

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

DANIEL SCHRÖTER

Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation



Universität Stuttgart



Fraunhofer
IPA

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 81

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Daniel Schröter

**Entwicklung einer Methodik zur Planung von
Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation**

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Opel Automobile GmbH, Rüsselsheim

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1332-0

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2018

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Daniel Schröter

aus Stuttgart

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Mitberichter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Kuhlang

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2017

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen
der Universität Stuttgart

2017

Vorwort

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Adam Opel AG entstanden. Herrn Prof. Dr. Alexander Verl, dem Leiter des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart, möchte ich meinen Dank für die Betreuung dieser Dissertationsschrift aussprechen. Herrn Prof. Dr. Peter Kuhlang, Leiter des MTM-Instituts in Zeuthen, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Auch bedanke ich mich ganz herzlich bei ihm und Herrn Dr. Finsterbusch für die hervorragende Zusammenarbeit bei der Entwicklung des Prozessbausteinsystems MTM-MRK.

Frau Dr. Petra Krammer, Leiterin der Abteilung Advanced Manufacturing Technology bei Opel, danke ich dafür, dass ich in einer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre unter netten Kollegen meine Arbeit anfertigen konnte. Ganz besonders danke ich Dr. Benjamin Kuhrke für die Unterstützung, die wertvollen Diskussionen und für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Vielen Dank an das Team des Tech-Centers um Peter Wolf. Ich hätte mir keine bessere Unterstützung für den Aufbau und den Betrieb von Versuchsständen wünschen können. Peter Antweiler danke ich für die umfassende Beratung und Ausbildung zu allen Themen der Arbeitssicherheit. Die Inbetriebnahme des ersten kollaborativen Roboters im Werk Kaiserslautern hat viel Kopfzerbrechen aber auch viel Spaß bereitet. Vielen Dank für die tolle Zusammenarbeit an Joachim Blochowicz, Ronny Fischer, Axel Schaaf, Benjamin Bäcker sowie Oliver Huber; und natürlich einen ganz besonderen Dank an Philipp Neupert, der mit mir in mehreren Spätschichten durch das ein oder andere Tal der Tränen schreiten musste.

Ganz herzlich danke ich meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht haben und meiner Frau, die ihn immer frei gehalten hat. Auch für das fleißige Korrekturlesen möchte ich mich ganz herzlich bedanken; erst so konnten zahlreiche Kommata einen angemessenen Platz finden.

Kurzfassung

Eine hybride Automatisierung mit einer direkten Kooperation von Mensch und Roboter bietet im Vergleich zu konventionellen Produktionslösungen Verbesserungspotential hinsichtlich Ergonomie, Flexibilität und Kosten. Obwohl technische Lösungen zur Umsetzung von hybriden Arbeitssystemen bestehen, wurden bisher nur wenige Applikationen in der industriellen Serienfertigung umgesetzt. Neben mangelnder praktischer Erfahrung mit dieser neuen Technologie ist ein wesentlicher Grund hierfür, dass in bestehenden Methoden der Montageplanung Mensch-Roboter-Kooperation nur unzureichend berücksichtigt wird.

Diese Arbeit stellt eine Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation vor. Basierend auf bestehenden Forschungsarbeiten wird ein Konzept zur fähigkeitsorientierten Zuordnung von Montagetätigkeiten entwickelt, das darüber hinaus die Identifikation von Montageschritten mit einer hohen Eignung für eine Kooperation von Mensch und Roboter ermöglicht. Die Umsetzung einer Applikation mit einer direkten Interaktion zwischen Mensch und Roboter erfordert spezielle Sicherheitskonzepte, die unmittelbare Auswirkungen auf die Produktivität des Arbeitssystems haben. Auf Basis aktueller Normen werden formelbasierte Zusammenhänge aufgestellt, um die maximal zulässige Geschwindigkeit von Roboterbewegungen und den Mindestabstand zu Gefahrenstellen zu berechnen. Weiterhin werden Prozessbausteine zur Beschreibung roboterbasierter Montagevorgänge definiert, die eine direkte Berechnung von Sollzeiten ermöglichen. In Kombination mit bestehenden Prozessbausteinsystemen zur Planung manueller Arbeitsvorgänge ist es möglich, Arbeitsabläufe von Mensch und Roboter in einer gemeinsamen Prozesssprache zu beschreiben und aufeinander abzustimmen. Abschließend wird die Methodik in ein softwarebasiertes Planungswerkzeug umgesetzt und anhand von zwei Anwendungsbeispielen aus der Automobilproduktion validiert.

Summary

In comparison to classic automated solutions, the direct cooperation of human workers and industrial robots offers new potential regarding flexibility, cost and ergonomics. However those advantages are mostly not obvious and only few applications using human-robot interaction are used in serial production as of the current state of the art. Reasons for this are a lack of knowledge about this new technology and its capabilities as well as a lack of planning tools supporting the design of hybrid work systems.

This work introduces a methodology for planning work systems using human-robot interaction. Based on existing research work a concept for a capability orientated task assignment between humans and robots is developed. Using capability indicators it is possible to generate work sequences and to identify assembly tasks with a high suitability for human-robot interaction. The implementation of an application with a direct interaction between a human and a robot requires dedicated safety concepts, which have a direct impact on the productivity of the work system. Taking into account safety aspects and its implications as early as possible in the planning phase, the developed methodology contains an approach to calculate the maximum speed of the robot as well as of minimum distances to a hazard point depending on the type of interaction. Furthermore process building blocks for robot based assembly operations are defined, enabling the calculation of accurate cycle times. In combination with existing process building block systems for describing manual work it becomes possible to plan human-robot work systems in a common modelling language. Finally, the methodology is implemented in a software-based planning tool and its application is validated on two use cases from the automobile industry to show its practical relevance.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Summary	v
Abkürzungsverzeichnis	xi
Formelverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	4
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	5
2 Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1 Begriffe und Definitionen.....	7
2.2 Mensch-Roboter-Kooperation	11
2.2.1 Schutzprinzipien für den kollaborativen Betrieb	16
2.2.2 Kollaborative Roboter	17
2.2.3 Industrielle Anwendung.....	20
2.3 Montageplanung.....	23
2.3.1 Allgemeine Methoden der Montageplanung	23
2.3.2 Zeitdatenermittlung in der Montageplanung	26
2.3.3 Planung manueller Arbeitssysteme	30
2.3.4 Planung roboterbasierter Arbeitssysteme	32
2.4 Analyse relevanter Forschungsansätze	34
2.5 Fazit	38

3	Anforderung an eine Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation	41
3.1	Definition der Anforderungen	41
3.2	Konzeption der Planungsmethodik	44
4	Ausarbeitung der Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation.....	49
4.1	Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben	49
4.1.1	Definition der Kriterien zur Fähigkeitsbeurteilung.....	49
4.1.2	Berechnung der Fähigkeitskennzahlen und Eignungsgrade.....	53
4.1.3	Identifizierung des Potentials für Mensch-Roboter-Kooperation ..	56
4.2	Schutzprinzipien für den kollaborativen Betrieb.....	59
4.2.1	Sicherheitsbewerteter überwachter Halt.....	60
4.2.2	Handführung.....	63
4.2.3	Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	64
4.2.4	Leistungs- und Kraftbegrenzung.....	66
4.3	Prozessbausteine zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation.....	71
4.3.1	Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit	73
4.3.2	Definition der Roboter-Prozessbausteine	75
4.3.3	Beschreibung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation.....	102
4.3.4	Validierung der Prozessbaustein-Genauigkeit.....	104
5	Praktische Umsetzung und Anwendung der Methodik	113
5.1	Entwicklung eines softwarebasierten Planungswerkzeugs	113

5.1.1	Bestimmung der Eignungsgrade von Mensch und Roboter	113
5.1.2	Auswahl des Schutzprinzips	114
5.1.3	Ablaufplanung der Arbeitsinhalte	115
5.2	Anwendung der Methodik	117
5.2.1	Anwendungsbeispiel Türmontage.....	117
5.2.2	Anwendungsbeispiel Kolbenmontage.....	126
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	131
	Abbildungsverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis.....	139
	Literaturverzeichnis.....	141

Abkürzungsverzeichnis

AQ	Arbeitsqualität
LBR	Leichtbauroboter
MEK	Einzel- und Kleinserienfertigung
MOST	Maynard Operation Sequence Technique
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
MTM	Methods Time Measurement
UAS	Universelles Analysiersystem
PQ	Prozessqualität
RRS	Realistische Robotersimulation
RTM	Robot Time and Motion
SvZ	System vorbestimmter Zeiten
TMU	Time Measurement Unit
WF	Work Factor

Formelverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
α_{bl}	Winkel zwischen zwei Geraden zum Überschleifen	rad
α_j	Winkelbeschleunigung der Achse j	rad/s ²
a_{gr}	Beschleunigung der Finger für einen Greifvorgang	mm/s
a_{tcp}	Beschleunigung des Tool Center Points	mm/s
a_{max}	Maximale Beschleunigung	mm/s ²
a_{rl}	Beschleunigung der Finger beim Loslassen	mm/s ²
$A_{i,k}$	Ausprägung k des Kriteriums i	
c_a	Koeffizient zur Berechnung der Beschleunigung	1/s
c_v	Koeffizient zur Berechnung der mittleren Winkeldifferenz	rad/mm
C	Eindringabstand im Falle einer Kollision	mm
d	Sensordetektionsvermögen	mm
d_{ik}	Kartesische Distanz der Punkte P_i und P_k	mm
d_l	Distanz zwischen zwei Punkten	mm
d_r	Distanz des Punkterasters	mm
d_{sl}	Distanz der Fügebewegung	mm
Θ_g	Reduziertes Massenträgheitsmoment	Kg m ²
$\Delta\bar{\varphi}$	Mittlere Winkeldifferenz der Roboterachsen	rad
$\Delta\varphi_{ik}$	Winkeldifferenz der Roboterachsen zwischen P_i und P_k	rad
Δt_m	Differenz der mittleren Bewegungszeit	s
e_B	Fehler der Berechnungsmethode	s
e_{HL}	Fehler des Prozessbausteins <i>Hinlangen</i>	s
e_M	Eignungsgrad des Menschen	
e_{MRK}	Eignungsgrad für Mensch-Roboter-Kooperation	
e_R	Eignungsgrad des Roboters	
e_{sim}	Fehler der 3D-Simulation	s
E	Energie	Nm
F_{AQ}	Fähigkeit bezüglich Arbeitsqualität	
F_K	Fähigkeit bezüglich Zusatzinvestment	
F_{max}	Maximal zulässige Kraft	N
F_{Mges}	Gesamtfähigkeit des Menschen	
F_{PQ}	Fähigkeit bezüglich Prozessqualität	

Symbol	Beschreibung	Einheit
F_{Rges}	Gesamtfähigkeit des Roboters	
F_Z	Fähigkeit bezüglich Taktzeit	
g_i	Gewichtung des Kriteriums i	
i	Zählvariable	
k	Zählvariable	
j	Zählvariable	
K_i	Kriterium Fähigkeitsbeurteilung	
K_a	Korrekturfaktor Beschleunigung aufgrund erhöhter Masse	
m_{RK}	Masse der Roboterkinematik	Kg
m_{TCP}	Masse am Endeffektor des Roboters	Kg
M_A	Antriebsmoment	Nm
$\mathbf{M}_{\Delta\varphi}$	Matrix der Winkeldifferenzen der Roboterachsen	rad
\mathbf{M}_d	Matrix der kartesischen Distanzen einer Punktmenge	mm
n	Dimension eines Vektors bzw. Az. der Elemente einer Menge	
O_i	Montageoperation	
φ_i	Winkelstellung	rad
p_{max}	Maximal zulässiger Druck	N/mm ²
\mathbf{P}_i	Bahnpunkt des Roboters	mm
r_{bl}	Überschleifradius	mm
s_{bl}	Wegstrecke für das Überschleifen von Bahnpunkten	mm
s_g	Gesamtwegstrecke	mm
s_{gr}	Wegstrecke der Fingerbewegung bei Greifvorgang	mm
s_{rl}	Wegstrecke der Fingerbewegung beim Loslassen	mm
S	Mindestabstand	mm
S_p	Schutzabstand	mm
S_h	Abstand aufgrund der Bewegung des Menschen	mm
S_R	Abstand aufgrund der Reaktionszeit des Roboters	mm
S_S	Abstand aufgrund der Nachlaufzeit des Roboters	mm
t_0	Startzeitpunkt	s
t_a	Zeitanteil konstanter Beschleunigung	s
t_b	Zeitanteil konstanter Verzögerung	s
t_{bl}	Zeit zum Überschleifen von Bahnpunkten	s
t_c	Zeitanteil Kommunikation	s
t_{ds}	Durchführungszeit	s

Symbol	Beschreibung	Einheit
t_g	Gesamtzeit	s
\bar{t}_g	Mittelwert der Gesamtzeiten	s
$t_{g,achs}$	Gesamtzeit einer achsspezifischen Bewegung	s
$t_{g,Hl}$	Gesamtzeit des Prozessbausteins Hinlangen	s
$t_{g,j}$	Gesamtzeit der Bewegung der Roboterachse j	s
$t_{g,lin}$	Gesamtzeit einer linearen Bewegung	s
$t_{g,real}$	Gesamtzeit der real gemessenen Bewegung	s
$t_{g,Sim}$	Gesamtzeit der Simulation	s
t_{gr}	Zeit für Greifbewegung	s
t_{hS}	Hauptdurchführungszeit	s
t_{nS}	Nebendurchführungszeit	s
t_p	Zeit für Fügebewegung	s
t_v	Zeitanteil konstanter Geschwindigkeit	s
t_{rl}	Zeit für Loslassen	s
t_s	Ausschwingzeit	s
t_{sl}	Zeitanteil Fügetiefe	s
t_{sp}	Zeitanteil Suchfahrt	s
t_t	Totzeit	s
T	Nachlaufzeit	s
T_r	Reaktionszeit des Roboters	s
T_s	Zeit zum Stopp des Systems	s
v_g	Grenzgeschwindigkeit zur Berechnung d. Beschleunigung	mm/s
v_{gr}	Geschwindigkeit des Greifers	mm/s
v_{tcp}	Geschwindigkeit des Tool Center Points	mm/s
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zweier Objekte	mm/s
v_s	Geschwindigkeit des Roboters während des Anhaltens	mm/s
v_{rl}	Geschwindigkeit des Loslassens	mm/s
\mathbf{v}_j	Geschwindigkeitsvektor der Roboterachsen	rad/s
ω_j	Winkelgeschwindigkeit der Achse j	rad/s
Z_d	Positionsungenauigkeit des Menschen	mm
Z_r	Positionsungenauigkeit des Roboters	mm

1 Einleitung

Die demographische Entwicklung in Deutschland zeigt, dass die Arbeitswelt vor einem umfassenden Wandel steht (Richter et al. 2012). Eine steigende Lebenserwartung und rückläufige Geburtenraten führen zu einer Änderung der Altersstruktur der Bevölkerung mit einem höheren Anteil an älteren Menschen, wie die Prognose des statistischen Bundesamts in Abbildung 1.1 zeigt. Während der Anteil der Personen im erwerbsfähigen Alter an der Gesamtbevölkerung abnehmen wird, wird der Anteil der Rentner steigen. Im Jahr 2013 kamen 3,05 Erwerbstätige auf einen Rentner, im Jahr 2060 werden es nur noch 1,54 Erwerbstätige je Rentner sein (Destatis 2015).

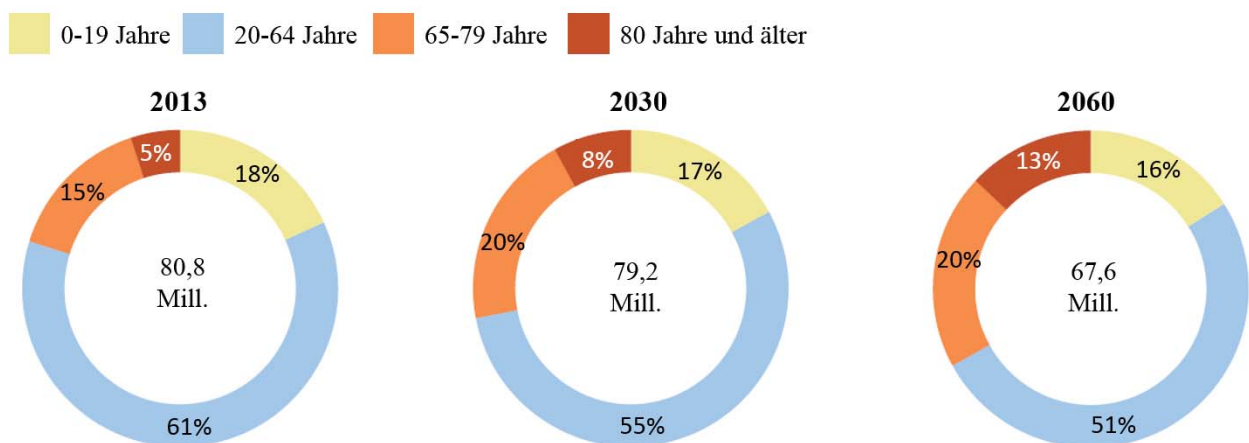


Abbildung 1.1: Bevölkerung nach Altersgruppen in Deutschland (Destatis 2015)

Diese Entwicklung hat massive Auswirkungen auf die Arbeitswelt und stellt produzierende Unternehmen in Deutschland vor große Herausforderungen. Zum einen besteht die Notwendigkeit die Produktivität zu erhöhen, da immer weniger Erwerbstätige eine größer werdende Anzahl von Nicht-Erwerbstätigen versorgen müssen. Zum anderen wird das Renteneintrittsalter weiter steigen, sollen die Sozialsysteme nicht über Gebühr belastet werden (Spillner 2015). Besonders Unternehmen in der industriellen Produktion mit einem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten und physisch belastenden Arbeitsabläufen sind hiervon betroffen (Lipaczewski et al. 2012). Um weiterhin ergonomische und effiziente Produktionsabläufe zu gewährleisten, sind

technische Unterstützungssysteme notwendig, mit denen die Produktivität erhalten bzw. gesteigert werden kann und mit denen die Beschäftigten bis zum Erreichen der Altersgrenze effizient im Unternehmen eingebunden werden können (Weidner 2015).

Neben den Folgen des demographischen Wandels stehen Industriebetriebe in Deutschland weiterhin vor der Herausforderung, auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig produzieren zu müssen. Gerade im Bereich der Montage besteht infolge der Globalisierung ein enormer Kostendruck durch Länder mit niedrigeren Lohnkosten (Blume 2014). Eine Möglichkeit dieser Herausforderung zu begegnen ist die Erhöhung des Automatisierungsgrades. Der Preis hierfür ist allerdings ein erhöhter Kapitaleinsatz und eine verringerte Flexibilität (Landau 2013). Letzteres ist vor allem vor dem Hintergrund kürzerer Produktlebenszyklen und steigender Variantenvielfalt problematisch, da gerade diese Entwicklungen eine erhöhte Flexibilität erfordern (Rudolf 2007).

Als Lösung werden hier vor allem Industrieroboter gesehen, die als flexible Produktionsmittel seit 1961 in der Produktion eingesetzt werden (Christaller 2001). Insbesondere in der Automobilindustrie werden Roboter im Karosserierohbau in großem Umfang eingesetzt (Gevatter 2006). In anderen Bereichen der Automobilproduktion, wie beispielsweise in der Fertig- und Endmontage, ist der Automatisierungsgrad mit weniger als 5 % hingegen sehr gering (Röscher 2007). Zum einen ist dies in der Komplexität der Montageaufgaben begründet. Zum anderen hat der Mensch mit seinen kognitiven und sensomotorischen Fähigkeiten hinsichtlich Flexibilität und Sensitivität wesentliche Vorteile gegenüber Robotern. Im Gegensatz dazu bieten Roboter Vorteile bei der Ausführung kraftintensiver und stark repetitiver Aufgaben mit erhöhten Qualitätsanforderungen (Giuliani et al. 2010). Die optimale Nutzung der spezifischen Fähigkeiten von Mensch und Roboter ist unter Anwendung konventioneller Sicherheitskonzepte nicht möglich. Diese basieren im Wesentlichen auf der strikten räumlichen Trennung des Arbeitsraums von Mensch und Roboter und verhindern so eine direkte Kooperation.

Durch die Anwendung neuer Sicherheitskonzepte ist es möglich, die räumliche Trennung zwischen Mensch und Roboter aufzuheben und die Fähigkeiten der beiden Interaktionspartner optimal zu nutzen (Krüger et al. 2009). Mit der intelligenten Verwendung berührungslos wirkender Schutzvorrichtungen bzw. technischen Schutzmaßnahmen zur Kraft- und Leistungsbegrenzung können kollaborierende Roboter ohne Schutzzaun direkt mit dem Menschen zusammen arbeiten. Dabei ist es möglich, durch den gezielten Einsatz von Robotern, den Menschen von schweren und ergonomisch ungünstigen Aufgaben zu entlasten und gleichzeitig die Prozessqualität zu erhöhen (Oberer-Treitz et al. 2013). Als Zwischenstufe zwischen manueller Fertigung und Vollautomatisierung ist es mit der Kooperation von Mensch und Roboter möglich, Flexibilität zu erhalten und Investitionskosten zu senken (s. Abbildung 1.2).

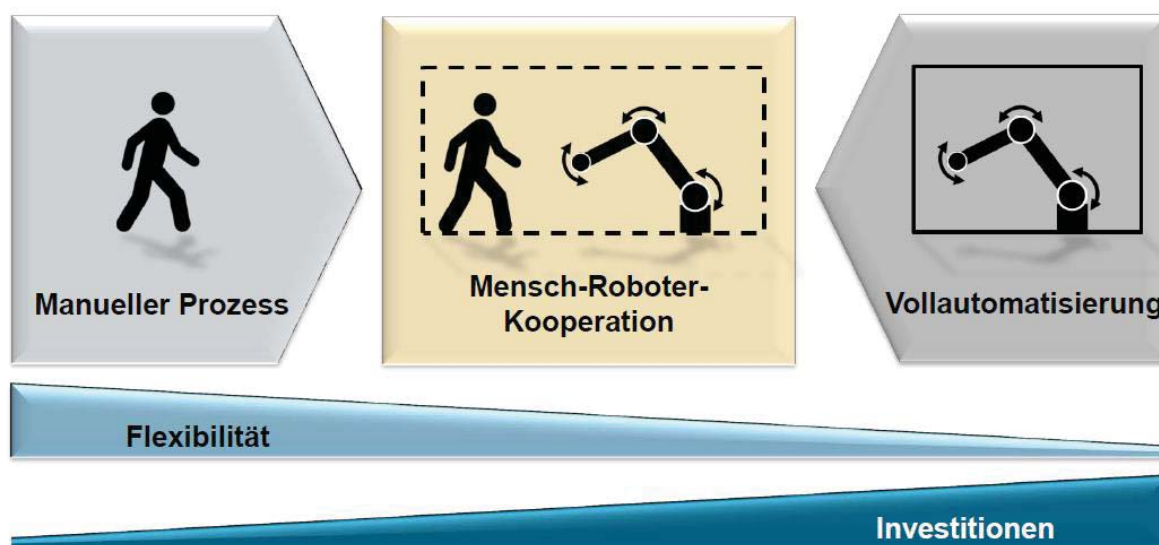


Abbildung 1.2: Mensch-Roboter-Kooperation als Zwischenstufe von manueller Arbeit und Vollautomatisierung (Neubauer et al. 2015)

Im Rahmen der McKinsey Studie „Industrie 4.0“ wurde Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) als eine der Schlüsseltechnologien für den Arbeitssektor identifiziert (McKinsey 2015). Abhängig von der zu produzierenden Stückzahl können mit der intelligenten Nutzung von MRK Stückkosten im Vergleich zu konventionellen

Lösungen gesenkt werden (Helms et al. 2002). Darüber hinaus bietet eine Kooperation von Mensch und Roboter Verbesserungspotential hinsichtlich Prozessqualität und Ergonomie, da die Mitarbeiter gezielt bei qualitätskritischen und ergonomisch belastenden Tätigkeiten unterstützen werden können (Drust et al. 2013). Insbesondere bei der Gestaltung altersgerechter Arbeitsplätze bietet sich mit MRK die Möglichkeit, die Beschäftigten bis zum Erreichen der Altersgrenze effizient im Unternehmen einzubinden und gleichzeitig dem steigenden Wettbewerbsdruck zu begegnen.

1.1 Problemstellung

Industrieroboter, die für eine Kooperation zwischen Mensch und Roboter ausgelegt sind und entsprechende technische Schutzmaßnahmen mit sich bringen, sind mittlerweile serienmäßig verfügbar. Trotzdem wurden bisher nur wenige Applikationen in die Praxis umgesetzt, die sich die Vorteile dieser Technologie zu Nutzen machen (Bauer et al. 2016). Zum einen bestehen nur wenige Erfahrungswerte hinsichtlich der Umsetzung kollaborativer Applikationen. Zum anderen ist die Planung von MRK-Arbeitssystemen vielschichtig und komplex, da besondere Anforderungen an die Arbeitssicherheit gestellt werden. Eine direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter erfordert spezielle Sicherheitskonzepte, die für eine erfolgreiche Implementierung unerlässlich sind. Um Sicherheitskonzepte und deren Auswirkungen bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, ist es notwendig diese so früh wie möglich zu adressieren. Darüber hinaus müssen die Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter in sinnvoller Weise aufgeteilt und aufeinander abgestimmt werden. Die unterschiedlichen Fähigkeiten von Mensch und Roboter spiegeln sich direkt in der Prozess- und Arbeitsqualität wider. Weiterhin bestehen Unterschiede in der Durchführungszeit, die sich unmittelbar auf die Kosten des Arbeitssystems auswirken. Allerdings ist die Bestimmung der Durchführungszeit insbesondere für den Roboter sehr aufwendig, da entweder 3D-Simulationen erstellt oder praktische Versuche durchgeführt werden müssen. Im Rahmen der frühen Phase der Montageplanung ist der Erstellungsaufwand

hierzu zu hoch, so dass es nicht möglich ist, verschiedene Lösungsvarianten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll zu vergleichen (Zwicker et al. 2016).

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik, die den Anwender in der Planung sicherer und effizienter Montagearbeitsplätze für eine direkte Kooperation zwischen Mensch und Roboter unterstützt. Die Arbeitsinhalte müssen in einer effizienten Art und Weise zwischen den Interaktionspartnern aufgeteilt werden. Dazu ist es notwendig, subjektive Einflussfaktoren zu minimieren und den Entscheidungsprozess auf Basis objektiver Beurteilungskriterien durchzuführen. Aufbauend auf bestehenden Forschungsarbeiten wird dazu das Konzept der fähigkeitsorientierten Ablaufplanung weiter entwickelt. Neben der Aufteilung der Arbeitsinhalte wird ein Konzept entwickelt, um in einer Sequenz von Montageoperationen diejenigen zu identifizieren, die eine hohe Eignung für MRK aufweisen.

Für die Planung von MRK-Arbeitssystemen ist es von elementarer Bedeutung, dass die zur Umsetzung notwendigen Sicherheitskonzepte bereits früh in der Planungsphase berücksichtigt werden. Das Sicherheitskonzept beeinflusst maßgeblich die Umsetzbarkeit und Produktivität des Arbeitssystems. Basierend auf den aktuell gültigen Normen und Gestaltungsrichtlinien werden formelbasierte Zusammenhänge aufgestellt, die als Grundlage für den weiteren Planungsprozess dienen. Weiterhin ist es das Ziel, die Arbeitsschritte von Mensch und Roboter in einer gemeinsamen Prozesssprache zu beschreiben und exakte Durchführungszeiten sowohl für den Menschen als auch für den Roboter zu berechnen. Vor diesem Hintergrund wird ein Prozessbausteinsystem zur Planung und Analyse roboterbasierter Bewegungen entwickelt. In Kombination mit bestehenden Prozessbausteinsystemen zur Analyse manueller Arbeitsvorgänge ist es möglich, Arbeitsabläufe von Mensch und Roboter zu planen, aufeinander abzustimmen und exakte Taktzeitinformationen zu generieren. Die entwickelte Methodik

wird in einem software-gestützten Planungswerkzeug umgesetzt und für die Planung von zwei Beispielapplikationen angewendet. Zusammenfassend ist der Aufbau der Arbeit in Abbildung 1.3 dargestellt.

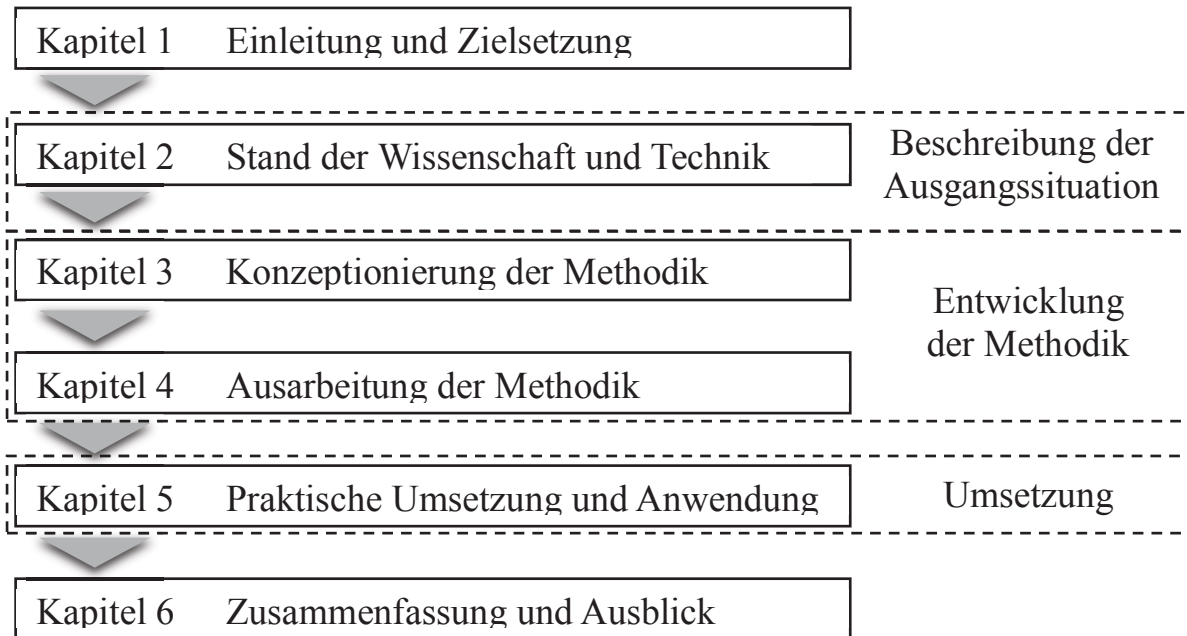


Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Bei der Automatisierung mit Industrierobotern arbeiten Mensch und Roboter aus Sicherheitsgründen normalerweise durch einen Schutzzaun voneinander getrennt. Diese strikte Trennung wird für ein Arbeitssystem in MRK aufgehoben. Nachfolgend wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung bezüglich dieser neuen Technologie beschrieben. Neben der Definition zentraler Begriffe und grundlegender Zusammenhänge zum Thema Montageplanung werden in diesem Kapitel die verwendeten Begriffe bezüglich Mensch-Roboter-Kooperation definiert. Weiterhin werden bestehende Arbeiten zum Thema Montageplanung für manuelle, roboterbasierte und hybride Arbeitssysteme vorgestellt.

2.1 Begriffe und Definitionen

Automatisierung ist ein Prozess, in dessen Verlauf fortschreitend menschliche Tätigkeiten durch Funktionen künstlicher Systeme (Automaten) ersetzt werden mit dem Ziel Produktivitätssteigerungen, Qualitätsverbesserungen und Kostensenkungen zu erzielen (Hesse 2000).

Der **Automatisierungsgrad** ist der Quotient aus der Menge der zum jeweiligen Prozess automatisierten Funktionen zur Menge sämtlicher Funktionen (Hesse 2000).

Eine **Arbeitsmethode** stellt die Beschreibung und Vorgabe der Art und Weise des Ausführens von Aufgaben in einem Arbeitssystem dar (REFA 1993).

Ein **Arbeitssystem** ist ein materiell-technisches System, in dem Arbeitskräfte unter Einsatz von Arbeitsmitteln und Energie auf einen Arbeitsgegenstand einwirken, um eine gewollte Änderung des Zustandes in der Produktionsstufe zu erreichen (Helbing et al. 2010). Das Arbeitssystem wird durch die folgenden Elemente beschrieben und ist in Abbildung 2.1 dargestellt (Schlick et al. 2010):

2.1 Begriffe und Definitionen

- Arbeitspersonen(en)
- Arbeitsauftrag
- Arbeitsaufgabe
- Eingabe/Ausgabe
- Arbeitsmittel
- Arbeitsobjekte
- Umwelteinflüsse

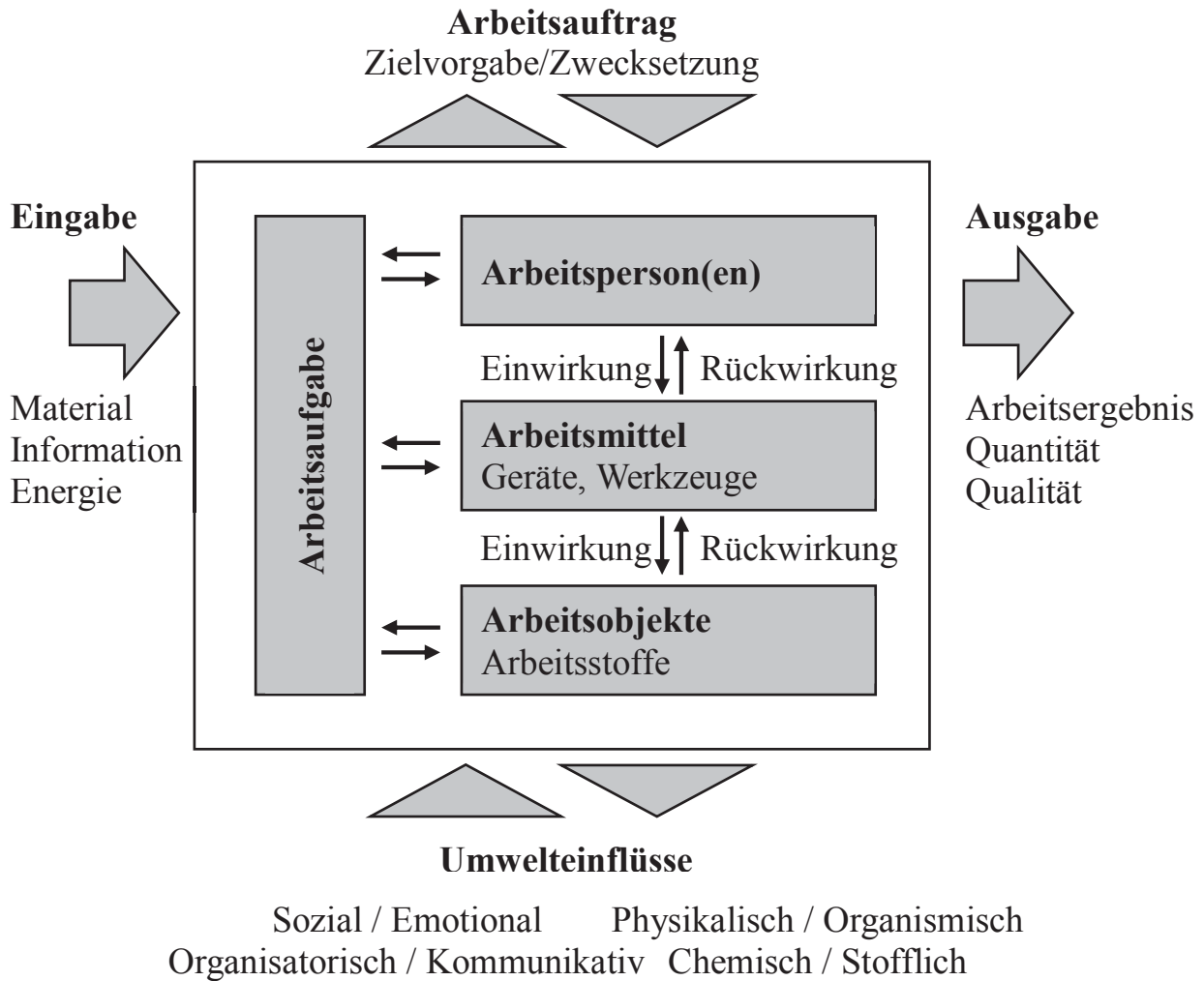


Abbildung 2.1: Arbeitssystem (Schlick et al. 2010)

Die **Durchführungszeit** ist die Zeit, welche zur Durchführung eines Auftrags innerhalb eines definierten Arbeitssystems erforderlich ist. Die Durchführungszeit t_{dS} setzt sich gemäß Gleichung (2.1) aus der Hauptdurchführungszeit t_{hS} und der Nebendurchführungszeit t_{nS} zusammen. Die Hauptdurchführungszeit umfasst die planmäßige, unmittelbar zur Erfüllung der Aufgabe aufzubringende Zeit. Die Nebendurchführungszeit dient im Gegensatz dazu nur mittelbar der Aufgabenerfüllung (REFA 1993).

$$t_{ds} = t_{hs} + t_{ns} \quad (2.1)$$

Die **Durchlaufzeit** umfasst die Soll-Zeiten für die Erfüllung eines Arbeitsvorgangs bzw. Auftrages in einem bestimmten Arbeitssystem (REFA 1993). In Abbildung 2.2 sind die verschiedenen Zeiteile der Durchlaufzeit dargestellt.

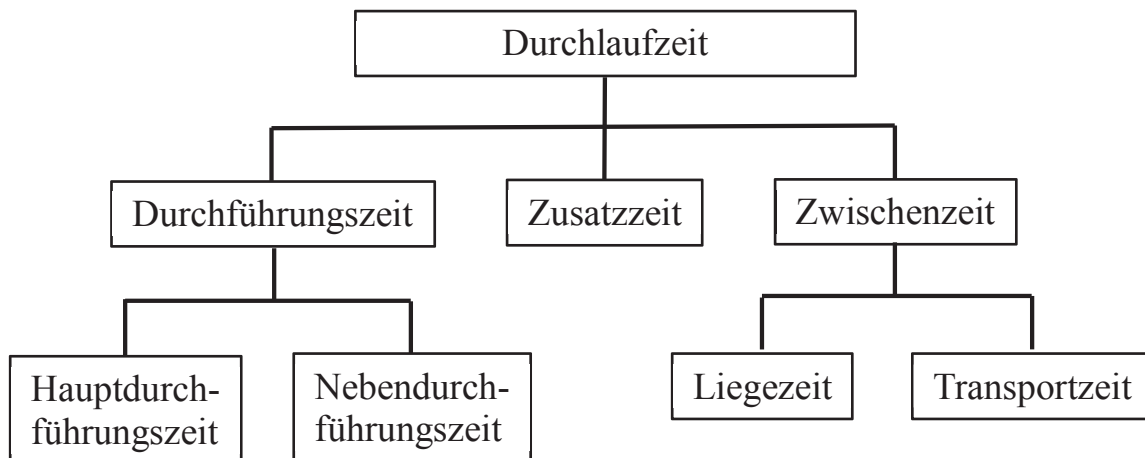


Abbildung 2.2: Zusammensetzung der Durchlaufzeit (REFA 1993)

Mensch-Roboter-Kooperation bezeichnet eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. In diesem Zusammenhang wird der Begriff „**Kollaborierender Betrieb**“ in der Norm für Industrieroboter DIN EN ISO 10218-1 folgendermaßen definiert:

„Zustand, in dem hierfür konstruierte Roboter innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten“ (DIN EN ISO 10218-1: 2012).

Der Begriff **Montage** beschreibt gemäß VDI-Richtlinie 2860 die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Dazu zählen Vorgänge des Fügens (DIN 8593), Funktionen der Werkstückhandhabung (VDI 2860: 1990), Tätigkeiten des Justierens sowie des Kontrollierens (Lotter 2012).

Es wird zwischen vollautomatisierten, manuellen und hybriden Montagesystemen unterschieden. **Hybride Montagesysteme** stellen eine Kombination aus

2.1 Begriffe und Definitionen

automatisierter und manueller Montage dar, bei der eine Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter vorliegt (Jonas 2000).

In der **Montageplanung** werden Montageanlagen und Montageabläufe entworfen, mit denen der Zusammenbau von Teilen oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen möglich ist (VDI 2870: 2012).

Die **Montageablaufstruktur** gibt die zeitliche und logische Aufeinanderfolge der zur Montage eines Produktes erforderlichen Montageprozesse wieder und enthält die wesentlichen technologischen und produktbedingten Vorrangbeziehungen (Bullinger et al. 1986). Zur Darstellung der Montageablaufstruktur werden **Vorranggraphen** oder **Vorrangmatrizen** verwendet (Bick 1992). Der Vorranggraph ist eine netzplanähnliche Darstellung der bestehenden Vorrangsbeziehungen und ist beispielhaft für die Montageoperationen $O_1 - O_{15}$ in Abbildung 2.3 abgebildet. Ein Zweig von Montageoperationen muss jeweils sequentiell abgearbeitet werden und die nachgelagerte Montageoperation kann erst durchgeführt werden, sofern alle vorherigen Montageoperationen erledigt sind.

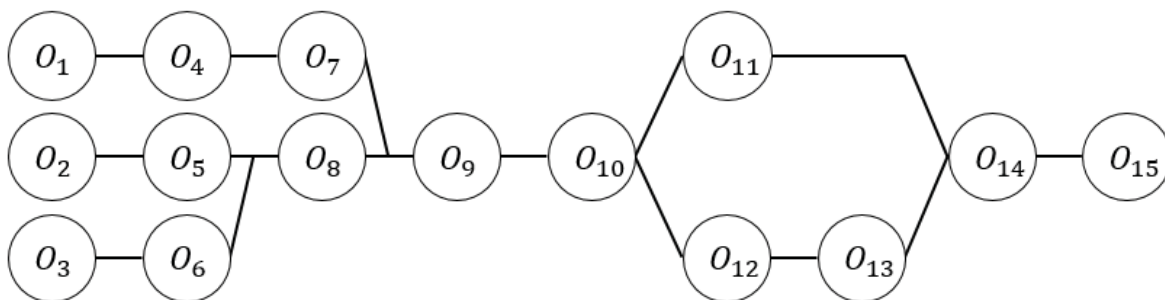


Abbildung 2.3: Vorranggraph (Prenting et al. 1964)

Bei der Darstellung der Vorrangbeziehung in einer Vorrangmatrix werden die Montageprozesse in der Kopfzeile und Kopfspalte aufgelistet. Jede Montageoperation O_i wird mit jeder Montageoperation O_k verglichen. Das entsprechende Matrixelement enthält bei bestehendem Vorrang des Montageprozesses O_i vor O_k eine 1 und bei

beliebiger Reihenfolge eine 0. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2.4 dargestellt. Aufgrund der wenigen Präzedenzbeziehungen sind die von 0 verschiedenen Elemente klein gegenüber der Anzahl aller Elemente. Insbesondere bei einer rechnergestützten Montageplanung stellt die Vorrangmatrix eine einfache Möglichkeit zur Dokumentation des Montagevorrangs dar.

$O_i \backslash O_k$	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}
O_1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	
O_2	0	0	0	0	1	0	0			
O_3	0	0	0	0						
O_4	0									
O_5	0									

$E_{i,k} = 0$: Reihenfolge von O_i und O_k beliebig
 $E_{i,k} = 1$: O_i muss O_k vorausgehen

Abbildung 2.4: Vorrangmatrix nach (Prenting et al. 1964)

2.2 Mensch-Roboter-Kooperation

Die strikte Trennung zwischen manuellen und automatisierten Arbeitsplätzen wird für ein Arbeitssystem in MRK aufgehoben und es entsteht ein gemeinsamer Arbeitsraum, in dem Mensch und Roboter zusammen arbeiten, wie in Abbildung 2.5 dargestellt. Das zu bearbeitende Produkt befindet sich im gemeinsamen Arbeitsraum und beide Interaktionspartner haben Zugriff auf das Produkt (Thiemermann 2005). Mit der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter und der Aufhebung der strikten Trennung ergeben sich neue Möglichkeiten in der Gestaltung von Arbeitssystemen.

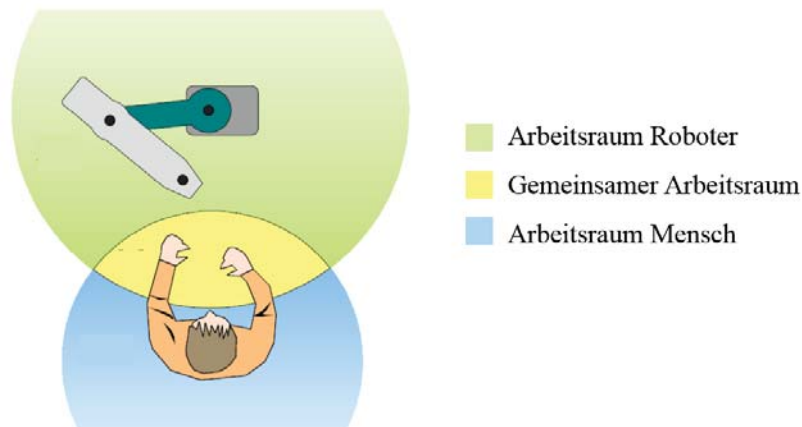


Abbildung 2.5: Arbeitsbereiche von Mensch und Roboter in Mensch-Roboter-Kooperation (Thiemermann et al. 2001)

Die Interaktion zwischen Mensch und Roboter kann hinsichtlich einer zeitlichen und räumlichen Trennung unterschieden werden (Thiemermann 2005). In Abbildung 2.6 sind vier verschiedene Interaktionsszenarien dargestellt. Im Falle der Koexistenz arbeiten Mensch und Roboter sowohl räumlich als auch zeitlich getrennt, aber ohne trennende Schutzeinrichtung. Diese Art der Arbeit stellt eine Vorstufe der weiteren Interaktionsszenarien dar, für die im Wesentlichen dieselben Sicherheitsanforderungen erfüllt sein müssen. Kommt es zu einer vorhersehbaren Fehlanwendung und der Mensch betritt den Arbeitsraum des Roboters, muss die Arbeitssicherheit weiterhin gewährleistet sein und es müssen geeignete technische Schutzmaßnahmen vorgesehen werden.

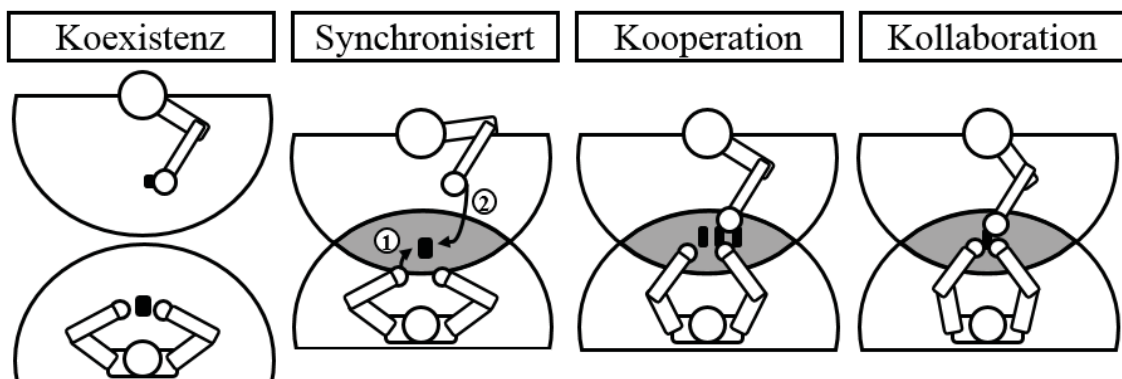


Abbildung 2.6: Klassifikation der Interaktionsszenarien (Bauer et al. 2016)

Für einen synchronisierten Arbeitsablauf teilen sich Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsraum. Die Arbeit ist aber weiterhin zeitlich getrennt. Während der Mensch seine Arbeitsaufgabe erledigt, befindet sich der Roboter außerhalb des gemeinsamen Arbeitsraums und umgekehrt (Bauer et al. 2016). Bei einem kooperierenden Betrieb teilen sich Mensch und Roboter den Arbeitsraum und können gleichzeitig Aufgaben ausführen, arbeiten aber nicht am selben Produkt oder Bauteil. Für das Interaktionsszenario der Kollaboration wird auch diese Beschränkung aufgehoben und Mensch und Roboter arbeiten zeitgleich am selben Produkt oder Bauteil. Im Folgenden wird allgemein der Begriff Mensch-Roboter-Kooperation verwendet, ohne dass hierbei ein spezifisches Interaktionsszenario zu Grunde gelegt wird.

Mensch und Roboter besitzen unterschiedliche Fähigkeiten, die in einer Kooperation optimal genutzt werden können. Eine erste Auflistung dieser unterschiedlichen Fähigkeiten wurde 1951 mit der Fitts Liste erstellt (Fitts 1951). Im Laufe der Jahre wurde diese Liste an die Entwicklungen der Robotertechnik angepasst (Nof 1999) und wurde in der Arbeit Thiernermanns (Thiernermann et al. 2002) speziell vor dem Hintergrund einer Kooperation von Mensch und Roboter in der Montage aufgestellt. Die daraus resultierenden Vor- und Nachteile sind auszugsweise in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Der Mensch zeichnet sich besonders durch ein hohes Maß an kognitiven und sensorischen Fähigkeiten und daraus resultierend durch einen hohen Grad an Flexibilität aus. Für den Menschen ist es beispielsweise problemlos möglich, sich innerhalb kürzester Zeit auf einen geänderten Arbeitsablauf oder eine Änderung der Teile einzustellen. Im Gegensatz dazu müsste der Roboter für eine entsprechende Änderung erst umprogrammiert und zum Greifen geänderter Teile müsste unter Umständen eine mechanische Anpassung des Greifers vorgenommen werden.

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile von Mensch und Roboter in der Montage nach
(Thiemermann et al. 2002)

Mensch	Roboter
Nachteile	Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> a. Unzuverlässige Prozesskontrolle b. Ergonomische Einschränkungen c. Genaues Positionieren nur über Vorrichtungen oder Anschläge d. Verlangt nach anspruchsvollen Aufgaben 	<ul style="list-style-type: none"> a. Integrierte Prozesskontrolle b. Handhabung schwerer Bauteile c. Exaktes Abfahren definierter Bahnpunkte d. Zuverlässige Durchführung monotoner Tätigkeiten
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> e. Hohe Verfügbarkeit f. Handhabung komplexer Bauteile möglich g. Zuverlässige Durchführung komplexer Fügevorgänge h. Unkomplizierte Teilebereitstellung möglich i. Aufgabenflexibel 	<ul style="list-style-type: none"> e. Störungen möglich f. Handhabung durch Bauteileigenschaften eingeschränkt g. Toleranzbehaftetes Fügen nur mit zusätzlicher Sensorik möglich h. Definierte Teilebereitstellung notwendig i. Starre Abarbeitung von Aufgaben

Eine Entnahme von Teilen aus einer Kiste mit vermischt liegenden Gegenständen stellt für den Menschen kein Problem dar. Für den Roboter hingegen ist dies nach aktuellem Stand der Technik nur mit aufwendiger Zusatz-Sensorik möglich, wodurch sich höhere Investitionskosten ergeben. In anderen Bereichen, wenn es z. B. um die Handhabung schwerer Bauteile oder um die Durchführung monotoner Tätigkeiten mit gleichbleibend hoher Qualität geht, weist der Roboter wesentliche Vorteile gegenüber dem Menschen auf (Giuliani et al. 2010). Mithilfe von MRK können die besonderen Fähigkeiten von Mensch und Roboter gezielt ergänzt werden. So kann der Roboter beispielsweise den Menschen unterstützen und von ergonomisch ungünstigen Arbeitshaltungen und Aufgaben entlasten. Gleichzeitig bleibt eine hohe Flexibilität erhalten, da der Mensch in die Produktion eingebunden ist und das Arbeitssystem flexibel auf sich ändernde Produktionsbedingungen reagieren kann (Krüger et al. 2009).

Mit MRK als Zwischenstufe von manueller Montage und Vollautomatisierung ergibt sich weiterhin die Möglichkeit, die Stückkosten zu senken, wie in Abbildung 2.7 dargestellt. Für eine manuelle Montage ergeben sich unabhängig vom Produktionsvolumen konstante Stückkosten. Im Gegensatz dazu bieten teil- und vollautomatisierte Lösungen Potential für Kostensenkungen für höhere Produktionsvolumina. Insbesondere in einem Bereich, in dem eine Produktion unter Verwendung einer vollautomatisierten Lösung wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, besteht mit MRK Potential zur Kostensenkung. Tätigkeiten, die verhältnismäßig einfach zu automatisieren sind, können vom Roboter durchgeführt werden, während der Mensch komplexe und schwierig zu automatisierende Aufgaben übernimmt. Im Vergleich zu vollautomatisierten Lösungen können so die Investitionskosten gesenkt werden (Krüger et al. 2009).

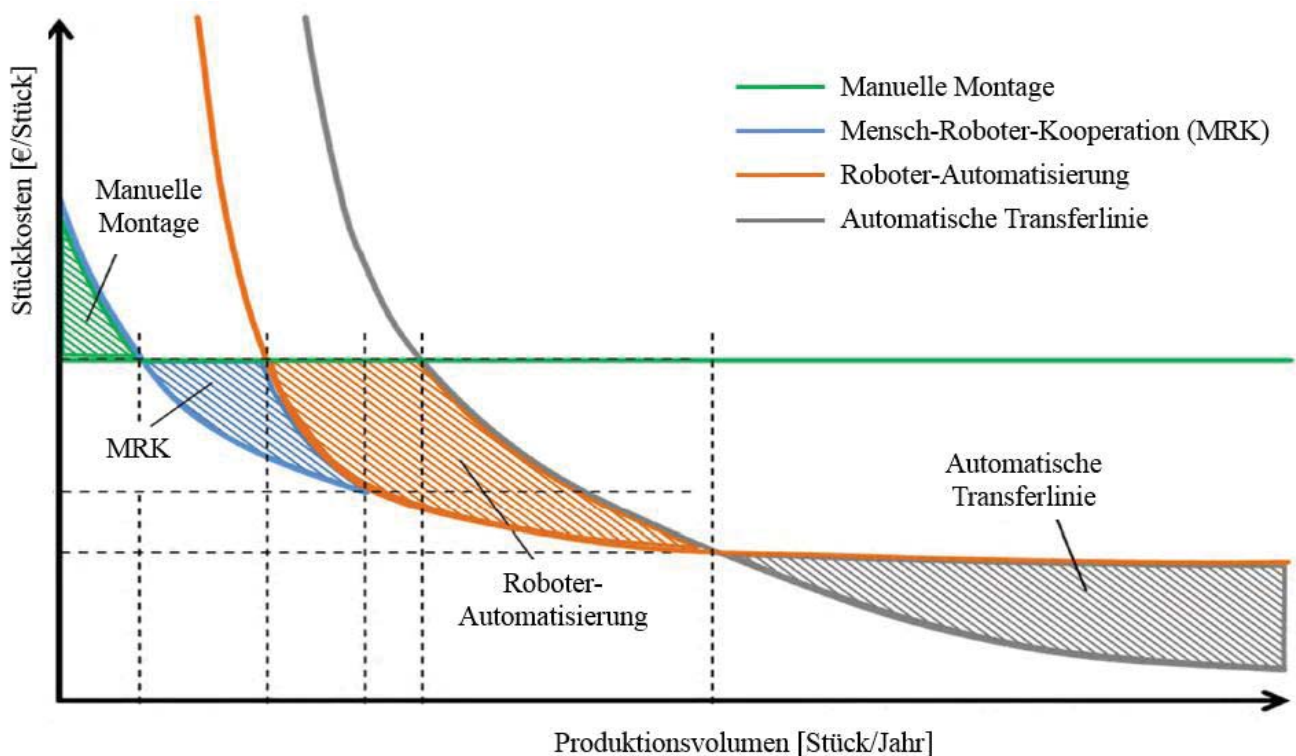


Abbildung 2.7: Stückkosten in Abhängigkeit des Produktionsvolumens (Helms et al. 2002)

2.2.1 Schutzprinzipien für den kollaborativen Betrieb

Die Sicherheit des Menschen muss bei einer Kooperation mit dem Roboter zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Da die Arbeitsräume von Mensch und Roboter nicht mehr durch einen Schutzzaun voneinander getrennt sind, müssen geeignete technische Schutzmaßnahmen getroffen werden. In der Norm für Industrieroboter DIN EN ISO 10218-1 werden für den kollaborativen Betrieb vier Schutzprinzipien unterschieden. Diese sind in Tabelle 2.2 mit den entsprechenden Anforderungen aufgelistet.

Tabelle 2.2: Schutzprinzipien und Anforderungen für den kollaborativen Betrieb nach (DIN EN ISO 10218-1: 2012)

Schutzprinzip	Anforderungen
Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	Der Roboter hält an, wenn der Mitarbeiter den gemeinsamen Arbeitsraum betritt
Handführung	Die Roboterbewegung wird vom Mitarbeiter mit einer sicherheitsbewerteten überwachten Geschwindigkeit gesteuert
Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	Ein Kontakt zwischen Mitarbeiter und Roboter wird verhindert
Leistungs- und Kraftbegrenzung	Die Kontaktkräfte zwischen Mitarbeiter und Roboter werden technisch auf ein ungefährliches Maß begrenzt

Die Schutzprinzipien des sicherheitsbewerteten überwachten Halts, der Handführung und der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung können unter Verwendung zusätzlicher Sensorik, wie beispielsweise Lichtvorhängen oder sensitiven Bodenmatten, auch mit konventionellen Industrierobotern umgesetzt werden. Im Gegensatz dazu sind für Applikationen unter Verwendung des Schutzprinzips der Leistungs- und Kraftbegrenzung speziell dafür ausgelegte kollaborative Roboter notwendig. Dazu zählen beispielsweise Leichtbauroboter mit integrierter Sensorik, die eine Kollision

zuverlässig detektieren und die Kontaktkräfte und Drücke im Falle einer Kollision auf ein ungefährliches Maß begrenzen.

Für die Umsetzung einer kollaborativen Anwendung kann es auch notwendig sein, verschiedene Schutzprinzipien miteinander zu kombinieren. Beispielsweise kann ein Roboter, der über eine Abschaltvorrichtung zur Leistungs- und Kraftbegrenzung verfügt, zusätzlich über eine Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung abgesichert werden.

2.2.2 Kollaborative Roboter

Roboter, die für den kollaborativen Betrieb ausgelegt sind, verfügen über Abschaltvorrichtungen, die die Sicherheit des Menschen gewährleisten und einen schutzzaunlosen Betrieb ermöglichen. Zur Umsetzung der Anforderungen der Schutzprinzipien gemäß Tabelle 2.2 können zwei wesentliche Kategorien von Abschaltvorrichtungen unterschieden werden. Abschaltvorrichtungen nach dem Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung reagieren im Falle einer Kollision und stoppen die Bewegung des Roboters, nachdem es zu einer Kollision gekommen ist. Im Gegensatz dazu wird durch eine Abschaltvorrichtung zur Abstandsüberwachung die Bewegung des Roboters gestoppt, bevor es zu einer Kollision kommt. Dadurch kann eine Kollision entweder vollständig vermieden werden oder bereits vor dem ersten Kontakt so viel Bewegungsenergie abgebaut werden, dass die Kontaktkräfte und Drücke im Falle einer Kollision wesentlich reduziert werden.

Kollaborative Roboter nach dem Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung verfügen über Sensoren, die eine Kollision erkennen und mit einer Sicherheitsabschaltung die Kollisionskräfte und Drücke auf ein ungefährliches Maß begrenzen. In Abbildung 2.8 ist der Aufbau eines Roboter gelenks mit integriertem Drehmomentensensor gezeigt. Sobald der Sensor eines Gelenks ein unzulässig hohes Drehmoment registriert, wird die Bewegung des Roboters gestoppt. Zusätzlich kann über die

Drehmomentsensoren mithilfe einer Impedanzregelung eine Nachgiebigkeit dargestellt werden. Der Roboter kann hierdurch von Hand geführt werden und kraftsensitive Montagetätigkeiten durchführen.

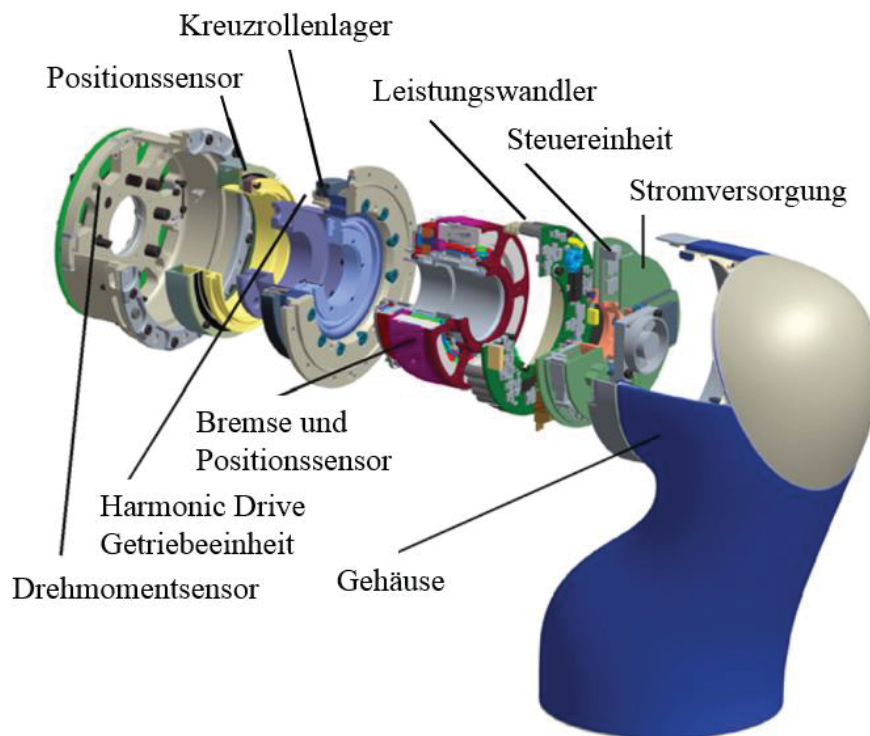


Abbildung 2.8: Aufbau eines Roboterjoints eines kollaborativen Leichtbau-roboters mit Drehmomentsensor (Albu-Schäffer et al. 2007)

Alternativ zum Einsatz von Drehmomentsensoren in den einzelnen Achsen kann eine Abschaltung auch über einen einzelnen Kraft-Momenten-Sensor in der Basis des Roboters erfolgen. Der Kraftfluss aller auf die Roboterkinematik einwirkenden Kräfte läuft über die Basis des Roboters und kann somit über einen entsprechenden Sensor detektiert werden. Dabei müssen die manipulierte Masse und die genauen Gelenkstellungen der Roboterkinematik zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Mit diesen Werten wird durch die Robotersteuerung der Sollverlauf der zu messenden Kräfte und Momente berechnet. Liegt die Differenz zwischen Soll- und Istwert über einem definierten Grenzwert, wird die Bewegung des Roboters gestoppt. Zusätzlich werden

je nach Robotertyp Ummantelungen aus weichem Kunststoff verwendet, die einen passiven Schutz darstellen und im Falle einer Kollision die Druckwerte verringern. In Abbildung 2.9 sind zwei kollaborative Roboter dargestellt, die über Sensorik zum Betrieb nach dem Schutzprinzip der Kraft- und Leistungsbegrenzung verfügen. Das Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung kommt vorwiegend bei kleinen und leichten Robotern zum Einsatz, da die bewegte Masse im Falle einer Kollision erheblichen Einfluss auf die Kraft- und Druckwerte hat. Aktuell verfügbare Modelle haben eine Traglast von bis zu 35 kg, wobei die maximale Geschwindigkeit dann auf 250 mm/s begrenzt ist (Fanuc Ltd. 2016b).



Abbildung 2.9: Kollaborativer Roboter Kuka LBR iiwa (links) (Kuka Roboter GmbH 2016) und Fanuc CR35-iA (rechts) (Fanuc Ltd. 2016a)

Kollaborative Roboter mit Abschaltvorrichtungen nach dem Prinzip der Abstandsüberwachung detektieren den Abstand zu Körperteilen bzw. Gegenständen und stoppen die Bewegung bevor es zu einer Kollision kommt. Die Abstandsüberwachung kann entweder über externe oder über integrierte Sensoren erfolgen. Der in Abbildung 2.10 dargestellte kollaborative Roboter Bosch APAS ist beispielsweise mit einer sensitiven Schutzhaut ausgerüstet, die über kapazitive Sensoren die Annäherung eines Körperteils registriert. Wird ein Abstand von 50 mm unterschritten, wird die

Bewegung des Roboters gestoppt. Gemäß DIN EN ISO 10218 müssen Abschaltvorrichtungen für den kollaborativen Betrieb mindestens Performance-Level D, Kategorie 3 erfüllen und demnach redundant ausgelegt sein sowie Fehlfunktionen sicher erkennen.



Abbildung 2.10: Kollaborativer Roboter Bosch APAS mit sensibler Schutzhaut
(Robert Bosch GmbH 2016)

2.2.3 Industrielle Anwendung

In einer Studie des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation wurden 25 bestehende MRK-Anwendungen in Deutschland betrachtet und ausgewertet (Bauer et al. 2016). Die Anlagenbetreiber wurden bezüglich der Motivation zum Einsatz der neuen Technologie befragt. Neben der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit als meist genannter Grund wurden Innovation und die Verbesserung der Ergonomie am häufigsten angegeben, wie in Abbildung 2.11 dargestellt. Andere Gründe wie eine Entkopplung von der Taktbindung, ein Fachkräftemangel bzw. eine erhöhte Fluktuation spielen für die Betreiber eine untergeordnete Rolle. Mit Ausnahme einzelner Werke in der Automobilindustrie sind in der Serienproduktionen deutscher Industriebetriebe bisher allerdings nur wenige Applikationen in MRK umgesetzt worden (Bauer et al. 2016), (Faber et al. 2015).

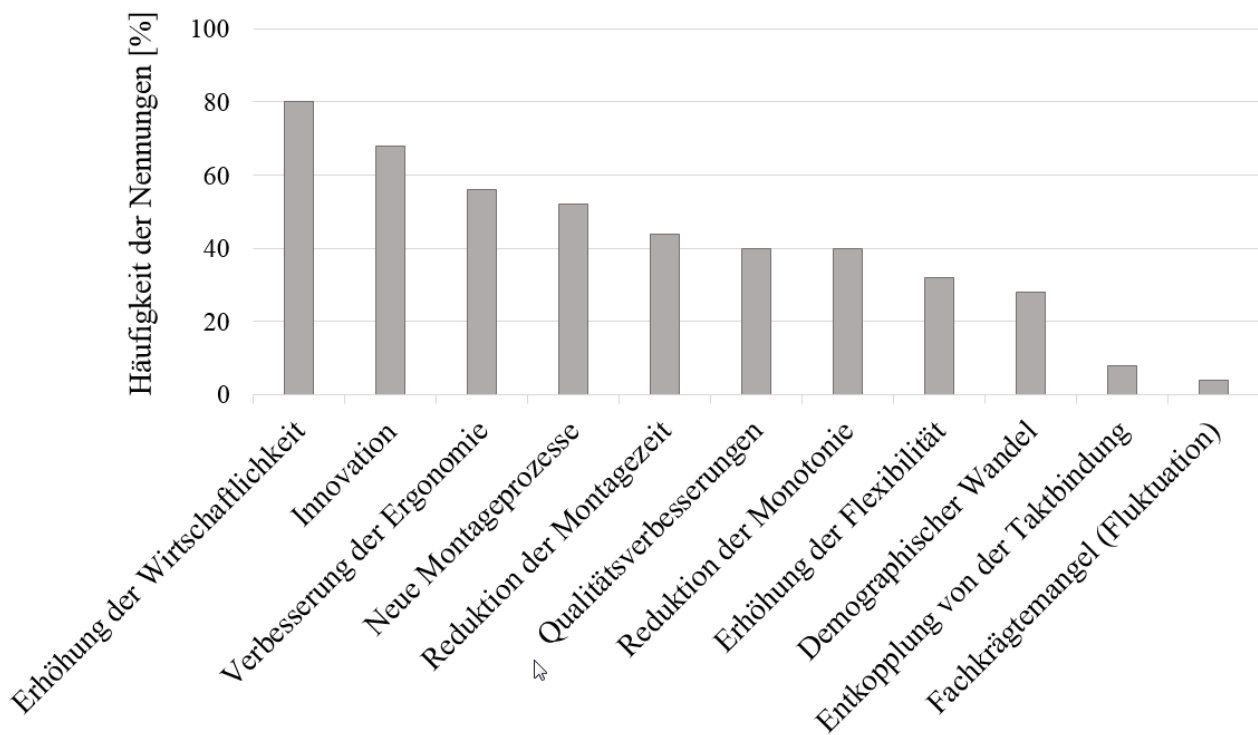


Abbildung 2.11: Gründe für den Einsatz von Mensch-Roboter-Kooperation nach (Bauer et al. 2016)

In Abbildung 2.12 ist eine kollaborative Anwendung aus der Motorenmontage des Opelwerk Kaiserslautern dargestellt. Der Roboter wird für die Verschraubung des Turboladers in der Motormontage eingesetzt. Während ein Mitarbeiter auf der gegenüberliegenden Seite den Turbolader in Position bringt und die Muttern steckt, übernimmt der Roboter die Verschraubung auf das gewünschte Drehmoment. Insgesamt werden acht Verschraubungen durchgeführt, die in einer definierten Reihenfolge angezogen werden müssen. Zum einen führt die Automatisierung dieser Montagetätigkeit zu einer ergonomischen Entlastung, da der nachgelagerte Arbeitsplatz zeitlich entlastet wird und der Ruck beim Anziehen der Muttern nicht mehr durch den Mitarbeiter aufgenommen werden muss. Zum anderen wird die Qualität der Montage erhöht, da durch den Einsatz des Roboters gewährleistet ist, dass die Schrauben immer in der richtigen Reihenfolge angezogen werden und so Undichtigkeiten in der Verbindung zwischen Krümmer und Motor vermieden werden. Der Roboter arbeitet ohne

Schutzzaun nach dem Schutzprinzip der Kraft- und Leistungsbegrenzung. Die Arbeitssicherheit wird durch den Kraft-Momenten-Sensor des Roboters sowie durch eine zusätzliche Abschaltvorrichtung im Werkzeug gewährleistet.



Abbildung 2.12: Kollaborativer Roboter in der Motormontage im Opel Werk Kaiserslautern (Opel Automobile GmbH 2016)

In einer Befragung von Roboterherstellern, System-Integratoren und Endanwendern wurden Hindernisse zum Einsatz von MRK ermittelt (Ranz et al. 2017). Die Befragten gaben an, dass vor allem die Identifikation von geeigneten Applikationen, die Anwendung der relevanten Sicherheitsnormen und die applikationsspezifische Risikobeurteilung derzeit die größten Herausforderungen in der Umsetzung von kollaborativen Anwendungen darstellen. Für die Umsetzung kollaborativer Applikationen ist Erfahrungswissen erforderlich, das vor allem in kleineren Unternehmen fehlt. Darüber hinaus sind nur wenige Planungs-Werkzeuge für MRK verfügbar. Insbesondere die Ermittlung von akkuraten Prozesszeiten wird als problematisch angesehen (Ranz et al. 2017). Technische Aspekte wie die Auswahl eines passenden Roboters, Teaching von Bahnpunkten oder mangelnde Maschinen-Intelligenz spielen eine untergeordnete Rolle.

2.3 Montageplanung

In der Montageplanung werden Abläufe, Betriebsmittel und Organisationen nach mengen- und variantenabhängigen, fügetechnischen, organisatorischen und ergonomischen Kriterien gestaltet (Slama 2004). Die Montageplanung umfasst dabei mehrere Planungsphasen mit einer Vielzahl verschiedener Aktivitäten (Roßgoderer 2002). Aufgrund der hohen Anzahl der zu berücksichtigenden Randbedingungen und den weitreichenden Folgen einer Planungsentscheidung ist für die Montageplanung ein systematisches Vorgehen unumgänglich (Bick 1992).

2.3.1 Allgemeine Methoden der Montageplanung

In der Planungsmethodik nach Bullinger werden von der Projektorganisation bis zum Betrieb alle nötigen Arbeitsschritte zur Planung und Umsetzung einer Montageanlage beschrieben. Die Methodik gliedert sich in sieben Planungsabschnitte mit den jeweiligen Planungsschritten:

- 1. Projektorganisation:** Projektplanung und Steuerung sowie Festlegung des prinzipiellen Planungsablaufs.
- 2. Konzeption:** Beschaffung der Planungsdaten, Festlegung der Planungsziele und Ausarbeitung von Prinziplösungen.
- 3. Ablaufplanung:** Montageablaufstruktur festlegen, Kapazitätsteilung ermitteln, Vorgabezeiten ermitteln und Arbeitsinhalte bewerten.
- 4. Montagesystementwurf:** Prinzipanordnungen erstellen, Materialbereitstellung planen, Layout festlegen, Montagesystem simulieren und auswählen.
- 5. Ausarbeitung:** Detaillierte Ausarbeitung der manuellen und automatischen Montagestationen erstellen.
- 6. Realisierung:** Bereitstellung der Betriebsmittel, Personaleinsatz planen, Montagesystem aufbauen und Anlauf überwachen.

- 7. Betrieb:** Controlling, Kennzahlen ermitteln, Rationalisierungsmaßnahmen treffen und Problemlösungstechniken anwenden.

Bereits während der Konzeption werden Prinziplösungen erarbeitet, für die im Rahmen der Ablaufplanung ein Grobvorranggraph erstellt wird. Anschließend werden Vorgabezeiten ermittelt, sodass die Montageablaufstruktur festgelegt werden kann. Mit dem Montagesystementwurf wird eine Entscheidung über das zu verwendende Montagesystem getroffen, das anschließend in der Ausarbeitungsphase detailliert wird. Bei der Planung werden sowohl manuelle als auch automatisierte Arbeitsplätze berücksichtigt und ein Leitfaden zur Bestimmung automatisierter Teileverrichtungen entwickelt (Bullinger et al. 1986). Die Festlegung der zu automatisierenden Prozesse erfolgt durch die Überprüfung der technischen und wirtschaftlichen Automatisierbarkeit. Aspekte der Arbeitssicherheit und der ergonomischen Bewertung sind nur auf bereits realisierte Arbeitsplätze bzw. in der Ausarbeitung der Montagestation anwendbar.

Der Planungsleitfaden nach Konold & Reger (2009) unterteilt die Montageplanung in fünf Planungsstufen, wie in Abbildung 2.13 dargestellt. Ausgehend von der Aufgabenstellung werden in der Grobplanung die Arbeitsabläufe festgelegt und verschiedene Lösungsvarianten werden nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet und ausgewählt. Anschließend wird im Rahmen der Feinplanung das Gesamtsystem im Detail ausgearbeitet, bevor mit der Realisierung und dem anschließenden Fertigungsanlauf das entsprechende Produkt gefertigt werden kann. Neben der Betrachtung technischer, wirtschaftlicher und sozialer Aspekte ist es das Ziel, eine möglichst flexible Montagestruktur zu erreichen (Konold et al. 2009).

		Planungsstufen				
		Aufgabenstellung	Grobplanung	Feinplanung	Realisierung	Fertigungsanlauf
Planungsschritte	- Ziele festlegen	- Systemausbringung berechnen	- Gesamt- und Teilsystem detailliert ausarbeiten	- Beschaffung veranlassen	- Systemanlauf analysieren	
	- Terminrahmen vorgeben	- Arbeitsabläufe festlegen und Montagestruktur entwickeln	- Terminplan erstellen	- Personal schulen	- Fehler beseitigen	
	- Planungsdaten beschaffen	- Lösungsvarianten bewerten/auswählen	- Ausschreibungen durchführen	- Montagesystem installieren	- Dokumentation korrigieren	
	- Situationsanalyse durchführen		- Wirtschaftlichkeitsnachweis überprüfen	- Dokumentation erstellen	- Abnahme durchführen	
	- Aufgaben abgrenzen					

Abbildung 2.13: Planungsstufen in der Montageplanung nach (Konold et al. 2009)

Besonders die frühe Phase der Montageplanung ist von entscheidender Bedeutung, da hier ein kaum begrenzter Handlungsspielraum besteht und die Kosten des Produkts maßgeblich beeinflusst werden können (Feldmann 2004). Ein verstärkter Einsatz von Methoden und Hilfsmitteln in der frühen Planungsphase, der zu einem effizienteren Produktionsablauf führt, kann den Wertschöpfungsverlauf eines Unternehmens maßgeblich beeinflussen. Der in Abbildung 2.14 dargestellte Planungsprozess unter erhöhtem Methoden- und Hilfsmiteleinsatz verursacht zwar höhere Kosten in der Planungsphase, führt aber insgesamt zu einer geringeren Amortisationszeit aufgrund einer kürzeren Planungsdauer und einer erhöhten Planungsqualität (Schilde 1982).

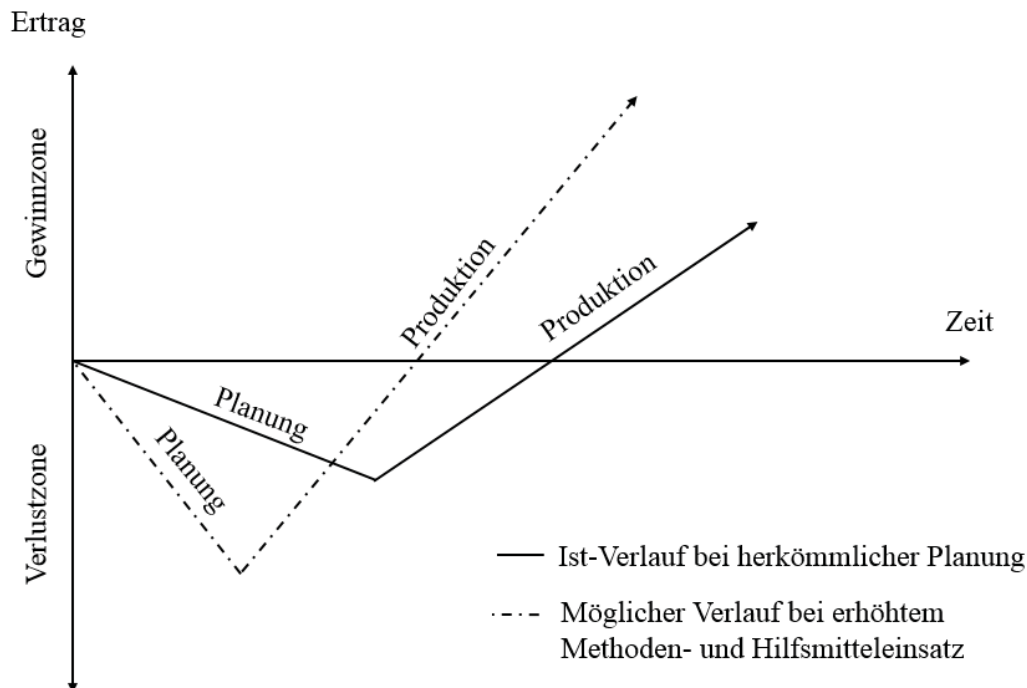


Abbildung 2.14: Bedeutung der Planung für den Wertschöpfungsverlauf in der Produktion nach (Feldmann 2004)

2.3.2 Zeitdatenermittlung in der Montageplanung

Zeitdaten sind ein wesentliches Kriterium zur Gestaltung, Organisation und Wirtschaftlichkeitsbeurteilung eines Arbeitssystems (Schlick et al. 2010). Der Zeitwirtschaft kommt deshalb im Rahmen der Montageplanung eine besondere Rolle zu. In Verbindung mit der zu erzielenden Taktzeit bestimmen die Durchführungszeiten, wie viele Montageoperationen an einer Station verrichtet werden können. Darüber hinaus wird die Produktivität und Wirtschaftlichkeit eines Montagesystems maßgeblich durch die Durchführungszeit bestimmt. Valide Zeitdaten bilden die Basis für Planungsentscheidungen sowie für eine wirklichkeitsgerechte Kalkulation der Herstellkosten im Rahmen der Montageplanung. Dementsprechend stellt die Zeit, die zur Durchführung einer Montageaufgabe benötigt wird, eine wesentliche Planungs- und Bewertungsgröße innerhalb der Montageplanung dar (Petzelt 2010).

In der Zeitdatenermittlung werden Ist-Zeiten und Soll-Zeiten unterschieden. Während Ist-Zeiten die tatsächlich für die Ausführung bestimmter Ablaufabschnitte benötigten Zeiten darstellen, werden mit Soll-Zeiten die planmäßig zur Ausführung bestimmter Ablaufabschnitte benötigten Zeiten beschrieben. In Abhängigkeit der Methode der Datenermittlung basieren die Soll-Zeiten direkt oder indirekt auf Ist-Zeiten. Dabei beziehen sich Soll-Zeiten auf eine festgelegte Bezugsleistung der Arbeitsperson, die als Normleistung bezeichnet wird. Die Normleistung ist die „Leistung eines mittelgut geübten Menschen (...) der diese Leistung ohne Arbeitsermüdung auf Dauer erbringen kann" (DMTM 2003).

Bei der Ermittlung von Zeitdaten können die folgenden drei Kategorien mit den nachfolgend aufgelisteten Methoden der Zeitdatenermittlung unterschieden werden (Heinz et al. 1994):

1. Kontinuierliche Beobachtungen: Manuelle Zeitaufnahme und selbsttätige Zeitmessung über Geräte
2. Stichprobenbeobachtungen: Multimomentverfahren
3. Rechnerisch- analytische Verfahren: Systeme vorbestimmter Zeiten, Regressionsanalyse

Mit den Methoden der kontinuierlichen Beobachtung und der Stichprobenbeobachtung werden Ist-Zeitdaten ermittelt, die über eine Leistungsgradbeurteilung normiert werden können und somit auf Soll-Zeiten schließen lassen. Im Gegensatz dazu liefern rechnerisch analytische Verfahren, wie beispielsweise Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ), direkt Soll-Zeiten, ohne im Anwendungsfall zunächst Ist-Zeitdaten erheben zu müssen (Schlick et al. 2010). Rechnerisch analytische Verfahren sind sehr wirtschaftlich in der Erstellung, da Veränderungen an einzelnen Zeiteinflussgrößen sehr einfach vorgenommen werden können. Aufgrund des hohen Verbreitungsgrades und der praktischen Relevanz werden im Folgenden verschiedene SvZ sowie die

Zeitdatenermittlung mittels Regressionsanalyse näher beschrieben. Eine Übersicht über Methoden der kontinuierlichen Beobachtung und der Stichprobenbeobachtung findet sich in (Heinz et al. 1994) und (Schlick et al. 2010).

Systeme vorbestimmter Zeiten sind rechnerisch-analytische Verfahren der Zeitdatenermittlung, die vorwiegend bei der Zeitdatenermittlung für manuelle Arbeitsplätze eingesetzt werden. Mit SvZ können Tätigkeitszeiten von Bewegungsabläufen bereits in der Planungsphase im Voraus bestimmt werden, ohne dass das Arbeitssystem dazu real existieren muss. Eine Bewegungsfolge wird bei der Berechnung der Sollzeit in Bewegungselemente zerlegt. Durch das Zusammensetzen von mehreren Bewegungselementen ist die Bildung von Sollzeiten komplexer Bewegungsabfolgen über die Summe der einzelnen Bewegungselemente möglich.

Eine erste Beschreibung menschlicher Arbeit erfolgte mittels der von Frank Bunker Gilbreth im Rahmen seiner Bewegungsstudien entwickelten Bewegungselemente (Gilbreth et al. 1917). Mit einem Inventar von 17 Bewegungselementen konnten erstmals Arbeitsabläufe bewertet und Ablaufmängel identifiziert werden. Die Weiterentwicklung und Verschmelzung dieser Bewegungselemente mit der Größe „Zeit“ schuf die Grundlage für die Entwicklung von Systemen vorbestimmter Zeiten. Im Jahr 1926 wurde mit Motion-Time-Analysis durch Asa B. Segur, einem Mitarbeiter Gilbreths, das erste SvZ vorgestellt, das bis in die 1930er Jahre in einer Reihe US-amerikanischer Unternehmen verwendet wurde (Landau 2013). In der Folgezeit entstanden viele weitere Systeme, wie beispielsweise das Work-Factor-System (WF) von Joseph Quick im Jahr 1945 oder das 1948 vorgestellte System Methods-Time Measurement (MTM) von Maynard, Stegmerten und Schwab sowie die auf MTM basierende Maynard Operation Sequence Technique (MOST). Heute sind vor allem diese drei Systeme von praktischer Bedeutung (Schlick et al. 2010). Eine Übersicht weiterer Entwicklungen findet sich in (Matias).

Mit dem MTM-Verfahren werden Bewegungsabläufe in ihre Grundbewegungen gegliedert. Jeder Grundbewegung ist ein Normzeitwert zugeordnet, der in seiner Höhe durch die erfassten Ausprägungen der Einflussgrößen bestimmt ist (Milberg et al. 1998). Mit MTM-1 wurde das MTM-Grundverfahren als universell anwendbares SvZ entwickelt und die Grundlage für weitere MTM-Verfahren geschaffen (Bokranz et al. 2012b). MTM-1 und WF unterscheiden sich in der Art der Berücksichtigung der Zeiteinflussgrößen bei einer Bewegungsablaufanalyse. Während WF nur quantitative Einflussgrößen berücksichtigt, werden in MTM auch qualitative Einflussgrößen berücksichtigt (Schlick et al. 2010).

Der größte Unterschied von MOST zu MTM und WF besteht darin, dass die Analyse von Arbeitsabläufen mithilfe standardisierter Bewegungssequenzmodelle erfolgt. Die Ausprägung einer Zeiteinflussgröße wird über eine Indexierung einzelner Modellparameter berücksichtigt, wodurch sich der Vorteil einer hohen Analysegeschwindigkeit ergibt (Zandin 2003). Das MOST Verfahren findet vor allem Anwendung im US-amerikanischen Raum.

Eine Überprüfung der Additivitätshypothese, die allen SvZ zu Grunde liegt, ergab, dass sich „(...) selbst bei größeren Ungenauigkeiten der Elementarzeiten i. d. R hinreichend zutreffende Gesamtzeiten ergeben" (Sanfleber 1968). Darüber hinaus haben SvZ eine hohe praktische Relevanz, da sie bereits in der Planungsphase angewendet werden können. Änderungen an der Arbeitsmethode bedingen nur geringfügige Änderungen in der Adaption der Prozessbausteine. Auf diese Weise lassen sich Hinweise zur Verbesserung der Arbeitsmethode ableiten und schnell umsetzen (Luczak 1986). Weiterentwicklungspotentiale von SvZ liegen in der Entwicklung neuer Bewegungselemente und Prozessbausteine, um das System mit weiteren Informationen zu versehen (Schlick et al. 2010).

Mit einer Regressionsanalyse wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen einer quantitativen Zielgröße und einer unabhängigen Einflussgröße formelmäßig

beschrieben (Fricke 2010). Abhängig von der Anzahl der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren wird nach einer einfachen und mehrfachen Regression unterschieden sowie, je nach Art des funktionellen Zusammenhangs, nach einer linearen oder nicht-linearen Regression (Haller-Wedel 1985). In der Praxis liegen i. d. R. keine monokausalen Beziehungen vor, so dass eine mehrfache Regressionsanalyse durchzuführen ist. Die Methode findet vor allem Anwendung in der Planzeitermittlung für komplexe Projekte. Sie kann nicht nur vor dem Hintergrund standardisierter Tätigkeiten angewendet werden, sondern bietet erhebliches Potential für eine Anwendung in indirekten Bereichen und schwach strukturierten Arbeitsprozessen, wie z.B. in der Projektarbeit (Schlick et al. 2010). Allerdings ist die Ermittlung von Zeitdaten im Vergleich zu SvZ mit einem erhöhten Zeitaufwand verbunden und es ist nicht möglich, Zeitdaten für eine Neuplanung zu ermitteln, da keine Zeitaufnahmen durchgeführt werden können.

2.3.3 Planung manueller Arbeitssysteme

In der Montageplanung stellt der Mensch eines der komplexesten Elemente dar. Um den Menschen im industriellen Umfeld effizient einsetzen zu können, ist es notwendig, System-Modelle menschlicher Arbeit zu erstellen. Auf diese Weise ist es möglich, menschliche Arbeit zu beschreiben, zu analysieren und zu bewerten (Kuhlang et al. 2014). Häufig werden hierzu Prozesssprachen genutzt (s. Abschnitt 2.3.2).

Prinzipiell kann jeder manuelle Arbeitsablauf mit Prozesssprachen wie MTM, WF oder MOST beschrieben werden. Insbesondere im deutsch-sprachigen Raum wird MTM in vielen Unternehmen verwendet. Die Modellierung menschlicher Arbeitsabläufe erfolgt in MTM mittels Prozessbausteinen und kann je nach betrachtetem System in unterschiedlicher Granularität erfolgen. Die unterschiedlichen MTM-Verfahren sind für die Planung wiederkehrender Abläufe ausgelegt und finden Anwendung in der Mengenfertigung (MTM-1 und MTM-2), in der Serienfertigung (MTM-UAS; Universelles

Analysiersystem) sowie in der Einzel- und Kleinserienfertigung (MTM-MEK). In der MTM-eigenen Software TiCon sind darüber hinaus Module bezüglich Taktung, Mehrstellenarbeit und Ergonomie verfügbar. Durch die Kopplung von Prozessbausteinen mit ergonomisch relevanten Daten ist eine quantifizierbare Belastungsanalyse möglich und sowohl Ökonomie als auch Ergonomie können prospektiv in der Planung berücksichtigt werden (Britzke 2010).

Mithilfe von 3D-Simulationen können Arbeitssysteme simuliert und geplant werden. Unter Verwendung eines digitalen Mensch-Modells ist es möglich, ergonomische Analysen zu erstellen oder die Erreichbarkeit bei der Montage für verschiedene Personengruppen zu überprüfen. Die bekanntesten Vertreter kommerziell erhältlicher Software zur 3D-Simulation von manuellen Arbeitsvorgängen stellen Dassault Systèmes und Tecnomatix mit den Programmen „Delmia Human“ und „Process Simulate Human“ bzw. „Jack“ dar. „Delmia Human“ und „Jack“ sind vor allem für die Erstellung ergonomischer Untersuchungen sehr gut geeignet (Kohler 2008). Mit einem virtuellen Mensch-Modell mit 100 unabhängigen Gelenken und 148 Freiheitsgraden können von statischen Haltungen bis hin zu dynamischen Bewegungen realistische Belastungsstudien erstellt werden. Beispielhaft ist eine solche Simulation in Abbildung 2.15 dargestellt. Das digitale Mensch-Modell kann laufen, balancieren, greifen, Werkzeuge und Dinge handhaben und so mit der virtuellen Umgebung interagieren (Duffy 2009). Darüber hinaus ist es möglich, Verletzungsrisiken abzuschätzen sowie Kollisionsprüfungen durchzuführen.

2.3 Montageplanung

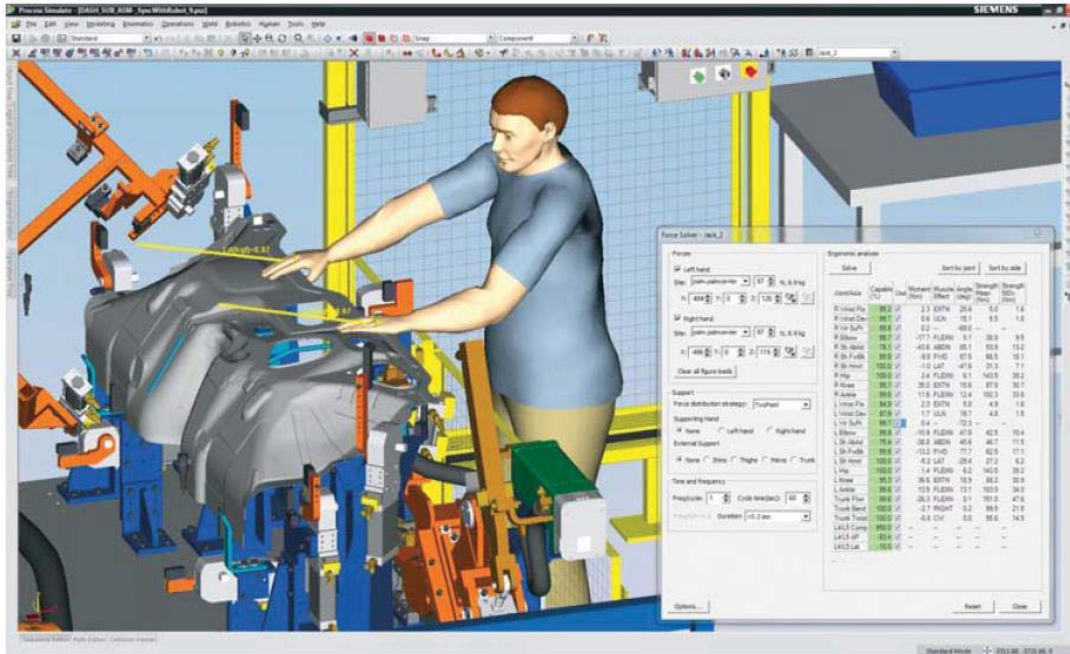


Abbildung 2.15: Simulation eines manuellen Arbeitsvorgangs in Process Simulate Human (Tecnomatix 2016)

2.3.4 Planung roboterbasierter Arbeitssysteme

Zur Planung roboterbasierter Montagevorgänge können 3D-Simulationen erstellt werden. Die meisten Roboterhersteller bieten dazu entsprechende Simulationsprogramme an, mit denen eine Offline-Programmierung vorgenommen werden kann und genaue Berechnungen bezüglich der zu erwartenden Bewegungszeit durchgeführt werden können (Vogl 2009). Allerdings sind diese Programme herstellerabhängig, sodass die Software hinsichtlich der Auswahl der Roboter eingeschränkt ist. Darüber hinaus ist die Kenntnis der jeweiligen Roboter-Programmiersprache erforderlich. Bei Programmen zur digitalen Fabrikplanung (z. B. Process Simulate, Delmia oder 3D-Automate, s. Abbildung 2.16) ist es möglich, über Zusatzmodule herstellerunabhängig Simulationen von Roboter-Anwendungen durchzuführen. Über Importschnittstellen wie STEP oder IGES können CAD-Modelle geladen werden, um Erreichbarkeitsuntersuchungen und Kollisionsprüfungen vorzunehmen (Weck 2006). Berechnungen der Zykluszeiten sind mithilfe der realistischen Robotersimulation (RRS) ebenfalls

möglich. RRS wurde ursprünglich entwickelt, um Bewegungsplanungsalgorithmen in die Offline-Programmierung einzubinden (Beyer 2005). Allerdings setzt dies voraus, dass die entsprechenden Algorithmen zur Bahnplanung von den Herstellern zur Verfügung gestellt werden.

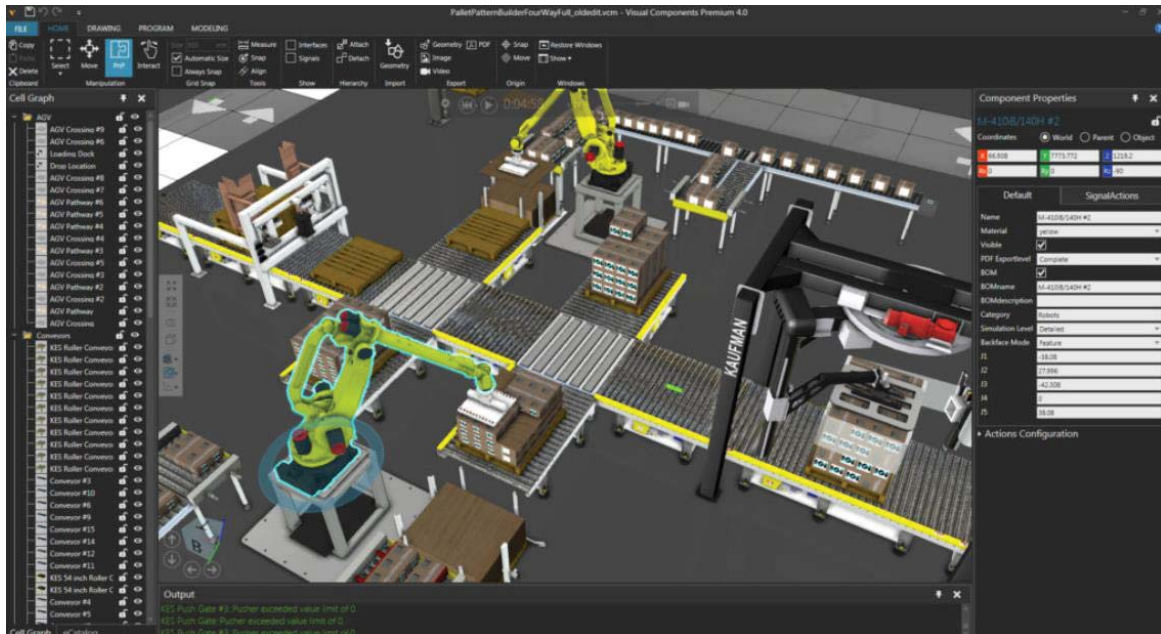


Abbildung 2.16: Simulation von Roboterbewegungen in 3D-Automate (Visual Components 2016)

In den 1980er Jahren wurde der Planungsansatz „Robot Time and Motion“ (RTM) entwickelt (Robinson et al. 1984). Mit RTM ist es möglich, auf Basis einer detaillierten Aufgabenbeschreibung Zeitdaten für Roboteranwendungen zu ermitteln, ohne dass eine Programmierung notwendig ist. In RTM werden fünf Gruppen von Bewegungselementen unterschieden:

1. Movement elements: Reach, Move and Orient
2. Sensing: Stop-on-error/force, Touch & Vision
3. Gripper or tool elements: Grasp and Release
4. Delay Elements: Process-Time-Delay and Time-Delay
5. Mobility: straight, spin turn, curve and diagonal moves

Für die Berechnung einer Bewegung werden, neben den genauen Koordinaten von Start- und Zielpunkt oder der Bewegungslänge, die Geschwindigkeit und der Bewegungstyp angegeben. Als Ergebnis wird die Bewegungszeit in TMU (Time Measurement Unit, $1 \text{ TMU} = 0,036 \text{ s}$) ausgegeben. Auf diese Weise können Bewegungsbahnen optimiert werden und über ein Zusatzmodul direkt Roboterprogramme generiert werden. Allerdings ist die Anwendung von RTM aufgrund der damaligen Computer-Technik sehr aufwändig und konnte sich in der praktischen Anwendung nicht durchsetzen. Infolge der Entwicklung der Roboter-Technologie ist RTM nicht mehr auf den aktuellen Stand der Technik anwendbar.

2.4 Analyse relevanter Forschungsansätze

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Unterstützung der Montageplanung entwickelt. Insbesondere in der Forschung seit der Jahrtausendwende wurden viele rechnergestützte Planungsmethoden entwickelt, die auf unterschiedliche Bereiche der Montageplanung spezialisiert sind. Eine Übersicht verschiedener Planungsmethoden mit dem entsprechenden Fokus findet sich in (Kluge 2011). Im Folgenden wird nur eine Auswahl der Methoden vorgestellt, die für diese Arbeit von hoher Relevanz sind.

Bick (1992) untersucht im Rahmen der Grobplanungsphase die Planung hybrider Montagesysteme. Die Methodik gliedert sich in drei wesentliche Schritte. Zunächst wird das Rationalisierungspotential einer Montageaufgabe ermittelt und mit einem Grenzwert verglichen. Alle Prozesse, die ein ausreichend hohes Rationalisierungspotential besitzen, werden hinsichtlich technischer KO-Kriterien untersucht. Abschließend erfolgt eine genauere Untersuchung der verbliebenen Prozesse. Diese Untersuchung umfasst eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsrechnung sowie den Vergleich zwischen einer manuellen und einer automatischen Prozessausführung (Bick 1992).

Die Betrachtung Bicks umfasst Montagestationen mit einer zeitlichen und räumlichen Trennung von manuellen und automatischen Prozessen. Eine direkte Kooperation zwischen Mensch und Roboter wird nicht berücksichtigt. Ebenso finden ergonomische Kriterien keine Berücksichtigung in der Methodik.

Beumelburg (2005) entwickelt eine Methode zur fähigkeitsorientierten Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Für Anwendungen in MRK werden die einzelnen Montageoperationen zwischen den Ressourcen Mensch und Roboter aufgeteilt. Um den Entscheidungsprozess dieser Aufteilung möglichst objektiv zu gestalten, hat Beumelburg einen Kriterienkatalog entwickelt. Mithilfe dieses Kriterienkatalogs werden Fähigkeitskennzahlen berechnet, die die Eignung einer Ressource für einen bestimmten Arbeitsschritt in Bezug auf ein Kriterium repräsentieren. Die Eignung einer Ressource wird dabei für jedes Kriterium und jede Ausprägung bezüglich Taktzeit, Zusatzinvestment, Arbeits- und Prozessqualität bewertet. Auf Basis der Eignungsgrade, des Montagevorranggraphen und der Prozesszeiten wird ein Optimierungsproblem definiert, das mit einem genetischen Algorithmus gelöst wird.

Das Vorgehen Beumelburgs bietet eine objektive Möglichkeit, automatisiert einen Montageablauf zu definieren, ohne im Anwendungsfall auf das Wissen eines einzelnen Experten zurückgreifen zu müssen. Allerdings deckt die Methodik nur einen kleinen Teil der Arbeitsaufgaben ab, die zur Planung eines Arbeitssystems in MRK notwendig sind. So werden z. B. Aspekte der Zeitdatenermittlung und die Berücksichtigung von Schutzkonzepten für MRK nicht berücksichtigt.

Choi (1999) untersuchte, ob Bewegungselemente und Bewegungszeiten von MTM auf RTM übertragbar sind, um die Anwendung von RTM zu erleichtern. Die Ergebnisse zeigten, dass die Ungenauigkeiten der Bewegungszeiten zu hoch sind und eine direkte Übertragung der menschlichen Bewegungszeiten auf Roboter-Anwendungen nicht zielführend ist (Choi et al. 1999).

Die Bestimmung von Sollzeiten in der Montageplanung auf Basis Systemen vorbestimmter Zeiten ist arbeitsintensiv, vor allem wenn es im Laufe der Planung zu Änderungen kommt. Mit dem Ziel den Aufwand zur Bestimmung von Sollzeiten zu reduzieren, entwickelte **Petzelt** (2010) ein Konzept zur rechnergestützten Bestimmung von Sollzeiten. Das Konzept setzt in der frühen Phase der Produktentstehung an und wird mit einer domänenspezifischen visuellen Programmiersprache umgesetzt. Während die eigentliche Bestimmung von Sollzeiten auf MTM basiert, wird über ein digitales Modell des Arbeitssystems eine weitestgehend automatische Parametrierung der Prozessbausteine vorgenommen. Weiterhin umfasst die Methode ein Schnittstellenkonzept zum werkezugübergreifenden Austausch von Datenmodellen und Zeitdaten.

Mit der Methodik Petzelts wird sowohl der Erstellungsaufwand von Planungsstudien reduziert als auch die Planungsqualität erhöht, da weniger manuelle Eingaben nötig sind. Allerdings werden in der Methodik keine automatisierten Montageprozesse berücksichtigt und somit ist sie nicht für die Planung hybrider Arbeitssysteme anwendbar.

Reichenbach (2010) entwickelte eine Planungsumgebung für Montageaufgaben in der wandlungsfähigen Fabrik. Das zentrale Element dieser Planungsumgebung ist ein Wissensspeicher, der verschiedene Elementarfunktionen und Basisoperationen, wie z.B. Drehen oder ein Moment aufbringen, definiert. Für diese Operationen werden technische Parameter mit Werten für den Menschen, den Leichtbauroboter LBR IV und den Standard-Industrieroboter KUKA KR16 hinterlegt. Auf Basis dieser Daten wird mithilfe einer Potentialfeldanalyse eine Bewertung von Qualität, Kosten und Zeit vorgenommen. Nach der Auswahl einer bestimmten Ressource ergibt sich daraus eine Handlungsempfehlung.

Mit der Methodik Reichenbachs ist es möglich, für eine gegebene Montageaufgabe die Eigenschaften und Daten des Menschen mit denen eines Roboters zu vergleichen, aber

eine Planung eines hybriden Arbeitssystems, bei dem Mensch und Roboter in Interaktion treten, ist mit der entwickelten Methodik nicht möglich. Die Planung des Arbeitsablaufs und die Berücksichtigung von Schutzmaßnahmen für MRK ist nicht Bestandteil der Methodik.

Ross (2002) entwickelte eine Methodik zur Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades, die es dem Anwender erlaubt, bereits in der frühen Phase der Montageplanung eine Aussage über die wirtschaftliche Automatisierbarkeit von einzelnen Montageprozessen zu treffen (Ross 2002). Der geplante Prozess wird dazu mit bereits bestehenden automatisierten Prozessen über eine Lösungsdatenbasis verglichen. Basierend auf den Produkt-, Bauteil- und Prozessinformationen wird der technische Aufwand für eine Automatisierung bewertet. Über den Vergleich mit einem erfahrungsbasierten Schwellwert wird das Automatisierungspotential bestimmt. Neben der technischen Bewertung des Automatisierungsaufwands wird eine monetäre Bewertung auf Basis der Stückkosten einer manuellen und automatischen Lösung vorgenommen.

Mit der entwickelten Methode ist es möglich, im Rahmen der Grobplanungsphase ohne explizites Erfahrungswissen eine Aussage über einen wirtschaftlich sinnvollen Automatisierungsgrad zu treffen. Die Bestimmung des technischen Aufwands zur Automatisierung erfolgt über den Vergleich mit bereits bestehenden Lösungen. Dies schränkt die Methode in Bezug auf neue Montagekonzepte ein, da diese nur berücksichtigt werden können, wenn die Lösungsdatenbasis auf dem neuesten Stand ist. Gerade bei der Berücksichtigung neuer Technologien ist dies problematisch.

Ein weiterer Ansatz für die Planung von Roboter-Anwendungen wurde von **Zwicker und Reinhart** (2016) entwickelt. Die möglichen Operationen des Roboters werden in allgemeine und prozess-spezifische Elemente unterteilt, die dann hinsichtlich ihrer Charakteristik in einem mathematischen Modell beschrieben werden. In einem ersten

Schritt wurden die allgemeinen Zeitelemente analysiert, wobei die Berechnungsergebnisse bereits für einfache, lineare Bewegungen eine relativ hohe Abweichung vom realen Roboter-Verhalten aufweisen (Zwicker et al. 2016).

2.5 Fazit

Die Planung und Gestaltung von Arbeitsprozessen beginnt bereits in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses. In der Konzeptphase werden verschiedene Varianten zur Montage des Produkts bzw. einer Produktgruppe erstellt und geprüft. Unter anderem wird festgestellt, welcher Automatisierungsgrad eine bestmögliche Produktion ermöglicht. Um einen Vergleich verschiedener Lösungsvarianten zu erhalten, bedarf es unter anderem der Ermittlung von Zeit- und Ergonomiedaten. Die Basis einer solchen Ermittlung sind Beschreibungen und Visualisierungen des zukünftigen Arbeitsprozesses, da dieser noch nicht real existiert. In bestehenden Planungsmethoden wird zwar der Aspekt der Automatisierbarkeit und der damit verbunden Vor- und Nachteile behandelt. Erfolgt aber eine Vernetzung der Aktivitäten des Menschen mit denen des Roboters, ist es nach aktuellem Stand der Technik nur unter hohem Aufwand möglich, verschiedene Varianten auszuarbeiten und zu bewerten.

Die Zeit, die zur Durchführung einer Montageaufgabe benötigt wird, stellt eine wesentliche Planungs- und Bewertungsgröße innerhalb der Montageplanung dar (Petzelt 2010). In Verbindung mit der zu erzielenden Taktzeit bestimmen die Durchführungszeiten, wie viele Montageoperationen an einer Station verrichtet werden können. Darüber hinaus wird die Produktivität und Wirtschaftlichkeit eines Montagesystems maßgeblich durch die Durchführungszeit bestimmt. Während für die Planung manueller Arbeitssysteme Zeitdaten über Systeme vorbestimmter Zeiten mit vertretbarem Aufwand ermittelt werden können, ist dies für die Planung roboterbasierter Montagevorgänge nur über die Erstellung von 3D-Simulationen möglich. Die

Erstellung von 3D-Simulationen ist zeit- und kostenintensiv. Deshalb ist sie kein geeignetes Werkzeug für die frühe Planungsphase (Zwicker et al. 2016).

Bei der Umsetzung von Arbeitssystemen in MRK sind darüber hinaus besondere technische Schutzmaßnahmen erforderlich. Die Wahl des zugrunde liegenden Sicherheitskonzepts hat signifikante Auswirkungen auf die Produktivität des Arbeitssystems (Oberer-Treitz et al. 2013). In der Anwendung bestehender Methoden zur Planung hybrider Arbeitssysteme finden Aspekte der Arbeitssicherheit vor dem Hintergrund einer Kooperation zwischen Mensch und Roboter keine Berücksichtigung und sind nicht Gegenstand der Montageplanung.

In Abbildung 2.17 ist eine Übersicht der analysierten Methoden der Montageplanung dargestellt. Während eine getrennte Betrachtung von manuellen und roboterbasierten Montagetätigkeiten bei den meisten Methoden möglich ist, wird eine Kooperation von Mensch und Roboter nur bedingt berücksichtigt. Es fehlt eine systematische und allgemeingültige Vorgehensweise zur Planung von Montagesystemen unter Berücksichtigung von MRK, die eine wirtschaftlich sinnvolle Bewertung verschiedener Varianten im Rahmen der frühen Phase der Montageplanung ermöglicht. Vor allem Aspekte der Arbeitssicherheit, die für die Planung von Arbeitssystemen in MRK von elementarer Bedeutung sind, werden in bestehenden Methoden der Montageplanung nur ansatzweise abgedeckt.

		Manuelle Montage	Roboter-basierte Montage	Mensch-Roboter-Kooperation	Zeitdatenermittlung	Arbeitssicherheit	Ergonomie
Kommerzielle Software	3D Automate	◐	●	◐	◐	◐	○
	Delmia	●	●	◐	◐	◐	●
	Process Simulate	●	●	◐	◐	◐	●
	TiCon	●	○	○	◐	○	●
Forschungsarbeiten	Bick (1992)	●	●	○	◐	○	◐
	Beumelburg (2005)	◐	◐	●	○	○	◐
	Choi (1992)	○	●	○	◐	○	○
	Petzelt (2010)	●	○	○	◐	○	◐
	Reichenbach (2011)	●	●	○	◐	○	○
	Ross (2002)	●	◐	○	◐	○	○
	Zwicker (2016)	○	●	○	◐	○	○

Legende

● Schwerpunkt ◐ Teilaspekt ○ nicht behandelt

Abbildung 2.17: Übersicht kommerzieller Software und Forschungsarbeiten zur Montageplanung

3 Anforderung an eine Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation

Ausgehend von der Zielsetzung und der im Stand der Wissenschaft und Technik identifizierten Defizite bestehender Planungssystematiken, werden in diesem Kapitel Anforderungen an die Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in MRK definiert. Anschließend wird unter Berücksichtigung dieser Anforderungen der Aufbau der Methodik beschrieben.

3.1 Definition der Anforderungen

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. Dabei resultieren die Anforderungen, die an das Planungsverfahren gestellt werden, zum einen aus den Anforderungen an das Arbeitssystem, das als Ergebnis der Planung umgesetzt werden soll; zum anderen ergeben sich Anforderungen ausgehend von den Anwendern der Methodik. Neben der Berücksichtigung von Kriterien, die bei der Planung rein manueller oder voll automatisierter Montagelinien berücksichtigt werden müssen, ergeben sich bezüglich der direkten Zusammenarbeit von Mensch und Roboter gesonderte Anforderungen. In Abbildung 3.1 sind Kriterien dargestellt, die bei der Planung zu berücksichtigen sind. Ausgehend von diesen Kriterien werden die Anforderungen an die Methodik abgeleitet.

3.1 Definition der Anforderungen

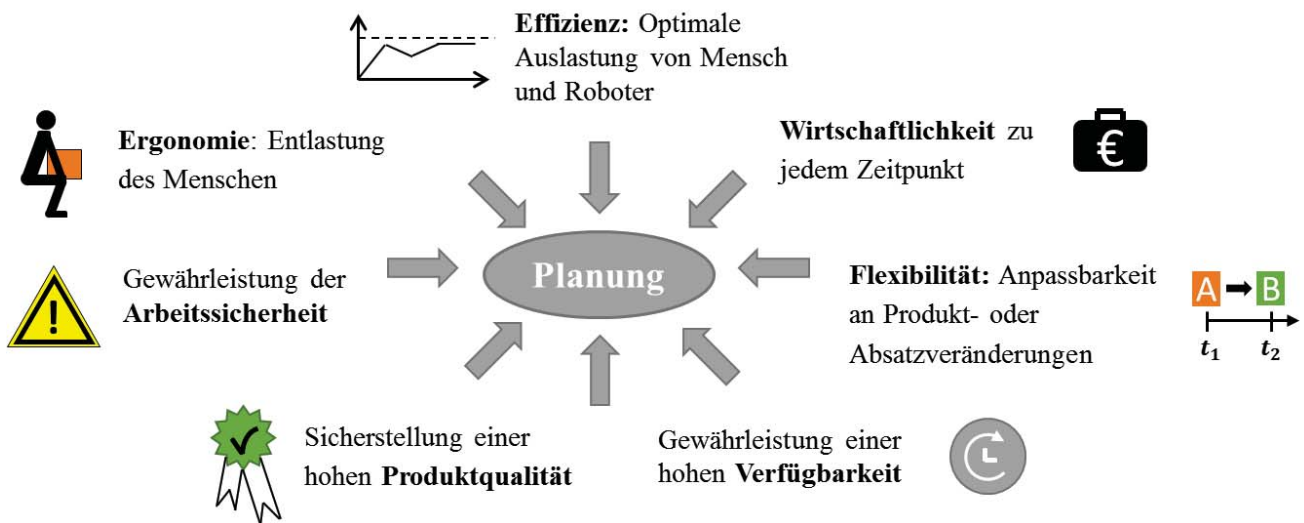


Abbildung 3.1: Kriterien bei der Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation

Der Einfluss auf die Struktur der Fertigungskosten ist in der frühen Phase der Montageplanung am höchsten. Um verschiedene Lösungsvarianten zu bewerten und zu vergleichen, müssen diese grob ausgelegt und erste Leistungskennzahlen berechnet werden. Vor diesem Hintergrund ist der Erstellungsaufwand der Planungskonzepte so gering wie möglich zu halten, um die Methodik sinnvoll in der frühen Phase der Montageplanung einzusetzen. Eine Bewertung unterschiedlicher Alternativen ist nur dann möglich, wenn Planungsstudien mit vertretbarem Aufwand erstellt werden können. Bei der Planung von Montagelinien für komplexe Produkte stellt die Identifikation von Montageoperationen, die für MRK geeignet sind, eine wesentliche Herausforderung dar. Deshalb muss die zu entwickelnde Methodik, den Anwender in der Auswahl der Montageoperationen unterstützen, die einen hohen potentiellen Nutzen für MRK im Vergleich zu einer konventionellen Lösung bieten.

Mensch und Roboter verfügen über unterschiedliche Fähigkeiten. Der Mensch zeichnet sich besonders durch kognitive Fähigkeiten und daraus resultierend durch einen hohen Grad an Flexibilität aus. Im Gegensatz dazu bieten Industrieroboter Vorteile bei der Ausführung kraftraubender und stark repetitiver Aufgaben mit

erhöhten Qualitätsanforderungen. Damit ein Optimum an Flexibilität sowie Verfügbarkeit bei hoher Fertigungsqualität erreicht werden kann, müssen die unterschiedlichen Fähigkeiten von Mensch und Roboter in der Planung berücksichtigt werden.

Um bei einer Kooperation von Mensch und Roboter einen effizienten Arbeitsablauf zu gewährleisten, ist es von großer Bedeutung, die Tätigkeiten von Mensch und Roboter perfekt aufeinander abzustimmen. Hierzu ist es notwendig, die Tätigkeiten der Interaktionspartner in einer gemeinsamen Prozesssprache zu beschreiben. Die Spezifikation und der Grad der Detaillierung der Beschreibung sollten sowohl für den Menschen als auch für den Roboter identisch sein, um eine Vergleichbarkeit der beiden Ressourcen zu gewährleisten. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Bestimmung der Durchführungszeiten. Zum einen bestimmen die Durchführungszeiten in Kombination mit der zu erzielenden Taktzeit, wie viele Montageoperationen an einer Station verrichtet werden können; zum anderen wird die Produktivität und die Wirtschaftlichkeit maßgeblich durch die Durchführungszeit bestimmt. Deshalb besteht eine Anforderung an die Planungsmethodik in der prospektiven Bestimmung der Durchführungszeiten sowohl des Menschen als auch des Roboters. Dabei ist wichtig, dass die Bestimmung mit einem möglichst geringen Erstellungsaufwand verbunden ist, um in der frühen Phase der Montageplanung angewendet werden zu können.

Eine wesentliche Anforderung für ein Arbeitssystem in MRK ist die Gewährleistung der Arbeitssicherheit (Graf 2010). Die Umsetzbarkeit einer Applikation wird maßgeblich durch die Einhaltung sicherheitstechnischer Aspekte bestimmt. Darüber hinaus hat das Sicherheitskonzept signifikante Auswirkungen auf die Produktivität des Arbeitssystems. Dementsprechend ist es essentiell, die Arbeitssicherheit bereits früh in der Planungsphase zu berücksichtigen. Neben der Anforderung an die Berücksichtigung der Arbeitssicherheit bestehen Anforderungen an die Ergonomie. Die Mitarbeiter sollen so weit wie möglich von ergonomisch ungünstigen Tätigkeiten entlastet werden, um gesunde und altersgerechte Arbeitsplätze zu gewährleisten. Dabei

3.2 Konzeption der Planungsmethodik

ist es wichtig, dass Kriterien der Ergonomie bereits prospektiv in der Planungsphase berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu einem korrekativen Einsatz von ergonomischen Verbesserungsmaßnahmen besteht mit der prospektiven Berücksichtigung der Ergonomie erhebliches Potential zur Kosteneinsparung. Zusammenfassend sind diese Anforderungen an die Planungsmethodik in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Anforderungen an die Planungsmethodik

Nr.	Anforderung
1	Anwendbarkeit in der frühen Phase der Montageplanung
2	Identifizierung von Tätigkeiten, die ein hohes Potential für eine Kooperation zwischen Mensch und Roboter bieten
3	Aufteilung der Montagetätigkeiten zwischen Mensch und Roboter unter Berücksichtigung der besonderen Fähigkeiten der Interaktionspartner
4	Beschreibung der Tätigkeiten von Mensch und Roboter in einer gemeinsamen Prozesssprache
5	Prospektive Bestimmung der Durchführungszeiten des Menschen und des Roboters
6	Berücksichtigung von Sicherheitskonzepten für MRK
7	Berücksichtigung von ergonomischen Kriterien

3.2 Konzeption der Planungsmethodik

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation unterstützt den Anwender in der Planung gesunder und effizienter Arbeitsplätze. Die Methodik gliedert sich in die drei Planungsstufen gemäß Abbildung 3.2 und ist im zeitlichen Verlauf der Montageplanung in der Grobplanungsphase angeordnet. Die detaillierte Ausarbeitung der Montagestation im Rahmen der Feinplanung ist nicht Teil der Methodik. Auch ist es nicht das Ziel der Methodik, automatisch Montageabfolgen zwischen Mensch und Roboter zu generieren. Vielmehr dient sie als Leitfaden und Unterstützung der Planung und Bewertung kollaborativer Arbeitssysteme.

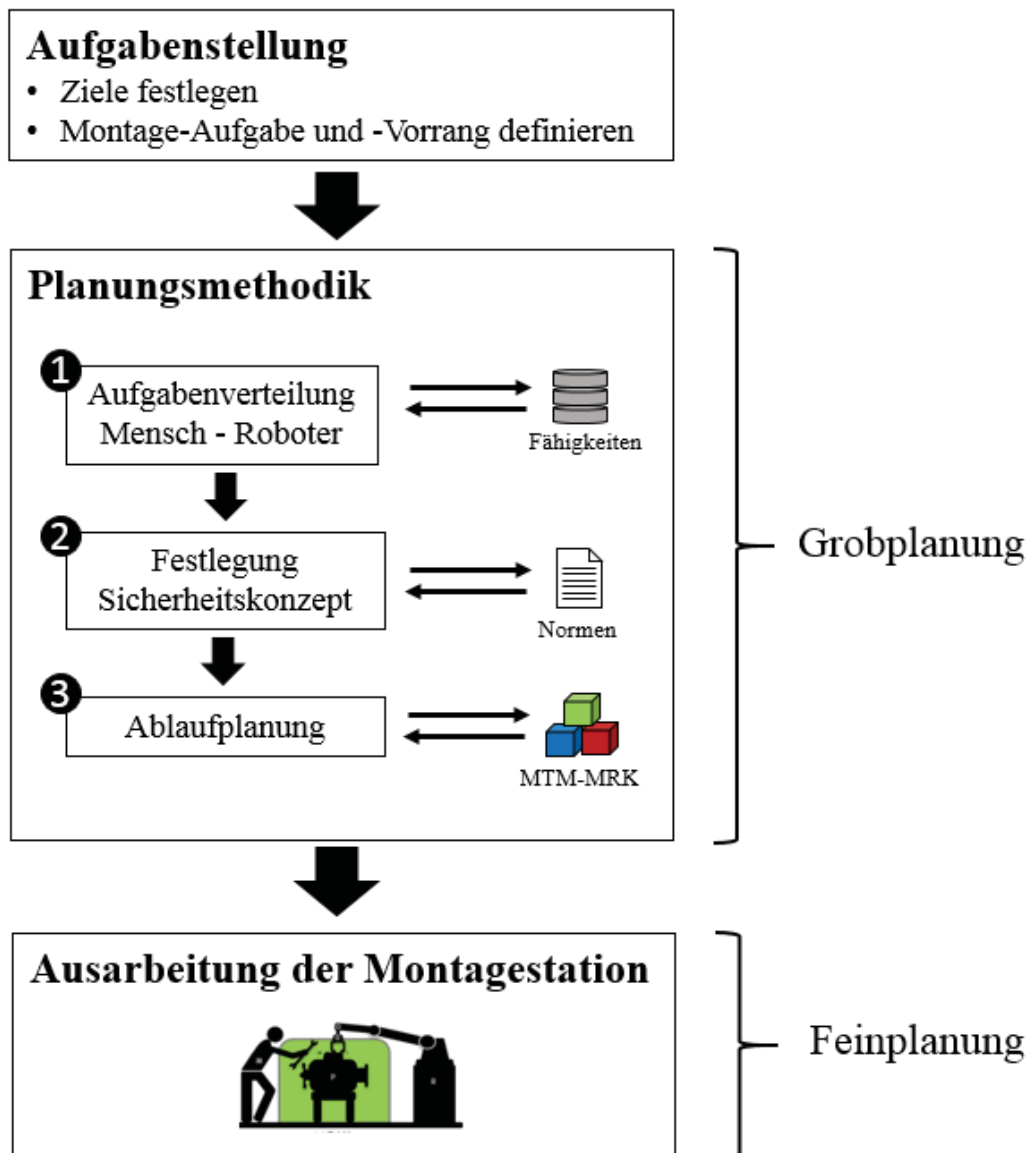


Abbildung 3.2: Aufbau der Planungsmethodik

Mit der Aufgabenstellung legt der Anwender die Ziele fest und beschreibt die Montageaufgabe sowie den Montagevorrang. Anhand eines Kriterienkatalogs werden die Fähigkeiten von Mensch und Roboter über eine Datenbank mit der vorliegenden Montageaufgabe abgeglichen und Fähigkeitskennzahlen der Ressourcen für die einzelnen Montageschritte berechnet. Auf Basis dieser Daten wird eine Aufteilung der

Arbeitsinhalte generiert und ein erster Montageablauf festgelegt. Mit der Berücksichtigung der Fähigkeitskennzahlen wird gewährleistet, dass Mensch und Roboter gemäß ihrer spezifischen Fähigkeiten optimal eingesetzt werden.

Im nächsten Schritt wird das Sicherheitskonzept zur Umsetzung des Arbeitssystems in Mensch-Roboter-Kooperation festgelegt. Mit der Wahl des Sicherheitskonzepts kann die maximal zulässige Robotergeschwindigkeit bzw. der minimal einzuhaltende Sicherheitsabstand berechnet werden, basierend auf den aktuell gültigen Normen. Diese Berechnung liefert eine erste Abschätzung der einzuhaltenden Grenzwerte, die als Eingangsgrößen für den weiteren Planungsprozess dienen. Dabei ist wichtig zu beachten, dass die Berechnungen nicht die Durchführung einer detaillierten Risiko-bewertung ersetzen, sondern lediglich eine erste Abschätzung im Rahmen der Grob-planungsphase darstellen.

Abschließend wird der Ablauf der Kooperation geplant und es werden gemäß der Aufgabenzuordnung Durchführungszeiten berechnet. Die Arbeitsschritte des Menschen und des Roboters werden dazu mit einem Prozessbausteinsystem modelliert. Bei der Modellierung der menschlichen Arbeitsschritte wird dabei auf das bestehende Prozessbausteinsystem MTM-1 zurückgegriffen, während für die Tätigkeiten des Roboters ein neues, zu MTM-1 kompatibles, Prozessbausteinsystem entwickelt wird. Mit der Kombination dieser beiden Systeme ist es möglich, kollaborative Arbeitssysteme zu planen.

Der Montageprozess wird dazu in generische Bewegungselemente unterteilt, mit denen jeder potentielle Montageprozess abgebildet werden kann. Neben Informationen zur Anzahl der erforderlichen Ressourcen und Fähigkeiten werden direkt Taktzeitinformationen generiert. Die Analyse des Arbeitssystems beinhaltet neben der zeitlichen Bewertung auch Informationen zum Prozesstyp und beschreibt somit die Produktionsbedingungen, wie beispielsweise den Gestaltungsgrad der Arbeitsplätze, die Art der Materialbereitstellung und der Produktvielfalt. Dabei ist wichtig, dass sich

verschiedene Varianten des Arbeitssystems bereits in der Planungsphase effektiv vergleichen und bewerten lassen. Abgeleitet von den funktionellen Eigenschaften der MTM-Prozessbausteine (Bokranz et al. 2012b) weisen die roboter-spezifischen Prozessbausteine die folgenden zentralen Eigenschaften auf:

1. Modellbildungsimmanenz: Die Prozessbausteine basieren auf Ergebnisstandards; d. h. das Arbeitssystem wird als Modell abgebildet und es können direkt Soll-Ergebnisse abgeleitet werden ohne diese indirekt von Ist-Ergebnissen abzuleiten.
2. Simulationsfähigkeit: Es ist kein realer Arbeitsplatz nötig, um das Arbeitssystem zu planen. Dadurch ist eine Anwendung auch bei virtuellen Arbeitssystemen möglich und es können bereits in der Produktentstehungsphase verschiedene Varianten evaluiert werden.

Mit der Planung des Arbeitssystems kann überprüft werden, ob die geforderten Vorgaben, wie beispielsweise die Investitionskosten oder die Taktzeit, für das Arbeitssystem eingehalten werden können. Ist dies nicht der Fall, werden in einem iterativen Vorgehen Anpassungen getroffen, bis die gewünschten Vorgaben erfüllt sind. Auf diese Weise wird die Anschaffung redundanter Technologien vermieden und die Ressourcen können bestmöglich ausgelastet werden. Zusammenfassend ist dieses Vorgehen im Ablaufdiagramm in Abbildung 3.3 dargestellt. So ist es möglich, fundierte Entscheidungen über den Montageablauf, basierend auf den Fähigkeiten von Mensch und Roboter, zu treffen sowie verschiedene Lösungsvarianten zu bewerten. Weiterhin wird der Anwender in der Auswahl MRK-spezifischer, Sicherheitskonzepte unterstützt und es können direkt Taktzeitinformationen generiert werden, um den optimalen Montageablauf in MRK zu bestimmen. Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist nicht Bestandteil der Methodik wobei mit den ermittelten Daten der Durchführungszeiten und den verwendeten Ressourcen wesentliche Eingangsgrößen hierfür bereits ermittelt sind.

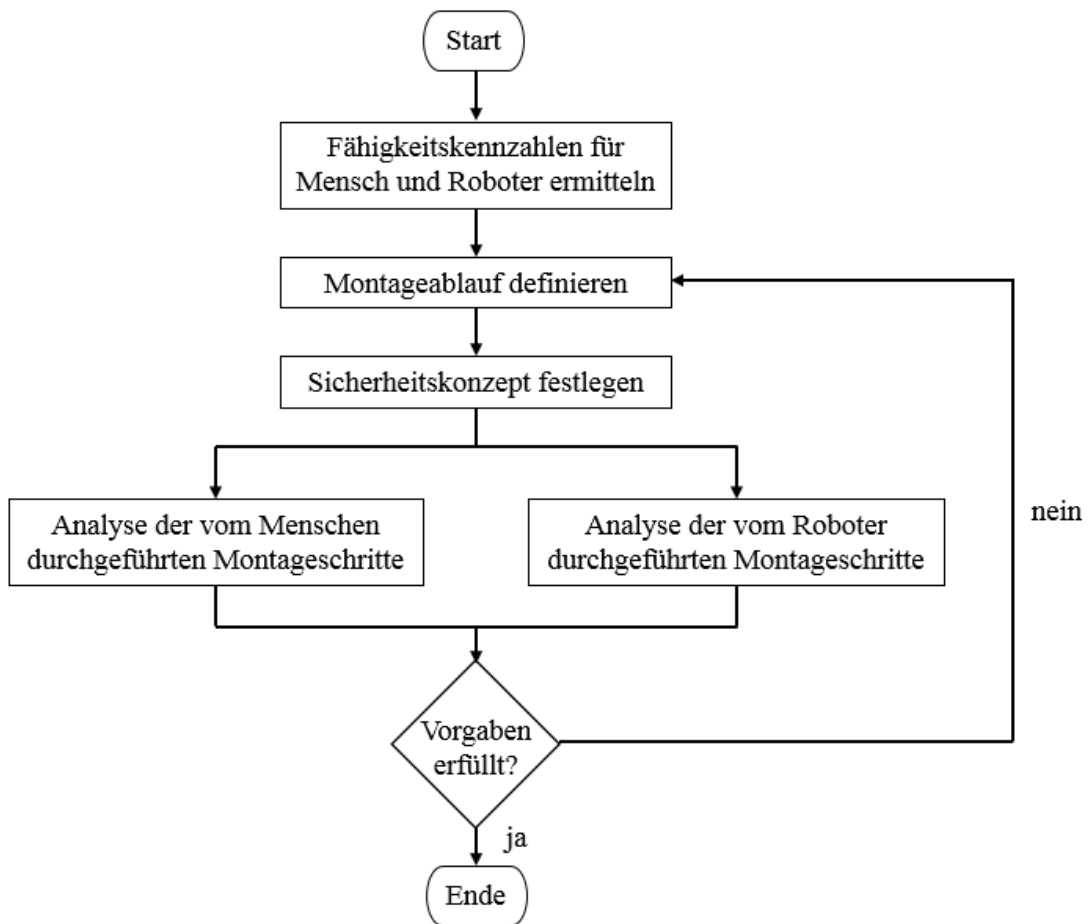


Abbildung 3.3: Ablaufdiagramm der Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation

4 Ausarbeitung der Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation

Ausgehend von den Anforderungen und der Konzeptionierung wird in diesem Kapitel die Methodik ausgearbeitet. Dazu werden Kriterien zur Bewertung der Fähigkeiten des Menschen und des Roboters erarbeitet, Schutzprinzipien für den kollaborativen Betrieb und deren Auswirkung auf die Planung beschrieben sowie Prozessbausteine zur Beschreibung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation definiert.

4.1 Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben

Ein zentraler Aspekt bei der Planung eines hybriden Arbeitssystems ist die Planung des Montageablaufs. Die einzelnen Arbeitsschritte müssen den Ressourcen Mensch und Roboter zugeordnet werden. Anhand der unterschiedlichen Fähigkeiten von Mensch und Roboter kann eine Entscheidung über die Verteilung der Montageaufgaben getroffen werden. Um diese Entscheidung so objektiv wie möglich zu gestalten, wurde in der Arbeit Beumelburgs (2005) das Konzept der fähigkeitsorientierten Ablaufplanung entwickelt. In diesem Kapitel wird aufbauend auf dieser Arbeit ein Kriterienkatalog aufgestellt, mit dem die Eignung von Mensch und Roboter für eine bestimmte Montageoperation bewertet werden kann. Zusätzlich wird eine Methodik entwickelt, mit der das Potential zur Automatisierung in Mensch-Roboter-Kooperation quantifiziert werden kann. Aus einer Sequenz von Montageaufgaben werden diejenigen identifiziert, die den größten potentiellen Nutzen für eine Umsetzung in einer hybriden Arbeitsstation bieten.

4.1.1 Definition der Kriterien zur Fähigkeitsbeurteilung

Die Grundlage zur Beurteilung der Fähigkeit von Mensch und Roboter zur Durchführung einer Montageaufgabe stellt ein Kriterienkatalog dar. Für jedes Kriterium sind Ausprägungen definiert, mit denen eine Montageaufgabe charakterisiert

werden kann. Anhand der jeweils vorliegenden Ausprägungen werden Fähigkeitskennzahlen berechnet, mit denen eine Aussage über die Eignung einer Ressource für die Ausführung einer bestimmten Montageoperation getroffen wird. Speziell vor dem Hintergrund einer Kooperation von Mensch und Roboter werden Kriterien bezüglich der Ergonomie, des Montageprozesses sowie des Bauteils berücksichtigt. Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche wurden die Kriterien wie in Tabelle 4.1 angegeben, übernommen bzw. angepasst oder neu aufgestellt.

Mit der Auswahl der Ausprägungen für das jeweils betrachtete Kriterium ergeben sich direkt Folgerungen für die Eignung des Menschen bzw. des Roboters für die betrachtete Montageoperation. Besondere Bedeutung haben dabei die Kriterien der Ergonomie, da diese durch den gezielten Einsatz des Roboters in einer Kooperation deutlich verbessert werden kann. Ist z.B. für eine Montageaufgabe Überkopfarbeit notwendig, wodurch die Arbeitsposition negativ beeinflusst wird, hat dies eine negative Folge für die Bewertung der Fähigkeit des Menschen zur Durchführung dieses Arbeitsschritts. Genauso wirkt sich ein hohes Bauteilgewicht negativ auf die Ergonomie aus, wobei dabei auch die Ausführungsbedingungen sowie die Anzahl der Wiederholungen pro Schicht beachtet werden müssen. Über eine Verknüpfung der Kriterien K_1 , K_2 und K_3 gemäß Tabelle 4.1 kann die ergonomische Belastung differenziert betrachtet werden (BauA 2001). Die Wahl der Ausprägungen von Kriterium K_2 basiert auf dem Siemens-Burandt Verfahren zum Heben und Tragen von Lasten zur Abschätzung einer zumutbaren Arbeitsbelastung (Burandt 1978).

Tabelle 4.1: Kriterienkatalog zur Ablaufplanung von Arbeitssystemen

Kriterium		Ausprägung	
Ergonomie			
K₁	Wird die Arbeitsposition oder Haltung durch die Position der Fügestelle negativ beeinflusst?	A _{1,1}	Ja
		A _{1,2}	Teilweise
		A _{1,3}	Nein
K₂	Wie hoch ist die Masse des zu handhabenden Werkzeugs oder Bauteils?	A _{2,1}	< 1 kg
		A _{2,2}	1 kg – 8 kg
		A _{2,3}	> 8 kg
K₃	Wie viele Wiederholungen des Montagevorgangs treten innerhalb einer Schicht auf?	A _{3,1}	< 40
		A _{3,2}	40-500
		A _{3,3}	> 500
K₄	Sind Hilfs-, Betriebs-, Werkstoffe oder Umgebungseinflüsse potentiell gesundheitsschädlich für den Mitarbeiter? [Sma-88]	A _{4,1}	Ja
		A _{4,2}	Nein
K₅	Auf welcher Höhe befindet sich die Fügestelle oder das zu handhabende Bauteil?	A _{5,1}	< 1 m
		A _{5,2}	1 m - 1,5 m
		A _{5,3}	> 1,5 m
K₆	Weist das zu handhabende Bauteil scharfe Kanten auf?	A _{6,1}	Ja
		A _{6,2}	Nein
Montageprozess			
K₇	Welche Art der Fügepassung liegt vor? [Hoi-00], [Sra-98]	A _{7,1}	Spielpassung
		A _{7,2}	Grenzpassung
		A _{7,3}	Übermaßpassung
K₈	Besteht während des Montageprozesses die Möglichkeit des Vertauschens von Fügeteilen oder Fügstellen?	A _{8,1}	Ja
		A _{8,2}	Nein
K₉	Wie wird die Basis oder das Fügeteil bereitgestellt? [Beu-02]	A _{9,1}	Positioniert und orientiert
		A _{9,2}	Vermischt liegend
Bauteil			
K₁₀	Ist das Bauteil kratz-, bruch- und/oder formempfindlich? [Sra-99]	A _{10,1}	Ja
		A _{10,2}	Nein
K₁₁	Wie ist die Steifigkeit des Bauteils einzustufen? [Sra-98]	A _{11,1}	Starr
		A _{11,2}	Elastisch
		A _{11,3}	Biegeschlaff
K₁₂	Sind Greif- und Zentriermöglichkeit des zu greifenden Bauteils gegeben? [Sma-88]	A _{12,1}	Ja
		A _{12,2}	Nein

4.1 Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben

Die Ausprägungen von Kriterium K_3 beziehen sich auf Hebe- oder Umsetzvorgänge und sind nicht anwendbar auf eine Haltedauer größer als fünf Sekunden. Die Werte sind nicht als exakte Grenzwerte zu verstehen, sondern dienen als Anhaltspunkt, um zu überprüfen ob kritische Grenzen womöglich erreicht werden. Eine detaillierte Betrachtung muss im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung erfolgen.

Bei Verwendung des Schutzprinzips der Kraft- und Leistungsbegrenzung ergeben sich im Falle einer Kollision gemäß ISO TS 15066 unterschiedliche Grenzwerte für Kraft und Druck je nach betroffener Körperregion. Die Grenzwerte für eine Kollision mit dem Oberschenkel liegen z. B. bei 250 N/cm^2 und 240 N , während diese bei einer Kollision im Bereich des Gesichts 110 N/cm^2 und 65 N liegen (ISO/TS 15066: 2016). Vor diesem Hintergrund wird mit Kriterium K_5 die Arbeitshöhe berücksichtigt. Weiterhin ist es wichtig, dass scharfe Kanten an allen Bauteilen und Werkzeugen vermieden werden, um im Falle einer Kollision die Druckwerte so gering wie möglich zu halten. Wird z. B. für Kriterium K_6 die Ausprägung „Ja“ gewählt, kann an dieser Stelle eine entsprechende Handlungsempfehlung zur Vermeidung scharfer Kanten gegeben werden.

Die weiteren Kriterien bezüglich des Montageprozesses und des Bauteils beziehen sich auf die technische Umsetzbarkeit der Montageoperationen sowie die zu erwartende Prozessqualität. Werden die Bauteile beispielsweise ungeordnet bereitgestellt, ist eine Automatisierung dieses Arbeitsschritts mit zusätzlichen Kosten verbunden, was sich negativ auf die Bewertung der Fähigkeit des Roboters auswirkt. Ebenso ist eine Automatisierung mit biegeschlaffen Teilen oder nicht vorhandenen Greif- und Zentriermöglichkeiten komplexer und damit kostenaufwendiger. Besteht hingegen die Möglichkeit des Vertauschens von Bauteilen oder Fügestellen, ist die Fähigkeit des Roboters höher als die des Menschen einzustufen, da mit dem Einsatz des Roboters derartige Fehler nicht auftreten können und die Prozessqualität gesteigert wird. Zwar kann für einen manuellen Arbeitsplatz durch Verwendung zusätzlicher Einrichtungen

wie Pick2Light oder Pokayoke auch ein erhöhtes Qualitätsniveau erreicht werden, jedoch sind auch diese Maßnahmen mit zusätzlichem Aufwand und Kosten verbunden.

4.1.2 Berechnung der Fähigkeitskennzahlen und Eignungsgrade

Für jedes Kriterium und jede Ausprägung gemäß dem Kriterienkatalog aus Tabelle 4.1 wird eine Bewertung der Ressourcen Mensch und Roboter vorgenommen und damit quantifiziert, welche Fähigkeit der Mensch bzw. der Roboter für die betrachtete Montageoperation und das betrachtete Kriterium aufweist. Diese Fähigkeit wird durch eine Fähigkeitskennzahl beschrieben. Damit ergibt sich eine objektive Bewertung der Fähigkeiten von Mensch und Roboter anhand derer ein erster Montageablauf festgelegt werden kann und eine Verteilung der Arbeitsinhalte vorgenommen werden kann.

Die Berechnung der Fähigkeitskennzahlen erfolgt auf Grundlage der erwarteten Fähigkeit der Ressource in Bezug auf die Bewertungsaspekte Taktzeit, Zusatzinvestment, Arbeits- und Prozessqualität. Die betrachtete Ressource wird dabei immer im Vergleich zur jeweils anderen Ressource bewertet. Dabei erfolgt eine Bewertung, ob sie besser (Bewertung mit 1), gleichwertig (Bewertung mit 0,5) oder schlechter (Bewertung mit 0) in Bezug auf die Bewertungsaspekte gemäß Tabelle 4.2 ist. Für die Abstufung der Bewertung wurde gemäß (Beumelburg 2005) eine verhältnismäßig grobe Einteilung gewählt, da der Zeitpunkt der Bewertung in der frühen Phase der Montageplanung angesiedelt ist und lediglich eine erste Einschätzung über die Eignung der Ressource getroffen werden soll. Eine detaillierte Betrachtung und Quantifizierung aller Bewertungsaspekte muss im Rahmen der weiteren Detailplanung erfolgen.

Tabelle 4.2: Bewertungsaspekte und zugehöriges Formelzeichen

Bewertungsaspekt	Formelzeichen	Wertebereich
Taktzeit	F_Z	$\in \{0; 0,5; 1\}$
Zusatzinvest	F_K	$\in \{0; 0,5; 1\}$
Prozessqualität	F_{PQ}	$\in \{0; 0,5; 1\}$
Arbeitsqualität	F_{AQ}	$\in \{0; 0,5; 1\}$

Anschließend wird eine Aggregation der Fähigkeitskennzahlen für die einzelnen Bewertungsaspekte durchgeführt, um die normierte Fähigkeitskennzahl $F_{Mges,i,j}$ für das Kriterium i mit der Ausprägung j zu berechnen. Die Normierung der Fähigkeitskennzahl ist in Gleichung (4.1) mit einer Gewichtung von $\frac{1}{4}$ dargestellt. Diese Gewichtung kann angepasst werden, um beispielsweise unterschiedlichen Unternehmenszielen gerecht zu werden. Mit der Bewertungsskala gemäß Tabelle 4.2 ergibt sich die Fähigkeitskennzahl des Roboters als Differenz der maximalen möglichen Eignung und der Fähigkeitskennzahl des Menschen gemäß Gleichung (4.2). Zusammenfassend ist die Bildung der aggregierten Fähigkeitskennzahlen in Tabelle 4.3 dargestellt.

$$F_{Mges,i,j} = \frac{F_Z}{4} + \frac{F_K}{4} + \frac{F_{PQ}}{4} + \frac{F_{AQ}}{4} \quad (4.1)$$

$$F_{Rges,i,j} = 1 - F_{Mges,i,j} \quad (4.2)$$

Tabelle 4.3: Bewertung und Aggregation der Fähigkeitskennzahlen nach
(Beumelburg 2005)

Kriterium	Ausprägung	Mensch				Fähigkeitskennzahl Mensch	Roboter				Fähigkeitskennzahl Roboter
		Taktzeit	Zusatzinvestment	Prozessqualität	Arbeitsqualität		Taktzeit	Zusatzinvestment	Prozess	Ergonomie	
K_i	$A_{i,1}$	$F_{Z,i,1}$	$F_{K,i,1}$	$F_{PQ,i,1}$	$F_{AQ,i,1}$	$F_{Mges,i,1}$	$1-F_{Z,i,1}$	$1-F_{K,i,1}$	$1-F_{PQ,i,1}$	$1-F_{AQ,i,1}$	$F_{Rges,i,1}$
	$A_{i,2}$	$F_{Z,i,2}$	$F_{K,i,2}$	$F_{PQ,i,2}$	$F_{AQ,i,2}$	$F_{Mges,i,2}$	$1-F_{Z,i,2}$	$1-F_{K,i,2}$	$1-F_{PQ,i,2}$	$1-F_{AQ,i,2}$	$F_{Rges,i,2}$
	...										

Sobald alle Ausprägungen ausgewählt sind, werden die Fähigkeitskennzahlen aller zutreffenden Ausprägungen gewichtet und es wird der normierte Gesamteignungsgrad des Menschen e_M und des Roboters e_R gemäß Gleichung (4.3) und (4.4) für die jeweilige Montageoperation berechnet. Bei der Berechnung der Gesamteignungsgrade müssen nicht alle Kriterien verwendet werden. Sofern ein Kriterium keine Relevanz für die betrachtete Montageoperation besitzt, wird dieses nicht für den weiteren Entscheidungsprozess berücksichtigt. Die Wahl der Gewichte g_i erfolgt durch den Anwender abhängig von der betrachteten Montageoperation. Damit kann die Berechnung des Eignungsgrades genau auf die Gegebenheiten der betrachteten Montageoperation angepasst werden. Bestehen beispielsweise Probleme mit der Prozessqualität oder der Ergonomie, kann den entsprechenden Kriterien mehr Gewicht verliehen werden und die Bewertung entsprechend angepasst werden. Zusammenfassend ist die Bildung der Gesamteignungsgrade in Tabelle 4.4 dargestellt.

4.1 Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben

$$e_M = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot F_{Mges,i,j}}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad e_M \in \{0, \dots, 1\} \quad (4.3)$$

$$e_R = 1 - e_M = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot F_{Rges,i,j}}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad e_R \in \{0, \dots, 1\} \quad (4.4)$$

Tabelle 4.4: Berechnung der Eignungsgrade nach (Beumelburg 2005)

Kriterium.	Ausprägung	Ausprägung zutreffend	Fähigkeits- kennzahl Mensch	Gewichtete Fähigkeits- kennzahl Mensch	Fähigkeits- kennzahl Roboter	Gewichtete Fähigkeits- kennzahl Roboter
K_1	$A_{1,1}$	1	$F_{Mges,1,1}$	$g_1 \cdot F_{Mges,1,1}$	$F_{Rges,1,1}$	$g_1 \cdot F_{Rges,1,1}$
	$A_{1,2}$	0	$F_{Mges,1,2}$		$F_{Rges,1,2}$	
...
K_n	$A_{n,1}$	0	$F_{Mges,n,1}$		$F_{Rges,n,1}$	
	
	$A_{n,k}$	1	$F_{Mges,n,k}$	$g_n \cdot F_{Mges,n,k}$	$F_{Rges,n,k}$	$g_n \cdot F_{Rges,n,k}$
				e_M		e_R

Die Bewertung der Kriterien ist nur einmalig festzulegen. Dabei ist es zu empfehlen, die Bewertung in einer Expertenrunde vorzunehmen, um das Erfahrungswissen mehrerer Personen zu berücksichtigen und einfließen zu lassen. Anschließend kann dieselbe Datenbasis universell angewendet werden und es müssen nur die jeweils relevanten Kriterien und Ausprägungen gewählt werden. Auf diese Weise wird der Einfluss subjektiver Einflüsse minimiert und gleichzeitig der Aufwand zur Berechnung der Fähigkeitskennzahlen wesentlich reduziert.

4.1.3 Identifizierung des Potentials für Mensch-Roboter-Kooperation

Mit der Berechnung der Eignungsgrade ist es möglich, eine Sequenz von Montageoperationen zu analysieren. Für jede Montageoperation ist anhand der Eignungsgrade $e_{M,i}$ und $e_{R,i}$ direkt die Fähigkeit einer Ressource für eine Montageoperation

O_i ersichtlich. Beispielhaft ist in Tabelle 4.5 eine Sequenz von Montageoperationen mit den entsprechenden Eignungsgraden dargestellt. In der Planung komplexer Montagelinien werden mehrere Montageoperationen zu einer Montagestation zusammengefasst. Mittels MRK ist es möglich, die Montageoperationen einer Station zwischen Mensch und Roboter aufzuteilen. Um in einer Sequenz von aufeinanderfolgenden Montageoperationen diejenigen zu identifizieren, die das höchste Potential für MRK bieten, werden die Differenzen der Eignungsgrade einer Operation gemäß Gleichung (4.5) betrachtet.

Tabelle 4.5: Analyse einer Sequenz von Montageoperationen

Montageoperation	Eignungsgrad Mensch	Eignungsgrad Roboter
O_1	$e_{M,1}$	$e_{R,1}$
O_2	$e_{M,2}$	$e_{R,1}$
...
O_n	$e_{M,n}$	$e_{R,n}$

$$\Delta e_{MR,i} = e_{M,i} - e_{R,i} \quad \in \{-1; \dots; 1\} \quad (4.5)$$

Ein Wert von $\Delta e_{MR,i} = 1$ repräsentiert die maximal mögliche Eignung des Menschen für eine Montageoperation, wobei $\Delta e_{MR,i} = -1$ die maximal mögliche Eignung des Roboters für die betrachtete Montageoperation bezeichnet. Mit dieser Definition kann die Eignung benachbarter Montageoperationen betrachtet werden. Für eine Sequenz von $n+1$ Montageoperationen wird die Differenz des maximalen und des minimalen Werts von $\Delta e_{MR,i}$ für die betrachtete Sequenz von Montageoperationen gemäß (4.6) gebildet und normiert. Daraus ergibt sich der Eignungsgrad $e_{MRK,i}$, mit dem direkt die Eignung einer Montageoperation i und der n nachgelagerten Operationen für die Umsetzung in MRK beschrieben wird. Je höher der Wert für $e_{MRK,i}$, desto höher das Potential für MRK, da unmittelbar benachbarte Montageoperationen sowohl eine hohe

4.1 Fähigkeitsorientierte Verteilung von Montageaufgaben

Eignung für den Menschen als auch eine hohe Eignung für den Roboter aufweisen. Auf diese Weise kann eine komplette Montagelinie analysiert werden, wobei diejenigen Montageoperationen identifiziert werden, die sich am besten für MRK eignen (Schröter et al. 2016b). Beispielhaft ist dies für die Sequenz aus Tabelle 4.5 in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Wahl der Anzahl der zu betrachtenden benachbarten Stationen kann abhängig von der angestrebten Taktzeit und der durchschnittlichen Durchführungszeit der einzelnen Montageoperationen bestimmt werden.

$$e_{MRK,i} = \frac{\max(\Delta e_{MR,i}; \dots; \Delta e_{MR,i+n}) - \min(\Delta e_{MR,i}; \dots; \Delta e_{MR,i+n})}{2} \quad (4.6)$$

$$e_{MRK,i} \in \{0; \dots; 1\}$$

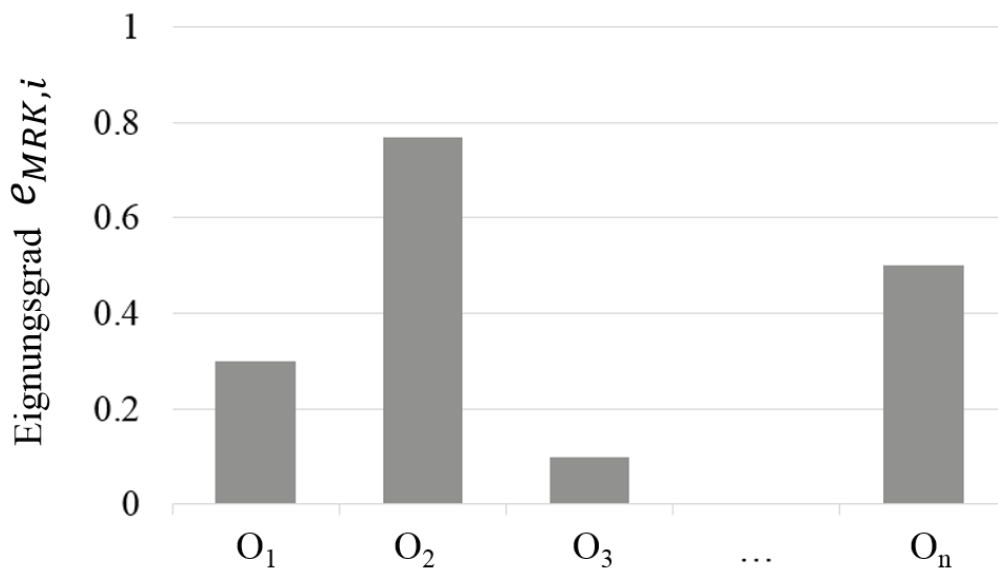


Abbildung 4.1: Eignungsgrad $e_{MRK,i}$ für eine Sequenz von Montageoperationen

4.2 Schutzprinzipien für den kollaborativen Betrieb

Bei einem Arbeitssystem in Mensch-Roboter-Kooperation kommt der Arbeitssicherheit ein besonderer Stellenwert zu. Um eine Kooperation zu ermöglichen, sind Mensch und Roboter nicht mehr durch trennende Schutzeinrichtungen separiert. Dementsprechend ergibt sich ein neues Gefährdungspotential, das durch geeignete Schutzmaßnahmen auf ein ungefährliches Maß zu reduzieren ist (Oberer-Treitz et al. 2011). Erst unter Verwendung dieser Schutzmaßnahmen ist ein kollaborativer Betrieb möglich. Zudem ergeben sich je nach Schutzkonzept unterschiedliche Auswirkungen auf die Investitionskosten, den Platzbedarf und die Produktivität des Arbeitssystems. Deshalb ist es von zentraler Bedeutung, das Schutzkonzept des Arbeitssystems bereits früh in der Planungsphase zu berücksichtigen (Schröter et al. 2016b).

Eine der wesentlichen Voraussetzungen zur Umsetzung einer Applikation in MRK ist die Erstellung einer Risikobeurteilung des Gesamtsystems. Dazu zählt die Betrachtung der Roboter-Kinematik, aber auch die Betrachtung des Bauteils, des Werkzeugs und aller Peripheriegeräte. Ein Roboter, der für MRK ausgelegt ist, ist dabei als unvollständige Maschine zu verstehen. Durch das Anbringen von applikations-spezifischen Werkzeugen wie z.B. Greifern oder Schraubwerkzeugen können neue Gefahrenmomente entstehen, die in der Risikobeurteilung des Gesamtsystems berücksichtigt werden müssen. Der Hersteller der Gesamtanlage hat den für den Menschen sicheren kollaborativen Betrieb zu untersuchen und in Form einer CE-Konformitätserklärung (Conformité Européenne) gemäß Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) nachzuweisen (Bauer et al. 2016). Der Anlagenbetreiber ist gemäß Arbeitsschutzgesetz zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung verpflichtet. Mit der Gefährdungsbeurteilung werden arbeitsbedingte Gefährdungen ermittelt und geeignete Schutzmaßnahmen getroffen. Dies trifft insbesondere auf Gefährdungen resultierend aus Umgebungseinflüssen zu, die nicht mit der Risikobeurteilung durch den Anlagenhersteller berücksichtigt werden

können. Dabei sind die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Gesundheitsschutz für die Beschäftigten gemäß Betriebssicherheitsverordnung einzuhalten.

In der Norm für Industrieroboter DIN ISO 10218-1 werden die vier folgenden Schutzprinzipien unterschieden (s. auch Abschnitt 2.1):

- Sicherheitsbewerteter überwachter Halt
- Handführung
- Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung
- Leistungs- und Kraftbegrenzung

Alle vier Schutzprinzipien haben, neben der Erhöhung der Arbeitssicherheit, Einschränkungen zur Folge bzw. erfordern bestimmte Rahmenbedingungen. So wirkt sich beispielsweise eine Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung unmittelbar auf die Produktivität des Arbeitssystems aus und bringt je nach eingesetzter Sensorik zusätzliche Investitionskosten mit sich. Die Anforderungen der unterschiedlichen Schutzprinzipien sowie deren Auswirkungen auf die Planung des Arbeitssystems werden im Folgenden gemäß den aktuell gültigen Normen beschrieben. Weiterhin werden formelbasierte Zusammenhänge aufgestellt, um Abschätzungen über die Produktivität basierend auf dem zu Grunde liegenden Schutzprinzip zu treffen. Die Berechnung konkreter Zahlenwerte hängt stark von den exakten Rahmenbedingungen und der verwendeten Hardware ab. Die nachfolgend aufgestellten Formelzusammenhänge stellen häufig auftretende Anwendungsfälle dar, müssen aber in jedem Fall für die spätere Umsetzung eines Arbeitssystems detailliert in der Risikobeurteilung betrachtet werden.

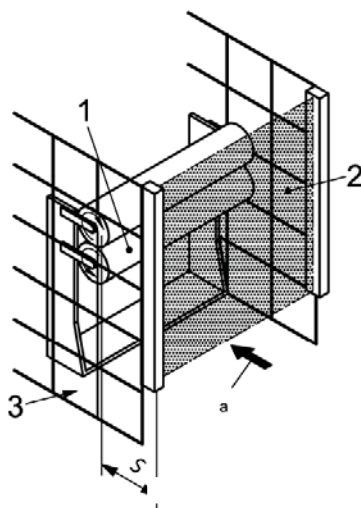
4.2.1 Sicherheitsbewerteter überwachter Halt

Mit der Methode des sicherheitsbewerteten überwachten Halts wird der Roboter gestoppt, bevor der Mensch den Kollaborationsraum betritt. Ein Betreten des

Kollaborationsraums kann z.B. erfolgen, um ein Werkstück einzulegen oder zu entnehmen oder um andere Arbeitsschritte bei still stehendem Roboter durchzuführen. Sobald der Mitarbeiter den Kollaborationsraum verlassen hat, kann der Roboter seine Arbeit automatisch wieder aufnehmen. Der Kollaborationsraum muss dabei so gestaltet sein, dass die Abstände gemäß ISO TS 13855 eingehalten werden (DIN EN ISO 13855: 2010). Für berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen berechnet sich der Mindestabstand S vom Schutzfeld zum Gefährdungsbereich gemäß Gleichung (4.7), wobei dieser mindestens 100 mm betragen muss. Der Parameter K bezeichnet die Annäherungsgeschwindigkeit des Körpers oder von Körperteilen, C den Eindringabstand und T die Nachlaufzeit des Gesamtsystems. Der Eindringabstand C berechnet sich anhand des Sensordetektionsvermögens gemäß Gleichung (4.8). Beispielhaft ist die orthogonale Anordnung eines Schutzfelds in Bezug auf den Gefährdungsbereich in Abbildung 4.2 dargestellt.

$$S = (K * T) + C \quad (4.7)$$

$$C = 8 * (d - 14) \quad (4.8)$$



Legende

- 1: Gefährdungsbereich
- 2: Schutzfeld
- 3: Feststehende trennende Schutzeinrichtung
- a : Annäherungsrichtung
- S : Mindestabstand

Abbildung 4.2: Schutzfeld orthogonal zur Annäherungsrichtung (DIN EN ISO 13855: 2010)

In Abbildung 4.3 ist der Mindestabstand für eine berührungslos wirkende Schutz- einrichtung mit einer Höhe von 2000 mm gemäß Gleichung (4.8) in Abhängigkeit der Nachlaufzeit dargestellt. Der Eindringabstand C wird anhand des Sensordetektions- vermögens d gemäß Gleichung (4.8) berechnet. Das Sensordetektionsvermögen wird mit $d = 40$ mm angenommen und die Annäherungsgeschwindigkeit wird zu 1600 mm/s definiert. Ab einem Mindestabstand von 500 mm wird gemäß ISO TS 13855 Abschnitt 6.2.3. mit einer Annäherungsgeschwindigkeit von 2000 mm/s gerechnet. Mithilfe dieses bereichsweisen linearen Zusammenhangs kann ein erster Richtwert für den einzuhaltenden Mindestabstand berechnet werden. Dabei ist wichtig, dass die auf diese Weise berechneten Werte nur einen Anhaltspunkt über die geo- metrischen Gegebenheiten in der Planungsphase geben. Für die Erstellung der Risiko- beurteilung muss eine detaillierte Betrachtung des Anwendungsfalls erfolgen. Dazu zählen die Beachtung der Höhe des Gefahrenbereichs und der Höhe des Schutzfeldes sowie der Orientierung des Schutzfeldes, um ein eventuelles Hinüberreichen über das Schutzfeld zu berücksichtigen (s. Abbildung 4.4)

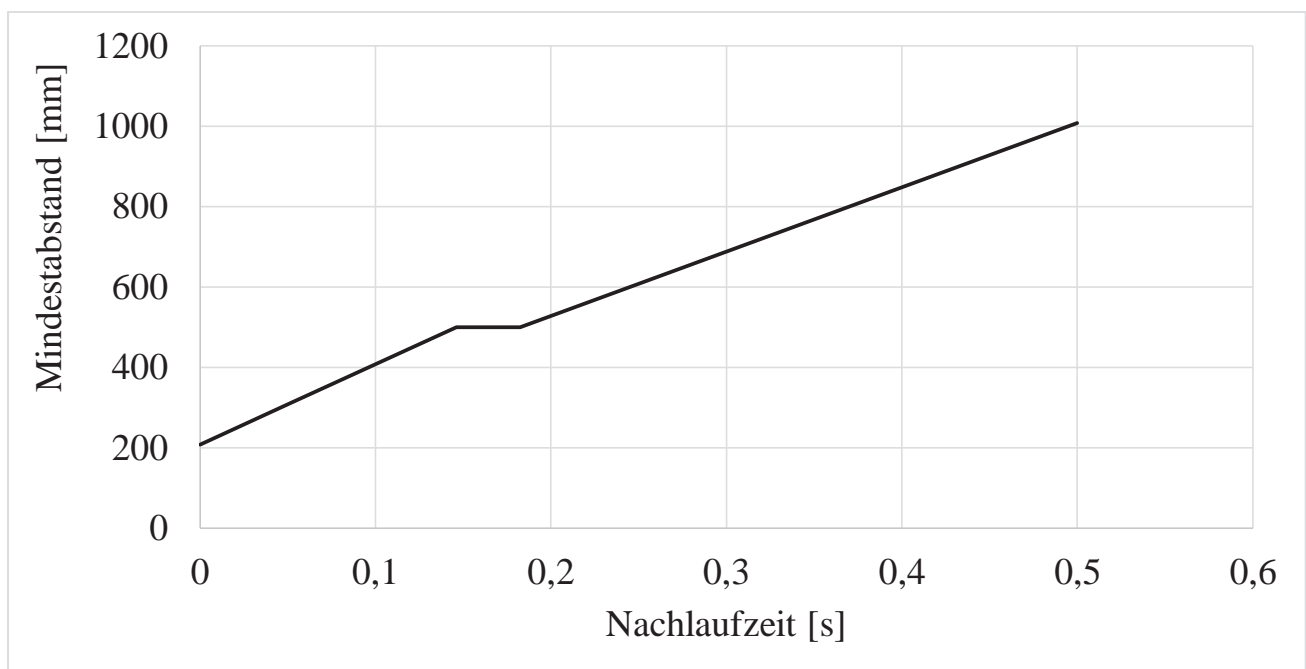
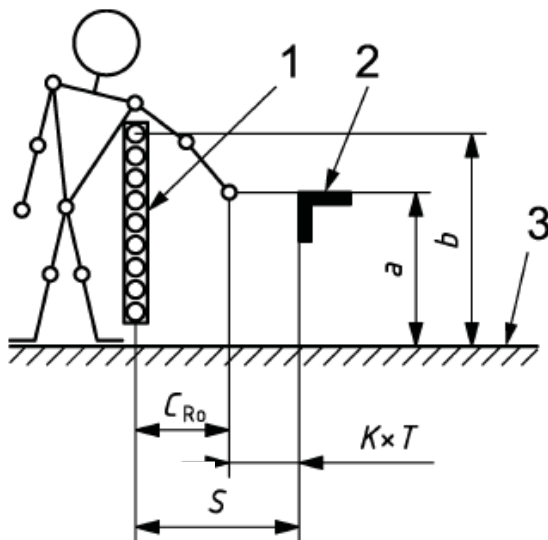


Abbildung 4.3: Mindestabstand bei orthogonaler Anordnung des Schutzfeldes zur Gefahrenstelle in Abhängigkeit der Nachlaufzeit

$$S = \begin{cases} \left(2000 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * T\right) + C & 0,05 > T \leq 0,15 \\ 500 \text{ mm} & 0,15 > T \leq 0,1825 \\ \left(1600 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * T\right) + C & T > 0,1825 \end{cases} \quad (4.9)$$



- 1: Berührungslos wirkende Schutzeinrichtung
- 2: Gefährdungsbereich
- 3: Bezugsebene
- a: Höhe des Gefährdungsbereichs
- b: Höhe des Schutzfeldes
- C: Eindringtiefe
- S: Mindestabstand

Abbildung 4.4: Hinüberreichen über ein senkrecht wirkendes Schutzfeld
(DIN EN ISO 13855: 2010)

4.2.2 Handführung

Mit dem Schutzprinzip der Handführung kann der Roboter ähnlich wie ein Handhabungsgerät zum Heben schwerer Lasten eingesetzt werden. Dabei wird der Endeffektor des Roboters durch den Menschen geführt. Bevor der Mensch dazu den Kollaborationsraum betritt, muss der Roboter einen sicherheitsbewerteten Halt durchführen und erst durch das Betätigen einer Freigabeeinrichtung, die in unmittelbarer Nähe des Endeffektors angebracht ist, kann der Roboter bewegt werden. Sobald der Mensch den Kollaborationsraum verlassen hat, kann der Roboter unter Einhaltung der Mindestabstände gemäß Abschnitt 4.2.1 autonom arbeiten. Bei der Handführung muss der Roboter mit einer sicherheitsbewerteten Geschwindigkeit betrieben werden. Der

Grenzwert hierfür wird in der Risikobeurteilung festgelegt (DIN EN ISO 10218-1:2012).

4.2.3 Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Bei Verwendung des Schutzprinzips der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung können sich Mensch und Roboter zeitgleich in einem gemeinsamen Arbeitsraum bewegen. Um die Sicherheit des Menschen zu gewährleisten, muss zu jeder Zeit ein minimaler Schutzabstand zwischen Mensch und Roboter eingehalten werden. Sobald der Abstand zwischen Mensch und Roboter unter diese Grenze fällt, stoppt der Roboter automatisch. Dabei wird die Distanz des minimalen Schutzabstandes gemäß TS 15066 nach Formel (4.10) berechnet. Der Schutzabstand ist direkt abhängig von der Geschwindigkeit des Roboters v_r , der Geschwindigkeit des Menschen v_h , sowie der Reaktionszeit des Roboters T_r und der Zeit T_s , die zum Stoppen des Systems benötigt wird. Der Eindringabstand C beschreibt gemäß ISO TS 13855 die Strecke, die ein Körperteil in den Gefahrenbereich eindringen kann, bevor es durch einen Sensor erkannt wird. Die Konstante Z_d beschreibt die Positionsunsicherheit des Menschen, aufgrund der Messtoleranz des verwendeten Sensors und Z_r analog dazu die Positionsunsicherheit des Roboters.

$$S_p(t_0) = S_h + S_R + S_S + C + Z_d + Z_r \quad (4.10)$$

$$\text{mit } S_h = \int_{t_0}^{t_0+T_r+T_s} v_h(t)dt, \quad S_r = \int_{t_0}^{t_0+T_r} v_r(t)dt,$$

$$\text{und } S_S = \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_r+T_s} v_s(t)dt$$

Tabelle 4.6: Variablenbezeichnung für Formel (4.10)

Variable	Beschreibung
$S_p(t_0)$	Schutzabstand zum Zeitpunkt t_0
S_h	Abstand aufgrund der Bewegung des Menschen
S_R	Abstand aufgrund der Reaktionszeit des Roboters
S_S	Abstand aufgrund der Nachlaufzeit des Roboters
C	Eindringabstand eines Körperteils in den Gefährdungsbereich
Z_d	Positionsungenauigkeit des Menschen im Arbeitsraum
Z_r	Positionsungenauigkeit des Roboters im Arbeitsraum

Mithilfe von Gleichung (4.10) kann somit der minimal einzuhaltende Schutzabstand berechnet werden. Umgekehrt kann bei vorgegebenem Schutzabstand die maximal zulässige Robotergeschwindigkeit berechnet werden und als Eingangsgröße für die Planung des Arbeitssystems verwendet werden. Dies ist in (4.11) unter der Annahme konstanter Beschleunigung und konstanter Geschwindigkeit dargestellt.

$$v_r = \frac{S_p - v_H(T_r + T_s) - C - Z_d - Z_r}{T_r + 0,5 T_s} \quad (4.11)$$

Beispielhaft ist in Abbildung 4.5 der lineare Zusammenhang zwischen der Robotergeschwindigkeit und dem minimal zulässigen Schutzabstand gemäß (4.11) dargestellt. Die Konstanten zur Berechnung der Kurve wurden gemäß Tabelle 4.7 gewählt. Die Geschwindigkeit des Menschen wird mit 1600 mm/s als konstant angenommen und die Daten des Sensors wurden beispielhaft für einen Sicherheits-Laserscanner Sensor des Herstellers Sick der Produktfamilie S3000 mit einer Auflösung von 30 mm gewählt. Der Eindringabstand für einen Sensor mit einem Auflösungsvermögen $d < 40$ mm berechnet sich gemäß ISO TS 13855 zu (4.8)

Tabelle 4.7: Konstanten zur Berechnung der Kurve in Abbildung 4.5

Konstante	T_r	T_s	v_H	C	Z_d	Z_r
Wert	0,1 s	0,1 s	1600 mm/s	128 mm	30 mm	0,1 mm

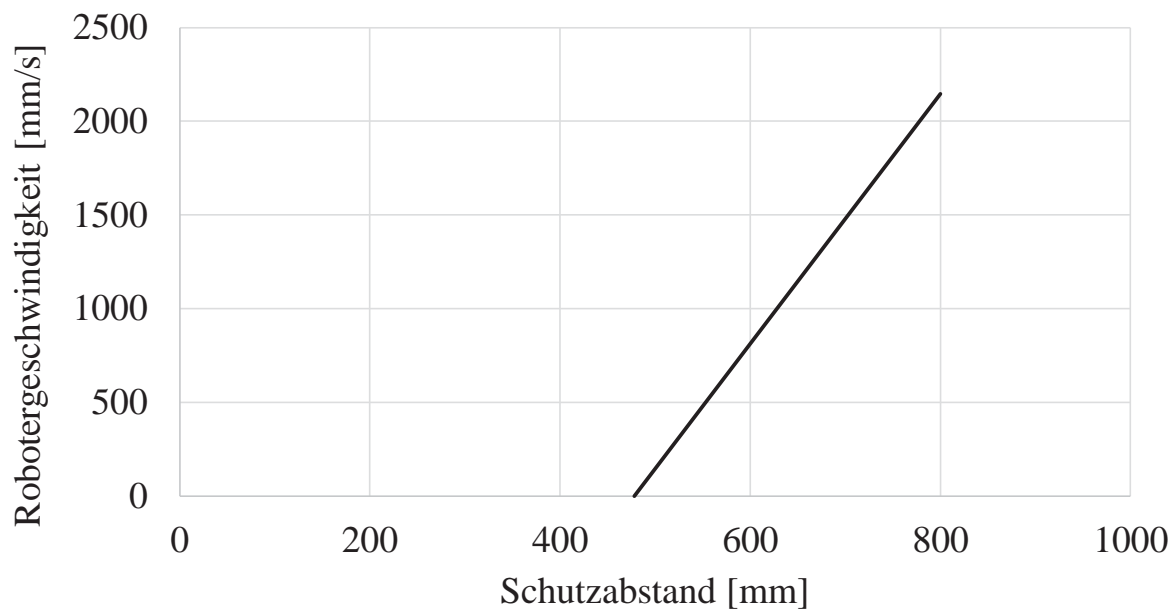


Abbildung 4.5: Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit des minimal zulässigen Schutzabstandes

Bei der Anwendung von Formel (4.10) bzw. (4.11) ist es von elementarer Bedeutung, die Konstanten basierend auf der real verwendeten Hardware zu bestimmen. Wird beispielsweise ein Sensor mit einem Auflösungsvermögen > 40 mm verwendet, berechnet sich die Eindringtiefe C mit der Armreichweite zu 850 mm, da ein Eindringen des Arms nicht erkannt werden könnte. Eine genaue Berechnung muss im Rahmen der Risikobeurteilung erfolgen. Für die Planung des Arbeitssystems dient der Zusammenhang gemäß (4.11) nur als grobe Abschätzung.

4.2.4 Leistungs- und Kraftbegrenzung

Beim Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung kann es zu einem beabsichtigten aber auch zu einem unbeabsichtigten Kontakt zwischen Mensch und Roboter kommen. Damit im Falle einer Kollision der Mensch nicht zu Schaden kommt, verfügen kollaborative Roboter mit diesem Schutzprinzip über sicherheitsgerichtete Abschaltvorrichtungen (Oberer-Treitz et al. 2010). Diese können z. B. in Form von

Kraft-Momenten-Sensoren in den einzelnen Gelenken oder in der Basis des Roboters vorgesehen sein, um bei Überschreitung eines Grenzwertes einen Not-Halt einzuleiten.

In Abbildung 4.6 ist eine Kollision zwischen einem Roboterteil und einem Kontaktbereich am Oberarm dargestellt. Das stoßende Roboterteil trifft auf den Oberarm und komprimiert das Körpergewebe. Bis zur Detektion der Kollision bewegt sich der Roboter mit nahezu unverminderter Geschwindigkeit. Ab dem Zeitpunkt der Kollisionsdetektion bremst der Roboter die Bewegung ab und bewegt sich bis zum Stillstand der Bewegung weiter wie in Abbildung 4.6 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt ist die tatsächliche Körperkompression erreicht, die die maximal zulässige Körperkompression nicht überschreiten darf.

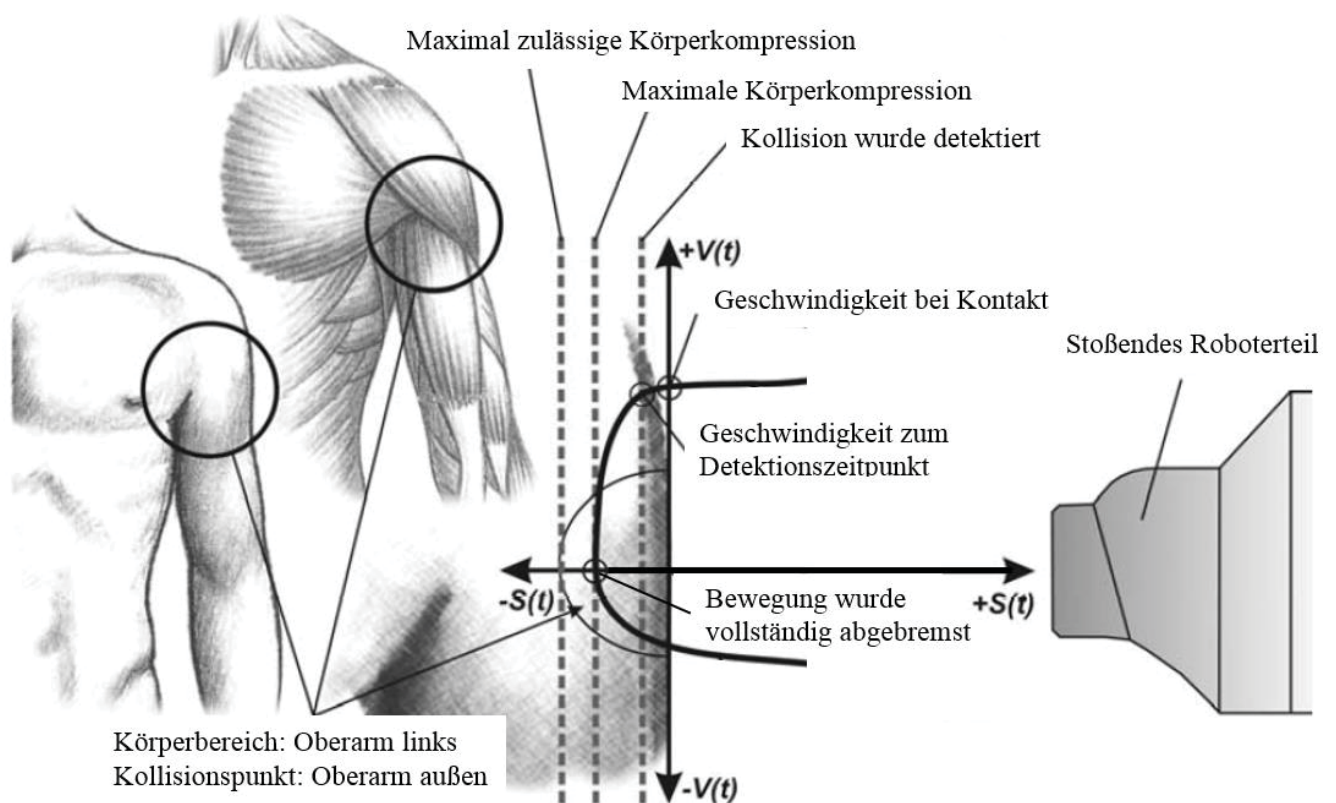


Abbildung 4.6: Geschwindigkeits-Weg-Verlauf bei einer Kollision zwischen Mensch und Roboter nach (IFA 2011)

Als Richtlinie zur Umsetzung von Anwendungen basierend auf dem Prinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung wird in der Technischen Spezifikation ISO TS 15066 ein Körper-Atlas eingeführt. Für die verschiedenen Körperregionen sind Grenzwerte bezüglich Kraft und Druck definiert, die im Falle einer Kollision nicht überschritten werden dürfen. Beispielhaft ist ein Auszug dieser Grenzwerte in Abbildung 4.7 und Tabelle 4.8 dargestellt. Die Grenzwerte wurden auf Basis der Schmerzeintrittsschwelle im Rahmen einer Probandenstudie durch die Berufsgenossenschaft Holz und Metall ermittelt. Auf Basis dieser Grenzwerte lässt sich eine Abschätzung der maximal zulässigen Robotergeschwindigkeit vornehmen, die unmittelbare Auswirkungen auf die Produktivität der Montagestation hat und damit eine wichtige Eingangsgröße für die Planung eines Arbeitssystems in Mensch-Roboter-Kooperation darstellt.

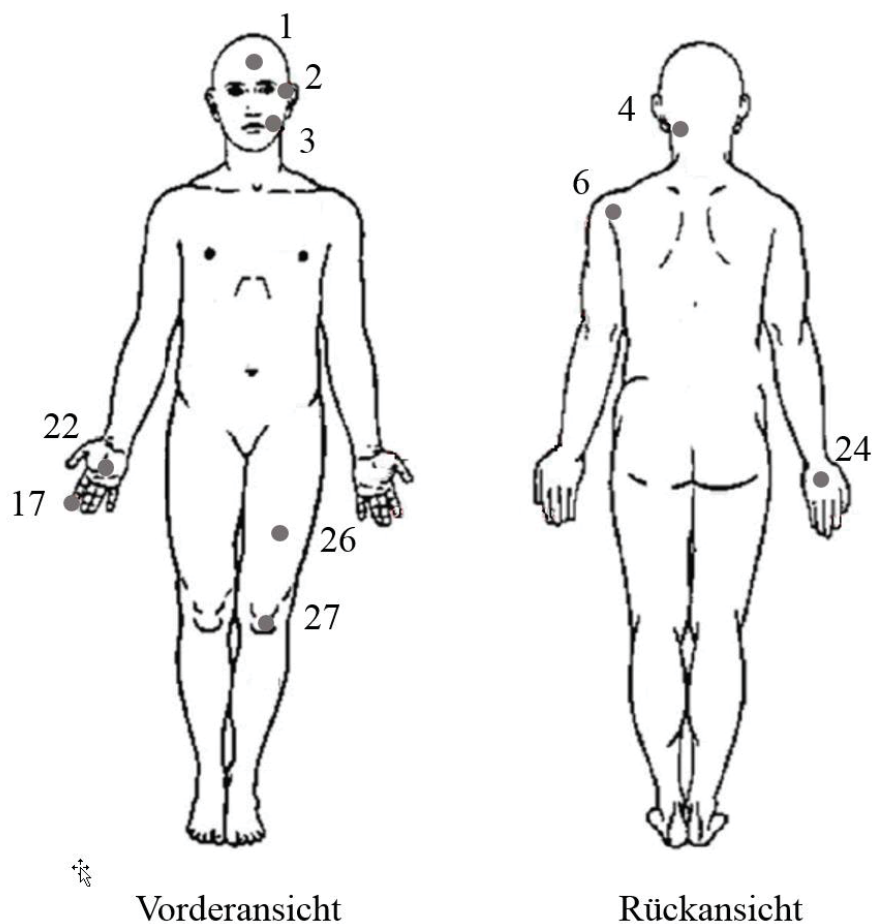


Abbildung 4.7: Definition der Körperregionen nach ISO TS 15066 (ISO/TS 15066: 2016)

Tabelle 4.8: Grenzwerte für Transienten und Quasistatischen Kontakt gemäß ISO TS 15066

Körperregion	Körperstelle		Quasi-statischer Kontakt		Transienter Kontakt	
			p_s [N/cm ²]	F_{max} [N]	P_T	F_T
Kopf	1	Stirn	130	130	Nicht zutreffend	
	2	Schläfe	110			
Gesicht	3	Kaumuskel	110	65		
Nacken	4	Nackenmuskel	140	150	2	2
Rücken	6	Schultergelenk	160	210	2	2
Hand/Finger	17	Finger	300	140	2	2
	22	Handfläche	260		2	
	24	Handrückseite	200		2	
Oberschenkel	26	Oberschenkelmuskel	250	220	2	2
	27	Kniescheibe	220	220	2	

Bei einer Kollision zwischen Mensch und Roboter wird zwischen transienten und quasi-statischen Kontakt-Situationen unterschieden. Bei einem transienten Kontakt kann das entsprechende Körperteil zurückweichen, wohingegen dies bei einem quasi-statischen Kontakt nicht möglich ist. Für den quasi-statischen Kontaktfall kommt es zu einer Klemmung des Körperteils zwischen dem stoßenden Roboterteil und einem feststehenden Gegenstand. Die Grenzwerte für Kraft und Druck in Tabelle 4.8 sind nur für den quasi-statischen Kontakt aufgeführt. Für einen transienten Kontakt dürfen diese Grenzwerte für maximal 0,5 Sekunden um den Faktor zwei überschritten werden, mit Ausnahme der Kontaktpunkte im Bereich des Kopfs und des Gesichts.

Bei der Umsetzung einer kollaborativen Anwendung nach dem Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung ist es wichtig, dass überall dort, wo es möglich ist Quetsch- und Scherkanten vermieden werden. Durch eine entsprechende Programmierung der Bewegungsbahn des Roboters ist ein ausreichend großer Abstand zu feststehenden Gegenständen einzuhalten. Ein quasi-statischer Kontaktfall wird somit

weitestgehend vermieden und kann nur noch bei Tätigkeiten wie dem Ablegen oder Fügen eines Werkstücks auftreten. Damit wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen quasi-statischen Kontaktfall im Vergleich zum transienten Kontaktfall wesentlich reduziert. Für die Abschätzung der maximalen Robotergeschwindigkeit im Rahmen der Planungsphase wird deshalb der transiente Kontaktfall herangezogen. Um für einen transienten Kontaktfall die maximal zulässige Robotergeschwindigkeit zu berechnen, wird ein einfaches Zwei-Körper-Modell aufgestellt wie in Abbildung 4.8 dargestellt.

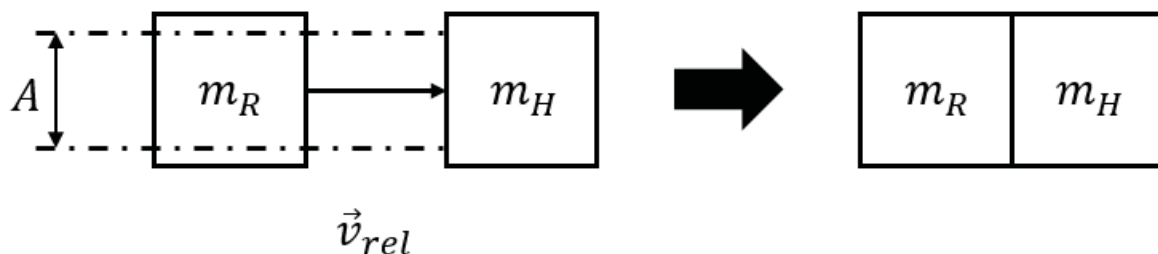


Abbildung 4.8: Körpermodell für transienten Kontakt zwischen Mensch und Roboter nach (ISO/TS 15066: 2016)

Der Roboter mit der effektiven Masse m_R trifft mit der Relativ-Geschwindigkeit v_{rel} und der Kontaktfläche A auf ein Körperteil des Menschen mit der Masse m_H . Der Stoß wird als vollständig inelastisch angenommen. Daher wird die gesamte kinetische Energie nach Formel (4.12) übertragen. Die Variable μ bezeichnet dabei die reduzierte Masse des Gesamtsystems. Durch Gleichsetzen von (4.12) und (4.13) und Umstellen nach v_{rel} ergibt sich (4.14). Mit der Federkonstanten k des betrachteten Körperteils und den Grenzwerten für Kraft und Druck gemäß (ISO/TS 15066: 2016) kann die maximal zulässige Robotergeschwindigkeit berechnet werden. Tabelle 4.9 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnung für verschiedene Körperregionen und effektive Roboter Massen. Auf diese Weise kann direkt eine Geschwindigkeits-Vorgabe für die Planung der roboterbasierten Bewegungen getroffen werden.

$$E = \frac{1}{2} \mu v_{rel}^2 \quad (4.12)$$

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{A^2 p_{max}^2}{2k} \quad (4.13)$$

$$\text{mit } \mu = \left(\frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1}$$

$$v_{rel} = \frac{F_{max}}{\sqrt{\mu K}} = \frac{p_{max} A}{\sqrt{\mu K}} \quad (4.14)$$

Tabelle 4.9: Maximale Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit der effektiven Roboter­masse in mm/s (ISO/TS 15066: 2016)

Körperregion	Effektive Roboter­masse					
	1 kg	2 kg	5 kg	10 kg	15 kg	20 kg
Hand/Finger	2400	2200	2000	2000	2000	1900
Unterarm	2200	1800	1500	1400	1400	1300
Oberarm	2400	1900	1500	1400	1300	1300
Abdomen	2900	2100	1400	1000	870	780
Hüfte	2700	1900	1300	930	800	720
Oberschenkel	2000	1400	920	670	560	500
Unterschenkel	1700	1200	800	580	490	440
Schultern	1700	1200	790	590	500	450
Brust	1500	1100	700	520	440	400

4.3 Prozessbausteine zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation

In diesem Kapitel werden Prozessbausteine zur Beschreibung roboterbasierter Montageabläufe definiert. In Kombination mit dem bestehenden Prozessbaustein­system MTM-1 zur Beschreibung und Analyse menschlicher Arbeit können Arbeits­systeme in Mensch-Roboter-Kooperation analysiert und geplant werden. Aus der Definition der Montageabläufe des Roboters kann zudem herstellerunabhängig ein Programmablaufplan der nötigen Bewegungselemente generiert werden, der als

wichtige Eingangsgröße für die weitere Planung und Umsetzung des Arbeitssystems dient.

Die Prozessbausteine bestehen aus einem anwendungsneutralen und einem anwendungsspezifischen Teil mit den Inhalten, wie in

Tabelle 4.10 dargestellt. Der anwendungsneutrale Teil ist universell gültig und umfasst neben einer eindeutigen Beschreibung des Prozessbausteins alle nötigen Informationen zur Berechnung der Normzeit auf Basis der signifikanten Einflussgrößen.

Tabelle 4.10: Zusammensetzung und Aufbau der Prozessbausteine, nach (Bokranz et al. 2012b)

Anwendungsneutraler Teil	Anwendungsspezifischer Teil
<ul style="list-style-type: none">• Bezeichnung• Inhalt• Ablauf• Abgrenzung• Einflussgrößen• Kodierung• Normzeit	<ul style="list-style-type: none">• Beschreibung inkl. Begrenzung• Faktor<ul style="list-style-type: none">• Anzahl• Häufigkeit• Sollzeit

Im anwendungsspezifischen Teil wird der genaue Arbeitsablauf der Applikation beschrieben und es erfolgt eine Abgrenzung zu vor- bzw. nachgelagerten Arbeitsschritten. Außerdem wird der Prozessbaustein mit der Anzahl und der Häufigkeit der auftretenden Handlungen gewichtet. Es kann z.B. sein, dass mehrere Handlungen hintereinander anfallen, so dass eine Anzahl > 1 vorliegt. Genauso kann es sein, dass diese Handlung mit einer Häufigkeit < 1 , beispielsweise nur bei jedem 10. Bauteil durchgeführt werden muss. Basierend auf der Normzeit ergibt sich mit dieser Prozessbaustein-Gewichtung die Sollzeit.

Abbildung 4.9 zeigt den Aufbau der Kodierung, die allen Prozessbausteinen zu Grunde liegt und eine eindeutige Identifikation möglich macht. Aus dieser eindeutigen Prozessbausteinbezeichnung und Einflussgrößendefinition resultiert ein hohes Maß an Objektivität und Reliabilität, wodurch eine hochgradig reproduzierbare Ablauf- und Prozessbeschreibung gewährleistet wird (Bokranz et al. 2012b).

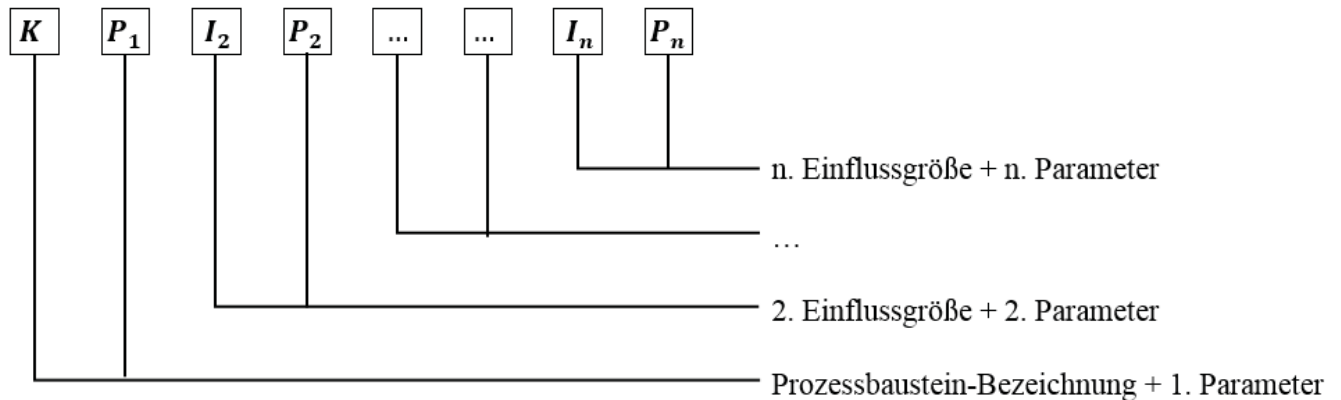


Abbildung 4.9: Kodierung der Prozessbausteine

4.3.1 Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit

Als Grundlage zur Berechnung genauer Bewegungszeiten werden für jeden Prozessbaustein signifikante Einflussgrößen definiert. Diese Einflussgrößen resultieren teilweise aus der Montageaufgabe, teilweise ergeben sie sich mit der Ausführungsart; je nachdem, ob die Montageaufgabe durch den Menschen oder durch den Roboter ausgeführt wird. Während für den Menschen Faktoren wie Konstitution, Übung und Motivation eine Rolle spielen, wirken sich diese für den Roboter nicht aus. Einmal programmiert, führt der Roboter die ihm zugeteilten Aufgaben immer gleich aus. Abhängig vom Robotertyp und den programmierten Parametern kann die Ausführungszeit dafür genau berechnet werden. Tabelle 4.11 gibt eine Übersicht über die Einflussgrößen resultierend aus der Montageaufgabe bzw. der verwendeten Ressource. Für die Definition der unterschiedlichen Prozessbausteine werden die jeweils relevanten Einflussgrößen gesondert betrachtet.

Tabelle 4.11: Signifikante Einflussgrößen resultierend aus der Montageaufgabe bzw. der durchführenden Ressource

Montageaufgabe	Mensch	Roboter
<ul style="list-style-type: none"> • Bewegungslänge • Bauteilgewicht • Teilebereitstellung • Art der Platzierung • Bauteilorientierung • Zugänglichkeit des Fügeorts 	<ul style="list-style-type: none"> • Konstitution • Übung • Motivation 	<ul style="list-style-type: none"> • Robotertyp • Bewegungsart • Geschwindigkeit • Beschleunigung • Überschleifen von Bahnpunkten • Greifertyp

Für menschliche Bewegungen unterscheidet das Prozessbausteinsystem MTM-1 zwei übergeordnete Einflussgrößen mit grundlegender Bedeutung (Bokranz et al. 2012a):

1. Kontrollaufwand bei Bewegungen
2. Bewegungslänge

Der Kontrollaufwand umfasst qualitative Einflussgrößen, die den Aufwand zur Koordination muskulärer, visueller und mentaler Funktionen abbilden und damit die Bewegungszeit signifikant beeinflussen (Bokranz et al. 2012a). Genauso hat die Bewegungslänge einen direkten Einfluss auf die Bewegungszeit. Zur Analyse von Roboterbewegungen müssen diese beiden Einflussgrößen auch berücksichtigt werden, wobei grundsätzliche Unterschiede zu menschlichen Bewegungen bestehen. Das Äquivalent zur Koordination muskulärer Bewegungen bei Menschen ist bei Industrierobotern durch die Ansteuerung und Regelung der Antriebsmotoren gegeben. Zusätzlich muss vor jeder Bewegung die Bewegungsbahn und die dazu nötige Bewegung der Roboterkinematik berechnet werden, die je nach Bewegungsart für eine lineare Bewegung des Endeffektors beispielsweise komplexer ist als für achs-spezifische Bewegung.

In Bezug auf den visuellen Kontrollaufwand unterscheidet sich ein Industrieroboter grundsätzlich vom Menschen. Ein Standard-Industrieroboter führt Bewegungen basierend auf Sensorwerten in den einzelnen Achsen durch. Der Kontrollaufwand visueller Funktionen entfällt somit für einen Industrieroboter ohne zusätzliche Sensorik. Werden zusätzlich bildgebende Sensoren eingesetzt, um beispielsweise einen Gegenstand in undefinierter Lage zu greifen oder eine Objekterkennung durchzuführen, muss die Zeit zur Bildaufnahme, zur Erkennung des Gegenstandes und zur Berechnung der Ziel-Position und Pose auch für ein Roboter-System berücksichtigt werden.

Ein erhöhter Kontrollaufwand aufgrund von erhöhten Präzisionsanforderungen, der für eine menschliche Bewegung in Form gedanklicher Kontrolle berücksichtigt wird, ist für eine Roboterbewegung nur bedingt relevant, da der Roboter alle Bewegungen mit der technisch bedingten Wiederholgenauigkeit durchführt. Nur wenn die Anforderungen der Arbeitsaufgabe die Wiederholgenauigkeit des Roboters übersteigen, müssen zusätzliche Sensoren berücksichtigt werden.

4.3.2 Definition der Roboter-Prozessbausteine

In Abbildung 4.10 ist der Grundzyklus zum Aufnehmen und Platzieren eines Gegenstandes dargestellt. Dieser Grundzyklus tritt in der Praxis sowohl für menschliche als auch für roboterbasierte Montageabläufe auf. Das Hinlangen beschreibt die Bewegung der Hand bzw. des Endeffektors zu einem Zielort, an dem durch eine Greifbewegung die Kontrolle über ein Objekt erlangt wird. Anschließend wird das Objekt zu einem Zielort bewegt. Dort ist je nach erforderlicher Prozessgenauigkeit ein Fügen notwendig oder das Objekt kann direkt durch das Aufheben der Kontrolle platziert werden. Die dazu notwendigen Prozessbausteine werden nachfolgend am Beispiel von Vertikal-

Knickarm-Robotern definiert. Prinzipiell ist eine Anwendung auch für andere Robotertypen möglich, wobei sich Unterschiede aufgrund der Roboterkinematik speziell für achsspezifische Bewegungen ergeben werden (Schröter et al. 2016a).

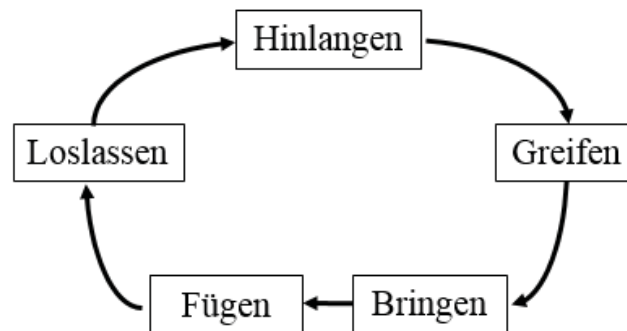


Abbildung 4.10: Grundzyklus zum Aufnehmen und Platzieren eines Gegenstandes, nach (Bokranz et al. 2012a)

4.3.2.1 Hinlangen

Hinlangen ist die Grundbewegung, bei der der Endeffektor eines Roboters ohne Nutzlast zu einem Zielort bewegt wird. Die Bewegung beginnt mit der Ausführung des ersten Befehlssatzes auf der Roboter-Steuerung und umfasst die Bewegung des Endeffektors von einem Start- zu einem Zielpunkt. Start- und Zielpunkt werden dabei in der Programmierung durch einen Vektor beschrieben, der die kartesische Position sowie Orientierung des Endeffektors in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem beinhaltet.

Das Ende des Prozessbausteins *Hinlangen* ist durch den Stillstand des Endeffektors in der gewünschten Zielposition oder durch die Ausführung des nächsten Bewegungsbefehls gekennzeichnet, sofern sich eine weitere Bewegung anschließt und der erste Zielpunkt überschritten wird.

Bei einer Bewegung der Roboterkinematik werden zwei unterschiedliche Bewegungsarten unterschieden: Die Bewegung kann entweder linear oder achsspezifisch durch-

geführt werden. Während bei der linearen Bewegung die Bahn des Endeffektors genau vorhergesagt werden kann, hängt diese bei einer achsspezifischen Bewegung von den Achsstellungen der Roboter-Kinematik in Start- und Zielpunkt ab. Die Achsbewegungen werden so berechnet, dass die Bewegungsdistanz der einzelnen Achsen minimal ist. Dabei ist die genaue Bahn des Endeffektors zwischen Start- und Zielpunkt ohne Kenntnis des Bahnplanungs-Algorithmus und der genauen Roboter-Kinematik nicht vorhersagbar. In Abbildung 4.11 ist dieser Unterschied in der Bewegungsart für eine Bewegung von einem Startpunkt P_i zu einem Zielpunkt P_{i+1} dargestellt.

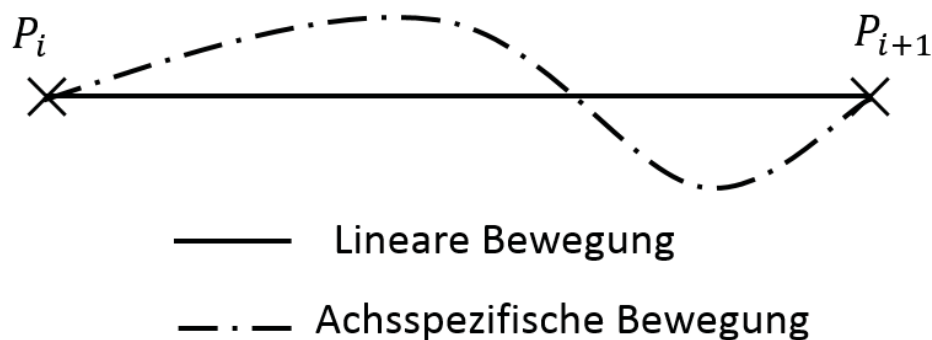


Abbildung 4.11: Vergleich von achsspezifischer und linearer Roboterbewegung

Bei der Durchführung einer Roboter-Bewegung zum Hinlangen treten verschiedene Zeitanteile auf. Diese lassen sich in beeinflussbare und nicht beeinflussbare Zeitabschnitte (Lotter 1992) unterteilen. So ist z.B. die Totzeit bis zum Beginn der eigentlichen Bewegung abhängig vom Robotertyp und der verwendeten Steuerung und kann nicht beeinflusst werden. Die Bewegungszeit kann hingegen in der Programmierung durch die Wahl der Beschleunigung und der Zielgeschwindigkeit beeinflusst werden. Der Zeitanteil der konstanten Geschwindigkeit hängt von der zu fahrenden Wegstrecke und der programmierten Zielgeschwindigkeit ab und ist damit unmittelbar beeinflussbar. Im Gegensatz dazu ist die Ausschwingzeit am Ende der Bewegung vorrangig von der Roboterkinematik und der bewegten Masse abhängig und damit nur bedingt beeinflussbar.

Tabelle 4.12 zeigt zusammenfassend die signifikanten Einflussgrößen für den Prozessbaustein *Hinlangen*. Im Gegensatz zu menschlichen Bewegungen beeinflusst die erforderliche Positionsgenauigkeit am Zielpunkt nicht die benötigte Zeit zur Durchführung der Bewegung, da der Roboter alle Bewegungen mit der technisch bedingten Wiederholgenauigkeit ausführt. Andere Einflussgrößen wie die Bewegungsrichtung und die genaue Position im Arbeitsraum werden aufgrund des geringen Einflusses auf die Bewegungszeit für lineare Bewegungen nicht berücksichtigt, finden aber implizit Berücksichtigung für die Berechnung von achsspezifischen Bewegungen.

Tabelle 4.12: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein *Hinlangen*

Einflussgröße	Ausprägung
Bewegungslänge	Absolutwert in mm
Geschwindigkeit	Absolutwert in mm/s
Beschleunigung	Absolutwert in mm/s ²
Bewegungsart	Linear oder achsspezifisch
Art des Stopps	Genauhalt oder überschliften

Lineare Bewegungen

Die Zeit, die für eine lineare Roboterbewegung mit Phasen konstanter Beschleunigung und konstanter Geschwindigkeit benötigt wird, unterteilt sich in fünf verschiedene Zeitanteile gemäß Abbildung 4.12. Eine Bewegung mit diesen Zeitanteilen ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Gesamtzeit zur Durchführung der Bewegung ergibt sich dabei aus der Summe dieser Zeitanteile wie in Gleichung (4.15) dargestellt.

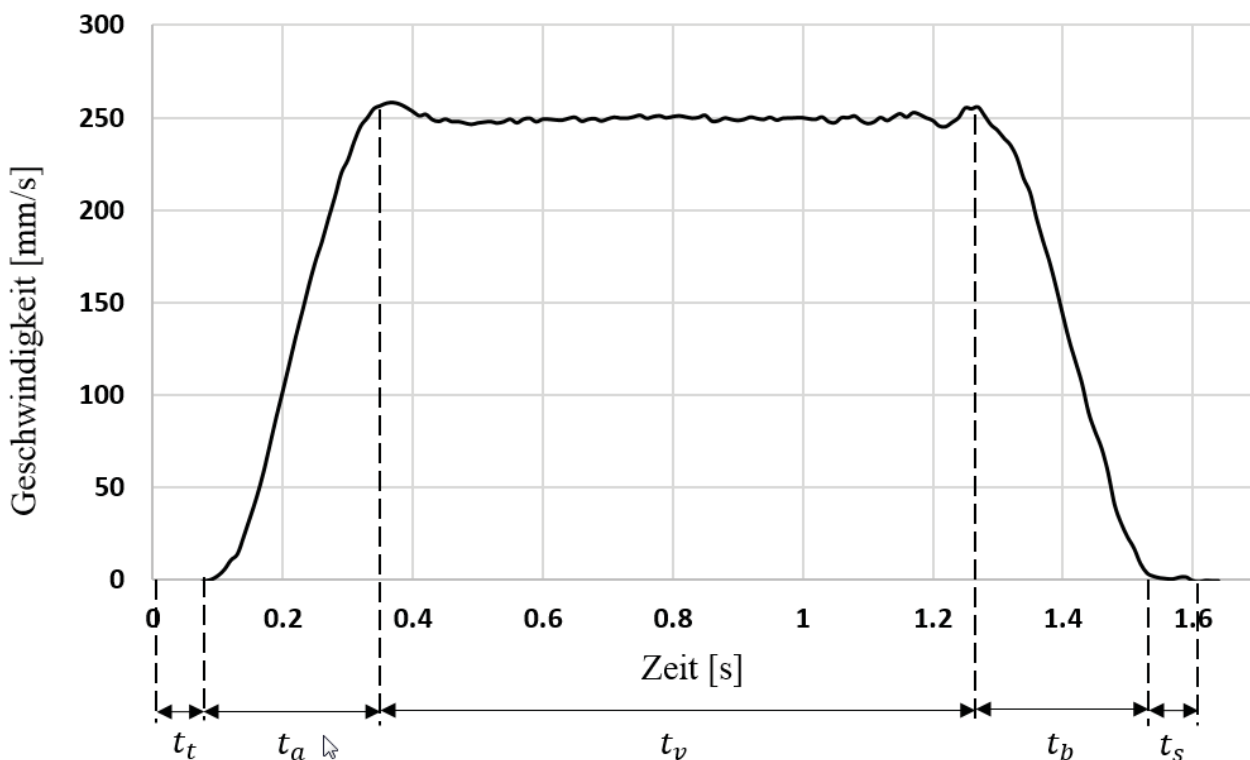


Abbildung 4.12: Unterteilung der Bewegungszeit einer linearen Roboter-Bewegung nach Lotter 1992

Tabelle 4.13: Zeitelemente einer linearen Roboterbewegung

Element	Beschreibung
t_t	Totzeit
t_a	Zeitanteil Beschleunigung
t_v	Zeitanteil konstanter Geschwindigkeit
t_b	Zeitanteil Verzögerung
t_s	Ausschwingzeit

$$t_g = t_t + t_a + t_v + t_b + t_s \quad (4.15)$$

Für gleichförmig beschleunigte Bewegungen gilt für die zurückgelegte Wegstrecke s_g Gleichung (4.16). Der Zeitanteil der Beschleunigung t_a berechnet sich aus den in der Roboter-Programmierung festgelegten Zielparametern für die Geschwindigkeit des

Endeffektors v_{tcp} und der Beschleunigung a_{tcp} . Da die Verzögerung des Roboters auch über die Antriebsmotoren erfolgt, wird der Zeitanteil der Verzögerung gemäß (4.17) gleich dem der Beschleunigung gesetzt. Damit wird der Zeitanteil konstanter Geschwindigkeit durch Einsetzen von (4.17) in (4.16) und Umformen nach t_v zu (4.18) bestimmt.

$$s_g = \int_0^{t_a} a_{TCP} t \, dt + \int_{t_a}^{t_a+t_v} v_{TCP} \, dt + \int_{t_a+t_v}^{t_a+t_v+t_b} a_{TCP} t \, dt \quad (4.16)$$

$$t_a = t_b = \frac{v_{tcp}}{a_{tcp}} \quad (4.17)$$

$$t_v = \frac{s_g - a_{tcp} t_a^2}{v_{tcp}} = \frac{s_g}{v_{tcp}} - \frac{v_{tcp}}{a_{tcp}} \quad (4.18)$$

Die Gesamtzeit einer linearen Bewegung $t_{g,lin}$ ergibt sich zu (4.19) mit den programmierten Zielparametern für die Geschwindigkeit des Endeffektors v_{tcp} , der Beschleunigung a_{tcp} sowie der zurückzulegenden Gesamtwegstrecke s_g als Distanz zwischen Start- und Zielpunkt. Für kurze Wegstrecken kann es vorkommen, dass die programmierte Zielgeschwindigkeit nicht erreicht wird. In diesem Fall ist die theoretisch zurückgelegte Wegstrecke während des Beschleunigens und des Abbremsens, um die Zielgeschwindigkeit zu erreichen, größer als die Gesamtwegstrecke. Dies wird durch die Fallunterscheidung in (4.19) repräsentiert.

$$t_{g,lin} = \begin{cases} t_t + \frac{v_{tcp}}{a_{tcp}} + \frac{s_g}{v_{tcp}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{tcp}^2}{a_{tcp}} \right) \geq 0 \\ t_t + 2 \sqrt{\frac{s_g}{a_{tcp}}} + t_s & \text{für } \left(s_g - \frac{v_{tcp}^2}{a_{tcp}} \right) < 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

Die Beschleunigung des Endeffektors wird in der Roboterprogrammierung, abhängig von der Programmiersprache des jeweiligen Herstellers, i. d. R. als optionaler

Parameter angeben. Wird die Beschleunigung nicht angegeben, so wird von der Robotersteuerung die Beschleunigung abhängig von der gewünschten Zielgeschwindigkeit berechnet. Diese Berechnung weist bis zum Erreichen eines Maximalwerts einen linearen Charakter auf, wie in Abbildung 4.13 dargestellt.

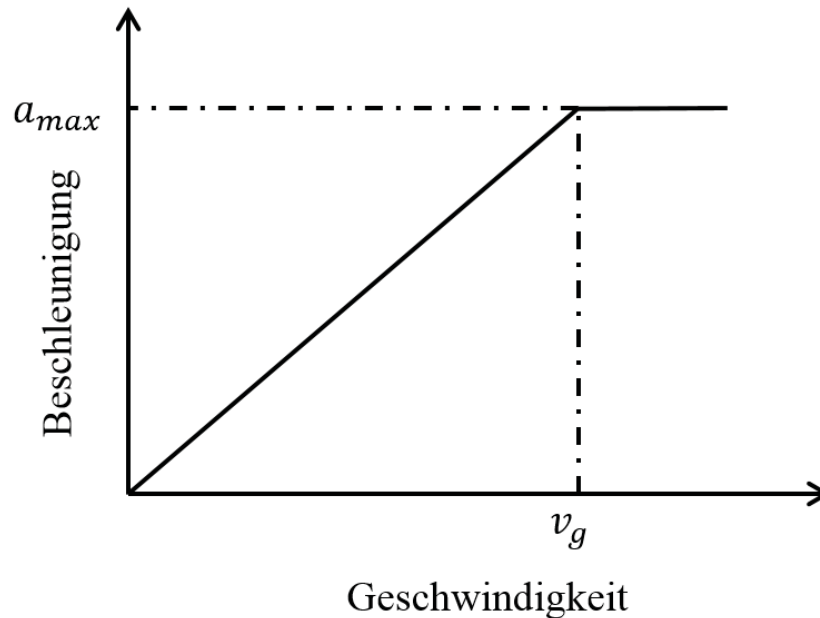


Abbildung 4.13: Berechnung der Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

In der frühen Planungsphase eines Arbeitssystems ist die Beschleunigung des Roboters normalerweise nicht bekannt. Deshalb ist die Angabe der Beschleunigung für den Prozessbaustein *Hinlangen* optional. Sofern kein Wert für die Beschleunigung angegeben wird, wird dieser gemäß Gleichung (4.20) berechnet. Die Konstanten c_{a1} und c_{a2} sind abhängig vom jeweiligen Robotertyp und werden mit Standardwerten belegt, sofern der Robotertyp zum Planungszeitpunkt noch nicht bekannt ist.

$$a_{TCP} = \begin{cases} c_{a1}v_{TCP} + c_{a2} & v < v_g \\ a_{max} & v \geq v_g \end{cases} \quad (4.20)$$

Achsspezifische Bewegungen

Bei der Berechnung der Bewegungszeit von achsspezifischen Roboterbewegungen gelten die Zusammenhänge von linearen Bewegungen nur eingeschränkt. Bei gegebenem Start- und Zielpunkt lässt sich die benötigte Bewegungszeit nur mit Kenntnis des Bahnplanungsalgorithmus und der genauen Roboterkinematik berechnen, da die Bahn zum Zielpunkt nicht linear ist und somit auch die Geschwindigkeit des Endeffektors nicht als konstant angenommen werden kann. Da die Bahnplanungsalgorithmen der Hersteller i. d. R. nicht bekannt sind und in der Planungsphase auch der genaue Start- und Zielpunkt nicht bekannt ist, wird ein vereinfachender Zusammenhang zur Berechnung von achsspezifischen Bewegungen aufgestellt.

Die Achsbewegungen des Roboters werden durch die Steuerung so koordiniert, dass alle Achsen ihre Bewegung zum gleichen Zeitpunkt starten und abschließen, wie beispielhaft für eine achsspezifische Roboterbewegung in Abbildung 4.14 dargestellt. Damit wird gewährleistet, dass die Fortsetzung der Bewegung zum nächsten Bahnpunkt ohne Unruhe und Ruck erfolgen kann. Die Bewegungszeit wird durch die langsamste Achse bestimmt (Hesse 2010).

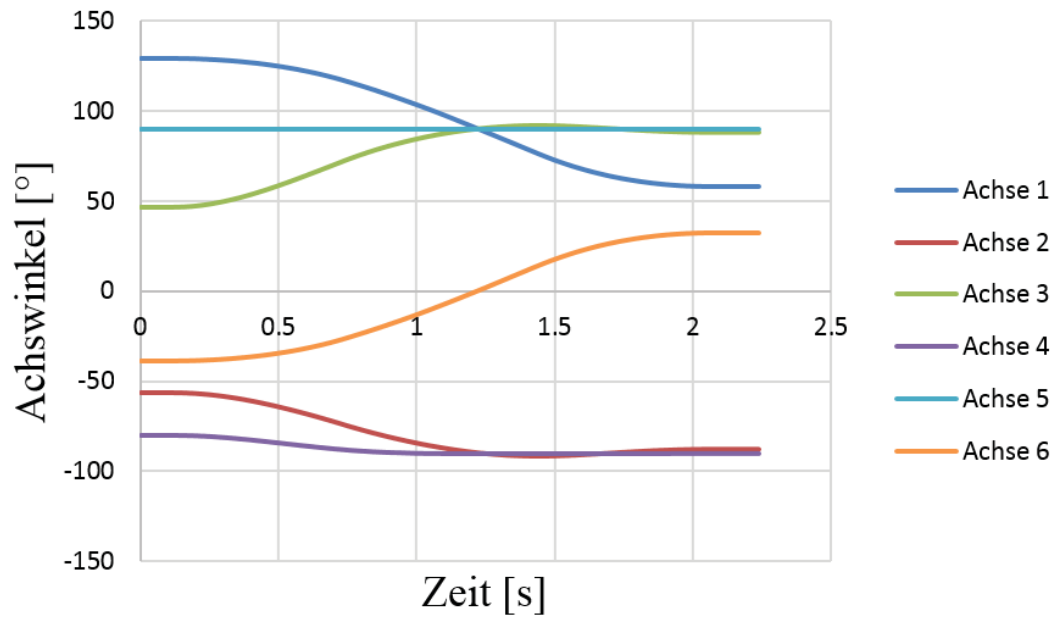


Abbildung 4.14: Achsspezifische Roboterbewegung

Die Zeit einer achsspezifischen Bewegung von einem beliebigen Punkt \mathbf{P}_i zu einem beliebigen Punkt \mathbf{P}_k wird durch den Geschwindigkeitsvektor der Roboterachsen \mathbf{v}_j und den Gelenkstellungen $\boldsymbol{\varphi}_i$ und $\boldsymbol{\varphi}_k$ der Roboterachsen am jeweiligen Punkt \mathbf{P}_i und \mathbf{P}_k bestimmt. Da die einzelnen Achsen unterschiedliche Winkeländerungen vornehmen, bewegen sich die Achsen mit unterschiedlicher Beschleunigung und Geschwindigkeit. Bezogen auf die Bewegungszeit einer Achse j gelten die Zusammenhänge analog zu Gleichung (4.19) mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit ω_j und Winkelbeschleunigung α_j sowie der zu verfahrenen Winkeldifferenz $\Delta\varphi_j$ von Start- zu Zielpunkt. Die Zeit zur Durchführung einer achsspezifischen Bewegung ergibt sich damit für die jeweilige Roboterachse j zu (4.21).

$$t_{g,j} = t_t + \frac{\omega_j}{\alpha_j} + \frac{\Delta\varphi_j}{\omega_j} + t_s \quad j \in \{1, \dots, 6\} \quad (4.21)$$

Die benötigte Gesamtzeit für die Bewegung wird dabei gemäß Gleichung (4.22) durch die Achse limitiert, deren Bewegung am längsten dauert. Die Bewegungszeit wird

dabei durch die zu verfahrenende Winkeldifferenz von Start- zu Zielpunkt und die jeweilige maximale Achsgeschwindigkeit bzw. Achsbeschleunigung bestimmt.

$$t_{g,achs} = t_t + \max \left(\frac{\omega_j}{\alpha_j} + \frac{\Delta\varphi_j}{\omega_j} \right) + t_s \quad j \in \{1, \dots, 6\} \quad (4.22)$$

Da in der Planungsphase die genauen Achsstellungen in Start- und Zielpunkt nicht bekannt sind, sondern lediglich die Distanz zwischen gewünschtem Start- und Zielpunkt, wird ein Zusammenhang zwischen dieser bekannten Distanz und der durchzuführenden Winkeländerung der Roboterachsen aufgestellt. Mit der vorgegebenen maximalen Achsgeschwindigkeit und Beschleunigung wird daraus die zeitbestimmende Achse identifiziert, anhand welcher die Bewegungszeit für die achsspezifische Roboterbewegung berechnet werden kann.

Für eine Menge von n äquidistanten Punkten innerhalb des Arbeitsraums des Roboters wird die symmetrische Matrix $\mathbf{M}_{\Delta\varphi}$ definiert, die mit $\Delta\varphi_{ik}$ gemäß Gleichung (4.23) die maximal zu fahrende Winkeldifferenz vom Punkt \mathbf{P}_i zum Punkt \mathbf{P}_k beinhaltet. Analog dazu wird die Matrix \mathbf{M}_d aufgestellt, die mit d_{ik} nach Gleichung (4.24) die betragsmäßige Distanz der jeweiligen Punkte zueinander enthält. Die Matrizen $\mathbf{M}_{\Delta\varphi}$ und \mathbf{M}_d sind symmetrisch, da eine Bewegung von \mathbf{P}_i zu \mathbf{P}_k in Bezug auf Winkeldifferenz und Distanz der umgekehrten Bewegung von \mathbf{P}_k zu \mathbf{P}_i entspricht. Damit ergibt sich eine Menge von $\frac{n^2-n}{2}$ unterschiedlichen Punktepaaren und den dazugehörigen Winkel- und Abstandswerten.

$$\Delta\varphi_{ik} = \max(|\varphi_i - \varphi_k|) \quad (4.23)$$

$$d_{ik} = |\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_k| \quad (4.24)$$

$$\mathbf{M}_{\Delta\varphi} = \begin{bmatrix} 0 & \Delta\varphi_{1i} & \dots & \Delta\varphi_{1n} \\ \Delta\varphi_{k1} & 0 & \dots & \Delta\varphi_{kn} \\ \dots & \dots & 0 & \dots \\ \Delta\varphi_{n1} & \Delta\varphi_{ni} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} 0 & d_{1i} & \dots & d_{1n} \\ d_{k1} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & 0 & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Für einen Vertikal-Knickarm-Roboter mit sechs Achsen und einem kugelförmigen Arbeitsraum wurden beispielhaft die Gelenkstellungen der einzelnen Achsen und die kartesische Position des Endeffektors für eine Punktemenge von 10.000 Punkten in einer Computer-Simulation berechnet. Basierend auf diesen Daten wurden die Matrizen $\mathbf{M}_{\Delta\varphi}$ und \mathbf{M}_d aufgestellt. Für alle Abstandswerte aus \mathbf{M}_d wurden dann die Teilmengen von Punktepaaren in einem Raster von $d_r = 1$ mm ermittelt für die gilt:

$$d_l - \frac{d_r}{2} > \mathbf{M}_{d,ik} > d_l + \frac{d_r}{2}$$

mit $d_l \in \{1,2, \dots, [\max(\mathbf{M}_d)]\}$, $i \in \{1,2, \dots, n\}$ und $k \in \{1,2, \dots, n\}$

Die entsprechenden Teilmengen aus $\mathbf{M}_{\Delta\varphi}$ liefern die zu verfahrenende Winkeldifferenz für die Bewegung aller Punkte mit dem betrachteten Abstand. Der Mittelwert der Winkeldifferenzen einer dieser Teilmengen wird als Approximation für die gesuchte Bewegungszeit für zwei Punkte mit einem gegebenen Abstand verwendet. In Abbildung 4.15 ist dazu beispielhaft die Häufigkeitsverteilung der zu verfahrenenden Winkeldifferenz für alle Punktepaare mit einem kartesischen Abstand von $d_l = 1000$ mm dargestellt.

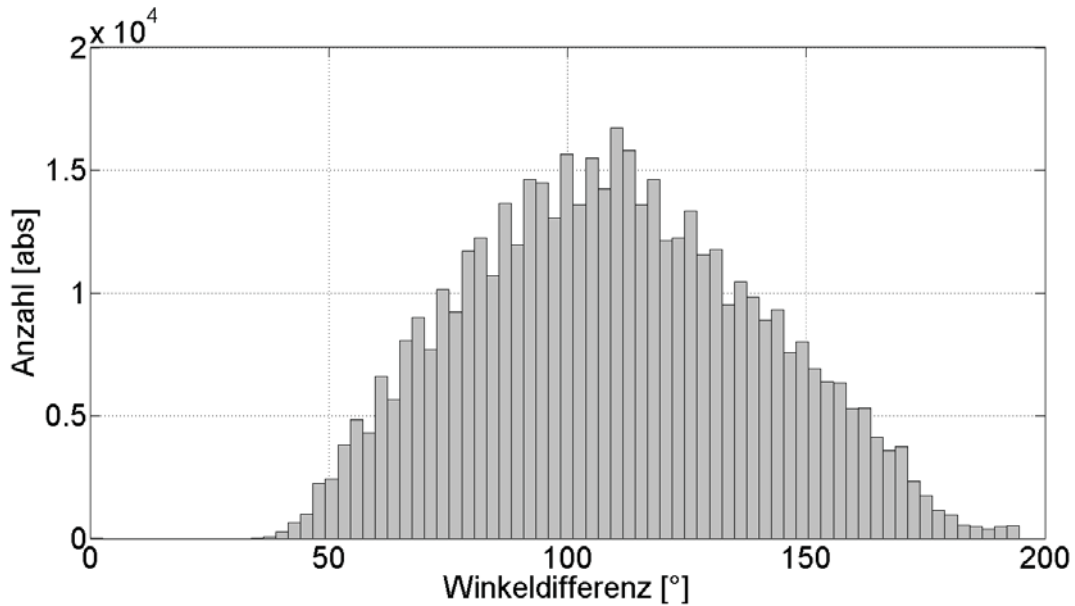


Abbildung 4.15: Häufigkeitsverteilung der Bewegungszeiten für alle Punktepaare mit einem Abstand von $d_l = 1000$ mm

Der Mittelwert der Winkeldifferenzen der Teilmenge von $M_{\Delta\varphi}$ und M_d in Abhängigkeit des Punkteabstands ist in Abbildung 4.16 dargestellt und kann über den linearen Zusammenhang gemäß Gleichung (4.25) in guter Näherung abgebildet werden.

$$\Delta\bar{\varphi}(d_l) = c_{v1}d_l + c_{v0} \quad (4.25)$$

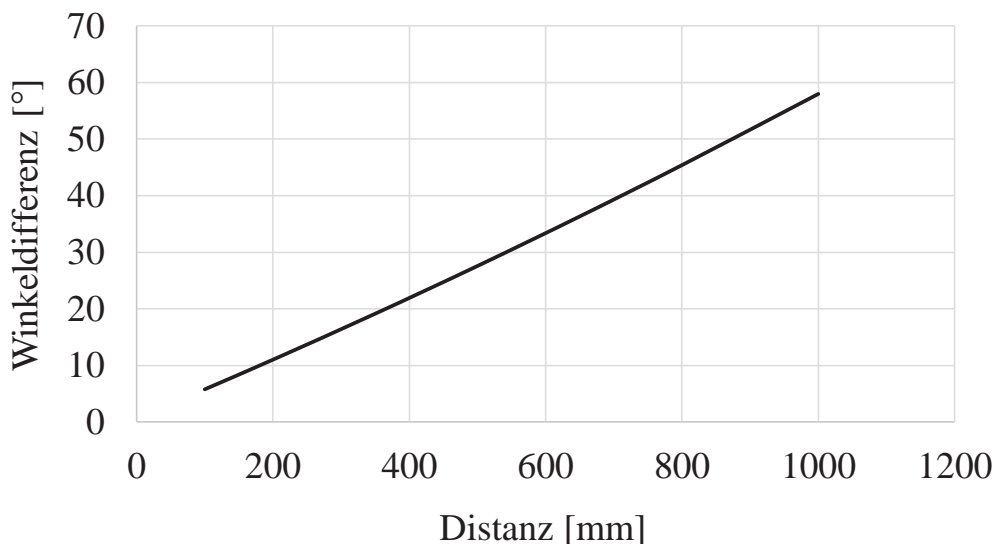


Abbildung 4.16: Winkeldifferenz der zeitbestimmenden Achse in Abhängigkeit der zu verfahrenen Distanz für achsspezifische Bewegungen

Über den Zusammenhang zwischen der zurückzulegenden Wegstrecke und der Winkeldifferenz einer einzelnen Roboterachse kann somit die Bewegungszeit gemäß Gleichung (4.22) berechnet werden. Die Approximation der zu verfahrenen Winkeländerung der zeitbestimmenden Achse nach Gleichung (4.25) ist hauptsächlich von der Form und Größe des Arbeitsraums des Roboters abhängig. Somit kann der Zusammenhang nach Abbildung 4.16 auf eine Roboterklasse, wie z.B. Vertikal-Knickarm-Roboter mit einem kugelförmigen Arbeitsraum mit einem gegebenen Arbeitsradius angewendet werden.

Überschleifen von Bahnpunkten

Als weitere signifikante Einflussgröße wird die Art des Stopps einer Roboterbewegung unterschieden. Für die Durchführung einer komplexen Bewegung ist es notwendig, mehrere Bahnpunkte zu programmieren. Zwischenpunkte werden dabei i. d. R. nicht als Genau-Halt angefahren, sondern überschliffen. Auf diese Weise wird die effektive Bewegungslänge reduziert, da der Endeffektor die vorhergesehene Bewegungsbahn ab einer definierten Distanz verlässt und bogenförmig den nächsten Punkt anfährt. In Abbildung 4.17 ist eine solche Bewegung vom Punkt P_{i-1} über den Punkt P_i zum Punkt P_{i+1} dargestellt, wobei der Punkt P_i überschliffen wird und der Endeffektor die Bahn zur Durchführung eines Genauhalts ab der Distanz b verlässt. Der Winkel α_{bl} definiert den Winkel zwischen den Geraden $\overrightarrow{P_{i-1}P_i}$ und $\overrightarrow{P_iP_{i+1}}$.

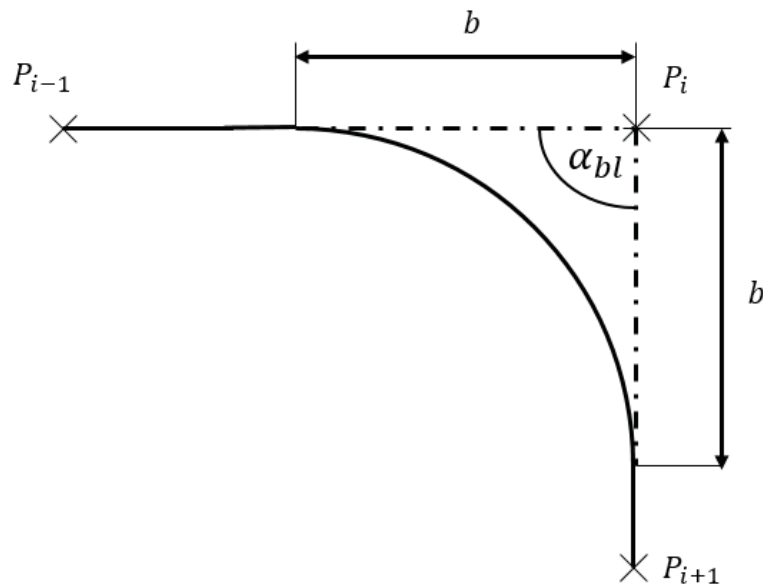


Abbildung 4.17: Überschleifen des Bahnpunktes P_i

Die Bewegungslänge wird um die Strecke s_{bl} verkürzt, wodurch sich die Bewegungszeit mit der Geschwindigkeit des Endeffektors v_{TCP} um t_{bl} verkürzt, wie in (4.26) und (4.27) für $\alpha = 90^\circ$ dargestellt.

$$s_{bl} = 2 \cdot b - \frac{\pi \cdot b}{2} \quad (4.26)$$

$$t_{bl} = \left(2 \cdot b - \frac{\pi \cdot b}{2} \right) \cdot \frac{1}{v_{TCP}} \quad (4.27)$$

Zusätzlich wird die Roboterkinematik beim Überschleifen eines Punktes nicht oder nur geringfügig abgebremst und muss dementsprechend zum Anfahren des nächsten Zielpunktes nicht mehr beschleunigt werden. Dadurch entfallen der Zeitanteil zum Abbremsen t_b und der Zeitanteil zur Beschleunigung t_a . In gleicher Weise entfallen die Totzeit t_t zu Beginn der Bewegung und die Ausschwingzeit t_s am Ende der Bewegung für überschlifffene Punkte.

Bei der Analyse einer Bahn mit mehreren Zwischenpunkten ist es notwendig zu differenzieren, ob der vorherige Punkt überschlifffene wurde oder nicht. Je nachdem

ändert sich die Formel zur Berechnung der Bewegungszeit, wie in Tabelle 4.14 dargestellt. In Abbildung 4.18 ist qualitativ der Geschwindigkeitsverlauf des Endeffektors für die vier Fälle nach Tabelle 4.14 dargestellt

Tabelle 4.14: Berechnung der Bewegungszeit für verschiedene Bewegungsfälle

Fall	P_{i-1}	P_i	Berechnungsformel
1	Genauhalt	Genauhalt	$t_g = t_t + t_a + t_v + t_b + t_s$
2	Überschliffen	Genauhalt	$t_g = t_v + t_b + t_s$
3	Genauhalt	Überschliffen	$t_g = t_t + t_a + t_v - t_{bl}$
4	Überschliffen	Überschliffen	$t_g = t_v - t_{bl}$

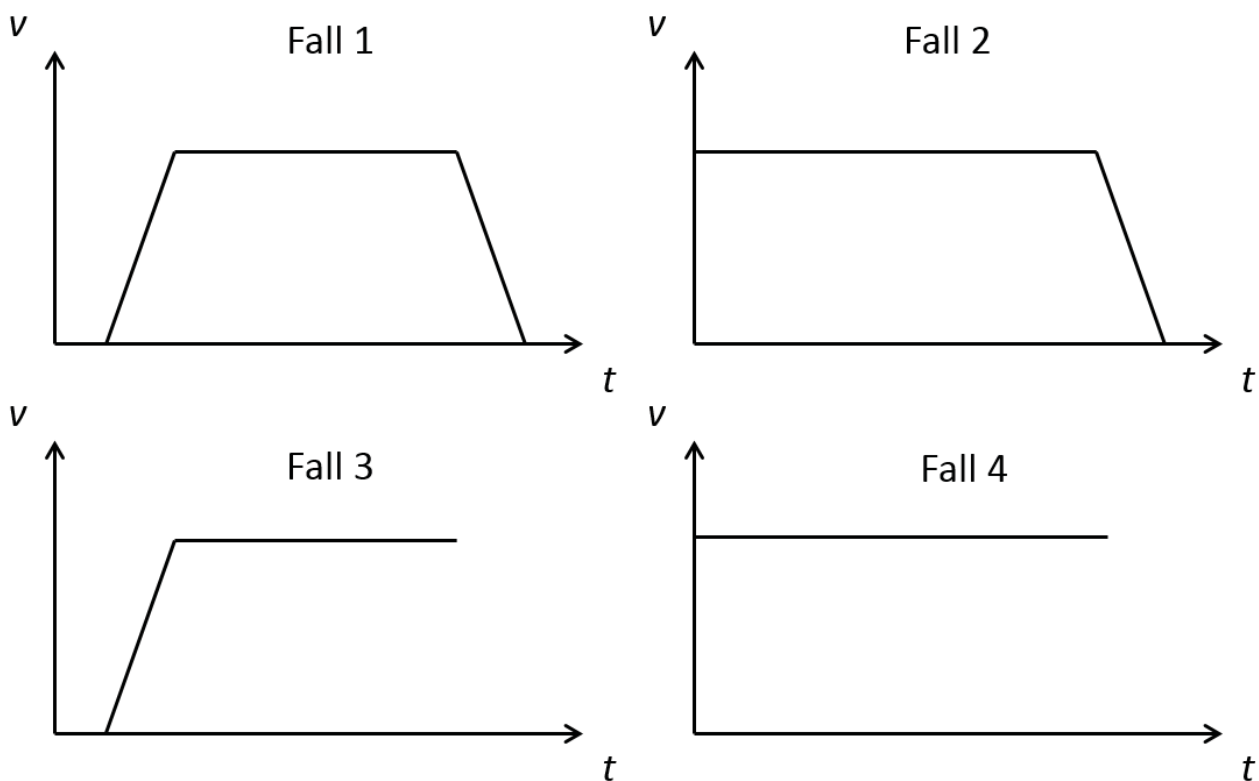


Abbildung 4.18: Geschwindigkeitsdiagramme für verschiedene Bewegungsfälle

Die Geschwindigkeit der vorhergehenden Bewegung muss für Fall 2 bzw. Fall 4 nicht notwendigerweise der sich anschließenden Bewegung entsprechen. Dieser Fall ist in den Formeln, wie in Tabelle 4.14 aufgeführt, nicht berücksichtigt, da dies in der Praxis

nicht häufig auftritt und keinen großen Einfluss hat. Alle signifikanten Einflussparameter werden in der Kodierung, wie in Abbildung 4.19 dargestellt, zusammengefasst und stellen die Grundlage zur Berechnung der Bewegungszeit dar. Die Angabe der Beschleunigung ist optional. Wird diese nicht angegeben, werden Standardwerte basierend auf der Zielgeschwindigkeit berechnet.

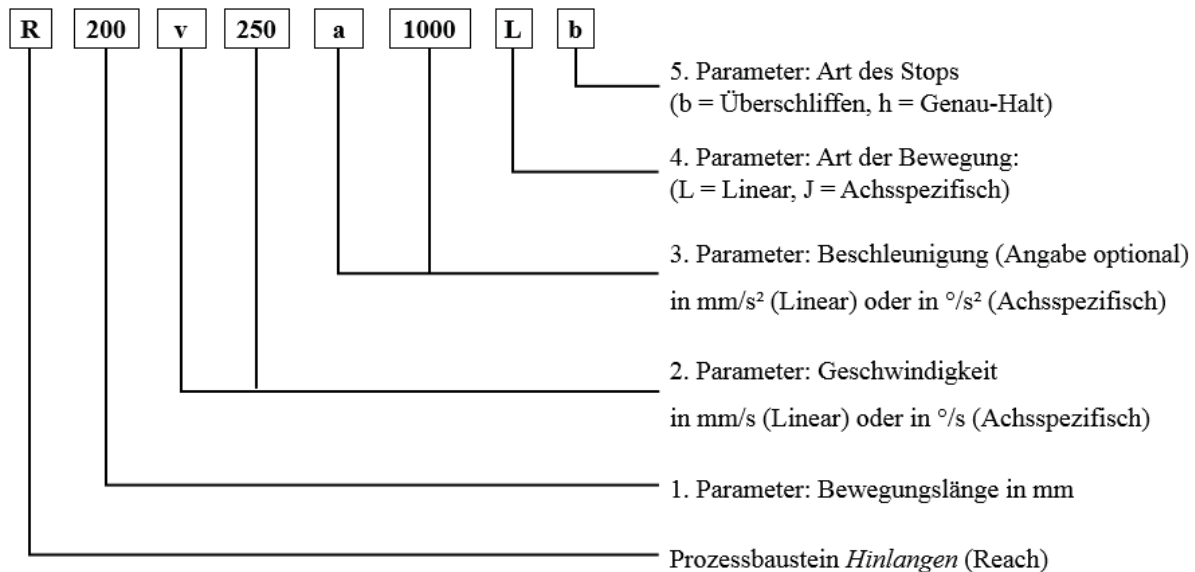


Abbildung 4.19: Kodierung des Prozessbausteins *Hinlangen*

4.3.2.2 Greifen

Um Objekte aufnehmen und anschließend platzieren zu können, wird der Roboter mit einem Greifer ausgerüstet, der am Endeffektor befestigt wird. Mit dem Prozessbaustein *Greifen* wird ein Greifprozess beschrieben mit dem Ziel, die Kontrolle über ein Objekt zu erlangen. Der Beginn des Prozessbausteins *Greifen* ist durch das Ausführen des entsprechenden Befehls auf der Robotersteuerung gekennzeichnet und endet, sobald die Kontrolle über das zu greifende Objekt erlangt ist und der Roboter bereit ist, den nächsten Bewegungsbefehl auszuführen. Nach dem zugrunde liegenden physikalischen Wirkprinzip werden nach (Hesse 2011) vier Greifarten unterschieden:

1. Greifen durch Klemmen (z. B. Zwei-Finger-Greifer)
2. Greifen durch Eindringen (z. B. Nadelgreifer)

3. Greifen durch Grenzflächeneffekte (z. B. Elektrostatischer Greifer)
4. Greifen durch Anhalten (z. B. Vakuum-Greifer)

In einem ersten Schritt wird *Greifen* für Greifer basierend auf dem Wirkprinzip des Klemmens am Beispiel eines elektrischen Zwei-Finger-Greifers definiert. Für diese Art des Greifens führen die Finger eine lineare Schließbewegung aus. Die Berechnung der Bewegungszeit kann deshalb ähnlich wie für lineare Bewegungen des Prozessbausteins *Hinlangen* erfolgen. In Abbildung 4.20 ist die Schließbewegung eines elektrischen Zwei-Finger-Greifers dargestellt mit den Zeitanteilen gemäß Tabelle 4.16.

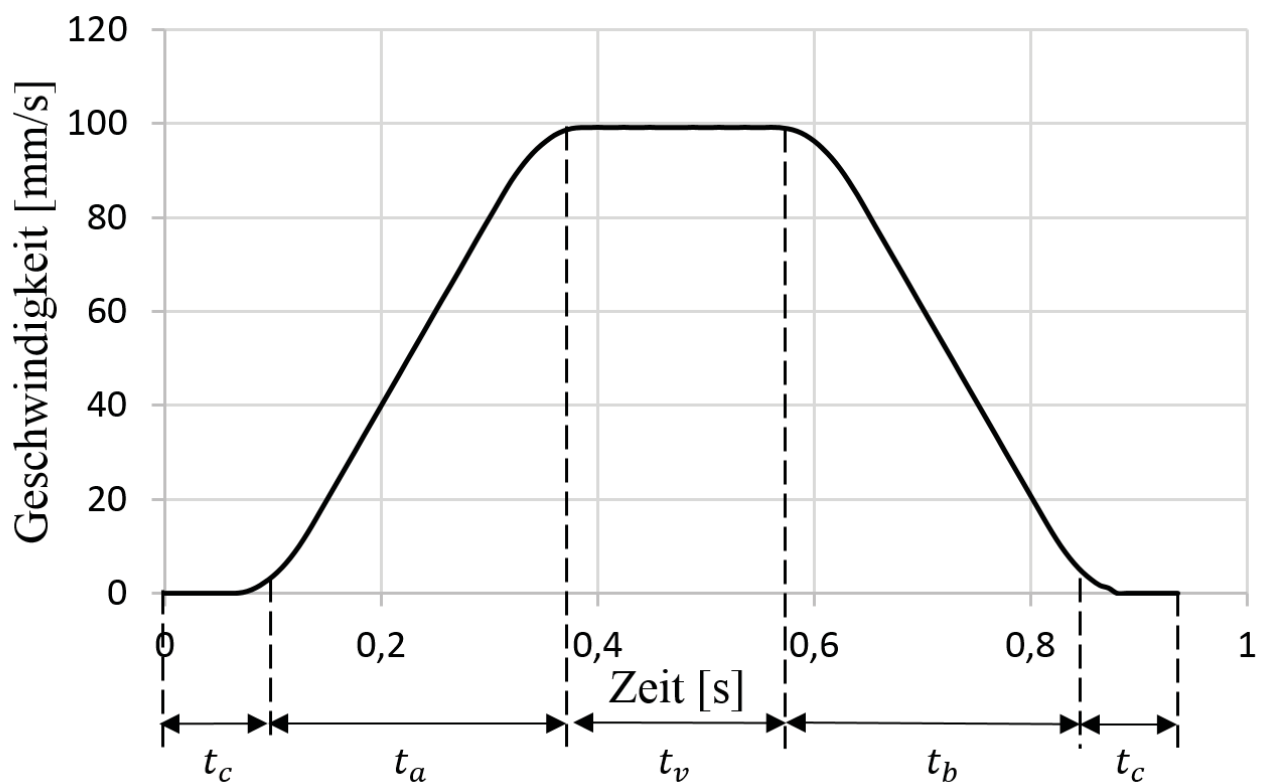


Abbildung 4.20: Geschwindigkeit der Finger für eine positionsgeregelte Schließbewegung

Tabelle 4.15: Zeitelemente einer Greifbewegung

Element	Beschreibung
t_c	Zeitanteil Kommunikation
t_a	Zeitanteil Beschleunigung
t_v	Zeitanteil konstanter Geschwindigkeit
t_b	Zeitanteil Verzögerung

Nachdem der Befehl zum Schließen des Greifers auf der Roboter-Steuerung ausgeführt wird, vergeht die Zeitspanne t_c , bis die Schließbewegung startet, da das Signal zum Schließen an die Greifer-Steuerung übertragen wird und dort verarbeitet wird. Anschließend beschleunigen die Finger linear für die Zeitspanne t_a bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit. Die Zeitspanne der konstanten Geschwindigkeit ist mit t_v bezeichnet. Anschließend wird die Bewegung für die Zeitdauer t_b abgebremst bis die Finger in der gewünschten Schließposition sind. Bevor der Roboter den nächsten Bewegungsbefehl ausführen kann, vergeht die Zeitspanne t_c , bis das Signal von der Greifer-Steuerung zur Robotersteuerung übertragen ist. Zusammenfassend sind die signifikanten Einflussgrößen auf die Bewegungszeit einer Greifbewegung in Tabelle 4.16 aufgeführt.

Tabelle 4.16: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein *Greifen*

Einflussgröße	Ausprägung
Kommunikation zw. Roboter- und Greifer-Steuerung	Absolutwert in s
Distanz der Schließbewegung	Absolutwert in mm
Geschwindigkeit	Absolutwert in mm/s
Beschleunigung	Absolutwert in mm/s ²

Die Gesamtzeit zur Durchführung der Greifbewegung ergibt sich aus der Summe der Zeitelemente aus Tabelle 4.15 wie in Gleichung (4.30) dargestellt, wobei der Zeitanteil der Kommunikation einmal zu Beginn und ein weiteres Mal am Ende des Greifvorgangs auftritt. Die Gesamtzeit zur Durchführung der Greifbewegung berechnet sich nach (4.28). mit der Geschwindigkeit der Greifbewegung v_{gr} , der Beschleunigung a_{gr} und der Distanz der Schließbewegung s_{gr} . Für kurze Schließbewegungen kann es vorkommen, dass die spezifizizierte Greifer-Geschwindigkeit nicht erreicht wird. Dieser Umstand wird mit der Fallunterscheidung in (4.29) berücksichtigt.

$$t_{gr} = t_c + t_a + t_v + t_b + t_c \quad (4.28)$$

$$t_{gr} = \begin{cases} 2 t_c + \frac{v_{gr}}{a_{gr}} + \frac{s_{gr}}{v_{gr}} & \text{für } \left(s_{gr} - \frac{v_{gr}^2}{a_{gr}} \right) \geq 0 \\ 2 t_c + 2 \sqrt{\frac{s_{gr}}{a_{gr}}} & \text{für } \left(s_{gr} - \frac{v_{gr}^2}{a_{gr}} \right) < 0 \end{cases} \quad (4.29)$$

In der Programmierung des Greifers kann entweder die Schließposition vorgegeben werden oder die Schließkraft über den Motorstrom geregelt werden. Da sowohl für die Beschleunigung als auch für das Abbremsen der Schließbewegung dieselben Motoren genutzt werden, wird der Zeitanteil der Beschleunigung gleich dem des Abbremsens gesetzt. Für das Greifen über einen definierten Motorstrom ergibt sich dabei eine Abweichung, da der Geschwindigkeitsabfall beim Erreichen der Schließposition höher ist als beim positionsgeregelten Greifen. Dieser Einfluss ist in Bezug auf die Gesamtzeit gering und wird deshalb für die Berechnung nicht berücksichtigt. Insgesamt ergibt sich damit die Gesamtzeit zur Durchführung einer Greifbewegung zu (4.29). Der Zeitanteil zur Kommunikation zwischen Roboter- und Greifer-Steuerung wird als konstant angenommen, während die Parameter Greifer-Beschleunigung a_{gr} , Greifer-Geschwindigkeit v_{gr} und die Distanz der Finger-Bewegung s_{gr} direkt durch den Benutzer

vorgegeben werden. Damit ergibt sich die Kodierung des Prozessbausteins *Greifen* mit den signifikanten Einflussgrößen wie in Abbildung 4.21 dargestellt.

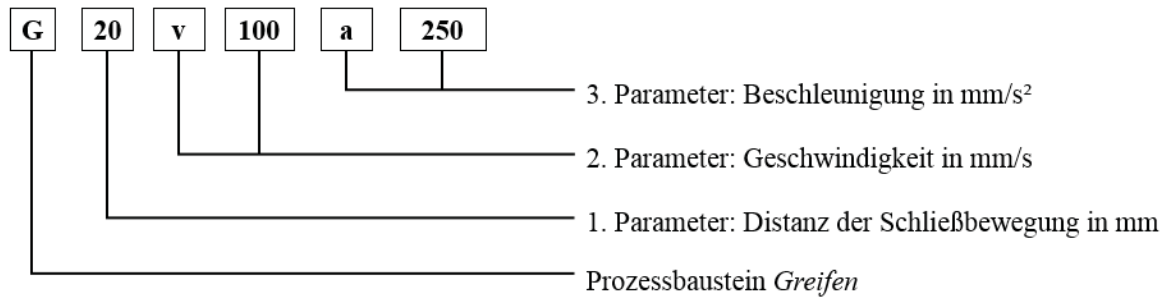


Abbildung 4.21: Kodierung des Prozessbausteins *Greifen*

4.3.2.3 Bringen

Bringen ist die Grundbewegung, mit der ein Gegenstand von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt bewegt wird. Die Bewegung beginnt mit der Ausführung des ersten Befehlssatzes auf der Roboter-Steuerung und endet mit dem Stillstand des Gegenstandes in der Zielposition. Für den Prozessbaustein *Bringen* gelten grundsätzlich dieselben Überlegungen wie für den Prozessbaustein *Hinlangen*. Zusätzlich zu den bereits ermittelten Einflussgrößen des Hinlangens muss die Masse des manipulierten Gegenstands berücksichtigt werden, da die Massenträgheit einen Einfluss auf die zur Durchführung der Bewegung benötigte Zeit hat. Damit ergeben sich die signifikanten Einflussgrößen wie in Tabelle 4.17 aufgeführt.

Tabelle 4.17: Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein *Hinlangen*

Einflussgröße	Ausprägung
Bewegte Masse	Absolutwert in kg
Bewegungslänge	Absolutwert in mm
Geschwindigkeit	Absolutwert in mm/s
Beschleunigung	Absolutwert in mm/s ²
Bewegungsart	Linear oder achsspezifisch
Art des Stops	Genauhalt oder überschliffen

Die Antriebe des Roboters müssen neben der Masse der Roboterkinematik den zu manipulierenden Gegenstand beschleunigen. Dabei hat die Massenträgheit einen signifikanten Einfluss auf die Bewegungszeit. Zur Durchführung exakter Berechnungen muss die genaue Roboterkinematik bekannt sein, um zu jeder Pose und der damit verbundenen Gelenkstellung die Massenträgheiten zu berechnen. Da diese Parameter in der Planungsphase i.d.R nicht bekannt sind, werden die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen: Für eine Bewegung um ein beliebiges Drehgelenk j_i wird die Masse des Roboterarms, der um dieses Gelenk bewegt wird, zu einer Punktmasse m_{RK} im Abstand l_1 zum Drehpunkt reduziert. Die Masse des manipulierten Gegenstandes wird durch die Punktmasse m_{TCP} im Abstand l_2 zur Drehachse dargestellt. Mit dem als konstant angenommenen Antriebsmoment M_A ergibt sich das Freikörperbild wie in Abbildung 4.22 dargestellt.

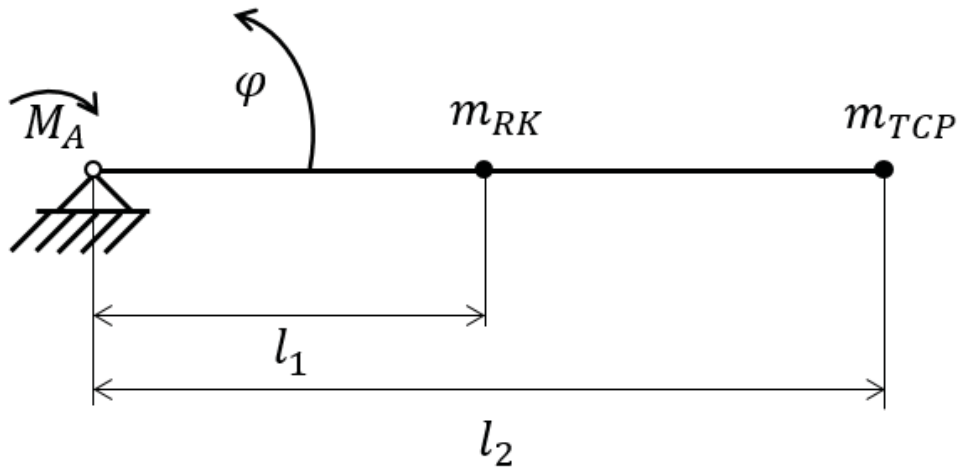


Abbildung 4.22: Bewegung um Drehgelenk

Es gelten die Bewegungsgleichungen (4.30)-(4.32) mit der Beschleunigungszeit t_a und dem zusammengefassten Massenträgheitsmoment Θ_g gemäß Gleichung (4.33).

$$\Theta_g \ddot{\varphi} = M_A \quad (4.30)$$

$$\dot{\varphi} = \int_0^{t_a} \frac{M_A}{\Theta_g} dt = \frac{M_A}{\Theta_g} t_a \quad (4.31)$$

$$\varphi = \int_0^{t_a} \frac{M_A}{\Theta_g} t dt = \frac{M_A}{2 \Theta_g} t_a^2 \quad (4.32)$$

$$\Theta_g = \left(\frac{m_{RK} l_1 + m_{TCP} l_2}{m_{RK} + m_{TCP}} \right)^2 (m_{RK} + m_{TCP}) = \frac{(m_{RK} l_1 + m_{TCP} l_2)^2}{m_{RK} + m_{TCP}} \quad (4.33)$$

Der Einfluss auf die Bewegungszeit zum Beschleunigen und Abbremsen wird maßgeblich durch das Verhältnis m_{RK} zu m_{TCP} und die zugrunde liegenden geometrischen Gegebenheiten l_1 und l_2 bestimmt. Für einen Leichtbauroboter hat eine Änderung der Traglast einen größeren Einfluss auf die Bewegungszeit im Vergleich zu einem massiv ausgeführten Standard-Industrieroboter. Genauso ist der Einfluss auf die erste

Bewegungsachse des Roboters am größten, da die nachgelagerten Gelenke mitbewegt werden müssen. Durch Lösen der Bewegungsgleichungen (4.30)-(4.32), kann die benötigte Beschleunigungszeit t_a berechnet werden. Das Berechnungsergebnis ergibt sich in Abhängigkeit des anliegenden Motormoments und des Massenträgheitsmoments, abhängig von der Traglast und der Roboterpose. Da diese Parameter in der Planungsphase nicht bekannt sind, wird eine vereinfachte, an den Planungsstand angepasste Rechnung eingeführt. Für eine Bewegung ohne Traglast wird Gleichung (4.34) und für dieselbe Bewegung mit der Traglast m_{TCP} wird Gleichung (4.35) aufgestellt. Mit dem Verhältnis von (4.35) zu (4.34) ergibt sich der Faktor K_a zu (4.36), der sich anhand der Roboter- und der zu bewegenden Traglast sowie den geometrischen Gegebenheiten mit l_1 und l_2 berechnen lässt. Mithilfe dieses Faktors kann die an die Traglast angepasste Beschleunigung gemäß (4.37) berechnet werden. Die Masse des Roboters und die zu bewegendende Traglast werden als bekannt vorausgesetzt und die Längen l_1 und l_2 anhand der Roboterreichweite als Konstanten festgelegt. Die Berechnung der Bewegungszeit für den Prozessbaustein *Bringen* erfolgt analog der Berechnung des Prozessbausteins *Hinlangen* nach Gleichung (4.17), wobei die Beschleunigung gemäß (4.37) berechnet wird. Mit den signifikanten Einflussgrößen gemäß Tabelle 4.17 ergibt sich die Kodierung des Prozessbausteins *Bringen* wie in Abbildung 4.23 dargestellt.

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{M_A}{m_{RK} l_1^2} \quad (4.34)$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \frac{M_A(m_{RK} + m_{TCP})}{(m_{RK} l_1 + m_{TCP} l_2)^2} \quad (4.35)$$

$$K_a = \frac{\ddot{\varphi}_2}{\ddot{\varphi}_1} = \frac{(m_{RK} l_1 + m_{TCP} l_2)^2}{(m_{RK} + m_{TCP}) m_{RK} l_1^2} \quad (4.36)$$

$$a_{m_{TCP}} = K_a a_{TCP} \quad (4.37)$$

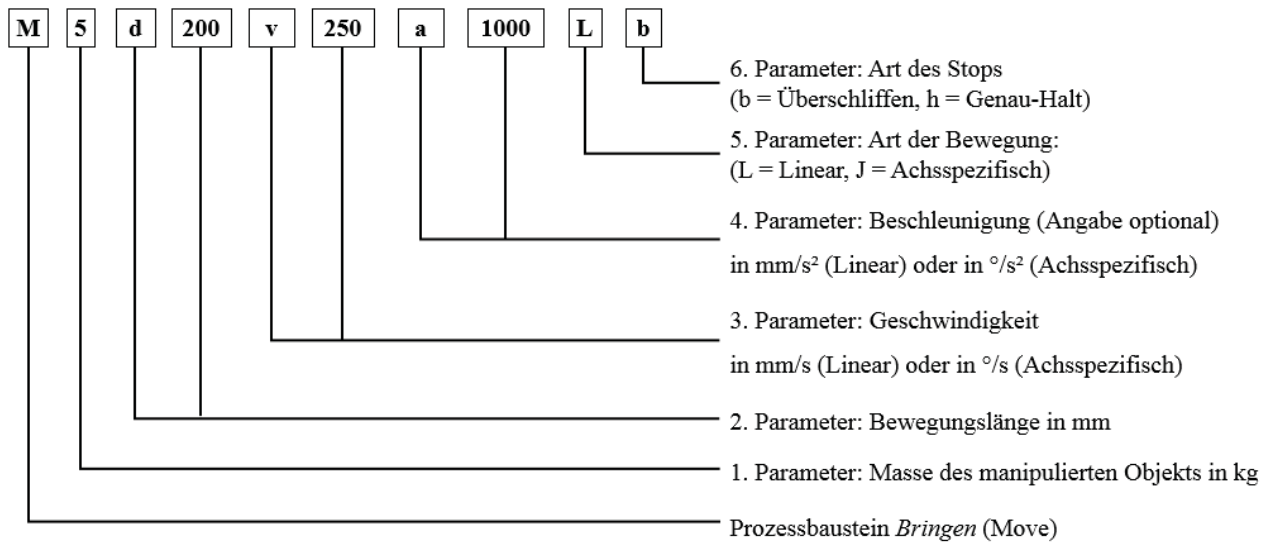


Abbildung 4.23: Kodierung des Prozessbausteins *Bringen*

4.3.2.4 Fügen

Für die Bewegung eines Objektes zu einem Zielort wird der Prozessbaustein *Bringen* verwendet. Wenn die erforderliche Genauigkeit am Zielort höher als die technisch bedingte Wiederholgenauigkeit des Roboters ist, muss zusätzlich der Prozessbaustein *Fügen* verwendet werden. Durch *Fügen* wird das Einstecken eines Objekts in ein anderes beschrieben. Dieser Fügevorgang beginnt, sobald der Roboter die vorherige Bring-Bewegung beendet hat und in der Position steht, um den Fügevorgang durchzuführen, wie beispielhaft in Abbildung 4.24 dargestellt. Das Ende des Prozessbausteins *Fügen* ist erreicht, sobald das Objekt in der endgültigen Fügeposition ist, und der Roboter bereit ist, den nächsten Bewegungsbefehl auszuführen, wie in Abbildung 4.25 dargestellt.



Abbildung 4.24: Roboter ist in Position zum Fügen



Abbildung 4.25: Das Objekt wurde gefügt

Mit dem Prozessbaustein *Fügen* werden Füge-Vorgänge abgebildet, bei denen die erforderliche Genauigkeit des Fügevorgangs die technische Wiederholgenauigkeit des Roboters übersteigt. Dazu ist ein sensitives Fügen notwendig, bei dem eine Kraft in Fügerichtung aufgebracht wird und das Objekt in einer Suchfahrt leicht hin und her bewegt wird, bis es entlang der Kontur des Fügepartners in die endgültige Füge-Position gebracht werden kann. Diese Suchfahrt kann abhängig von der Geometrie der Fügepartner beispielsweise in einem linearen Zick-Zack-Muster oder in einer spiralförmigen Kreisbahn erfolgen. Auch kann es erforderlich sein, dass das Objekt durch eine Drehbewegung in Position gebracht wird. Die Zeit, die für einen solchen Fügevorgang erforderlich ist, hängt von der genauen Startposition und dem Muster der Suchfahrt ab und kann nicht genau im Voraus berechnet werden, da die Startposition im Rahmen der Wiederholgenauigkeit des Roboters zufällig ist. Deshalb wird die Zeit zur Durchführung der Suchfahrt mit der Konstanten t_{sp} approximiert, die den Mittelwert verschiedener in Experimenten durchgeführten Suchfahrten repräsentiert. Abhängig von der Passungsklasse unterscheidet sich die Zeit zur Durchführung der Suchfahrt, da beispielsweise für eine grobe Spielpassung die Suchfahrt schneller durchgeführt werden kann als für eine engere Grenzpassung. Dieser Umstand spiegelt sich in den verschiedenen Werten für unterschiedliche Passungsklassen gemäß Tabelle 4.18

wieder. Die Passungsklassen sind in Anlehnung an das Prozessbaustein-System MTM-1 gewählt.

Tabelle 4.18: Zeit zur Durchführung der Suchfahrt in Abhängigkeit der Passungsklasse

Passungsklasse	P1	P2	P3
Passung	Lose: Kein Druck – Gegenstände fallen ineinander	Eng: Leichter Druck – Gegenstände fallen nicht mehr ineinander	Fest: Starker Druck – Gegenstände werden ineinander gepresst
t_{sp}	0.5 s	0.7 s	0.9 s

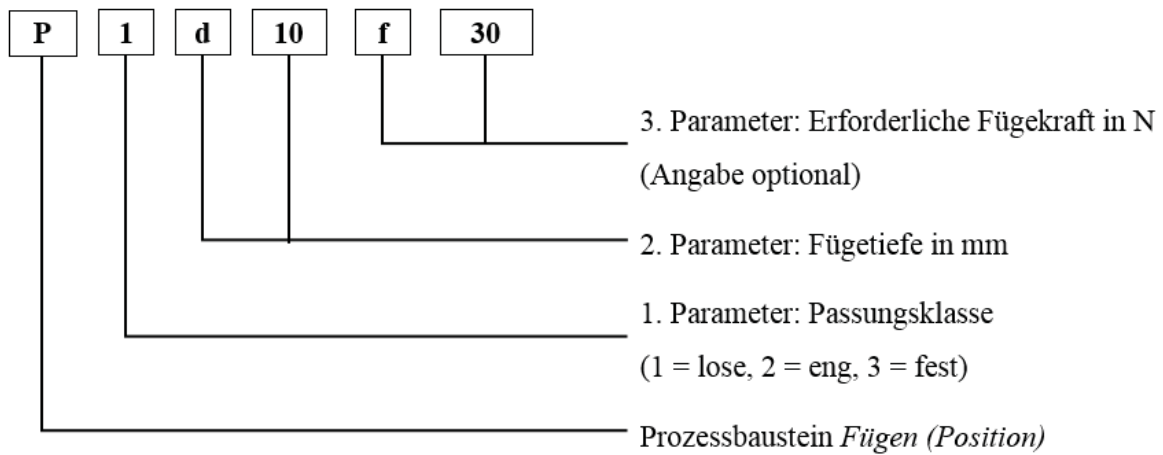
Nachdem die Suchfahrt beendet ist, wird das zu fügende Objekt entlang der Kontur des Fügepartners in Position gebracht. Der dafür benötigte Zeitanteil t_{sl} ist abhängig von der aufbrachten Fügekraft, der Reibkraft zwischen den Fügepartnern sowie der Masse des zu fügenden Objekts. Da diese Parameter, bis auf die Masse des zu fügenden Objekts, während der Planungsphase nicht bekannt sind, wird dieser Zeitanteil abhängig von der zu überbrückenden Fügetiefe d_{sl} mit einer Konstanten approximiert wie in Tabelle 4.19 dargestellt.

Tabelle 4.19: Zeit für das Fügen in Abhängigkeit der Fügetiefe

	$d_{sl} < 20mm$	$20mm \leq d_{sl} < 50mm$	$d_{sl} \geq 50mm$
t_{sl}	0.6 s	0.9 s	1.8

Insgesamt ergibt sich die für den Fügevorgang benötigte Zeit aus der Summe der Zeitanteile für die Suchfahrt sowie des eigentlichen Fügens wie in (4.38) dargestellt. Die signifikanten Einflussgrößen werden zusammengefasst in der Kodierung, wie in Abbildung 4.26 dargestellt. Zusätzlich zur Fügepassung und der Fügetiefe wird die erforderliche Fügekraft als optionaler Parameter angegeben. Hieraus lassen sich direkt Anforderungen an den zu verwendenden Roboter ableiten.

$$t_P = t_{sp} + t_{sl} \quad (4.38)$$

Abbildung 4.26: Kodierung des Prozessbausteins *Fügen*

4.3.2.5 Loslassen

Der Prozessbaustein *Loslassen* beschreibt den Vorgang zur Aufgabe der Kontrolle über ein zuvor manipuliertes Objekt. Er beginnt mit der Ausführung des entsprechenden Befehls auf der Roboter-Steuerung und endet, sobald die Kontrolle über das Objekt aufgegeben wurde und der nächste Befehl durch den Roboter ausgeführt werden kann. Genauso wie für den Prozessbaustein *Greifen* wird *Loslassen* für einen elektrischen Zwei-Finger-Greifer definiert. Um den Greifer zu öffnen, wird die Schließbewegung der Finger umgekehrt, bis diese sich wieder in der Ausgangsposition befinden. Dementsprechend werden dieselben Formelzusammenhänge zur Berechnung der benötigten Zeit des Loslassens wie für das Greifen verwendet:

$$t_{rl} = \begin{cases} 2 t_c + \frac{v_{rl}}{a_{rl}} + \frac{s_{rl}}{v_{rl}} & \text{für } s_{rl} - \frac{v_{rl}^2}{a_{rl}} \geq 0 \\ 2 t_c + 2 \sqrt{\frac{s_{rl}}{a_{rl}}} & \text{für } s_{rl} - \frac{v_{rl}^2}{a_{rl}} < 0 \end{cases} \quad (4.39)$$

Auch hier tritt der Zeitanteil der Kommunikation zwei Mal auf, da der Roboter den nächsten Bewegungsbefehl erst ausführen kann, wenn die Rückmeldung der Greifer-Steuerung erfolgt ist, dass der Greifer geöffnet ist. Die Berechnung der benötigten Zeit für das Loslassen berechnet sich gemäß der Fallunterscheidung in (4.39) je nachdem, ob die spezifizizierte Geschwindigkeit für die Bewegung des Loslassens erreicht werden kann oder nicht. In Abbildung 4.27 ist die Kodierung des Prozessbausteins *Loslassen* dargestellt.

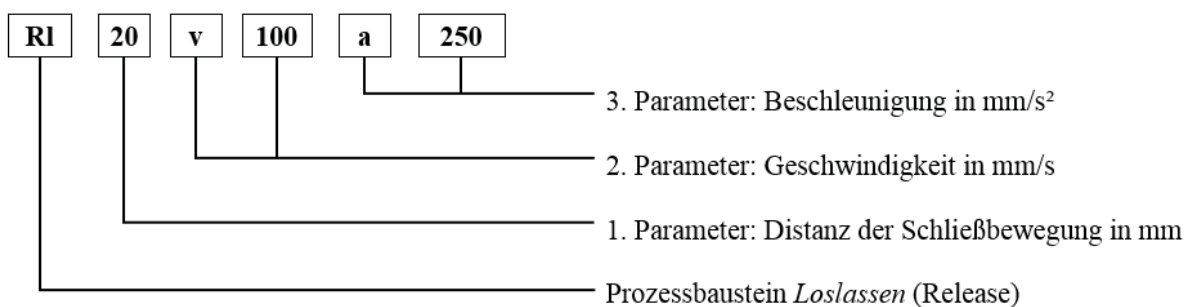


Abbildung 4.27: Kodierung des Prozessbausteins *Loslassen*

4.3.3 Beschreibung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation

Zur Beschreibung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation werden Prozessbausteine des bestehenden Prozessbausteinsystems MTM-1 mit den roboterspezifischen Prozessbausteinen aus Abschnitt 4.3.2 kombiniert. Das daraus resultierende System wird im Folgenden mit MTM-MRK (MTM-Mensch-Roboter-Kooperation) bezeichnet. Eine Analyse in MTM-MRK erfolgt tabellenbasiert, wobei die Tätigkeiten von Mensch und Roboter chronologisch beschrieben und nebeneinander dargestellt werden. In Abbildung 4.28 ist beispielhaft eine Analyse eines Arbeitssystems mit MTM-MRK dargestellt.

MTM		MTM-Analyse Mensch-Roboter-Kooperation										Anlage-Nr.
		□ Planungsanalyse					□ Ausführungsanalyse					Blatt
Mensch								Roboter				
Nr.	Bezeichnung	A*H	Kode	TMU	Kode	A*H	Bezeichnung	Status	Bezeichnung	A*H	Kode	TMU
7								R	Zwischenposition anfahren	1*1	M3000v1500Lb	55
8								R	Zwischenposition anfahren	1*1	M1500v1500Lb	27
9								R	Zwischenposition anfahren	1*1	M500v250Lb	35
10				75	W5P	1*1	Zum Fahrzeug	MR	Start Linetracking	1*1	M3000v80Lb	1034
11	Zur Bedieneinheit	1*1	R10B	6				MR				
12		1*1	G5	0				MR				
13	Drücken	1*1	M2A	2				MR				
14		1*1	RL2	0				MR				
15				29	B	1*1	In Fahrzeug	MR				
16	Zum Tügriff	1*1	R10B	6				MR				
17		1*1	G1A	2				MR				

Abbildung 4.28: Auszug aus MTM-MRK Analyse (Schröter et al. 2016c)

Neben der Bezeichnung des Arbeitsschrittes wird der entsprechende Code nach MTM-1 Kodierung in einer Beidhandanalyse für die linke und für die rechte Hand aufgeführt. In der Spalte „A*H“ wird das Produkt aus Anzahl und Häufigkeit des Auftretens des jeweiligen Arbeitsschrittes aufgeführt. In Kombination mit der MTM-1 Normzeit berechnet sich hieraus die Sollzeit des entsprechenden Arbeitsschrittes und wird in der Spalte „TMU“ dokumentiert. Die Normzeit bzw. Sollzeit wird in MTM als TMU (Time Measurement Unit) angegeben; 1 TMU entspricht 0,036 Sekunden. Im rechten Teil der Tabelle werden analog zur Beschreibung der menschlichen Arbeitsschritte die Arbeitsschritte des Roboters mit Bezeichnung, Anzahl, Häufigkeit, Code und entsprechendem Sollzeitwert dargestellt.

In der Spalte „Status“ wird die zeitbestimmende Ressource gekennzeichnet und es ist ersichtlich ob Mensch und Roboter synchronisiert arbeiten oder an welchem Punkt eine Interaktion stattfindet. Zusammenfassend sind die verschiedenen Möglichkeiten und der entsprechende Status in Tabelle 4.20 dargestellt. Auf diese Weise ist es möglich, sowohl Arbeitsabläufe von Mensch und Roboter aufeinander abzustimmen als auch eine Kooperation der beiden zu berücksichtigen und damit effiziente Arbeitsabläufe zu planen.

Tabelle 4.20: Identifikation der zeitbestimmenden Ressource

Status	Beschreibung
M	Mensch ist zeitbestimmend; keine parallele Bewegung des Roboters
R	Roboter ist zeitbestimmend; keine parallele Bewegung des Menschen
M	Mensch ist zeitbestimmend, Ablauf erfolgt zeitgleich zur Roboterbewegung
R	Roboter ist zeitbestimmend, Ablauf erfolgt zeitgleich zur Menschbewegung
MR	Mensch ist zeitbestimmend, Ablauf erfolgt synchronisiert
RM	Roboter ist zeitbestimmend, Ablauf erfolgt synchronisiert

4.3.4 Validierung der Prozessbaustein-Genauigkeit

Die Genauigkeit der Bewegungszeiten, die mit den Prozessbausteinen berechnet werden, ist von zentraler Bedeutung für die Anwendung der Methodik. Die handhabungsbedingten Zubringzeiten haben den größten Einfluss auf die Durchführungszeit einer Montageaufgabe (Schöninger 1989). Deshalb wird im Folgenden die Genauigkeit der Prozessbausteine *Hinlangen* und *Bringen* untersucht.

4.3.4.1 Aufbau und Durchführung der Versuche

Für jede Roboterbewegung werden in der Planung verschiedene Parameter festgelegt, die als Grundlage zur Berechnung der Bewegungszeiten der Prozessbausteine *Hinlangen* und *Bringen* dienen. Dazu zählen die Bewegungslänge, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Traglast sowie die Bewegungsart und die Art des Stops am Ende der Bewegung. Für die Versuche zur Validierung der Prozessbaustein-Genauigkeit wurden die kartesische Position des Endeffektors und die Achsstellungen der Roboter-Kinematik über eine Echtzeitmessung der Roboter-Steuerung mit einer Aufnahme-frequenz von 125 Hz aufgezeichnet. Zusätzlich wurde die Bewegungszeit über ein externes Messgerät des Typs Siemens B2041 erfasst. Über das Bussystem des Roboters wird unmittelbar vor Beginn der Bewegung ein Signal von der Roboter-Steuerung an

das Messgerät gesendet, mit dem die Zeitmessung gestartet wird. Sobald die Bewegung beendet ist wird ein zweites Signal übertragen, mit dem die Messung gestoppt wird. Um die Anwendbarkeit der Prozessbausteine auf verschiedene Roboter zu untersuchen, wurden die Versuche mit Robotern zweier verschiedener Hersteller durchgeführt. Die Versuche wurden durchgeführt mit einem Roboter des Typs CR35-iA der Firma Fanuc und mit einem Roboter des Typs UR10 des Herstellers Universal Robot. Beide Roboter verfügen über sechs Achsen und sind speziell für Mensch-Roboter-Kooperation ausgelegt. Sie verfügen über Sensoren, die eine Kollision zuverlässig erkennen, um kollaborative Anwendungen unter Verwendung des Schutzprinzips der Kraft- und Leistungsbegrenzung umzusetzen.

Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale sind die Größe und damit verbunden die Reichweite und Traglast, wie in Tabelle 4.21 dargestellt. Zusätzlich wurde für jeden Versuch eine Simulation des entsprechenden Roboters mit der 3D-Simulations-Software der Hersteller durchgeführt (Fanuc Roboguide und UR Studio). Damit ist es möglich, sowohl eine Aussage über die Genauigkeit der Prozessbausteine in Bezug auf die realen Messwerte als auch in Bezug zu den Ergebnissen der 3D-Simulation zu treffen.

Tabelle 4.21: Reichweite und Traglast der Roboter im Vergleich

	Fanuc CR35-iA	Universal Robot UR10
Eigenmasse Roboterkinematik [kg]	252	29
Reichweite [mm]	1813	1300
Traglast [kg]	35	10

Für die signifikanten Einflussgrößen von *Hinlangen* und *Bringen* wurden die entsprechenden Parameter in drei Testblöcken variiert, wie in Tabelle 4.22 dargestellt. Im ersten Testblock wurden die Wiederholgenauigkeit der Messungen, der Einfluss unterschiedlicher Traglasten sowie der Einfluss der Bewegungsrichtung überprüft. In einem

zweiten und dritten Testblock wurde anschließend die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Bewegungsart und hinsichtlich des Überschleifens von Bahnpunkten untersucht.

Tabelle 4.22: Untersuchungsfokus der Testblöcke und variierte Testparameter

Testblock	Untersuchungsfokus	Variierte Parameter
1.	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederholgenauigkeit der Versuche • Bewegungsrichtung des Roboters • Einfluss der Traglast 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewegungsrichtung • Bewegte Masse • Bewegungslänge • Beschleunigung • Geschwindigkeit
2.	<ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedliche Bewegungsarten (Linear und achsspezifisch) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewegungsart • Bewegungslänge • Beschleunigung • Geschwindigkeit
3.	<ul style="list-style-type: none"> • Überschleifen von Bahnpunkten 	<ul style="list-style-type: none"> • Überschleifradius

4.3.4.2 Auswertung der Versuche

Testblock 1

Für den ersten Testblock wurde in einer ersten Versuchsreihe die Wiederholgenauigkeit der Zeit-Messung bestimmt. Alle Messungen weisen eine Abweichung von weniger als 1 ms auf und liegen damit im Rahmen der Wiederholgenauigkeit des Messgeräts Siemens B2041.

Um den Einfluss der Bewegungsrichtung zu überprüfen, wurden Bewegungen der gleichen Länge in die verschiedenen Koordinatenrichtungen des Arbeitsraums des Roboters vorgenommen. Für jeden Versuch wurde gemäß Gleichung (4.40) die Abweichung der Bewegungszeit vom Mittelwert aller Bewegungen gebildet. Wie die Ergebnisse in Tabelle 4.23 zeigen, hat die Bewegungsrichtung sowohl für den Fanuc CR35-iA als auch für den Universal UR10 keinen signifikanten Einfluss auf die Bewegungszeit.

$$\Delta t_m = \frac{t_g - \bar{t}_g}{t_g} * 100 \quad (4.40)$$

Tabelle 4.23: Einfluss der Bewegungsrichtung auf eine lineare Bewegung

Versuch	Bewegungs- richtung	UR 10		Fanuc CR35-iA	
		t_g [s]	Δt_m [%]	t_g [s]	Δt_m [%]
1.07	X	2.279	-0.02	2.520	-0.08
1.08	Y	2.280	0.02	2.522	0.00
1.09	Z	2.280	0.02	2.518	-0.16
1.10	XYZ	2.279	-0.02	2.528	0.24

Zur Untersuchung des Einflusses der Traglast wurden für beide Roboter Bewegungen mit unterschiedlicher Bewegungslänge und Geschwindigkeit bei verschiedenen Traglasten durchgeführt. Dazu wurden Bewegungen unter Verwendung gleicher Bewegungs-Parameter jeweils mit und ohne Traglast durchgeführt. Für den Roboter CR35-iA wurde der Einfluss der Traglast mit den in Tabelle 4.24 dargestellten Versuchen untersucht. Abhängig von den Bewegungsparametern ergibt sich einen Einfluss der Traglast von etwa 2-4% auf die Bewegungszeit des Roboters. Dieser ist für kurze Bewegungslängen und hohe Geschwindigkeiten größer, da hier der Einfluss der Phase des Beschleunigens und Abbremsens aufgrund des erhöhten Massenträgheitsmoments größer ist. Im Gegensatz dazu zeigt die Auswertung der Ergebnisse in Tabelle 4.25 keinen signifikanten Einfluss der Traglast für den Roboter UR10, obwohl das Verhältnis von Robotereigenmasse zu Traglast wesentlich geringer als das des CR35-iA ist. Die Begründung hierfür liegt in der Steuerung der Motorströme durch die Roboter-Steuerung. Während für den Roboter CR35-iA die Bewegungszeit für höhere Traglasten zunimmt, werden für den untersuchten Universal Robot höhere Traglasten durch höhere Motorströme kompensiert, wodurch die Bewegungszeit unabhängig von der Traglast ist. Das bedeutet, dass die Berücksichtigung des Faktors K_a gemäß Abschnitt 4.3.2.3 für die Berechnung des Prozessbausteins *Bringen* abhängig vom Robotertyp erfolgen sollte.

Tabelle 4.24: Einfluss der Traglast für den Roboter CR35-iA

Versuch	Bewegungs- länge [mm]	Geschw. [mm/s]	Traglast [kg]	Zeit [s]	Differenz [%]
1.01	100	100	0	1.52	3.95
1.11	100	100	10	1.58	
1.07	500	250	0	2.52	2.38
1.12	500	250	10	2.58	
1.04	1000	750	0	1.86	2.58
1.13	1000	750	10	1.91	

Tabelle 4.25: Einfluss der Traglast für den Roboter UR10

Versuch	Bewegungs- länge [mm]	Geschw. [mm/s]	Traglast [kg]	Zeit t_g [s]	Differenz [%]
1.01	100	100	0	1.15	-0.09
1.11	100	100	10	1.15	
1.07	500	250	0	2.28	0.00
1.12	500	250	10	2.28	
1.04	1000	1000	0	1.90	0.00
1.13	1000	750	10	1.90	

Testblock 2

Für den zweiten Testblock wurden verschiedene Bewegungsarten untersucht, um einen Vergleich der Berechnungsergebnisse der Prozessbausteine *Hinlangen* und *Bringen* mit denen der 3D-Simulation bzw. den realen Messwerten zu erhalten. Dazu wurde jeweils der Fehler der betrachteten Berechnungsmethode B in Bezug auf den realen Messwert der Gesamtzeit gemäß Formel (4.41) gebildet.

$$e_B = \frac{t_{g,real} - t_{g,B}}{t_{g,real}} * 100 \quad (4.41)$$

In Tabelle 4.26 ist ein Versuchsblock mit linearen Bewegungen verschiedener Bewegungslängen bei einer konstanten Geschwindigkeit von 250 mm/s für den Roboter CR35-iA dargestellt. Die Ergebnisse der 3D-Simulation zeigen eine Abweichung von maximal 2,35 % in Versuch 2.09, während diese für das Berechnungsergebnis des Prozessbausteins *Hinlangen* bei 1,33 % liegt. Insgesamt weisen die Ergebnisse von *Hinlangen* im Vergleich zu den Ergebnissen der 3D-Simulation einen geringeren Fehler auf.

Tabelle 4.26: Vergleich der Berechnungsergebnisse für lineare Bewegungen, Fanuc CR35-iA

Versuch	Code	<i>Hinlangen</i> $t_{g,HL}$ [s]	Realität $t_{g,real}$ [s]	3D-Sim. $t_{g,sim}$ [s]	Fehler e_{Sim} [%]	Fehler e_{HL} [%]
2.09	R200v250Lh	1.34	1.32	1.35	2.35	1.33
2.10	R350v250Lh	1.94	1.92	1.95	1.61	0.92
2.11	R500v250Lh	2.54	2.52	2.55	1.27	0.74
2.12	R650v250Lh	3.14	3.12	3.15	0.99	0.56
2.13	R800v250Lh	3.74	3.72	3.75	0.78	0.42
2.14	R1000v250Lh	4.54	4.52	4.55	0.69	0.39

Die Ergebnisse für den Roboter UR10 zeigen einen ähnlichen Charakter, wobei auch hier der maximale Fehler der 3D-Simulation mit 5,47 % höher liegt als der von *Hinlangen* mit maximal 1,95 %. Die Genauigkeit der Berechnung steigt für längere Bewegungen. Der Grund hierfür ist, dass der Hauptfehler der Berechnung in der Beschleunigungsphase begangen wird. Die Bewegung wird als gleichförmig beschleunigte Bewegung angenommen. In der Realität ist der Verlauf der Bewegung aber nicht ideal gleichförmig, wie der Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 4.29 zeigt. Da der Zeitanteil der Beschleunigung und des Abbremsens für kurze Bewegungslängen höher ist, ergibt sich ein erhöhter Berechnungsfehler für diese Bewegungen.

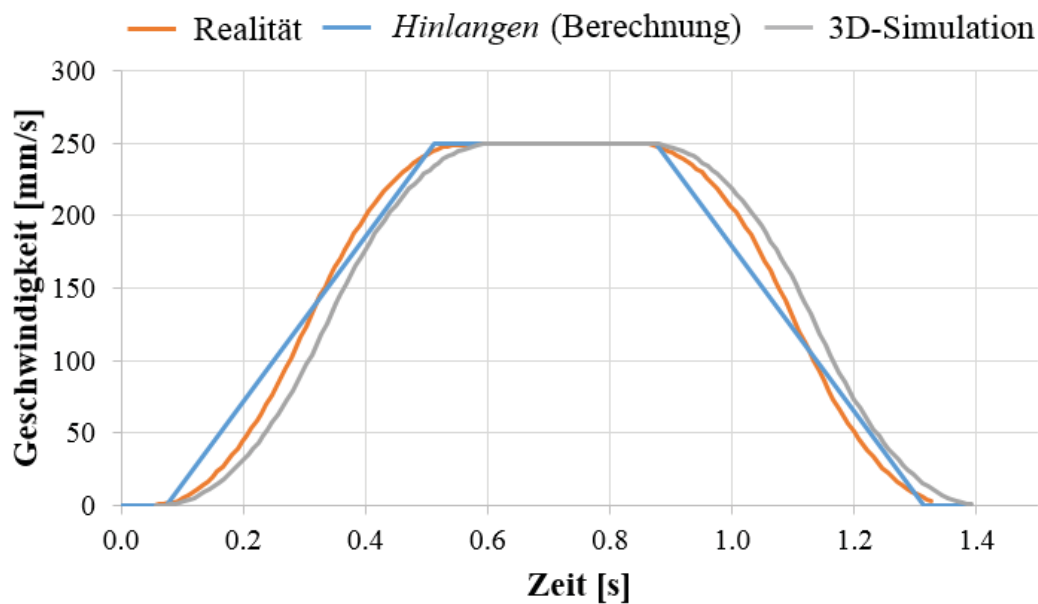


Abbildung 4.29: Geschwindigkeitsverlauf der Berechnungsmethoden im Vergleich, Versuch 2.09

Für achsspezifische Bewegungen ist der Berechnungsfehler des Prozessbausteins *Hinlangen* höher im Vergleich zu den Ergebnissen linearer Bewegungen, wie die Ergebnisse aus Tabelle 4.27 zeigen. Die Berechnung der Bewegungszeit basiert auf der mittleren Winkeldifferenz der zeitbestimmenden Achse, die für eine bestimmte Distanz zwischen Start- und Zielpunkt zu überbrücken ist. Da die tatsächliche Bahn des Endeffektors nicht bekannt ist, kommt es zu Abweichungen in der tatsächlich zu verfahrenen Winkeldifferenz der einzelnen Achsen und damit zu einem Fehler in der Berechnung. Der maximale Fehler liegt bei 15,12% in Versuch 2.49. Auch die Genauigkeit der Ergebnisse der 3D-Simulation ist im Vergleich mit den Ergebnissen linearer Bewegungen geringer und liegt bei einer maximalen Abweichung von 7,17% in Versuch 2.49. Die Ergebnisse des UR10 zeigen einen ähnlichen Charakter und weisen für achsspezifische Bewegungen einen maximalen Fehler von 12,48% in Versuch 2.49 für die Berechnung von *Reach* auf.

Tabelle 4.27: Vergleich der Bewegungszeiten für achsspezifische Bewegungen,
Fanuc CR35-iA

Versuch	Code	Hinlangen $t_{g,HL}$ [s]	Realität $t_{g,real}$ [s]	3D-Sim. $t_{g,sim}$ [s]	Fehler e_{sim} [%]	Fehler e_{HL} [%]
2.44	R200v100Jh	0.62	0.54	0.56	-2.94	-13.47
2.45	R350v100Jh	0.89	0.79	0.81	-2.02	-12.12
2.46	R500v100Jh	1.17	1.05	1.06	-1.53	-11.57
2.47	R650v100Jh	1.46	1.30	1.33	-2.47	-12.73
2.48	R800v100Jh	1.76	1.55	1.60	-3.09	-13.61
2.49	R1000v100Jh	2.18	1.90	2.03	-7.17	-15.12

Testblock 3

Für den dritten Testblock wurde das Überschleifen von Bahnpunkten untersucht. Dazu wurde in einem ersten Schritt eine Gruppe von drei Punkten im Winkel von 90° zueinander programmiert, wie in Abbildung 4.30 dargestellt. Die Bewegung des Endeffektors erfolgt vom Punkt P_1 über den überschlifften Punkt P_2 und endet im Zielpunkt P_3 . Dabei wurde in den Versuchen 3.06 bis 3.10 der Überschleifradius r_{bl} bei ansonsten gleichbleibenden Parametern variiert und damit der Einfluss des Überschleifens auf die Bewegungszeit untersucht.

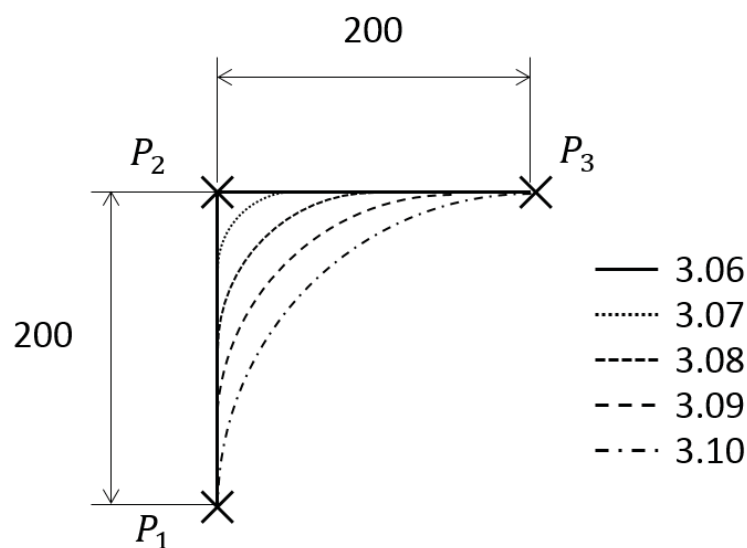


Abbildung 4.30: Bewegungsbahn der Versuche 3.06-3.10

In Tabelle 4.28 und Tabelle 4.29 sind die Ergebnisse der Versuche 3.06-3.10 für den Fanuc CR35-iA bzw. den Roboter Universal UR10 dargestellt. Ein Überschleifradius von null, wie in Versuch 3.06, entspricht einem Genauhalt bei P_2 und wird dementsprechend in der Berechnung von *Hinlangen* und *Bringen* berücksichtigt. Für alle anderen Versuche erfolgt die Berechnung mit einem konstanten Überschleifradius von 50 mm, weshalb sich die Werte von $t_{g,HL}$ für die Versuche 3.07-3.10 nicht unterscheiden. Der maximale Fehler beträgt dabei 4,38 % für den CR35-iA bzw. 5,36 % für den UR10. Im Vergleich dazu ergeben sich bei der Berechnung der 3D-Simulation genauere Ergebnisse für den CR35-iA, da hier der genaue Überschleifradius berücksichtigt wird. Im Falle des UR10 liegt der maximale Fehler der 3D-Simulation bei 8,13 % und übersteigt den maximalen Fehler der Berechnungsmethode, obwohl auch in der Simulation der genaue Überschleifradius spezifiziert wird.

Tabelle 4.28: Einfluss des Überschleifens für Fanuc CR35-iA

Versuch	Radius r_{bl} [mm]	Hinlangen $t_{g,HL}$ [s]	Realität $t_{g,real}$ [s]	3D-Sim. $t_{g,Sim}$ [s]	Fehler e_{Sim} [%]	Fehler e_{HL} [%]
3.06	0	2.68	2.63	2.70	2.43	1.82
3.07	12.5	2.05	2.14	2.17	1.12	-4.38
3.08	25	2.05	2.06	2.09	1.16	-0.68
3.09	37.5	2.05	2.01	2.02	0.80	2.09
3.10	50	2.05	1.97	1.98	0.81	4.17

Tabelle 4.29: Einfluss des Überschleifens für Universal UR10

Versuch	Radius r_{bl} [mm]	Hinlangen $t_{g,HL}$ [s]	Realität $t_{g,real}$ [s]	3D-Sim. $t_{g,Sim}$ [s]	Fehler e_{Sim} [%]	Fehler e_{HL} [%]
3.06	0	2.2	2.088	2.03	-2.78	5.36
3.07	12.5	1.99	2.063	1.98	-4.02	-3.54
3.08	25	1.99	2.04	1.93	-5.39	-2.45
3.09	37.5	1.99	2.017	1.88	-6.79	-1.34
3.10	50	1.99	1.992	1.83	-8.13	-0.10

5 Praktische Umsetzung und Anwendung der Methodik

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Methodik in ein softwarebasiertes Planungswerkzeug beschrieben. Anschließend wird die Anwendung der Methodik anhand zweier Beispiele aus dem Bereich der Automobilproduktion gezeigt.

5.1 Entwicklung eines softwarebasierten Planungswerkzeugs

Die Umsetzung der Methodik erfolgt in der Programmiersprache Excel VBA. Aufgrund der weiten Verbreitung der Produkte von Microsoft Office sind die meisten Anwender mit der Bedienung von Excel vertraut und es muss keine neue Software angeschafft werden. Das Programm gliedert sich in insgesamt vier Abschnitte mit jeweils einem Tabellenblatt, wobei der Anwender mithilfe eindeutiger Schaltflächen durch das Programm navigieren kann. Im ersten Tabellenblatt erfolgt die Bewertung der Montageoperationen hinsichtlich der Eignung für Mensch und Roboter gemäß Abschnitt 4.1, woraus im zweiten Tabellenblatt ein erster Montageablauf erstellt wird. Anschließend wird im dritten Tabellenblatt das Schutzprinzip gemäß Abschnitt 4.2 festgelegt und der Anwender kann abhängig vom gewählten Schutzprinzip Berechnungen bezüglich einzuhaltender Sicherheitsabstände und Geschwindigkeitsgrenzen durchführen. Abschließend erfolgt im letzten Schritt die Planung und Einteilung der Montageinhalte über die Prozesssprache MTM-MRK, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben. Es werden direkt Taktzeitinformationen generiert, anhand derer die Montageinhalte von Mensch und Roboter aufeinander abgestimmt werden können.

5.1.1 Bestimmung der Eignungsgrade von Mensch und Roboter

Die Auswahl der für die Montageoperation zutreffenden Kriterien erfolgt über ein Kontrollkästchen, wie in Abbildung 5.1 links dargestellt. Anschließend wird die zutreffende Ausprägung über ein Drop-Down-Menü ausgewählt. Die Gewichtung kann über einen Schieberegler im Bereich von 0-100% eingestellt werden. Ist ein

Kriterium nicht angewählt, ist es ausgegraut, um eine eindeutige visuelle Darstellung zu gewährleisten. Mit dem Klick auf die Schaltfläche „Montageoperation speichern“ wird automatisch der Gesamt-Eignungsgrad für Mensch und Roboter berechnet und zusammen mit dem Titel der Montageoperation im nächsten Tabellenblatt gespeichert. Sind alle Montageoperationen bewertet, kann in diesem Tabellenblatt die Aufgabenzuordnung zu den Ressourcen erfolgen. Darüber hinaus werden die ausgewählten Kriterien, Ausprägungen und Gewichtungen aller gespeicherten Montageoperationen in eine XML-Datei (Extended Modelling Language) exportiert, sodass für wiederkehrende Montageoperationen diese einfach wieder geladen werden können.

Fähigkeitskennzahlen berechnen

Neue Montageoperation
Eignungsgrad berechnen
Montageoperation speichern
Montageoperation laden
Nächster Schritt

Montageoperation: Türbremse verschrauben Einstellungen


		Kriterium	Ausprägung	Gewichtung
K1	<input checked="" type="checkbox"/>	Wird die Arbeitsposition oder Haltung durch die Position der Fügestelle negativ beeinflusst?	Nein	0 % 100 % 100 %
K2	<input type="checkbox"/>	Wie hoch ist die Masse des handzuhabenden Werkzeugs oder Bauteils?	> 8 kg	0 100 % 100
K3	<input checked="" type="checkbox"/>	Wie viele Wiederholungen des Montagevorgangs treten innerhalb einer Schicht auf?	< 10 10-100 > 100	0 100 % 100
K4	<input type="checkbox"/>	Sind Hilfs-, Betriebs-, Werkstoffe oder Umgebungseinflüsse potentiell gesundheitsschädlich für den Mitarbeiter?		0 100 % 100
K5	<input type="checkbox"/>	Auf welcher Höhe befindet sich die Fügestelle oder das zu handhabende Bauteil?	h > 1,5 m	0 100 %

Abbildung 5.1: Auswahl der zutreffenden Kriterien und Ausprägungen

5.1.2 Auswahl des Schutzprinzips

Im nächsten Schritt wird das Schutzprinzip zur Umsetzung der kollaborativen Anwendung festgelegt. Über ein Drop-Down-Menü wird das zutreffende Schutzprinzip ausgewählt. Neben der Darstellung einer kurzen Beschreibung des ausgewählten Schutzprinzips werden automatisch die Berechnungen nach Abschnitt 4.2 durchgeführt. Es müssen lediglich die zu Grunde liegenden Randbedingungen angegeben

werden, woraus dann z. B. für das Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung die maximale Robotergeschwindigkeit berechnet wird, wie in Abbildung 5.2 dargestellt. Zusätzlich werden kontextabhängig Erklärungen zu den einzelnen Variablen angezeigt. In den Einstellungen können die Tabellenwerte und Berechnungsformeln an zukünftige Änderungen der Normen angepasst werden.



Schutzprinzip festlegen

Auswahl Schutzprinzip: Leistungs- und Kraftbegrenzung Nächster Schritt

Sicherheitsbewerteter überwachter Halt

Handführung

Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Leistungs- und Kraftbegrenzung

Beschreibung:

Beim Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung kann es zu einem beabsichtigten aber auch zu einem unbeabsichtigten Kontakt zwischen Mensch und Roboter kommen. Damit im Falle einer unbeabsichtigten Kollision der Mensch nicht zu Schaden kommt, verfügen kollaborative Roboter mit diesem Schutzprinzip über sicherheits-gerichtete Abschaltvorrichtungen. Gemäß ISO TS 15066 kann für eine freie Kollision die maximale Robotergeschwindigkeit anhand der effektiven Robotertermasse und der betroffenen Körperregion abgeschätzt werden. Die berechneten Werte liefern einen ersten Anhaltspunkt für die weitere Planung, ersetzen aber nicht eine detaillierte Betrachtung innerhalb der Risikobeurteilung.

Berechnung der maximalen Robotergeschwindigkeit:

Körperregion	Oberarm	
Effektive Robotertermasse [Kg]	16	
Robotergeschwindigkeit [mm/s]	1300	Einstellungen

Abbildung 5.2: Auswahl und Festlegung des Schutzprinzips

5.1.3 Ablaufplanung der Arbeitsinhalte

Die eigentliche Festlegung des Arbeitsablaufs erfolgt in der Prozesssprache MTM-MRK. Neue Prozessbausteine können entweder direkt als Code oder über ein Kontextmenü mit der Angabe aller notwendigen Parameter hinzugefügt werden, wie in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Berechnung der Bewegungszeit erfolgt formelbasiert auf Grundlage der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Zusammenhänge. Zur visuellen Darstellung der Ergebnisse der Ablaufplanung werden sowohl der Soll-Geschwindigkeits-Zeitverlauf der Roboterbewegung als auch ein Balkendiagramm mit den Tätigkeiten des Menschen und des Roboters dargestellt. Über die Schaltfläche „Einstellungen“ können roboter-spezifische Einstellungen getroffen werden sowie die Kodierung der Prozessbausteine ein- und ausgeblendet werden.

5.1 Entwicklung eines softwarebasierten Planungswerkzeugs

Ablaufplanung - MTM-MRK												
Mensch						Roboter						
Nr.	Bezeichnung	A'H	Kode	TMU	Kode	A'H	Bezeichnung	Status	Bezeichnung	A'H	Kode	TMU
1											R200v100Jh	17
2											R350v100Jh	22
3											R500v100Jh	26
4											R650v100Jh	30
5											R800v100Jh	34
6											R1000v100Jh	39
7												
8												
9												
10												
11				75	W5P	1*1						
12	Zur Bedieneinheit	1*1	R10B	6								
13		1*1	G5	0								
14	Drücken	1*1	M2A	2								
15		1*1	RL2	0								
16				29	B	1*1						
17	Zum Tügriff	1*1	R10B	6								
18		1*1	G1A	2								
19				6	R10B	1*1						
20				0	G5	1*1	Schöpfgriff	MR				
21				7	M10B		Schöpfgriff					

Abbildung 5.3: Planung des Arbeitsablaufs mit MTM-MRK

Für jeden Prozessbaustein wird ein Objekt der Klasse *Prozessbaustein* erstellt, das als wesentliche Attribute den ausgewählten Robotertyp sowie die Bewegungszeit enthält. Die Methoden und Attribute der Klasse *Prozessbaustein* werden gemäß dem Klassendiagramm in Abbildung 5.4 an die Unterklassen vererbt. Diese verfügen als Attribute über die signifikanten Einflussfaktoren, wie in Abschnitt 4.3 definiert.

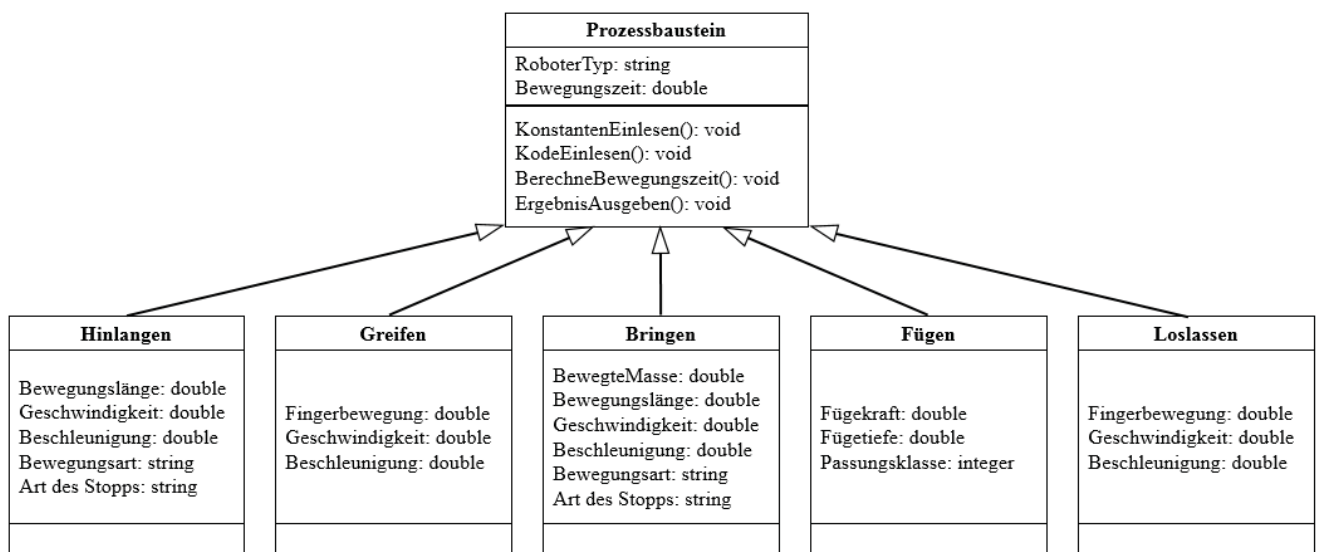


Abbildung 5.4: Klassendiagramm der Prozessbausteine

5.2 Anwendung der Methodik

In diesem Abschnitt wird die Anwendung der entwickelten Methodik gezeigt und die erzielten Ergebnisse diskutiert. Als Anwendungsbeispiele dienen die Montage von Fahrzeugtüren in der Final- und Endmontage sowie ein Anwendungsfall aus der Motorenmontage in der Automobilproduktion.

5.2.1 Anwendungsbeispiel Türmontage

In der Final- und Endmontage werden die Türen am Fahrzeug montiert. Aufgrund der hohen Masse der Türen, die je nach Ausführung und Modell bei etwa 40 kg liegt, wird dazu ein Handhabungsgerät verwendet. Das Handhabungsgerät wird vom Mitarbeiter geführt, wie in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Tür wird über einen deckengestützten Transportschlitten an die Montagelinie gebracht. Nachdem die Tür mithilfe des Handhabungsgeräts aus diesem entnommen ist, wird sie zum Fahrzeug gebracht. Das Fahrzeug wird in Fließmontage gefertigt und bewegt sich kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/s.



Abbildung 5.5: Bestehende Montagestation zur Türmontage mit Handhabungsgerät

Der Mitarbeiter synchronisiert die Bewegung des Handhabungsgeräts mit der des Fahrzeugs und nimmt gleichzeitig die Feinpositionierung der Tür vor. Die Tür wird am Fahrzeug mit zwei Scharnieren und insgesamt vier Verschraubungen befestigt. Zusätzlich wird ein Kabel gesteckt, über das die elektrische Versorgung der Tür gewährleistet wird. Das Stecken des Kabels erfolgt vor der Verschraubung der Tür, da ansonsten der Stecker nicht mehr erreichbar ist. Alle Arbeitsschritte erfolgen sequentiell gemäß dem Montagevorranggraph in Abbildung 5.6. Die entsprechenden Montageoperationen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Dieser Montageablauf wird für jedes Fahrzeug, je nach Modell, zwei bis viermal an zwei bis vier Montagestationen durchgeführt. Insgesamt ergeben sich pro Schicht ca. 400 Wiederholungen pro Montagestation.

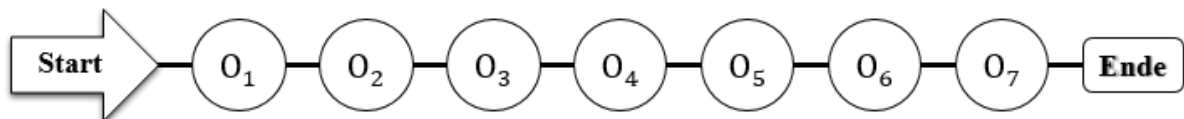


Abbildung 5.6: Montagevorranggraph der Türmontage

Tabelle 5.1: Montageoperationen der Türmontage

Nr.	Beschreibung der Montageoperation
O ₁	Tür aufnehmen und an Fahrzeug bringen
O ₂	Tür mit Fahrzeugbewegung synchronisieren
O ₃	Stecker aufnehmen und fügen
O ₄	Feinpositionierung der Tür
O ₅	Schrauben stecken
O ₆	Schrauben auf Drehmoment anziehen
O ₇	Tür loslassen

Die Montageoperationen gemäß Tabelle 5.1 werden mit dem in Abschnitt 4.1 definierten Kriterienkatalog bewertet. Beispielhaft ist diese Bewertung für den Vorgang der Türentnahme in Abbildung 5.7 dargestellt.

Fähigkeitskennzahlen berechnen

Neue Montageoperation

Eignungsgrad berechnen

Montageoperation speichern

Einstellungen

➔ Nächster Schritt

Montageoperation: Tür entnehmen

Kriterium		Ausprägung	Gewichtung		
K1	<input checked="" type="checkbox"/> Wird die Arbeitsposition oder Haltung durch die Position der Fügestelle negativ beeinflusst?	Nein	0 %	100 %	100 %
K2	<input checked="" type="checkbox"/> Wie hoch ist die Masse des handzuhabenden Werkzeugs oder Bauteils?	> 8 kg	0	100 %	100
K3	<input checked="" type="checkbox"/> Wie viele Wiederholungen des Montagevorgangs treten innerhalb einer Schicht auf?	> 100	0	100 %	100
K4	<input checked="" type="checkbox"/> Sind Hilfs-, Betriebs-, Werkstoffe oder Umgebungseinflüsse potentiell gesundheitsschädlich für den Mitarbeiter?	Nein	0	100 %	100
K5	<input type="checkbox"/> Auf welcher Höhe befindet sich die Fügestelle oder das zu handhabende Bauteil?		0	0 %	100
K6	<input type="checkbox"/> Weist das zu handhabende Bauteil scharfe Kanten auf?		0	0 %	100
K7	<input checked="" type="checkbox"/> Wie wird das Basis/Fügeteile bereitgestellt?	Positioniert und q	0	100 %	100
K8	<input type="checkbox"/> Welche Art der Fügepassung liegt vor?		0	0 %	100
K9	<input checked="" type="checkbox"/> Besteht während des Montageprozesses die Möglichkeit des Vertauschens von Fügeteilen oder Fügstellen?	Nein	0	100 %	100
K10	<input checked="" type="checkbox"/> Ist das Bauteil kratz-, bruch-, und/oder formempfindlich?	Ja	0	100 %	100
K11	<input checked="" type="checkbox"/> Sind Greif- und Zentriermöglichkeit des zu greifenden Bauteils gegeben?	Ja	0	100 %	100
K12	<input checked="" type="checkbox"/> Wie ist die Steifigkeit des Bauteils einzustufen?	Starr	0	100 %	100

Eignungsgrad Mensch: 0.19

Eignungsgrad Roboter: 0.81

Abbildung 5.7: Berechnung der Fähigkeitskennzahlen für die Türentnahme

Nach Auswahl der entsprechenden Ausprägungen ergibt sich für die Entnahme und den Transport der Tür ein Gesamteignungsgrad von 0,19 für den Menschen und 0,81 für den Roboter. Die ergonomische Situation der Montagestation kann hier verbessert werden, wenn der Roboter die schwere und kraftraubende Arbeit der Türentnahme und des Transports übernimmt. In der aktuellen Montagestation geschieht dies zwar auch über ein Handhabungsgerät, wodurch der Mitarbeiter entlastet wird. Allerdings muss die Masse des Handhabungsgeräts und der Tür, die insgesamt bei etwa 150kg liegt, durch den Mitarbeiter für jeden Montagevorgang beschleunigt und abgebremst werden. Dies stellt bei etwa 400 Montagevorgängen pro Schicht eine erhebliche Belastung dar. Die Bereitstellung der Tür erfolgt über einen deckengestützten Transport-

schlitten. Die Positionierung und Orientierung ist innerhalb des Schlittens ausreichend genau, so dass die Tür durch einen Roboter ohne zusätzliche Sensorik entnommen werden kann. Somit werden diese Montageoperationen dem Roboter zugeordnet. Zusätzlich ergibt sich bei Verwendung eines Roboters für diese Montageschritte ein weiterer Vorteil. Der Transportschlitten muss nicht mehr auf die Ebene der Fahrzeugmontage abgesenkt werden, da der Roboter nach oben greifen kann und die Tür nach unten anreichen kann. Somit vereinfacht sich die Infrastruktur zur Bereitstellung der Türen erheblich.

Für die Feinpositionierung der Tür weist der Mensch mit 0,67 einen höheren Eignungsgrad auf als der Roboter. Die ergonomische Belastung ist im Vergleich zum Transport der Tür wesentlich geringer, da die Position der Tür nur um wenige Millimeter verändert werden muss. Allerdings ist für diese Korrektur Sensitivität notwendig und durch eine optische Kontrolle muss gewährleistet sein, dass die Tür an genau der richtigen Stelle ist, damit im nächsten Schritt die Schrauben zur Befestigung der Scharniere richtig platziert werden können. Dies wäre mit dem Roboter nur unter erhöhtem Aufwand umzusetzen, weshalb diese Montageoperation dem Menschen zugeordnet wird. Weiterhin wird ein Stecker zur elektrischen Versorgung angebracht und die Schrauben zur Befestigung der Tür werden angebracht. Der Mensch weist für diese beiden Montageoperationen mit 0,67 bzw. 0,63 einen etwas besseren Gesamteignungsgrad auf als der Roboter. Zum einen stellen beide Montageoperationen keine große ergonomische Belastung für den Menschen dar. Zum anderen handelt es sich bei dem elektrischen Stecker um ein biegeschlaffes Teil und auch zur Platzierung der Schrauben ist Sensitivität notwendig. Dies würde bei der Umsetzung mit einem Roboter erhöhten technischen Aufwand bedeuten und damit zusätzliche Kosten verursachen. Ein weiterer Faktor beim Stecken der Schrauben ist die Art der Teilebereitstellung, die ungeordnet als Schüttgut erfolgt. Dies stellt für den Menschen

kein Problem dar, für den Roboter müsste aber eine geeignete Vorrichtung zur Bereitstellung der Teile angeschafft werden, die wiederum mit Kosten verbunden ist.

Im letzten Arbeitsschritt werden die Schrauben auf ein Drehmoment von 25 Nm angezogen. Dies erfolgt in der derzeitigen Montagestation mit einem Drehmomentschrauber, der durch den Mitarbeiter bedient wird. Die Analyse der Fähigkeitskennzahlen zeigt, dass der Roboter mit einem Eignungsgrad von 0,68 besser für diese Montageoperation geeignet ist. Dies liegt zum einen an der Position, in der die Schrauben angezogen werden müssen, zum anderen muss der Ruck beim Anziehen der Schraube durch den Mitarbeiter aufgenommen werden. Dies stellt bei vier Wiederholungen pro Montagevorgang über die Dauer einer Schicht eine erhebliche Belastung für das Hand-Arm-System dar. Zusammenfassend sind die Arbeitsschritte zur Türmontage mit den entsprechenden Eignungsgraden von Mensch und Roboter und der daraus resultierenden Zuordnung der Montageoperationen in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Eignungsgrade von Mensch und Roboter für Türmontage

Nr.	Montageoperation	e_M	e_R	Zuordnung
1	Tür aufnehmen und an Fahrzeug bringen	0.19	0.81	Roboter
2	Tür mit Fahrzeugbewegung synchronisieren	0.19	0.81	Roboter
3	Stecker aufnehmen und fügen	0.60	0.40	Mensch
4	Feinpositionierung der Tür	0.67	0.33	Mensch
5	Schrauben stecken	0.63	0.37	Mensch
6	Schrauben auf Drehmoment anziehen	0.32	0.68	Roboter

Nach der Berechnung der Fähigkeitskennzahlen und Eignungsgrade stehen der Montageablauf und eine erste Zuordnung der Montageschritte fest. Auf Basis dieses Montageablaufs und der Randbedingungen der Montageaufgabe wird das zu verwendende Sicherheitskonzept festgelegt. Mit einer Masse von 40 kg muss die Tür vom Transportschlitten zum Fahrzeug gebracht werden. Zusätzlich zur Masse der Tür muss das Werkzeug zur Türentnahme durch den Roboter mitgeführt werden, so dass die Gesamtmasse zu hoch ist, um von einem Roboter nach dem Schutzprinzip der Kraft-

und Leistungsbegrenzung manipuliert zu werden. Deshalb wird ein herkömmlicher Vertikal-Knickarm-Roboter verwendet, der über zusätzliche Sensorik abgesichert wird und damit nach dem Schutzprinzip des sicherheitsbewerteten überwachten Halts bzw. der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung betrieben wird. Der Roboter nimmt die Tür aus dem Transportschlitten und bringt sie zur Montagelinie direkt neben dem Fahrzeug in Position. Während dieses Vorgangs wird über Laserscanner sichergestellt, dass sich kein Mensch im Arbeitsraum befindet. Sobald der Mensch den Arbeitsraum betritt, stoppt der Roboter mit einem sicherheitsbewerteten überwachten Halt. Nachdem die Tür neben der Karosserie positioniert ist, gleicht der Roboter die Bewegung der Karosserie auf der Montagelinie aus indem er die Tür in der Bewegungsrichtung der Karosserie mitbewegt. Gleichzeitig wird der Arbeitsraum für den Menschen freigegeben und dieser betritt den gemeinsamen Arbeitsraum. Sobald der Arbeitsraum für den Menschen freigegeben ist, wird die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Roboters mit Sicherheitsfunktionen überwacht, sodass sich dieser nicht schneller als 100 mm/s bewegen kann. Weiterhin ist durch die Bewegungsrichtung und die Bewegungsbahn sichergestellt, dass keine Körperteile eingeklemmt werden können. Während der Roboter die Tür synchron zum Fahrzeug bewegt, übernimmt der Mitarbeiter die Feinpositionierung der Tür, bringt einen Stecker an und positioniert die Schrauben für den weiteren Montagevorgang.

Auf Basis der Zuordnung der Montageschritte, die über die Fähigkeitskennzahlen und Eignungsgrade ermittelt wurden sowie der Festlegung des Sicherheitskonzepts, wird der Arbeitsablauf in MTM-MRK modelliert. Die Ergebnisse aus Tabelle 5.2 haben gezeigt, dass der Roboter für die Entnahme und den Transport der Tür sowie das Anziehen der Schrauben besser geeignet ist, wohingegen der Mensch für die Feinpositionierung und das Stecken der Schrauben einen höheren Eignungsgrad aufweist. Um die Tür zu entnehmen fährt der Roboter über mehrere Zwischenpunkte die Entnahmeposition der Tür an und bringt dann die Tür über weitere Zwischenpunkte an

die Montagelinie. Diese Bewegungen werden über den Prozessbaustein *Bringen* abgebildet. Zuerst bewegt der Roboter das Leergewicht der Greifereinheit und anschließend, nachdem die Tür gegriffen ist, das Gewicht der Tür und des Greifers. Für den Transport der Tür zur Montagelinie verfährt der Roboter mit einer Geschwindigkeit von 1000 mm/s, da sich der Mitarbeiter zu diesem Zeitpunkt außerhalb des Arbeitsraums des Roboters befindet. Anschließend gleicht der Roboter die Bewegung der Karosserie mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/s aus und der Arbeitsraum wird für den Menschen freigegeben. Bis zu diesem Zeitpunkt ist der Roboter die zeitbestimmende Ressource. In der Analyse mit MTM-MRK wird dies in Abbildung 5.8 in der Spalte „Status“ angezeigt.

		MTM-Analyse Mensch-Roboter-Kooperation								Anlage-Nr.		
		□ Planungsanalyse				□ Ausführungsanalyse				Blatt		
		Mensch						Roboter				
Nr.	Bezeichnung	A*H	Kode	TMU	Kode	A*H	Bezeichnung	Status	Bezeichnung	A*H	Kode	TMU
7								R	Zwischenposition anfahren	1*1	M3000v1500Lb	55
8								R	Zwischenposition anfahren	1*1	M1500v1500Lb	27
9								R	Zwischenposition anfahren	1*1	M500v250Lb	35
10				75	W5P	1*1	Zum Fahrzeug	MR	Start Linetracking	1*1	M3000v80Lb	1034
11	Zur Bedieneinheit	1*1	R10B	6				MR				
12		1*1	G5	0				MR				
13	Drücken	1*1	M2A	2				MR				
14		1*1	RL2	0				MR				
15				29	B	1*1	In Fahrzeug	MR				
16	Zum Tügriff	1*1	R10B	6				MR				
17		1*1	G1A	2				MR				

Abbildung 5.8: Ablaufanalyse der Türmontage mit MTM-MRK

Sobald der Mitarbeiter den gemeinsamen Arbeitsraum betritt, beginnt die Interaktion zwischen Mensch und Roboter. Während der Roboter die Bewegung der Fahrzeugkarosserie ausgleicht, tritt der Mitarbeiter an die Bedieneinheit des Werkzeugs und übernimmt die Feinpositionierung der Tür. Das Werkzeug verfügt hierzu über zwei Freiheitsgrade über die die Feinpositionierung durch den Mitarbeiter möglich ist. Nachdem die Tür ausreichend genau positioniert ist, steckt der Mitarbeiter die Schrauben für den weiteren Montagevorgang. Die Berechnung der Eignungsgrade hat ergeben, dass der Roboter einen höheren Eignungsgrad zum Anziehen der Schrauben aufweist. Da der Roboter aber bereits mit dem Transport der Tür voll ausgelastet ist,

wird dieser Montageschritt dem Menschen zugeordnet. Die Verschraubung könnte zwar auch mit einem zweiten Roboter durchgeführt werden, allerdings müsste dieser dann im Fahrzeug mitbewegt werden und wäre nicht voll ausgelastet. Deshalb wird die Zuordnung der Arbeitsschritte gemäß Tabelle 5.3 abgeändert. Nachdem die Verschraubung erfolgt ist, gibt der Mitarbeiter das Werkzeug frei und der Roboter begibt sich zurück in die Ausgangsstellung und ist bereit für den nächsten Arbeitsvorgang.

Tabelle 5.3: Eignungsgrade von Mensch und Roboter für Türmontage nach Durchführung der Ablaufanalyse

Nr.	Montageoperation	e_M	e_R	Zuordnung
1	Tür aufnehmen und an Fahrzeug bringen	0.19	0.81	Roboter
2	Tür mit Fahrzeugbewegung synchronisieren	0.19	0.81	Roboter
3	Stecker aufnehmen und fügen	0.60	0.40	Mensch
4	Feinpositionierung der Tür	0.67	0.33	Mensch
5	Schrauben stecken	0.63	0.37	Mensch
6	Schrauben auf Drehmoment anziehen	0.32	0.68	Mensch

In Abbildung 5.9 ist der Aufbau zur Evaluierung der Montagestation zu sehen. Durch die intelligente Aufteilung der Arbeitsschritte zwischen Mensch und Roboter wird die ergonomische Belastung der Mitarbeiter signifikant reduziert. Zusätzlich wird der Platzbedarf für die Bereitstellung der Türen über die deckengestützten Transportschlitten wesentlich verringert, da diese nun nicht mehr nach unten an die Montagelinie geführt werden müssen, sondern durch den Roboter von oben entnommen werden können. Dies führt auch zu erheblichen Vereinfachungen bei der Einführung neuer Fahrzeugvarianten, da Anpassungen durch die flexible Programmierung der Roboter wesentlich einfacher erfolgen können.



Abbildung 5.9: Türmontage in Mensch-Roboter-Kooperation

Auf Basis der Eignungsgrade konnte eine objektive Entscheidung über die Zuteilung der Montageschritte zwischen Mensch und Roboter erfolgen. Damit konnte ein erster Montageablauf festgelegt werden und ein valides Sicherheitskonzept bestimmt werden. Es hat sich gezeigt, dass der Montageablauf nach der Ablaufanalyse mit MTM-MRK geringfügig abgeändert werden musste, da der Roboter mit den ihm zugeordneten Montageoperationen voll ausgelastet ist. Je nachdem wie hoch die Auslastung der Ressourcen ist, muss die Aufteilung der Montageschritte zwischen Mensch und Roboter angepasst werden. Diese Zuteilung kann nicht alleine auf Basis der Eignungsgrade erfolgen, sondern muss alle Einflussfaktoren wie die Randbedingungen der Montagesituation, das zu Grunde liegende Sicherheitskonzept und die erforderlichen Montagezeiten berücksichtigen. Die Überprüfung der mit MTM-MRK berechneten Bewegungszeiten ergab eine Genauigkeit von 93,1 % für den Gesamt-ablauf des Türtransports.

5.2.2 Anwendungsbeispiel Kolbenmontage

In der Motorenmontage werden die Kolben mit den Pleueln in den Motorblock gesteckt und von unten mit einer Lagerschale verschraubt. Der Pleuel weist an der Montagefläche zur Lagerschale scharfe Kanten auf, die beim Fügen des Kolbens nicht die Lauffläche des Zylinders berühren dürfen, um Beschädigungen zu vermeiden. Dazu werden in der aktuellen Montagestation vor dem Fügen des Kolbens Führungspfeile aus Kunststoff auf die Montagebohrungen des Pleuels gesetzt, die einen Kontakt zwischen Pleuel und Zylinderlauffläche verhindern. Nachdem die Kolben im Motorblock positioniert sind, werden die Führungspfeile von unten abgezogen. Die Kolbenringe werden über ein konisches Fügewerkzeug komprimiert, das vor dem Fügen der Kolben lose auf dem Motorblock platziert wird. Es ist wichtig, dass die Fügehilfe nicht fixiert wird, damit die Ausrichtung des Führungswerkzeugs über den Kolben und die Zylinderbohrung geschehen kann.

In Tabelle 5.4 sind die notwendigen Montageoperationen mit den Eignungsgraden für Mensch und Roboter aufgelistet. Während sich die Eignungsgrade für die Montageoperationen 1-4 nur geringfügig unterscheiden, weist der Roboter mit einem Eignungsgrad von 0,78 eine wesentliche höhere Eignung zum Abziehen der Führungspfeile auf. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass das Abziehen für den Menschen in einer ergonomisch ungünstigen Haltung vorgenommen werden muss, da die Höhe der Fügestelle unterhalb des Motorblocks liegt. Deshalb wird diese Montageoperation dem Roboter zugeordnet. Die Montageoperationen des Aufsteckens und Abziehens der Führungspfeile entfallen, da der Roboter zur Umsetzung der Führungsaufgabe mit einem speziellen Werkzeug ausgerüstet wird, das fest auf dem Endeffektor des Roboters montiert wird. Die Ausrichtung der Fügehilfe sowie das Stecken des Kolbens werden weiterhin vom Menschen durchgeführt. Der Montagevorganggraph für diese Montagefolge ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Die Montageoperationen O_3 und O_5 entfallen und werden durch die Montageoperationen O_6 und O_7 , dem Positionieren der

Führungshilfe und Ausfahren aus dem Zylinder ersetzt. Dadurch, dass die Führungshilfe nicht mehr auf die Kolben aufgesteckt werden muss, kann Montageoperationen O_6 parallel zu O_1 und O_2 erfolgen.

Tabelle 5.4: Eignungsgrade von Mensch und Roboter für die Kolben-Montage

Nr.	Montageoperation	e_M	e_R	Zuordnung
1	Fü Gehilfe aufnehmen und platzieren	0.51	0.49	Mensch
2	Kolben aufnehmen	0.57	0.43	Mensch
3	Führungspfeile aufstecken	0.46	0.54	entfällt
4	Kolben stecken	0.57	0.43	Mensch
5	Führungspfeile abziehen	0.22	0.78	entfällt

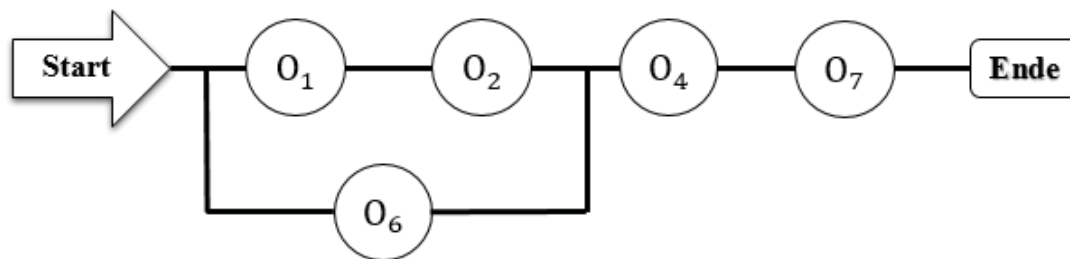


Abbildung 5.10: Montagevorranggraph der Kolben-Montage

In Abbildung 5.11 ist das Werkzeug zur Führung der Kolben dargestellt. Es besteht aus zwei Pneumatik-Zylindern, die gabelförmig auf einem Ausleger angeordnet sind. Das Werkzeug wird mit der grauen Montageplatte fest mit dem Endeffektor des Roboters verbunden. Während der Roboter das Führungswerkzeug von unten, vorbei an der Kurbelwelle im Zylinder in Position bringt, bereitet der Mensch alle notwendigen Schritte zum Fügen des Kolbens vor. Sobald das Führungswerkzeug im Zylinder positioniert ist, fahren die Pneumatik-Zylinder aus und werden anschließend drucklos geschaltet. Der Mensch kann dann den Pleuel von oben auf den ausgefahrenen Pneumatik-Zylindern positionieren und geführt nach unten drücken. Das Führungswerkzeug ist mit Positionssensoren ausgestattet, so dass das Ende des Fügevorgangs detektiert wird und das Führungswerkzeug automatisch für das Fügen des nächsten Kolbens in Position gebracht wird.

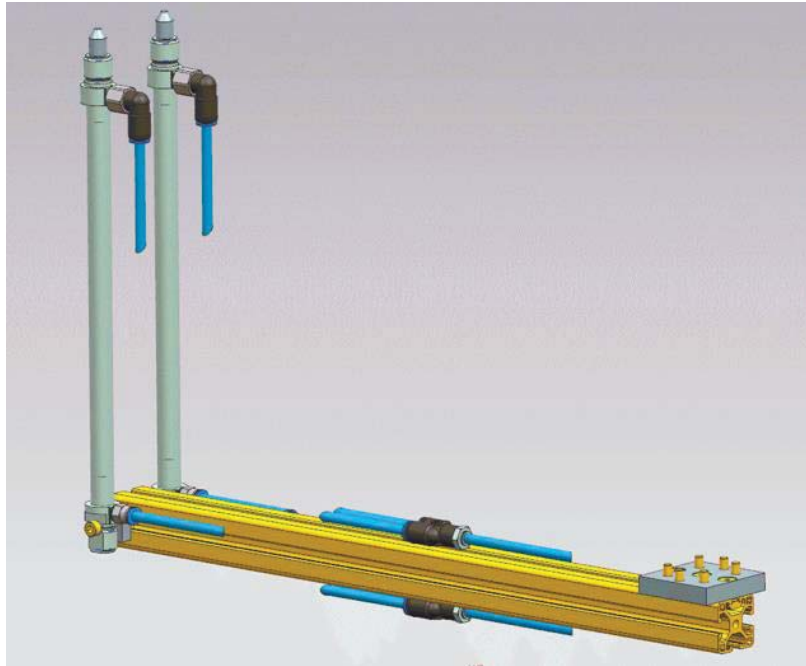


Abbildung 5.11: Werkzeug zur Führung beim Fügen der Kolben

Da Mensch und Roboter für diesen Arbeitsablauf in unmittelbarer Nähe zueinander zeitgleich am selben Bauteil arbeiten und in Interaktion treten, wird zur Umsetzung der Applikation das Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung ausgewählt. Über die in der TS 15066 definierten Grenzwerte wird die maximal zulässige Geschwindigkeit des Roboters berechnet. Zusätzlich ist in Situationen, in denen es zu einer Klemmung von Körperteilen zwischen Führungswerkzeug und Bauteil kommen kann, eine geringere Geschwindigkeit zu berücksichtigen. Dies ist z.B. der Fall beim Einführen des Führungswerkzeugs in den Motorblock.

In Abbildung 5.12 ist ein Auszug aus der Analyse des Montageablaufs in MTM-MRK dargestellt. Nachdem der Motor in die Montagestation eingefahren ist, beginnen Roboter und Mensch zeitgleich mit den ihnen zugeordneten Montageoperationen und arbeiten parallel. Die Durchführungszeiten zeigen, dass der Roboter bis zur Positionierung des Führungswerkzeugs im ersten Zylinder die zeitbestimmende Ressource ist und der Mensch ca. zwei Sekunden warten muss, bis das Pleuel auf die Führungshilfe aufgesetzt werden kann und der Kolben gefügt werden kann. Für diesen

Fügevorgang ist der Mensch die zeitbestimmende Ressource, da der Roboter erst weiter fahren kann, wenn der Kolben in Position ist und die Pneumatik-Zylinder vollständig eingefahren sind. Insgesamt ergibt sich für das Fügen eines Kolbens eine Durchführungszeit von ca. 12,5 Sekunden. Damit kann bereits eine Aussage über die Einhaltung der Taktzeit für die Montage verschiedener Motor-Varianten getroffen werden.

MTM		ZZ		Ablaufplanung - MTM-MRK								Start Berechnung	PBB hinzufügen	Einstellungen
Mensch								Roboter						
Nr.	Bezeichnung	A*H	Kode	TMU	Kode	A*H	Bezeichnung	Status	Bezeichnung	A*H	Kode	TMU		
1	Führungshilfe	1*1	R4A	3,4	R4A	1*1	Führungshilfe	R	zum Motor	1*1	M200v250a100Lb	35,0		
2		1*1	G1A	2,0	G1A	1*1		R	ausrichten TCP	1*1	M30v30a100b	91,1		
3		1*1	M45C	20,1	M45C	1*1		R	in Zylinderbohrung	1*1	M100v250a1000Lh	23,6		
4	an Motor	1*1	P2SE	16,2	P2SE	1*1	an Motor	R	Pneumatik ausfahren	1*1	PT (Process Time)	19,4		
5		1*1	RL1	2,0	RL1	1*1		R						
6	Pleuel (KH 20cm)	1*1	R120B	38,1				R						
7		1*1	G1A	2,0				R						
8	z. r. Hand (KH 20cm)	1*1	M120B	34,8	[R-B G1A	1*1	Pleuel	R						

Abbildung 5.12: Auszug der MTM-MRK Analyse zur Kolben-Montage in Mensch-Roboter-Kooperation

In Abbildung 5.13 ist der Aufbau der Montagestation zum Fügen des Kolbens in einer Kooperation zwischen Mensch und Roboter dargestellt. Der Roboter unterstützt gezielt den Menschen durch die Übernahme einer ergonomisch belastenden Tätigkeit. Gleichzeitig wird der Arbeitsplatz zeitlich optimiert und die Effizienz wird erhöht, da nicht wertschöpfende Tätigkeiten wie das Aufstecken und Abziehen der Führungspfeile entfallen. In der experimentellen Validierung konnten die Ergebnisse der Planung überprüft werden. Die in der Planung ermittelten Durchführungszeiten bilden die der experimentellen Untersuchung mit einer Genauigkeit von 95,3 % ab.



Abbildung 5.13: Der Roboter unterstützt den Menschen in der Kolben-Montage

6 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen stehen in Deutschland aufgrund einer sich ändernden Altersstruktur der Bevölkerung, steigenden Kostendrucks sowie erhöhten Flexibilitätsforderungen vor vielfältigen Herausforderungen. Insbesondere im Bereich der Montage, gekennzeichnet durch einen hohen Anteil manueller Tätigkeiten, wird mit dem Konzept der Mensch-Roboter-Kooperation ein Ansatz verfolgt, der Verbesserungspotential hinsichtlich Ergonomie, Kosten und Flexibilität verspricht. Obwohl nach aktuellem Stand technische Lösungen zur Umsetzung von hybriden Arbeitssystemen bestehen, wurden bisher nur wenige Applikationen in der industriellen Serienfertigung umgesetzt. Neben mangelnder Erfahrung in der Umsetzung dieser neuen Technologie ist ein wesentlicher Grund hierfür, dass in bestehenden Methoden der Montageplanung eine Kooperation von Mensch und Roboter nur unzureichend berücksichtigt wird.

Als Zielsetzung der Arbeit wurde die Entwicklung einer Methodik formuliert, welche die Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation unterstützt. Zentrale Aspekte hierfür sind die Aufgabenzuordnung zwischen den Ressourcen Mensch und Roboter sowie die Berücksichtigung von spezifischen Sicherheitskonzepten. Weitere wesentliche Aspekte sind die prospektive Bestimmung von Durchführungszeiten des hybriden Arbeitssystems sowie die Berücksichtigung der Ergonomie. Abbildung 6.1 stellt die drei wesentlichen Planungsstufen der entwickelten Methodik dar. Aufbauend auf bestehenden Forschungsarbeiten zur fähigkeitsorientierten Ablaufplanung wurde ein Konzept entwickelt, mit dem der Eignungsgrad sowohl des Menschen als auch des Roboters für eine Montageoperation quantifiziert werden kann. Auf diese Weise wird eine objektive Entscheidung bezüglich der Aufgabenzuordnung zwischen den Interaktionspartnern Mensch und Roboter unterstützt.

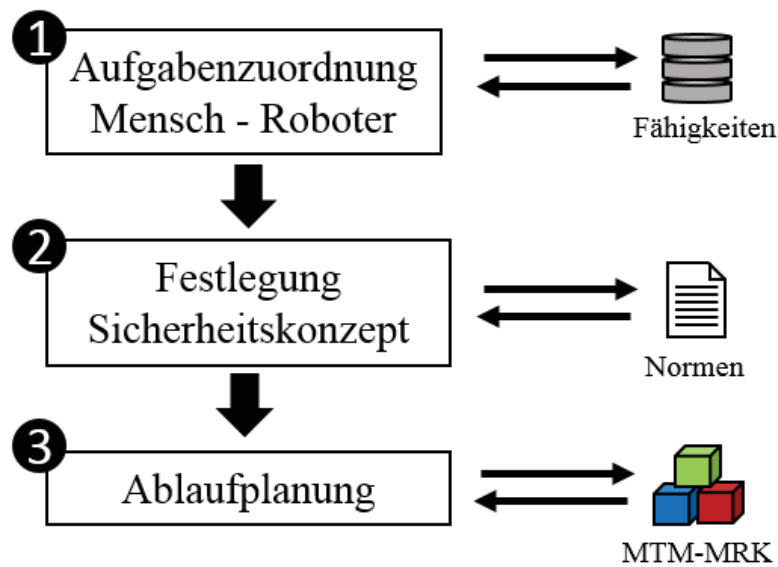


Abbildung 6.1: Aufbau der Planungsmethodik

Darüber hinaus wurde ein Vorgehen entwickelt, mit dem es möglich ist, in einer Sequenz von Montageoperationen diejenigen zu identifizieren, die eine hohe Eignung für eine Kooperation von Mensch und Roboter aufweisen. Um Sicherheitskonzepte und deren Auswirkungen auf das spätere Arbeitssystem bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, wird der Anwender durch die Planungsmethodik in der Auswahl eines geeigneten Sicherheitskonzepts unterstützt. Basierend auf den aktuell gültigen Normen wurden formelbasierte Zusammenhänge aufgestellt, um einzuhaltende Mindestabstände und Maximal-Geschwindigkeiten der Roboterbewegungen für ein gegebenes Interaktionsszenario zu berechnen. Diese Werte dienen als wesentliche Eingangsgrößen für den weiteren Planungsprozess.

Für die Planung manueller Arbeitsvorgänge ist die MTM-Prozesssprache in der industriellen Praxis weit verbreitet. Um die Planung von Mensch-Roboter-Kooperation zu ermöglichen, wurde ein zu MTM-1 kompatibles Prozessbausteinsystem zur Planung von roboterbasierten Montagevorgängen entwickelt. Mit der Kombination dieser beiden Systeme können Montagevorgänge in Mensch-Roboter-Kooperation in einer gemeinsamen Prozesssprache beschrieben und geplant werden. Basierend auf den

funktionellen Eigenschaften der MTM-Prozessbausteine wurden roboterbasierte Prozessbausteine zur Abbildung eines Grundzyklus zum Aufnehmen und Platzieren eines Gegenstands definiert und signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit ermittelt. Über formelbasierte Zusammenhänge ist es möglich, für jeden Prozessbaustein Durchführungszeiten zu berechnen und damit die Bewegungsabläufe von Mensch und Roboter exakt aufeinander abzustimmen. In der Validierung der Prozessbaustein-Genauigkeit wurde gezeigt, dass vereinfachende Annahmen bezüglich der Bewegungsrichtung des Roboters, der manipulierten Masse und des Überschleifens von Bahnpunkten zulässig sind.

Die Methodik wurde in einem rechnergestützten Planungswerkzeug umgesetzt, das es dem Anwender ermöglicht, in einem geführten Prozess zielgerichtet Arbeitssysteme in Mensch-Roboter-Kooperation zu planen. Anhand von zwei Beispielen aus der Automobilproduktion wurde die praktische Anwendung der Methodik gezeigt. Im Rahmen der experimentellen Validierung der Anwendungsfälle wurde die Genauigkeit der Durchführungszeiten der roboter-spezifischen Prozessbausteine auf 93,1 % bzw. 95,3 % bestimmt.

Ausblickend ist festzuhalten, dass der Einsatz von kollaborativen Robotern zukünftig zunehmen und die Produktion nachhaltig verändern wird. Zum einen werden die Kosten für den Einsatz von kollaborativen Robotern weiter sinken. Zum anderen werden sich die Fähigkeiten der Roboter weiter entwickeln. Die Entwicklung neuer Sensorik und Aktorik sowie die Entwicklung neuartiger Lern- und Regelalgorithmen erweitern zukünftig die Anwendungsmöglichkeiten von Mensch-Roboter-Kooperation. Dementsprechend wird auch der Bedarf an Werkzeugen zur Planung von Mensch-Roboter-Kooperation zunehmen. Vor diesem Hintergrund ist die Fortsetzung der Arbeit in zweierlei Hinsicht anzustreben:

1. Mit der Entwicklung neuer Prozessbausteine zur Darstellung kraftsensitiver und visueller Funktionen, wie beispielsweise einer Objekt- oder Gestenerkennung, kann die Methodik an neue Entwicklungen der Roboter-Technik angepasst werden. Insbesondere Prozessbausteine zur Abbildung mobiler Robotik versprechen die Anwendungsmöglichkeiten der Methodik zu erweitern.
2. Mithilfe eines Optimierungsalgorithmus besteht die Möglichkeit den Arbeitsablauf für eine gegebene Sequenz von Montageoperationen automatisch zu generieren. Auf Basis der ermittelten Eignungsgrade, der Durchführungszeiten sowie der vorliegenden Kostenstruktur können auf diese Weise automatisch Lösungsvorschläge generiert werden, um den Unterstützungsgrad für den Anwender weiter zu erhöhen und den Erstellungsaufwand für Planungsstudien zu reduzieren.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Bevölkerung nach Altersgruppen in Deutschland (Destatis 2015)	1
Abbildung 1.2:	Mensch-Roboter-Kooperation als Zwischenstufe von manueller Arbeit und Vollautomatisierung (Neubauer et al. 2015).....	3
Abbildung 1.3:	Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 2.1:	Arbeitssystem (Schlick et al. 2010)	8
Abbildung 2.2:	Zusammensetzung der Durchlaufzeit (REFA 1993).....	9
Abbildung 2.3:	Vorranggraph (Prenting et al. 1964)	10
Abbildung 2.4:	Vorrangmatrix nach (Prenting et al. 1964).....	11
Abbildung 2.5:	Arbeitsbereiche von Mensch und Roboter in Mensch-Roboter-Kooperation (Thiemermann et al. 2001)	12
Abbildung 2.6:	Klassifikation der Interaktionsszenarien (Bauer et al. 2016)	12
Abbildung 2.7:	Stückkosten in Abhängigkeit des Produktionsvolumens (Helms et al. 2002)	15
Abbildung 2.8:	Aufbau eines Robotergelenks eines kollaborativen Leichtbau-roboters mit Drehmomentsensor (Albu-Schäffer et al. 2007).....	18
Abbildung 2.9:	Kollaborativer Roboter Kuka LBR iiwa (links) (Kuka Roboter GmbH 2016) und Fanuc CR35-iA (rechts) (Fanuc Ltd. 2016a) ..	19
Abbildung 2.10:	Kollaborativer Roboter Bosch APAS mit sensitiver Schutzhaut (Robert Bosch GmbH 2016)	20
Abbildung 2.11:	Gründe für den Einsatz von Mensch-Roboter-Kooperation nach (Bauer et al. 2016)	21
Abbildung 2.12:	Kollaborativer Roboter in der Motormontage im Opel Werk Kaiserslautern (Opel Automobile GmbH 2016).....	22
Abbildung 2.13:	Planungsstufen in der Montageplanung nach (Konold et al. 2009)	25

Abbildung 2.14: Bedeutung der Planung für den Wertschöpfungsverlauf in der Produktion nach (Feldmann 2004).....	26
Abbildung 2.15: Simulation eines manuellen Arbeitsvorgangs in Process Simulate Human (Tecnomatix 2016).....	32
Abbildung 2.16: Simulation von Roboterbewegungen in 3D-Automate (Visual Components 2016).....	33
Abbildung 2.17: Übersicht kommerzieller Software und Forschungsarbeiten zur Montageplanung.....	40
Abbildung 3.1: Kriterien bei der Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation.....	42
Abbildung 3.2: Aufbau der Planungsmethodik.....	45
Abbildung 3.3: Ablaufdiagramm der Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation.....	48
Abbildung 4.1: Eignungsgrad eMRK, i für eine Sequenz von Montageoperationen.....	58
Abbildung 4.2: Schutzfeld orthogonal zur Annäherungsrichtung..... (DIN EN ISO 13855: 2010).....	61
Abbildung 4.3: Mindestabstand bei orthogonaler Anordnung des Schutzfelds zur Gefahrenstelle in Abhängigkeit der Nachlaufzeit.....	62
Abbildung 4.4: Hinüberreichen über ein senkrecht wirkendes Schutzfeld (DIN EN ISO 13855: 2010).....	63
Abbildung 4.5: Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit des minimal zulässigen Schutzabstandes.....	66
Abbildung 4.6: Geschwindigkeits-Weg-Verlauf bei einer Kollision zwischen Mensch und Roboter nach (IFA 2011).....	67
Abbildung 4.7: Definition der Körperregionen nach ISO TS 15066.....	68
Abbildung 4.8: Körpermodell für transienten Kontakt zwischen Mensch und Roboter nach (ISO/TS 15066: 2016).....	70

Abbildung 4.9:	Kodierung der Prozessbausteine	73
Abbildung 4.10:	Grundzyklus zum Aufnehmen und Platzieren eines Gegenstandes, nach (Bokranz et al. 2012a)	76
Abbildung 4.11:	Vergleich von achsspezifischer und linearer Roboterbewegung.	77
Abbildung 4.12:	Unterteilung der Bewegungszeit einer linearen Roboter-Bewegung nach Lotter 1992.....	79
Abbildung 4.13:	Berechnung der Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.....	81
Abbildung 4.14:	Achsspezifische Roboterbewegung.....	83
Abbildung 4.15:	Häufigkeitsverteilung der Bewegungszeiten für alle Punktepaare mit einem Abstand von $dl = 1000$ mm.....	86
Abbildung 4.16:	Winkeldifferenz der zeitbestimmenden Achse in Abhängigkeit der zu verfahrenen Distanz für achsspezifische Bewegungen	86
Abbildung 4.17:	Überschleifen des Bahnpunktes π	88
Abbildung 4.18:	Geschwindigkeitsdiagramme für verschiedene Bewegungsfälle	89
Abbildung 4.19:	Kodierung des Prozessbausteins <i>Hinlangen</i>	90
Abbildung 4.20:	Geschwindigkeit der Finger für eine positionsgeregelte Schließbewegung.....	91
Abbildung 4.21:	Kodierung des Prozessbausteins <i>Greifen</i>	94
Abbildung 4.22:	Bewegung um Drehgelenk.....	96
Abbildung 4.23:	Kodierung des Prozessbausteins <i>Bringen</i>	98
Abbildung 4.24:	Roboter ist in Position zum Fügen	99
Abbildung 4.25:	Das Objekt wurde gefügt	99
Abbildung 4.26:	Kodierung des Prozessbausteins <i>Fügen</i>	101
Abbildung 4.27:	Kodierung des Prozessbausteins <i>Loslassen</i>	102
Abbildung 4.28:	Auszug aus MTM-MRK Analyse (Schröter et al. 2016c)	103
Abbildung 4.29:	Geschwindigkeitsverlauf der Berechnungsmethoden im Vergleich, Versuch 2.09.....	110

Abbildung 4.30: Bewegungsbahn der Versuche 3.06-3.10	111
Abbildung 5.1: Auswahl der zutreffenden Kriterien und Ausprägungen	114
Abbildung 5.2: Auswahl und Festlegung des Schutzprinzips	115
Abbildung 5.3: Planung des Arbeitsablaufs mit MTM-MRK	116
Abbildung 5.4: Klassendiagramm der Prozessbausteine.....	116
Abbildung 5.5: Bestehende Montagestation zur Türmontage mit Handhabungsgerät	117
Abbildung 5.6: Montagevorranggraph der Türmontage.....	118
Abbildung 5.7: Berechnung der Fähigkeitskennzahlen für die Türentnahme.....	119
Abbildung 5.8: Ablaufanalyse der Türmontage mit MTM-MRK	123
Abbildung 5.9: Türmontage in Mensch-Roboter-Kooperation	125
Abbildung 5.10: Montagevorranggraph der Kolben-Montage.....	127
Abbildung 5.11: Werkzeug zur Führung beim Fügen der Kolben	128
Abbildung 5.12: Auszug der MTM-MRK Analyse zur Kolben-Montage in Mensch- Roboter-Kooperation	129
Abbildung 5.13: Der Roboter unterstützt den Menschen in der Kolben-Montage	130
Abbildung 6.1: Aufbau der Planungsmethodik.....	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Vor- und Nachteile von Mensch und Roboter in der Montage nach (Thiemermann et al. 2002).....	14
Tabelle 2.2:	Schutzprinzipien und Anforderungen für den kollaborativen Betrieb nach (DIN EN ISO 10218-1: 2012).....	16
Tabelle 3.1:	Anforderungen an die Planungsmethodik	44
Tabelle 4.1:	Kriterienkatalog zur Ablaufplanung von Arbeitssystemen	51
Tabelle 4.2:	Bewertungsaspekte und zugehöriges Formelzeichen	54
Tabelle 4.3:	Bewertung und Aggregation der Fähigkeitskennzahlen nach (Beumelburg 2005).....	55
Tabelle 4.4:	Berechnung der Eignungsgrade nach (Beumelburg 2005)	56
Tabelle 4.5:	Analyse einer Sequenz von Montageoperationen.....	57
Tabelle 4.6:	Variablenbezeichnung für Formel (4.10)	65
Tabelle 4.7:	Konstanten zur Berechnung der Kurve in Abbildung 4.5.....	65
Tabelle 4.8:	Grenzwerte für Transienten und Quasistatischen Kontakt gemäß ISO TS 15066.....	69
Tabelle 4.9:	Maximale Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit der effektiven Roboter­masse in mm/s (ISO/TS 15066: 2016).....	71
Tabelle 4.10:	Zusammensetzung und Aufbau der Prozessbausteine, nach (Bokranz et al. 2012b)	72
Tabelle 4.11:	Signifikante Einflussgrößen resultierend aus der Montageaufgabe bzw. der durchführenden Ressource	74
Tabelle 4.12:	Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein <i>Hinlangen</i>	78
Tabelle 4.13:	Zeitelemente einer linearen Roboterbewegung	79
Tabelle 4.14:	Berechnung der Bewegungszeit für verschiedene Bewegungsfälle	89

Tabelle 4.15:	Zeitelemente einer Greifbewegung	92
Tabelle 4.16:	Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein <i>Greifen</i>	92
Tabelle 4.17:	Signifikante Einflussgrößen auf die Bewegungszeit für den Prozessbaustein <i>Hinlangen</i>	95
Tabelle 4.18:	Zeit zur Durchführung der Suchfahrt in Abhängigkeit der Passungsklasse	100
Tabelle 4.19:	Zeit für das Fügen in Abhängigkeit der Fügetiefe	100
Tabelle 4.20:	Identifikation der zeitbestimmenden Ressource	104
Tabelle 4.21:	Reichweite und Traglast der Roboter im Vergleich	105
Tabelle 4.22:	Untersuchungsfokus der Testblöcke und variierte Testparameter	106
Tabelle 4.23:	Einfluss der Bewegungsrichtung auf eine lineare Bewegung	107
Tabelle 4.24:	Einfluss der Traglast für den Roboter CR35-iA	108
Tabelle 4.25:	Einfluss der Traglast für den Roboter UR10	108
Tabelle 4.26:	Vergleich der Berechnungsergebnisse für lineare Bewegungen, Fanuc CR35-iA.....	109
Tabelle 4.27:	Vergleich der Bewegungszeiten für achsspezifische Bewegungen, Fanuc CR35-iA.....	111
Tabelle 4.28:	Einfluss des Überschleifens für Fanuc CR35-iA.....	112
Tabelle 4.29:	Einfluss des Überschleifens für Universal UR10	112
Tabelle 5.1:	Montageoperationen der Türmontage	118
Tabelle 5.2:	Eignungsgrade von Mensch und Roboter für Türmontage	121
Tabelle 5.3:	Eignungsgrade von Mensch und Roboter für Türmontage nach Durchführung der Ablaufanalyse	124
Tabelle 5.4:	Eignungsgrade von Mensch und Roboter für die Kolben-Montage	127

Literaturverzeichnis

- Albu-Schäffer et al. 2007** Albu-Schäffer, Alin, Haddadin, Sami, Ott, Christian, Stemmer, Andreas, Wimböck, Thomas & Hirzinger, Gerd. 2007.
The DLR lightweight robot: Design and control concepts for robots in human environments.
Industrial Robot: An International Journal **34** (5), S. 376–385.
DOI: 10.1108/01439910710774386
- BauA 2001** Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Medizin. 2001.
Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten, Tragen : BauA, zuletzt geprüft am 4. November 2016.
Verfügbar: <http://www.baua.de/de/>
- Bauer et al. 2016** Bauer, Wilhelm, Bender, Manfred, Braun, Martin, Rally, Peter & Scholtz, Oliver. 2016.
Roboter ohne Schutzzaun in der Montage: Stand der Anwendungen in deutschen Montagen.
Werkstattstechnik online **106** (9), S. 616–621
- Beumelburg 2005** Beumelburg, Katharina. 2005.
Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation.
Heimsheim, Stuttgart : Jost-Jetter.
IPA-IAO-Forschung und -Praxis; 413.
ISBN 3-936947-52-X
- Beyer 2005** Beyer, Lukas. 2005.
Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern: Insbesondere mit Parallelkinematik.
Aachen : Shaker.
Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik; Bd. 1.
ISBN 978-3-83-223681-6
- Bick 1992** Bick, Werner. 1992.
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades, München, Technische Univ., Diss, 1991.
Berlin [u.a.] : Springer.
Iwb-Forschungsberichte; 46.
ISBN 3-540-55377-0
- Blume 2014** Blume, Jürgen. 2014.
Methoden und Anwendungen zur intuitiven Mensch-Roboter-Interaktion, München, Technische Univ., Diss, 2014
- Bokranz et al. 2012a** Bokranz, Rainer & Landau, Kurt. 2012.
Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM , Band 1: Konzept.

- Stuttgart : Schäffer-Poeschel.
ISBN 978-3-7910-2863-7
- Bokranz et al. 2012b** Bokranz, Rainer & Landau, Kurt. 2012.
Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM, Band 2: Anwendung.
Stuttgart : Schäffer-Poeschel.
ISBN 978-3-7910-2863-7
- Britzke 2010** Britzke, Bernd. 2010.
MTM in einer globalisierten Wirtschaft: Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren.
München : FinanzBuch-Verlag.
ISBN 978-3-8688-0091-3
- Bullinger et al. 1986** Bullinger, Hans-Jörg & Ammer, Dieter. 1986.
Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis.
München [u.a.] : Hanser.
ISBN 3-446-14606-7
- Burandt 1978** Burandt, Ulrich. 1978.
Ergonomie und Design und Entwicklung.
Köln : Schmidt.
ISBN 978-3504530020
- Choi et al. 1999** Choi, C. K. & Ip, W. H. 1999.
A comparison of MTM and RTM.
Work Study **48** (2), S. 57–61.
DOI: 10.1108/00438029910253707
- Christaller 2001** Christaller, Thomas. 2001.
Robotik: Perspektiven für menschliches Handeln in der zukünftigen Gesellschaft.
Berlin [u.a.] : Springer.
Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung; 14.
ISBN 3-540-42779-1
- Destatis 2015** Statistisches Bundesamt. 2015.
Bevölkerung Deutschlands bis 2060: 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung.
Wiesbaden : Statistisches Bundesamt, zuletzt geprüft am 8. September 2016.
Verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/>
- DIN EN ISO 10218-1: 2012** Deutsches Institut für Normung. 2012.
Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter.
Berlin : Beuth Verlag GmbH
- DIN EN ISO 13855: 2010** Deutsches Institut für Normung. 2010.
Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen.
Berlin : Beuth Verlag GmbH

- DMTM 2003** Deutsche MTM-Vereinigung. 2003.
MTM - Grundverfahren Lehrgangsunterlage Teil 1.
Hamburg
- Drust et al. 2013** Drust, Manuel, Dietz, Thomas, Pott, Andreas & Verl, Alexander. 2013.
Production assistants: The rob@work family.
International Symposium on Robotics **44**, S. 1–6.
DOI: 10.1109/ISR.2013.6695746
- Duffy 2009** Duffy, Vincent. 2009.
Handbook of digital human modeling: Research for applied ergonomics and human factors engineering.
Boca Raton : CRC Press.
Human factors and ergonomics.
ISBN 0-805-85646-3
- Faber et al. 2015** Faber, Marco, Bützler, Jennifer & Schlick, Christopher. 2015.
Human-robot Cooperation in Future Production Systems:
Analysis of Requirements for Designing an Ergonomic Work System.
Procedia Manufacturing **3**, S. 510–517.
DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.215
- Fanuc Ltd. 2016a** Fanuc Ltd. 2016.
Kollaborierender Roboter CR35-iA, zuletzt geprüft am 25. Oktober 2016.
Verfügbar: www.fanuc.eu
- Fanuc Ltd. 2016b** Fanuc Ltd. 2016.
Technische Daten kollaborativer Roboter CR35-iA, zuletzt geprüft am 22. November 2016.
Verfügbar: www.fanuc.eu
- Feldmann 2004** Feldmann, Klaus. 2004.
Montage strategisch ausrichten: Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen.
Berlin [u.a.] : Springer.
ISBN 3-540-40304-3
- Fitts 1951** Fitts, Paul Morris. 1951.
Human engineering for an effective air-navigation and traffic control system.
Washington : National Research Council, Division of Anthropology and Psychology, Committee on Aviation Psychology
- Fricke 2010** Fricke, Werner. 2010.
Statistik in der Arbeitsorganisation.
4. Auflage.
München : Hanser.
REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung.
ISBN 3-446-42559-4

- Tabellen.*
München : Hanser.
ISBN 978-3-4464-1969-8
- Hesse 2011**
Hesse, Stefan. 2011.
Greifertechnik: Effektoren für Roboter und Automaten.
München : Hanser.
ISBN 978-3-4464-2422-7
- IFA 2011**
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung. 2011.
*BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach
Maschinenrichtlinie: Gestaltung von Arbeitsplätzen mit
kollaborierenden Robotern, U 001/2009.*
Sankt Augustin
- ISO/TS 15066: 2016**
International Organization for Standardization. 2016.
Robots and robotic devices - Collaborative robots.
Vernier, Schweiz : ISO copyrigh office
- Jonas 2000**
Jonas, Christian. 2000.
*Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von
Montageanlagen.*
München : Utz.
Forschungsberichte IWB; Bd. 145.
ISBN 978-3-8967-5870-5
- Kluge 2011**
Kluge, Stefan. 2011.
*Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer
Montagesysteme.*
Heimsheim : Jost-Jetter.
IPA-IAO-Forschung und Praxis; 510.
ISBN 978-3-9398-9081-2
- Kohler 2008**
Kohler, Ulrich. 2008.
*Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung
produktionstechnischer Systeme.*
München : Utz.
IWB Forschungsberichte; 210.
ISBN 3-831-60753-2
- Konold et al. 2009**
Konold, Peter & Reger, Herbert. 2009.
*Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung,
Systemgestaltung Peter Konold ; Herbert Reger.*
Wiesbaden : Vieweg.
Vieweg Praxiswissen Aus dem Programm Fertigungstechnik.
ISBN 3-528-13843-2
- Krüger et al. 2009**
Krüger, Jörg, Lien, Terje Kristoffer & Verl, Alexander. 2009.
Cooperation of human and machines in assembly lines:
CIRP Annals, Bd. 58, S. 628–646.
DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.009

- Kuhlang et al. 2014** Kuhlang, Peter, Erohin, Olga, Krebs, Matthias, Deuse, Joachim & Sihn, Wilfried. 2014.
Morphology of time data management – Systematic design of time data management processes as fundamental challenge in Industrial Engineering.
International Journal of Industrial and Systems Engineering (Vol. 16, No. 4), S. 415–423
- Kuka Roboter GmbH 2016** Kuka Roboter GmbH. 2016.
Leichtbauroboter LBR iiwa, zuletzt geprüft am 25. Oktober 2016.
Verfügbar: www.kuka-robotics.com
- Landau 2013** Landau, Kurt. 2013.
Mehr tun müssen? 100 Jahre Produktivitätsmanagement.
Stuttgart : Ergonomia.
ISBN 978-3-9350-8925-2
- Lipaczewski et al. 2012** Lipaczewski, Michael & Ortmeier, Frank. 2012.
Handlungsadaptive Produktionsassistentz.
GI Jahrestagung, S. 585–596
- Lotter 1992** Lotter, Bruno. 1992.
Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik Bruno Lotter.
Düsseldorf : VDI-Verl.
ISBN 3-18-401168-2
- Lotter 2012** Lotter, Bruno. 2012.
Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis ; mit 18 Tabellen [VDI]. Bruno Lotter ; Hans-Peter Wiendahl.
Berlin [u.a.] : Springer Vieweg.
ISBN 978-3-642-29060-2
- Luczak 1986** Luczak, Holger. 1986.
Manuelle Montagesysteme.
In: Spur, Günter & Stöferle, Theodor (Hrsg.): *Handbuch der Fertigungstechnik*.
München : Hanser, S. 620–682.
ISBN 978-3-4461-2536-0
- Matias** Matias, Aura Castillo. 2001.
Work Measurement: Principles and Techniques: *Salvendy (Hg.) 2001 – Handbook of industrial engineering*, S. 1409–1462.
DOI: 10.1002/9780470172339.ch54
- McKinsey 2015** McKinsey. 2015.
Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector, zuletzt geprüft am 3. November 2016.
Verfügbar:
https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf

- Milberg et al. 1998** Milberg, Joachim & Becks, Carl. 1998.
Moderne Methoden zur Montageplanung: Schlüssel für eine effiziente Produktion.
München : Utz, Wiss.
ISBN 3-931327-36-1
- Neubauer et al. 2015** Neubauer, Wilm. & Heyn, Holger. 2015.
Auf dem Weg zur Mensch-Roboter-Kooperation: Anwendungsbeispiele und Vorgehensweisen im Volkswagen Konzern.
Magdeburg: Fraunhofer IFF
- Nof 1999** Nof, Shimon Y. 1999.
Handbook of industrial robotics.
New York [u.a.] : Wiley.
ISBN 0-471-17783-0
- Oberer-Treitz et al. 2010** Oberer-Treitz, Susanne, Puzik, Arnold & Verl, Alexander. 2010.
Measuring the Collision Potential of Industrial Robots.
In: *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, S. 1–7
- Oberer-Treitz et al. 2011** Oberer-Treitz, Susanne, Puzik, Arnold & Verl, Alexander. 2011.
Sicherheitsbewertung der Mensch-Roboter-Kooperation.
Werkstattstechnik online (Jahrgang 101 H. 9), S. 629–632
- Oberer-Treitz et al. 2013** Oberer-Treitz, Susanne, Dietz, T. & Verl, A. 2013.
Safety in industrial applications: From fixed fences to direct interaction.
In: *Robotics (ISR), 2013 44th International Symposium on Robotics*, S. 1–4
- Opel Automobile GmbH 2016** Opel Automobile GmbH. 2016.
Kollaborative Roboter bei Opel, zuletzt geprüft am 25. Oktober 2016.
Verfügbar: <https://opelpost.com/>
- Petzelt 2010** Petzelt, Dominik. 2010.
Konzept zur rechnerunterstützten Bestimmung von Sollzeiten in der Montageplanung.
Aachen : Shaker.
Schriftenreihe industrial engineering; Bd. 5.
ISBN 3-832-29640-9
- Prenting et al. 1964** Prenting, T.O. & Battaglin, R.M. 1964.
The Precedence Diagram: A Tool for Analysis in Assembly Line Balancing: *The Journal of Industrial Engineering*, XV
- Ranz et al. 2017** Ranz, Fabian, Hummel, Vera & Sihm, Wilfried. 2017.
Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration.
Procedia Manufacturing **9**, S. 182–189.
DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.011

- REFA 1993** Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung. 1993.
Lexikon der Betriebsorganisation.
München : Hanser.
ISBN 3-446-17523-7
- Richter et al. 2012** Richter, Götz, Bode, Silke & Köper, Birgit. 2012.
Demografischer Wandel in der Arbeitswelt, zuletzt geprüft am 16. Januar 2016.
Verfügbar:
www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/artikel30.html
- Robert Bosch GmbH 2016** Robert Bosch GmbH. 2016.
Kollaborativer Roboter Bosch APAS, zuletzt geprüft am 9. November 2016.
Verfügbar: <http://www.bosch-apas.com/>
- Robinson et al. 1984** Robinson, A. P., Lechtman, Hanan & Nof, Shimon Y. 1984.
RTM (Robot Time and Motion) user manual, version 1.2.
West Lafayette : Purdue University.
Research memorandum; no. 84-12
- Röscher 2007** Röscher, Jörg. 2007.
Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie, Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss. 2007
- Ross 2002** Ross, Paul. 2002.
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung.
München : Utz.
Forschungsbericht // IWB; 170.
ISBN 978-3-8316-0191-2
- Roßgoderer 2002** Roßgoderer, Ulrich. 2002.
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen.
München : Utz.
Forschungsberichte / IWB; Bd. 168.
ISBN 3-831-60154-2
- Rudolf 2007** Rudolf, Henning. 2007.
Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie.
München : H. Utz.
Forschungsberichte IWB; Bd. 204.
ISBN 978-3-8316-0697-9
- Sanfleber 1968** Sanfleber, Helmut. 1968.
Untersuchung zur Abhängigkeit von Elementarzeiten vom Aufbau des auszuführenden Bewegungsvorganges: Ein kritischer Beitrag zur Vorgehensweise der Verfahren vorbestimmter Zeiten.
Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften.

- Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen; Bd. 1922.
ISBN 3-663074-00-5
- Schilde 1982** Schilde, Jürgen. 1982.
Ermittlung und Bewertung von Rationalisierungsmaßnahmen im Produktionsbereich: Ein Beitrag zur rationellen Produktionsplanung.
Berlin : Springer.
ISBN 978-3-540-11730-8
- Schlick et al. 2010** Schlick, Christopher, Bruder, Ralph & Luczak, Holger. 2010.
Arbeitswissenschaft.
Berlin : Springer.
ISBN 978-3-540-78332-9
- Schöninger 1989** Schöninger, Joachim. 1989.
Planung taktzeitoptimierter flexibler Montagestationen, Zugl.:
Stuttgart, Univ., Diss., 1988.
Berlin [u.a.] : Springer.
IPA-IAO-Forschung und Praxis; 133.
ISBN 3-540-50896-1
- Schröter et al. 2016a** Schröter, Daniel, Kuhlmann, Peter, Finsterbusch, Thomas, Kührke, Benjamin & Verl, Alexander. 2016.
Introducing Process Building Blocks for Designing Human Robot Interaction Work Systems and Calculating Accurate Cycle Times.
Procedia CIRP **44**, S. 216–221.
DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.038
- Schröter et al. 2016b** Schröter, Daniel, Jaschewski, Peter, Kührke, Benjamin & Verl, Alexander. 2016.
Methodology to Identify Applications for Collaborative Robots in Powertrain Assembly.
Procedia CIRP **55**, S. 12–17.
DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.015
- Schröter et al. 2016c** Schröter, Daniel, Finsterbusch, Thomas & Kuhlmann, Peter. 2016.
Entwicklung von Prozessbausteinen zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation.
Smarte Fabrik & Smarte Arbeit - Industrie 4.0 gewinnt Kontur **22**, S. 365–374
- Slama 2004** Slama, Stefan. 2004.
Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz.
Bamberg : Meisenbach.
Fertigungstechnik - Erlangen; 148.
ISBN 3-875-25204-7
- Spillner 2015** Spillner, Rüdiger. 2015.
Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion, Zugl.: München,

- Techn. Univ., Diss., 2014.
München : Utz.
Forschungsberichte; Bd. 296.
ISBN 978-3-8316-4450-6
- Tecnomatix 2016** Tecnomatix. 2016.
Simulation eines manuellen Arbeitsvorgangs in Jack, zuletzt geprüft am 27. Oktober 2016.
Verfügbar:
https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/human-ergonomics/jack.shtml#lightview-close
- Thiemermann 2005** Thiemermann, Stefan. 2005.
Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter.
Heimsheim : Jost-Jetter.
IPA-IAO-Forschung und Praxis; Nr. 411.
ISBN 978-3-9369-4750-2
- Thiemermann et al. 2001** Thiemermann, Stefan & Spingler, Jochen. 2001.
Direkte Mensch-Roboter-Kooperation.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (Nr. 11-12), S. 616–620
- Thiemermann et al. 2002** Thiemermann, Stefan & Schulz, Oliver. 2002.
Trennung aufgehoben.
Computer & Automation, Nr. 8, S. 82–85
- VDI 2860: 1990** Verein deutscher Ingenieure. 1990.
Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.
Berlin : Beuth
- VDI 2870: 2012** Verein deutscher Ingenieure. 2012.
Ganzheitliche Produktionssysteme Grundlagen, Einführung und Bewertung.
Berlin : Beuth
- Visual Components 2016** Visual Components. 2016.
Simulation von Roboterbewegungen mit 3D Automate, zuletzt geprüft am 27. Oktober 2016.
Verfügbar: <http://www.visualcomponents.com/de/visual-components-essentials/>
- Vogl 2009** Vogl, Wolfgang. 2009.
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern.
München : Utz.
Forschungsberichte / IWB; 228.
ISBN 3-831-60869-5

- Weck 2006** Weck, Manfred. 2006.
Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme.
8., neu bearb. Aufl.
Berlin [u.a.] : Springer.
ISBN 978-3-5402-2502-7
- Weidner 2015** Weidner, Robert. 2015.
Technische Unterstützungssysteme.
Berlin [u.a.] : Springer.
ISBN 978-3-662-48382-4
- Zandin 2003** Zandin, Kjell B. 2003.
MOST work measurement systems.
New York : Marcel Dekker.
Industrial engineering; 22.
ISBN 978-0-8247-0953-2
- Zwicker et al. 2016** Zwicker, Carola & Reinhart, Gunther. 2016.
System for the Estimation of Robot Cycle Times in Early
Production Planning Phase.
Applied Mechanics & Materials **Vol. 840**, S. 99–106

Die Arbeit stellt eine Methode zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation vor. Basierend auf bestehenden Forschungsarbeiten wird ein Konzept zur fähigkeitsorientierten Zuordnung von Montage-tätigkeiten entwickelt, das darüber hinaus die Identifikation von Montage-schritten mit einer hohen Eignung für eine Kooperation von Mensch und Roboter ermöglicht. Auf Basis aktueller Normen werden formelbasierte Zusammenhänge aufgestellt, um die maximal zulässige Geschwindigkeit von Roboterbewegungen und den Mindestabstand zu Gefahrenstellen zu berechnen. Weiterhin werden Prozessbausteine zur Beschreibung roboter-basierter Montagevorgänge definiert, die eine direkte Berechnung von Sollzeiten ermöglichen. In Kombination mit bestehenden Prozessbaustein-systemen zur Planung manueller Arbeitsvorgänge ist es möglich, Arbeits-abläufe von Mensch und Roboter in einer gemeinsamen Prozesssprache zu beschreiben und aufeinander abzustimmen.

ISBN 978-3-8396-1332-0



FRAUNHOFER VERLAG