





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften

**Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung  
von Leistungswandlungen in der Produktion**

**Rüdiger Spillner**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

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

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr. phil. K. Bengler

Die Dissertation wurde am 27.03.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.09.2014 angenommen.





Rüdiger Spillner

**Einsatz und Planung von Roboterassistenz  
zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen  
in der Produktion**



Herbert Utz Verlag · München

**Forschungsberichte IWB**

Band 296

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4450-6

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



Q	B	V	H	Y		
W	Z	I	Q	E	F	G
U	R	D	H	E	K	N
X	E	S	J	M	P	



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>V</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Situation und Motivation	1
1.1.1 Der demographische Wandel	1
1.1.2 Alter, Gesundheit und Arbeitsfähigkeit	2
1.1.3 Roboterassistenz in der Produktion	3
1.2 Allgemeine Zielsetzung	4
1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Integration Leistungsgewandelter</b>	<b>6</b>
2.1 Definitionen und Grundlagen	6
2.1.1 Leistungswandlung	6
2.1.2 Gesundheit	7
2.1.3 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept	7
2.1.4 Eingruppierung von Leistungswandlungen	7
2.1.5 Montagesystemplanung	9
2.2 Betriebliche Maßnahmen zum Umgang mit Leistungswandlungen und Einsatzeinschränkungen	13
2.2.1 Übersicht und Einordnung der Maßnahmen	13
2.2.2 Prävention	15
2.2.3 Integration	18
2.2.4 Reintegration	29
2.2.5 Vorgehen zur Maßnahmeneinführung	31
2.3 Zwischenfazit	34
<b>3 Mensch-Roboter-Kooperation und Roboterassistenz</b>	<b>35</b>
3.1 Definitionen und Grundlagen	35
3.1.1 Montage, Handhabung	35

3.1.2	Industrie-, Service-, Assistenzroboter	35
3.1.3	Mensch-Roboter-Kooperation	36
3.1.4	Normen und Regelungen	38
3.2	Technische und organisatorische Schlüsselemente	39
3.2.1	Schlüsselemente	39
3.2.2	Sichere Zusammenarbeit und Koexistenz	39
3.2.3	Ortsflexibilität, Mobilität, Formfaktor	48
3.2.4	Modulare und vernetzte Maschinen	49
3.2.5	Flexible Endeffektoren	50
3.2.6	Interaktion und Programmierung	51
3.2.7	Verankerung in Unternehmen	56
3.2.8	Akzeptanz	59
3.3	Kooperative und kollaborative Handhabung	66
3.4	Einschätzung der Technologiereife	72
3.5	Zwischenfazit	74
3.6	Ableitung des Handlungsbedarfs	75
<b>4</b>	<b>Möglichkeiten robotergestützter Assistenz innerhalb betrieblicher Maßnahmen</b>	<b>77</b>
4.1	Potenzial robotergestützter Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen	77
4.1.1	Einschätzung des Maßnahmenpotenzials	77
4.1.2	Synthese allgemeiner robotergestützter Maßnahmen	78
4.2	Handhabungsassistenz und Leistungswandlung	82
4.2.1	Erörterung	82
4.2.2	Bewertung und Übersicht	83
4.3	Darstellung archetypischer Maßnahmen und Einsatzbeispiele	85
4.3.1	Beispiele allgemeiner und arbeitsplatzübergreifender, bereichsbezogener Maßnahmen	86
4.3.2	Assistenzbeispiele auf Arbeitsplatzebene	87



4.4	Zusammenfassung	98
<b>5</b>	<b>Planung von Roboterassistenz</b>	<b>99</b>
5.1	Ableitung eines Planungs- und Entwicklungsvorgehens	99
5.1.1	Anforderungen	100
5.1.2	Hinreichende Detaillierung eines Roboterassistenzsystems	101
5.1.3	Zeitpunkt	102
5.1.4	Maßnahmenbeschreibung	107
5.2	Planung von Roboterassistenz für Handhabungsprozesse	111
5.2.1	Analyse Assistenzbedarf	112
5.2.2	Vorauswahl bestehender Lösungen per Profilvergleich	116
5.2.3	Konzeption neuer Assistenzsysteme auf Prozessebene	118
5.2.4	Prüfung der Arbeitsinhalte	125
5.2.5	Integration zusätzlicher Aufgaben	126
5.2.6	Layout	126
5.2.7	Bewertung von Assistenz und Ergonomie	133
5.2.8	Einschätzung zur Akzeptanz	135
5.2.9	Kostenbewertung	137
5.2.10	Entscheidung und Maßnahmenbeschreibung	139
5.3	Zusammenfassung	140
<b>6</b>	<b>Beispielhafte Anwendung des Vorgehens</b>	<b>141</b>
6.1	Ausgangssituation	141
6.1.1	Arbeitsinhalt, Layout	141
6.1.2	Rahmenbedingungen und Vorgaben	142
6.2	Analyse Assistenzbedarf	143
6.2.1	Belastungs-, Gefährdungsanalyse	143
6.2.2	Handlungs- und Assistenzbedarf	143
6.2.3	Vorauswahl bestehender Lösungen	145
6.3	Konzeption	146

6.3.1	Betrachtung der Handhabungsschritte	146
6.3.2	Kombination von Teillösungen auf Grobkonzeptebene	147
6.3.3	Detailkonzept	149
6.4	Konzeptdetaillierung und -prüfung	151
6.4.1	Prüfung der Arbeitsinhalte	151
6.4.2	Integration zusätzlicher Aufgaben	151
6.4.3	Layout	152
6.4.4	Bewertung von Assistenz und Ergonomie	159
6.4.5	Einschätzung zur Akzeptanz	159
6.4.6	Kostenbewertung	160
6.4.7	Verallgemeinerung der wirtschaftlichen Einsatzbereiche	162
6.5	Zusammenfassung	164
<b>7</b>	<b>Resümee</b>	<b>165</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>168</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>A-1</b>
9.1	Vergleich Montageplanungsvorgehen	A-1
9.2	Beispiele von Arbeitsplatzanpassungen	A-2
9.3	Funktionen der Montage und Handhabung	A-4
9.4	Regelungen für Robotereinsatz in Personennähe	A-5
9.5	Ansätze betrieblicher Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen mit Roboterunterstützung	A-8
9.6	Diskussion der Ausführungsarten kooperativer Handhabung	A-18
9.7	Eingrenzung gültiger Arbeitsbereiche	A-27
9.8	Diskussion unterschiedlicher Ausführungsvarianten	A-28
9.9	Pick-By-Wire Modul	A-30
<b>10</b>	<b>Studienarbeiten</b>	<b>A-40</b>
<b>11</b>	<b>Veröffentlichungen</b>	<b>A-42</b>

## Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	-	Index zur Zuordnung von Arbeitsplatz, -aufgabe, -schritt
$\ddot{a}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung beim Manipulieren eines Objekts
$AB_{mpa}$	-	Assistenzbedarf
$AM_{ap}$	-	Anforderungsmerkmal
$C_a$	[GE]	Hardwarekosten einer Automation
$C_b$	-	Proportionalitätsfaktor zur Schätzung der Betriebs- und Außerbetriebnahmekosten anhand der Hardwarekosten
$C_e$	-	Proportionalitätsfaktor zur Schätzung der Kosten von Ingenieursleistungen und Inbetriebnahme anhand der Hardwarekosten
$C_h$	[GE]	Hardwarekosten einer hybriden (kooperativen) Lösung
$C_L$	[GE/a]	Jahreskosten für zuordenbares Personal
$C1 \dots Cn$	-	Konstanten für die Regelparameter des Pick-By-Wire Moduls
$D$	[a]	Abschreibungsdauer
$d_{Bet}$	[s]	Dauer bzw. Laufzeit des Anlagenbetriebs
$d_{psi}$	[s]	Dauer von Prozessschritt i
$d_{psi}R_j$	[s]	Dauer des Einsatzes der Ressource i in Prozessschritt j
$\vec{F}_f$	[N]	Führkraft-Vektor beim Manipulieren eines Objekts
$FG$	-	Fähigkeitsgrenze
$FM$	[m]	Abstand zwischen Seilführung und Messebene
$FM_{mp}$	-	Fähigkeitsmerkmal
$F_x, F_y, F_z$	[N]	Kräfte beim Manipulieren eines Objekts
$F_{Zug}$	[N]	Zugkraft am Seil bzw. entlang eines Seils
$GE$	-	Geldeinheiten
$i, j$	-	Zählindizes
$K$	[GE]	Gesamtkosten (Beschaffung, Betrieb und Rezyklierung)
$KD_{psi}$	[GE]	Durchschnittliche Kosten des Prozessschritts i

$KN$	[GE]	Summe der nicht zuordenbaren Kosten
$K_{per}$	[GE/s]	Kosten per Periode
$KR_j$	[GE]	Gesamtkosten der Ressource j
$KS_{psi}$	[GE]	Spezifische Kosten des Prozessschritts i
$KS_{psi}R_j$	[GE]	Spezifische Kosten der Ressource j für Prozessschritt i
KS1, KS2	-	Kartesische Koordinatensysteme
$K_{wert}$	[GE]	Kostenwert
$LZE$	s	Laufzeitende
$m$	-	Index zur Zuordnung der Mitarbeiter
$NAB_{mpa}$	-	Normierter Assistenzbedarf
$n$	-	Zählindex
$n_{pBet}$	-	Häufigkeit der Prozessdurchführung während der Laufzeit
$p$	-	Index zur Zuordnung der Profilmerkmale
$per$	-	Zeitperiode
$R_j$	-	Ressource
$S$	-	Anzahl der Arbeitsschichten pro Tag
$T_{hi}$	[%]	Zeitanteil der betrachteten Kollaboration pro Einsatz bzw. pro Zyklus oder Takt
$Z_{zr}$	-	Zinssatz

## Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
d.h.	das heißt
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ggf.	gegebenenfalls
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
u.a.	unter anderen
z.B.	zum Beispiel



# 1 Einleitung

## 1.1 Situation und Motivation

### 1.1.1 Der demographische Wandel

Europa und Deutschland erfahren einen drastischen demographischen Wandel. Die Bevölkerung altert, vgl. Abbildung 1. Der Altersmedian der EU-25-Bevölkerung steigt bis 2050 voraussichtlich auf 49 Jahre (EK RSDA 2007). Die Ursachen liegen in der gestiegenen Lebenserwartung, den geringen Geburtenraten und einer begrenzten Einwanderung Jüngerer. In Folge werden dem Arbeitsmarkt bis 2050 mehr ältere, gleichzeitig aber 20 % weniger Arbeitskräfte als noch 2004 zur Verfügung stehen, was das potenzielle Wachstum des Brutto-sozialprodukts halbiert (ebenda). Während die alternde Gesellschaft hohe Anforderungen an die sozialen Sicherungssysteme stellt, verdoppelt sich das Rentner-zu-Arbeits-tätigen-Verhältnis von 37 % (2004) auf 70 % (2050) (ebenda). Das heißt, weniger Bürger müssen mehr versorgen. Dabei stehen sie mit ihren Wohlstandsquellen – Arbeitsplätze und Unternehmen – weiterhin im globalen Wettbewerb. Gerade auch für produzierende Unternehmen, als wichtigen Wohlstandsfaktor, besteht in der Bewältigung dieses demographischen Wandels eine der großen Herausforderungen zur Zukunftssicherung (ABELE & REINHART 2011).

Angesichts dieser Entwicklung ist es für die Wirtschaft und Gesellschaft der EU und Deutschlands von essentieller Bedeutung, die Arbeitskraft Älterer zu erhalten und zu stärken. Neben sozialen und politischen Anreizen sind innovative Produktionstechnologien erforderlich, die es Erwerbstätigen ermöglichen ihr Berufsleben zu verlängern und die gleichzeitig die Pro-Kopf-Produktivität erhöhen.

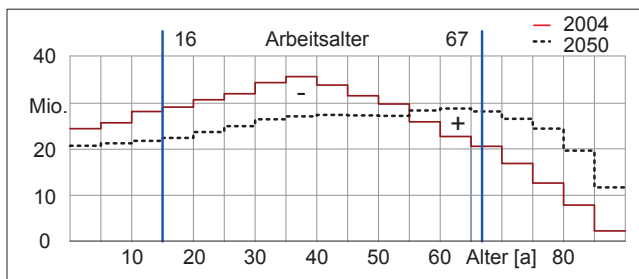


Abbildung 1: Alterskohorten der EU-25 nach EK RSDA (2007)

### 1.1.2 Alter, Gesundheit und Arbeitsfähigkeit

Alterung ist ein stark individueller und teilweise reversibler Prozess. Als genereller Trend nehmen Geschicklichkeit, Reaktionsvermögen, Wahrnehmung und Kraft ab den Mittzwanzigern ab, während Erfahrung und Kompetenz wachsen. Entwicklung und Abbau der Fähigkeiten unterliegen genetischen Voraussetzungen, Umwelteinflüssen, Gesundheit, Training und Nichtgebrauch. Vgl. (SCHLICK ET AL. 2010, S. 116-134). Alterungseffekte können im Arbeitsleben zum Teil durch z.B. Verhaltensänderung und Betriebserfahrung kompensiert werden, vgl. (BÖRSCH-SUPAN ET AL. 2007). Folglich kann nicht vom Alter des Einzelnen auf Einschränkungen der Arbeitsfähigkeit oder -leistung geschlossen werden. Allerdings nimmt mit zunehmendem Alter die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher Einschränkungen bzw. Leistungswandlungen zu. Im Fallbeispiel einer Produktionsbelegschaft weisen 5 % der Mitarbeiter im Alter von 40 Jahren Einschränkungen auf, mit denen sie am angestammten Arbeitsplatz nicht mehr einsetzbar sind (DUBIAN 2009). In der Altersgruppe der 60-jährigen sind davon bereits 47 % betroffen. Auch der Anteil derer nimmt zu, die mangels adäquater Arbeitsplätze gar nicht mehr einsetzbar sind, siehe Abbildung 2.

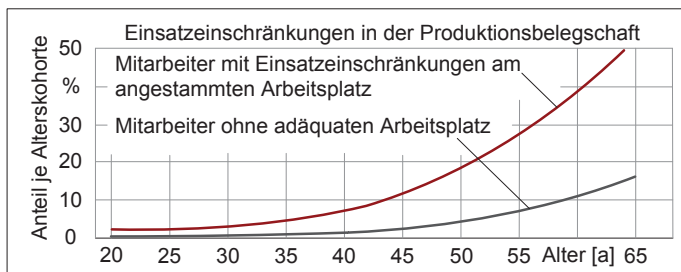


Abbildung 2: Altersverteilung durch Leistungswandlungen bedingte Einsatz einschränkungen einer Produktionsbelegschaft, interpoliert nach DUBIAN (2009)

Ältere weisen mehr Fehltage auf; sie verunfallen und erkranken zwar seltener, aber schwerwiegender als Jüngere (SILVERSTEIN 2008; BADURA & ASTOR 2003). Gerade produzierende Unternehmen, mit ihrem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten, müssen mit einer Zunahme an Fehlzeiten rechnen, vgl. (LIEBERS ET AL. 2013). Das hohe gesetzliche Renteneintrittsalter in Deutschland wird von den Meisten nicht erreicht. Mehr als jeder Vierte geht aus gesundheitlichen Gründen vorzeitig in den Ruhestand, im Schnitt mit 55 Jahren (DESTATIS 2010).



Ohne weitere Maßnahmen werden Unternehmen erheblich an Arbeits- und Innovationskraft, Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit einbüßen.

Eine wesentliche Ursache der Einschränkungen, wie auch von Fehlzeiten und vorzeitigem Ruhestand sind Gesundheitsprobleme, (EUROPEAN AGENCY FOR SAFETY AND HEALTH AT WORK 2010; PARENT-THIRION ET AL. 2007). Der Produktionsbereich scheint davon besonders betroffen: Dort geben 40 % der Erwerbstätigen eine Beeinträchtigung der Gesundheit durch ihre Arbeit an – einen höheren Anteil zeigen nur die Sektoren Landwirtschaft und Bauarbeiten, (EUROPEAN AGENCY FOR SAFETY AND HEALTH AT WORK 2010).

Unter den arbeitsbezogenen Gesundheitsproblemen und Berufserkrankungen weisen Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) die größte Prävalenz auf, (ebenda). Als Hauptrisikofaktoren für (sowohl das Entstehen als auch das Auswirken von) MSE im Produktionsbereich gelten: Das Handhaben schwerer Lasten, monoton repetitive oder schnelle Arbeiten sowie ermüdende und schmerzhafte Körperhaltungen (ebenda).

Alle drei Risikofaktoren finden sich häufig in Handhabungsprozessen der Fertigung, Montage und Logistik wieder. Deswegen wird in dieser Arbeit der Handhabungsprozess als Schwerpunkt adressiert.

### **1.1.3 Roboterassistenz in der Produktion**

Zur Erhaltung und Steigerung der Pro-Kopf-Produktivität im demographischen Wandel erscheint ein verstärkter Einsatz von Automation unumgänglich. Das wirtschaftliche Optimum liegt jedoch nicht in der Maximierung des Automatisierungsgrades, vgl. (LAY & SCHIRRMEISTER 2001). Die Ausgrenzung der Erfahrung und Flexibilität menschlicher Arbeitskräfte führt in volatilen Märkten zu hohen Flexibilisierungskosten. Vielmehr bedarf es einer geeigneten Mischung menschlicher und maschineller Arbeit, vgl. (BLEY ET AL. 2004).

Ein Schlüsselement der industriellen Automation stellen Industrieroboter dar. Durch technische Innovationen wachsen Leistungsfähigkeit, Fertigkeiten und Flexibilität der Roboter beständig, wodurch sie in einem zunehmend breiteren Einsatz- und Branchenfeld Anwendung finden, vgl. (INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2009). Ein spezieller Zweig der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zielt darauf ab, Robotern eine Zusammenarbeit mit Menschen und ein Arbeiten in unmittelbarer Nähe von Menschen zu ermöglichen, vgl. (KRÜGER ET AL. 2009). Der Vorteil einer solchen Mensch-Roboter-Kooperation wird darin gesehen, dass zum einen der Mensch seine

Erfahrung, Übersicht und Entscheidungskompetenz unmittelbar einbringen kann und damit den Robotereinsatz flexibilisiert. Zum anderen kann der Roboter den Menschen bei physisch anspruchsvollen, ermüdenden oder gefährlichen Arbeiten entlasten (ebenda).

Durch diese Eigenschaften hat die Mensch-Roboter-Kooperation das Potenzial, erstens die Pro-Kopf-Produktivität zu fördern, zweitens durch Verbesserung der Arbeitsbedingungen Arbeitskräfte gesund zu erhalten und drittens Leistungswandlungen durch Assistenz zu kompensieren. Die Weiterentwicklung dieser Technologie erscheint daher als Maßnahme geeignet, den Folgen des demographischen Wandels zu begegnen.

### **1.2 Allgemeine Zielsetzung**

Der gezielte Einsatz der Mensch-Roboter-Kooperation in der Produktion ist in Hinblick auf die Berücksichtigung von Leistungswandlungen bisher nicht umfassend beleuchtet worden. Für einen solchen Einsatz sind einige Voraussetzungen zu schaffen: Erstens bedarf es im Zuge der Montagesystemplanung eines Vorgehens, welches eine zielgerichtete Gestaltung der Roboterassistenz auf Arbeitsplatzebene ermöglicht. Eine derartige Planung wird erleichtert, wenn eine größere Auswahl an Systemen oder Modulen für eine Roboterassistenz verfügbar ist und erfolgreiche Anwendungsbeispiele bekannt sind. Daher gilt es zweitens, neue Module und Systeme für die robotergestützte Assistenz zu entwickeln und zu erproben. Für Entwicklungen ist eine Fokussierung auf Technologien mit dem größten Potenzial sinnvoll. Daher ist drittens eine Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten der Roboterassistenz und eine Bewertung des jeweiligen Einsatzpotenzials vorzunehmen.

### **1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 1 werden Motivation, Zielsetzung und Vorgehen dargelegt.

In Kapitel 2 werden bestehende betriebliche Maßnahmen zum Umgang mit Leistungsgewandelten analysiert und in einer neuen Übersicht zusammengefasst. Es werden zudem Grundlagen der Montagesystemplanung erläutert, der Begriff der Leistungswandlung definiert und eine Klassifikation von Leistungswandlungen eingeführt.

In Kapitel 3 wird der Stand der Technik der Mensch-Roboter-Kooperation allgemein sowie spezifisch für robotergestützte Assistenz bei Handhabungsprozessen dargelegt.

Kapitel 4 baut auf die Kapitel 2 und 3 auf. Für die zuvor beschriebenen betrieblichen Maßnahmen zur Berücksichtigung Leistungsgewandelter werden jeweils robotergestützte Assistenzmöglichkeiten entworfen und bewertet. Hierfür wird ein neues Bewertungsverfahren eingeführt. Auf Basis der Bewertung wird eine Übersicht der potenzialreichsten robotergestützten Maßnahmen zur Berücksichtigung Leistungsgewandelter erstellt. Weiterhin werden die Kooperationsmöglichkeiten von Mensch und Roboter im Bereich der Handhabung diskutiert und hinsichtlich des Assistenzpotenzials bezüglich unterschiedlicher Leistungswandlungen bewertet. Abschließend werden beispielhafte robotergestützte Assistenzmaßnahmen in Archetypen klassifiziert und beschrieben.

Kapitel 5 entwirft in Anlehnung an bestehende Methoden zur Montagesystemplanung ein angepasstes Vorgehen zur Planung von Roboterassistenz. Basis sind die vorangegangenen Kapitel 2 bis 4.

In Kapitel 6 wird das in Kapitel 5 entworfene Vorgehen an einem Anwendungsszenario illustriert. Dabei wird ein neu entworfenes Handhabungsassistenzsystem eingeplant.

## 2 Integration Leistungsgewandelter

In diesem Kapitel werden zunächst einige Grundlagen und Definitionen geliefert. Anschließend werden betriebliche Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen gegliedert und vorgestellt.

### 2.1 Definitionen und Grundlagen

#### 2.1.1 Leistungswandlung

Für den Begriff der Leistungswandlung finden sich verschiedene Definitionen. In ADENAUER (2004) werden Leistungswandlungen den Behinderungen gleichgesetzt. Behinderungen liegen nach dem Sozialgesetzbuch vor, wenn „körperliche Funktion, geistige Fähigkeit oder seelische Gesundheit mit hoher Wahrscheinlichkeit länger als sechs Monate von dem für das Lebensalter typischen Zustand abweichen“ (SGB IX, §2 Abs.1). Im genauen Gegensatz dazu definieren SCHLICK ET AL. (2010, S. 151) Leistungswandlungen als durch Krankheit verursachte, „nicht nur vorübergehende Beeinträchtigung der (...) Leistungsfähigkeit“ von Arbeitspersonen, denen „kein Grad der Behinderung zuerkannt wird“. Nach SCHÜHLEIN (1997) wird ‚leistungsgewandelt‘ als Euphemismus für ‚leistungsgemindert‘ verwendet und beschreibt eine Gruppe von „nicht mehr ehrgeizigen, wenig durchsetzungsfähigen und motivierten Mitarbeitern“. Nach JAHN (2001) sind Leistungsgewandelte „Mitarbeiter mit Einsatzeinschränkungen, die (...) für bestimmte Anforderungen/Belastungen des Arbeitsplatzes nicht geeignet sind, jedoch am passenden Arbeitsplatz die volle Leistung erbringen können“. In (EGBERS ET AL. 2010) werden Leistungswandlungen als „relevante negative wie auch positive Veränderung“ der „beruflichen Leistungsfähigkeit“ festgelegt. Daraus abgeleitet, wird in der vorliegenden Arbeit folgende Definition verwendet:

**Leistungswandlungen** sind Veränderungen an Arbeitspersonen, die zu einer relevanten Herabsetzung ihrer Arbeitsleistung oder zu Einsatzeinschränkungen an zuvor für sie geeigneten Arbeitsplätzen führen und nicht den Grad einer Behinderung erreichen. Leistungsgewandelte sind Personen, die mindestens einer Leistungswandlung unterliegen.

**Einsatzeinschränkungen** sind Eigenschaften von Arbeitspersonen, die die Verwendung dieser Arbeitspersonen an bestimmten Arbeitsplätzen ausschließt, für die sie sonst verwendbar wären. Einsatzeinschränkungen reduzieren die Einsatzflexibilität einer Arbeitsperson.

Die **Integration Leistungsgewandelter** umfasst im Sinne dieser Arbeit alle betrieblichen Maßnahmen zum Umgang mit Leistungsgewandelten.

### 2.1.2 Gesundheit

**Gesundheit** ist nach der Definition der World Health Organization (WHO 1946) „ein Zustand des vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlergehens und nicht nur das Fehlen von Krankheit oder Gebrechen.“ Eine detaillierte Diskussion des Gesundheitsbegriffs wird in (ULICH & WÜLSER 2010) vorgenommen, wonach neuere Definitionen die Eigenverantwortung des Menschen betonen.

### 2.1.3 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept

In den Arbeitswissenschaften werden **Belastungen** beschrieben als die „äußeren Merkmale der Arbeitssituation (z.B. Arbeitsaufgabe, physikalische, chemische, organisatorische und soziale Umgebungsbedingungen, besondere Ausführungsbedingungen wie Zeitdruck etc.)“ (SCHLICK ET AL. 2010, S.38). Unter dem Begriff der **Beanspruchung** werden die „Reaktionen (körperlich-physiologisch, erlebens- und verhaltensmäßig) des arbeitenden Menschen auf diese Bedingungen“ zusammengefasst. Übung und Gewöhnung können die Beanspruchungen reduzieren. Im zeitlichen Verlauf kumulierte Beanspruchungen können zu Ermüdung oder zur Schädigung führen (ebenda).

Die gleichen Belastungen führen bei verschiedenen Personen zu unterschiedlichen Beanspruchungen. Um eine Überbeanspruchung zu vermeiden werden in der betrieblichen Praxis allgemeine Belastungsgrenzwerte verwendet. Bei Leistungswandlungen sind Überbeanspruchungen innerhalb dieser Belastungsgrenzwerte möglich und wahrscheinlich. Eine Überbeanspruchung kann bereits eine Leistungswandlung darstellen.

### 2.1.4 Eingruppierung von Leistungswandlungen

Um eine Zuordnung von Assistenzmöglichkeiten zu Leistungswandlungen und Einsetzeinschränkungen darzustellen, ist zunächst eine möglichst allgemein verwendbare Einordnung festzulegen. Zwar besteht eine internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit und Behinderung von Menschen (ICF) (WHO 2001). Diese aber erscheint für den Gebrauch im Produktionsbereich durch Umfang und Komplexität ungeeignet. In der betrieblichen Praxis werden Leistungswandlungen und Einsetzeinschränkungen beispielsweise anhand von Kriterien erfasst, die die Arbeitsplatzanforderungen an den Mitarbeiter

beschreiben. Es besteht aber keine einheitliche, betriebsübergreifende Klassifizierung. Mit dem Fokus auf Montage- und Handhabungsaufgaben wird hierzu die in Tabelle 1 dargestellte fünfteilige Grobklassifikation eingeführt. Diese baut auf dem Profilvergleichsverfahren „Anforderungs- und Belastbarkeitsanalyse“ (ABA) (BMW 2002) sowie auf den Werkzeugen zur Gefährdungsbeurteilung „Leitmerkalmethoden“ (LMM) (BAUA 2001; STEINBERG ET AL. 2007) und „Ergonomic Assessment Work Sheet“ (EAWS) (IAD 2009) auf.

*Tabelle 1: Grobklassifizierung von Leistungswandlungen und Einsatz einschränkungen für Montage- und Handhabungsaufgaben*

Grob- klasse	Zuordenbare Anforderungs-, Profil- und Gefährdungsmerk- male	Beispielhaft zuordenbare Ursachen in den Arbeitsanforderungen und -bedingungen
Kraft	Muskelbelastung Arme, Schulter; Greif-, Haltekraft; Bearbeitungs-, Fügekraft; Aktionskräfte; Ziehen, Schieben, Heben, Tragen	Hohes Objektgewicht, große Entfernung des Schwerpunkts von Greifstellen; ungünstige Greifbarkeit des Objekts; Erfordernis großer Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, Richtungswechsel; Trägheit, Schwergängig- keit von Handhabungsgeräten, ungünstige Ausführungsbedingungen
Körperhaltung	Stehen, Sitzen, Beugen, Knien, Liegen; Überkopf-, Über- schulterarbeit; Belastung von Nacken, Handgelenk; Beweg- lichkeit von Arm, Rumpf, Kniegelenk;	Schlechte Zugänglichkeit, Sicht, Arbeits- höhe; Entfernung und Position von Bereit- stellungsbehältern;
Sensomotorik	Präzision, Positioniergenauig- keit z.B. beim Ziehen, Schieben; Fingerbelastung	Sehr große, sehr kleine Objekte, hohes Objektgewicht; Objektverhalten im Hauf- werk; Erschwerungen durch Schutz aus- rüstung; Schwergängigkeit, Trägheit von Handhabungsgeräten; schlechte Sicht; monotone, schnelle oder hochfrequente Tätigkeit

Zeitreime	Häufigkeit, Dauer, Frequenz der Handhabung; Dauer einzelner Körper- oder Zwangshaltungen; Taktabhängigkeit, Autonomie; Schichtarbeit, Nachtschicht	Hohe Zielvorgaben, Akkord; fehlende Puffer oder Springer; monotone, schnelle oder hochfrequente Tätigkeit
Umgebungsbedingungen	Beleuchtung; Lärm, Vibrationen; Nässe, Klima; Gefahrstoffe, Allergene; Unfallgefahren;	Fehlende, zu schwache Lichtquellen oder Reflexionsflächen; örtliche Nähe zu, fehlende Abschottung von oder Arbeit mit Gefährdungsquellen (Maschinen, Betriebsstoffe, Tiefkühlager); Bodenbeschaffenheit

### 2.1.5 Montagesystemplanung

In diesem Abschnitt werden klassische Planungsverfahren zusammengefasst dargestellt und deren Berücksichtigung von Leistungswandlungen besprochen. Dies ist Grundlage für das Verständnis von später vorgestellten Planungsvorgehen die gezielt auf Belegschaftsanforderungen eingehen (Abschnitt 2.2.3). Ferner bildet es die Basis für die Ableitung eines Planungsvorgehens, welches Roboterassistenz berücksichtigt (Kapitel 5).

Die Planung eines Montagesystems weist den Charakter eines Projekts auf, vgl. DIN 69901, dessen Durchführung sich grob in fünf Phasen gliedern lässt: Vorbereitung, Grobplanung, Feinplanung, Umsetzung und Betrieb, vgl. (BULLINGER 1986; LOTTER 1992; KONOLD & REGER 2003), siehe auch Abbildung 49 im Anhang 9.1. Unterschiede zwischen den Verfahren bestehen insbesondere in der Schwerpunktsetzung der Anwendung oder dem Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge. So fokussiert LOTTER (1992) z.B. Automatisierungslösungen und JONAS (2000) begleitet und unterstützt die Teilschritte mit Datenbanken. Die Lösung der Planungsaufgabe erfordert dabei in der Regel ein iteratives Vorgehen in den Teilschritten der Phasen, wobei aufeinanderfolgende Arbeitsschritte vorteilhafterweise den Lösungsraum immer weiter eingrenzen, vgl. (LOTTER & WIENDAHL 2006). Typisch ist weiterhin ein Top-Down-Vorgehen, d.h. eine hierarchische Betrachtung ausgehend vom gesamten Montagesystem hin zur einzelnen Montagestation.

Stellvertreten durch das Verfahren nach BULLINGER (1986) soll das Vorgehen klassischer Montagesystemplanung vorgestellt sowie die dortige Berücksichtigung von Belegschaftsanforderungen und von Schnittstellen manueller und automatischer Arbeit herausgestellt werden. Das Verfahren wird linearisiert

dargestellt, d.h., Iterationen und Parallelisierungen der Teilschritte werden nicht extra angesprochen.

**Vorbereitung:** Zu Beginn des Planungsprojekts wird in der Regel ein organisatorischer Rahmen definiert, der das Projektmanagement regelt, vgl. DIN 69901. Nach einer Situationsanalyse werden Ziele definiert sowie Verantwortlichkeiten, Rahmenbedingungen, Termine und Budgets festgelegt, als auch eine Montagekosten-Vorkalkulation durchgeführt. Es folgt eine weitere Konkretisierung der Anforderungen, eine Auswahl der durchzuführenden Planungsmaßnahmen sowie die Erhebung und Bereitstellung relevanter Planungsdaten. Zu diesen Daten gehören unter anderem auch mitarbeiterbezogene Daten zu deren Qualifikation und Leistungswandlung bzw. Einsatzeinschränkung, vgl. (BULLINGER 1986, S. 60). Diese werden von BULLINGER (1986) allerdings nicht näher spezifiziert und im Weiteren wird auch nicht detaillierter darauf eingegangen.

**Grobplanung:** Der weiteren Grobplanung liegen maßgeblich die Produkt- bzw. Erzeugniseigenschaften zu Grunde. In einer Erzeugnisstruktur werden alle Baugruppen und Einzelteile des Erzeugnisses aufgelistet, die unter anderem hinsichtlich ihrer Stapelbarkeit, Anpassbarkeit an Fördermittel und Handhabungssysteme, erforderliche Werkzeuge etc. beschrieben und bewertet werden. Anschließend wird ein Montageplan erstellt, der die mögliche Reihenfolge der Montageschritte bzw. Teilverrichtungen z.B. in einem Vorranggraphen darstellt.

Es folgt eine Prüfung, ob einzelne Teilverrichtungen wirtschaftlich automatisierbar sind, wobei die Automation die bevorzugte Lösung darstellt, in der Wertung gefolgt von einer Teilautomation und schließlich der manuellen Montage. Die Teilautomation wird hier allerdings nur als Wechsel von automatischen und entkoppelten, manuellen Arbeitsstationen betrachtet.

Die Montageablaufstruktur kann durch zusätzliche Daten angereichert werden wie z.B. einer Kennzeichnung der manuellen Teilvorrichtungen, die etwa aufgrund der Bauteil- oder Prozesseigenschaften (u.a. Gewicht, Raumbedarf, Fügekräfte) voraussichtlich des Einsatzes von Montagehilfsmitteln bedürfen.

Für die Ausführung der manuellen Teilverrichtungen werden dann z.B. durch Abschätzung oder MTM (Methods-Time-Measurement) Vorgabezeiten ermittelt. Anhand dieser Vorgabezeiten erfolgt eine Kapazitätsteilung, die das Kapazitätsangebot der Mitarbeiter auf die zu erfüllenden Teilverrichtungen verteilt. Das Kapazitätsangebot wird dabei durch die Anwesenheitszeit der Mitarbeiter und



einem planerischen Leistungsgrad als Korrekturfaktor beschrieben. Zusammen mit der iterativ oder parallel erstellten Prinzipanordnung der Montagestationen können dann die Arbeitsinhalte beschrieben und bewertet werden. Bei der Bewertung wird zum einen auf Basis der Tätigkeitsanforderungen (Qualifizierung, Belastung, Umgebungseinflüsse, Verantwortung) ein Arbeitswert, d.h. eine mitarbeiterunspezifische Entlohnungsstufe gefunden. Weiterhin wird mit arbeitswissenschaftlichen Analyseverfahren (z.B.: FRIELING & HOYOS 1978) überprüft und ggf. durch weitere Maßnahmen sichergestellt, dass grundlegende, personalorientierte Kriterien erfüllt werden:

- Ausführbarkeit: die Tätigkeit kann eingedenk normativer Anforderungen physisch ausgeübt werden;
- Schädigungslosigkeit: die Gesundheit bleibt unbeeinträchtigt;
- Beeinträchtigungsfreiheit: die Leistungsfähigkeit wird nicht herabgesetzt;
- Persönlichkeitsförderlichkeit: Kompetenz wird erhalten oder gebildet.

Auf Basis der zuvor durchgeführten Einteilung in automatisierte, teilautomatisierte oder manuelle Teilrichtungen werden zu den geeigneten Montageverfahren Vorrichtungen, Maschinen und Werkzeuge recherchiert und ausgewählt. Die einzelnen Montagestationen werden dann in Prinzipanordnungen in logischer Reihenfolge zueinander ausgerichtet. Anschließend werden Verkettungsmittel, Puffer, Werkstückträger und Materialbereitstellung ausgewählt, die wiederum eng mit der Art des Organisationsprinzips (u.a. Verrichtungs-, Objekt-, Flussprinzip) verknüpft sind und sich sowohl auf die Automatisierbarkeit (u.a. Ordnungszustände in der Bauteilbereitstellung) als auch auf die Belastungen und Arbeitsinhalte der Mitarbeiter (Körperhaltung, Handhabungskräfte, Taktbindung) auswirkt. Die Prinzipanordnungen werden dann durch die maßstäbliche Anordnung aller Elemente unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen in sogenannten Layouts detailliert.

Aus den dabei entstandenen Lösungsalternativen wird unter Abwägung wirtschaftlicher wie auch nicht monetärer Kriterien eine geeignete Variante für die weitere Detaillierung ausgewählt.

**Feinplanung:** Nachdem die bisherige Planung nur für ein repräsentatives Erzeugnis erfolgt ist, wird das gesamte Erzeugnisspektrum eingeplant und eine Leistungsabstimmung durchgeführt. Dabei werden im Zuge der Optimierung der Modell-Mix-Verluste u.a. der Belastungsmix und die Taktausgleichszeiten für die Mitarbeiter vorbestimmt.

Aufbauend auf den bisherigen Daten werden die manuellen Arbeitsplätze und Arbeitsinhalte weiter detailliert. Dazu gehören die konkrete, ergonomische Anordnung und Gestaltung u.a. von Stellteilen, Griffen, Arbeitsflächen, Teilebereitstellungsbehälter, Handhabungshilfsmittel etc., wobei die Durchführung z.B. mit anthropometrischen Maßtabellen, Schablonen oder virtuellen Menschmodellen unterstützt wird. Mit zunehmender Ausarbeitung werden Kosten, Vorgabezeiten und Arbeitsbelastung präziser kalkulierbar, so sind beispielsweise Greifwege oder Körperhaltung bei der Arbeitsausführung durch die Arbeitsraumgestaltung determiniert.

Die Ausgestaltung der automatischen Montagestationen erfolgt separat. Die technischen Lösungen, sofern nicht zugekauft, werden durch methodisches Konstruieren z.B. nach VDI 2222 erarbeitet. Beim Design sollen Auswirkungen auf die Arbeitsbedingungen der Belegschaft berücksichtigt werden. Genannt werden hierfür z.B. der Abbau von Arbeitsinhalten einhergehend mit einem Anstieg von Monotonie und einseitigen Belastungen, enge Taktbindung, Verringerung von Kommunikation und Qualifikationsanforderungen.

Die Einhaltung des Anforderungskollektivs wird abschließend z.B. mit Checklisten überprüft. Bei Freigabe erfolgt die Erstellung vorläufiger Montageunterlagen (u.a. Pflichtenheft, Konstruktionszeichnungen, Stücklisten, Montageanweisungen).

**Umsetzung:** In der Umsetzungsphase finden Betriebsmittelbau, Beschaffung, Personaleinsatzplanung, Systemaufbau und Systemanlauf statt. Auf die individuellen Belegschaftsanforderungen wird in der Personaleinsatzplanung hier durch Prüfung der Eignung der einzelnen Mitarbeiter hinsichtlich der Arbeitsplatzanforderungen eingegangen (Qualifikationsdeckung). Zu diesen Anforderungen können auch belastungsbezogene Merkmale zählen. Maßnahmen zur Erhöhung der Qualifikationsdeckung bei physischer Überbelastung sind u.a.: Anpassung der Arbeitsplatzgestaltung oder Arbeitsmethode, Verringerung der Arbeitsinhalte, Automatisierung.

**Betrieb:** Während des Betriebs findet die Überprüfung und Bewertung des Montagesystems vorwiegend anhand von Kennzahlen statt, um Optimierungs- und Rationalisierungspotenziale durch Anpassungen am System auszuschöpfen. Neu entstehende Leistungswandlungen innerhalb der Belegschaft werden nach BULLINGER (1986) nur indirekt bzw. symptomatisch beobachtet, etwa über Veränderungen der Arbeitsproduktivität.

## 2.2 Betriebliche Maßnahmen zum Umgang mit Leistungswandlungen und Einsatz einschränkungen

### 2.2.1 Übersicht und Einordnung der Maßnahmen

Die bestehenden betrieblichen Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen bzw. Einsatz einschränkungen lassen sich drei Wirkungsfeldern und drei Zielstellungen zuordnen, vgl. Abbildung 3. Die drei Zielstellungen orientieren sich an den Zeitpunkten der Entscheidung bzw. Handlung der Maßnahme:

- **I Prävention:** Maßnahmen und Gestaltungsmittel zur Vermeidung der Entstehung oder Ausdehnung von Leistungswandlungen bzw. Einsatz einschränkungen
- **II Integration:** Die Berücksichtigung bekannter oder prognostizierter Leistungswandlungen während der Montagesystemplanung
- **III Intervention / Reintegration:** Maßnahmen zum Umgang mit während der Planung nicht berücksichtigten Leistungswandlungen während des Betriebs eines Montagesystems

Die Wirkungs- und Handlungsfelder der Maßnahmen adressieren:

- **1 Mitarbeiter:** Dies umfasst hier die als „Arbeitsperson“ (SCHLICK ET AL. 2010) handelnden inklusive ihrer Fähigkeiten, Fertigkeiten, Motivation etc., einschließlich der nicht mit dem Arbeitsplatz verbundenen Umgebungs- und Randbedingungen
- **2 Arbeitsinhalt und Arbeitsstruktur:** Die Menge, Art, Organisation und Zeitregime der von den Mitarbeitern auszuführenden Tätigkeiten, Vorrichtungen und wahrzunehmenden Verpflichtungen
- **3 Arbeitsplatzgestaltung:** Die Bedingungen und Verhältnisse, in der die Arbeitsinhalte in den Arbeitsstrukturen durch die Mitarbeiter ausgeführt werden

Umfassende Beispiele und Übersichten der hier zusammengefassten betrieblichen Maßnahmen geben: MÜLLER ET AL. (2007), NEFF & KAISER (2007), PFEIFFER ET AL. (2010), SCHMAL ET AL. (2001); SPORKET (2009), SZYMANSKI ET AL. (2009), WHYSALL ET AL. (2006), PACKEBUSCH & WEBER (2003), ADENAUER (2004), BAUA (2008), STROTMANN & HESS (2003), KRENN & VOGT (2004), AXHAUSEN ET AL. (2002) und BMAS (2012).

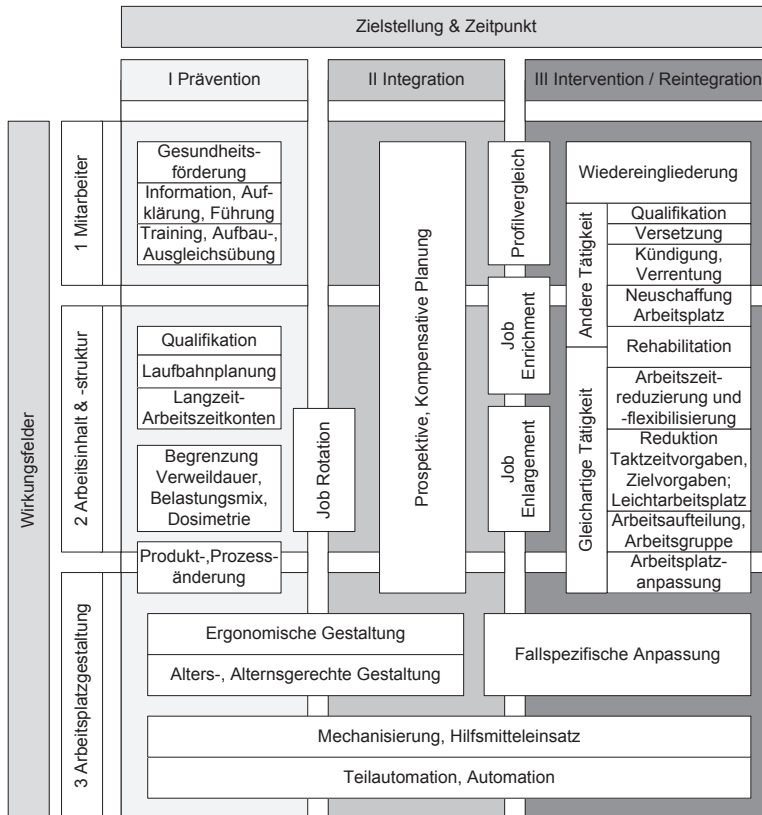


Abbildung 3: Übersicht der betrieblichen Maßnahmen zum Umgang mit Leistungswandlungen

Im Folgenden wird auf die einzelnen Maßnahmen aus Abbildung 3 eingegangen, beginnend bei den präventiven und abschließend mit den reintegrativen Maßnahmen. Anschließend wird ein Vorgehen zur Maßnahmeneinführung vorgestellt.

### **2.2.2 Prävention**

#### **2.2.2.1 Gesundheitsförderung, Aufklärung, Training, Führung**

Gesundheitsförderung zielt „auf einen Prozess, allen Menschen ein höheres Maß an Selbstbestimmung über ihre Gesundheit zu ermöglichen und sie damit zur Stärkung ihrer Gesundheit zu befähigen“ (ULICH & WÜLSER 2010) und ergänzt damit präventive Behandlungs- und Pflegestrategien (KRUSE 2002). Es wird versucht, die Beanspruchung der Arbeitsinhalte durch eine Erhöhung der Belastbarkeit zu senken. Typische Maßnahmen der Gesundheitsförderung als Teil des Gesundheitsmanagements (ULICH & WÜLSER 2010) stellen dar: Betriebssport (HERZER 2007), (KENNY ET AL. 2008), Gesundheitschecks (SCHLICK ET AL. 2010, S.133), Stressimmunisierungstraining (ULICH & WÜLSER 2010, S.15), Rückenschule (LENHARDT ET AL. 1997), Physiotherapie vor Ort (PFOSER 2008, S.24) sowie die Aufklärung über gesunde Verhaltensweisen (HOEHNE-HÜCKSTÄDT ET AL. 2007). Für den Umgang mit Belegschaftsanforderungen und betrieblicher Gesundheit ist auch die (Unternehmens-)Führung relevant (ULICH & WÜLSER 2010, S. 269). Diese kann durch mehrere Mittel einwirken: von der Einrichtung von Ziel- und Kontrollsystemen, Zuordnung von Verantwortlichkeiten und Öffnung bestehender Strukturen für Gestaltungs- und Qualifizierungsmöglichkeiten über das Schaffen eines Bewusstseins für derartige Anforderungen bei Ausführenden, Planenden und Leitenden bis hin zur Anpassung der Unternehmenskultur, vgl. (ULICH & WÜLSER 2010, S. 225-274). Investitionen in die betriebliche Gesundheitsförderung verursachen nicht nur Kosten sondern können sich um ein Mehrfaches auszahlen (CHAPMAN 2005).

#### **2.2.2.2 Erfassung, Begrenzung und Mischung der erfahrenen Belastung**

Lässt sich das Auftreten potenziell schädlicher Belastungen nicht vermeiden, so wird auf Ebene der Arbeitsstruktur und Arbeitsinhalte versucht die Dauer bzw. Dosis der Exposition zu minimieren.

Zur Feststellung und Bewertung der Belastungen können zahlreiche Verfahren angewendet werden: Hierzu zählen Verfahren wie die Leitmerkmalermethode für manuelle Arbeitsprozesse (STEINBERG ET AL. 2007), OWAS (KARHU ET AL. 1981), RULA (MCATAMNEY & NIGEL CORLETT 1993), EAWS, OCRA (LAVATELLI ET AL. 2012), MTM-Ergo (LANDAU 2004), AAWS (SCHAUB 2004), NIOSH (WATERS ET AL. 1994), TBS (HACKER 1996). Die Verfahren unterscheiden sich im Einzelnen durch ihren Geltungsraum (z.B.

allgemein oder eingegrenzt auf einzelne Körperregionen oder Belastungsarten) ihre Detailtiefe (Grobscreening bis Detailverfahren) vgl. (KUGLER ET AL. 2010, Abb. 12) und können in mehrstufige Vorgehen eingebettet sein (CAFFIER ET AL. 1999).

Zur Belastungsbegrenzung werden bei den Analyseverfahren wie der Leitmerkmal-methode Grenzwerte vorgegeben, die einzuhalten sind. Ist eine Belastung zu hoch, müssen Arbeitsplatz, Arbeitsweise oder Arbeitseinsatz mit dem Ziel der Belastungsreduktion angepasst werden.

Um einseitige und dadurch potenziell schädliche Belastungen zu vermeiden wird ein Belastungsmix empfohlen, der ein Wechsel von unterschiedlichen Körperhaltungen, -bewegungen und psychischen wie kognitiven Anforderungen beinhaltet (BUCK 2002). Dies kann z.B. durch Regelungen der Pausenzeit und Tätigkeitswechsel umgesetzt werden. Die Optimierung von Pausenregime und konkrete Aneinanderreihung von verschiedenen Belastungsarten ist weiterhin Forschungsgegenstand. Für einige Belastungsfälle ist nachgewiesen, dass sich Einzelbelastungen über die Zeit addieren und kritische Dosen erreichen können, wobei zusätzlich auch eine Alterskomponente mitwirken kann, vgl. (PANGERT & HARTMANN 1999), (RADEMACHER ET AL. 2012). Auch für andere Belastungsarten wird ein solcher Zusammenhang vermutet. Ein praktisches Problem besteht darin, die tatsächlich erfahrene Gesamtbelastung für einzelne Mitarbeiter zu erfassen und zu speichern. Ein Ansatz, diese Dokumentation im Sinne einer Belastungsdosimetrie durch Mitarbeiteridentifikation am Arbeitsplatz zu automatisieren und damit die Ableitung entsprechender Maßnahmen zu ermöglichen wird von REINHART ET AL. (2009a) vorgestellt. Ferner können einige spezifische Belastungsarten, wie z.B. Lärm, durch tragbare Dosimeter erfasst werden (MÜLLER 2009).

### 2.2.2.3 Qualifikation und Laufbahnplanung

Die stete Weiterqualifikation, sogenanntes ‚lebenslanges‘, ‚berufsbegleitendes‘ oder ‚integriertes‘ Lernen kann vornehmlich auf zwei Arten präventiv wirksam werden. Zum einen ermöglicht es den Mitarbeitern breitere Einsatzmöglichkeiten und einen Anforderungswechsel. Zum anderen kann auf die Ausführung anderer Tätigkeiten ausgewichen werden, wenn durch betriebliche Umstrukturierung oder durch Auftreten von Leistungswandlungen einzelne, bisher ausgeführte Tätigkeiten nicht mehr durchführbar sind, vgl. (BUCK & SCHLETZ 2004). Dabei stellt gerade bei älteren Mitarbeitern der nicht erlernte oder akzeptierte

Umgang mit neuen Technologien – wie Computer oder Roboterassistenz – eine wichtige Problemursache dar, vgl. (HENTZE 1994, S. 151).

Innerbetrieblich kann Weiterqualifikation z.B. durch die Einarbeitung des Mitarbeiters in wechselnde Einsatzfelder realisiert werden. Arbeitsinhalte können „lern- und persönlichkeitsförderlich“ sein, wenn sie die Ausübung „vollständiger Tätigkeit“, d.h. Planung, Organisation, Ausführung, Kontrolle ermöglichen (HACKER 2000, S.71). Nach BRANDENBURG & DOMSCHKE (2007) werden entsprechend in einer alternsgerechten Laufbahngestaltung vier Phasen bzw. Arbeitsplatztypen durchlaufen: Einstiegs-, Umstiegs-, Verweil- und Ausstiegsarbeitsplätze. Die ersten beiden Typen seien auf Qualifikationsbildung (vorwiegend horizontal, d.h. auf gleichbleibender Qualifikationsebene, vgl. MATTHÄI & MORSCHHÄUSER 2009, S. 35), der letzte auf Kompensation von Alterserscheinungen ausgerichtet. Weiterhin können interne und externe Weiterbildungsangebote durch Freistellung der Mitarbeiter gefördert werden, wobei CZESKLEBA ET AL. (2004, S. 29) für den Umfang 2 % der Jahresarbeitszeit vorschlagen. Auch Sabbatjahre (BUCK 2007) sind vorstellbar. Ein Hemmnis für die arbeitgeberseitige Unterstützung von Weiterbildungen können Tarifvereinbarungen darstellen, die den Lohn auf Basis von vorhandener Qualifikation unabhängig vom tatsächlichen Einsatz staffeln (Kosten einer Höhergruppierung). Diesem Hemmnis ist durch Verhandlungen entgegenzusteuern.

Lebensarbeitszeitmodelle wie Jahres- und Lebensarbeitszeitkonten bzw. Zeitwertkonten ermöglichen das Ansammeln von Zeitguthaben, die bei Bedarf abgeschöpft werden können, z.B. für ein vorgezogenes Berufsende, Altersteilzeit, Teilzeitarbeit mit Lohnausgleich, Blockfreizeiten (KRÄMER 2002, S.86) oder ausbezahlt werden (ARBFLEXIG 2008). Sie stellen damit einen quasifinanziellen Ausgleich dar, leisten jedoch darüber hinaus keinen Beitrag zur Kompensation oder Vermeidung von Leistungswandlungen.

### 2.2.2.4 Job Rotation

Job-Rotation ist ein systematischer Arbeitsplatzwechsel (LUCZAK & FRÄDRICH 1993), üblicherweise innerhalb einer Arbeitsgruppe. Hierdurch werden dann Belastungswechsel ermöglicht und einseitige, eintönige Belastungen verringert, wenn sich die Tätigkeiten der Arbeitsplätze hinreichend unterscheiden.

### 2.2.2.5 Produkt- und Prozessänderungen

Die konstruierten Eigenschaften der Produkte legen maßgeblich die möglichen Fertigungs- und Montageprozesse und damit die durchzuführenden Arbeitsinhalte fest. Neben allgemeinen Vorgaben zur montagegerechten Gestaltung (BARTHELMESS 1987) kann durch frühzeitige Integration ergonomischer Anforderungen, z.B. im Sinne des Simultaneous Engineerings (BULLINGER & WARSCHAT 1996), das spätere Auftreten belastender Tätigkeiten reduziert oder vermieden werden. Liegen konkrete Anforderungen der Belegschaft vor, kann die Maßnahme auch integrationsförderlich eingesetzt werden.

### 2.2.2.6 Arbeitsplatzgestaltung

Die Arbeitsplatzgestaltung determiniert zusammen mit den Arbeitsinhalten die Arbeitsbelastung. Die präventive Wirkung wird vor allem durch eine Reduktion der Belastungen realisiert. Die ergonomische, alters- und altersngerechte Arbeitsplatzgestaltung sowie die Mechanisierung, der Hilfsmittelsmitteleinsatz und die Automation können sowohl präventiv wie auch integrativ wirken. Auf diese Maßnahmen wird in Abschnitt 2.2.3 genauer eingegangen.

## 2.2.3 Integration

### 2.2.3.1 Profilvergleich

Profilvergleichsverfahren stellen Arbeitsplatzanforderungen und Mitarbeiterfähigkeiten gegenüber und prüfen damit, ob und inwieweit Mitarbeiter die entsprechende Tätigkeit unter den gegebenen Umständen ausführen können. Eine Sammlung mehrerer Arbeitsplatzprofile ermöglicht die Suche geeigneter Arbeitsplätze für leistungsgewandelte Mitarbeiter, wobei computerunterstützte Verfahren die Durchführung vereinfachen können, vgl. (DUBIAN 2009; SCHAUB ET AL. 2006). Die Zuordnung mehrerer Mitarbeiter kann als Optimierungsproblem aufgefasst und je nach Kriterium den Unternehmensanforderungen angepasst werden (z.B. größte Fähigkeitsnutzung, geringste Belastungs-Fähigkeits-Differenz, geringster Anpassungsbedarf, Belastungsnivellierung), vgl. (EGBERS 2012; XU ET AL. 2012; PETERS & ZELEWSKI 2005). Können Mitarbeiter keinen geeigneten Arbeitsplätzen zugeordnet werden, ist die Anpassung des Arbeitsplatzes eine mögliche Maßnahme. Dabei kann die Diskrepanz zwischen Eignungs- und Anforderungskriterien Hinweise zu Art und Umfang der Anpassungen geben.



Profilvergleichsverfahren verwenden üblicherweise zwei zueinander passende Listen von Kriterien, die jeweils Anforderungen bzw. Eignungen beschreiben. Je nach Verfahren werden Kriterien unterschiedlicher Art und Menge eingesetzt. Das ABAMed-Verfahren erfasst die Mitarbeiterfähigkeiten in 19 Merkmalen, die zum Belastungsermittlungsverfahren ABATech kongruent sind (BMW 2002), wobei vom Werksarzt festgestellt wird, ob eine Einsatz einschränkung in den einzelnen Kriterien vorliegt. Analog, wenngleich umfangreicher, wird das Eignungsprofil nach SCHRADER ET AL. (1995) erstellt. Typische Anforderungs- und Fähigkeitsmerkmale bzw. Eignungsausschlusskriterien sind z.B.: Körperhaltungen (gebeugt, knieend, Überkopparbeit), Prozesskräfte (statisch, dynamisch, einseitig, hochfrequent), Psyche (Monotonie), Umgebungseinflüsse (Hitze, Staub, Luftzug), Nachtschicht, enge Taktbindung, hohes Nahsehvermögen, (BMW 2002; SCHRADER ET AL. 1995). Die Bewertung dieser Kriterien wird üblicherweise in zwei bis fünf ordinalen Stufen vorgenommen vgl. (SCHRADER ET AL. 1995; SCHAUB ET AL. 2006). Eine grobe Übersicht, welche medizinischen Diagnosen zu welchen Einsatz einschränkungen führen können, geben SCHRADER ET AL. (1995, S. 18).

Ein Profilvergleich ist grundsätzlich auch ohne spezielle Profilvergleichsverfahren möglich, indem Belastungs- und Anforderungsanalysen Fähigkeitsanalysen gegenübergestellt werden. Methoden zur Ermittlung von Arbeitsbelastung bzw. -anforderungen sind bereits in Abschnitt 2.2.2.2 dargelegt worden. Diese können durch Ergonomen, Fachkräfte für Arbeitssicherheit oder Montageplaner durchgeführt werden. Die Ermittlung der arbeitsbezogenen Fähigkeiten bzw. der Belastbarkeit der Mitarbeiter (auch: Functional Capacity Evaluation) wird üblicherweise durch Betriebsärzte oder Arbeitsmediziner ausgeübt. Eine allgemeine Einschätzung der Arbeitsfähigkeit liefert der Arbeitsbewältigungsindex (Work Ability Index) (EBENER 2011), wo Mitarbeiter anhand eines Fragebogens eine Selbsteinschätzung treffen. In (CAFFIER ET AL. 1999) wird eine Belastungsbewertung und eine Erhebung gesundheitlicher Beschwerden vorgenommen, zusätzlich flankiert von einer medizinisch-orthopädischen Untersuchung. Zur weiteren Detaillierung werden Methoden unter anderem zur Erfassung physiologische Parameter (Pulsfrequenz, Blutdruck, Elektromyographie) vorgeschlagen. Nach RADEMACHER ET AL. (2010) werden die Ergebnisse der Befragung, medizinische Untersuchung und arbeitsspezifische Untersuchungen als Indikatoren verstanden, die eine Beurteilung und eine Einstufung in industrierelevante Fähigkeiten durch einen Experten ermöglichen bzw. benötigen. Das MELBA-Verfahren (FÖHRES ET AL. 2005) bestimmt vor allem

psychologische Merkmalsausprägungen (z.B. die Fähigkeiten zur Arbeitsplanung, Teamarbeit, Misserfolgstoleranz aber auch Feinmotorik, Reaktionsgeschwindigkeit oder Lesen). Mit Hilfe des Arbeitssimulationsgeräts ERGOS (KAISER ET AL. 2000; SCHIAN & KAISER 2000) lässt sich die Leistungsfähigkeit von Probanden in standardisierten, typischen Arbeitsaufgaben messen. Ergebnis des umfangreichen Verfahrens sind insbesondere auch qualitative Aussagen zur Belastbarkeit. Hierzu gehören z.B. Handgreifkräfte aufgeschlüsselt für beide Hände und für verschiedene Greifarten, die Angabe noch geeigneter Zeitanteile verschiedener Aktivitäten (Bücken, Knien, Reichen über Kopf) oder die Angabe von Grenzlasten (z.B. Heben von 5 kg). GLATZ ET AL. (2007) legen dar, dass die Zuhilfenahme vom ERGOS zu einer besseren Eignungsbeurteilung führt. In GOUTTEBARGE ET AL. (2004) wird ein Vergleich mit weiteren Verfahren (Blankenship, ERGO-Kit, Isernhagen Work System) vorgenommen. Eine weitreichende Sammlung und Übersicht von weiteren Bewertungsmethoden bietet die Online-Datenbank für Assessment-instrumente (ALLES 2012).

### 2.2.3.2 Prospektive, kompensative und altersgerechte Planung

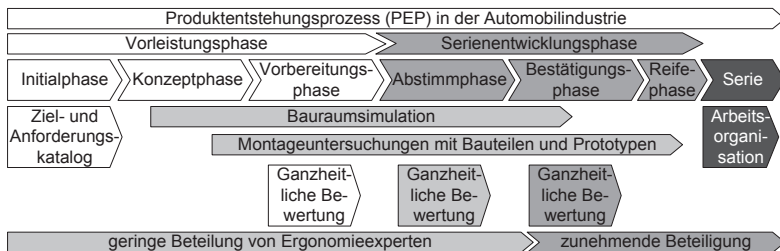


Abbildung 4 Berücksichtigung ergonomischer Anforderungen im Produktentstehungsprozess (Kaltenbrunner 2008)

KALTENBRUNNER (2008) zeigt am Beispiel des bereits stark strukturierten Produktentstehungsprozesses eines Automobilherstellers (Abbildung 4) Schwachstellen bestehender praktischer Planungsvorgehen auf. So werden zu Beginn nur bedingt konkrete Ergonomieziele definiert und Schwachstellen nicht systematisch berücksichtigt. Die präventive Berücksichtigung von Mitarbeiter-eigenschaften beschränkt sich zumeist auf Geschlecht und Körpergröße (KUGLER ET AL. 2010). Frühe Bauraumsimulationen und Montagevoruntersuchungen betrachten vornehmlich die Erreichbarkeit und Zugänglichkeit, ergonomische Bewertungen finden dabei nicht flächendeckend statt und erhobene

Daten werden nur situativ weiterverarbeitet. Eine vollumfängliche Bewertung findet entlang des Prozesses zwei bis dreimal statt. Dabei ist die Akzeptanz von methodischen Unterstützungen nur bedingt gegeben und die ergonomischen Bewertungen bleiben teilweise ungenau, vgl. (BROBERG 2007; SCHMAL ET AL. 2001). Ergonomieexperten werden vornehmlich in späteren Phasen beteiligt. Die Zuteilung von Mitarbeiter zu Arbeitsplatz oder zur Arbeitsplatzrotation wird erst am Ende und ohne genauere Regelung vorgenommen. Eine Vernetzung der Ergonomieinformationen zwischen den Phasen ist nur bedingt vorhanden. Innerhalb solcher und vergleichbarer Vorgehen können Mitarbeiteranforderungen und die Notwendigkeit präventiver oder korrekativer Maßnahmen erst spät erkannt werden, wobei deren Umsetzung dann zumeist einen erhöhten Aufwand erfordert, vgl. (BRUDER ET AL. 2009). SCHMAL ET AL. (2001) stellen fest, dass zu wenige geeignete Arbeitsplätze für Leistungsgewandelte vorgesehen werden, ergonomische Anpassungen allein in der Regel nicht ausreichen. Er empfiehlt die Erfahrung und Kompetenz der Planer zu fördern und die Berücksichtigung von Mitarbeiteranforderungen in der Planung zu institutionalisieren.

Hier greifen diverse Planungsansätze an (je nach Schwerpunkt bezeichnet als: prospektiv, kompensativ, korrektiv, präventiv (LAURIG 1990; ROBERT & BRANGIER 2009); fähigkeits-, alters- oder altersgerecht bzw. -robust, -adäquat oder -differenziert (SCHAUB ET AL. 2006; FRIELING ET AL. 2007; BUCK 2002; KISTLER ET AL. 2006; GERHÄUSER ET AL. 2010; HAMMER 1996; ZÜLCH & WALDHERR 2009; SINN-BEHRENDT 2006; WALDHERR & ZÜLCH 2010; BUCK ET AL. 1994; ZÜLCH ET AL. 2009.; FRIEDRICH 1986), deren Kernpunkte bzgl. der Montagesystemplanung vereinfacht in Abbildung 5 zusammengefasst werden.

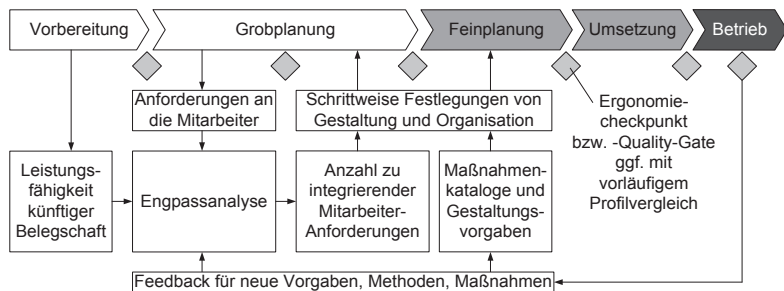


Abbildung 5 Vorausschauende Berücksichtigung und Integration von Mitarbeiteranforderungen in der Montagesystemplanung

Die einzelnen Funktionsbausteine (Rechtecke) sind entlang der Teilschritte einer Montagesystemplanung (vgl. Abschnitt 2.1.5) angeordnet. Die Funktionsbausteine werden im Folgenden erläutert.

### **Leistungsfähigkeit künftiger Belegschaft**

Ein Schwerpunkt besteht in der Prognose der Eigenschaften und Strukturen der künftigen Belegschaft. Dabei interessieren z.B. Altersstruktur, veränderte Leistungsfähigkeit oder Art und Häufigkeit von Leistungswandlungen.

Zur Altersstruktur: Die Alterszusammensetzung hat zunächst wenig Aussagekraft. Erst wenn durch eine Analyse weitere Eigenschaften mit dem Alter in Zusammenhang gebracht werden können (z.B. Leistungswandlungen, Ausfallzeiten, vgl. (VETTER 2003)) sind weitere Anforderungen oder Maßnahmen ableitbar (LANGHOFF 2009; PUTZING 2009).

Zur Veränderung der Leistungsfähigkeit: Den Zusammenhang von Alter und Leistung bzw. Produktivität legen z.B. ARNOLD & LANG (1990), BECKER (2007), BÖRSCH-SUPAN ET AL. (2007), BÖRSCH-SUPAN ET AL. (2009), GÖBEL (2009), DE ZWART ET AL. (1996) und HATTESOHL ET AL. (2007) dar. ZÜLCH & BECKER (2008), ZÜLCH ET AL. (2009) modellieren und simulieren die Leistungsentwicklung und -abstimmung in Montagesystemen anhand spezifischer Parameter, wie der Arbeitsenergieumsatzgrenze. KEIL ET AL. (2009) beschreiben die Leistungsentwicklung in drei Fähigkeitskategorien (Informationsaufnahme, -verarbeitung, -umsetzung) im „Chemnitzer Altersmodell“. TÄUBERT & REIF (1997, S. 94) treffen eine Einschätzung altersrelevanter Fähigkeitsveränderungen und ordnen dies allgemeinen Tätigkeitsbereichen zu, wonach insbesondere Feinmotorik und Überwachungstätigkeiten, ferner Grobmotorik, Transport- und Eingabetätigkeiten von einer Leistungsverschlechterung betroffen sind.

Zu Leistungswandlungen: Mit der Zuordnung erfasster Einsatzeinschränkungen bzw. Leistungswandlungen zur bestehenden Altersstruktur der Belegschaft kann anhand der prognostizierten Alterszusammensetzung das Auftreten von Leistungswandlungen grob extrapoliert werden, vgl. (BOGUS & DORN 2010; SCHMAL ET AL. 2001; EGBERS & SCHILP 2010; REINHART & EGBERS 2011).

### **Anforderungen an die Mitarbeiter**

In der Grobplanungsphase werden die durchzuführenden Arbeitsinhalte und damit auch Anforderungen an die Mitarbeiter beschrieben. Diese beinhalten z.B. die erforderlichen Qualifikation, vgl. (BULLINGER 1986) sowie zusätzlich die erforderlichen Fähigkeiten bzw. Einsatzvoraussetzungen und die zu erwartenden Arbeitsbelastungen. Zusammen mit der Belegschaftsprognose lässt sich dann eine Engpassanalyse durchführen.

### **Engpassanalyse**

Die Engpassanalyse dient dazu Schwachstellen bzgl. künftiger Mitarbeiterfähigkeiten, geplanter Arbeitsanforderungen und deren Verhältnis zueinander zu identifizieren. Hierzu können z.B. die Häufigkeit oder Höhe einzelner Anforderungen aufsummiert und verglichen werden, vgl. (SCHRADER ET AL. 1995, S.47). Ferner kann das (Miss-)Verhältnis zwischen Arbeitsanforderungen und Mitarbeitereigenschaften über Profilvergleichsverfahren erfasst und anschließend gewichtet werden, vgl. (SCHAUB ET AL. 2006; RADEMACHER ET AL. 2006; DIECKMANN ET AL. 2006; SCHRADER ET AL. 1995).

Arbeitsbelastungen werden im Planungsprozess bereits früh beeinflusst, aber erst spät in ihrer Höhe festgelegt (EGBERS ET AL. 2012). Dadurch kann ein Profilvergleich zunächst nur unvollständig durchgeführt werden. Daraus folgt, dass für die ersten Planungsschritte vor allem Mitarbeiteranforderungen zu berücksichtigen sind.

### **Integration der Mitarbeiteranforderungen**

Als quantifizierbares Ergebnis der Engpassanalyse ist bekannt, wie viele Mitarbeiter keinen zu ihren Fähigkeiten passenden Arbeitsplätzen zuzuordnen sind bzw. wie viele und welche Leistungswandlungen im geplanten Montagesystem zu integrieren sind. Eine chronologische Analyse des bestehenden Planungsvorgehens legt offen, zu welchen Zeitpunkten Planungsschritte Arbeitsbelastungen bzw. Einsatz einschränkungen im Einzelnen festlegen, vgl. (KUGLER ET AL. 2010; REINHART ET AL. 2010a; Reinhart und Egbers 2011; EGBERS ET AL. 2012). Dies ermöglicht zum einen, den Montageplanern zur geeigneten Zeit und nur die aktuell relevanten Beispielmaßnahmen bereitzustellen, z.B. in der Form eines digitalen, planungsbegleitenden Maßnahmenkatalogs, vgl. (EGBERS 2012). Zum anderen lassen sich Zeitpunkte ableiten, wann und in welchem Umfang erneute Überprüfungen des Planungsstandes hinsichtlich der Integration der

Mitarbeiteranforderungen effizient und effektiv durchführbar sind. Diese Zeitpunkte werden dann z.B. in der Form von Checkpunkten oder „Ergonomie-Quality-Gates“ im weiteren Planungsvorgehen vorgeschrieben, vgl. (KUGLER ET AL. 2010).

### **Maßnahmenkataloge und Gestaltungsvorgaben**

Die Einhaltung der allgemeinen, ergonomischen (ZÜLCH ET AL. 1999) sowie der belegschaftsspezifischen Anforderungen lässt sich während der Grob- und Feinplanung mit planungsbegleitenden Leitfäden und Checklisten realisieren, vgl. (TÄUBERT & REIF 1997; KEMPE & REIF 1996). Diese können durch lösungsspezifische Methoden oder Vorgehen ergänzt werden, so betrachtet PRASCH (2010) z.B. gezielt den Einsatz von Lasthandhabungshilfen. Die Checklisten dienen dabei vor allem der Prüfung der Zielerreichung und der präventiven Belastungsermittlung, vgl. (TÄUBERT & REIF 1997, S.85). Zielgerichtete Gestaltungshinweise erfolgen darüber hinaus in vier Formen, vgl. (TÄUBERT & REIF 1997):

- Bereitstellung von Anforderungs-Profilen von Gestaltungselementen: z.B. indem physiologische Anforderungen unterschiedlicher Arbeitsplatz-organisationsformen bewertet und gegenübergestellt werden
- Qualitative Gestaltungsvorgaben: z.B. Vermeidung statischer Haltearbeit
- Quantitative Gestaltungsvorgaben: allgemeine sowie geschlechts- und altersspezifische Grenzen und Richtwerte, z.B. für Arbeitshöhe, Mindestleuchtdichte bei Prüfarbeit, Lastgrenzen bei der Handhabung
- Bereitstellung und Zuordnung von Maßnahmenbeispielen zu bestimmten Beanspruchungsarten, Symptomen oder Beschwerdekomplexen

### **Feedback**

Die Erhaltung und Rückführung von Erfahrungswissen aus allen Planungsphasen inklusive des Betriebs dient zur kontinuierlichen Verbesserung des Planungsvorgehens (vgl. WINTER ET AL. 2009), z.B. durch:

- Aktualisierung der Maßnahmenkataloge mit neuen Lösungen oder Überarbeitung bestehender Einträge anhand von Einsatzerfahrungen,
- Identifikation von neuen Engpasskriterien, Verbesserung der Beurteilung im frühen Planungsprozess,
- Vorhersage von anforderungsbedingten Leistungsentwicklungen der Mitarbeiter (Belastungs-Schädigungskonzept).

### 2.2.3.3 Job Enlargement

Job Enlargement beschreibt die Erweiterung der Arbeitsinhalte und Arbeitsumfänge auf gleichartigem Qualifikationsniveau (LUCZAK & FRÄDRICH 1993). Dadurch können einseitige und eintönige Belastungen abgebaut bzw. relativiert werden (SCHLICK ET AL. 2010, S.506). Die Realisierung erfolgt z.B. durch die Zusammenlegung nachfolgender Arbeitsinhalte und Arbeitsplätze und kann im Ergebnis zu einer Steigerung der Zielerfüllung bei gleichzeitig geringerer Ermüdung führen (KAWAKAMI ET AL. 1999).

### 2.2.3.4 Job Enrichment

Job Enrichment beschreibt die Anreicherung der Arbeitsinhalte mit Tätigkeiten unterschiedlicher Qualifikationsanforderungen (auch „vertikale Erweiterung“) (SCHLICK ET AL. 2010, S.507). Die Erweiterung in Richtung ganzheitlicher Arbeit (HACKER 2000, S.71) durch z.B. zusätzliche Planungs- oder Organisationstätigkeiten bietet dem Mitarbeiter größere Autonomie und kann zu größerer Motivation und Produktivität führen und erfordert in der Regel Qualifikationsmaßnahmen (SCHLICK ET AL. 2010, S.507). Ein konkretes Beispiel kann die Erweiterung vom Bediener zum Programmierer von Maschinen darstellen.

### 2.2.3.5 Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung

Ziel der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung ist die Optimierung sowohl des menschlichen Wohlbefindens (schädigungsfrei, belastungsarm, risikoarm) als auch der Leistung (effizient, fehlerfrei) des Arbeitssystems, vgl. (SCHLICK ET AL. 2010, S. 949 ff.). Typische Eigenschaften des Arbeitsplatzes die beeinflusst werden sind z.B.: Arbeitsraum, Arbeitshöhe, Greifwege, Position von Bereitstellungsbältern, Wirkrichtung von Stellelementen, Form und Lage von Handgriffen und Bedienelementen. Eine umfangreiche Übersicht sowie konkrete Anleitung zur Umsetzung bietet einschlägige Fachliteratur, siehe (SCHLICK ET AL. 2010; SCHULTETUS 1987; ZÜLCH ET AL. 1999; BIERWIRTH ET AL. 2011; LANDAU & LUCZAK 2001; LANDAU 2003; DIN EN ISO 6385). In der praktischen Umsetzung wird bei der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung üblicherweise nicht auf individuelle Anforderungen der Mitarbeiter bzw. auf Leistungswandlungen oder Alterseffekte eingegangen. Eine Berücksichtigung der Eigenschaften findet in der Regel unspezifisch nach Geschlecht und Perzentil statt. Für die Körperhöhe beispielsweise wird in der Regel ein Betrachtungsbereich vom 5. Perzentil der Frauen bis zum 95. Perzentil der Männer bestimmt, d.h. 5 % der Frauen sind kleiner und 5 % der Männer größer. Zur Unterstützung

der Planung kommen u.a. Mensch-Modelle (2D-Schablonen mit perzentilen Maßen, virtuelle 3D-Modelle (MÜHLSTEDT ET AL. 2008), Cardboard-Engineering (REINHART ET AL. 2010b), Skizzen optimaler Greifräume und tabellierte Grenzwerte zum Einsatz (SCHLICK ET AL. 2010, S. 949 ff.).

Aus der allgemeinen, perzentilen Betrachtungsebene klassischer ergonomischer Arbeitsplatzgestaltung folgt, dass unabhängig von Leistungswandlungen ein Teil der Belegschaft ungeeignete Arbeitsplätze vorfindet. Darüber hinaus liegen Anforderungen Leistungsgewandelter in der Regel außerhalb der Gestaltungsmaßgaben. Für die Integration von Leistungsgewandelten sollten die ergonomischen Gestaltungsmaßgaben daher als zu erweiterndes Mindestmaß verstanden werden.

### 2.2.3.6 Altersgerechte Arbeitsplatzgestaltung

Nach KRÄMER (2002, S.11) ist der Kern altersgerechter Arbeitsgestaltung die Anpassung der Arbeitsanforderungen an die Fähigkeiten Älterer, wohingegen Alternsgerechtigkeit auf die Förderung von Gesundheit, Motivation, Qualifikation abzielt, vgl. auch (EGBERS ET AL. 2010). In diesem Sinne werden also alters-typische Fähigkeiten und Leistungswandlungen berücksichtigt. Die zugehörigen Maßnahmen sind allgemein einsetzbar, wobei jedoch eine Unterforderung Leistungsstärkerer zu vermeiden ist, vgl. (SCHRADER ET AL. 1995, S. 28 f.). Eine Übersicht einer Auswahl von Gestaltungsmöglichkeiten und Maßgaben, relevant für die manuelle Handhabung und Roboterbedienung, findet sich im Anhang 9.2.

Eine fallspezifische Anpassung der Arbeitsumgebung, vgl. (PRASCH 2010, S. 116), setzt voraus, dass ein Mitarbeiter mit bekannten Leistungswandlungen einem Arbeitsplatz zugeordnet ist. Die Arbeitsplatzanpassung („Hard-Adaptation“, (ZÄH & PRASCH 2007)) wird nötig, wenn andere, z.B. organisatorische Maßnahmen („Soft-Adaption“, (ZÄH & PRASCH 2007)), als nicht anwendbar oder nachteilig eingestuft werden. Die nachträgliche Arbeitsplatzanpassung, wie z.B. die Integration von Handhabungshilfsmitteln, ist in der Regel teurer als dessen Berücksichtigung schon im Planungsprozess, vgl. analog (FALCK & ROSENQVIST 2012). Andererseits wird eine leistungs- oder behindertengerechte Gestaltung aller Arbeitsplätze weder wirtschaftlich oder sozialpolitisch als angemessen gesehen (SCHRADER ET AL. 1995, S. 28). Eingedenk, dass Leistungswandlungen nicht fehlerfrei vorherzusehen sind, wird es also auch bei prospektiver, präventiver Planung zu nachträglichen



Anpassungsbedarfen kommen. Eine modulare, standardisierte Gestaltung kann helfen, Aufwendungen zum Umbau gering zu halten, vgl. (KLUGE 2011; ZÄH ET AL. 2005b).

Zu Beispielen konkreter Maßnahmen können alle Mittel der zuvor beschriebenen ergonomischen und altersgerechten Arbeitsplatzgestaltung gezählt werden, ebenso wie Hilfsmittel für Menschen mit Behinderung nach ISO 9999 (2011) oder SCHMALLENBERG (1994). Zu Letzteren zählen auch technische Arbeitshilfen, z.B. Sitz-Steh-, Positionier-, Halte-, Trage und Hebe-Hilfen, Mittel zur Reichweitenvergrößerung oder auch Prothesen. Beim Ausfall einzelner Fähigkeiten kann eine Anpassung der Arbeitsumgebung den Ausgleich über andere Fähigkeiten ermöglichen, z.B. können Informationen vom optischen Kanal auf akustische oder haptische Kanäle umgestellt werden, von Rechthand- auf Linkhandbedienung oder von Hand- auf Fußbetätigung (SCHMALLENBERG 1994). Es ist anzumerken, dass bei Behinderungen, anders als bei Leistungswandlungen, Träger der gesetzlichen Renten- oder Unfallversicherung, Arbeitsagenturen oder Integrationsämter Mittel für die Einrichtung derartiger technischer Arbeitshilfen zur Verfügung stellen, vgl. (SCHLICK ET AL. 2010, S. 156; SCHMALLENBERG 1994, S. 64).

### 2.2.3.7 Mechanisierung, Hilfsmiteinsatz

Der Einsatz von Hilfsmitteln und die Mechanisierung von (Teil-)Tätigkeiten dienen zur Belastungsreduktion und wirken somit in allen drei Ebenen (Prävention, Integration, Reintegration). Ihre Notwendigkeit wird in diesen Ebenen jeweils durch Belastungs-, Engpass- oder Fähigkeitsanalysen angezeigt. Eine Umsetzung erfolgt im Zuge ergonomischer, wie auch alters-, fähigkeitsgerechter oder fallspezifischer Arbeitsplatzgestaltung (siehe dort). Typische Vorrichtungen sind Hebehilfen (PRASCH 2010; HESSE 2010), handbetätigte Kniehebelpressen oder an Federzügen montierte elektrische Schrauber.

### 2.2.3.8 Automatisierung

Automatische Vorrichtungen dienen, im Sinne mitarbeiterzentrierter Vorgehen, zur Reduktion der Gesamtbelastung und Elimination von Teilbelastungen am Arbeitsplatz durch Übertragung menschlicher Arbeit auf Maschinen. Deren Einsatz kann grundsätzlich, analog wie beim Hilfsmiteinsatz zur Prävention, Integration oder Reintegration geplant und im Zuge ergonomischer, alters-, fähigkeitsgerechter oder fallspezifischer Arbeitsplatzgestaltung umgesetzt

werden. In klassischen Planungsvorgehen allerdings, wiewohl anzunehmender Weise auch oft in der Praxis, wird die Anwendung automatischer Vorrichtungen vornehmlich aus wirtschaftlichen Gründen (Kosten, Volumen, Qualität) und noch vor Ansehen von Arbeitsbelastungen oder Mitarbeiterfähigkeiten erwogen, vgl. z.B. (BULLINGER 1986). Dies kann dann im Weiteren zu einem zum hiesigen Ziel umgekehrten Betrachtungsfokus führen, in dem dann Arbeitsinhalte und Mitarbeitereinsatz passend zu den Anforderungen der Automation geplant werden. Es gehört zur den Ironien der Automation (BAINBRIDGE 1983), dass diese vom Menschen einerseits eine, im Vergleich zur automatisierten Aufgabe, höhere fachliche Qualifikation abverlangen (u.a. Einrichten, Störungsbeseitigung, Programmieren), andererseits die dann noch verbleibenden, nicht automatisierten Aufgaben für den Menschen noch fordernder oder monotoner werden können. Letzteres zeigen auch praxisbezogene Studien (NEUMANN ET AL. 2002; ENRÍQUEZ-DÍAZ ET AL. 2012). In diesem Beispiel wird nach Einführung einer Teilautomatisierung bzw. einer Chaku-Chaku-Montagelinie eine Produktivitätssteigerung beobachtet. Zwar wird die Belastung systemweit reduziert. Die Belastung bzw. Intensität durch die für die Mitarbeiter verbleibenden Tätigkeiten aber steigt (mithin die Wahrscheinlichkeit von Leistungswandlungen) (NEUMANN ET AL. 2002). Die psychosozialen Arbeitsbedingungen werden als schlechter empfunden (ENRÍQUEZ-DÍAZ ET AL. 2012). Um dies zu vermeiden, wird empfohlen bei der Einführung von Teilautomation deren Auswirkungen auf die verbleibenden Tätigkeiten vor Umsetzung zu prüfen (NEUMANN ET AL. 2002), um dann eventuell gestalterische oder organisatorische Anpassungen rechtzeitig vorzunehmen. Der Gedanke ist auch auf die automatisierte Aufgabe zu erweitern, da Fähigkeiten und Fertigkeiten verkümmern, wenn diese nicht mehr gefordert werden. Auf Ebene der Arbeitsinhalte bietet sich z.B. die Möglichkeit, dass der Mitarbeiter ggf. durch Weiterqualifizierung seinen Aufgabenbereich im Sinne der Persönlichkeitsförderung (HACKER 2000) auf Bedienung, Überwachung, Einrichtung oder Störungsbeseitigung der automatischen Vorrichtung erweitert. Arbeitsorganisatorisch wird empfohlen, Mikropausen oder Job-Rotation zu ermöglichen um z.B. die Kommunikation zu erleichtern (ENRÍQUEZ-DÍAZ ET AL. 2012), bzw. generell das Arbeits-Zeit-Regime nicht strikt von der Maschine vorgeben zu lassen vgl. auch (BUCK 2002). Darüber hinaus sind die allgemeinen Grundsätze ergonomischer, alterns-, fähigkeitsgerechter bzw. mitarbeitergerechter Arbeits- oder Systemgestaltung anzuwenden, vgl. auch (PRASCH 2006; BRAUN 2009).

Zu den typischen Beispielen der Automatisierung von Handhabungsprozessen gehören z.B. Stetigfördersysteme wie Kettenförderer, Förderbänder (NEUMANN ET AL. 2002) oder Handhabungsautomaten wie Industrieroboter z.B. zum Palettieren (ZÄH ET AL. 2005a). Auch andere Montageprozesse, wie Fügen und Kontrollieren, lassen sich durch automatische Stationen in verschiedene Layouts und Abläufe in „hybride Montagesysteme“ integrieren (LOTTER & WIENDAHL 2006). Zur Abgrenzung ist anzumerken, dass bei den bisher beschriebenen Maßnahmen eine strikte, physische Trennung von Mensch und Roboter herrscht und eine getrennte Betrachtung von manuellem Arbeitsplatz und automatischer Arbeitsstation möglich ist - hierin unterscheiden sie sich also von der Mensch-Roboter-Kooperation. Weiterhin sind auch Justage- und Sonderoperationen (teil-)automatisierbar, die gezielt zur Belastungsreduktion einsetzbar sind. Hierzu zählen z.B. die automatische Höheneinstellung (REINHART ET AL. 2010c) zur Verbesserung der Körperhaltungen oder die automatische Aufbereitung und Bereitstellung relevanter Montageanweisungen (ZÄH ET AL. 2007 STORK ET AL. 2008) zur Unterstützung der Gedächtnisleistung.

### 2.2.4 Reintegration

Das betriebliche Wiedereingliederungsmanagement beschäftigt sich auf Arbeitgeberseite mit der Organisierung der Rückkehr von Mitarbeitern in das Arbeitsleben. Zielgruppe sind Mitarbeiter, die vornehmlich aus gesundheitlichen Gründen längere Zeit oder wiederholt arbeitsunfähig waren, vgl. (SGB IX, §82 Abs.2), oder die Leistungswandlungen erfahren haben, so dass sie nicht mehr voll einsatzfähig sind, vgl. (SCHMAL ET AL. 2001). Die stufenweise Wiedereingliederung strebt dabei eine schrittweise Wiederheranführung an eine volle Arbeitsbelastung an. Es sind Maßnahmen an die Kompetenzen der Mitarbeiter, der Arbeitsorganisation und der technischen Arbeitsplatzgestaltung unterscheidbar, die wiederum zum Mitarbeiterereinsatz in eine gleichartige oder in eine andersartige Tätigkeit führen (ebenda).

Der Mitarbeiter-Wiedereinsatz in einer gleichartigen Tätigkeit, stärker bevorzugt am gleichen Arbeitsplatz, ist zwar akzeptanzförderlich. Eine starre Begrenzung auf diese Bereiche ist allerdings nicht sinnvoll, denn ein Wiedereinsatz im angestammten Bereich gelingt nur in ca. 30-50% der Fälle (ebenda). Um einen Einsatz in bevorzugt gleichartiger Tätigkeit zu ermöglichen werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

**Arbeitsplatzanpassung:** Die Umgestaltung des Arbeitsplatzes z.B. durch Integration von Steh-, Gehhilfen; Maschinenumrüstung, Umfeldanpassungen. Diese Anpassungen können ergonomisch oder auch auf Leistungswandlungen oder Behinderungen fallspezifisch zugeschnitten sein (SCHMAL ET AL. 2001).

**Arbeitsaufteilung, Arbeitsgruppe:** Durch selbstständige Organisation und Aufgabenteilung innerhalb eines z.B. alters- oder fähigkeitsgemischten Teams ist eine gegenseitige Unterstützung, Know-How-Transfer und der Ausgleich von individuellen Schwächen oder Leistungswandlungen möglich, vgl. (MORSCHHÄUSER ET AL. 2005, S.79; BUCK & SCHLETZ 2004). Allerdings können dadurch für die jüngeren bzw. noch gesunden Mitarbeiter im Team deutlich schlechtere Arbeitsbedingungen entstehen, so dass auf einen Belastungsausgleich oder auf eine Belastungsbegrenzung zu achten ist (BUCK ET AL. 2002, S.73).

**Reduktion von Taktzeit, Zielvorgaben; Einrichtung eines Schon-, Leicht-arbeitsplatzes:** Die Verringerung der Arbeitsinhalte bzw. Leistungsanforderungen zur Anpassung an das Leistungsvermögen des Mitarbeiters. Die Reduktion kann sich z.B. auf die Menge und Ausführungsgeschwindigkeit der Tätigkeit beziehen, vgl. (KAWAKAMI ET AL. 2000). Dies kann teils organisatorisch durch Reduzierung von Sollvorgaben realisiert werden, teils sind durch Verlangsamung von Taktzeit oder Fließgeschwindigkeit weitere Arbeitsplätze, Abläufe und technische Vorrichtungen betroffen und ggf. anzupassen. Die Reduktion kann weiterhin durch Entfernung anspruchsvoller und Zusammenfassung einfacher Teiltätigkeiten in Schonarbeitsplätze erreicht werden (MÜLLER ET AL. 2007). Dabei ist eine Stigmatisierung der dort eingesetzten Mitarbeiter möglichst zu vermeiden, z.B. indem die Arbeitsplätze auch von nicht leistungsgewandelten verwendet werden, vgl. (PRASCH 2010, S.89).

**Arbeitszeitreduktion und -flexibilisierung:** Hierunter fallen Teilzeitarbeit, Verkürzung von Wochenarbeitszeit, Begrenzung der Schichtarbeitsdauern, Reduzierung oder Elimination von Nachtschichten, Vorwärtsrotation der Schichten, Verlängerung schichtfreier Intervalle, Einführung vom Fünf-Schichtmodell, Streichung von (unregelmäßigen, geplanten) Einbringschichten, Ermöglichung von Mikropausen, (MORSCHHÄUSER ET AL. 2005; MEYER & NYHUIS 2012; CZESKLEBA ET AL. 2004; BMAS 2012).

**Rehabilitation:** Die berufliche und medizinische Rehabilitation widmet sich der (Wieder-)Herstellung von zur sozialen Teilhabe und zur Arbeitsausführung

befähigenden Qualifikationen und (Leistungs-)Fähigkeiten (BEIDERWIEDEN 2001; MARGOSHES 1998; SCHRADER ET AL. 1995). Sie kann z.B. durch den Betriebsarzt veranlasst und begleitet werden (LEITNER ET AL. 2009).

Ist ein Einsatz im angestammten Bereich bzw. in gleichartiger Tätigkeit nicht möglich, so kann nach einem leistungsadäquaten Arbeitsplatz gesucht (z.B. per Profilvergleich) bzw. ein solcher geschaffen werden. Die Eingliederung in andere Bereiche kann allerdings zu Akzeptanzproblemen führen und ist mit nicht unerheblichem organisatorischen Aufwand verbunden (Arbeitsplatzsuche; Abstimmung mit Mitarbeiter, Vorgesetzten, Betriebsrat, Betriebsarzt, Personalabteilung,...) (SCHMAL ET AL. 2001). Maßnahmen, die einen Einsatz bevorzugt in andersartigen Tätigkeiten ermöglichen sind folgende:

**Neuschaffung Arbeitsplatz:** Der Aufbau oder die Integration von Arbeitsplätzen und -inhalten, die eine verringerte bzw. angepasste Anforderungsstruktur aufweisen. Beispielsweise können Reinigungsprozesse, die zuvor durch Fremdfirmen durchgeführt wurden, integriert (ADENAUER 2004, S.14) oder Möglichkeiten zur Heimarbeit eingerichtet werden (MÜLLER ET AL. 2007).

**Kündigung, Verrentung:** Kann kein geeigneter Arbeitsplatz bereitgestellt werden sind Kündigung oder (Früh-)Verrentung verbleibende Lösungen. Auch hiernach ist eine Weiterbeschäftigung, z.B. als Berater grundsätzlich möglich (BUCK 2007, S.22).

**Versetzung:** Der Wechsel in einen geeigneten Arbeitsplatz in einer anderen Arbeitsgruppe, Abteilung oder an anderen Standorten

**Qualifikation:** Die Erweiterung der Fertigkeiten und des Eignungsprofils des Mitarbeiters, um Arbeiten ausführen zu können, die andere bzw. höhere Qualifikationsanforderungen und zugleich geringere physischen Anforderungen stellen, vgl. (KROHN & HAHN 2000).

### 2.2.5 Vorgehen zur Maßnahmeneinführung

Im Allgemeinen wird für eine Einführung von Maßnahmen zur Berücksichtigung von Belegschaftsanforderungen ein strukturiertes, stufenweises und auf Nachhaltigkeit orientiertes Vorgehen als vorteilhaft angesehen, vgl. (SPORKET 2009, S.296) und (MATTHÄI & MORSCHHÄUSER 2009). Ein derartiges Vorgehen stellt Abbildung 6 dar. In den einleitend zu schaffenden Projektstrukturen nimmt eine Steuergruppe eine zentrale bzw. übergeordnete Stellung ein, vgl. (CZESKLEBA ET AL. 2004; MATTHÄI & MORSCHHÄUSER 2009; ULLICH

& WÜLSER 2010, S.125). Eine hochrangige und fachübergreifende Besetzung soll dabei die Wirksamkeit erhöhen und Einführungshindernisse (WHYSALL ET AL. 2006) reduzieren. Die genannten Zusammensetzungsbeispiele werden in Tabelle 2 nach Verantwortungsbereichen zusammengefasst dargestellt. Die Größe und Zusammensetzung der jeweiligen Gruppe sowie Sitzungsintervalle sind dabei den organisatorischen Rahmenbedingungen des Unternehmens anzupassen - so werden gerade in kleineren Unternehmen mehrere Rollen entfallen oder in Personalunion weniger Beteiligter durchzuführen sein. Fehlende Fach- oder Methodenkenntnisse können durch Weiterbildungsangebote oder durch Einbinden externer Berater wie z.B. Demographie-Lotsen (BENDIG ET AL. 2010) kompensiert werden.

1. Einleitung des Demographieprojekts	Unternehmensbeschluss; Aufbau von Projektstrukturen; Kommunikation und Einbindung; interne/externe Unterstützung
2. Analyse der Ausgangssituation	Bestandsaufnahme; Analyse von Arbeitsbedingungen und Alters-/Beschäftigungsstruktur; Identifizierung der Handlungsbedarfe
3. Festlegung der Handlungsfelder	Auswahl der Handlungsfelder anhand der Analysebefunde
4. Entwicklung von Maßnahmen	Konzipierung und Entwicklung passförmer Maßnahmen
5. Erprobung von Maßnahmen	Festlegung von Pilotbereichen/Zielgruppen, Vorgehensweisen; Erprobung der Maßnahmen
6. Bewertung der Maßnahmen	Erfolgskontrolle: Wirkungen und Wirksamkeiten der Maßnahmen
7. Verstehtigung, Implementierung	Überführung der Maßnahmen in den Regelbetrieb

*Abbildung 6 Mehrstufiges Vorgehen zur Maßnahmeneinführung nach MATTHÄI & MORSCHHÄUSER (2009)*

*Tabelle 2: Zusammensetzung der Steuergruppe*

Bereich	Beteiligte
Gesamtverantwortung	Vertreter der Geschäftsführung
Personalwesen und Mitarbeitervertretung	Fachkräfte der Personalabteilung, Personalentwicklung; Vertreter des Betriebsrats, Schwerbehindertenvertreter
Arbeitsorganisation und Arbeitsplatzgestaltung	Direkte Vorgesetzte, Meister, Gruppenleiter; Montagesystemplaner, Arbeitsplaner, Betriebsmittelbau
Externe Moderatoren	Vermittler, Mediatoren
Sonstige	Partner der öffentlichen sozialen Sicherungssysteme

Nach einer Analysephase werden Handlungsfelder identifiziert und Schwerpunkte z.B. anhand des Leidensdrucks, der Wirksamkeit oder der Umsetzungsfähigkeit möglicher Maßnahmen gewählt. Anschließend erfolgt die Konzipierung neuer oder die Adaption bekannter Maßnahmen sowie deren Anwendung und Erprobung in einem begrenzten (Pilot-)Bereich. Ein bloßes Kopieren von Maßnahmen ohne Anpassung an die unternehmenseigenen Gegebenheiten ist häufig wenig wirksam (Brandenburg & Nieder 2009). Ferner wird die frühe Information bzw. die aktive Mitwirkung der von den Maßnahmen betroffenen Mitarbeiter als wichtig erachtet, um Widerstände oder gar Sabotage der Einführung zu verhindern, vgl. (BRANDENBURG & NIEDER 2009; ZWACK & SCHWEITZER 2011). Einige Maßnahmen, wie z.B. der Einsatz neuer Anlagen, sind mit der Umsetzung bereits verstetigt. Andere Maßnahmen hingegen erfordern regelmäßige Kontrolle und Auffrischung, um die Wirksamkeit auf Dauer zu erhalten, vgl. (ULICH & WÜLSER 2010, S.189; LENHARDT ET AL. 1997). Dies gilt z.B. für Verhaltensmaßgaben für Mitarbeiter und ist besonders relevant für den Gesundheits- und Arbeitsschutz, vgl. (MUSAHL 2001). Die Maßnahmenwirkung kann teilweise durch Kennziffern erfasst werden (MATTHÄI & MORSCHHÄUSER 2009, S.56). Unter Berücksichtigung der aus der Erprobung gewonnenen Erfahrungen erfolgt abschließend eine Ausweitung der Maßnahmen auf weitere Bereiche. Beispielhafte Projekte stellen FRIEBEL & BOYSEN (2010) vor.

### 2.3 Zwischenfazit

In diesem Abschnitt werden bekannte betriebliche Maßnahmen zur Berücksichtigung von Belegschaftsanforderungen und Leistungswandlungen dargelegt. Die Maßnahmen werden in einer Übersicht zusammengestellt, nachfolgend einzeln erläutert und mit Beispielen ergänzt. Die Maßnahmen können präventiv, integrativ und reintegrativ wirken und an Mitarbeiter, Arbeitsinhalt und Arbeitsstruktur oder Arbeitsplatzgestaltung gerichtet sein. Es wird ein Einblick gegeben sowohl in die klassische Montagesystemplanung, wie auch in Ansätze zur prospektiven, kompensativen Planung. Der Begriff der Leistungswandlung wird definiert und eine Klassifikation von Leistungswandlungen für Handhabungsprozesse vorgenommen.

Es lässt sich feststellen, dass ein breites Spektrum an Maßnahmen zur betrieblichen Berücksichtigung von Leistungswandlungen bekannt und erprobt ist. Ein Robotereinsatz findet bisher bereits im Maßnahmenbereich der Automation statt. Dabei wird aber stets von einer Trennung von Mensch und Roboter ausgegangen.

**Defizit 1:** Es hat bisher noch keine umfassende allgemeine und auch noch keine spezifisch auf die Handhabung bezogene Betrachtung der Möglichkeiten einer Zusammenarbeit von Mensch und Roboter für die Berücksichtigung leistungsgewandelter Mitarbeiter stattgefunden.

**Defizit 2:** Die vorgestellten Vorgehen der Montagesystemplanung zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen gehen nicht auf das Thema Roboterassistenz ein.



### 3 Mensch-Roboter-Kooperation und Roboterassistenz

In diesem Kapitel werden zunächst Grundlagen und Definitionen zum Thema Mensch-Roboter-Kooperation und Assistenzroboter geliefert. Anschließend wird der Stand der Technik und Erkenntnisse der Mensch-Roboter-Kooperation im Allgemeinen in einzelne Schlüsselemente gegliedert und dargelegt. Danach werden spezifisch Ansätze der Mensch-Roboter-Kooperation zur Unterstützung bei Handhabungsprozessen dargelegt. Abschließend erfolgt eine Bewertung der jeweiligen Technologiereife.

#### 3.1 Definitionen und Grundlagen

##### 3.1.1 Montage, Handhabung

Der Begriff der Montage umfasst alle Vorgänge zum Zusammenbau geometrisch bestimmter Körper, (LOTTER & WIENDAHL 2006, S.2; VDI 2860). Die maßgeblichen Funktionen bestehen aus Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen. Handhaben wiederum ist nach VDI 2860 eine von drei Funktionen zum Bewirken des Materialflusses (neben Fördern und Lagern, VDI 2411) und lässt sich in Teilfunktionen wie z.B. ‚Bewegen‘ und darunter in Elementarfunktionen untergliedern wie z.B. ‚Positionieren‘ und ‚Orientieren‘. Eine detaillierte Übersicht der Funktionen gibt Abbildung 50 im Anhang 9.3.

##### 3.1.2 Industrie-, Service-, Assistenzroboter

**Industrieroboter** werden nach DIN EN ISO 8373 als „automatisch gesteuerte, reprogrammierbare, universelle Manipulatoren mit drei oder mehr Achsen für industrielle Automationsanwendungen.“ definiert und abgegrenzt. Die Leistungskenngrößen und -prüfung standardisiert die EN ISO 9283.

**Serviceroboter** sind nach einem Entwurf der International Federation of Robotics als „Roboter die teilautonom oder selbstständig nützliche Dienste für das Wohlbefinden (Anm.: Schutz, Unterhaltung, Versorgung,...) von Menschen oder für die Betriebsfähigkeit (Anm.: Wartung, Reparatur, Reinigung) von Geräten erfüllen, aber nicht an Produktionsprozessen teilnehmen“.

Angelehnt an diese Definitionen bietet sich zur Abgrenzung von **Assistenzrobotern** in der Produktion folgende Formulierung zur Definition an: „Roboter, die Menschen in wertschöpfenden Prozessketten autonom oder teilautonom unterstützen.“ (REINHART & SPILLNER 2010). Assistenzroboter für

Leistungsgewandelte haben das Ziel, durch deren Assistenzfunktionen die Ausführbarkeit oder Beeinträchtigungsfreiheit einer Aufgabe für den Leistungsgewandelten wieder herzustellen.

Eine **Assistenzfunktion** sei in diesem Kontext angelehnt an die Definition von HELMS (2006, S.23), ein vom Roboter autonom oder teilautonom ausgeführter Teilprozess der Montage oder Fertigung, der den Menschen in dessen Aufgaben unterstützt'. Eine Assistenzfunktion kann bzgl. Leistungswandlungen präventiv, integrativ und reintegrativ wirken.

#### 3.1.3 Mensch-Roboter-Kooperation

In der Literatur finden mehrere Begrifflichkeiten Verwendung: Mensch-Roboter-Kooperation (THIEMERMANN 2005), -Koexistenz (HENRICH ET AL. 2008), -Kollaboration (DIN EN ISO 10218-1) oder auch -Interaktion (BORTOT ET AL. 2012). Im Folgenden werden eine Diskussion und Festlegung zur Verwendung innerhalb dieser Arbeit vorgenommen.

**Interaktion** beschreibt das aufeinander gerichtete Wirken und Handeln zwischen mehreren Subjekten oder Objekten, vgl. (DUDEN 2012). Entsprechend umfassend wird hier die Mensch-Roboter-Interaktion als ‚alles Wirken und Handeln zwischen Mensch und Roboter‘ verstanden, was Kooperation, Kollaboration und Koexistenz miteinschließt.

**Kooperation** beschreibt das gemeinsame Wirken oder auch Vorgehen mehrerer Beteiligter. In Bezug auf den produktionstechnischen Einsatz wird hier unter der Mensch-Roboter-Kooperation eine ‚Zusammenarbeit von Mensch und Roboter zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe‘ verstanden. Dabei ist unerheblich, wie diese Arbeit organisiert, aufgeteilt oder durchgeführt wird.

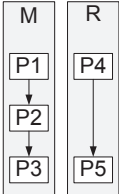
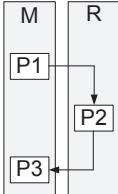
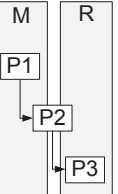
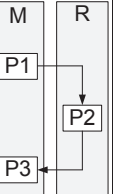
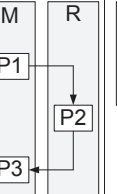
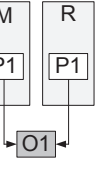
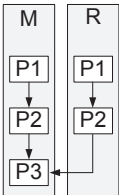
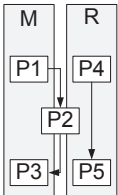
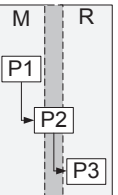
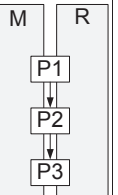
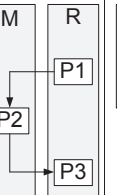
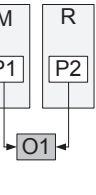
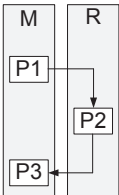
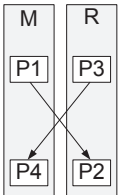
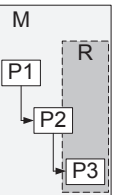
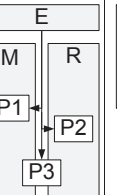
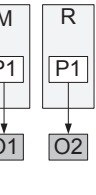
**Kollaboration** ist unter der Bedeutung Zusammenarbeit synonym zur Kooperation. In Abgrenzung dazu wird hierunter ‚eine Zusammenarbeit von Mensch und Roboter zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe ohne trennende Schutzeinrichtung bzw. im gleichen Arbeitsraum‘ verstanden, vgl. (DIN EN ISO 10218-1). Hierunter zählt insbesondere auch der Betrieb mit direktem Kontakt zwischen Mensch und Roboter, der unter anderem auch als ‚direkte Mensch-Roboter-Kooperation‘ oder ‚Direct Physical Human Robot Interaction‘ bezeichnet wird.

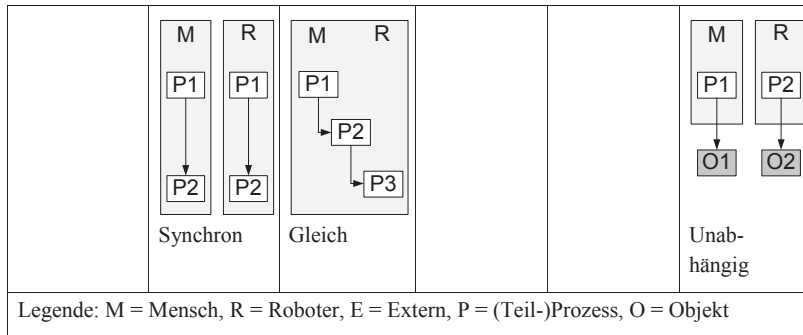
**Koexistenz** umfasst den Zustand des gleichzeitigen (nebeneinander) Bestehens mehrerer Beteiligter. Im Kontext des produktionstechnischen Einsatzes und in Abgrenzung der vorgenannten Einteilungen wird unter Mensch-Roboter-

Koexistenz „die sichere, gleichzeitige und voneinander unabhängige Arbeitsausführung von Mensch und Roboter im gleichen Arbeitsraum“ verstanden.

Die Mensch-Roboter-Kooperation lässt sich, in Anlehnung und Erweiterung bestehender Definitionen (YANCO & DRURY 2002; YANCO & DRURY 2004; THIEMERMANN 2005; HELMS 2006) in unterschiedliche, allgemeine Betrachtungsebenen klassifizieren, z.B. nach der Abhängigkeit der mensch- oder maschinengeführten Prozesse, zeitlicher Abfolge, räumlicher Aufteilung, Prozessausführung, Prozessführung oder nach dem handzuhabenden oder zu bearbeitenden Objekt, vgl. Tabelle 3.

Tabelle 3: Klassifikation der Mensch-Roboter-Kooperation

Abhängigkeit	Zeit	Arbeitsraum	Ausführung	Hierarchie	Objekt
 <p>Unabhängig</p>	 <p>Sequentiell</p>	 <p>Getrennt</p>	 <p>Separat</p>	 <p>Mensch</p>	 <p>Arbeitsteilig</p>
 <p>Beeinflussend</p>	 <p>Intermittierend</p>	 <p>Überlappend</p>	 <p>Gemeinsam</p>	 <p>Roboter</p>	 <p>Aufgabenteilig</p>
 <p>Abhängig</p>	 <p>Simultan</p>	 <p>Einschließend</p>		 <p>Extern</p>	 <p>Kopierend</p>



Zur Detaillierung lässt sich die gemeinsame Ausführung nach dem Grad der Beteiligung bzw. der Rolle der Beteiligten unterscheiden, siehe Tabelle 4, vgl. (YANCO & DRURY 2002; YANCO & DRURY 2004; HELMS 2006).

Tabelle 4: Taxonomie gemeinsamer Ausführung

Gemeinsame Ausführung	Varianten				
Dauer und Zeit der Beteiligung	Singulär	Intermittierend	Konstant	Zeitgleich	Vor-, Nachgelagert
Modalität der Beteiligung	Aktorisch, Mechanisch, Körperlich	Sensorisch	Informativ, Interpretativ, Kognitiv	-	-
Rolle eines Beteiligten	Beobachter	Auslöser, Entscheider	Bediener von Teilfunktionen (shared control)	Steuerer, Regler	Rüstender, Programmierer, Vorarbeiter

### 3.1.4 Normen und Regelungen

Für Herstellung und Betrieb von Anlagen zur Mensch-Roboter-Kooperation sind gesetzliche und normative Regelungen einzuhalten. Der interessierte Leser findet in Tabelle 34 im Anhang 9.4 eine Übersicht von für den Robotereinsatz in Personennähe relevanten Gesetzen, Richtlinien, Verordnungen, Normen und Empfehlungen. Im Weiteren wird auf diese nur dort wo notwendig näher eingegangen.

### 3.2 Technische und organisatorische Schlüsselemente

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über den Stand der Roboterassistenz und gliedert diesen dabei nach relevanten Bereichen. Die Struktur der Darlegung folgt (REINHART & SPILLNER 2010) und erweitert diese.

#### 3.2.1 Schlüsselemente

Die Anforderungen an den Einsatz einer Roboterassistenz erwachsen nicht nur aus der Interaktion zwischen Roboter und Mitarbeiter sondern ergeben sich auch aus deren Einbettung in ein Gesamtsystem und den damit verbundenen Schnittstellen. In Abbildung 7 wird ein solches Gesamtsystem plakativ dargestellt, woraus sich sieben Schlüsselemente für eine wirtschaftliche Einsatzfähigkeit von Roboterassistenzsystemen ableiten. Im Folgenden werden Bedeutung und Stand dieser Schlüsselemente vorgestellt.

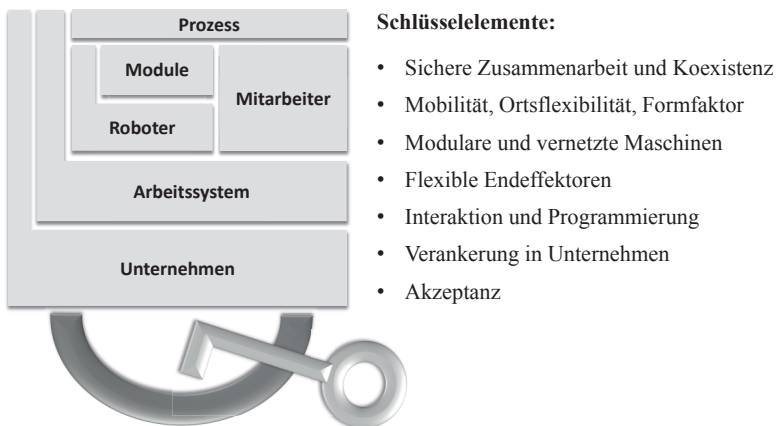


Abbildung 7: Schlüsselemente für einen wirtschaftlichen Einsatz von Assistenzrobotern

#### 3.2.2 Sichere Zusammenarbeit und Koexistenz

Sicherheit und Schutz vor Verletzungen des betroffenen Personals, aber auch von Unbeteiligten, sind fundamentale Voraussetzungen für den Einsatz von roboterbasierten Assistenzsystemen. Arbeiten Mensch und Roboter in zeitlicher und räumlicher Nähe zueinander, kann ein physischer Kontakt zwischen diesen auftreten. Der Kontakt kann für Interaktion oder Kollaboration beabsichtigt und notwendig sein oder einen Unfall darstellen.

Vom Robotersystem können dabei unter anderen folgende Gefährdungen ausgehen, siehe Tabelle 5:

*Tabelle 5: Gefährdungen durch Roboter*

Gefährdung	Beispiel oder Ursache
Entladung elektrischer Spannung	Stromschlag, Motorstrom, Fehlstrom
Entladung mechanischer Spannung	Druckluft, Hydraulik, Federpakete, Vorspannung elastischer Kinematik, Spannungen nach Kollisionen der Kinematik mit der Umgebung
Thermische Energie	Motorabwärme
Kinetische Energie	Stoß, Stich, Schlag durch Kinematik, Werkzeug, gehandhabte Objekte; Klemmen, Scheren, Quetschen z.B. von Gliedmaßen durch Achsen, Kinematik, Werkzeug, gehandhabte Objekte und der Umgebung
Beeinflussung der Umgebung	Umstoßen von Stapeln, Splitterwirkung zerschlagener Objekte
Bearbeitungs- oder Handhabungsprozesse	Laserlicht, Funkenflug, Schmelze beim Schweißen; Klemmen zwischen Greifbacken

Die Anforderungen für den kollaborativen Betrieb von Robotersystemen sind normativ in der DIN EN ISO 10218 festgelegt, die sich in Teil 1 mit der sicheren Gestaltung und in Teil 2 mit der Integration befasst.

Es lassen sich grundsätzlich zwei Ansätze formulieren um die Sicherheit des Menschen in der Nähe einer bewegten Kinematik zu gewährleisten. Zum einen, das Auftreten von Kollisionen zwischen Mensch und Roboter zu vermeiden (Kollisionsvermeidung), zum anderen die Folgen einer Kollision für den Menschen auf ein zulässiges Maß zu reduzieren (Schadensbegrenzung). Beide werden nachfolgend beschrieben.

#### 3.2.2.1 Schadensbegrenzung

Kern dieses Ansatzes ist es, im Falle einer Kollision potenzielle Verletzungen auf ein akzeptables bzw. minimales Niveau zu reduzieren.

Nach der DIN EN ISO 10218-1 ist eine Begrenzung der Operationsparameter (250 mm/s Bahngeschwindigkeit, 150 N Kontaktkraft, 80 W Leistung) Voraus-

setzung für den kollaborativen Betrieb. Untersuchungen zum Verletzungsrisiko zeigen allerdings, dass unter günstigen Kollisionsbedingungen (z.B. stumpfer Stoß, geringe Roboter­masse) auch höhere Werte nur geringe Schäd­fol­gen aufweisen, gleichzeitig aber ungünstige Bedingungen (z.B. scharfe Kanten, Einklemmen) auch bei geringeren Leistungsdaten schwerwiegende Verletzungen erzeugen, vgl. (OBERER ET AL. 2006; HADDADIN ET AL. 2007; HADDADIN & ALBU-SCHÄFFER 2009). Nach DIN EN ISO 10218-2 sind daher die Grenzparameter entsprechend einer Gefährdungsanalyse (DIN EN ISO 12100) ggf. anzupassen. Dabei dürften künftig biomechanische Grenzwerte anzuwenden sein, die nach Kontakt­fall (z.B. Klemmkraft, Flächen­pres­sung, Kompressionskonstante, Kollisionsfläche) und Körperbereich (z.B. Hals, Kopf, Torso) unterscheiden, vgl. (HUELKE 2011; BGIA 2009; ISO/TS 15066).

Nach DIN EN ISO 12100 sind Verletzungsrisiken mit hierarchischem Vorzug durch folgende Maßnahmen zu mindern:

1. sichere Gestaltung,
2. technische Schutzmaßnahmen,
3. Betriebsanweisungen.

Für den Kollisionsfall lassen sich drei gestalterische Maßnahmen unterscheiden, vgl. Abbildung 8:

Leistungsbegrenzung	Nachgiebigkeit	Dämpfung an Kontaktstellen
		

Abbildung 8 Verletzungsmindernde Gestaltung für Industrieroboter im kollaborierenden Betrieb

Die Ansätze dieser Maßnahmen werden mit Beispielen nachfolgend stichpunktartig aufgeführt.

#### **Leistungsbegrenzung:**

- Leichtbau: z.B. Parallelkinematik mit geringen bewegten Massen (Brogård. T. 2009), ‚BioRob‘ der Fa. Tetra GmbH
- Baulich reduzierte Antriebsleistung: z.B. ‚UR-5‘ der Fa. Universal Robots A/S, ‚Katana‘ der Fa. Neuronics AG;
- Überwacht reduzierte Leistung: sichere Steuerungen nach DIN EN ISO 13849, Steuerungen mit Geschwindigkeitsüberwachung wie z.B. ‚safety-controller‘ der Fa. REIS GmbH & Co. KG Maschinenfabrik und Elan Schaltelemente GmbH, vgl. (SOM 2005), ‚dual check safety‘ der Fa. FANUC Robotics Deutschland GmbH, ‚SafeMove‘ der Fa. ABB Asea Brown Boveri Ltd., ‚safe robot technology‘ der Fa. KUKA Roboter GmbH
- Stopp: Schaltleisten auf der Kinematik lösen einen Stopp des Roboters aus, z.B. KR5-SI der Fa. MRK-Systeme GmbH. Dies erfordert in der Regel weitere Maßnahmen.

#### **Nachgiebigkeit:**

- Elastische Antriebe: z.B. pneumatische McKibben Aktuatoren, ‚Leichtbauroboter‘ FerRobotics Compliant Robot Technology GmbH, (RADOJICIC ET AL. 2009)
- Elastische Vermittler: z.B. gefederte Seilzüge ‚BioRob‘ Fa. Tetra GmbH
- Geregelte Nachgiebigkeit, z.B. „trajectory scaling“ (HADDADIN & ALBU-SCHÄFFER 2009), „soft robotics“ (ALBU-SCHÄFFER 2011); es ist anzumerken, dass diese bisher nicht sicher (gemäß ISO 13849) umgesetzt wurden.
- Überlastsicherung, Sollbruchstellen: z.B. selbstlösender Flansch des ‚KR5-SI‘ der Fa. MRK-Systeme GmbH

#### **Dämpfung an Kontaktstellen:**

- Baulich reduzierte Quetschgefahr an den Achsen: z.B. ‚Leichtbauroboter‘ der Fa. KUKA Roboter GmbH
- Abdeckung spitzer, scharfer oder harter Oberflächen: z.B. elastische Hülle des ‚KR5-SI‘ der Fa. MRK-Systeme GmbH, siehe auch (HEILIGENSETZER 2005)



Robotersysteme, die durch ihre Gestaltung ein Verletzungsrisiko ohne weitere Maßnahmen ausschließen werden im Weiteren als ‚inhärent sichere‘ Systeme bezeichnet.

Der Nachteil der meisten der vorgenannten Systeme liegt in der begrenzten Traglast von ca. 0,5 - 15 kg. Bei höheren Lasten bzw. größerer Leistung oder Robotermaße sind derzeit kollisionsvermeidende Maßnahmen zu ergreifen.

### 3.2.2.2 Kollisionsvermeidung

Im Kern besteht der Ansatz der Kollisionsvermeidung darin, die Roboterbewegung bei Unterschreitung eines Mindestabstands zwischen Mensch und Maschine auf ein unterkritisches Maß zu reduzieren bzw. zu stoppen.

Der Mindestabstand für einen Stopp ergibt sich vereinfacht aus dem Reaktions- und Bremsweg bzw. Nachlauf des Roboters und der in gleicher Zeit vom Menschen zurücklegbaren Strecke, vgl. Abbildung 9. Durch die hohen erreichbaren Geschwindigkeiten von Roboter ( $> 2 \text{ m/s}$ ) und Mensch ( $1,6 - 2 \text{ m/s}$ , vgl. DIN EN ISO 13855) sowie der Nachlaufwege (je nach Typ z.B. 4 - 187 cm, HADDADIN ET AL. 2007) können ohne weitere Einschränkungen erhebliche Mindestabstände erforderlich werden, die einen kollaborierenden Betrieb stark einschränken.

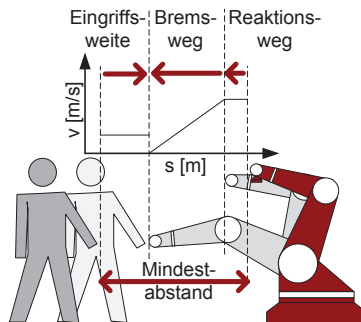


Abbildung 9 Mindestabstand für den kollisionsmeidenden Stopp von Roboterbewegungen

Eine Reduzierung des Mindestabstands ist z.B. möglich durch:

- Einschränkung und Überwachung der Maximalgeschwindigkeit, Bewegungsrichtung, Bewegungsfreiheit durch eine sichere Steuerung entsprechend DIN EN ISO 13849

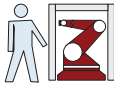




- Reduzierung der Bremswege durch verbesserte Antriebe (DENKINA ET AL. 2008) oder verringerte bewegte Massen
- Reduzierung der Reaktionszeit z.B. durch schnellere Auswertung, Übertragung der Daten sicherheitsgerichteter Sensoren und schnellere Interpolation der Robotersteuerung (IPO-Takt)
- Detaillierte Gefährdungsanalyse entsprechend DIN EN ISO 12100: z.B. lässt sich eine reduzierte Eingriffsweite bzw. Geschwindigkeit des Menschen annehmen, wenn ein Hineinreichen aber kein Betreten des Gefährdungsraumes möglich ist (GÖRNEMANN 2008)
- Präzisere Prädiktion menschlicher Bewegung durch Berücksichtigung der Bewegungsrichtung des Menschen und der maximal zu erwartenden Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen (KRIEGER 2010)
- Zulassung einer potentiellen Kollision bei Einhaltung zulässiger biomechanischer Grenzwerte, so dass es zu keinen (schwerwiegenden) Verletzungen kommen kann, vgl. (BGIA 2009; HADDADIN ET AL. 2007; ISO/TS 15066; DIN EN ISO 10218-1; DIN EN ISO 10218-2)
- Online Gefahrenbewertung und Bestimmung der Form und Ausdehnung des aktuellen Gefährdungsraumes auf Basis von z.B. Abstand, Energie, Trajektorie (HADDADIN ET AL. 2012; LACEVIC & ROCCO 2010a; KULIC & CROFT 2004).

Auf eine (drohende) Unterschreitung des Mindestabstands bzw. Annäherung des Menschen oder anderer Objekte kann das Robotersystem prinzipiell in der folgenden Weise reagieren:

- Stopp des Robotersystems
- Verlangsamen der Roboterbewegungen (HEILIGENSETZER 2003; HENRICH & KUHN 2006; KUHN ET AL. 2006)
- Ausweichen (EBERT 2003; LACEVIC & ROCCO 2010b; LACEVIC & ROCCO 2010c)
- Warnen des Mitarbeiters, z.B. durch akustische und optische Signale

Die Maßnahmen zur Sicherstellung bzw. Überwachung kollisionsfreier (Roboter-)Bewegungen lassen sich in fünf Klassen einteilen, vgl. Tabelle 6. Nachfolgend werden diese Maßnahmen-Klassen einzeln besprochen.

Tabelle 6 Sicherheitsgerichtete Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung

Trennung	Freigabe	Sensorüberwachung		
		Person	Arbeitsbereich	Kinematik
				
	(HEILIGEN-SETZER 2005) (KUHN ET AL. 2006) (BICCHI ET AL. 2008) (REINHART ET AL. 2009b) (MATTHIAS 2009)	(KLAUSMANN 2002) (DRESSEL-HAUS 2006) (MENEVIDIS ET AL. 2006) (ZAEH & ROESEL 2009) (SCHMIDT 2007) (WALLHOFF ET AL. 2010) (MÜHLBAUER ET AL. 2008)	(HELMS & MEYER 2005) (BRECHER 2006) (GÖRNEMANN 2008) (ZAEH & ROESEL 2009) (THOMAS ET AL. 2001a; 2011b) (HOYER ET AL. 2012) (KRIEGER 2010) (WALTER 2011) (FRANK 2011) (WALTER 2009) (KRÜGER ET AL. 2005) (SCHRAFT ET AL. 2005) (MORIOKA & SAKIBARA 2010)	(EBERT & HENRICH 2002) (GECKS & HENRICH 2004) (EBERT 2003) (HEILIGEN-SETZER 2003) (HENRICH & KUHN 2006) (HENRICH ET AL. 2008) (HENRICH & GECKS 2008) (LACEVIC & ROCCO 2010a) (OSTERMANN ET AL. 2011) (WALTER 2011) (LAFRENTZ 2011) (LÜTH 2009) (NOVK & FEDDEMA 2002)

**Trennung:** Die Einrichtung physischer Barrieren um den Arbeitsraum des Roboters trennt den Menschen von den dortigen Gefahren. Die für Wartung oder Rüsten erforderlichen Zugänge werden überwacht, vgl. (DIN EN 1088), so dass deren Öffnen zum Stopp des Roboters führt (Stoppkategorie 0 oder 1). Der Anlagenbetrieb kann danach erst aufgenommen werden, wenn die Zugänge verschlossen sind und eine Startfreigabe erteilt wird. Entsprechend ist ein kollaborierender Betrieb nicht möglich. Typische Ausführungsformen sind:

- Sicherheitszaun, Schutzgitter, Mauerwerk: Verhindern ein Betreten oder Eingreifen
- Stabile Schutzgitter, Poller, Hardware-Endanschläge des Roboters: Verhindern das Ausbrechen des Roboters
- Rolll Tore, Schwenktüren, Drehtische, Einlegefenster: Ermöglichen grenzübergreifend einen Materialaustausch oder die Integration sequentieller manueller Tätigkeiten

**Freigabe:** Hierbei übernimmt eine Person mit einem Totmann- bzw. Zustimmungstaster die Überwachungsfunktion. Bei dieser Betriebsart ist nach DIN EN ISO 10218 eine Leistungs- und Geschwindigkeitsbeschränkung vorgesehen. Die Zustimmungseinrichtung, zugehörige Notausschalter wie auch die Robotersteuerung sind nach DIN EN ISO 13849 sicher zu gestalten. Ohne Freigabe führt der Roboter in der Regel einen Betriebshalt aus (Stoppkategorien 1 oder 2) und kein Nothalt (Stoppkategorie 0), was eine schnellere Wiederaufnahme unterbrochener Prozesse ermöglicht. Diese Variante ist für Kollaboration oder Assistenz grundsätzlich geeignet und entspricht dem Stand der Technik. Geeignete Zustimmungseinrichtungen können hinsichtlich verschiedener Eigenschaften unterschieden werden:

- Betätigung: Taster, Hebel oder Griffe mit integrierten Tastern zur Einhand- oder Zweihandbedienung
- Tastfunktion: zweistufig, dreistufig
- Anbindung: kabelgebunden, drahtlos

**Sensorüberwachung – Personen:** In dieser Variante werden Personen im Gefährdungsraum des Roboters sensorisch lokalisiert, was zusammen mit der Kenntnis der Roboterposition oder -pose eine Abstandsbestimmung erlaubt. Sensorik und Steuerung müssen sicher ausgeführt sein. Die Ansätze lassen sich in drei Klassen entsprechend der Messprinzipien der Sensoren einordnen:

- Durchdringend: Transponder (SCHMIDT 2007)
- Berührungslos: Kamerasysteme (Stereobild, Time-of-Flight) (KLAUSMANN 2002; MENEVIDIS ET AL. 2006), Laserscanner (ZAEH & ROESEL 2009; DRESSELHAUS 2006)
- Berührend: Trittschuttmatten (ZAEH & ROESEL 2009)

**Sensorüberwachung – Arbeitsbereich:** Hierbei werden flächige oder volumenförmige Schutzbereiche im Arbeitsbereich definiert und sensorisch überwacht. Bei Eindringen eines Objekts oder einer Person in diese Bereiche wird dies vom Sensor durch Sollwert- oder Schwellwertüberschreitungen erkannt und in Folge ein nach DIN EN ISO 13849 sicherer Ausgang geschaltet, der dann eine Reaktion, z.B. das Stoppen des Roboters veranlasst. Der jeweils erforderliche Mindestabstand wird durch die Wahl von Position und Ausdehnung der Schutzbereiche dargestellt. Werden die Soll- und Schwellwerte im Betrieb nicht geändert, ist diese Funktionalität vornehmlich als Ersatz für physisch trennende Zutritts- und Eingriffskontrollen zu verstehen. Einige Sensoren bieten darüber hinaus die Möglichkeit mehrere Überwachungs- und Schaltbereiche vorzudefinieren und diese während des Betriebs nach Bedarf ein- oder auszublenden oder zu wechseln. Durch mehrere, voneinander abgesetzte Überwachungsbereiche (z.B. Warn- und Schutzbereich) lässt sich das Schalt- und Anlageverhalten abstufen, z.B. erst Verlangsamen, dann Stoppen. Die Zahl der definierbaren Bereiche je Sensor liegt momentan im niedrigen ein- bis zweistelligen Bereich. Dies erlaubt Personen eine gleichzeitige, räumlich getrennte Arbeit innerhalb des Wirkraums des Roboters. Für einen Einsatz in dynamischen, veränderlichen Umgebungen, etwa der Fließmontage erscheint die Rasterung allerdings zu grob und unflexibel. Typische Ausführungsformen der Sensoren sind:

- Trittschuttmatte: ‚safety mat‘ der Fa. ABB AB/Jokab Safety
- Lichtschranke: ‚Unfallschutz-Lichtvorhang‘ der Fa. Dietz Sensortechnik
- Laserscanner: Sicherheitslaserscanner der Fa. Leuze electronic GmbH & Co. KG
- Kamerasystem: ‚V300 Work Station safety camera system‘ der Fa. Sick AG

**Sensorüberwachung – Kinematik:** Bei diesem Ansatz werden Überwachungs- bzw. Schutzfelder um die Kinematik gelegt und den Poseänderungen angepasst. Die Sensoren können dabei entweder die Kinematik von außen beobachten, wobei insbesondere Okklusionen zu berücksichtigen sind, vgl. z.B. (EBERT

2003), oder sie können an der Kinematik angebracht sein und sich mitbewegen, vgl. z.B. (OSTERMANN ET AL. 2011; LÜTH 2009). Der jeweils erforderliche Mindestabstand wird durch die Ausdehnung der Schutzbereiche dargestellt. Das Ausblenden einzelner Schutzbereiche kann den Kontakt zur Kinematik ermöglichen ohne einen Stopp des Roboters auszulösen (HENRICH & KUHN 2006), wobei weitere Maßnahmen die Absicherung an der Kontaktstelle gewährleisten müssen. Die Beispiele verschiedener Umsetzungen mit Sensoren lassen sich wie folgt gliedern:

- Kapazitiv (HEILIGENSETZER 2003)
- Ultraschallbasiert (OSTERMANN ET AL. 2011)
- Laserscannend (LÜTH 2009)
- Kamerabasiert (HENRICH & GECKS 2008)

#### 3.2.3 Ortsflexibilität, Mobilität, Formfaktor

Für die Erfüllung logistischer Aufgaben, Maschinenbefüllung, die Verlegung zu wechselnden Einsatzorten, Montage- und Hilfstätigkeiten in Fließlinien und zur Erhöhung der Durchgängigkeit und Zugänglichkeit von robotergestützten Assistenzfunktionen für die Mitarbeiter sind Ortsflexibilität, Mobilität und Formfaktor von entscheidender Bedeutung.

In Abbildung 10 werden bestehende und mögliche Varianten klassifiziert:








Ortsfest	Gebunden	Ortsflexibel	Selbstfahrend	Mitfahrend	Handhabbar	Tragbar
						

Abbildung 10 Klassifizierung von Robotersystemen bzgl. Mobilität und Formfaktor

**Ortsfest:** Der Roboter ist fixiert, z.B. im Boden verankert. Ein Beispiel aus dem Bereich der Mensch-Roboter-Koexistenz gibt SCHRAFT ET AL. (2005).

**Gebunden:** Der Wirkraum des Roboters ist durch ein ortsfestes System erweitert, z.B. durch eine Linearachse (WERNER 2008).

**Ortsflexibel:** Das Robotersystem kann von Hand oder durch einfache Hilfsmittel bewegt werden, z.B. durch Hubwagen oder Gabelstapler, und kann mit geringem Aufwand am Zielort in Betrieb genommen werden. Ein umfassendes Beispiel,

welches auch sensorbasierte Arbeitsraumüberwachung integriert, gibt BRECHER (2006).

**Selbstfahrend:** Das Robotersystem kann sich autonom oder teilautonom fortbewegen und navigieren oder führen lassen (ELKMANN ET AL. 2010; LAY ET AL. 2001; NEUMANN 2008) und so beispielsweise Arbeitsstationen anfahren, sich als Arbeitsstation oder Handhabungshilfe anbieten, Teile transportieren und bereitstellen (AKELLA ET AL. 1999), Objekte kollaborierend handhaben (KOSUGE ET AL. 2002), Montageaufgaben durchführen (HAMNER ET AL. 2010) oder sich bei Assistenzaufgaben mit gemeinsamer Prozessführung günstig zum Mitarbeiter positionieren (HELMS 2006).

**Mitfahrend:** Dies umfasst Robotersysteme, die an Personenbeförderungsmittel befestigt sind. Die Größenordnung von Roboter und Beförderungsmittel können variieren, z.B. vom Rollstuhl (HEYER & GRAESER 2012), (Bühler et al. 1995) bis zum Schiff („Mamac Offshore Access System“ der Fa. Mamac GmbH).

**Handhabbar:** Robotersysteme, die in Größe oder Form in der Hand gehalten betrieben werden können, etwa als Handwerkzeug. Einen Prototyp für die Medizintechnik stellen BÜHLER ET AL. (1995) vor.

**Tragbar:** Das Robotersystem kann vom Menschen als Kleidung, Exoskelett, Orthese oder Prothese getragen werden und dessen Ideo- oder Lokomotion folgen, unterstützen oder ermöglichen. Fortgeschrittene Prototypen sind z.B. „HAL-5“ der Fa. Cyberdyne Inc., „Sarcos Exoskeleton XOS2“ der Fa. Raytheon, siehe auch (GUIZZO & GOLDSTEIN 2005).

### 3.2.4 Modulare und vernetzte Maschinen

In Software und Hardware modulare Roboterassistenzsysteme können flexibel rekonfiguriert werden und erlauben einen Einsatz in Aufgaben mit veränderlichen Anforderungen. Dauer und Kosten von Inbetriebnahme und Wartung werden reduziert. Zudem werden die fachlichen Anforderungen einer technischen Integration gesenkt, was Anwenderspektrum und Einsatzpotenzial steigert, vgl. (SCHUH ET AL. 2008). Als Vision formulieren REINHART & SPILLNER (2010), dass „Peripheriegeräte und Endeffektoren vom Produktionspersonal am Arbeitsplatz zusammengesetzt und in Betrieb genommen werden können, also der Mitarbeiter sich sein Assistenzsystem selbst konfigurieren kann“. Die Ansätze lassen sich in zwei Bereiche aufteilen:

**Modulare Peripherie:** Die vereinfachte Vernetzung, Integration und Inbetriebnahme von Peripheriegeräten, Endeffektoren mit Roboter und Steuerung. Ein Kernkonzept stellt ‚Plug and Produce‘ dar, d.h. nach Anstecken der Peripherie soll diese einsatzbereit sein. Hierzu werden z.B. erforderliche Versorgungsleitungen und Datenschnittstellen in Schnellwechselsysteme integriert, Maschinen- und Konfigurationsdaten automatisch ausgetauscht und eingestellt (LACHELLO 2009; KRUG 2013) und Bibliotheken mit Geräteinformationen angelegt (EHRMANN & SECKNER 2006).

**Modulare Kinematik:** Durch die geeignete Anordnung und Verbindung einzelner Aktormodule können z.B. Freiheitsgrade, Reichweite, Traglast oder morphologische Funktion eines Robotersystems dargestellt werden. Ebenso können diese Aktor-Anordnungen als Effektor, Andockstelle oder zur Fortbewegung verwendet werden. Neben Ansätzen im Forschungsbereich wie M-Tran (KUOKAWA ET AL. 2007) oder YaMoR (MOECKEL ET AL. 2006) sind auch kommerzielle Systeme wie der auf Powercubes basierende LWA 3 (Light Weight Arm) der Fa. Schunk GmbH & Co. KG verfügbar. Während einige Ansätze eine Montage und Inbetriebnahme des Gesamtsystems benötigen, können sich bei anderen die Module selbstständig verbinden, die Gruppenkonfiguration erkennen oder die Gesamtfunktion optimieren, vgl. (SPRÖWITZ ET AL. 2008).

#### 3.2.5 Flexible Endeffektoren

Effektoren begrenzen maßgeblich die Einsatzbreite und -flexibilität von Roboterassistenzsystemen. Die Handhabung von Objekten setzt in der Regel eine Abstimmung der Effektoren auf die Objektspezifika voraus. Änderungen der Handhabungsaufgabe können aufwendige Maßnahmen nach sich ziehen, von einfachen Neuparametrierungen über den Austausch von Modulen bis hin zu konstruktiven Anpassungen einzelner Merkmale (REINHART ET AL. 2010c) oder umfassender Neukonstruktionen, vgl. (STRÄßER 2012).

**Flexibilisierung:** Maßnahmen und Ansätze zur Flexibilisierung von Greifsystemen bzgl. der handzuhabenden Objekte ohne konstruktive Änderungen oder Wechsel lassen sich in den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Entkoppelung des Wirkprinzips von der Objektgestalt: Traktionsgreifer (WOHLFAHRT 2005)
- Nachgiebigkeit: ‚FinGripper‘ (Festo AG & Co. KG), universal robotic gripper (BROWN ET AL. 2010); (WEGENER 2007)



- Integration zusätzlicher Aktuatoren bzw. Freiheitsgrade: flächenselektive Niederdruckflächensauger (STRABER 2012), Mehrfingergreifer (WU ET AL. 2008)
- Integration sensorgestützter Funktionen: Zweibackengreifer für Textilmanipulation mit Hilfe bildverarbeitender Sensoren (MAITIN-SHEPARD ET AL. 2010)

**Sicherheit:** Eine weitere Einschränkung liegt in der Gewährleistung einer für Menschen sicheren Funktion. Diese lassen sich zwei Kategorien zuordnen:

- Selbstsicherung: Verhindern des unbeabsichtigten Lösens Entsicherns oder Entspannens z.B. durch Anwendung formschlüssiger statt kraftschlüssiger Wirkprinzipien, mechanische Rückhaltevorrichtungen oder redundante Ausführung
- Verhindern verletzender Einwirkung des Greifers auf den Menschen: z.B. durch integrierte Kraftmessung („Universalgreifer WSG 50“ der Fa. Weiss Robotics GmbH & Co.KG), Nachgiebigkeit („universal robotic gripper“ (BROWN ET AL. 2010) oder geringe Greifkraft („FinGripper“ Festo AG & Co. KG), vgl. Abschnitt 3.2.2

**Duale Nutzung:** Eine Befähigung des Robotersystems zur Handhabung, Benutzung oder Bedienung von für den Menschen gestalteten Objekten kann dessen Integration erleichtern. Die duale Nutzung beispielsweise von Werkzeugen durch Roboter, Mensch oder beide zusammen kann Investitionskosten und Rüstzeiten senken. Es lassen sich diesbezüglich zwei Ansätze erkennen:

- Anthropomorphe Effektoren: (WU ET AL. 2008; ROTHLING ET AL. 2007; WEGENER 2007, S.31; ASCARI ET AL. 2009)
- Einfache Spannelemente: (LACHELLO 2009; DRESSELHAUS 2009)

#### 3.2.6 Interaktion und Programmierung

Verglichen mit automatisierten Zellen ist bei roboterassistierten Arbeitsplätzen mit einer Zunahme von Störungen der Arbeitsabläufe und von Fluktuationen der Arbeitsaufgaben des Roboters zu rechnen. Robustheit, Einfachheit und Flexibilität bzgl. Planung, Abstimmung und Regelung der Interaktion in der Roboterassistenz werden durch Mensch-Maschine-Schnittstellen und zugehörige Programmierverfahren determiniert.

### 3.2.6.1 Programmierverfahren

Tabelle 7: Übersicht der Programmierverfahren für Industrieroboter (vgl. KORTENKAMP & SIMMONS 2008, HELMS 2006)

	Zugangsebene	Art	Online		Offline					
↙ Zunahme des Abstraktionsgrads ↙	Gelenkwinkel, Achsstellung	Explizit	Teach-In	Play-Back	Hybride Programmierverfahren	Sprachbasiert	Graphisch			
	Werkzeugposition, Bahn									
	Signale, Peripherie									
	Elementarfunktion, Ablauf	Implizit	Master-Slave	Sensorgestützt				Hybride Programmierverfahren	Sprachbasiert	Graphisch
	Prozessparameter									
	Produkt-eigenschaften									
	Ziel, Aufgabe									

Die Verfahren lassen sich zunächst nach Art und Zugangsebene unterscheiden, vgl. Tabelle 7. Bei expliziter Programmierung werden Parameter und Funktionen des Robotersystems exakt und vollständig festgelegt. Nachteilig ist der mit der Komplexität der Aufgabe zunehmende Aufwand zur Erstellung des Programms. Bei impliziter Programmierung werden hingegen Parameter und Eigenschaften von Prozess, Produkt oder Aufgabe beschrieben, vgl. (KUGELMANN 1999). Die Vorteile liegen dabei vor allem in der Reduktion von Programmieraufwand und der erforderlichen Programmierkenntnisse. Nachteilig ist die geringere Vielseitigkeit dieser Verfahren. So sind verfügbare Software-Suiten in der Regel auf einzelne Aufgabenbereiche spezialisiert, z.B. Messen (REINHART & TEKOUO 2009) Schweißen (ZAEH & VOGL 2006), Polieren (DRIEMEYER WILBERT ET AL. 2012).

Darüber hinaus ist eine Einteilung in online und offline Programmierverfahren üblich. Offline-Verfahren können ohne (gleichzeitig betriebenen) Roboter durchgeführt werden. Zum Einsatz kommen verschiedene Modalitäten:

- Sprache: schriftliche oder mündliche Deklaration
- Graphisch: Programmrepräsentation via 2D Ablaufdiagramm mit Elementarfunktionen, vgl. (SCHUH ET AL. 2008)
- Modellbasiert: CAD-gestützte Repräsentation und Simulation der Prozesse unter Berücksichtigung geometrischer, funktioneller oder stofflicher Eigenschaften der Objekte, die prozessbezogene Planungs- und Optimierungsmethoden enthalten können, vgl. (REINHART & TEKOUO 2009; DRIEMEYER WILBERT ET AL. 2012)

Bei Online-Verfahren wird das physische Robotersystem in die Programmierung einbezogen. Hierzu werden folgende Varianten gezählt:

- Teach-In: Zielkoordinaten und Stützpunkte für Position und Bahn der Werkzeugspitze werden mit dem Roboter angefahren und vom Bediener abgespeichert
- Play-Back: der Roboter wiederholt eine zuvor aufgezeichnete Bewegung;
- Master-Slave: der Roboter wird durch einen anderen Roboter oder ein Eingabegerät ferngesteuert
- Sensorgestützte Verfahren: Ableitung und Integration von z.B. Bahnkorrekturwerten, Zielkoordinaten etc. auf Basis erfasster Daten von Mess- und Prüfeinrichtungen

Durch Kombination von On- und Offline oder expliziten und impliziten Verfahrensschritten lassen sich hybride Verfahren bilden, vgl. (BRECHER ET AL. 2010).

### 3.2.6.2 Spezielle Ansätze

Nicht eindeutig zuordnen lassen sich zwei Ansätze, die für den künftigen Einsatz in der Mensch-Roboter-Kooperation relevant erscheinen. Erstens das Programmieren durch Vormachen, zweitens die maschinelle Kognition. Diese werden im Folgenden angesprochen.

Durch Vormachen eines Arbeitsprozesses, kann ein Roboter explizit oder implizit instruiert werden. Im expliziten Fall wird dem Roboter durch händisches Führen am Endeffektor oder am Arbeitsobjekt der Bewegungsablauf demonstriert (GÖBEL 2012; ALBU-SCHÄFFER & HIRZINGER 2002). Diese Eingabeart ist intuitiv, der Einsatz aber wird eingeschränkt durch unpräzise Vorführbewegungen des Bedieners, durch beschränkte Zugänglichkeit des Arbeitsraums und durch fehlende Möglichkeiten zur Integration komplexerer

Anweisung wie Haltebedingungen oder Montagekräfte. Bei nachgiebigen bzw. kraftgeregelten Robotersystemen können zudem Bahnabweichungen gegenüber einer positionsbasierten Vorführung auftreten. Bei impliziten Ansätzen wird dem Roboter der Montage oder Bearbeitungsprozess mit Zeigegeräten (ZAEH & VOGL 2006), virtuellen Objekten (ONG & WANG 2011) oder realen Bauteilen (DILLMANN 2004; EHRENMANN ET AL. 2002b) vorgeführt. Ein Nachahmen erfordert vom Robotersystem entsprechende Fähigkeiten zur Interpretation. Ohne Zeigegeräte wird in der Regel eine Bilderkennung zur Objektklassifizierung vorausgesetzt. Der Erfassung von Greifpunkt, -art und -kraft ermöglichen z.B. Datenhandschuhe mit Marker, Magnet- und Kraftsensoren (DILLMANN 2004; EHRENMANN ET AL. 2002b).

Die maschinelle Kognition in der Produktion befasst sich mit der eigenständigen Erkennung von Modulen und Fähigkeiten, der autonomen Identifikation, Planung, Durchführung komplexer Aufgaben sowie deren Anpassung und Optimierung je nach Status des Produktionsablaufs, vgl. (ZAEH ET AL. 2009; BEETZ ET AL. 2007; BANNAT ET AL. 2011). Eine Beispielanwendung stellt der sogenannte Griff in die Kiste dar, bei dem im Schüttgut auf Basis von CAD-Daten Bauteile sensorisch erkannt, Greifpunkte abgeleitet und kollisionsfreie Bahnen berechnet werden (LEDERMANN 2010). Ein weiteres Beispiel geben EWERT ET AL. (2012), wobei auf Basis von Graphen und Zustandsbeschreibung die nächsten möglichen Montageschritte geplant und durchgeführt werden. Das autonome vernetzte Integrieren und Exportieren von Daten, Erfahrungen und Fertigkeiten, angefangen von Kartenmaterial über Produktinformationen bis zu Programmen und Methoden stellt hingegen noch ein Grundlagenthema dar, vgl. (WAIBEL ET AL. 2011). Im Kontext der Mensch-Roboter-Kooperation lässt sich die Anforderung formulieren, dass kognitive Systeme aktuelle Position, Tätigkeit, Aufgabenfortschritt, mögliche Fehlhandlungen und Absichten des Menschen berücksichtigen und in gegenseitigen Kontext setzen sollten, vgl. (SEBANZ ET AL. 2006; BRACHMAN 2002; HOC 2001; BEETZ ET AL. 2007; G. REINHART ET AL. 2007; SCHMIDT-ROHR ET AL. 2008). Dadurch würde es dem kognitiven System ermöglicht, die nächsten Schritte des Mitarbeiters zu prognostizieren, geeignete Assistenzfunktionen anzubieten oder unabhängige Tätigkeiten zu verrichten. Aufwendungen zur Programmierung neuer Aufgaben oder Varianten im Betrieb entfallen. Assistierte Mitarbeiter benötigen keine Zusatzqualifikationen. Flexibilität und Produktivität können bei geeignetem Anwendungsfall zunehmen, vgl. (BÜSCHER ET AL. 2012). Eine Anlehnung an menschliche Entscheidungs- und Verhaltensmuster kann die Zusammenarbeit

angenehmer gestalten, vgl. (MAYER & SCHLICK 2012). Kritisch zu betrachten ist die erhebliche Komplexität autonomer Systeme vgl. (BAINBRIDGE 1983; BROOKS 2002): Die Einrichtung ist aufwendig und erfordert hochqualifizierte Fachleute. Ferner mangelt es bisher an Werkzeugen zur anwenderseitigen Wahrung der Übersicht und Kontrolle autonomer Funktionen.

### 3.2.6.3 Eingabemedien, Mensch-Maschine-Schnittstellen

Als Eingabemedien sind zahlreiche Varianten neben Tastatur und Programmierhandgeräte der Roboterhersteller verfügbar. Deren Eignung hängt spezifisch vom Anwendungsfall ab.

Vornehmlich für Online-Verfahren zum Positionieren oder Bewegen des Roboters dienen haptische Eingabegeräte wie Joystick (DAVIS 2006; RADI 2012), 6D-Mouse (REIS 2008), Kraft-Momenten-Sensoren (SCHRAFT ET AL. 2005) oder Beschleunigungssensoren z.B. in Mobiltelefonen (LAMBRECHT ET AL. 2011). Ein Bewegen der Kinematik kann auch durch direkten Kontakt mit dieser gesteuert werden, etwa durch eine Sensorhaut (SCHMID 2008) oder durch Messung von Motorstrom oder Gelenkmoment (HIRZINGER ET AL. 2001; WINKLER 2006).

Für die offline Erstellung, Anzeige, Überprüfung und Bearbeitung von Bahnen, Abläufen oder Bearbeitungsschritte bieten sich oft virtuelle Umgebungen an, vgl. (NEE ET AL. 2012; REINHART & TEKOUO 2009).

Online und offline können Zeigegeräte verwendet werden, durch welche Bahnen und Parameter direkt auf Bauteilen programmiert und via Projektor auf diesen dargestellt und manipuliert werden (ZAEH & VOGL 2006; OSAKI ET AL. 2008; HAHN 2007). Durch Projektion von ‚soft keys‘ werden freie Oberflächen als Eingabefelder nutzbar (BANNAT ET AL. 2009). Ein Vermitteln von Zielkoordinaten oder ein Kennzeichnen von Objekten von Interesse wird berührungslos ermöglicht durch Laserpointer (STOPP ET AL. 2001; MORIOKA & SAKIBARA 2010) oder Eingrenzung auf einem Bildschirm (REMAZEILLLES ET AL. 2008).

Ferner können Gestik (POOK & BALLARD 1996, ASFOUR ET AL. 2000; OSAKI ET AL. 2008), Mimik (HEINZMANN & ZELINSKY 1999, SAM GE ET AL. 2008) und Sprache eingesetzt werden. Der Bereich sprachbasierter Programmierung reicht von der Erkennung der Gesprächsbereitschaft (SATAKE ET AL. 2009) über die Anwendung expliziter Kommandos (EHRENMANN ET

AL. 2002a, WICHERT ET AL. 2002) bis hin zu impliziten Anweisungen, Diskussionen und Nachfragen zur Klarifikation (KRUIJFF ET AL. 2008).

#### **3.2.7 Verankerung in Unternehmen**

Der Einsatz von Roboterassistenzsystemen ist mit Kosten verbunden und erfordert somit unternehmerische Entscheidungen. Die Gestaltung und Auswahl von Assistenzsystemen müssen den Randbedingungen von Arbeitsplatz, Arbeitsinhalt und Mitarbeiter gerecht werden. Dies wird durch ein planerisches Vorgehen begünstigt, vgl. (DAS 2001). Die Einteilung und Durchführung von Assistenzaufgaben müssen arbeitsorganisatorisch berücksichtigt werden. Für eine breite Einführung von Roboterassistenz ist demnach eine Verankerung in den planerischen und organisatorischen Vorgehensweisen als vorteilhaft, wenn nicht als Voraussetzung anzusehen. Im Folgenden wird der Stand dargelegt und diskutiert.

##### **3.2.7.1 Assistenz-Bedarfs- und Assistenz-Potenzial-Analyse**

In HELMS (2006, S. 40-45) wurden Fertigungsverfahren zunächst hinsichtlich ihrer Eignung für eine bestimmte Assistenzart (Bahnführungsunterstützung) selektiert. Anschließend wurden typische Werkzeug-Bahnparameter ermittelt. Die Assistenzfunktionen wurden in fünf Gruppen mit insgesamt 18 Elementen eingeordnet. Eine Zuordnung von Prozess und anwendbaren Assistenzfunktionen erfolgte tabellarisch. Die jeweilige Eignung wurde durch Expertenverfahren qualitativ ermittelt.

Für ein am Rollstuhl mitfahrendes Assistenzsystem haben MATSUMOTO ET AL. (2011) die Häufigkeit unterschiedlicher menschlicher Funktionseinschränkungen einer Zielgruppe analysiert. Die häufigsten Einschränkungen (z.B. „Heben und Tragen“) wurden dann als Schwerpunkte für die weitere Entwicklung identifiziert.

##### **3.2.7.2 Aufgabenteilung von Mensch und Roboter in der Produktion**

Die Montagesystemplanung für automatische, manuelle und teilautomatisierte Arbeitsplätze ist gut beschrieben, siehe (BULLINGER 1986; PFRANG 1990; BLEY ET AL. 2004; LOTTER & WIENDAHL 2006). Die Auswahl der Ausführungsart (automatisch, manuell,...) wird vorwiegend ökonomisch motiviert (BULLINGER 1986). Wesentliches Element teilautomatisierter Arbeitsplätze ist die zeitliche Kopplung von Mensch und Automat (LOTTER & WIENDAHL 2006). Manuelle und automatische Operationen werden bspw.

durch Arbeitsablauf-Zeitanalyse (MTM) und Bewegungssimulation getrennt beschrieben und gemeinsam mittels Vorranggraph und Zeitdiagramm optimiert (PFRANG 1990). Diese Vorgehen berücksichtigen allerdings keine Roboterassistenz, Mensch-Roboter-Kollaboration oder nicht getrennte Arbeitsräume von Mensch und Maschine.

In den Arbeiten von BEUMELBURG (2005) und ZÜLCH & BECKER (2010) werden Menschen und Maschinen Parameter zur Beschreibung ihrer Aufgabeneignung zugewiesen. Im Wesentlichen auf Montagezeiten und -kosten stützt sich (TAKATA & HIRANO 2011). Durch Optimierungsverfahren können damit zur jeweiligen Montage- oder Fertigungsaufgabe ein vorteilhafter Automatisierungsgrad oder geeignete Funktion-Ausrüstung-Zuordnungen bestimmt werden. Dabei wird nicht konkret auf Roboterassistenz oder MRK eingegangen.

#### 3.2.7.3 **Layout**

In KRIEGER (2010) wird ein Werkzeug zur weitgehend automatisierten Einrichtung von Sicherheitsräumen vorgestellt. Basisdaten bestehen in einer Aufzeichnung des robotergestützten Prozesses (Bahn, Geschwindigkeit,...), eine Einteilung der Arbeitsbereiche (statisch, überlappend,...) und Objekte (Mensch, Umhausung, Werkzeugmaschine,...) und deren Lage zueinander. Mindestabstände werden aus den Normen abgeleitet und automatisch geprüft. Die Nutzung eines solchen Werkzeugs führe zur beschleunigten Einrichtung und zu einer besseren Ausnutzung des Arbeitsraums durch den Roboter.

Für Teilautomation mit getrennten Arbeitsräumen nehmen LOTTER & WIENDAHL (2006, S. 193 ff.) eine Betrachtung unterschiedlicher Montage- und Verkettungssysteme vor. Die zeitliche Bindung von Mensch und Maschine können durch Puffer und Nebenschluss entkoppelt werden (ebenda). THIEMERMANN (2005, S. 50-66) leitet für die MRK drei geeignete Layouts ab. Vorteilhaft seien demnach Inselmontage, U-Layout und Karree- bzw. Linienanordnung mit Nebenflussprinzip. Roboter und Teilebereitstellung sollten vor dem Mitarbeiter liegen. Bedient der Assistenzroboter weitere automatische Montagestationen sollten diese Abseits vor dem Werker liegen, vgl. (THIEMERMANN 2005).

Ein Beispiel für das Layout ortsflexibler Robotersysteme gibt BRECHER (2006). Für eine nur zeitweise Automation schlagen SCHUH ET AL. (2008) ein modulares System vor. Eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung ist für den Robotereinsatz kaum hinderlich (CONSIGLIO ET AL. 2007).

#### 3.2.7.4 Bewertung

Eine ergonomische Bewertung der Kollaboration kann in der Phase der Feinlayouts durch Kombination von CAD-gestützten Bewegungssimulationen mit Belastungsanalysemethoden wie z.B. OWAS durchgeführt werden (THOMAS ET AL. 2001a). Je nach Belastungsanalysemethode wäre eine Beschreibung der auf den Bediener wirkenden Interaktionskräfte erforderlich. Entsprechend kann es vorab einer Messung, Schätzung oder mathematischen Modellierung bedürfen. Neben ergonomischer Kriterien kann auch die Reduktion des Unfallrisikos berücksichtigt werden (LEE ET AL. 2011).

Daneben sind Bewertungen von Kosten (Personal, Maschine, Betrieb, Inbetriebnahme,...), Produktionsmengen und Prozessdauern im Vergleich zu möglichen Alternativen üblich, vgl. (LOTTER & WIENDAHL 2006; BULLINGER 1986; VERL ET AL. 2009). Stückzahl- oder Variantenflexibilität werden z.B. über den Rüstaufwand beschrieben (CONSIGLIO ET AL. 2007; BÜSCHER ET AL. 2012). Die Wirkung von Roboterassistenz auf die Belegschaft bzgl. z.B. der Entwicklung von Arbeitsunfähigkeitstagen, Leistung oder Motivation lässt sich hingegen nur eingeschränkt quantifizieren und bewerten, vgl. (CHAPMAN 2005; LANDAU 2002).

#### 3.2.7.5 Betreibermodell und Kostenzuordnung

Eine rein wirtschaftliche Argumentation des Einsatzes robotergestützter Assistenz widerspricht dem humanitären Verständnis. Gleichwohl sind die Kosten solcher Assistenzsysteme ein Einsatzhemmnis, vgl. (HELMS 2006, S.37). Nachteilig wirken sich dabei folgende Punkte aus, vgl. (REINHART ET AL. 2011):

- Hohe Anschaffungskosten
- Kurze Abschreibungsdauer
- Nur zeitweise Nutzung
- Reduzierte Arbeitsgeschwindigkeit

Um dem Einsatzhemmnis entgegenzuwirken wurden bisher folgende Modelle vorgeschlagen:

- Vermietung des Roboters an Anwender über ein Betreibermodell (SCHUH ET AL. 2008)
- Nutzung des Assistenzsystem als Automat in Arbeitsschichten oder Taktzeiten ohne Assistenzbedarf (REINHART ET AL. 2011)



- Integration zusätzlicher automatischer wertschöpfender Prozesse am assistierten Arbeitsplatz (REINHART ET AL. 2011)

Ein weiteres Einsatzhemmnis kann eine getrennte, fixe Budgetierung von Planung und Betrieb eines Montagesystems darstellen. Späte Kosteneinsparungen des Betreibers durch bereits integrierte Assistenzsysteme können so nicht in der Planung berücksichtigt werden.

Neben der Kostenzuordnung sind auch organisatorische und rechtliche Verantwortung für den Robotereinsatz relevant. In der aktuellen Diskussion stehen insbesondere Wirken und Folgen künstlicher Intelligenz und autonomer maschineller Handlungen, vgl. (BECK 2009; BECK 2012). Ein Trend in der Umsetzung ist kaum abzusehen. Es lässt sich aber abschätzen, dass auf absehbare Zeit die Anforderung an menschliche Kontrolle und Betreiberhaftung im Wesentlichen erhalten bleiben. Eine früher einsetzende Problematik liegt vor, wenn das Produktionspersonal Roboterassistenzsysteme selbstständig konfigurieren, in Betrieb nehmen oder als Hilfsmittel oder Werkzeug verwenden soll (REINHART & SPILLNER 2010). Hierfür ist bisher wenig untersucht auf welcher personellen Ebene die Verfügungsgewalt liegen sollte, wie eine Sicherheitsabnahme gewährleistet würde oder wie Auswirkungen auf die Prozess- oder Produktqualität zu berücksichtigen wären.

### **3.2.8 Akzeptanz**

Neben den anderen Aspekten ist für den Einsatz von Roboterassistenten entscheidend, ob die angebotene Unterstützung auch tatsächlich und in korrekter Weise vom Mitarbeiter genutzt werden. Die Folgen fehlender Akzeptanz können vom Nichtgebrauch bis zur Sabotage reichen. Im Folgenden wird die Akzeptanz in verschiedenen Aspekten der technischen und funktionellen Gestaltung der Roboterassistenz beleuchtet. Dabei wird auf Gestalt, Sicherheit, Verhalten bei Annäherung und Nähe des Menschen sowie Handhabungsunterstützung und Kollaboration zur Handhabung eingegangen. Andere, z.B. soziopolitische Aspekte wie Arbeitsplatzverlust, Arbeitskampf werden nicht betrachtet. Im Anschluss an die Diskussion werden die Schlussfolgerungen in kurzen Stichpunkten als Hinweise für eine akzeptanzförderliche Gestaltung kondensiert.

### 3.2.8.1 Einfluss der äußeren Gestalt

Die emotionale Haltung bezüglich Roboter wird nicht umso positiver, je menschenähnlicher der Roboter ist, sondern wechselt zwischen den Extremen künstlicher und menschenähnlicher Gestalt ins Negative (MORI 1970), vgl. Abbildung 11. Je menschenähnlicher die Gestalt des Roboters ist, umso höher ist die Erwartungshaltung an ein ebenso menschenähnliches Verhalten und Eigenschaften. Die Anforderungen gehen von einem als natürlich empfundenen Bewegungsverhalten bis hin zur Darstellung von Emotionen und sozialer Kompetenz. Dies zu erreichen erforderte einen hohen technischen Aufwand. Bei nicht menschenähnlicher Gestalt fällt eine Assoziation bzw. Empathie leichter, sobald ein Verhaltensmuster bzw. eine Eigenschaft erkannt wird, mit der der Beobachter sich identifizieren kann.

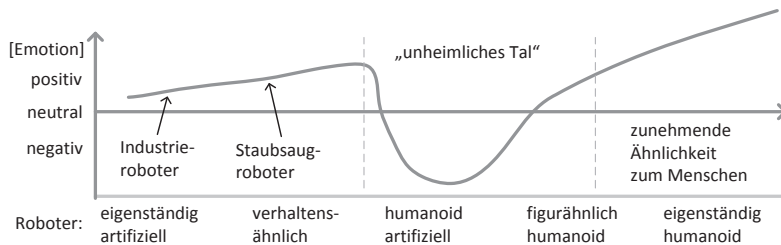


Abbildung 11 Emotionen gegenüber Robotern je nach deren Ähnlichkeit zum Menschen, nach BRAU (2011)

Daraus folgt, dass für die Umsetzung von Roboterassistenz in der Produktion eine menschenähnliche Gestalt in der Regel vermieden werden sollte und natürliche, vorhersehbare Verhaltensweisen bevorzugt zu integrieren sind. Darüber hinaus erscheint es plausibel, dass personalisierende Maßnahmen, wie z.B. eine Namensgebung durch die Mitarbeiter akzeptanzförderlich sind.

### 3.2.8.2 Aspekte der Sicherheit und Wartung

Sicherheitseinrichtungen werden häufig und selbstgefährdend umgangen, wenn diese der zielführenden Handlung der Werker im Weg stehen. Diese dabei empfundene oder tatsächliche Behinderung kann verschiedene Ursachen haben: Wartezeiten, mögliche Fehlbetätigungen, motorische Erschwernisse oder Unzugänglichkeit benötigter Informationen. Die häufigsten Unfälle treten im Ausnahmebetrieb auf (Wartung, Reparatur). Von der Wahrnehmung der Gefahrenlage her werden häufige, alltägliche Risiken unterschätzt, seltene Risiken mit drastischeren Folgen hingegen in ihrer Häufigkeit überschätzt – dies sowohl vom

Bedienpersonal wie auch von Gutachtern bei der Gefährdungsanalyse, vgl. (SARODNICK ET AL. 2005; WEIßGERBER 2001). Häufige falsche Alarmer führen zur generellen Missachtung der Warnung, seltene Warnungen zum Verlernen korrekter Reaktionen (PARASURAMAN 1997). Zwar wird generell ein fehlertolerantes Design empfohlen, das Ausbleiben von Folgen oder Sanktionen fördert aber ein fehlerhaftes, riskantes Verhalten. Der Lerneffekt zum falschen Verhalten scheint beim Ausbleiben entsprechender Folge größer zu sein als durch Effekte durch Belohnung richtigen Verhaltens. Bleibt es bei 80% oder mehr der Regelverstöße folgenlos, gilt eine Regel als obsolet (MUSAHL 2001).

Daraus lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Umgehen, Manipulation von Sicherheitseinrichtungen technisch unmöglich machen
- Fehlertolerantes Verhalten der Systeme realisieren, aber Fehler immer auch an den Bediener bzw. Verursacher zurückmelden
- Einbeziehung dritter Personen (Vorgesetzte, Sicherheitsverantwortliche) z.B. durch Protokollierung fördern
- Sicherheitsmaßnahmen sollten die Ausführung der eigentlichen Aufgabe des Bedieners nicht hindern, insbesondere Wartezeiten sind zu vermeiden
- Sicherheitsmaßnahmen wenn möglich auch auf den Ausnahmebetrieb ausdehnen

#### **3.2.8.3 Annäherung an den Menschen, Arbeit in der Nähe des Menschen, Koexistenz**

Das Sicherheitsempfinden bzw. ein vom Beobachter noch als sicher empfundenen Roboterverhalten, hängt u.a. von Annäherungsgeschwindigkeit und -winkel ab. Für einen kleinen Scara ist der Zusammenhang von THIEMERMANN (2005) beschrieben. Vereinfacht: je näher und je direkter auf den Menschen zu bewegt wird, umso langsamer sollte der Roboter fahren, vgl. auch (NONAKA ET AL. 2004; ARAI ET AL. 2010). Mit steigender Größe des Roboters ist eine weitere Reduzierung der als sicher empfundenen Geschwindigkeiten zu erwarten. Da das Sicherheitsempfinden, ebenso wie die Kooperationsfähigkeit individuellen Unterschieden unterliegt, wird weiterhin eine entsprechende Anpassungsfähigkeit des Roboterverhaltens bzw. der Bewegungscharakteristik empfohlen (THIEMERMANN 2005). Eine häufige und naheliegende These ist auch, dass eine Kooperation im Sichtbereich stattfinden sollte. Ein Wechsel der Roboterbewegung aus oder in den Sichtbereich des Mitarbeiters könnte

diesen ablenken oder irritieren und sollte entsprechend vermieden werden (THIEMERMANN 2005), ebenso wie der Betrieb eines Roboters im Rücken des Mitarbeiters, vgl. (BARTNECK ET AL. 2009). Eine Studie von BORTOT ET AL. (2012) indiziert, dass die Geräusentwicklung des Roboters einen deutlichen Einfluss auf das Empfinden wie auch auf die Leistung der Mitarbeiter haben kann. Demnach sollte eine hohe Geräusentwicklung (die typischerweise auf großen Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten des Roboters hinweisen) vermieden werden. Ein lautloser Betrieb kann hingegen auch nicht als ideal angesehen werden – es ist zu vermuten, dass ohne akustisches Signal der Betriebszustand bzw. die Pose oder Verhalten des Roboters ohne Hinsehen schwer einzuschätzen ist und so das Unfallrisiko erhöht würde.

Daraus lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Wechsel des Roboters in das Blickfeld, aus dem Blickfelder heraus vermeiden
- Annäherung bzw. Vorbeifahrt in Winkel und Geschwindigkeit anpassen
- Vorhersehbares (auch hörbares) Verhalten vorsehen

#### 3.2.8.4 Akzeptanz hinsichtlich Handhabungsunterstützung

Der Bauteiltransport oder allgemeiner, das Handhaben von Objekten, ist eine Tätigkeit auf Gewohnheits- oder Fertigkeitsebene, (RASMUSSEN 1983). Daher können die Verwendung und das Erlernen des Einsatzes einer Handhabungshilfe, schneller als bei anderen Tätigkeiten, als umständlich oder aufwendig empfunden werden. Nach MELENHORST ET AL. (2006) entscheidet insbesondere der Nutzen, weniger der Aufwand bzw. die Kosten des Erlernens über die Akzeptanz einer Technologie. Der Vorteil der Nutzung muss den Vorteil des Nichtnutzens überwiegen. Das bedeutet, dass ein leicht zu erlernendes, intuitives Führverhalten einer Handhabungshilfe vielleicht schneller angenommen und beherrscht wird, letztendlich aber vor allem der Vorteil in der zielführenden Handlung liegen muss. KALTENBRUNNER & SPILLNER (2013) haben die Akzeptanz für Handhabungshilfsmittel untersucht – die Befunde lassen sich vermutlich analog auf eine kollaborative Handhabung mit einem Roboter übertragen. Demnach stellen u.a. folgende Punkte Hindernisse dar, die dazu führen können dass das Assistenzsystem vom Mitarbeiter nicht genutzt wird:

- Takt- oder Zielvorgaben werden bei Nutzung der Handhabungsunterstützung nicht erreicht, die Arbeitsgeschwindigkeit ist gering
- Die Arbeitsgeschwindigkeit ist geringer als bei einer Nichtnutzung der Handhabungsunterstützung
- Die Tätigkeit ist ohne Handhabungsunterstützung ausführbar, z.B. bei kleinen Bauteilgrößen oder Objektgewichten unter 15 kg
- Das Greifen oder Positionieren eines Objekts mit dem Handhabungsgerät ist umständlich
- Der Einsatz der Handhabungsunterstützung ist nur selten erforderlich.
- Der Transportweg ist besonders kurz oder lang
- Der verfügbare Platz ist gering
- Die Handhabungsunterstützung ist schwergängig oder umständlich zu bedienen

Daraus lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Das Assistenzsystem sollte nicht nur physische Erleichterung bieten, sondern muss auch eine schnellere oder bessere Erfüllung der Arbeit ermöglichen um akzeptiert zu werden.
- Der Anteil automatischer Operationen in der Nähe des Menschen ist, auch wirtschaftlich gesehen, möglichst hoch zu gestalten. Eine Kollaboration sollte nur eingesetzt werden, wo diese erforderlich oder vorteilhaft scheint.

#### 3.2.8.5 Aspekte der Regelung kollaborierender Handhabung

Es erscheint plausibel, dass eine Aufgabe in der Mensch-Roboter-Kollaboration effektiver und effizienter ausgeführt werden kann, wenn das Verhalten und die Bewegungskarakteristik des Roboters an Aufgabe und an Nutzer angepasst ist. Verschiedene Ansätze hierzu werden nachfolgend besprochen:

**Anpassung der Regelung:** Eine Handhabungsaufgabe lässt sich in verschiedene Phasen gliedern, z.B. Aufnahme, Transport, Positionierung (YAMADA ET AL. 1999). Bei einer manuellen Ausführung lassen sich in diesen Phasen charakteristische Verläufe von Objektgeschwindigkeit, -beschleunigung, Handhabungskraft und Impedanz des menschlichen Muskel-Skelett-Apparats beobachten, vgl. (YAMADA ET AL. 1999; TSUMUGIWA ET AL. 2002). Entsprechend ist eine Anpassung der Regler und Regelparameter dem Aufgabenfortschritt oder den erfassten charakteristischen Größen vornehmbar.

Beispiele:

- Unterscheidung nach Aufnahme-, Transport-, Positionieren (YAMADA ET AL. 1999)
- Wechsel zwischen proportional- und newtonschen Regelverhalten je nach Führungsgeschwindigkeit (STOLKA & HENRICH 2004)
- Variable Impedanzregelung, Erfassung der Änderung der Handsteifigkeit beim Positionieren (TSUMUGIWA ET AL. 2002)

**Intuitive Bedienung:** Das Regel- bzw. Führverhalten kann derart gestaltet werden, dass es einem dem Bediener bekannten Verhalten ähnelt. Ein Ansatz hierfür besteht in der Verwendung funktioneller Bewegungsmodelle. In (ARAI ET AL. 2000; TAKUBO ET AL. 2000) wird durch Einführung eines virtuellen Rades in der Regelung das Führverhalten einer Schubkarre nachgebildet. Ein weiteres Beispiel funktioneller Bewegungsmodelle gibt YIGIT (2005, S.53f.) mit dem Pumpverfahren. Eine besonders intuitive Eingabe stellt das Führen am Bauteil dar, bei dem der Bediener das Objekt manuell führt, während der Roboter den Großteil der Handhabungskräfte aufbringt. Diese Methode stellt allerdings gleichzeitig hohe sensor- und sicherheitstechnische Anforderungen (REINHART ET AL. 2011), die beim Bedienen eine Trennung des Kraftflusses zwischen Mensch, Objekt und Roboter bevorzugen lassen.

**Aufweichen von Begrenzungen:** Durch z.B. aufgabenspezifische Anforderungen kann eine Begrenzung der kinematischen Größen des Roboters erforderlich sein. In (TICKEL ET AL. 2002) wird festgestellt, dass Bediener teilweise unnötig große Kräfte gegen virtuelle Führungen richten. Verallgemeinert kann beim kollaborativen Führen für den Bediener der Eindruck entstehen, dass der geführte Roboter ab Erreichen einer limitierten Geschwindigkeitsgrenze schwergängig und kraftraubend sei, während eigentlich ein Bedienfehler vorliegt. Für Drucktaster, wo ein ähnliches Phänomen auftritt, werden spezielle Kraft-Weg-Kennlinien vorgeschlagen (BIERMANN & WEIßMANTEL 1995), was sich ggf. auch auf das Führverhalten an virtuellen Barrieren verwenden ließe. In (HENRICH ET AL. 2008) wird empfohlen eine Skalierung der Begrenzung vorzunehmen, wenn Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen limitiert werden müssen. Allgemein sollte der Mitarbeiter Feedback erhalten um sein Verhalten bzgl. der Kraftausübung anpassen zu können.

**Stetige, stabile, beherrschbare Bedienung:** Unstetiges Verhalten dürfte dem Führenden als unnatürlich vorkommen und sollte vermieden werden. Diese Hypothese wird durch HENRICH ET AL. (2008) gestützt. Ebenso ist instabiles Verhalten verschiedener Regelungsstrategien zu berücksichtigen und zu vermeiden, wie es z.B. bei Veränderung des Impedanzverhalten des führenden Werkers (TSUMUGIWA ET AL. 2002), Veränderung der Kontaktsituation (KRÜGER & SURDILOVIC 2008) oder des Reglerverhaltens (HENRICH & KUHN 2006) auftritt. Auch bei idealer Regelung sind Bedienfehler möglich, wenn die erforderlichen Bewegungen bzw. Freiheitsgrade für den Mitarbeiter zu komplex sind oder eine nur eingeschränkte Wahrnehmung des Handhabungsvorgangs herrscht (REINHART ET AL. 2011). Der Einsatz weiterer Assistenzsysteme oder -funktionen zur Komplexitätsbeherrschung ist möglich. Die Problematik eingeschränkter Sicht beispielsweise adressieren WOJTARA ET AL. (2009) durch Zusammensetzung mehrerer Kamerabilder in eine leicht zu erfassende Ansicht.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Orientierung des Führverhaltens an für den Bediener bekannten Vorbildern (z.B. Schubkarre, Fahrradlenker, Feder-Masse-Dämpfer-Systeme)
- Reduzierung der vom Menschen kontrollierbaren Freiheitsgrade vornehmen, wenn Aufgabe oder Bewegungsbahn zu komplex ist
- Gewährleistung der Sicht auf alle erforderliche Daten (z.B. Fügemerkmale)
- Feedback an den Bediener liefern, wenn bei kraftgesteuerten Roboterverhalten Grenzen oder Sättigungsbereiche erreicht werden

### 3.3 Kooperative und kollaborative Handhabung

Ein typischer Handhabungsvorgang in der Montage lässt sich in drei bis vier konsekutive Schritte einteilen, vgl. Tabelle 8. Am Anfang wird das Objekt aufgenommen, am Ende wird es wieder abgegeben. Bei Werkzeugen endet der Handhabungsvorgang mit dem Ablegen des Werkzeugs, bei Bauteilen mit deren Ablage oder Montage. Jeder Teilschritt kann erstens manuell, zweitens kooperativ bzw. kollaborierend, drittens koexistierend bzw. automatisch umgesetzt werden.

*Tabelle 8: Handhabungsschritte und zugehörige robotergestützte Ausführungsarten*

	Handhabungsschritte			
Handhabungsschritte nach YAMADA ET AL. (1999)	Aufnahme	Transport	Positionieren	Montieren
Handhabungsschritte nach VDI 2860	Prüfen, Mengen verändern, Sichern	Bewegen, Sichern		Prüfen, Mengen verändern, Speichern
Beschreibung manueller Tätigkeit	Greifen, Heben	Halten, Tragen, Schieben, Ziehen		Ablegen, Einsetzen
	Robotergestützte und kooperative Teilschritte			
Wechsel von/zur manuellen Ausführung	Aushändigen, Anreichen, Ablegen des Objekts/Bauteils			
kooperative, kollaborative Handhabung	Anweisen, Führen am Roboter, Fernsteuern	Anweisen, Führen am Objekt, Führen am Roboter, Fernsteuern		Anweisen, Führen am Roboter, Fernsteuern
Wechsel von / zur automatischen Ausführung	Aushändigen, Anreichen, Ablegen des Objekts/Bauteils; Kontrollübernahme, -freigabe			
Koexistenz, Automation	Objekthandhabung durch programmiertes Ausführen, sensorgestütztes Reagieren, kognitionsbasiertes Agieren			



In Tabelle 8 wird eine entsprechende Einordnung und Klassifikation der entsprechenden Ausführungsformen vorgenommen. Zwischen diesen Varianten kann während einer Handhabung gewechselt werden. Die möglichen Übergänge zwischen den Ausführungsarten illustriert Abbildung 12

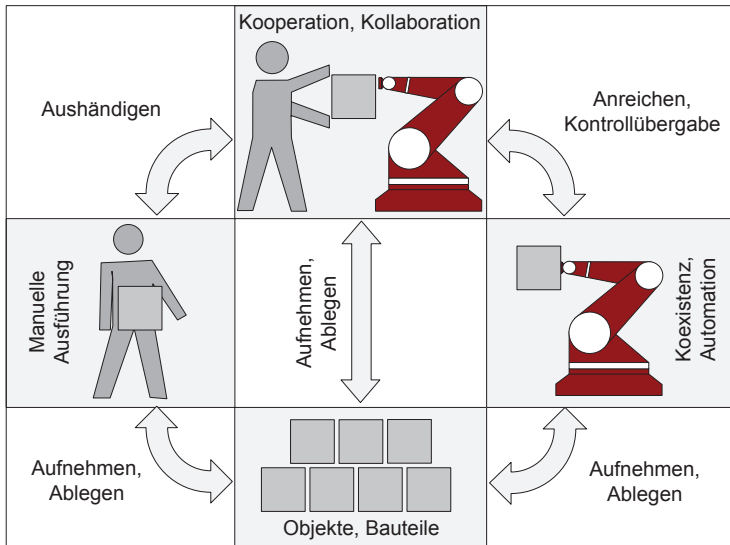


Abbildung 12: Wechsel zwischen Handhabungsschritten und Kooperationsform

Im Folgenden werden die einzelnen Übergänge und Ausführungsformen roboter-gestützter Handhabungsschritte dargelegt und mit Beispielen belegt.


### 3.3.1.1 Anweisen

Der Bediener kommandiert den Roboter ein Objekt zu handhaben. Die Anweisung kann bspw. mündlich erfolgen (EHRENMANN ET AL. 2002a mit Zeigegeräten (STOPP ET AL. 2001) oder per Bildschirm (REMAZEILLLES ET AL. 2008), siehe auch Abschnitt 3.2.6.

### 3.3.1.2 Führen am Objekt

Der Bediener steuert die Bewegungen des Objekts durch Einprägen von Kraft, Weg oder Winkel auf das Objekt. Das Objekt wird dabei vom Roboter allein oder von Mensch und Roboter gemeinsam gehalten.

*Tabelle 9: Gemeinsame Handhabung von Mensch und Roboter durch Führen am Objekt*

Beispiel	Quelle
 <p><i>Abbildung 13: Positionieren durch Kraft-eingabe am Objekt (WOJTARA ET AL. 2009)</i></p>	(AL-JARRAH & ZHEN 1997) (HAYASHIBARA & SONODA 1999) (TAKUBO ET AL. 2000) (KOSUGE & KAZAMURA 2001) (KOSUGE ET AL. 2002) (LAWITZKY ET AL. 2010)
Verwendung virtueller Handhabungs-primitive für intuitiveres, leichteres, schnelleres Führen	(ARAI ET AL. 2000) (YIGIT 2005)
Virtuelle Federn zur Feinpositionierung	(WOJTARA ET AL. 2009)
Zusammenfassung visuellen Feedbacks für Positionierung bei ungünstiger Sicht	(WOJTARA ET AL. 2009)
Einsatz zur Rehabilitation	(REINKENSMEYER ET AL. 2007)

### 3.3.1.3 Führen am Roboter

Der Bediener steuert die Bewegung des Objekts bzw. Roboters durch Einprägen von Kraft, Weg oder Winkel auf die Roboterkinematik oder auf roboternahe Eingabegeräte wie Joysticks oder 6D-Maus, vgl. auch Abschnitt 3.2.6.


Tabelle 10: Kollaborierende Objekthandhabung durch Führen am Roboter

Beispiel	Quelle
 <p>Abbildung 14: Gewichthandhabung mit Admittanzregelung (SURDILOVIC &amp; RADOJICIC 2007)</p>	(FUKUDA ET AL. 2002) (IKEURA & INOOKA 2002) (TSUMUGIWA ET AL. 2002) (STOLKA & HENRICH 2004) (SURDILOVIC & BERHARDT 2005) (LEE ET AL. 2007) (SURDILOVIC & RADOJICIC 2007) (HENRICH ET AL. 2008) (KRÜGER & SURDILOVIC 2008) (KRÜGER ET AL. 2009) (SPILLNER ET AL. 2010)
Ausgleich von Objektgewicht und Trägheit	(HAYASHIBARA ET AL. 1996)
Verwendung von Handhabungsprimitiven	(AKELLA ET AL. 1999)
Bahnführungsunterstützung	(SCHRAFT ET AL. 2004) (HELMS & MEYER 2005)
Vibrationsunterdrückung beim Führen	(ERDEN & MARIC 2011)
Positionierung mobiler Roboter bei Bahnführungsunterstützung	(HELMS 2006)
Folgen einer vorgegebenen Bahn	(SURDILOVIC & BERHARDT 2005)
Adaptives Regelverhalten für Transport und Positionierung	(HENRICH & KUHN 2006) (YAMADA ET AL. 1999)
Bewegungseinschränkungen durch Daten visueller Sensoren	(HAGER 2010)
Virtuelle Wände zur Begrenzung der Objekt- oder Roboterbewegung	(KRÜGER ET AL. 2006)
Virtuelle Förderbänder zur Beschleunigung und Erleichterung von Transportvorgängen	(REINHART ET AL. 2010c)
Feinpositionierung durch shared visual servoing / shared control	(BECKER ET AL. 2009) (REINHART ET AL. 2012)

### 3.3.1.4 Fernsteuern


Der Bediener steuert die Bewegungen des Objekts bzw. des Roboters durch Eingabe von Kraft, Weg oder Winkel auf ein roboterfernes Eingabegerät.

*Tabelle 11: Objekthandhabung per Fernsteuern in der Mensch-Roboter-Kooperation*

Beispiel	Quelle
 <p><i>Abbildung 15: Telepräsente Steuerung (REINHART ET AL. 2009b)</i></p>	(PAPANIKOLOPOULOS & KHOSLA 2002) (SUN ET AL. 2006) (ARTIGAS ET AL. 2006) (RADI ET AL. 2010) (NUNO ET AL. 2011) (GOTO ET AL. 2010) (RADI 2012)
Positionieren, Fügen mit shared visual control	(ETHIER ET AL. 2002)
Haptisches Feedback zur Montage	(REINHART ET AL. 2009b)

### 3.3.1.5 Aushändigen, Anreichen, Ablegen

*Tabelle 12: Aushändigen, Anreichen, Ablegen von Objekten in der MRK*

Beispiel	Quelle
 <p><i>Abbildung 16: Aushändigen von Objekten (HUBER ET AL. 2008)</i></p>	(REMAZEILLLES ET AL. 2008) (HUBER ET AL. 2008) (SISBOT ET AL.. 2010) (WALLHOFF ET AL. 2010) (REINHART ET AL. 2010c)
Anreichen zur manuellen Bearbeitung zur Verbesserung der Körperhaltung	(THOMAS ET AL. 20011a)

Beim Aushändigen übergibt der eine Interaktionspartner das Handhabungsobjekt an den anderen. Beim Anreichen wird, zur Unterscheidung vom Aushändigen, das Handhabungsobjekt in Aktionsnähe des Interaktionspartners gebracht, aber nicht übergeben. Beim Ablegen wird das Handhabungsobjekt so abgesetzt, dass der andere Partner es autonom aufnehmen kann.

#### 3.3.1.6 Kontrollübergabe

Bei einer Kontrollübergabe werden Steuer- und Überwachungsaufgaben bei der Handhabung zwischen Mensch und Maschine auf- bzw. zugeteilt. Bei gemeinsamen Prozessen kann der Mensch die Rollen der in der Tabelle 4 dargelegten Taxonomie übernehmen. Die Ausführungsart kann den zuvor beschriebenen entsprechen (Anweisen, Führen am Objekt, Führen am Roboter, Fernsteuern). Rolle oder Modalität können sich zu Beginn wie auch während des gemeinsamen Handhabungsprozesses wandeln. In (REINHART ET AL. 2011) beispielsweise übernimmt der Mensch bei der Handhabung eines Vordersitzes konstant die Rolle eines Beobachters. Der Vordersitz wird einer vordefinierten Bahn folgend in eine Karosserie eingefädelt, solange der Beobachter per Totmannschalter zustimmt. Bei Bedarf kann der Mensch per Eingabegerät intermittierend einen Teil der Steuerung übernehmen und die Bahn so modifizieren.

#### 3.3.1.7 Automatische, koexistente Objekthandhabung

*Tabelle 13: Automatische Objekthandhabung in Mensch-Roboter-Koexistenz und -Kooperation*

Beispiel	Quelle
Handhaben, Fügen nach Programmieren durch Vormachen	(ALBU-SCHÄFFER & HIRZINGER 2002)
Überwachung ergonomischer Kriterien bei Bewegung in Nähe von Menschen	(THIEMERMANN 2005)
Übergeben oder Ablegen nach automatischem Griff in die Kiste	(LEDERMANN 2010) (HADDADIN ET AL. 2011)
Pick-and-Place Operationen in der Nähe von Menschen	(GECKS & HENRICH 2005) (HENRICH & GECKS 2008)

Die automatische Objekthandhabung wird hier als vom Menschen separierter Prozess verstanden, vgl. Tabelle 3. Aus der Breite bestehender Automatisierungslösungen sei in Tabelle 13 speziell nur auf Arbeiten verwiesen, wo die automatische Handhabung in der Nähe vom Menschen (Koexistenz) durchgeführt wird oder wo diese Bezug auf den Menschen oder seine Arbeitsaufgabe nimmt (Kooperation). Vgl. auch Kapitel 3.2.2 und 3.2.6.

#### 3.4 Einschätzung der Technologiereife

Anhand des Stands der Technik ist eine Synthese neuer Assistenzlösungen durch Zusammensetzung bestehender Teillösungen möglich. Um eine erste Abschätzung der Umsetzbarkeit hinsichtlich Kosten- und Zeitplanung treffen zu können bietet sich eine Bewertung der Technologiereife an. Angelehnt an den „Technology Readiness Level“ der NASA (2012) wird hier zunächst eine siebenstufige Einteilung der Technologiereife vorgenommen und anschließend diese im Expertenverfahren auf die technischen Aspekte des zuvor beschriebenen Stands der Technik angewendet.

Die Stufen der Technologiereife werden wie folgt eingeteilt, siehe Tabelle 14:

*Tabelle 14: Stufung der Technologiereife*

Stufe	Merkmal
1	Das Prinzip oder die theoretischen Grundlagen wurden beschrieben.
2	Die prinzipielle Funktion wurde durch Experimente im Labormaßstab und Prototypen nachgewiesen.
3	Die Technologie wurde an tatsächlichen Anwendungsfällen erprobt.
4	Die Technologie ist mindestens zum Teil verfügbar und mindestens für Einzel- oder Spezialfälle einsatzfähig.
5	Die Technologie ist in mehreren Einsatzfällen oder in zweiter Generation erprobt. Lösungen sind für eine Vielzahl von Einsatzfällen verfügbar. Es sind wenige Standards definiert.
6	Die Technologie ist umfassend standardisiert. Lösungen sind nur für Einzel- oder Spezialfälle nicht verfügbar.
7	Die Technologie ist obsolet.

Die Einschätzung der Technologiereife der zuvor vorgestellten technischen Elemente nimmt Tabelle 15 vor:

Tabelle 15: Einschätzung zur Technologiereife des Stands der Technik

Technologien der Mensch-Roboter-Kooperation	Technologiereife						
	1	2	3	4	5	6	7
Sicherheit							
Schadensbegrenzung							
Leistungsbegrenzung							
Nachgiebigkeit							
Dämpfung an Kontaktstellen							
Kollisionsvermeidung							
Trennung							
Freigabe							
Sensorüberwachung – Person							
Sensorüberwachung – Arbeitsbereich							
Sensorüberwachung – Kinematik							
Ortsflexibilität, Mobilität, Formfaktor							
Ortsfest							
Gebunden							
Ortsflexibel							
Selbstfahrend							
Mitfahrend							
Handhabbar							
Tragbar							
Modulare und vernetzte Maschinen							
Peripherie							
Kinematik							
Endeffektoren (Greifer)							
Flexibel bzgl. Handhabungsobjekt							
Personensichere Funktion							
Duale Nutzung							
Interaktion und Programmierung							
Gelenkwinkel, Achsstellung							
Werkzeugposition, Bahn							
Signale, Peripherie							
Elementarfunktion, Ablauf							
Prozessparameter							
Produkteigenschaften							
Ziel, Aufgabe							
Vormachen							
Maschinelle Kognition							

Ausführungsarten der kollaborativen Handhabung	Technologiereife						
	1	2	3	4	5	6	7
Anweisen							
Führen am Roboter							
Führen am Objekt							
Fernsteuern							
Aushändigen, Anreichen							
Ablegen							
Kontrollübergabe							
Automatische Handhabung							
Koexistente Handhabung							

### 3.5 Zwischenfazit

In diesem Kapitel werden zunächst Grundlagen und Definitionen zum Thema Mensch-Roboter-Kooperation und Assistenzroboter geliefert. Roboterassistenz für Leistungsgewandelte zielt darauf ab, die Betroffenen in wertschöpfenden Prozessketten derart zu unterstützen, dass für sie die Ausführbarkeit und Beeinträchtigungsfreiheit einer Arbeitsaufgabe wiederhergestellt wird. Der Stand der Technik und Erkenntnisse zur Mensch-Roboter-Kooperation wird in sieben Schlüsselementen dargelegt, wobei technische, planerische und psychologische Aspekte berücksichtigt werden. Ferner wird spezifisch für die Betrachtung von Handhabungsprozessen eine Klassifizierung für Roboterunterstützung bei der Handhabung eingeführt und der technische Stand der Handhabungsassistenz dargelegt. Das Kapitel schließt mit der Technologiereifebewertung der vorgestellten Ansätze ab.

Zwar adressieren viele Arbeiten kooperative und kollaborative Funktionen. Diese richten sich aber im Wesentlichen entweder auf die Anforderungen von Prozessen und gehen nicht auf Leistungswandlungen ein, oder sie betrachten einen vollständigen Leistungsausfall bzw. Behinderungen und gehen damit über den Fokus der Leistungswandlung hinaus. Daraus folgt:

**Defizit 1:** Bisher ist noch keine umfassende Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten der Mensch-Roboter-Kooperation für betriebliche Maßnahmen vorgenommen worden, die sich an Leistungswandlungen bzw. Belegschaftsanforderungen richten.



Bisherige Vorgehen der Montagesystemplanung berücksichtigen Teilaspekte der Mensch-Roboter-Kooperation, jedoch nicht gleichzeitig die Mensch-Roboter-Kooperation und Leistungswandlungen der Mitarbeiter. Daraus folgt:

**Defizit 2:** Die vorgestellten Vorgehen zur Planung von Mensch-Roboter-Kooperationen sind nicht geeignet Leistungswandlungen einzuplanen.

Um dem demographischen Wandel zu begegnen, besteht „enormer Bedarf an gleichermaßen wirtschaftlichen und menschengerechten Gestaltungslösungen“ (ZÜLCH & STOCK 2009, S. 3). Im Bereich der Handhabung finden sich zahlreiche Entwicklungen von unterstützenden Funktionen. Diese Funktionen sind aber nur selten hinsichtlich der Einsatzmöglichkeit für verschiedene Leistungswandlungen klassifiziert und ihre Assistenzwirkung ist nur selten quantifiziert. Daraus folgt:

**Defizit 3:** Es mangelt an Beispielen („Best Practice“) von Roboterassistenztechnologien und ihres Einsatzes zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion.

### 3.6 Ableitung des Handlungsbedarfs

In der Einleitung Kapitel 1 wird der Einsatz von Roboterassistenzsystemen als weitere Möglichkeit zur Bewältigung der Herausforderungen des demographischen Wandels motiviert. Der Mensch-Roboter-Kooperation wird das Potenzial zugesprochen, Arbeitsbelastungen zu reduzieren, Leistungsgewandelte zu unterstützen und die Pro-Kopf-Produktivität zu erhöhen. In Kapitel 2 wurde dargelegt, dass die bisherigen betrieblichen Maßnahmen zur Berücksichtigung von Belegschaftsanforderungen bzw. Leistungswandlungen keine Mensch-Roboter-Kooperation betrachten. Auch aus der Blickrichtung der Mensch-Roboter-Kooperation in Kapitel 3 stellt sich dar, dass bisher keine allgemeine Übersicht an potenziellen Maßnahmen zur Assistenz von Leistungsgewandelten besteht. Daraus ergibt sich der Handlungsbedarf 1.

In Zusammenfassung von Kapitel 2 und Kapitel 3 kann festgestellt werden, dass es bisher kein Vorgehen zur Montagesystemplanung gibt, welches beide Domänen (Berücksichtigung von Leistungswandlungen und Roboterassistenz) verbindet. Hieraus ergibt sich der Handlungsbedarf 2.

In Kapitel 3 wird geschlossen, dass die Anzahl konkreter Assistenzbeispiele nur gering ist, daran jedoch ein großer Bedarf besteht. Die Relevanz konkreter, anwendungsorientierter Beispiele ergibt sich daraus, dass davon auszugehen ist,

dass Entscheidungen in der Montagesystemplanung, die unter unternehmerischem Risiko getroffen werden, bevorzugt auf erprobte Lösungen fallen. Hieraus leitet sich Handlungsbedarf 3 ab.

Es ergeben sich also folgende Handlungsbedarfe und Zielsetzungen:

**Handlungsbedarf 1:** Es ist eine Übersicht über Einsatzmöglichkeiten und -potenzial einer Mensch-Roboter-Kooperation bzw. Roboterassistenz als Teil betrieblicher Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen zu erstellen. Um den Fokus dieser Arbeit gerecht zu werden, ist ferner das Assistenzpotenzial innerhalb von Handhabungsprozessen zu betrachten. Siehe Kapitel 4.

**Handlungsbedarf 2:** Es ist ein Vorgehen zur Planung von Roboterassistenz als Erweiterung oder Spezifizierung bestehender Planungsmethoden zu entwerfen. Hierfür sind folgende Punkte zu adressieren: die Eingrenzung geeigneter Zeitpunkte für eine Maßnahmenberücksichtigung; eine Vorgehensbeschreibung für Auswahl, Layout, Gestaltung; Möglichkeiten für Feedback zur Verbesserung der Maßnahmenkataloge oder Vorgehensweisen. Siehe Kapitel 5.

**Handlungsbedarf 3:** Es gilt, die Menge an anwendungsorientierten Beispielen zur Roboterassistenz für Leistungsgewandelte zu erweitern. Hierzu ist das entwickelte Planungsvorgehen an einem Beispiel zu demonstrieren. Dabei soll ein neuartiges Roboterassistenzsystem oder eine neue Assistenzfunktion eingeplant werden. Siehe Kapitel 6.

## 4 Möglichkeiten robotergestützter Assistenz innerhalb betrieblicher Maßnahmen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den potenziellen Beitrag von Robotern zur Berücksichtigung von Einsatzeinschränkungen und Leistungswandlungen entwickelt. Hierzu wird zunächst eine Bewertungsmethode eingeführt. Anschließend werden Ansätze des Robotereinsatzes für die einzelnen betrieblichen Maßnahmen synthetisiert und bewertet. Die als geeignet bewerteten Maßnahmen werden in einer Übersicht zusammengefasst.

Danach wird die Roboterassistenz bei Handhabungsprozessen betrachtet, wobei die einzelnen Ausführungsarten der Kooperation hinsichtlich der Unterstützung einzelner Leistungswandlungen diskutiert und bewertet werden. Die bewerteten Kombinationsmöglichkeiten werden dann in einer Tabelle zusammengefasst.

Abschließend werden Archetypen der Roboterassistenz für Leistungsgewandelte definiert und in einem Beispiellayout illustriert und erläutert.

### 4.1 Potenzial robotergestützter Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen

#### 4.1.1 Einschätzung des Maßnahmenpotenzials

Um eine Bewertung des Maßnahmenpotenzials durchzuführen werden die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen in je vier Dimensionen im Expertenverfahren charakterisiert. Die Bewertungskriterien und ihre Ausprägung und zugehörige Gewichtung sind in Tabelle 16 dargelegt.

*Tabelle 16: Bewertungsmaßstab für das Maßnahmenpotenzial*

Charakterisierung	
Gewichtung	Ausprägung
Nutzenhäufigkeit	
1	Kleiner Anwenderkreis, seltene Anwendung, wenig Anwendungsfelder
2	Mittlerer Anwenderkreis, häufige Anwendung, einige Anwendungsfelder
3	Großer Anwenderkreis, ständige Anwendung, viele Anwendungsfelder
Nutzenhöhe	
1	Keine oder nur geringe Unterstützung der Mitarbeiter
2	Verbesserung der allgemeinen Arbeitsbedingungen, Verbesserung der Bedienung, Nutzung oder Akzeptanz des Assistenzsystems

3	Entlastung, Erleichterung, Verbesserung in der konkreten Arbeitsausführung des Mitarbeiters
4	Befähigung oder Wiederbefähigung des Mitarbeiters zur Arbeitsausführung
Kosten der Einführung	
1	Technologie verfügbar, geringer Aufwand, Reifestufen 4-6
2	Technologie teilweise verfügbar, mittlerer Aufwand, Reifestufen 3-5 oder 7
3	Technologie kaum oder nicht verfügbar, hoher Aufwand, Reifestufen 1-3
Kosten im Betrieb	
1	Assistenzsystem oder -funktion erzielt aus seiner Nutzung heraus Kostenneutralität oder Kostenreduktion für das Arbeitssystem
2	Assistenzsystem oder -funktion erzielt unter günstigen Begleitumständen (z.B. Integrierbarkeit einer Funktion in bereits vorhandene Geräte) Kostenneutralität oder Kostenreduktion
3	Assistenzsystem oder -funktion verursacht geringe oder mittlere zusätzliche Kosten
4	Assistenzsystem oder -funktion verursacht erhebliche zusätzliche Kosten

Durch Verrechnung der Größen lässt sich eine Potenzialkennziffer wie folgt bestimmen:

Formel 4-1

$$\text{Potenzialkennziffer} = \frac{\text{Nutzenhäufigkeit} \cdot \text{Nutzenhöhe}}{\text{Kosten der Einführung} + \text{Kosten im Betrieb}}$$

Ein höherer Wert entspricht dabei einem größeren Einsatzpotenzial der Maßnahme. Die so gewählte Kennziffer begünstigt praktikable Lösungen durch Einbeziehung von Kosten und Verfügbarkeit. Ist ein Kriterium einer Maßnahme von Experten stark unterschiedlich bewertet worden, ist dies mit ‚!‘ nach dem gemittelten Wert gekennzeichnet. Eine Maßnahme wird als praktikabel gewertet, wenn die Kennziffer ein Potenzial größer gleich eins bestimmt.

### 4.1.2 Synthese allgemeiner robotergestützter Maßnahmen

In Abschnitt 2.2 werden die bestehenden betrieblichen Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in einem Katalog zusammengefasst und erläutert. Auf dieser Basis wird in diesem Abschnitt betrachtet, ob und inwiefern sich diese Maßnahmen mit Robotern bzw. mit Roboterassistenz darstellen ließen. Die Ansätze werden kurz erläutert und setzen eine Kenntnis der betrieblichen Maßnahmen (Kapitel 2) sowie der technischen Möglichkeiten und Einschränkungen voraus.

kungen der Mensch-Roboter-Kooperation (Kapitel 3) voraus. Von den über 60 bewerteten Ansätzen zeigt *Tabelle 17* einen Auszug. Die vollständige Liste ist in Tabelle 35 im Anhang 9.5 nachzulesen.

*Tabelle 17: Auszug robotergestützter betrieblicher Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen*

#	Maßnahmeneinordnung und –beschreibung	Bewertung				
		Nutzenhäufigkeit	Nutzenhöhe	Einführungskosten	Betriebskosten	Potenzialkennziffer
I	<b>Robotergestützte Prävention</b>					
a	Gesundheitsförderung, Information, Aufklärung					
1	Beratung zur Arbeitsausführung	1	1	3	4	0,15
	Menschliche Ansprechpartner und Berater werden am Ort der Arbeitsausführung durch mobile Roboter mit Telepräsenzausstattung verfügbar oder durch autonome Agentensysteme ersetzt. Beispiel: Die Beobachtung einer ungünstigen Körperhaltung löst eine Präsentation von Hinweisen zum richtigen Heben aus.					
II	<b>Robotergestützte Integration</b>					
c	Job-Enlargement, -Enrichment, -Rotation					
1	Job-Enlargement	2	3	1	2!	2!
	Die gezielte, koexistente Automation von Teilaufgaben kann zur Homogenisierung des Aufgabenspektrums eines Mitarbeiters genutzt werden. Stark belastende oder einsatzeinschränkende Teilaufgaben werden gezielt eliminiert. Die durch Automation erzielten Zeitgewinne und Belastungsreduktionen ermöglichen den Anteil gleichartiger Arbeits(teil)aufgaben für den Menschen zu steigern.					
e	<b>Alternsgerechte Arbeitsgestaltung</b>					
3	Körperhaltung: Überkopfarbeit	2	4	2	4	1,33
	Zur Eliminierung von Überkopfarbeit sind Automation oder telepräsente Arbeit nutzbar. In der Verwendung als Hebebühne hebt der Roboter den Menschen zum Arbeitsort. Als Haltevorrichtung senkt der Roboter den Arbeitsort bzw. das zu bearbeitende Objekt zum Menschen herab.					

In Zusammenfassung wurden drei Gruppen von Maßnahmen als praktikabel bewertet, welche nachfolgend erläutert und die Maßnahmenkarte eingeordnet werden, siehe Abbildung 17.

Zunächst gibt es eine Gruppe von drei Maßnahmen, die die Einführung und Durchführung der anderen Maßnahmen unterstützt (gebrochene Umrandung, Abbildung 17): Durch eine ‚automationsgerechte Produkt- und Prozessgestaltung‘, werden die technischen Anforderungen einer Roboterassistenz reduziert und deren Einführung erleichtert. Ferner verhindert eine ‚Planung unter Berücksichtigung von MRK‘ die Notwendigkeit späterer Anpassungsplanungen und entsprechender Kosten beim Nachrüsten einer Roboterassistenz. Durch Erstellen und Anwenden von Eignungs- und Einsatzprofilen von Roboterassistenzlösungen schließlich wird die Zuordnung von robotergestützten Maßnahmen zu den Anforderungen von Leistungswandlung und Einsatzgebiet ermöglicht und dadurch die Montagesystem- und Einsatzplanung vereinfacht.

Die zweite Gruppe besteht aus qualifikationsbezogenen Maßnahmen. Nach einer entsprechenden ‚Qualifikation‘ ist ein Planen, Einrichten, Programmieren oder Warten von roboterbasierten Systemen durch den geschulten Mitarbeiter durchführbar. Dies kann zum einen im Sinne eines ‚Job-Enrichments‘ zur Anreicherung von Montageaufgaben dienen. Zum anderen kann auch ein neuer Arbeitsplatz eingerichtet werden, an welchem der geschulte Mitarbeiter nur noch derartige ‚dedizierte Servicetätigkeiten‘ ausführt.

Die dritte Gruppe betrifft den eigentlichen Einsatz von Roboterassistenzsystemen im Zuge ‚ergonomischer‘, ‚altersgerechter Arbeitsplatzgestaltung‘, bei der ‚Schaffung von Bereichen einfacherer Arbeit‘ oder bei dem ‚Einrichten neuer assistierter Arbeitsplätze‘. Dabei zielt der Robotereinsatz darauf ab, eine Reduktion oder Eliminierung von hohen oder einsatzeinschränkenden Arbeitsbelastungen zu erreichen. Der Roboter kann dabei zum einen kollaborierend als Hilfsmittel, zum anderen koexistent zur Automation von Teilaufgaben eingesetzt werden. Durch geeignete Aufgabenteilung ist ein ‚Job-Enlargement‘ umsetzbar, bei dem der Mensch nur die für ihn noch ausführbaren, einfacheren oder anspruchsvolleren Aufgaben erledigt. Für eine Job-Rotation erscheint es als vorteilhaft, ein am Arbeitsplatz ortsfestes Assistenzsystem zu verwenden. Dies liegt darin begründet, dass ein ortsfestes Assistenzsystem keiner aufwendigen Mobilisierung bedarf und zweitens nur ein Arbeitsplatz hinsichtlich der Roboterassistenz anzupassen ist.

Als potenzialreiche Anwendungsgebiete werden im weiteren Detail gesehen:

- das Anreichen von Objekten in optimaler Pose zur Verbesserung der Körperhaltung, Erweiterung des Arbeitsraumes und zum Ermöglichen von Steh-Sitz-Arbeit;
- die Entkopplung von der Taktbindung durch Automation von Teilaufgaben;
- der Einsatz als Hebezeug zur Reduktion von Kraftanforderungen beim Handhaben, Montieren oder Fügen;
- der Einsatz als Greifhilfe bei gefährlichen, empfindlichen oder schwer von Hand zu manipulierenden Objekten;
- das Ausgliedern stark belastender Aufgaben durch Automation und Teilautomation.

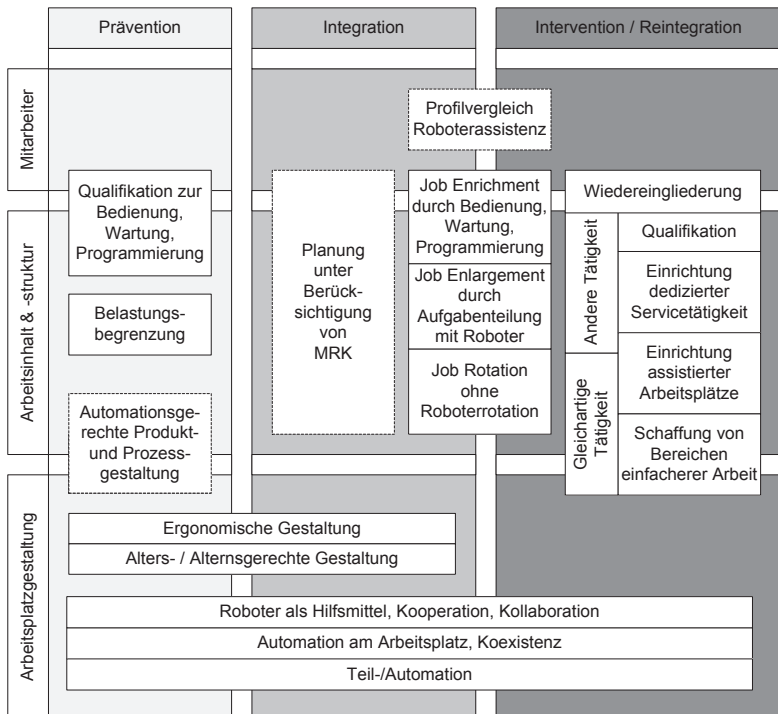


Abbildung 17: Übersicht über die als praktikabel bewerteten robotergestützten betrieblichen Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen

## 4.2 Handhabungsassistenz und Leistungswandlung

Im Folgenden werden die Möglichkeiten robotergestützter Handhabungsassistenz hinsichtlich unterschiedlicher Leistungswandlungen erörtert und bewertet.

### 4.2.1 Erörterung

Dabei werden für alle Handhabungsschritte (vgl. Tabelle 8) die jeweiligen Kooperationsarten einzeln durchgesprochen und eine Einschätzung der Unterstützung in den verschiedenen Klassen von Leistungswandlungen (vgl. Tabelle 1) vorgenommen. Vergleichende Aussagen und Wertungen der Ausführungsarten beziehen sich jeweils auf nicht assistierte aber sonst gleiche Tätigkeiten. Die Einschätzung der technischen Aspekte beruht auf Kapitel 3.

Tabelle 18 zeigt einen Auszug der vorgenommenen Diskussion, die in Gänze in Tabelle 36 im Anhang 9.6 nachvollziehbar ist.

*Tabelle 18: Auszug der Diskussion der Ausführungsarten kooperativer Handhabung bezüglich der Unterstützung von Leistungswandlungsklassen*

A	Unterstützung beim Aufnehmen, Greifen
2	Führen am Roboter
a	Unterstützung der Kraft: Führt der Mitarbeiter den Roboter zum Objekt um es dort vom Roboter greifen zu lassen ist eine Entlastung von den Greif- und Haltekräften sowie ggf. beim Heben gegeben – hinreichend kleine Führkräfte oder große Objektgewichte vorausgesetzt.
b	Unterstützung der Körperhaltung: Durch Nutzung von ergonomischen Eingabegeräten ist eine Verbesserung der Handstellung bedingt möglich. Eine Verbesserung der restlichen Körperhaltung oder Gelenkstellung beim Führen des Roboters in Flansch- oder Effektnähe ist ohne weitere Maßnahmen (wie eine Umpositionierung der Bereitstellungsbehälter) nicht zu erreichen. Die Zugänglichkeit wird tendenziell abnehmen, da das Robotersystem zusätzlichen Raum beansprucht und der Mitarbeiter zur Bedienung in der Nähe sein muss. Eine Haltungsverbesserung wie auch eine Erleichterung der Zugänglichkeit wären möglich, wenn die Eingabe an anderer Stelle am Roboter erfolgen kann, bspw. wenn ein Objekt in Bodennähe gegriffen werden soll und ein Joystick in Hüfthöhe am Roboter befestigt ist. Durch die dann folgende Distanz von Eingabegerät und Greifpunkt kann eine Verschlechterung der Sichtverhältnisse auftreten, die Zwangshaltungen (Nacken, Rumpf) des Bedieners verursachen können. Dem kann mit zusätzlichen Anzeigen oder sensorgestützten Funktionen (shared visual control, shared control) begegnet werden.



c	Unterstützung der Sensomotorik: Kleine oder eng beieinander stehende Objekte können durch angepasste Effektoren gegriffen werden und so Anforderungen an Fingerkräfte und Fingerfertigkeit reduzieren. Die Präzision der kollaborativen Bewegung kann durch sensorgestütztes shared control oder adaptives Regelverhalten unterstützt werden.
d	Unterstützung bzgl. Zeitregime und Leistungsflexibilisierung: Wegstrecke und Häufigkeit der Handhabung bleiben durch die Roboterassistenz weitgehend unbeeinflusst. Die Dauer des kollaborierenden Greifvorgangs wird durch die erzielbare Führgeschwindigkeit, das Ansprechverhalten des Robotersystems und die Qualität des Feedbacks für den Bediener beeinflusst. Die Dauer dürfte im Allgemeinen zunehmen. Eine Beschleunigung würde durch zusätzliche Roboterfunktionen wie virtuelle Wände oder virtuelle Federn ermöglicht. Diese setzen voraus, dass entweder das zu greifende Objekt in einer bekannt Pose bereitgestellt wird oder dass zusätzliche Sensoren zur Objekt- oder Merkmallokalisation integriert werden. Sicherheitsbedingt müssen kollisionsvermeidende Robotersysteme wegen der Nähe zu den zu greifenden Objekten, der Bereitstellungsbehälter und des Menschen die Bewegungsgeschwindigkeit reduzieren. Inhärent sichere bzw. schadensbegrenzende Robotersysteme auf der anderen Seite ließen sich ggf. schneller führen, weisen aber eine nur geringe Traglast bis 15 kg auf. In beiden Fällen kann eine Akzeptanz des Systems fraglich sein, vgl. (KALTENBRUNNER & SPILLNER 2013).
e	Unterstützung bzgl. Umgebungsbedingungen: Durch die Nähe zum Roboter ist im Regelfall davon auszugehen, dass keine Entlastung von Umgebungsbedingungen des Arbeitsplatzes darzustellen ist. Das Robotersystem selbst stellt eine neue Unfall- und Gefahrenquelle dar.

### 4.2.2 Bewertung und Übersicht

Zur Bewertung der einzelnen Kombinationsmöglichkeiten wird auf Basis der Erörterung unterschieden, ob diese zur Kompensation von Leistungswandlungen geeignet, bedingt geeignet oder nachteilig erscheinen. In Tabelle 19 werden Erörterung und Bewertung zusammengefasst. Diese dadurch erstellte Übersicht ermöglicht eine Groborientierung zur weiteren Betrachtung und Gestaltung einer robotergestützten Handhabungsassistenz. Ausgangspunkt solcher Betrachtungen können Assistenz- oder Kompensationsbedarfe von Leistungswandlungen oder Arbeitsanforderungen allgemein oder innerhalb einzelner Handhabungsschritte bilden. Für eine weitere technische Orientierung und Detaillierung sei auf die Abschnitte 3.2 und 3.3 verwiesen.

*Tabelle 19 Eignung zur Kompensation unterschiedlicher Leistungswandlungen je nach Handhabungsschritt und Ausführungsform der Mensch-Roboter-Kooperation*

	Handhabungs-schritt				Art der Unterstützung					
Kooperationsform		Aufnehmen, Greifen	Transportieren, Tragen	Positionieren, Halten	Ablegen, Montieren	Kraft	Körperhaltung	Sensomotorik	Zeitregime	Umweltbedingung
Führen am Objekt										
Führen am Roboter										V
Fernsteuern									V	
Automation, Koexistenz									V	
Anweisen									V	
Aushändigen, Ablegen										
Anreichen										
Ablegen										
Legende		zutreffender Handhabungsschritt								
		Eignung zur Kompensation								
		bedingte Eignung								
	V	Verschlechterung möglich								

### 4.3 Darstellung archetypischer Maßnahmen und Einsatzbeispiele

In diesem Abschnitt werden der bisher abstrakten Diskussion robotergestützter Maßnahmen bildhafte Archetypen der Roboterassistenz zur Seite gestellt. Hierzu werden an Hand eines fiktiven Layouts Beispiele einiger Maßnahmen und Assistenzlösungen illustriert, die aus den bisher beschriebenen Ansätzen und Technologien (vgl. Abschnitte 4.1.2, 3.3, 3.2) synthetisiert werden.

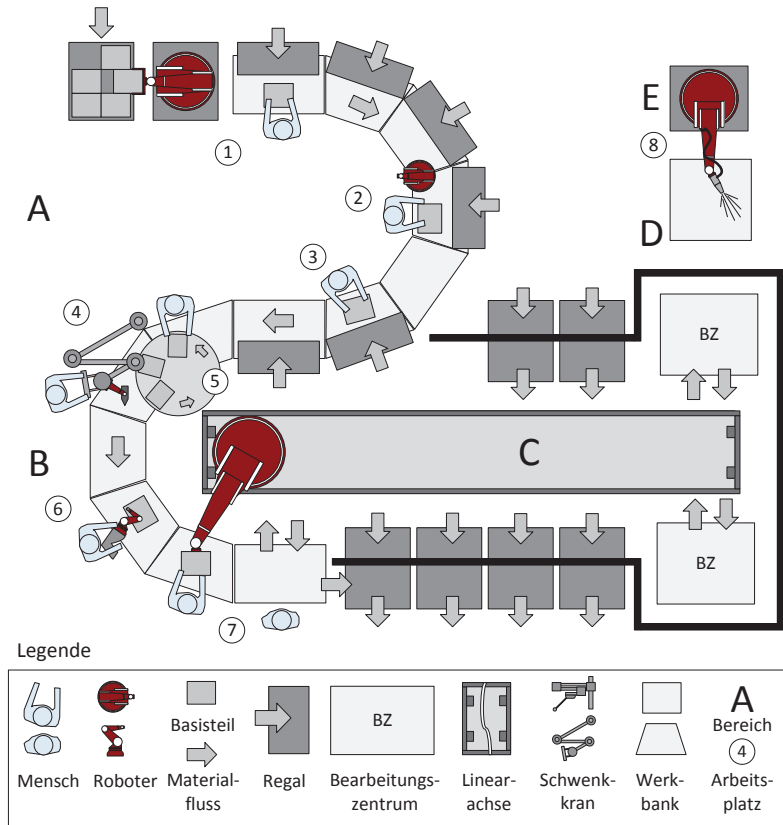


Abbildung 18: Beispiellayout einer getakteten Linie mit Roboterassistenz (Beschreibungen der Bereiche und Arbeitsplätze im Folgenden)

In Abbildung 18 ist ein Linienlayout samt Materialflussrichtung dargestellt. Es enthält acht Assistenzbeispiele (1-8) auf Arbeitsplatz- bzw. Mikroebene, ferner

fünf Bereiche (A-E) mit Bezug auf allgemeine und arbeitsplatzübergreifende Maßnahmen. Diese werden im Folgenden erläutert.

### **4.3.1 Beispiele allgemeiner und arbeitsplatzübergreifender, bereichsbezogener Maßnahmen**

#### **Bereich A: Normale Arbeitsplätze - zeitweise integrative, dauerhaft präventive Roboterassistenz**

In Bereich A arbeitet eine gemischte Mitarbeitergruppe mit und ohne Leistungswandlungen in einem U-Layout mit Job-Rotation. Die Arbeitsanforderungen sind für Mitarbeiter ohne Leistungswandlungen ausgelegt. Die hier eingesetzte Roboterassistenz ist entweder für einen zeitweisen Einsatz gedacht (1, 2) und entsprechend ortsflexibel und leicht am Arbeitsplatz integrierbar gestaltet. Oder die Assistenz dient im Sinne ergonomischer und präventiver Arbeitsgestaltung allen Mitarbeitern unabhängig von Leistungswandlung (3). Zur einfacheren Integration größerer Roboter bieten sich bevorzugt die Seite des einzelnen Arbeitsplatzes bzw. Anfang/Ende der Linie (1) sowie die Rückseite des Arbeitsplatzes (3) an. Dies erleichtert die Berücksichtigung von Platzbedarf, Sicherheitsanforderungen sowie Verkettung oder die Integration zusätzlicher automatisch auszuführender Arbeitsinhalte.

#### **Bereich B: Schonarbeitsplätze - dauerhaft integrative und reintegrative Roboterassistenz**

Unter B werden mehrere Arbeitsplätze zu einem Bereich einfacherer Arbeit zusammengefasst. Hier arbeiten vorwiegend Mitarbeiter mit bestehenden Leistungswandlungen. Das U-Layout ist umgekehrt, die Mitarbeiter arbeiten außen, die (automatische oder kooperative) Bereitstellung und das Roboterassistenzsystem liegen innerhalb des Us. So kann ein einzelnes, kostenintensives Assistenzsystem mehreren Mitarbeitern bzw. mehreren Arbeitsplätze unterstützen.

#### **Bereich C: Verkettung manueller, hybrider und automatischer Arbeitsstationen**

Im Bereich C kann das über eine Linearachse ortsgebundene Robotersystem zum einen Arbeitsplätze mit der Logistik verbinden, d.h. Bauteile oder Behälter vom und zum Arbeitsplatz bringen. Zum anderen kann der Materialfluss zwischen mehreren der assistierten Arbeitsplätze (B) untereinander, mit der Logistik, weiteren Arbeitsplätzen oder z.B. automatischen Bearbeitungszentren verkettet werden. Auch ein autonomer Betrieb ohne Assistenz ist realisierbar, z.B. das Be-

und Entladen der Bearbeitungszentren. Der Vorteil liegt in der potenziell höheren zeitlichen Auslastung des kostenintensiven Robotersystems während und insbesondere außerhalb der Zeiten mit Assistenzbedarf. Der Bereich C ist Menschen während des Betriebs nicht zugänglich so dass hohe Bahngeschwindigkeiten erzielbar sind. Beides erleichtert eine Kostenargumentation. Bei häufigen Assistenzbedarfen ist allerdings ein erhöhter Koordinationsaufwand innerhalb der assistierten Arbeitsplätze oder ggf. mit Wartezeiten seitens der Mitarbeiter zu rechnen, da der Roboter den Mitarbeitern nur einzeln assistiert.

#### **Bereich D: Automation - Zusammenfassung von automatischen Stationen und Bereichen ungünstiger Umgebungsbedingungen**

In Bereich D werden mehrere Bearbeitungszentren zusammengelegt und von den Mitarbeitern (in A, B) entfernt bzw. abgeschottet. Dass erzielt eine Entlastung von typischen Umweltbedingungen dieser Anlagen wie z.B. Lärm, Vibration, Emission. Ferner erleichtert die Zusammenfassung die Verkettung mit dem Robotersystem.

#### **Bereich E: Schaffung neuer Arbeitsplätze**

In Bereich C werden neuartige Arbeitsinhalte zusammengefasst, die von Mitarbeitern mit zusätzlicher Qualifikation ausgeführt werden. Hierzu zählen Reinigungsprozesse (8) die mit Roboterunterstützung ausgeführt werden, ferner aber auch Transport, Inbetriebnahme und Wartung der anderen Roboterassistenzsysteme der Linie.

### **4.3.2 Assistenzbeispiele auf Arbeitsplatzebene**

In diesem Abschnitt werden die Beispiele auf Arbeitsplatzebene vorgestellt. Die Erläuterungen richten sich inhaltlich und ihrer Reihenfolge nach folgenden Themen: Assistenz, Integration des Assistenzsystems am Arbeitsplatz, Aufgabe des Roboters, Rolle des Mitarbeiters in der Kooperation, Sicherheitsmaßnahmen.

#### **Arbeitsplatz 1: Hebehilfe**

Das Assistenzsystem integriert Mitarbeiter, die das Ab stapeln der palettierten Objekte aufgrund von Leistungswandlungen, insbesondere in den Bereichen Kraft und Körperhaltungen nicht oder nur bedingt ausführen können. Nicht Leistungsgewandelte werden präventiv entlastet.

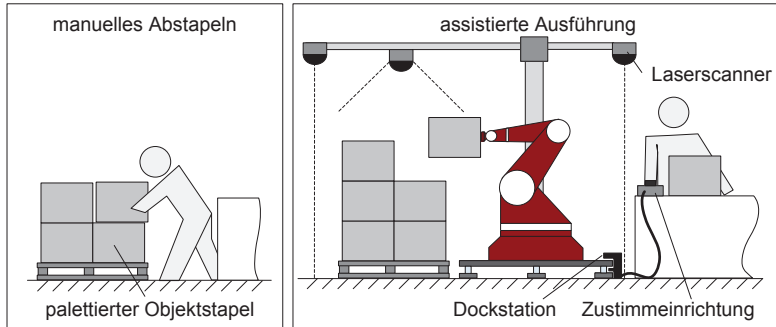


Abbildung 19: Roboter als Hebehilfe

Der Roboter ist ortsflexibel gestaltet und wird samt Steuerung und Sicherheitseinrichtungen durch einen Hubwagen vor Ort transportiert. Eine am Arbeitsplatz bereits integrierte Dockstation stellt Stoff- und Energieversorgung sicher und definiert die Position des Systems, so dass nach dem erstmaligen Einrichten keine Änderungen an z.B. der Zielposition beim Ablegen vorgenommen werden müssen.

Die Rolle des Roboters in dieser Kooperation besteht zunächst darin, die Objekte im Stapel automatisch zu identifizieren, zu greifen und in Richtung des Arbeitsplatzes zu transportieren. Zum Orten der Objekte und zum Greifen wird eine Lösung des ‚Griffs in die Kiste‘ verwendet, wobei als Sensor ein Laserscanner zum Einsatz kommt, der an einem Schwenkarm befestigt ist.

Die Rolle des Mitarbeiters in der Kooperation besteht darin, den letzten Handhabungsschritt per Taster auszulösen und zu überwachen, in der der Roboter das Objekt auf den Arbeitstisch positioniert und ablegt. Das beim manuellen Abstapeln erforderliche Bücken, Drehen oder Heben, Greifen, Halten des Objekts entfällt für den Mitarbeiter.

Die Sicherheit wird durch zwei Maßnahmen gewährleistet. Zum einen wird eine Bereichsüberwachung des Greif- und Transportprozesses durchgeführt, die durch Sicherheits-Laserscanner am Schwenkarm realisiert wird. Zum anderen wird das Positionieren und Ablegen vom Mitarbeiter visuell überwacht und per Zustimmeinrichtung freigegeben. Wegen besonderer Quetschgefahr für die Hände ist diese als Zweihandtaster ausgeführt. Durch die Aufteilung in einfache, sensorisch überwachte und komplexe, vom Mitarbeiter überwachte

Sicherheitsräume entfällt vorteilhafterweise ein detailliertes Zuschneiden der Sicherheitsbereiche hinsichtlich der Arbeitsplatzkonfiguration.

#### Arbeitsplatz 2: Taktentlastung

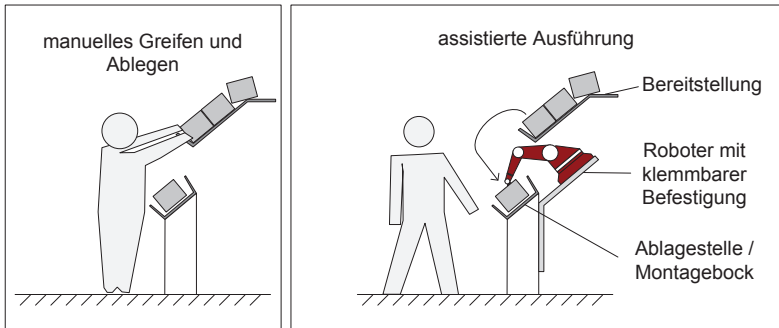


Abbildung 20: Roboter zur Entlastung von der Taktbindung

Dieses Assistenzbeispiel integriert Mitarbeiter die innerhalb getakteter Montagelinien Leistungswandlungen im Bereich des Zeitregimes aufweisen und z.B. eine Verlangsamung des Taktes oder Reduzierung der Arbeitsinhalte benötigen. Ferner kann eine verringerte Reichweite z.B. kleiner Mitarbeiter kompensiert werden.

Der Roboter ist durch geringes Gewicht und geringe Größe manuell handhabbar und kann von einem einzelnen Mitarbeiter installiert werden. Hierzu wird die Bodenplatte des Roboters an bestehende Gestänge oder Profile des Arbeitsplatzes geklemmt. Die Energieversorgung wird über die normale Stromversorgung des Arbeitsplatzes realisiert. Zur Demontage wird die Verklebung gelöst.

Die Aufgabe des Roboters besteht darin, ein Objekt automatisch aus der Bereitstellung zu greifen und auf einem Montagebock in Nähe des Mitarbeiters abzulegen. Die Bereitstellung ist als Rutsche ausgeführt, so dass der Greifpunkt für den Roboter konstant bleibt und keine zusätzliche Sensorik erfordert. Der Vorgang wird ausgelöst, sobald das zuvor abgelegte Objekt aus dem Montagebock entnommen wurde, was durch eine Lichtschranke detektiert wird. Gegenüber einem Taster als Auslöser hat dies den Vorteil, dass es dem Mitarbeiter, der im Bereich des Zeitregimes unterstützt werden soll, keine weiteren Aktionen kostet.

Der Mitarbeiter führt weitere Montageoperationen am Objekt im Montagebock durch und gibt dieses dann an den nächsten Arbeitsplatz weiter. In der Kooperation ist der Mitarbeiter der Auslöser. Für ihn entfällt das Greifen und Ablegen des Objekts, wodurch er mehr Zeit für die übrigen Montageaufgaben hat.

Die Sicherheit wird dadurch gewährleistet, dass ein inhärent sicherer Roboter mit geringer Traglast und nachgiebiger Kinematik verwendet wird.

#### Arbeitsplatz 3: Automatische Bereitstellung

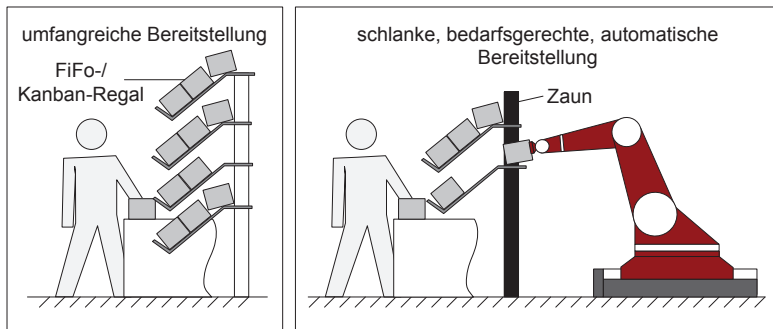


Abbildung 21: Roboter zur Bereitstellung in KanBan-Regalen

Diese Assistenz integriert Mitarbeiter mit eingeschränktem Greifraum oder Leistungswandlungen im Bereich der Körperhaltung. Ferner gestalten sich hierdurch für alle Mitarbeiter günstigere Greifbedingungen. Zu einem geringen Teil können auch Konzentrations- oder Kurzzeitgedächtnis-Schwächen kompensiert werden.

Das Robotersystem kann den Arbeitsplatz durch eine Linearachse von der Rückseite her erreichen. Wegen des erhöhten Installationsaufwands ist die eine dauerhafte Integration des Robotersystems an diesen Arbeitsplatz vorgesehen. Aus gleichem Grund werden Aufbau und Einrichtung bevorzugt nur im Zuge einer Neugestaltung mehrerer verbundener Arbeitsplätze bzw. eines Bereiches vorgenommen.

Der Roboter holt automatisch Objekte und Bereitstellungsbehälter aus Lagern, die er über seinen per Linearachse erweiterten Greifraum erreicht. Die gegriffenen Objekte werden in die Fächer des Regals beim Mitarbeiter abgelegt, wo diese auf Rutschen zum Mitarbeiter gleiten. Die Objekterkennung und -lokalisierung erfolgt mit optischen Sensoren am Roboterflansch über Markierungen an



den Behältern. Auslöser für das Nachfüllen sind zum einen Sensordaten zum Füllstand des Regals am Arbeitsplatz oder zum anderen direkte Anforderungen vom Mitarbeiter über ein zusätzliches Touch-Panel. Die Zuordnung von Auftrag und Objekt oder Bereitstellungsbehälter wird über ein ERP-System eingebunden. Unterschiedliche Objektvarianten werden just-in-sequence beim Mitarbeiter abgelegt. Analog werden leere Behälter vom Mitarbeiter zum Logistik-Lager zurückgebracht.

Die Rolle des Mitarbeiters liegt darin, den Nachfüll- oder Bereitstellungsvorgang des Roboters auszulösen. Dies geschieht indirekt durch Verbrauch der bereitgestellten Materialien oder durch direkte Anforderung. Durch das regelmäßige automatische und sequenzrichtige Bereitstellen reichen wenige Regalfächer aus um mehrere Produktvarianten vom Mitarbeiter montieren zu lassen. Dies erlaubt alle Fächer im für den Mitarbeiter ergonomischen oder fähigkeitsgerechten Greifraum zu positionieren. Dies wirkt positiv insbesondere auf den Bereich der Körperhaltung. Durch die Bereitstellung just-in-sequence muss der Mitarbeiter weniger auf Unterscheidungs- und Versionsmerkmale achten, was die geistigen Anforderungen senkt.

Ein Sicherheitszaun trennt den Arbeitsraum von Roboter und Mitarbeiter bzw. Arbeitsplatz ab. Ein Durchstoßen des Regals wird durch eine Arbeitsraum- bzw. Achsbeschränkung des Roboters mit einer sicheren Robotersteuerung realisiert.

#### Arbeitsplatz 4: Positionierhilfe

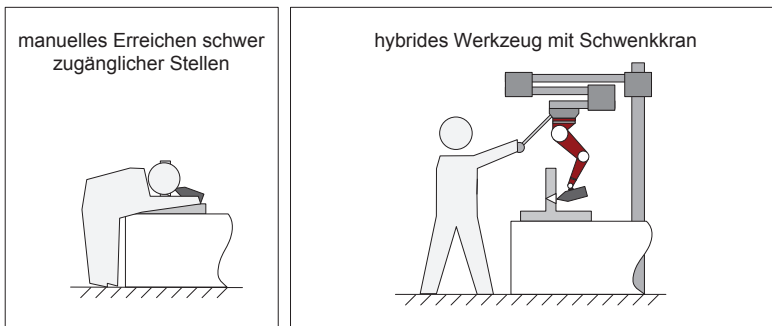


Abbildung 22: Robotergestützte Positionierhilfe

Diese Variante integriert Mitarbeiter, die bei Positionieraufgaben insbesondere an schwer zugänglichen oder schlecht einsehbaren Stellen Leistungswandlungen im Bereich der Sensomotorik, Körperhaltung, ferner im Zeitregime aufweisen.

Da ein erhöhter Aufwand zur Einrichtung vorliegt, ist diese bevorzugt während der Neugestaltung des Bereichs oder des Arbeitsplatzes für einen dauerhaften Einsatz vorzunehmen. Die Kinematik des Roboters ist an einem Schwenkkran befestigt, die Stoff- und Energieversorgung wird über die Arme des Krans zugeführt.

Das Robotersystem ist durch seine Kinematik und Anordnung am Arbeitsplatz in der Lage die relevanten Positionen am Werkstück zu erreichen. Die Zielposition wird anhand der umgebenden Objektmerkmale über ein Stereokamerasystem am Roboterflansch relativ zur Werkzeugspitze bestimmt, während der Roboter über den Schwenkkran bewegt wird. Werden gültige Objektmerkmale erfasst wird ein Feedback an den Mitarbeiter gegeben. Ist die Werkzeugspitze nah genug an der Zielposition und wird eine Freigabe durch den Mitarbeiter erteilt, beginnt der Roboter automatisch mit geregelter Bewegung die Werkzeugspitze bzw. das gehaltene Objekt auf das Ziel zu positionieren.

Der Mitarbeiter hat in dieser Kooperation die Aufgabe den Roboter über den Schwenkkran in die Nähe der Zielposition zu manövrieren, wobei er Kollisionen zu vermeiden hat. Er kontrolliert über einen Bildschirm ob das Assistenzsystem die Objektmerkmale korrekt erkennt und schließt Verwechslungen bei mehreren gleichen Merkmalen auf einem Objekt aus. Anschließend löst er die Positionierung aus. Der Mitarbeiter kann den Schwenkkran in einer günstigen Körperhaltung bedienen. Die Positioniergenauigkeit und –geschwindigkeit werden nur noch im geringen Maße von Beweglichkeit, Fingerfertigkeit oder Tremor beeinflusst.

Der Roboter mit sieben Freiheitsgraden ist mit einer sicheren Steuerung und Momentsensoren in den Gelenken ausgestattet. Im Fall einer unerwarteten Kollision reagiert dessen Regelung mit einem nachgiebigen Verhalten.

### Arbeitsplatz 5: Leistungsreserve

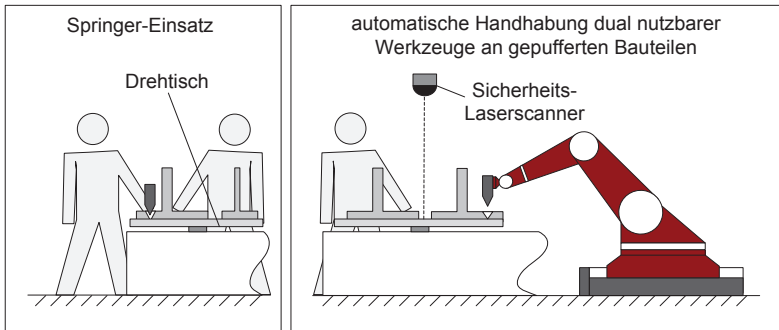


Abbildung 23: Roboter als Leistungsreserve

Dieses Assistenzbeispiel integriert Mitarbeiter, die einfache aber häufig oder schnell zu wiederholende Handhabungsschritte aufgrund Leistungseinschränkungen im sensomotorischen Bereich oder ferner im Zeitregime nicht ausführen können.

Das System wird so integriert, dass es dauerhaft bedarfsgerecht den Arbeitsplatz erreichen kann. Hierzu wird eine Linearachse am Boden rückseitig des Arbeitsplatzes montiert. Wegen des Aufwands wird dies bevorzugt nur in einer Neuplanung eines Bereiches vorgenommen und zugleich eine funktionelle Integration mit mehreren Arbeitsplätzen vorgesehen. Dies ermöglicht einen höheren zeitlichen Nutzungsgrad des Robotersystems sowie mehr Einsatzflexibilität. Die Kosten der Integration verteilen sich entsprechend auf alle assistierten Arbeitsplätze.

Der Roboter wird vor Beginn der Aufgabe zunächst vom Mitarbeiter angefordert, fährt zum Arbeitsplatz und erwartet weitere Instruktionen. Über ein Werkzeugwechselsystem werden Werkzeuge, die der Mitarbeiter auch für eine manuelle Ausführung verwenden würde vom Mitarbeiter am Flansch befestigt, wobei relevante Werkzeugdaten über einen Barcodescanner eingelesen werden. Im Einrichtbetrieb wird der Roboter dann vom Mitarbeiter durch Vormachen und vorgefertigte Makros direkt am relevanten Werkstück programmiert. Anschließend beginnt der Roboter mit der Ausführung. Die zu bearbeitenden Objekte werden über einen Rundtisch zugeführt, der auch als Puffer dient. Der Rundtisch verfügt über justierbare Spannelemente und winkeleinstellbare Rastpunkte, so dass die Werkstücke wiederholgenau befestigt werden können.

Ein Drehen des Rundtisches wird sensorisch erfasst und signalisiert dem Roboter bis auf Widerruf einen weiteren Auftrag.

Der Mitarbeiter übernimmt zunächst die Rolle des Programmierers und stellt anschließend sicher, dass die Werkstücke dem Roboter automationsgerecht zugeführt werden. Beim Einrichten wird der Mitarbeiter bereits dadurch unterstützt, dass das schwere Werkzeug bereits vom Roboter gehalten wird, womit einzelne Aufgaben auch ohne zu Programmieren gelöst werden können. Durch die Auslagerung eines Teils seiner Arbeitsinhalte an den Roboter hat der Mitarbeiter mehr Zeit für seine anderen Aufgaben und kann so z.B. Spitzenlasten hoher Auftragsmengen abfedern, was sonst einen Springereinsatz erfordert. Auch werden monotone, repetitive Handstellungen oder Drehungen, die die manuelle Werkzeughandhabung erfordert eliminiert.

Die Sicherheit beim Einrichten wird durch Zustimmungseinrichtungen und den Bedingungen des Einrichtbetriebs dargestellt. Im Betrieb ist der Arbeitsraum des Roboters auf einen Teil des Rundtisches begrenzt, der zudem von Sicherheits-Laserscannern überwacht wird.

##### Arbeitsplatz 6: Bahnführungsassistenz

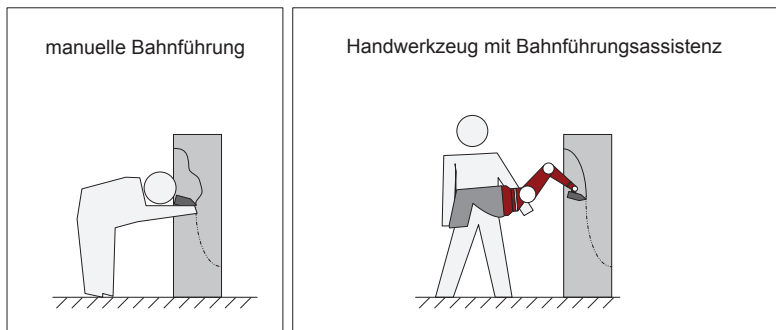


Abbildung 24: Roboterassistenz beim Führen von Handwerkzeugen

Dieser Ansatz unterstützt Mitarbeiter, die bei der aufgabenbezogenen Handhabung von Werkzeugen sensomotorische Leistungswandlungen aufweisen.

Das Robotersystem ist als Handwerkzeug ausgeführt und benötigt zur Integration am Arbeitsplatz im Wesentlichen eine Ablagefläche und ggf. Ladestationen oder Energiezuführungen. Bei hohem Werkzeuggewicht ist zudem ein passives Handhabungsgerät, z.B. ein Seilbalancer vorzusehen.

Das Roboter-Handwerkzeug ist mit einer Werkzeugspitze versehen, die dieser in einem begrenzten Raum positioniert und ausrichtet. Am Flansch sind mehrere Kamera- und Sensorsysteme befestigt, die den Bereich kurz vor der Werkzeugspitze in Sensorfusion beobachten und mittels Bilderkennung einfache Geometriemerkmale bzw. Features registrieren und lokalisieren. Abhängig von den Einstellungen, die der Mitarbeiter vorgenommen hat, wird das Werkzeug bezüglich des Merkmals ausgerichtet und positioniert. Dabei gleicht eine Regelung Posedifferenzen sowohl durch die Ausgangsstellung des Handwerkszeugs als auch durch die Bewegungen des Mitarbeiters aus.

Der Mitarbeiter muss das robotergestützte Handwerkzeug zunächst auf die Aufgabe konfigurieren und z.B. eine Stoßkante als relevantes Merkmal festlegen. Anschließend führt der Mitarbeiter das Gerät in die Nähe der relevanten Merkmale und löst über einen Schalter am Griff die Regelung aus. Über einen kleinen Bildschirm erhält er zusätzliches Feedback und z.B. Bilddaten von der Werkzeugspitze, wenn diese nicht direkt einsichtig ist. Durch diese Assistenz ist eine Steigerung der Präzision in Bahntreue und Bahngeschwindigkeit zu erzielen, die der leistungsgewandelte Mitarbeiter ggf. nicht mehr darstellen kann. Auch für nicht leistungsgewandelte ist ein Einsatz bei Führaufgaben z.B. im Mikrometerbereich vorstellbar.

Die Sicherheit wird durch einen Passivitätsansatz bzw. eine Zustimmungseinrichtung in Verbindung mit einer Leistungs- und Arbeitsraumbegrenzung der Roboterkinematik dargestellt.

#### Arbeitsplatz 7: Anreichhilfe

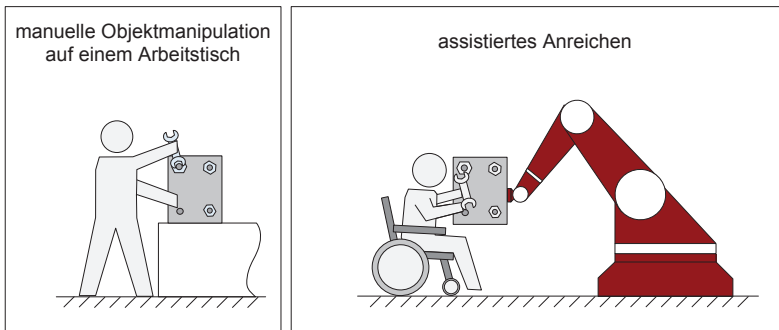


Abbildung 25: Roboterassistenz durch Anreichen von Objekten

Dieser Entwurf ist für leistungsgewandelte Mitarbeiter mit Einschränkungen im Bereich der Kraft oder Körperhaltung bei der Bearbeitung von Werkstücken geeignet.

Die Integration ist wie beim Arbeitsplatz 5 vorzusehen.

Der Roboter hat die Aufgabe ein Objekt auf Anforderung automatisch aus definierter Position vom vorherigen Arbeitsplatz zu greifen und einem Mitarbeiter geeignet anzureichen. Während des Anreichens wird die Pose des Objekts durch Eingaben des Mitarbeiters verändert. Anschließend transportiert der Roboter das Objekt weiter zum nächsten Arbeitsplatz oder direkt in ein Lager.

Der Mitarbeiter löst die Aktion des Roboters durch Anforderung aus. Durch ein mobiles funkbasiertes Eingabegerät samt Zustimmungseinrichtung kann er Lage und Position des Objekts verändern, wobei durch Beschleunigungs-Sensoren ein direktes Vormachen der Dreh-, Kipp- oder Neigebewegungen ermöglicht wird und Tasten zur Höhenverstellung dienen. Ebenfalls können vorher einprogrammierte Positionen per Tastendruck ausgewählt und angefahren werden. Der Mitarbeiter kann nach der Positionierung beidhändig am Objekt arbeiten und muss keine Greif- oder Haltekräfte aufbringen. Auch liegen für den Mitarbeiter günstige Arbeitshöhe und Neigung vor. Ein Arbeiten ist sowohl im Sitzen, Stehen oder im Wechsel möglich.

Die Sicherheit beim Greifen und Transportieren wird durch eine Bereichsüberwachung per Laserscanner gewährleistet. Beim Positionieren und Anreichen wird die Geschwindigkeit des Objekts und des Roboters sicher überwacht und begrenzt. Ferner werden die Bewegungen durch eine Zustimmungseinrichtung freigegeben. Darüber hinaus liegt eine Begrenzung der Bewegungsbereiche ausgehend von der Gestalt und Größe des Objekts vor. Zum Greifen wird ein formschlüssiger Greifer verwendet, der bei Versorgungsausfall geschlossen bleibt um ein Lösen oder Fallen des Objekts zu verhindern.

### Arbeitsplatz 8: Trennung von Umgebungsbedingungen



Abbildung 26: Roboterassistenz durch ferngesteuerte Ausführung

In diesem Beispiel werden Mitarbeiter integriert, die Leistungswandlungen in den Bereichen der Umgebungsbedingungen, ferner Kraft und Körperhaltung aufweisen.

Zur Integration des Assistenzsystems wird ein vorhandenes Trockeneisstrahlgerät an einem Roboter montiert zusammen mit diesem auf eine ortsflexible Plattform befestigt. An den Einsatzorten, z.B. mehrere Kokillen, werden Dockstationen mit Versorgungsleitungen und Trittschuttmatten installiert. Weiterhin wird ein Bildschirmarbeitsplatz in einem klimatisierten Raum eingerichtet.

Der Roboter hat die Aufgabe die Kokille am Einsatzort mittels Trockeneisbestrahlung zu reinigen. Ein Großteil der Bewegungen des Sprühkopfes wird automatisch ausgeführt. Durch Kamera- und Beleuchtungssysteme wird die Oberfläche vor und nach einzelnen Sprühvorgängen beobachtet. Anhand zusammengehöriger Positions- und Bilddaten wird eine dreidimensionale Repräsentation der aktuellen Kokillenoberfläche erzeugt und dem Mitarbeiter am Bildschirm ausgegeben. Bei Bedarf führt der Roboter auf Weisung des Mitarbeiters weitere Reinigungsschritte aus.

Der Mitarbeiter hat zunächst die Aufgabe das Robotersystem per Hubwagen zum jeweiligen Einsatzort zu verbringen und dort anzudocken. Dabei muss er die Sicherheitseinrichtung überprüfen und starten. Anschließend begibt er sich zum Bildschirmarbeitsplatz und startet den automatischen Reinigungsvorgang. Nach Ansicht der konstruierten Oberflächendaten entscheidet er über weitere Reinigungsvorgänge. Diese weist er an, indem er entweder am Bildschirm per Maus Markierungen in der Oberflächenkarte setzt oder indem er per Joystick die

Fernsteuerung der Roboterkinematik übernimmt. Der Mitarbeiter ist dadurch befreit von der Wärmestrahlung der Kokille, dem Lärm und Emissionen des Trockeneisstrahlens sowie ungünstiger Körperhaltungen beim Beugen und bei Überkopfarbeit im Kokillenraum, einschließlich der Unfallgefahren. Zusätzlich ist der Mitarbeiter mit Inbetriebnahme und Wartung der anderen Assistenzroboter beauftragt und entsprechend weiterqualifiziert.

Zur Absicherung der Reinigung wird der Zugang zur Kokille durch Trittschutzmatten überwacht – optische Systeme sind ggf. anfällig gegenüber möglicher Rauchentwicklung in Nähe der Kokille. Die Trittschutzmatten im Bereich einer Zufahrt von Flurförderfahrzeugen muss vor und nach der Reinigung abgedeckt und wieder abgeräumt werden. Der Bediener hat durch eine Kamera am Roboter eine Übersicht über das Geschehen und kann ein Stillsetzen des Roboters veranlassen. Der Trockeneisstrahl wird automatisch abgestellt, wenn dieser aus der Kokille herausweist, was anhand von Position und Winkel des Roboterflansches mit einer sicheren Robotersteuerung überwacht wird.

### **4.4 Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Möglichkeiten und das Potenzial robotergestützter Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen entwickelt. Nach einer Diskussion und Bewertung möglicher robotergestützter Anwendungsszenarien werden mehrere als praktikabel bewertete Maßnahmen identifiziert. Diese lassen sich in drei Gruppen einordnen: Maßnahmen zur Unterstützung der Einführung von Roboterassistenz, Maßnahmen an die Qualifikation der Mitarbeiter und Maßnahmen zur Belastungsreduktion durch Roboterunterstützung am Arbeitsplatz.

Ferner werden die möglichen Ausführungsformen kooperativer Handhabung bezüglich der Unterstützung einzelner Leistungswandlungsklassen erörtert. Als Ergebnis wird eine Zuordnung von Handhabungsschritt, Kooperationsform und Assistenzpotenzial erstellt, die zur Unterstützung der Montageplanung dienen kann.

Zur weiteren thematischen Vertiefung und Verständnisbildung schließt das Kapitel mit der Beschreibung archetypischer Anwendungsfälle von Roboterassistenz für Leistungsgewandelte.



## 5 Planung von Roboterassistenz

In diesem Kapitel wird das Gerüst für ein methodisches Vorgehen zur Planung und Entwicklung von Roboterassistenz-Lösungen für Handhabungsaufgaben in der Montage geschaffen.

### 5.1 Ableitung eines Planungs- und Entwicklungsvorgehens

Zur Ergänzung der zuvor zusammengefassten Planungsvorgehen zur vorausschauenden Berücksichtigung und Integration von Mitarbeiteranforderungen sind im Kern drei Punkte zu adressieren, vgl. Abbildung 27:

1. Die Bestimmung geeigneter Zeitpunkte, wann Roboterassistenz im Planungsvorgehen zu berücksichtigen ist.
2. Die Festlegung von Mitteln zur Erfassung und Beschreibung von Lösungsbeispielen zur Verwendung als Beispiel in einem Maßnahmenkatalog.
3. Die Definition oder Anpassung eines Planungsvorgehens zur Synthese robotergestützter Assistenzlösung.

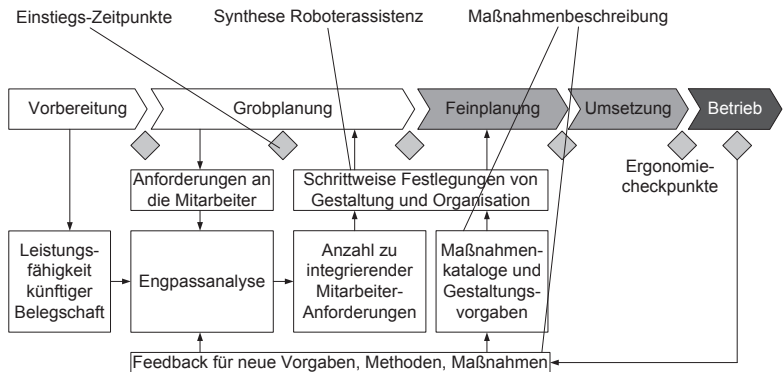


Abbildung 27: Die drei zu adressierende Kernpunkte innerhalb der vorausschauenden Montageplanung

Im folgenden Abschnitt werden Anforderungen und Zielgruppe des zu entwickelnden Vorgehens festgelegt. Anschließend werden erforderliche Planungsinhalte und -umfänge bestimmt, um ein Assistenzsystem hinreichend zu definieren. Anhand eines bestehenden Planungsvorgehens werden geeignete Planungszeitpunkte abgeleitet. Schließlich wird erarbeitet, wie Assistenzsysteme als Bestandteil eines Maßnahmenkatalogs beschrieben werden können, bevor ein

Vorgehen zur Synthese von Roboterassistenzlösungen für Handhabungsaufgaben vorgestellt wird.

### 5.1.1 Anforderungen

Die Zielgruppen für eine Anwendung des Vorgehens sind:

- Planer von Montagesystemen und ferner
- Entwickler von Roboterassistenzsystemen.

Drei Zielsetzungen seien für eine Anwendung vordergründig:

- **Integration:** Die Neuplanung eines Montagesystems (oder dessen Teilstrukturen Montagelinie, -zelle, -station, vgl. (JONAS 2000, S. 10) unter Berücksichtigung des bestehenden oder künftigen Leistungsvermögens der Belegschaft.
- **Intervention:** Die Anpassung eines bestehenden Montagesystems zur Kompensation von Leistungswandlungen bzw. zur Reintegration Leistungsgewandelter.
- **Innovation:** Die Entwicklung neuer oder Verbesserung bestehender Lösungen zur Roboterassistenz.

Der Betrachtungsfokus liegt auf Ebene von Montagezellen und -stationen.

Als Gütekriterien für Methoden und Methodik sind in Anlehnung an (REFA 1993) folgende zu nennen:

- **Anwendbarkeit:** Um eine Anwendungsnähe zu realisieren, soll sich die Methode an bestehende und den potenziellen Anwendern vertrauten Verfahren orientieren.
- **Kompatibilität:** Die Begriffe und Kenngrößen sollen in allen Ebenen des Vorgehens einheitlich und eindeutig verwendet werden.
- **Konsistenz:** Durch Klarheit und Verständlichkeit der Prozedurbeschreibungen soll eine möglichst allgemeingültige Nutzung ermöglicht werden.
- **Reproduzierbarkeit:** Bei gleichen Voraussetzungen sollen unterschiedliche Anwender nachvollziehbare, gleiche Ergebnisse erarbeiten. Hierzu sind möglichst objektivierbare Kriterien für Bewertungen heranzuziehen.
- **Validität:** Das Vorgehen muss das gestellte Problem lösen.
- **Vollständigkeit und Effizienz:** Die Struktur und Reihenfolge des Vorgehens soll eine Übersicht bieten, die vollständige Berücksichtigung der

relevanten Einflussfaktoren und Arbeitsschritte absichern und eine zielgerichtete, effiziente Durchführung ermöglichen.

- **Vergleichbarkeit der Lösung:** Das Ergebnis des Vorgehens muss hinreichend detailliert sein um eine Vergleichbarkeit mit den Realisierungsalternativen bzw. Alternativlösungen zu ermöglichen.

### 5.1.2 Hinreichende Detaillierung eines Roboterassistenzsystems

Wichtigstes Ziel des Vorgehens ist es, für den jeweiligen Anwendungsfall eine gültige Roboterassistenz-Lösung zu finden und zu detaillieren. Eine Lösung kennzeichne sich hier dadurch, dass die wesentlichen Gestaltungs- und Funktionsmerkmale in Anzahl und Art festgelegt sind. Im Planungsvorgehen nach BULLINGER (1986) (vgl. Abschnitt 2.1.5) wird dies mit den Teilschritten bis einschließlich der Erstellung des Layouts erfüllt. Die sich daran anschließenden Schritte Detaillierung, Bewertung, Vergleich, Auswahl oder Umsetzung sind mit den Methoden des Stands der Technik umsetzbar und bedürfen keiner gesonderten Betrachtung. Mit dem Layout ist die Anordnung des Roboterassistenzsystems innerhalb des Arbeitsplatzes definiert. Das Roboterassistenzsystem setzt sich aus mehreren technischen Elementen zusammen, die in Funktion, Ausprägung oder Typ, aber nicht notwendigerweise als Produkt zu bestimmen sind, vgl. Abbildung 28. Im Layout werden zudem erforderliche Änderungen in der Arbeitsplatzgestaltung vermerkt.

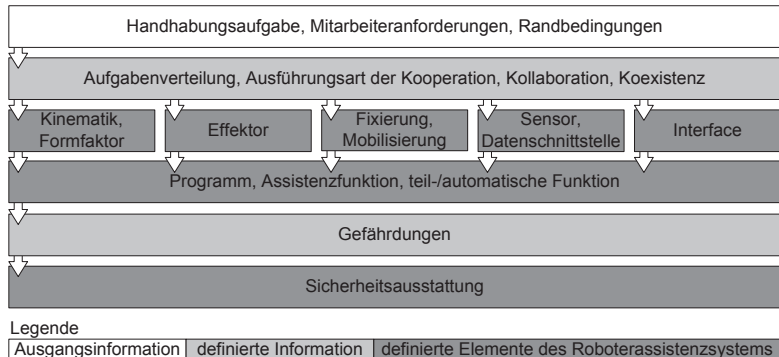


Abbildung 28: Zu definierende technische Elemente des Roboterassistenzsystems

Ferner ist eine Beschreibung der Aufgabenverteilung und eine Darstellung des Gesamtablaufs der Aufgabenerfüllung vorzunehmen, z.B. in der Form eines Programmablaufplans. Die erforderliche Detaillierungstiefe ergibt sich dabei aus

der Anforderung die Gültigkeit der Lösung zu plausibilisieren. Bezüglich des Sicherheitskonzepts ist zu prüfen, ob für alle erkannten Gefährdungen hinreichende Maßnahmen definiert wurden. Die Belastungen der assistierten Arbeitsausführung sind mindestens innerhalb des Bereichs der zu berücksichtigenden Leistungswandlung (Ausführbarkeit, Beeinträchtigungsfreiheit) abzuschätzen, was z.B. quantitative Werte von Handhabungswegen, -kräften und -zeiten erfordert. Es ist auf Abwesenheit von bekannten Akzeptanzhindernissen zu achten. Die ökonomische Sinnhaftigkeit ist durch Schätzung der Investitions- und Betriebskosten zu prüfen.

### 5.1.3 Zeitpunkt

Innerhalb der Montageplanung werden zu unterschiedlichen Zeiten organisatorische und gestalterische Entscheidungen getroffen, die aufeinander aufbauen und den Lösungsraum eingrenzen, vgl. (LOTTER & WIENDAHL 2006). Je später sich eine Lösung hinsichtlich spezieller Anforderungen wie Leistungswandlungen als unzureichend herausstellt, umso aufwendiger ist die Einarbeitung dadurch notwendiger Anpassungen. Dies berücksichtigt der zuvor zusammengefasste Ansatz vorausschauender Montageplanung (Kap. 2.2.3.2 ab S. 20) dadurch, dass die Erfüllung der Anforderungen entlang des Planungsfortschritts mehrfach und frühzeitig überprüft werden. Zur Unterstützung der Planung wird empfohlen, den Planern zum jeweiligen Planungsstand passende Maßnahmenvorschläge und -beispiele bereitzustellen, (Reinhart et al. 2010a).

Im Folgenden gilt es also, entlang eines erprobten Montagevorgehens Zeitpunkte zu identifizieren, die geeignet sind Roboterassistenz als Maßnahme oder Gestaltungsmittel zu berücksichtigen. Als potenziell geeignet angenommen werden zum einen Zeitpunkte nach Prüfungen der Einhaltung von Mitarbeiteranforderungen, zum anderen Zeitpunkte vor der Festlegung solcher Eigenschaften des Montagesystems, welche sich auf die Integration von Leistungswandlungen oder von Roboterassistenzsystemen auswirken. Die Zeitpunkte eignen sich in unterschiedlicher Weise für verschiedene Maßnahmen bzw. Leistungswandlungen. Ferner nimmt der Detaillierungsgrad der Maßnahmenvorschläge und -beschreibungen mit dem Fortschreiten des Planungsvorgehens zu, ohne dass hier näher darauf eingegangen wird. Als Grundlage wird das Vorgehen von BULLINGER (1986) verwendet, welches in Abbildung 29 in reduzierter Form als Ablaufdiagramm dargestellt ist. Die Identifikation und Diskussion der Zeitpunkte ist in analoger Weise auch auf andere Planungsvorgehen anwendbar.

### 5.1.3.1 Zeitpunkte in der Grobplanung

Es wird davon ausgegangen, dass die in der Vorbereitungsphase erhobenen Belegschaftsdaten mit Profildaten bzw. Informationen zu vorhandenen Einsatzeinschränkungen angereichert sind. Zwar lassen sich damit bereits Assistenzsysteme planen, welche nicht von der spezifischen Aufgabe der Mitarbeiter abhängen. Dies ist jedoch als nicht sinnvoll anzusehen, da dies eine bedarfsunabhängige und somit unwirtschaftliche Ressourcenzuordnung bedeutete.

#### **Zeitpunkt MRK G1**

Die erste Einstiegsmöglichkeit zur Einplanung von Roboterassistenz besteht während der Bewertung der Montageteilschritte hinsichtlich deren Eignung zur wirtschaftlichen Teilautomation, vgl. Abbildung 29. Dieser Zeitpunkt erscheint für die Planung von Mensch-Roboter-Kooperation und -Koexistenz allgemein geeignet, unabhängig von Assistenz für Leistungswandlungen. Voraussetzung zur Planung zu diesem Zeitpunkt ist, dass eine wirtschaftliche Bewertung der MRK bzw. Roboterassistenz auf Basis der Teilverrichtungen vorgenommen werden kann. Ein derartiges Bewertungsverfahren fehlt bisher. Ferner ist eine Formalisierung und Quantifizierung geeigneter Bewertungskriterien aufgrund der geringen Anzahl industrieller Anwendungsbeispiele derzeit nur schwer abzusichern. Dies rückt die Aufgabe eines Maßnahmen- und Beispielkatalogs in den Vordergrund, der an dieser Stelle dem Planenden wirtschaftlich erfolgreiche Anwendungsbeispiele für vergleichbare Anforderungen darlegen könnte. Da in diesem Planungsschritt die Aufteilung der Ausführungsart vorgenommen wird, spricht dies Maßnahmen an, die im Bereich der Arbeitsinhalte liegen (vgl. Abbildung 17 S. 81), insbesondere ‚Job Enlargement‘, die ‚Einrichtung von Assistenzarbeitsplätzen‘ und die ‚Einrichtung dedizierter Servicetätigkeiten‘.

#### **Zeitpunkt MRK G2**

Dieser Ansatzpunkt folgt der Feststellung des Bedarfs an Hilfsmitteln innerhalb der manuell auszuführenden Teilschritte. Der Bedarf kann sich zum einen direkt aus den Erzeugnis- und Prozesseigenschaften ergeben. Zum anderen kann sich dieser ergeben aus einem Abgleich der Arbeitsinhalte samt Zeitvorgaben mit den spezifischen Mitarbeiteranforderungen, im Sinne einer Engpassanalyse oder eines Profilvergleichs, vgl. Kap. 2.2.3.2. Zur Unterstützung des Planenden sollten Beispiele eines Maßnahmenkatalogs an dieser Stelle eine Auflistung oder ein Profil der jeweils durch die Lösung assistierbaren Leistungswandlungen und/oder Teiltätigkeiten aufweisen. Allgemeine Maßnahmen, die in dieser Phase

angesprochen werden sind insbesondere die ‚Belastungsbegrenzung‘, die ‚Einrichtung assistierter Arbeitsplätze‘, die ‚Integration roboterassistierter Hilfsmittel‘ und die ‚ergonomische, alters-, altersngerechte Arbeitsplatzgestaltung‘, vgl. Abbildung 17 S. 81. Innerhalb der Grobklassifikation der Leistungswandlungen (nach Tabelle 1 S. 8) werden hier vorwiegend die Bereiche ‚Kraft‘ und ‚Zeitregime‘ adressiert.

### **Zeitpunkt MRK G3**

Nach der Prinzipianordnung erfolgt die weitere Detaillierung der Arbeitsstationen in Richtung des Layouts. Hier ist die Betrachtung der MRK als eine gleichwertige Alternative zur automatischen und manuellen Station einzuführen. Zum anderen können Synergieeffekte aus der Neuordnung und Rekombination verschiedener Arbeitsstationen erwirkt werden. Dies ermöglicht dann die Integration von MRK in Bereichen, wo diese zuvor ungeeignet erschienen oder es ermöglicht eine Kostensenkung durch enge Verflechtung automatischer und assistierter Prozesse. Zu den allgemeinen Maßnahmen, die für diesen Ansatzpunkt relevant sind, zählen die Zusammenfassung von ‚Bereichen einfacherer Arbeit‘ sowie alle Maßnahmen innerhalb der ‚Arbeitsplatzgestaltung‘, vgl. Abbildung 17 S. 81. Der Maßnahmenkatalog kann dem Planenden hier Beispiele oder Gestaltungshinweise für Layouts assistierter Arbeitsplätze geben.

### **Zeitpunkt MRK G4**

Ein weiterer Einstiegspunkt ergibt sich nach der Bewertung der Ausführbarkeit und Persönlichkeitsförderlichkeit der bis hierin detaillierten Arbeitsinhalte und -plätze, wobei hier insbesondere auch die Anforderungen der Leistungsgewandelten einzugehen ist. Entsprechend der Bewertung wird ein Handlungsbedarf aufgezeigt, der sich potenziell durch Integration von Roboterassistenz begegnen lässt. Hier lassen sich alle allgemeinen Maßnahmen nach Abbildung 17 S. 81 zuordnen und es können alle Leistungswandlungen (vgl. Tabelle 1 S. 8) berücksichtigt werden. Die Beispiele des Maßnahmenkatalogs sind wie zuvor bei ‚MRK G3‘ detailliert bereitzustellen. Zusätzlich ist deren Eignungsprofil für konkrete Leistungswandlungen und Teiltätigkeiten herauszustellen.

#### **5.1.3.2 Zeitpunkte in der Feinplanung**

### **Zeitpunkt MRK F1**

Im Bereich der Feinplanung ermöglicht der höhere Detaillierungsgrad durch den Planungsfortschritt eine Bewertung der Schädigungslosigkeit und Beeinträchti-

gungsfreiheit von Arbeitsplatz und -inhalt. Wird ein Handlungsbedarf erkannt, können erneut robotergestützte Assistenzsysteme in Betracht gezogen werden. Bezüglich der Schädigungslosigkeit sind zuordenbare Maßnahmen und Leistungswandlungen analog zu ‚MRK G4‘ anzunehmen. Bezüglich der Beeinträchtigungsfreiheit ist ein Schwerpunkt betroffener Leistungswandlungen im Bereich des Zeitregimes zu sehen. Der Maßnahmenkatalog ist analog zu ‚MRK G3‘ zu detaillieren. Dabei sind wegen des fortgeschrittenen Planungsverlaufs solche Beispiele bevorzugt bereitzustellen, die sich mit nur geringfügigen Änderungen an Arbeitsplatzgestaltung oder Arbeitsinhalten integrieren lassen.

### 5.1.3.3 Zeitpunkte im Betrieb

#### **Zeitpunkt MRK B1**

Während des Betriebs können sich die Anforderungen der Belegschaft ändern, neue Leistungswandlungen können auftreten, alte zurückgehen. Diesem Planungszeitpunkt sind alle allgemeinen Maßnahmen zur Reintegration zuzuordnen, vgl. Abbildung 17 S. 81. Es lassen sich keine Leistungswandlungen ausschließen. Die Umwidmung nicht mehr benötigter Assistenzsysteme kann als Neu- oder Umplanung gesehen werden, welche mit dem Einstieg in eine frühere Planungsphase einhergehen – dies bedarf daher keiner gesonderten Betrachtung. Wie zuvor bei ‚MRK F1‘ sind die Beispiele im Maßnahmenkatalog detailliert anzugeben, wobei jene Lösungen bevorzugt zu präsentieren sind, die eine aufwandsarme Integration der Assistenzsysteme ermöglichen. Zusätzlich sollten konkrete Angaben zu Aufwand und Dauer einer Beispielinstallation robotergestützter Assistenz bereitgestellt werden, damit z.B. Stillstandzeiten des anzupassenden Arbeitssystems planbar werden.

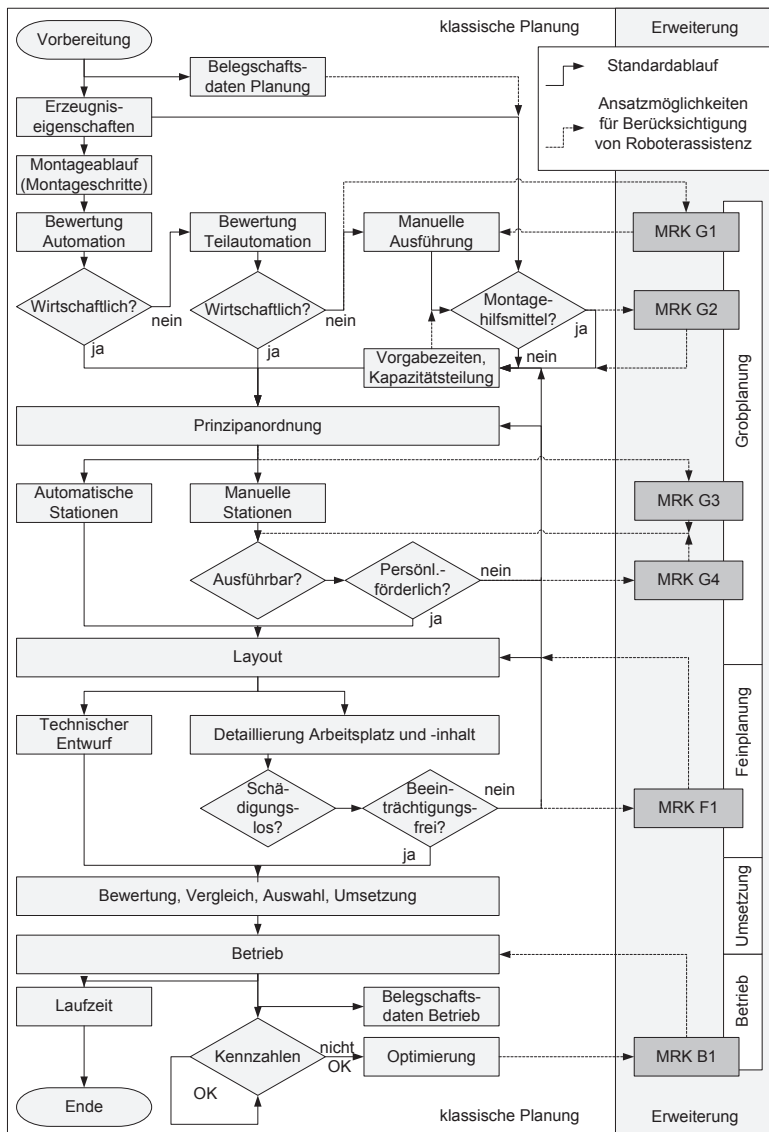


Abbildung 29: Abgeleitete Ansatzmöglichkeiten für die Berücksichtigung von Roboterassistenz (MRK) im Planungsvorgehen nach BULLINGER (1986)



### 5.1.4 Maßnahmenbeschreibung

Ziel der Maßnahmenbeschreibung ist es, die Montageplanung durch Aufzeigen von in der jeweiligen Planungsphase relevanten Lösungsbeispielen zu unterstützen. Es wird davon ausgegangen, dass hierdurch eine Beschleunigung des Planungsvorgangs wie auch eine Verbesserung der Planungslösung zu erzielen ist. Ferner können Hersteller von Assistenzsystemen die Detaillierung und Gliederung ihrer Produktinformation auf Basis eines solchen Katalogs an die entsprechende Planungsphase anpassen. Bestandteile des Katalogs können sein: allgemeine Maßnahmen (vgl. Abbildung 17 S. 81), konkrete Beispiele von Roboterassistenzsystemen sowie einzelne Elemente oder Technologien.

In Tabelle 20 wird auf die Inhalte der Maßnahmenbeschreibung eingegangen. Die Tabelle kann in ihrer Struktur als Technologie- oder Maßnahmensteckbrief verwendet werden. Die Gliederung der Tabelle folgt dabei dem Prinzip der zunehmenden Detaillierung bei abnehmendem Lösungsraum (vgl. LOTTER & WIENDAHL 2006): Zunächst wird das Finden potentiell geeigneter Lösungen ermöglicht, daraufhin werden allgemeine, dann spezifische Informationen bereitgestellt, die Eignung vermuten oder ausschließen lassen, abschließend wird auf weiterführende Informationsquellen für eine vollständige Detaillierung verwiesen. Die einzelnen inhaltlichen Punkte werden in der Tabelle angesprochen und in der Auswahl begründet. Weiterhin wird in der Tabelle vermerkt, welche inhaltlichen Punkte für welche Planungszeitpunkte relevant sind und ob diese Punkte allgemeine Maßnahmen, vollständige Assistenzsysteme oder einzelne Technologien ansprechen. Das Feedback (vgl. Abbildung 27 S. 99) kann über das Ausfüllen oder Anpassen der Maßnahmenbeschreibung umgesetzt werden.

Tabelle 20: Inhalte einer Maßnahmenbeschreibung

Zweck	Inhalte	Zeitpunkte	Allgemeine Maßnahme	Assistenzsystem	Technologie
Suche potentiell geeigneter Lösungen	Zuordnung Planungszeitpunkt	Alle	x	x	x
	Um Maßnahmen systematisch zum jeweils passenden Planungsschritt bereitstellen oder in Datenbanken suchen zu können ist eine entsprechende Indexierung erforderlich.				
	Kurzbezeichnung	Alle	x	x	x
	Eine eindeutige Namensgebung, die einen Hinweis auf die wesentliche Assistenz, Funktion oder Wirkung gibt, ermöglicht ein einfaches Finden und Zuordnen der katalogisierten Elemente.				
	Stichwort-Indexierung	Alle	x	x	X
	Eine Liste der zutreffenden Merkmale und Eigenschaften des Beispiels ermöglicht die Suche von Lösungen unter Einbeziehung mehrerer Kriterien. Die Suche erfordert ein entsprechendes Register oder eine computergestützte Indexierung. Die Stichwortliste kann entfallen, wenn eine Volltextsuche möglich ist.				
Feststellung allgemeiner Eignung	Abbildung	Alle	x	x	x
	Dies beinhaltet eine Skizze zu Illustrationszwecken.				
	Beschreibung der Maßnahme, Assistenzfunktion oder Technologie	Alle	x	x	x
	Dies beinhaltet eine Zusammenfassung der wesentlichen Wirkungsweise oder Funktion zur Förderung einer schnellen Eignungsfeststellung.				
	Assistenzprofil	Alle außer G1, G3		x	
	Dies beinhaltet eine Beschreibung der Anforderung an den Mitarbeiter bei Bedienung, Nutzung oder Einsatz des Assistenzsystems, für jeden Prozessschritt. Die Anforderungsbeschreibung richtet sich vorzugsweise nach dem jeweiligen Profilvergleichsverfahren, welches im Unternehmen Verwendung findet. Ist keine allgemeine Aussage der Anforderungen zu treffen, können die Daten von konkreten Beispielen verwendet werden. Ein quantitativer Ausdruck innerhalb der Profilkriterien ist gegenüber qualitativen zu bevorzugen. Das Assistenzprofil ermöglicht einen direkten Vergleich mit dem Leistungsangebot bzw. Assistenzbedarf der Mitarbeiter.				

	Anwendungsbereiche	Alle	x	x	
	Dies beinhaltet eine Auflistung bekannter oder potenzieller Einsatzfälle. Aus der Ähnlichkeit des zu planenden Einsatzfalls mit den hier beschriebenen, kann der Planende auf die Übertragbarkeit der Lösung bzw. der dazu notwendigen Aufwendungen schließen.				
	Ausschlussgründe	Ab MRK G3	x	x	
	Dies beinhaltet eine Auflistung von Kriterien, die einen Einsatz des Systems ausschließen. Der frühzeitige Ausschluss ungültiger oder nicht anwendbarer Lösungsmöglichkeiten beschleunigt den Planungsprozess.				
	Kostenbereich	Ab MRK G2	x	x	x
	Dies beinhaltet eine Einschätzung des variantenübergreifenden Kostenbereichs basierend auf Schätzungen, Marktpreisen oder durchgeführten Beispielanwendungen. Dies ermöglicht einen frühzeitigen Ausschluss kostspieliger Lösungen oder eine frühzeitige Einbeziehung weiterer Maßnahmen zur Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses.				
	Planungs- und Umsetzungsdauern	MRK G4, F1, B1	x	x	
	Dieser Punkt fasst Erfahrungswerte zusammen, die die Dauer bzw. der Arbeitsaufwand der Planungsaufwendungen und der Integration beschreiben. Dies ist insbesondere für die Planungsphasen MRK F1 und B1 relevant				
	Technologiereife	Alle		x	x
	Die Angabe der Technologiereife ermöglicht eine Einschätzung der zu erwartenden Aufwendungen und Dauer bei Integration oder Adaption eines Assistenzsystems oder einer Technologie. Dies kann dem Planenden einen frühen Abgleich mit zu Verfügung stehenden Ressourcen oder Zeitplänen ermöglichen und den Lösungsraum so frühzeitig eingrenzen.				
Prüfung spezifischer Eignung	Für Ausführung und Assistenz relevante Kenngrößen	MRK G2, G4, F1, B1		x	x
	Dies beinhaltet eine Auflistung quantifizierter Eigenschaften eines Assistenzsystems oder einer Technologie, anhand derer bewertet werden kann ob der Hauptzweck erfüllbar scheint. Es zielt auf die Beantwortung folgender Fragen: ‚Ist die Aufgabe für das Assistenzsystem ausführbar?‘ und ‚Ist die Unterstützung für den Mitarbeiter hinreichend?‘. Typische Eigenschaften und deren planungszeitliche Zuordnung für ein Roboterassistenzsystem sind z.B.: Traglast (MRK G2), Reichweite, Freiheitsgrade, Achsgeschwindigkeiten (MRK G4), Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinien beim Führen am Roboter (MRK G4), zulässige Bahngeschwindigkeit in der Nähe von Menschen (MRK G2).				

	Für Layout erforderliche Kenngrößen	Ab MRK G3		x	
	Dies beinhaltet Angaben die die wesentlichen Anforderungen für eine geometrische Anordnung des Assistenzsystems am Einsatzort beschreiben und damit eine grobe Positionierung ermöglichen. Hierzu können für ein Roboterassistenzsystem z.B. folgende Eigenschaften zählen: Stellfläche, Arbeitsraumgröße, erforderliche Energie-, Stoffversorgung, sicherheitsrelevante Abstände.				
	Zusätzliche Anforderungen	Ab MRK G3	x	x	
	Hierunter werden zu erfüllende technische und organisatorische Bedingungen zusammengefasst, die allgemein durch den Einsatz erforderlich oder unternehmensspezifisch zu erfüllen sind. Dies sind beispielsweise: Zusatzqualifikationen für den Bediener, die Notwendigkeit eines Maschinenführers, für den Betrieb zusätzlich erforderliche Module oder Sicherheitseinrichtungen.				
	Vorgehen zur Durchführung	Alle	x	x	
	Hier werden Teilschritte zur Durchführung einer allgemeinen Maßnahme oder sofern zutreffend zur Auslegung ein Assistenzsystems aufgezählt, jedoch nicht detailliert. Dies dient zur Erleichterung einer Einführung.				
	Weiterführende Verweise	Alle	x	x	x
Detaillierung	Hier werden zusätzliche Informationsquellen aufgezeigt, die für die Planung relevant aber für eine Übersicht zu detailliert sind. Hierunter fallen z.B.: Datenblätter, Normen, Berichte zu Beispielprojekten, ferner Hersteller bzw. Bezugsquellen aber auch Erfahrungsträger im Unternehmen.				

## **5.2 Planung von Roboterassistenz für Handhabungsprozesse**

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Auswahl und Synthese von Roboterassistenz vorgestellt. Strukturell ist es an das Montageplanungsvorgehen nach BULLINGER (1986) angelehnt. Das Vorgehen ist iterativ und nicht linear. Zum einen wird aus späteren Teilschritten in frühere zurückgesprungen, wenn ein Änderungsbedarf erkannt wird, der nicht im jeweiligen Teilschritt zu lösen ist. Zum anderen kann das gesamte Vorgehen mehrfach durchlaufen werden, wobei in jeder Iteration der Detaillierungsgrad zunimmt. Im Weiteren wird darauf nicht gesondert eingegangen und das Vorgehen linearisiert dargestellt. Die in den Teilschritten aufgeführten Methoden schließen die Anwendung anderer Ansätze nicht aus; das Vorgehen bleibt konsistent, solange die Ein- und Ausgangsgrößen der Teilschritte übereinstimmen.

Das Vorgehen wird parallel zur fortlaufenden Montagesystemplanung durchgeführt und beginnt mit der Erkennung eines Handlungsbedarfes, vgl. Abbildung 30. Entsprechend geeignete Einstiegspunkte in das Vorgehen, einschließlich zugehöriger Klassen von Leistungswandlungen und Maßnahmen sind in Abschnitt 5.1.3. ausgeführt. Mit dem Handlungsbedarf sind die Ziele, Planungsdaten und Rahmenbedingungen zu formulieren (analog zur Vorbereitungsphase, vgl. Abbildung 49 S. A-1) bzw. vom bisherigen Planungsstand zu vererben. Es ist insbesondere zu prüfen ob spezielle Budgets für die Integration von Leistungsgewandelten verfügbar sind. Ferner sollte eine Abschätzung der Folgekosten vorgenommen werden für den Fall, dass keine Maßnahmen ergriffen werden (Unterlassungsalternative). Die bisherige Projektorganisation kann sowohl beibehalten wie auch erweitert werden. Wie für an die Belegschaft gerichtete Maßnahmen empfohlen, ist ein Arbeitskreis zu bilden oder zu kontaktieren der die weiteren Schritte begleitet, vgl. Abschnitt 2.2.5. Abbildung 30 stellt die Teilschritte in ihrer Reihenfolge dar. Jeder Teilschritt wird im Folgenden besprochen. Ergebnis des Verfahrens ist eine hinreichend detaillierte Beschreibung des Roboterassistenzsystems (vgl. Abschnitt 5.1.2), die dann eine Bewertung mit Lösungsalternativen und eine Integration der Lösung in die parallel fortlaufende Montageplanung ermöglicht.

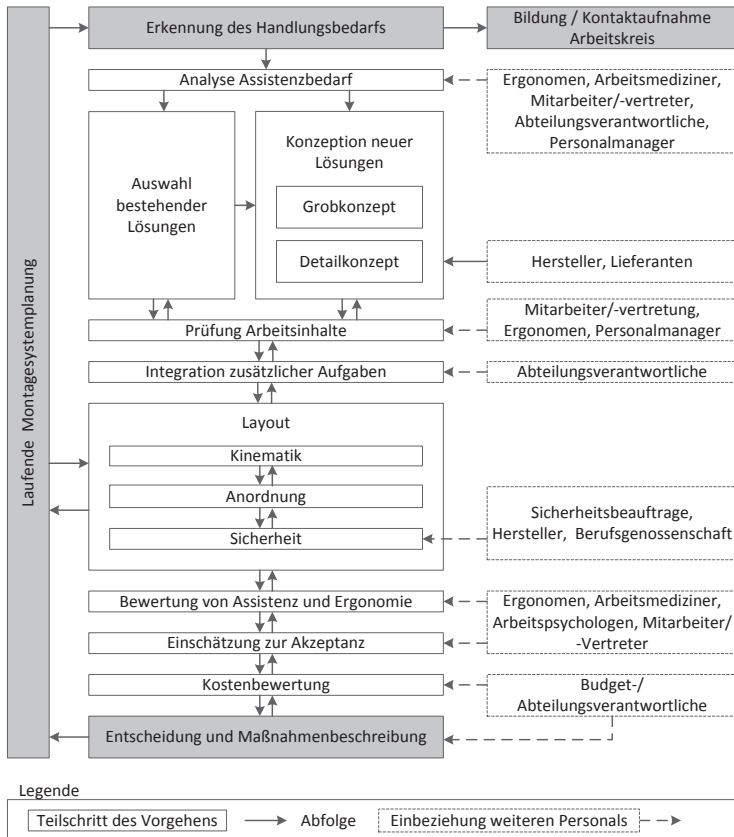


Abbildung 30: Übersicht des Planungsverfahrens von Roboterassistenz für Handhabungsprozesse

### 5.2.1 Analyse Assistenzbedarf

Der allgemeine Assistenzbedarf kann als die Diskrepanz zwischen dem Fähigkeitsangebot der Mitarbeiter und den Anforderungen der Arbeitsaufgaben verstanden werden. Um dies zu bestimmen sind in einem ersten Schritt die Fähigkeiten bzw. Einsatzeinschränkungen der Mitarbeiter sowie die Anforderungen mit einem Profilverfahren (vgl. Abschnitt 2.2.3.1) zu erfassen. Die Anforderungsbeschreibung kann von der Arbeitsplatzebene bis hin zu einzelnen Handhabungsschritten detailliert werden. Beginnend mit einer groben Beschrei-

bung ist eine weitere Verfeinerung nur bis zu der Ebene sinnvoll, auf der auch die Assistenzsysteme und -funktionen adressiert werden sollen.

Weist man den Ausprägungen der Profilvermerkmale Zahlenreihen zu, ist der Assistenzbedarf aus der Differenz zugehöriger Fähigkeits- und Anforderungsmerkmale bestimmbar. Der Zahlenwert sei dabei proportional zur Qualität von Anforderung und Fähigkeit. Mindestens eine Wertungsstufe in der Menge der Anforderungsmerkmale sollte dabei einen höheren Wert aufweisen als die größten Werte der zugehörigen Fähigkeitsmerkmale um eine Überbeanspruchung auch voll einsatzfähiger Mitarbeiter darstellen zu können. Formalisiert gelte also:

$$\text{Fähigkeitsmerkmale } FM = \{FM \in N\}$$

$$\text{Anforderungsmerkmale } = AM = \{AM \in N \mid \text{Max}(AM) > \text{Max}(FM)\}$$

Der Assistenzbedarf ergibt sich wie folgt:

Formel 5-1

$$\text{Assistenzbedarf} = AB_{mpa} = AM_{ap} - FM_{mp}$$

*m* = Index zur Zuordnung der Mitarbeiter

*p* = Index zur Zuordnung der Profilvermerkmale

*a* = Index zur Zuordnung von Arbeitsplatz, Arbeitsaufgabe, Arbeitsschritt etc.

$$m, p, a = \{m, p, a \in N\}$$

Hierzu ein Beispiel: Die Fähigkeit Objekte zu heben lässt sich in Schritte von fünf Kilogramm in den Wertestufen 0 bis 10, d.h. von 0 bis 50 kg unterteilen. Ein Mitarbeiter der 20 kg heben kann hätte die Stufe 4. Die Anforderung ein Objekt von 70 kg zu heben würde analog eine Wertestufe von 14 ergeben. Der Assistenzbedarf in diesem Merkmal entspräche dann 10, d.h. eine Assistenzkraft zum Heben von mind. 50 kg wäre erforderlich.

Für den Vergleich des Assistenzbedarfs zwischen unterschiedlichen Merkmalen ist eine Normierung hilfreich, wobei sich die jeweils höchste zu erwartende Fähigkeit, sprich die Fähigkeitsgrenze anbietet. Ferner sollten die Wertestufen der Merkmale möglichst quantifiziert, äquidistant und zwischen Fähigkeiten und Anforderungen bei gleicher Qualität gleichwertig sein. Entsprechend ergibt sich der normierte Assistenzbedarf durch:

Formel 5-2

$$\text{normierter Assistenzbedarf } NAB_{mpa} = \frac{AM_{ap} - FM_{mp}}{FG}$$

*Fähigkeitsgrenze*  $FG = (FG \in \mathbb{N}, FG > 0, FG = \text{konst.})$

*Fähigkeitsmerkmale*  $FM = \{FM \in \mathbb{N} \mid \text{Max}(FM_{mp}) = FG \forall m, p\}$

*Äquidistanz*:  $\forall (FM, AM): FM(n) - FM(n + 1) = AM(n) - AM(n + 1)$

Die so bestimmten Bedarfe lassen sich dann zusammenfassen und bezüglich ausgewählter Merkmale, Mitarbeitergruppen sowie Arbeitsplätze oder auch Handhabungsschritte analysieren. Abbildung 31 illustriert das Vorgehen tabellarisch, einschließlich vier unterschiedlicher Analysemethoden (siehe Abbildung 31), die je nach Zielsetzung anzuwenden sind und nachfolgend dargelegt werden.

**Häufigkeit:** Bei begrenzten Ressourcen bietet es sich an Handlungsschwerpunkte zu identifizieren. Hierzu kann die Häufigkeit und Höhe einzelner Bedarfe herangezogen werden, die durch spaltenweise Summation zu bestimmen ist, vgl. Abbildung 31. Die weitere Detaillierung der Entwicklung oder der Planung von Roboterassistenzsystem erfolgt dann entsprechend hierarchisch.

**Maxima:** Um möglichst alle Mitarbeiter der ausgewählten Gruppe einsetzen zu können sind die jeweilig höchsten Assistenzbedarfe zu Grunde zu legen. Dies wird durch eine spaltenweise Bestimmung der Maxima innerhalb der Assistenzbedarfe dargestellt, vgl. Abbildung 31. Hierzu gibt es zwei weitere Ausführungsvarianten, die die Maximalforderung zu Gunsten wirtschaftlicher Zwänge relativieren. Zum einen kann eine für die Mitarbeiter noch erträgliche Differenz zum Assistenzbedarf definiert werden. Zum anderen kann die Definition eines zulässigen Ausschlusses eines Teils der Mitarbeiter oder Arbeitsplätze eingeführt werden. Die Auswahl der nicht zu berücksichtigenden Mitarbeiter oder Arbeitsplätze kann als Optimierungsproblem angesehen werden, welches durch übliche Optimierungs- oder Probiervverfahren zu lösen ist. Das sich daraus bildende Merkmalsprofil ist dann die Ausgangslage für die weiterführende Detaillierung einer Roboterassistenz.

**Einzelfälle:** Sind nur wenige oder einzelne Mitarbeiter bzw. Arbeitsplätze einer Gruppe zu berücksichtigen oder haben diese herausragende Assistenzbedarfe bzw. Anforderungen ist eine Einzelfallbetrachtung sinnvoll. Diese ergibt sich aus der zeilenweisen Zuordnung von Mitarbeiter bzw. Arbeitsplatz zu den Profilmerkmalen, vgl. Abbildung 31.



**Gruppen und Muster:** Treten in der Verteilung der Assistenzbedarfe Regelmäßigkeiten oder Muster auf, kann deren gesonderte Betrachtung von Vorteil sein. Bei gleichartigen Assistenzbedarfen, die in aufeinanderfolgenden Arbeitsplätzen, Teilaufgaben oder Handhabungsschritten auftreten, besteht das Potenzial, diese durch ein einzelnes Assistenzsystem darzustellen. Bei häufig gleichzeitigem Auftreten von unterschiedlichen Assistenzbedarfen besteht das Potenzial darin, mehrere Anforderungen in ein Assistenzsystem zu integrieren.

Unabhängig von den Analysemethoden besteht das Ergebnis dieses Vorgangs darin, dass für einen zu betrachtenden Arbeitsplatz bzw. für eine Teilaufgabe oder einen Handhabungsschritt jene Assistenzbedarfe in den entsprechenden Profilmertkmalen möglichst quantifiziert dargestellt sind, für die eine Roboterassistenzlösung bestimmt werden soll.

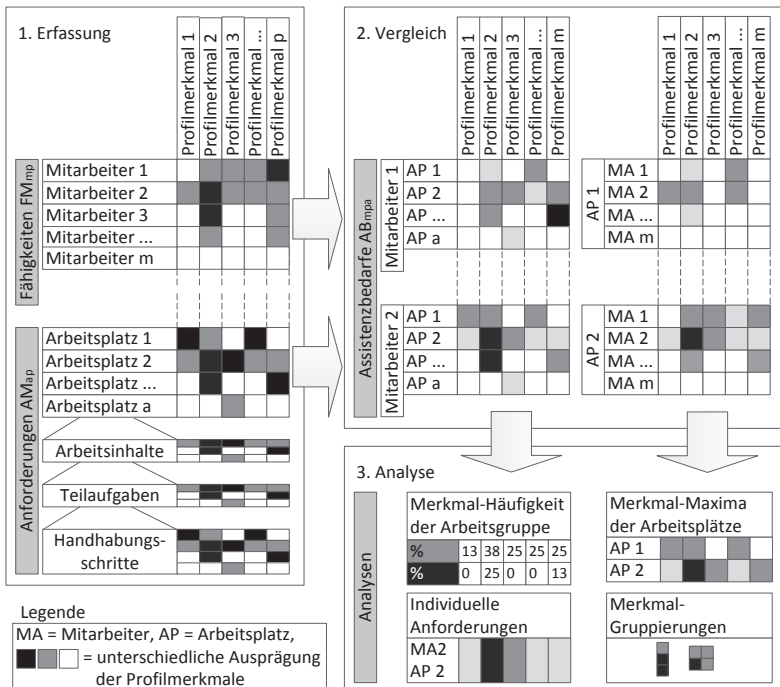


Abbildung 31: Illustration des Analysevorgangs

### 5.2.2 Vorauswahl bestehender Lösungen per Profilvergleich

Ist das Zielprofil bestimmt, gilt es zu prüfen welche bekannten Lösungen die Zielbedingungen hinreichend gut bzw. am besten erfüllen, vgl. Abbildung 32. Die Zieldefinition setzt sich dabei zusammen aus dem Assistenzprofil, dem Anwendungsgebiet bzw. in weiterer Detaillierungsstufe auch Arbeitsinhalt, Teilaufgabe oder Handhabungsschritt sowie Randbedingungen zur Einschränkung der Suchergebnisse. Zu den Randbedingungen können alle Elemente der Maßnahmenbeschreibung eines Lösungsbeispiels verwendet werden (vgl. Abschnitt 5.1.4), beispielsweise die Investitionskosten. Die Randbedingungen sollten in ihrer Detaillierung dem Informationsstand des Planungszeitpunkts entsprechen. Die Suche in der Datenbank kann mit bekannten Verfahren durchgeführt werden, siehe z.B. SCHMITT (2005).

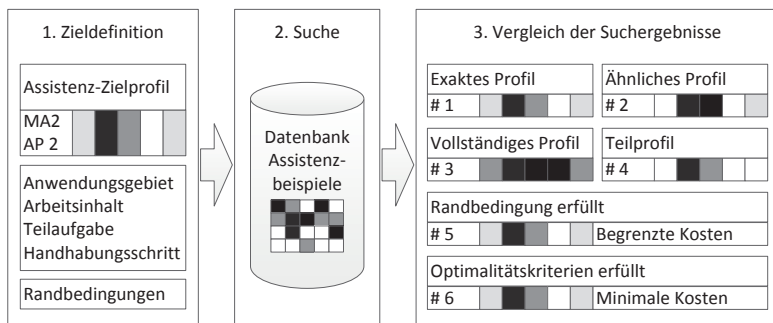


Abbildung 32: Profilvergleich via Datenbank mit Assistenzbeispielen

Die Suchergebnisse können in unterschiedlicher Weise mit dem Zielprofil übereinstimmen und sich in großer Menge unübersichtlich darstellen, so dass eine Eingrenzung erforderlich wird. Mit der Einführung von Kostenfunktionen zur Beschreibung des Erfüllungsgrads der jeweiligen Kriterien, Randbedingungen sowie zur Gewichtung von zusammengesetzten Lösungen gegenüber Einzellösungen ist der Einsatz von Optimierungsalgorithmen möglich. Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis zur Erstellung und Pflege einer solchen automatischen Planung erscheint hinsichtlich der Komplexität des Planungsvorgangs fragwürdig. Es wird daher ein einfaches schrittweises Verfahren vorgeschlagen, welches sich auch mit manuellen Suchvorgängen nachvollziehen lässt. Dieses ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Reihenfolge der Durchgänge eins bis vier ist nach dem zunehmenden Planungsaufwand hinsichtlich zunehmender Anzahl von Teillösungen und zunehmender

Abweichung von der Zieldefinition gestaffelt. Die Grenze der zu betrachtenden Abweichung bzw. Ähnlichkeit liegt im Ermessen des Planenden. Der zunehmende Planungsaufwand ist gleichzeitig ein weiteres Abbruchkriterium, welches jedoch nicht dargestellt ist. Innerhalb der Durchgänge wird die Lösungsmenge nach dem Ausschlussprinzip zunächst reduziert bevor Optimalitätskriterien angewendet werden. Die KO-Kriterien werden aus den Randbedingungen abgeleitet. Als Optimalitätskriterium zur Auswahl einer Einzel- oder zusammengesetzten Lösung bieten sich vorwiegend drei an: minimale Kosten, maximale Assistenz (Übererfüllung der Anforderungen) oder größte Einsatzbreite (Nutzbarkeit in anderen Anwendungsfällen), jeweils bei Mindesterfüllung aller anderen Kriterien. Ferner kann eine minimale Assistenz bzw. eine maximale Beteiligung der Mitarbeiter angestrebt werden um Unterforderung zu vermeiden.

Sind alle Anforderungen hinreichend erfüllt endet der Vorgang und die ausgewählten Lösungen werden in die weitere Planung übernommen. Werden nicht alle Assistenzbedarfe oder Einsatzbereiche abgedeckt, so schließt der Vorgang mit der Auswahl geeigneter Teillösungen während die verbleibenden Assistenzbedarfe zur weiteren Berücksichtigung vermerkt werden.

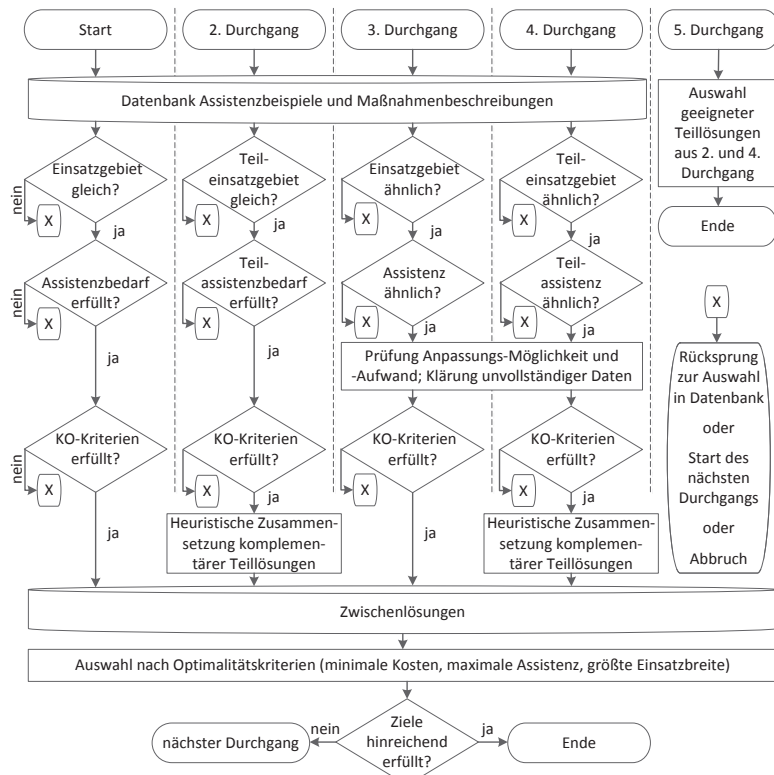


Abbildung 33: Schrittweises Vorgehen für den Profilvergleich mit Assistenzbeispielen

### 5.2.3 Konzeption neuer Assistenzsysteme auf Prozessebene

Wird für die Anforderungen von Arbeitsplatz und Mitarbeiter keine geeignete bestehende Assistenzlösung zugeordnet bzw. sind Assistenzbedarfe ungedeckt, so ist im Vorgehen zwischen drei Alternativen auszuwählen. Zum ersten können Alternativen ohne Roboterassistenz untersucht werden, zweitens können iterativ die zuvor festgelegten Anforderungen angepasst werden, drittens kann der Entwurf eines neuen roboterbasierten Assistenzsystems angestrebt werden.

Im Entwurfsvorgehen ist zunächst ein Grobkonzept zu entwickeln.

### 5.2.3.1 Grobkonzept

Zunächst wird die Grobkonzeptentwicklung dargestellt. Das Vorgehen ist so gewählt, dass es sich mit Computerunterstützung wie auch als ‚Papier-und-Stift-Methode‘ umsetzen lässt, vgl. Abbildung 34.

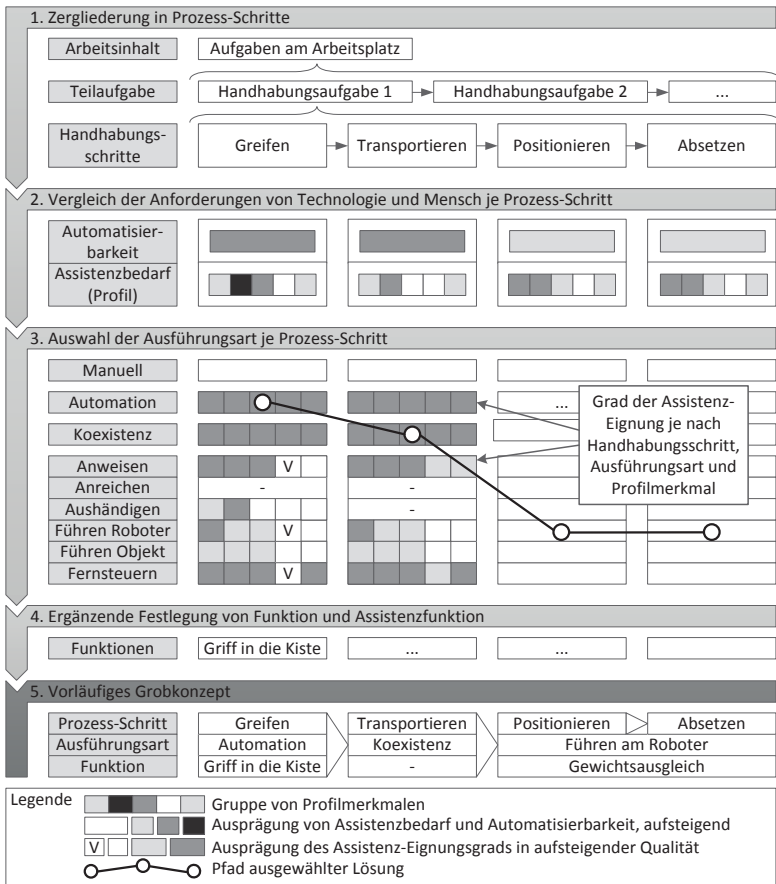


Abbildung 34: Illustration des Vorgehens zur Erstellung eines Grobkonzepts

Zu diesem Planungszeitpunkt ist der Montagevorranggraph bereits beschrieben. Ausgehend davon sind als erstes die Arbeitsinhalte in Teilaufgaben und diese in einzelne Handhabungsschritte zu unterteilen.

Im zweiten Schritt werden die Anforderungen der Handhabungsschritte an eine Ausführung durch Mensch oder Maschine zusammengetragen und verglichen.

Die Anforderungen des Menschen werden durch den Assistenzbedarf beschrieben, der wie zuvor ermittelt wird. Da ein vollständiges Profil des Assistenzbedarfs in der Regel erst mit Fortschreiten der Montageplanung (vgl. Abschnitt 5.1.3, S. 102) und Zunahme der Detaillierung des Arbeitsplatzes erstellt werden kann, ist zu Beginn mit unvollständigem Profil fortzufahren. Liegen keine Mitarbeiterdaten oder keine Assistenzbedarfe vor, kann alternativ auch eine Einschätzung zur Ausführbarkeit bzw. zur Belastungshöhe der Handhabungsschritte vorgenommen werden.

Die Anforderungen an eine automatische Ausführung werden qualitativ durch Verfahren zur Bewertung der Automatisierbarkeit ermittelt. Die Automatisierbarkeit gibt an wie technisch anspruchsvoll bzw. wie wirtschaftlich die Automation des betrachteten Prozesses erscheint. Als konkretes Bewertungsverfahren bietet sich jenes nach ROSS (2002) an, da es im Vergleich früh in der Montagesystemplanung einsetzbar ist, wenig Erfahrungswissen voraussetzt und mit quantitativen Ausgangsdaten arbeitet, vgl. (ROSS 2002, S. 52). Dabei werden neben Stückzahl, Losgröße und Produktionsdauer 20 Kriterien (z.B. Objekt-Formstabilität, Objekt-Symmetrie, Zugänglichkeit des Positionierungsbereichs) in vier Stufen mit Punkten bewertet und in einer Notenwertung zusammengefasst.

Es lässt sich nun bzgl. der Automatisierbarkeit Folgendes argumentieren: Je höher die Automatisierbarkeit eines Arbeitsinhalts bzw. eines Prozesses ist, umso leichter ist dort auch eine robotergestützte Assistenz darstellbar. Gleichzeitig aber steht ein hoher Grad an Automatisierbarkeit wirtschaftlich gegen den Einsatz von Roboterassistenz, da dann mit Vorzug eine Automation umzusetzen ist. Während bei der Automation von Teilen der Arbeitsinhalte der Mitarbeiter noch eine Unterstützung und Entlastung der Mitarbeiter gesehen werden kann, erfordert eine vollständige Automation offensichtlich weitere Maßnahmen zur Beschäftigung der Mitarbeiter. Auf Basis dieser Argumentation sind in dem Kombinationsfeld von Assistenzbedarf und Automatisierbarkeit fünf Bereiche zu unterscheiden, vgl. Tabelle 21.

Tabelle 21: Handlungsbereiche im Feld von Assistenzbedarf und Automatisierbarkeit

		Assistenzbedarf			
		Hoch	Mittel	Gering	Kein
Automatisierbarkeit	Hoch	1			
	Mittel	2	5		4
	Gering	3			

- **Feld 1:** Bei hoher Automatisierbarkeit ist zunächst eine Automation des Teilschritts anzustreben. Dabei ist soweit möglich die Trennung von Roboter und Mensch einer Mensch-Roboter-Koexistenz vorzuziehen. Eine Koexistenz ist im Wesentlichen nur dann zu erwägen, wenn eine örtliche Nähe zu menschengeführten Prozessen erforderlich ist oder ein genereller Platzmangel herrscht.
- **Feld 2:** Bei mittlerer bzw. bedingter Automatisierbarkeit und vorhandenem Assistenzbedarf ist eine Mensch-Roboter-Kooperation zu erwägen. Im Folgenden ist dann zu prüfen, ob bzw. wie durch die Kooperation die vorhandenen Automationshemmnisse und der Assistenzbedarfe ausgeglichen werden können.
- **Feld 3:** Bei geringer oder fehlender Automatisierbarkeit aber vorhandenem Assistenzbedarf ist zu prüfen, ob die Automationshemmnisse durch weitere Maßnahmen oder durch eine Mensch-Roboter-Kooperation abbaubar sind. Dies erfordert im Folgenden eine detaillierte Prozessbetrachtung, woraufhin sich eine Neubewertung anschließt.
- **Feld 4:** Bei geringer und mittlerer Automatisierbarkeit und nur geringem oder fehlendem Assistenzbedarf ist eine manuelle bzw. menschengeführte Ausführung des Teilschritts anzustreben.
- **Feld 5:** Die Fläche 5 stellt den Bereich dar, der für Einsatz oder Neuentwicklung kooperativer Roboterassistenz von besonderem Interesse erscheint.

Ergebnis dieser Betrachtung ist eine vorläufige Grobeinteilung der anzustrebenden Ausführungsart je Prozessschritt (automatisch, koexistierend, kooperierend, manuell) auf Basis der dargestellten technologisch-wirtschaftlicher Erwägungen.

Im nächsten Schritt wird die Ausführungsart weiter präzisiert. Hierzu ist zunächst das Assistenzpotenzial der Ausführungsarten je Profilmerkmal und Prozess-Schritt zu bestimmen. Eine vollständige Darstellung der Ausführungsarten kooperativer Handhabung findet sich in Abbildung 12, eine Argumentation und Bewertung des Assistenzpotenzials in Abschnitt 4.2. Die Potenzialbewertung ist bei Bedarf dem Stand der Technik anzupassen und in eine feinere Gliederung der Einsatzfähigkeits- bzw. Profilmerkmale zu überführen. Ausgehend von der zuvor erstellten vorläufigen Grobauswahl der Ausführungsart wird nun verglichen, welche Ausführungsart den konkreten Assistenzbedarf erfüllen kann. Die Zuordnung kann heuristisch oder per Profilvergleich (vgl. Abschnitt 5.2.2 S. 116) durchgeführt werden. Dabei sind bei der Zusammensetzung mehrerer konsekutiver Prozess- bzw. Handhabungs-Schritte zusätzlich folgende Regeln zu berücksichtigen:

- Es sollte mindestens ein automatisierter Teilschritt integriert werden, vorzugsweise am Beginn oder Ende der Handhabungsaufgabe. Dies kann zum einen die Akzeptanz begünstigen, da eine Nichtnutzung erschwert wird. Zum anderen kann sich der Automationsanteil günstig auf die wirtschaftliche Gesamtbilanz des Assistenzsystems auswirken, (vgl. Reinhart et al. 2011, KALTENBRUNNER & SPILLNER 2013).
- Bei gleicher oder ähnlicher Eignung sind gleichartige Ausführungsarten zu bevorzugen. Dies dient zur Reduktion der Komplexität einer Umsetzung.
- Es sind möglichst wenig Wechsel zwischen den Ausführungsformen anzustreben. Dies dient zur Reduktion von Komplexität und Unterbrechungs- bzw. Störmöglichkeiten im Prozess, sowie zur Reduktion des Umstellungsaufwands des Mitarbeiters in der Kooperation.
- Eine Ausführungsart sollte sich über möglichst viele konsekutive Teilschritte erstrecken. Dies reduziert den Umstellungsaufwand für den Mitarbeiter in der Kooperation. Begründung wie zuvor.
- Es ist keine beliebige Reihenfolge der Ausführungsarten zulässig, vgl. Abbildung 12.

Sind die Ausführungsarten festgelegt, sind in einem letzten Schritt der Grobkonzeptentwicklung Assistenzfunktionen zuzuweisen. Diese Funktionen sind dem Stand der Technik zu entnehmen und können einen oder mehreren Ausführungsformen (vgl. Tabelle 9 S. 68 bis Tabelle 13 S. 71) oder auch Assistenzprofilen zugeordnet werden, wenn Sie in einer Datenbank hinterlegt



und entsprechend beschrieben sind (vgl. Tabelle 20 S.108). Ist angesichts des Assistenzbedarfs direkt auf eine Assistenzfunktion zu schließen kann dieser Schritt vorgezogen werden, wobei sich dann in analoger Weise die Zuordnung der Ausführungsart anschließt.

Ergebnis dieses Schritts ist ein vorläufiges Grobkonzept, bestehend aus der Zuordnung von Ausführungsformen und Assistenzfunktionen zum jeweiligen Handhabungsschritt.

### 5.2.3.2 Detailkonzept

In der weiterführenden Detaillierung kann sich das gewählte Konzept als ungünstig herausstellen, was in Iterationen eine Anpassung des Konzepts erfordert. Den Hemmnissen einer Umsetzung des aktuell geplanten Assistenzsystems lässt sich allerdings nur begrenzt auf der Ebene des Grobkonzepts begegnen. Um eine geeignete Anpassung von Konzeptteilen oder eine Entwicklung neuartiger Assistenzsysteme zu ermöglichen, ist den Ursachen von Umsetzungshemmnissen durch eine detaillierte Betrachtung von Konzept und Prozess auf den Grund zu gehen. Das Vorgehen einer solchen Detailbetrachtung wird im Folgenden erläutert.

In einem ersten Schritt sind, wie beim Grobkonzept, die Arbeitsinhalte in Teilaufgaben und Handhabungsschritte zu unterteilen. Die Ebene der Handhabungsschritte erscheint zur Detaillierung einer Mensch-Roboter-Kooperation aber ungeeignet bzw. unvollständig. Zwar sind nach VDI 2860 sensorische Fähigkeiten wie Messen und Prüfen zur Handhabung zu zählen. Aber die Abbildung von z.B. Entscheidungsprozessen wird nicht berücksichtigt. Daher ist dort, wo Hemmnisse in der Umsetzung auftreten, eine weiterführende Unterteilung und Erweiterung der Handhabungsschritte einzuführen, vgl. Abbildung 35 S. 125. Zur Erweiterung bietet sich ein Modell kognitiver Systeme, vgl. (BANNAT ET AL. 2011) an, welches die Fähigkeiten von Menschen und autonomen Systemen in den folgenden Aspekten umfasst: Wahrnehmen, Wissen, Planen, Entscheiden, Handeln. Die Abbildung 35 gibt ein entsprechendes Beispiel für die Zerlegung des Greifens in Sub-Prozess-Schritte.

Nach der Unterteilung des Prozesses sind die bekannten Einsatz- bzw. Umsetzungshemmnisse jedem Sub-Prozess soweit möglich zuzuordnen. Zu den besonders relevanten Einsatzhemmnissen zählen: geringe Automatisierbarkeit (hohes Automatisierungshemmnis), nicht erfüllter Assistenzbedarf, fehlende Akzeptanz der Mitarbeiter, hohe und unwirtschaftliche Sicherheitsanforde-

rungen, hohe Kosten in der Anschaffung oder im Betrieb sowie lange Ausführungsdauern. Darüber hinaus können beliebige erkannte Hemmnisfaktoren ergänzt werden. Während grundsätzlich alle Hemmnisse auszuräumen sind, sollte die Lösungssuche hierarchisch mit den Bereichen bzw. Sub-Prozessen mit den größten oder häufigsten Hemmnissen begonnen werden. In Abbildung 35 ist dargestellt, wie sich dies zur Übersicht visualisieren lässt.

Zur Bestimmung einer neuen Lösung können zwei Ansätze verfolgt werden. Zum einen kann eine Rekombination bestehender Teillösungen je Sub-Prozessschritt vorgenommen werden, zum anderen kann eine neue Teillösung generiert werden. Für den ersten Ansatz sind zunächst für die betreffenden Schwerpunkte Lösungsalternativen zusammenzutragen und den jeweils betreffenden Sub-Prozessen und Ausführungsformen zuzuordnen. Für jede Lösungsalternative ist dann zu prüfen, ob diese das Potenzial zur Ausräumung der Einsatzhemmnisse aufweist.

Bei der Zusammensetzung einer neuen Gesamtlösung sind die gleichen Regeln wie beim Grobkonzept anzuwenden. Es ist unwahrscheinlich, dass dem Planenden eine auch nur annähernd vollständige Datenbank aller technischen Lösungsmöglichkeiten und Ansätze vorliegt. Ebenso ist es unwahrscheinlich, dass umfangreiche Daten zu einem Großteil der bekannten Lösungsmöglichkeiten mit sinnvollem Zeitaufwand ermittelt werden können. Entsprechend sind zur Ermittlung und Auswahl der Lösungsalternativen vorzugsweise heuristische Verfahren anzuwenden. Bei hinreichender Detaillierung, Vereinfachung oder Fokussierung auf einzelne Merkmale sind ansonsten auch optimierende Verfahren anwendbar, vgl. (PFRANG 1990; BEUMELBURG 2005; ZÜLCH & BECKER 2010; TAKATA & HIRANO 2011).

Für den zweiten Ansatz, der Generierung neuer Teil- oder Gesamtlösungen, können unterstützend Kreativitätstechniken angewendet werden, wie z.B. TRIZ (ORLOFF 2006). Zur Auslegung derartiger mechatronischer Systeme sind Entwurfsvorgehen wie z.B. nach VDI 2206 (VDI 2004) oder nach JANSCHKE (2010) anwendbar.

Ergebnis des Teilschritts ist ein Grobkonzept oder ein detailliertes Konzept, welches im weiteren Planungsvorgehen auszuarbeiten und gegenüber den Anforderungen zu prüfen ist.

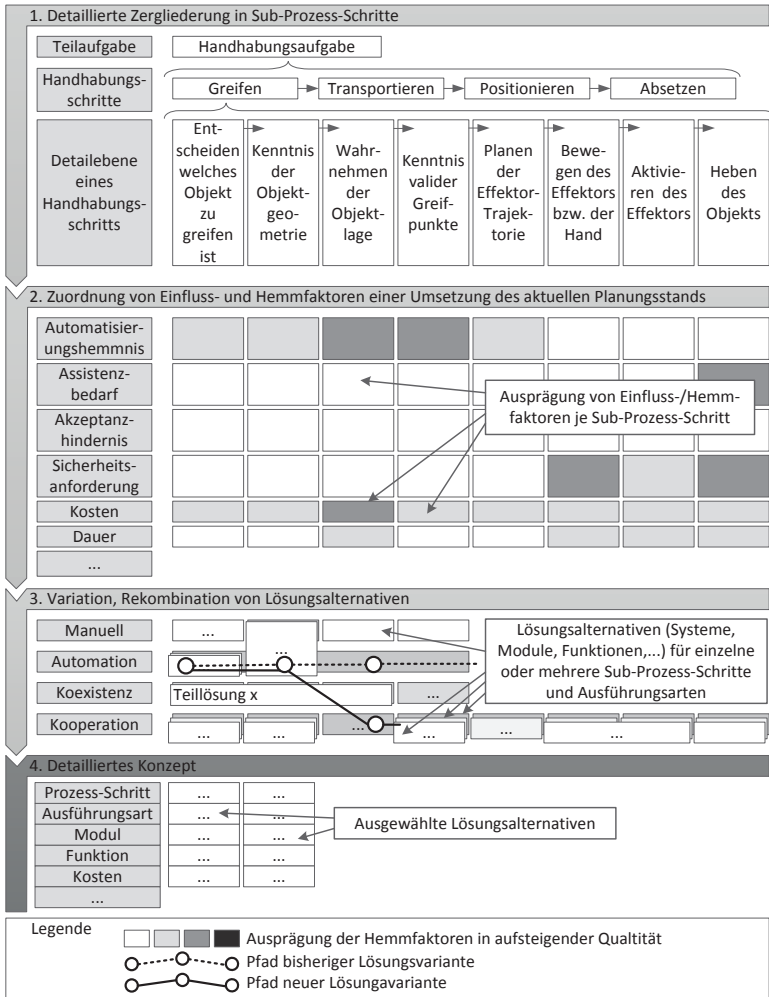


Abbildung 35: Vorgehen zur Ableitung und Überarbeitung eines Detailkonzepts

## 5.2.4 Prüfung der Arbeitsinhalte

Mit der Festlegung der zu integrierenden Assistenz und Automation in der Konzeptentwicklung sind auch die Arbeitsinhalte der assistierten Mitarbeiter innerhalb der Kooperation festgelegt, vgl. (BULLINGER 1986). Es ist an dieser Stelle zu prüfen, ob die Arbeitsinhalte möglicherweise zu monoton oder einseitig

sind, vgl. (NEUMANN ET AL. 2002), und ob die Tätigkeit hinreichend persönlichkeitsförderlich ist, vgl. (HACKER 2000; BULLINGER 1986). An der Beurteilung sollten vorzugsweise auch betroffene Mitarbeiter oder deren Vertretung teilhaben. Entsprechend der Prüfung ist das Konzept ggf. zu überarbeiten.

### 5.2.5 Integration zusätzlicher Aufgaben

Mit der Festlegung des Konzepts ist der Robotereinsatz auch zeitlich umrissen. In diesem Teilschritt ist zu prüfen, ob der Roboter in den Zeiten in denen er nicht assistiert andere Aufgaben (autonom oder assistierend) ausführen könnte. Typische Zeitpunkte sind Arbeitspausen, arbeitsfreie Schichten sowie Intervalle und Wartezeiten zwischen einzelnen Prozessschritten oder Assistenzbedarfen. Ziel der Betrachtung ist es, das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Assistenzsystems insgesamt zu verbessern, so dass z.B. eine teure Assistenzfunktion durch kostengünstige Automation ausgeglichen wird. Vgl. (REINHART ET AL. 2011).

Zum Vorgehen: Zunächst werden die Zeitbereiche bestimmt in denen das Assistenzsystem nicht benutzt bzw. benötigt wird. Anschließend wird nach automatisierbaren Aufgaben oder weiteren Assistenzbedarfen mit kleineren oder möglichst komplementären Bedarfszeiten gesucht. Dann wird vorläufig festgelegt, wo diese zusätzliche Aufgabe erfüllt werden soll: am selben, an einem benachbarten oder an einem entfernten Arbeitsplatz. Diese Anforderungen (insbesondere an Leistung, Mobilität, Sicherheit) sind dann bei der folgenden Detaillierung von System und Layout zu berücksichtigen. Auswahl und Gestaltung der zusätzlichen Automationsinhalte sind parallel zur weiteren Detaillierung des Assistenzsystems durchzuführen und sind bei Bedarf iterativ zu überarbeiten und anzupassen. Den Anforderungen der Assistenzfunktionen sollte dabei Vorrang gewährt werden.

### 5.2.6 Layout

Ist das Konzept erarbeitet, ist analog zur Montagesystemplanung nach BULLINGER (1986) ein Layout zu erstellen. Ziel des Schrittes ist es, zunächst eine gültige, dann eine vorteilhafte Anordnung des Roboterassistenzsystems am Arbeitsplatz zu bestimmen. Das Vorgehen ist so gewählt, dass es sich ohne besondere Anforderungen mit Skizzen und Modellierungen in 2D oder 3D durchführen lässt.

## 5.2.6.1 Auswahl Kinematik

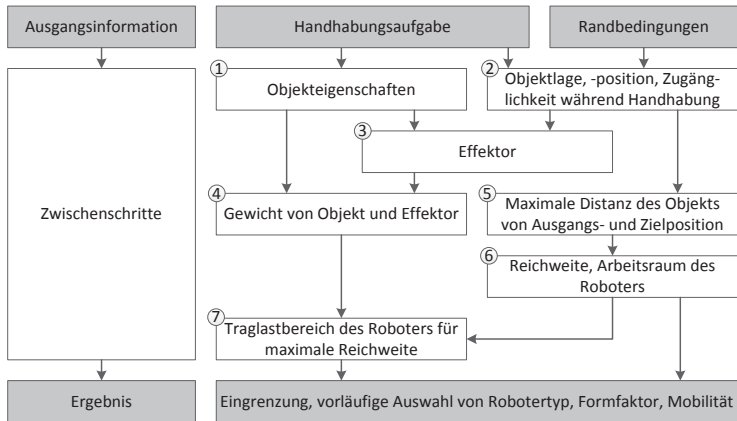


Abbildung 36: Vorgehen zur Auswahl der Roboterkinematik

Zunächst gilt es die Kinematik des Roboters und die Art dessen Integration am Arbeitsplatz festzulegen, vgl. Abbildung 36. Ausgangspunkt stellt die Beschreibung der Handhabungsaufgabe und der Randbedingungen dar. Zu den Randbedingungen sind jene Eigenschaften und Objekte des Arbeitsplatzes zu zählen, die sich auf die Handhabung auswirken können, z.B. die Art der Objektbereitstellung, der verfügbare Platz, vorhandene ortsfeste und bewegliche Objekte oder Mitarbeiter, die Verkettung mit und Integration zwischen benachbarten Arbeitsstationen oder das Organisationsprinzip. Diese sind vorab oder parallel im Zuge der regulären Montagesystemplanung (z.B. nach BULLINGER (1986)) festzulegen oder bei einer Umplanung bereits definiert. Im Rahmen dieses Vorgehens gelten sie als gegeben. Anhand der Randbedingungen und der Handhabungsaufgabe sind Position, Orientierung und Zugänglichkeit des Objekts abzuleiten, die vor, während und nach der Beteiligung des Roboters an der Handhabung vorliegt. In Verbindung mit den Objekteigenschaften (Gewicht, Gestalt, Oberfläche, etc.) wird ein Effektor bzw. die Art des Effectors bestimmt, wobei dessen Gewicht, Maße und Schwerpunktlage abzuschätzen sind. Gewicht von Objekt und Effektor legen die erforderliche Mindesttraglast fest. Zwischen Ausgangs- und Zielposition des handzuhabenden Objekts wird in grober Näherung eine kollisionsfreie Objektbahn festgelegt, unabhängig ob dies automatisch oder kooperierend ausgeführt wird. Sind durch Regelung oder durch

menschlichen Eingriff Abweichungen von der vorgegebenen Bahn oder Orientierung vorherzusehen, so sind die maximal erwarteten oder erforderlichen Abweichungen als Fläche bzw. Hüllvolumen um die davon betroffenen Abschnitte der Objektbahn zu legen. Der größte Abstand von Ausgangs- und Zielposition zu den Punkten der Objektbahn oder deren Hüllflächen bestimmt die Mindestreichweite des Roboters. Die Orientierungsänderung des Handhabungsobjekts über die Objektbahn bestimmt den mindestens erforderlichen Freiheitsgrad der Kinematik. Anhand von Mindesttraglast, Mindestreichweite, Bahn und Orientierung des Objekts ist eine Vorauswahl unter den verfügbaren Robotertypen zu treffen. Roboter, die keine sichere Steuerung aufweisen oder nicht inhärent sicher gestaltet sind, sind frühzeitig auszuschließen. Inhärent sichere Robotersysteme weisen geringere Traglasten auf und sind nach dem Stand der Technik ab einer bestimmten Traglastgrenze (Stand 2012: ab 15 kg) auszuschließen, sonst jedoch zu bevorzugen, vgl. Abschnitt 3.2.2. Bei hohen Traglasten sollten als Varianten berücksichtigt werden, dass mehrere Roboter beteiligt werden können und dass prinzipiell auch Roboter von passiven Handhabungs- und Tragehilfen unterstützt werden können. Hohe Reichweiten bzw. große Arbeitsräume sind neben dem Einsatz großer Roboterkinematiken auch durch mehrere oder mobile Roboterkinematiken erzielbar (vgl. Abschnitt 3.2.3).

#### 5.2.6.2 Anordnung der Kinematik und Bedienschnittstellen

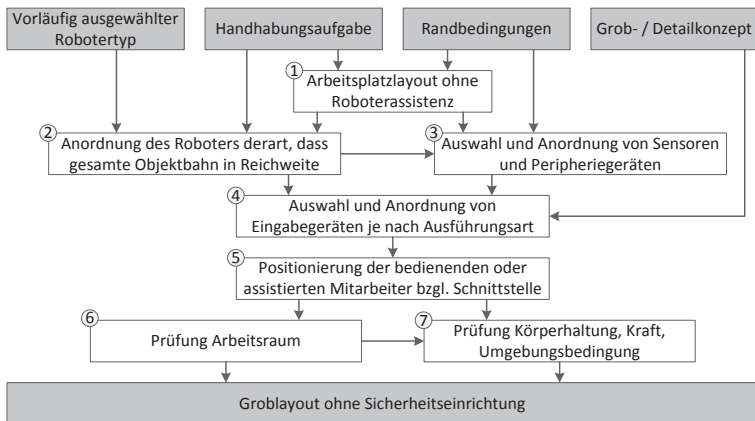


Abbildung 37: Vorgehen zur Positionierung der Roboterkinematik am Arbeitsplatz

Ist ein Robotertyp gewählt, ist dieser anschließend am Arbeitsplatz für die Handhabungs- und Assistenzaufgabe geeignet zu positionieren, vgl. Abbildung 37. Vor der Platzierung des Roboters ist das Layout des Arbeitsplatzes mit den bereits bekannten oder festgelegten Objekten maßstäblich in einer Skizze oder einem Modell darzustellen. Die zuvor grob geplante Bahn des handzuhabenden Objekts ist einzubeziehen und eine zugehörige Bahn des Roboterflansches zu ermitteln, z.B. durch Modellierung oder Vorwärtstransformation (CRAIG 2005). Der Roboter ist so zu positionieren und zu orientieren dass die gesamte Bahn (einschließlich der Hüllflächen und -Volumen möglicher Bahnabweichungen) des Roboterflansches im Arbeitsbereich des Roboters liegt. Im Beispiel von Abbildung 38 lässt sich die am ehesten durch eine Überkopfanordnung erreichen. Es ist dann zu prüfen, ob für alle Punkte der Bahn eine gültige, singularitäts- und kollisionsfreie Konfiguration der Roboterkinematik existiert. Dies kann in einfachen Fällen mit physischen oder virtuellen Modellen sowie Skizzen experimentell oder in komplexeren Fällen numerisch oder simulativ bestimmt werden, vgl. (CRAIG 2005 S. 19 ff., S. 101 ff., HELMS 2006, S. 69 ff., REINHART & TEKOUO 2009). Dies ist analog für jene Flächen oder Volumen durchzuführen, die sich durch Regelung oder menschlichen Eingriff als weitere Lösungsräume der Flanshbahn aufspannen. Für die Platzierung mobiler Roboter beschreibt HELMS (2006) ein formalisiertes Vorgehen.

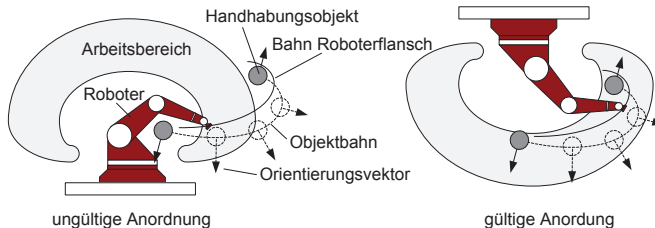


Abbildung 38: Grobplatzierung des Roboters bzgl. der Objektbahn

Um eine eventuell erforderliche Neupositionierung zu erleichtern erscheint es vorteilhaft, im Ergebnis der Prüfung gültige und ungültige Lösungsräume aufzuzeigen. Eine Methode zur Erstellung der Visualisierung illustriert Abbildung 51 im Anhang 9.7.

Ist der Roboter positioniert, werden erforderliche Sensoren, Peripherie- und Eingabegeräte am Arbeitsplatz oder am Roboter angeordnet. Die Auswahl der Eingabegeräte erfolgt heuristisch aus einer Übersicht des Stands der Technik

(vgl. Abschnitt 3.2.6) unter Berücksichtigung der gewählten Ausführungs- bzw. Kooperationsarten und Assistenzfunktionen (vgl. Abschnitte 3.3, 4.2). Auf Basis der Lage und Zugänglichkeit der Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie der Ausführungsart der Handhabungsschritte werden dann die mit dem Roboter kooperierenden Mitarbeiter im Layout positioniert. Die Bedienelemente müssen im Greifraum und Anzeigen im Sichtfeld des Mitarbeiters liegen, wobei jeder einzelne Handhabungsschritt zu berücksichtigen ist. Zur Repräsentation des Menschen im Layout können z.B. Schablonen oder Modelle verwendet werden (vgl. Abschnitt 2.2.3.5) wobei die Standard- bzw. Perzentilmaße bei Bedarf den bekannten Leistungswandlungen anzupassen sind. Mit der Positionierung der Mitarbeiter sind mehrere Belastungsfaktoren bestimm- bzw. abschätzbar und gegen die Mitarbeiteranforderungen zu prüfen. Dies sind zum einen Körperhaltung (bei 2D-Skizzen ist die Arbeitshöhe zu ergänzen), Platzverhältnisse und Nähe zu Umgebungseinflüssen. Der Vektor kraftbasierter Eingaben lässt sich entlang der Handhabungsschritte oder Objektbahn aus der Lage von Eingabegerät, der Bewegungsrichtung des Objekts und der Position des Mitarbeiters bestimmen. Die erforderliche Höhe der (Bedien-)Kraft wird durch die Ausführungsart der Kooperation und die Wahl der Eingabegeräte limitiert.

In den Bereichen, wo der Mitarbeiter eine Bahnabweichung durch Führen am Objekt oder am Roboter erzeugt, ist für den gesamten Bereich zu prüfen, ob der Mitarbeiter die erforderlichen Bedienschnittstellen in günstiger Weise erreichen bzw. einsehen kann. Eine Möglichkeit hierzu ist die Betrachtung weniger, vom Planer ausgewählter, markanter Punkte (mit entsprechender Kinematik-Konfiguration und Bedienerpose), um über die Notwendigkeit von Änderungen im Layout oder im Konzept entscheiden zu können. Für eine detailliertere Betrachtung sind simulative und berechnende Methoden anzuwenden, bei denen zulässige Posen oder Bahnen der Roboterkinematik unter Berücksichtigung geometrischer und funktioneller Randbedingungen bestimmt werden, vgl. (Tekouo Moutchiho 2012). Dabei ist dann der Mitarbeiter, ausgehend von der Lage der Bedienschnittstelle, als weiteres Objekt der Roboterkinematik, als Teil der Kinematik oder als Randbedingung eines Gleichungssystems zu integrieren.

Ergebnis dieses Teilschritts ist die Positionierung von Mensch und Roboter am Arbeitsplatz für die jeweiligen Prozessschritte.



### 5.2.6.3 Sicherheitsmaßnahmen

Nachdem die Aufgaben, Aufenthaltsort und Interaktion von Mensch und Roboter definiert wurden können die daraus resultierenden Gefährdungen analysiert und entsprechende Sicherheitsmaßnahmen abgeleitet werden, vgl. Abbildung 39: Vorgehen zur Auswahl und Integration eines Sicherheitskonzepts. Für die Durchführung sollten Sicherheitsbeauftragte oder entsprechend Sachverständige hinzugezogen werden.

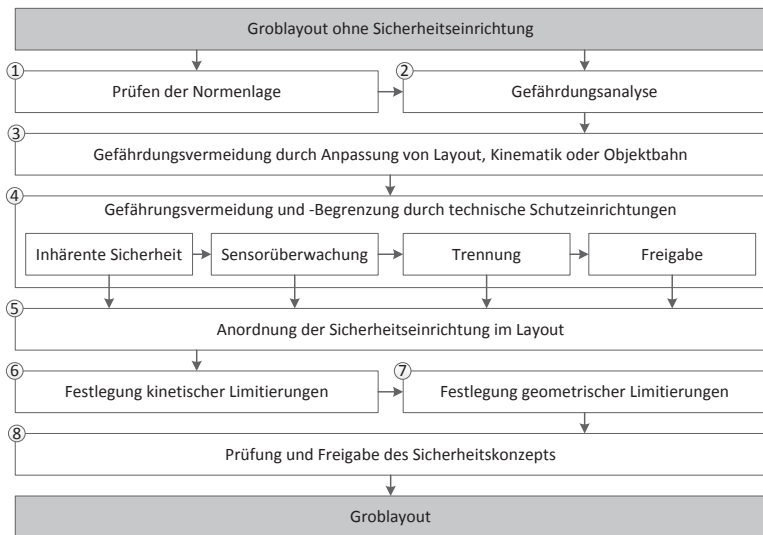


Abbildung 39: Vorgehen zur Auswahl und Integration eines Sicherheitskonzepts

Zunächst sind die zu berücksichtigenden Normen (vgl. Tabelle 34) auf Aktualität zu prüfen. Anschließend sind die möglichen Gefahrenquellen und Gefährdungen (vgl. Abschnitt 3.2.2) aufzulisten, wobei durch Beurteilung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Folgeschwere das jeweilige Risiko zu bestimmen ist, vgl. DIN EN ISO 12100, BG/BGIA U 001/2009 2011-02. Wo zutreffend, sind diese den jeweiligen Handhabungsschritten zuzuordnen. Die Bewertung ist zunächst durch Abschätzung vorzunehmen und mit zunehmender Detaillierung des Layouts zu präzisieren. Alle nicht akzeptablen Risiken sind im Folgenden sukzessive durch Maßnahmen auszuräumen, wobei mit dem höchsten Risiko begonnen wird. Zuvorderst ist zu versuchen, Gefährdungen durch Anpassung

bisheriger Festlegungen (Layout, Roboter- bzw. Objektbewegung, Roboterkinematik oder Kooperationsart) zu eliminieren. Durch Zuordnung der Risiken zu den einzelnen Handhabungs- bzw. Prozessschritten sowie deren grafische Eintragung in das Layout wird eine einfache Gesamtübersicht geschaffen. Gleiche, ähnliche und benachbarte Risiken lassen sich so zusammen mit den Bedingungen von Layout und Handhabungsprozess leicht erkennen, gruppieren und Anpassungen gezielter vornehmen. Lassen sich Risiken durch die genannten Anpassungen nicht verhindern sind weitere technische und gestalterische Maßnahmen zu treffen, deren Sicherheitsniveau mindestens dem der Risikoklassifizierung entsprechen muss. Dabei erscheint die Festlegung einer Reihenfolge der Berücksichtigung entsprechend Planungs- und Umsetzungsaufwand sowie technischer Reife sinnvoll. Vorzugsweise sind (schadensbegrenzende) Maßnahmen anzuwenden, die eine inhärente Sicherheit von System, Modul oder Funktion bieten, vgl. ‚Schadensbegrenzung‘ in Abschnitt 3.2.2 S. 39 ff. Diese Maßnahmen sind in der Regel nur bei geringen bzw. limitierten kinetischen Anforderungen der Handhabungsaufgabe einsetzbar.

Als Zweites ist eine Sensorüberwachung der einzelnen Handhabungsschritte zu betrachten vgl. Tabelle 6 S. 45., beginnend mit Maßnahmen zur ‚Arbeitsraumüberwachung‘. Erscheint die Unterteilung der sensorbasierten Arbeitsraumüberwachung zu grob ist eine sensorische Überwachung der Kinematik zu erwägen. Jene Ansätze, bei denen Sensoren an der Kinematik befestigt sind (Überwachung „von innen“ (OSTERMANN ET AL. 2011)) sind zu bevorzugen, wenn der verfügbare Raum nur klein oder verschachtelt ist. Sie sind zu benachteiligen, wenn eine größere Variantenvielfalt vorliegt, da für eine Überwachung von Effektor und Handhabungsobjekt Anpassungen an der sensorischen Hardware vorzunehmen sind. Jene Ansätze, bei denen Sensoren die Kinematik „von außen“ beobachten (OSTERMANN ET AL. 2011), sind zu bevorzugen wenn nur wenige oder keine Okklusionen vorliegen. Die Lösungen zur Lokalisation von Personen oder Gliedmaßen weisen bisher nur eine grobe Ortsauflösung oder ein geringes Sicherheitsniveau (safety integrity level) auf. Deren Einsatz erscheint daher eher nur für sicherheitsförderliche aber unkritische Funktionen geeignet, z.B. zur Verlangsamung der Roboterbewegung bei unterkritischen Abständen. Soll der Roboter Hindernissen ausweichen können, ist dieser Raum vorab zu definieren und wie zuvor hinsichtlich Kollision, Singularität und Erreichbarkeit zu prüfen.

Als Drittes sind trennende Sicherheitsvorrichtungen zu betrachten. Zwar schränken diese die Kooperationsfähigkeit des Systems ein, ermöglichen aber

einen Einsatz mit geringen oder keinen kinetischen Limitierungen. Eine Trennung bietet sich daher erst an, wenn mehrere zusammenhängende Prozessschritte automatisch ablaufen können.

Als letzte technisch-gestalterische Maßnahme ist die Freigabe (durch Zustimmungseinrichtungen) zu verwenden. Diese lässt sich zwar sehr flexibel einsetzen, ist aber bei längeren Prozessdauern im Betrieb kostspielig, da mit Mensch und Roboter zwei Ressourcen an eine Aufgabe gebunden werden. Ein weiterer Nachteil besteht in der systematischen Integration menschlicher Fehlerquellen.

Bei verbleibenden Risiken ist zu prüfen, ob sie organisatorisch, z.B. durch Betriebsanweisungen gelöst werden können. Andernfalls sind iterativ frühere Festlegungen anzupassen oder das Gesamtkonzept als nicht umsetzbar zurückzuweisen.

Nach Auswahl der Sicherheitskonzepte sind deren Bestandteile, wie z.B. Sensoren, im Layout zu integrieren. Dabei ist die technische Kompatibilität sicher zu stellen. Entsprechend des Sicherheitskonzepts sind kinetische Limitierungen (Geschwindigkeit, Kraft,...) für die jeweiligen Bahnabschnitte bzw. Handhabungsschritte festzulegen. Sind die dynamischen Größen bestimmt können die geometrischen Limitierungen (Sicherheitsabstände, Arbeitsraumbeschränkungen) definiert werden. Basis hierfür bilden die zuvor beschriebene Normung (vgl. Tabelle 34) und Methoden (siehe ‚Kollisionsvermeidung‘ Abschnitt 3.2.2). Zur Unterstützung können ferner Softwarewerkzeuge herangezogen werden, vgl. z.B. (KRIEGER 2010).

Anschließend ist die Gültigkeit des bisherigen Layouts (Kollision bei Bewegungen, Zugänglichkeit) sicherzustellen und zuletzt ist das Sicherheitskonzept gesondert durch Dritte (Berufsgenossenschaften, Technischer Überwachungsverein/TÜV) zu überprüfen.

Der Teilschritt schließt mit der Freigabe des Sicherheitskonzepts und der Festlegung des Groblayouts.

### **5.2.7 Bewertung von Assistenz und Ergonomie**

Ziele dieses Teilschrittes sind die Ermittlung der durch das Assistenzsystem dargestellten Anforderungen an die Mitarbeiter sowie der erneute Abgleich dieser Daten mit den Anforderungen der Mitarbeiter. Hierzu sind übliche Verfahren zur Belastungsanalyse und Profilvergleich (vgl. Abschnitte 2.2.2.2, 2.2.3.1) anzuwenden.

Bezüglich der assistierten Aufgabe sind für den Mitarbeiter Aufenthaltsort, Wege, Zeiten und Aktionen bereits durch die Groblayoutplanung definiert. Entsprechend sind die unter Umgebungsbedingung, Körperhaltung und Zeitregime zusammengefassten Belastungsfaktoren zu bestimmen. Die zu den Umgebungsbedingungen zählenden Gefährdungen sind der Betrachtung der Sicherheitsmaßnahmen zu entnehmen, siehe Abschnitt 5.2.6.3 .

Zur allgemeinen Bestimmung der Belastung in den Bereichen Kraft und Sensorik sind folgende Daten heranzuziehen:

- Kinetische Beschreibung der Handhabungsaufgabe, z.B. durch Definition der Bahnen von Flansch, Objekt oder Bedien- bzw. Interaktionsmedien
- Kinetische Wechselwirkung zwischen Bedienmedien und Mitarbeiter
- Kinetische Wechselwirkung zwischen Bedienmedien und Roboter
- Relative Positionen zwischen Mitarbeiter und Bedienmedien

Bahnen und Positionen sind durch die bisherige Layoutplanung definiert. Die kinetischen Wechselwirkungen lassen sich mit den folgenden Methoden bestimmen:

- Abschätzung, Erfahrung
- Messung, Experiment
- Ermittlung via Kennlinien (z.B. als Arbeitspunktbestimmung in Kraft-Geschwindigkeit- und Kraft-Weg-Diagrammen)
- Ermittlung via Übertragungsfunktion (vgl. LUNZE 2012, LUNZE 2013)

Weiterhin ist zu prüfen, ob das Assistenzsystem die Leistungsfähigkeit Einzelner (insbesondere nicht leistungsgewandelter Mitarbeiter) beeinträchtigt oder eine Unterforderung Einzelner vorliegt.

Werden die Assistenzbedarfe bzw. Mitarbeiteranforderungen nicht hinreichend erfüllt, ist zur Behebung eine Anpassung in Layout oder Konzept vorzunehmen. Ist eine entsprechende Änderung nicht möglich, sind nicht robotergestützte Ansätze zu prüfen, vgl. Abschnitt 2.2.

### 5.2.8 Einschätzung zur Akzeptanz

Mit der Fertigstellung des Sicherheitskonzepts sind die wesentlichen Faktoren, die zur Akzeptanz beitragen (vgl. Abschnitt 3.2.8) im Grobkonzept festgelegt. Ziel dieses Teilschrittes ist es, vermeidbare Gestaltungsmängel hinsichtlich Einsatz und Nutzung des Assistenzsystems aufzuzeigen, um durch weitere Anpassungen eine spätere Nichtnutzung zu vermeiden. Die Integration betroffener Abteilungen und einer Mitarbeitervertretung ist in diesem Teilschritt besonders anzustreben. Wird das Assistenzsystem als ein Handhabungshilfsmittel in den Kooperationsformen ‚Führen am Objekt‘ oder ‚Führen am Roboter‘ eingesetzt, kann das Verfahren nach KALTENBRUNNER & SPILLNER (2013) verwendet werden. Darüber hinaus sind die bekannten Einflussfaktoren (vgl. Abschnitt 3.2.8) mit Hilfe eines daraus abgeleiteten Checklistenvorgehens zu bewerten, siehe Tabelle 22. Werden nicht alle Kriterien erfüllt ist der Lösungsvorschlag nicht notwendigerweise abzulehnen, jedoch mit besonderer Sorgfalt zu prüfen und eine Einzelfallentscheidung vorzunehmen. Abschließend ist eine Freigabe z.B. durch eine Mitarbeitervertretung einzuholen.

Ergebnis dieses Teilschritts ist ein hinsichtlich der Mitarbeiterakzeptanz angepasstes und freigegebenes Groblayout.

*Tabelle 22: Checkliste zur akzeptablen Gestaltung des Assistenzsystems*

Prüfung der Zielerfüllung
Ist die Zielerfüllung nicht gegeben ist eine Überarbeitung von Layout oder Konzept zwingend erforderlich.
Sind die Zeit-, Mengen-, Zielvorgaben von allen dort eingesetzten Mitarbeitern erreichbar? (Unter Berücksichtigung der langsamsten Arbeitsgeschwindigkeit bei fähigkeitsabhängigen kollaborativen und manuellen Prozessschritten und unter Berücksichtigung durchschnittlicher Verlustzeiten durch wechselseitiges Warten oder Unterbrechen von Mensch und Maschine)
Ist die kollaborative Aufgabe hinsichtlich der Komplexität (z.B. zu steuernden Freiheitsgrade) für alle Mitarbeiter beherrschbar?
Identifikation von Hindernissen in der Aufgabenerfüllung je Handhabungs- bzw. Prozessschritt
Die Hindernisse in der Aufgabenerfüllung sind weitgehend zu reduzieren oder eliminieren.

Treten Wartezeiten oder Unterbrechungen in den Aufgaben des Mitarbeiters auf? Sind diese vermeidbar, reduzierbar oder mit weiteren Arbeitsinhalten auffüllbar?
Ist die Bedienung schwergängig (kraftaufwendig, träge) oder umständlich (viele Bedienaktionen erforderlich)?
Liegen Hindernisse in der Bewegungsbahn von Roboter, Objekt oder Mitarbeiter?
Erfordern Einsatz oder Nutzung des Assistenzsystems ungünstige oder anstrengende Körperhaltungen oder Bewegungen vom Mitarbeiter?
Nimmt der Mitarbeiter an kollaborativen Prozessen teil, die nicht oder nur indirekt mit der Erfüllung der Aufgaben des Mitarbeiters zu tun haben?
Ist hinreichend Platz verfügbar?
<b>Vergleich der Arbeitsausführung mit und ohne Roboterunterstützung</b>
Ist die Ausführung der Arbeit bei Einsatz oder Nutzung der Roboterunterstützung langsamer oder aufwendiger als bei einer Nichtnutzung besteht ein dringender Handlungsbedarf zur Anpassung von Layout oder Konzept. Dabei kann neben der Verbesserung der Leistungseigenschaften des Assistenzsystems auch eine Erschwerung der Nichtnutzung angestrebt werden.
Ist die Arbeit ohne Roboterunterstützung schneller ausführbar?
Ist die Arbeit ohne Roboterunterstützung von einem Einzelnen oder auch von mehreren Mitarbeitern gemeinsam ausführbar?
Erfordern Einsatz oder Nutzung des Assistenzsystems zusätzliche, umständlichere oder belastendere Aktionen des Mitarbeiters gegenüber der nicht assistierten Ausführung?
<b>Prüfung der Einhaltung von Komfortbedingungen</b>
Es ist eine möglichst weitgehende Erfüllung der Komfortbedingungen anzustreben.
Ist die Bedienung intuitiv? Sind die Mitarbeiter mit dem Bedienkonzept bereits vertraut?
Sind Betriebszustand, Aktionen und Bewegungsverhalten des Roboters für den Mitarbeiter vorhersehbar und nachvollziehbar?
Ist das Bewegungsverhalten des Roboters stetig?
Verlässt oder betritt der Roboter das Blickfeld?
Tritt eine hohe oder sehr geringe Geräuscentwicklung bei der Roboterbewegung auf?
Ist das Annäherungsverhalten an Angst- oder Wohlempfinden angepasst?
Sind Parameter der Kollaboration an den Mitarbeiter anpassbar?

Sind Fehlbedienungen weitgehend ausgeschlossen? Ist Feedback bei Fehlbedienung vorgesehen?
Sind Einschränkungen der Bewegungsfreiheit des Roboters für den Mitarbeiter vor Erreichen der Einschränkungen ersichtlich?
<b>Klärung indirekter Faktoren</b>
Diese weichen Faktoren sind je nach Unternehmenskultur unterschiedlich stark zu berücksichtigen. Gleichwohl ist anzustreben diese positiv zu erfüllen.
Kann eine Stigmatisierung der assistierten Mitarbeiter vermieden werden? Ist der Arbeitsplatz bzw. das Assistenzsystem auch von nicht Leistungsgewandelten nutzbar?
Wird den Mitarbeitern durch die Assistenz die Perspektive einer längeren Beschäftigung geboten?
Können Ängste vor einer Rationalisierung durch Robotereinsatz genommen werden? Sind die Ziele der Roboterassistenz den betroffenen Mitarbeitern klar?

### 5.2.9 Kostenbewertung

In diesem Teilschritt werden drei Ziele verfolgt. Erstens die Prüfung der Einhaltung der finanziellen Rahmenbedingungen. Zweitens der Vergleich und die Auswahl vorteilhafter Realisierungsalternativen. Drittens die Identifikation von Kostentreibern innerhalb der Prozessschritte und Systembestandteile.

Für die monetäre Bewertung und Prüfung des Gesamtsystems sind übliche Verfahren der Investitionsrechnung heranzuziehen, wie z.B. Kosten- Gewinn- vergleichs- oder Amortisationsrechnung (siehe KRUSCHWITZ 2005). Bei der Zuordnung der finanziellen Rahmenbedingungen ist zu berücksichtigen, dass die Systemgrenzen des Assistenzsystems bei einer Integration zusätzlicher Automationsaufgaben erweitert worden sein können. Da es sich beim Einsatz des Assistenzsystems um eine an die Belegschaft gerichtete Maßnahme handelt, ist soweit möglich auch der Nutzen bzw. die Wirkung auf die Belegschaft monetär abzubilden, siehe z.B. (FALCK & ROSENQVIST 2012). Vergleich und Auswahl von Realisierungsalternativen sind ebenso über die Investitionsrechnung durchzuführen. Unterscheiden sich die Lösungsalternativen in ihrer Leistungsfähigkeit oder sind relevante Faktoren nicht quantitativ oder monetär abzubilden, so kann ergänzend eine Nutzwertanalyse (ZANGEMEISTER 1976) angewendet werden.

Zur Identifikation der Kostentreiber ist zunächst eine Zuordnung der Kosten, bzw. allgemein der erwarteten Zahlungsreihen zu den jeweiligen Prozessschritten

vorzunehmen. Dabei kann eine durchschnittliche und eine spezifische Zuordnung vorgenommen werden, wie Abbildung 40 verdeutlicht. Eine Formalisierung erfolgt im Anschluss der Erläuterung.

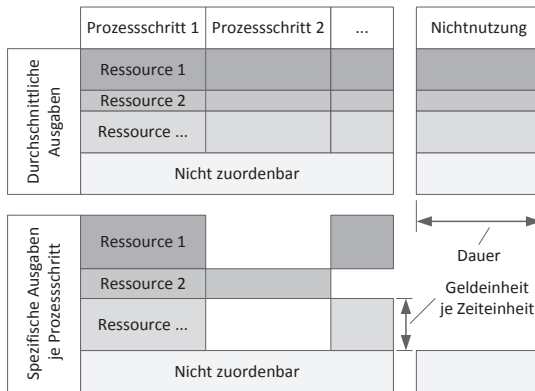


Abbildung 40: Durchschnittliche und spezifische Zuordnung des Ressourceneinsatz je Prozessschritt einschließlich der Nichtnutzungszeiten

Mit der durchschnittlichen Ausgabenzuordnung lässt sich insbesondere der Kostenanteil der Nichtnutzung (bestehend aus Pausen, Wartezeiten, Wartungsintervallen etc.) herausstellen. Bei einem hohen Anteil solcher Opportunitätskosten sollte die Integration weiterer Nutzungsmöglichkeiten wie z.B. weitere Automationsaufgaben erwogen werden. Dies gilt insbesondere, wenn sich das Gesamtsystem bisher als unwirtschaftlich errechnet.

Mit der spezifischen Ausgabenzuordnung werden jedem Prozessschritt nur die Kosten der Ressourcen zugeordnet, die der Prozessschritt erfordert. Die nicht zuordenbaren Kosten werden gleich verteilt. Diese Darstellung ermöglicht einen Kostenvergleich unterschiedlicher Ausführungsvarianten auf Ebene der Prozessschritte. Bei hohen Kosten einzelner Prozessschritte sollte eine iterative Prüfung und Überarbeitung auf Ebene der Detailkonzeption vorgenommen werden.

Die Zuordnung lässt sich wie folgt formalisieren:

Formel 5-3

$$KD_{psi} = \frac{K}{d_{Bet}} d_{psi} [GE]$$



Formel 5-4

$$KS_{psi}R_j = \frac{KR_j}{n_{pBet} \sum_{\min.i}^{max.i} d_{psi}} + \frac{KN}{d_{Bet}} d_{psi} [GE]$$

Formel 5-5

$$KS_{psi} = \sum_{\min.j}^{max.j} KS_{psi}R_j [GE]$$

$d_{Bet}$  = Dauer bzw. Laufzeit des Anlagenbetriebs

$n_{pBet}$  = Häufigkeit der Prozessdurchführung während der Laufzeit

$d_{psi}$  = Dauer von Prozessschritt  $i$

$d_{psi}R_j$  = Dauer des Ressourceneinsatzes der Ressource  $i$

in Prozessschritt  $j$

$d_{psi}R_j = \begin{cases} d_{psi}, & \text{wenn Ressource für Prozessschritt erforderlich} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$GE$  = Geldeinheiten

$K$  = Gesamtkosten (Beschaffung, Betrieb und Rezyklierung)

$KD_{psi}$  = Durchschnittliche Kosten des Prozessschritts  $i$

$KN$  = Summe der nicht zuordenbaren Kosten

$KR_j$  = Gesamtkosten der Ressource  $j$

$KS_{psi}$  = Spezifische Kosten des Prozessschritts  $i$

$KS_{psi}R_j$  = Spezifische Kosten der Ressource  $j$  für Prozessschritt  $i$

### 5.2.10 Entscheidung und Maßnahmenbeschreibung

Mit dem Vorgehen wird das Roboterassistenzsystem am Arbeitsplatz soweit detailliert, dass eine Fortführung der Montagesystemplanung im Bereich der Feinplanung fortgesetzt werden kann. Die vom Roboterassistenzsystem nicht betroffenen Gestaltungsmerkmale des Arbeitsplatzes sind mit der regulären Montagesystemplanung parallel zu planen. Die Entscheidung zur Fortführung und Umsetzung geschieht ebenfalls im Rahmen der regulären Montagesystemplanung.

Ist ein neues Assistenzsystem gestaltet worden, so ist dies als weitere Lösung aufbereitet in einem Maßnahmen- und Beispielkatalog aufzunehmen (vgl. Abschnitt 5.1.4, Maßnahmenbeschreibung S. 107). Zur Ergänzung des Katalogs sind im Betrieb die tatsächliche Nutzung und Wirkung der Maßnahme zu prüfen und Feedback der Nutzer einzuholen.

### 5.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird ein methodisches Vorgehen zur Planung und Entwicklung von Roboterassistenz-Lösungen für Handhabungsaufgaben in der Montage vorgestellt. Nach der Definition von Zielen und Anforderungen werden zunächst geeignete Einstiegszeitpunkte in der Montagesystemplanung identifiziert. Ferner wird eine Maßnahmenbeschreibung definiert, um für die Planung eine Aufbereitung und Nutzung von Maßnahmen und Beispielen in einem Katalog zu ermöglichen. Das neu entwickelte Planungsvorgehen ist eng an das Vorgehen nach BULLINGER (1986) angelehnt und erweitert dieses. Die wesentlichen Merkmale des Vorgehens bestehen darin, dass zu Beginn ein Assistenzbedarf ermittelt und dadurch geeignete Lösungen aus einem Maßnahmenkatalog zugeordnet werden. Weiterhin wird für die Konzeption neuer Assistenzlösungen im Bereich der Handhabung die Betrachtung von Prozess-Subteilschritten durch Ergänzung kognitiver Fähigkeiten vorgeschlagen. Schließlich wird die iterative Lösungsbildung durch Ergänzung von spezifisch zu prüfenden Eigenschaften wie der Akzeptanz abgesichert.

Durch die Anlehnung an das bekannte Planungsverfahren nach BULLINGER (1986) wird die Anwendbarkeit sichergestellt. Durch die eindeutige Verwendung von Kenngrößen und die schrittweise Vorgehensbeschreibung werden die Anforderungen an Kompatibilität und Konsistenz erfüllt. Zur Bewertung von Validität, Vollständigkeit, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit ist eine Anwendung des Verfahrens erforderlich, die im Folgenden vorgenommen wird.

## 6 Beispielhafte Anwendung des Vorgehens

In diesem Abschnitt wird das zuvor beschriebene Vorgehen zur Planung von Roboterassistenz an einem Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der getakteten Serienfertigung angewendet. Ziel ist es, das Vorgehen dadurch gleichzeitig zu veranschaulichen und zu plausibilisieren.

### 6.1 Ausgangssituation

#### 6.1.1 Arbeitsinhalt, Layout

Abbildung 41 zeigt das Layout des betrachteten Arbeitsplatzes an einem getakteten Montageband. Die Aufgabe des Mitarbeiters besteht darin, Bauteile aus der Gitterbox und Teilebereitstellung zu entnehmen und am Basisteil werkzeuglos zu montieren.

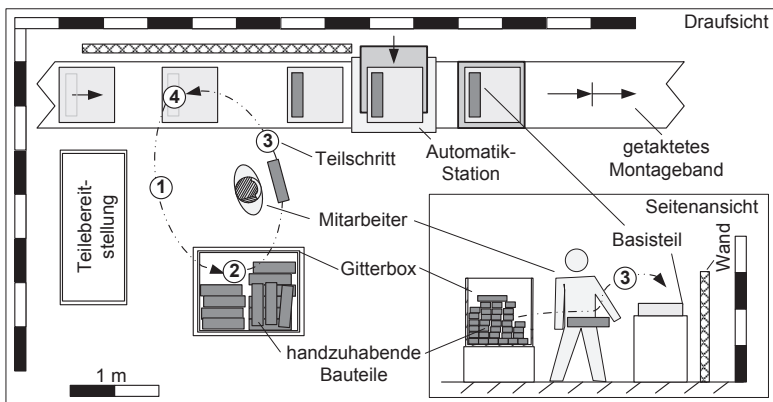


Abbildung 41: Layout des Beispielarbeitsplatzes

Die in der Abbildung dargestellten Teilschritte 1 bis 4 zeigen den Ablauf eines Teils der vom Mitarbeiter ausgeführten Handhabungs- und Montageschritte:

- Teilschritt 1: Der Mitarbeiter tritt vom Montageband an die Gitterbox.
- Teilschritt 2: Ein Bauteil von 6,5 kg Gewicht wird aus einem teilgeordneten Stapel beidhändig entnommen.
- Teilschritt 3: Der Mitarbeiter trägt das Bauteil zum Montageort.
- Teilschritt 4: Es wird überprüft, ob die Fügestelle am Montageort frei von Hindernissen ist. Dann wird das Bauteil einhändig positioniert und formschlüssig in eine Mulde abgesetzt.

Der Montagetakt beträgt 37 Sekunden. Davon werden für die Teilschritte 1 bis 4 nach Methodenzeitmessung (MTM) je nach Bauteilposition im Stapel zwischen 4,9 s und 7,4 s benötigt, im Durchschnitt 6,15 s. Der Mitarbeiter wechselt den Arbeitsplatz im Zuge von Job-Rotation alle zwei Stunden.

### 6.1.2 Rahmenbedingungen und Vorgaben

Für Investitionen zur Verbesserung der ergonomischen Arbeitsgestaltung oder Integration von Leistungsgewandelten stehe ein Sonderbudget von bis zu 30.000 € zur Verfügung. Um darüber hinaus einen erweiterten finanziellen Rahmen für Maßnahmen vorzugeben wird eine Kostenrechnung eines Szenarios ohne Assistenzeinsatz angestellt. Es wird dabei angenommen, dass je ein Mitarbeiter je Schicht wegen zu hoher Anforderungen des Arbeitsplatzes aus der Arbeitsgruppe versetzt und die freien Stellen durch zwei Neueinstellungen aufgefüllt werden müssten. Es wird weiter davon ausgegangen, dass die Mitarbeiter nach der Versetzung in Ermangelung geeigneter Arbeitsaufgaben weniger effektiv eingesetzt werden können. Die Kosten werden in Tabelle 23 zusammengefasst und werden als Vergleichsgröße für die zu entwickelnden Maßnahmen festgelegt. Zur Bestimmung des Kostenwerts  $K_{wert}$  wird eine dynamische Kostenwertrechnung (vgl. WERNER 2008) durchgeführt. Dabei werden die Zahlungen  $K_{per}$  je Periode  $per$  mit dem Zinssatz  $Z_{Zr}$  bis zum Laufzeitende  $LZE$  diskontiert.

Formel 6-1

$$K_{wert} = \sum_{per=0}^{LZE} K_{per} \frac{1}{(1 + Z_{Zr})^{per}}$$

Tabelle 23: Kostenschätzung der Unterlassungsalternative

Kostenbeschreibung	Quantifizierung
Mitarbeiterlohn nach ERA I mit 37 % Lohnnebenkosten bei	36.264 €
Anzahl Versetzung & Neubesetzung	2
Kosten des Arbeitszeitanteils des Handhabungsprozesses von	12.040 €
Opportunitätskosten des Effektivitätsverlust nach Versetzung	29.011 €
Summe jährlicher Kosten	41.051 €
Kostenwert für fünf Jahre (LZE = 5, $Z_{Zr}$ = 10 %)	155.615 €

Das weitere Vorgehen entspricht vom Planungszeitpunkt einer Änderungsplanung. Als Vorgaben einer Umsetzung werden folgende angenommen:

- Der Mensch soll am Handhabungsprozess beteiligt bleiben, eine vollständige Automation ist nicht erwünscht.
- Die weiteren, am Arbeitsplatz auszuführenden Tätigkeiten, sollen in Inhalt und Dauer möglichst unverändert bleiben.
- Die Bereitstellungsart und Bereitstellungsbehälter sollen unverändert bleiben.
- Der Kostenwert der Maßnahme muss abzüglich des Sonderbudgets von bis zu 30.000 € unter 155.615 € liegen.
- Die verbleibende Laufzeit des Arbeitsplatzes beträgt fünf Jahre.

## 6.2 Analyse Assistenzbedarf

### 6.2.1 Belastungs- und Gefährdungsanalyse

Die dem Arbeitsplatz zuzuordnende Arbeitsbelastung bzw. Gefährdung wird in Tabelle 24 auf Basis von ABATech-Kriterien bewertet. Anhand der Bewertung zeigt sich, dass für vier Kriterien Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen geprüft werden sollten.

*Tabelle 24: Bewertung des Beispielarbeitsplatzes nach ABATech-Kriterien*

Merkmal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Ergebnis	g	g	g	g	g	g	g	g	g	y	y	g	y	g	g	g	y	g	n
Ergebnisstufen: g = grün, niedriges Risiko; y = gelb, mögliches Risiko, Maßnahmen erforderlich; r = rot, erhöhtes Risiko, Maßnahmen dringend erforderlich; n = nicht betrachtet																			

- Kriterium 10 ‚Stehen, Gehen, Sitzen‘: Die Zeitanteile für Stehen (86 %), Gehen (14 %) und Sitzen (0 %) sind unausgeglichene bzw. einseitig.
- Kriterium 11 ‚Handhaben von Lasten‘: Häufiges Handhaben (240 Takte in 2 h) von Lastgewichten (< 10 kg) mit teilweise nicht optimalen Körperhaltungen und Ausführungsbedingungen tritt auf.
- Kriterium 13 ‚Klima‘: Es treten Kälteempfinden und Zugluft außerhalb des Behaglichkeitsbereichs auf.
- Kriterium 17 ‚Taktabhängiger Arbeitsplatz‘: Es liegt eine enge Taktbindung vor.

### 6.2.2 Handlungs- und Assistenzbedarf

Die Ausprägung der Kriterien ‚Stehen, Gehen, Sitzen‘, ‚Klima‘, und ‚Taktabhängiger Arbeitsplatz‘ sind in allen Arbeitsplätzen entlang der Montagelinie

vergleichbar. Dahingegen wird der ausgewählte Arbeitsplatz von Mitarbeitern und Montageplanern als der körperlich anspruchsvollste beschrieben, wobei insbesondere die Handhabung des Bauteils aus der Gitterbox (siehe Teilschritt 1 bis 4 in Abbildung 41) angesprochen wird. An diesem Arbeitsplatz werden nur kräftige Männer eingesetzt. De facto besteht somit eine allgemeine Einsatzeinschränkung für z.B. Frauen, Personen kleiner als 1,6 m oder Personen mit geringer Kraftausdauer. Diese Einsatzeinschränkung lässt sich quantitativ in der Gefährdungsbeurteilung nachvollziehen, wenn man die Lasthandhabung z.B. mit der Leitmerkmalmethode (BAuA 2001) für Männer und kleine Frauen getrennt bewertet, siehe Tabelle 25.

*Tabelle 25: Gefährdungsbewertung der Lasthandhabung für Männer und Frauen*

Beurteilung		Wertung für Männer	Wertung für Frauen
ZW	Zeitwichtung	6,0	6,0
LW	Lastwichtung	1,0	2,0
KW	Körperhaltung (gemittelt)	1,5	1,7
AW	Ausführungsbedingungen	0,5	0,5
PW	Punktwert	18,0	25,2
	Beschreibung des Punktwerts nach BAuA (2001)	„(...) Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich.“	„(...) Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich.“

Handlungsbedarf und Ziel des weiteren Vorgehens ist es, die Einsatzeinschränkung aufzuheben. Als deren Hauptursache wird die zyklische Handhabung eines schweren Bauteils (siehe Teilschritt 1 bis 4 in Abbildung 41) gesehen, worauf sich die weitere Betrachtung fokussiert. Da keine spezifischen Belegschaftsdaten zu Leistungs- oder Beanspruchungsgrenzen vorliegen, wird der Assistenzbedarf aus der Belastungsbewertung abgeleitet.

Zur Identifikation von Assistenzbedarfsschwerpunkten wird der Handhabungsvorgang in einzelnen Schritten betrachtet. Eine Bewertung nach der Leitmerkmalmethode in Tabelle 26 zeigt, dass hohe körperliche Anforderungen insbesondere beim Aufnehmen und Einsetzen des Bauteils auftreten (Punktwert gilt für Frauen). In Teilschritt 2 muss sich der Mitarbeiter weit in die Gitterbox hineinlehnen und bücken, um körperferne Bauteile erreichen zu können. In Teilschritt 4 muss das Bauteil beim Einsetzen in das Basisteil einhändig geführt werden. Außerdem muss sich der Mitarbeiter leicht nach vorn beugen um den Montageort

zu erreichen oder er muss stattdessen das Bauteil außermittig greifen, was die Momentenbelastung im Bereich der Handgelenke erhöht. Bei beiden Teilschritten (2, 4) erscheint eine Überbeanspruchung auch für normal belastbare Personen möglich. In Teilschritt 3 erscheint eine Überbeanspruchung noch für vermindert belastbare Personen möglich.

*Tabelle 26: Gefährdungsbewertung der einzelnen Handhabungsschritte*

Handhabungsschritt	Teilschritt 1	Teilschritt 2	Teilschritt 3	Teilschritt 4
	Gehen	Aufnehmen	Tragen	Einsetzen
Punktwert	6	33	18	27

Unter der Annahme, dass Ausführungsbedingungen und Handhabungshäufigkeit gleich bleiben, ist eine Verbesserung des Punktwerts durch eine Reduzierung der wirksamen Lastgewichte und der erforderlichen Körperhaltung möglich. Der Assistenzbedarf stellt sich damit in den Teilschritten 2 bis 4 in einer Kraftunterstützung beim Heben und Tragen dar. Über die Berechnungsvorschrift der Bewertungsmethode lassen sich konkrete Vorgaben ableiten. Ohne Haltungsverbesserung ist bei Betrachtung des gesamten Handhabungsvorgangs mit der Leitmerkmalmethode eine Reduzierung des wirksamen Lastgewichts von mindestens 1,5 kg zu erreichen, um eine Überbeanspruchung normal belastbarer Personen (Punktwert-Schwelle: 25) zu vermeiden. In Teilschritt 2 und 4 ist eine Reduzierung der erforderlichen Rumpfeigung anzustreben. Um ohne Kraftunterstützung eine Verbesserung der Gefährdungsbewertung zu erzielen ist es mindestens erforderlich, dass die Ausführung mit einer aufrechten Körperhaltung in Teilschritt 4 oder höchstens mit nur einem leichten Vorbeugen des Oberkörpers in Teilschritt 2 möglich wird.

### 6.2.3 Vorauswahl bestehender Lösungen

Den Assistenzanforderungen entsprechend wäre zur Kraftentlastung der Einsatz der vom Mitarbeiter zu führenden, passiven Handhabungshilfen wie z.B. Schwenkkrane mit gewichtsausgleichenden Seilzügen vorstellbar. Zur Verbesserung der Körperhaltung beim Greifen wäre der Einsatz von Hebe-Kipptischen denkbar, die durch das Neigen der Gitterbox die Erreichbarkeit der Bauteile verbessern können. Im Bereich der Roboterassistenz sind Assistenzfunktionen, Prototypen und Konzepte bekannt, die Teile der Anforderungen lösen könnten, jedoch kein Gesamtkonzept oder verfügbares System, welches als praktisch erprobt gelten könnte (vgl. Abschnitte 3.2, 3.3 und 4.3). Demzufolge sind neue Konzepte zu entwickeln und zu prüfen.

## 6.3 Konzeption

### 6.3.1 Betrachtung der Handhabungsschritte

In Tabelle 27 wird die Bewertung der wirtschaftlichen Automatisierbarkeit der einzelnen Schritte nach der Methode von ROSS (2002) vorgenommen, wobei Eigenschaften der Handhabungsaufgabe und Ausführungsbedingungen mit Punkten bewertet werden. Eine Montageaufgabe unterhalb eines Punktwerts von 1,55 wird als wirtschaftlich automatisierbar angesehen (ROSS 2002). Teilschritt 1 wird nicht betrachtet, da die Bereitstellung der Automatisierungslösung an der Gitterbox nicht in den Rahmen der Bewertungsmethode fällt.

*Tabelle 27: Bewertung der wirtschaftlichen Automatisierbarkeit der Handhabungsschritte*

Handhabungsschritt	Teilschritt	Teilschritt	Teilschritt 3	Teilschritt 4
	-	Greifen	Transportieren	Prüfen, Einsetzen
Wertung der Automatisierbarkeit	-	1,85 (gering)	1,29 (hoch)	1,53 (mittel)

Die Wertung von Teilschritt 2 liegt deutlich über der Punktschwelle, die Wertung von Teilschritt 4 nur knapp darunter. Die wirtschaftliche Automatisierung von Teilschritt 2 wird entsprechend der Bewertungsmethode vor allem durch folgende Eigenschaften erschwert:

- Geringe Ordnung der Bauteilbereitstellung
- Bauteil im Stapel nur von einer Seite greifbar
- Verwechslungsmöglichkeit durch scheinbar symmetrische Bauteilgestalt

Die Gegenüberstellung von Assistenzbedarf und Automatisierbarkeit (Tabelle 28) lässt je Teilschritt einen allgemeinen Handlungsbereich abschätzen (siehe Abschnitt 5.2.3, Tabelle 21). Entsprechend ist für Teilschritt 2 die Reduktion von Automationshemmnissen und die Entwicklung neuer MRK-Lösungen zu prüfen. Für Teilschritt 3 ist eine Automation oder Mensch-Roboter-Koexistenz zu bevorzugen. Für Teilschritt 4 sind Einsatz oder Entwicklung neuer MRK-Lösungen zu prüfen.



Tabelle 28: Gegenüberstellung von Assistenzbedarf und Automatisierbarkeit für das Anwendungsbeispiel

Handhabungsschritt	Teilschritt 1	Teilschritt 2	Teilschritt 3	Teilschritt 4
Assistenzbedarf	Kein	Hoch	Mittel	Hoch
Automatisierbarkeit	-	Gering	Hoch	Mittel
Handlungsbereich nach Tabelle 21	-	Felder 3, 5	Feld 1	Felder 2, 5

### 6.3.2 Kombination von Teillösungen auf Grobkonzeptebene

In Abbildung 42 sind Ansätze zur Ausführung der einzelnen Teilschritte und deren Kombinationsmöglichkeiten dargestellt. Dabei sind nur solche Ansätze ausgewählt, die ein Unterstützungspotenzial bzgl. Körperkraft oder -haltung vermuten lassen, vgl. Tabelle 19.

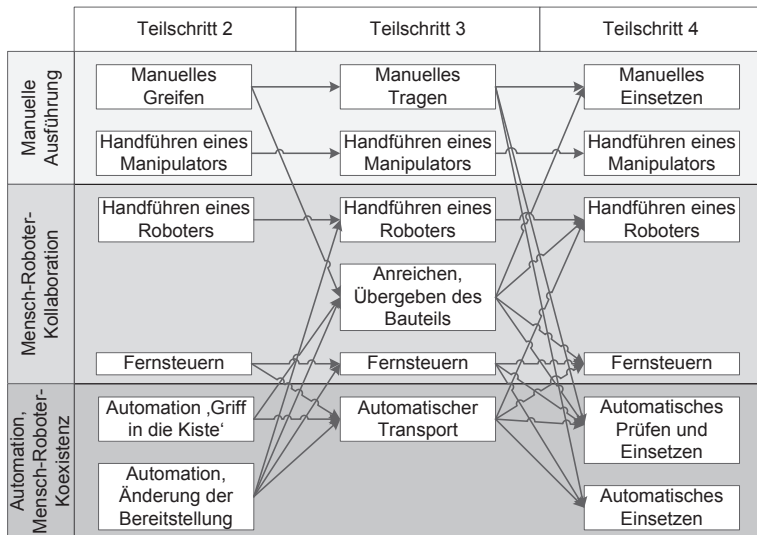


Abbildung 42: Teillösungen und deren Kombinationsmöglichkeiten

Auf Basis von Erfahrungswissen lassen sich die Ansätze und ihre Kombinationsmöglichkeiten hinsichtlich später festzulegender oder zu prüfenden Eigenschaften (z.B. Akzeptanz, Sicherheitskonzept) diskutieren und frühzeitig bewerten. Ein Großteil der Lösungsmöglichkeiten lässt sich so schnell ausschließen. Andernfalls ist das Planungsvorgehen mit einem vorläufigen Konzept fortzuführen, um dann im späteren Planungsstand eine Bewertung vornehmen zu

können. Hier wird nur ein vorläufiges Konzept diskutiert und zum Teil detailliert. Die Diskussion weiterer Konzepte bzw. Kombinationsmöglichkeiten findet sich im Anhang 9.8.

Ein derartiges vorläufiges Konzept kann beispielsweise vorsehen, die Teilschritte 2 und 3 zu automatisieren, die Prüfaufgabe in Teilschritt 4 vom Mitarbeiter ausführen zu lassen und das automatische Einsetzen des Bauteils vom Mitarbeiter auslösen und überwachen zu lassen. Es lässt sich einschätzen, dass dieses Konzept die geforderte Entlastung bzgl. Kräften und Körperhaltung erfüllt, da die eigentliche Bauteilhandhabung durch den Roboter ausgeführt wird. Als nachteilig zu sehen ist die geringe verbleibende Beteiligung des Mitarbeiters am Handhabungsprozess; die Tätigkeit ist fast vollständig automatisiert.

*Tabelle 29: Kostenverteilung des vorläufigen Grobkonzepts*

Teilschritt		Teilschritt 2	Teilschritt 3	Teilschritt 4	
Ausführungsart		Automation ,Griff in die Kiste‘	Automati- scher Trans- port	Manuelles Prüfen	Überwach- tes Einsetz- en
Hardware-Kosten	Roboter, sichere Steuerung, Podest	20.000 €	20.000 €	0 €	20.000 €
	Sensoren, Software	70.000 €	0 €	0 €	0 €
	Sensortüberwachung Arbeitsbereich	7.500 €	7.500 €	0 €	0 €
	Zweihandzustimm- einrichtung, Notaus	0 €	0 €	0 €	1.000 €
	Fixierung Basisteil	0 €	0 €	0 €	1.500 €
	Endeffektor	330 €	330 €	0 €	330 €
	Summe	97.833 €	27.830 €	0 €	22.830 €

Ein Anlass zur Überarbeitung des Konzepts und einem damit verbundenen Rücksprung im Planungsvorgehen bildet sich nach einer weiteren Lösungsdetailierung mit der Aufstellung der Kostenverteilung, siehe Tabelle 29. Die Kostenschätzung wurde durch eingeholte Angebote ermittelt. Dabei zeigt sich, dass die Automation von Teilschritt 2 den größten Kostenanteil verursacht. Für diesen Teilschritt ist zuvor in Abschnitt 6.3.1 ein für eine Mensch-Roboter-Kooperation günstiges Verhältnis von Automatisierbarkeit und Assistenzbedarf bestimmt

worden. Daher ist im Folgenden zu Prüfen, ob eine kooperative Ausführung von Teilschritt 2 sowohl die erforderliche Assistenz wie auch einen Kostenvorteil realisieren kann. Hierfür wird Teilschritt 2 detaillierter betrachtet.

### 6.3.3 Detailkonzept

Der Teilschritt 2 wird in Abbildung 43 in acht Sub-Prozess-Schritte unterteilt, die, unabhängig von der Ausführungsform, zum Greifen der gestapelten Objekte erforderlich sind. Bei Betrachtung von Automatisierungslösungen des ‚Griffs in die Kiste‘ (LEDERMANN 2010) ist anzunehmen, dass deren Hauptkosten in der Softwareentwicklung und in der Sensorhardware liegen. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass diese Kosten die Automatisierungshemmnisse proportional widerspiegeln. Ein weiteres Hemmnis stellt die Positionsdivergenz der Gitterbox nach deren Bereitstellung dar, die möglicherweise eine erneute Parametrierung der Randbedingung zur Trajektorienplanung erfordert um Kollisionen zwischen Roboter und Gitterbox zu vermeiden. Es ist in Abbildung 43 augenfällig, dass der Großteil der Automationshemmnisse in einem Bereich liegt, in denen der Mitarbeiter keinen Assistenzbedarf aufweist. Der Assistenzbedarf liegt nur im ausführenden, bzw. handelnden Bereich und überdeckt sich mit dem Einsatzbereich der Roboterkinematik.

Betrachtet man die Schwächen (Automatisierungshemmnisse, Assistenzbedarf) der jeweiligen Ausführungsform, so lassen sich Anfang und Ende einer Kombinationskette für eine neue Lösung leicht festlegen. Entsprechend seien die Schritte bis einschließlich der Trajektorienplanung durch einen Mitarbeiter auszuführen, das Heben des Objekts automatisch durch den Roboter. Zur Vervollständigung der Lösungskette wird damit eine Schnittstelle zwischen Trajektorienplanung des Endeffektors und Heben des Objekts gesucht. Ein Ansatz, der dies durch Mensch-Roboter-Kooperation löst, ist das Pick-By-Wire Modul. Beim Pick-By-Wire Modul befestigt der Mitarbeiter einen Endeffektor am zu greifenden Objekt bzw. Bauteil. Der Endeffektor ist über Seile mit dem Roboter mechanisch verbunden. Der Roboter folgt dann den Seilen, um das so markierte Bauteil zu greifen und zu heben. Das heißt, der Mitarbeiter instruiert den Roboter durch Handhabung des Endeffektors, wo, wie und welches Objekt zu greifen ist und ersetzt damit Teile der sonst erforderlichen Software und Sensorik. Die Teilschritte 3 und 4 werden automatisiert durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Pick-By-Wire Moduls findet sich in (SPILLNER 2014), daraus ausgewählte Auszüge finden sich im Anhang 9.9.

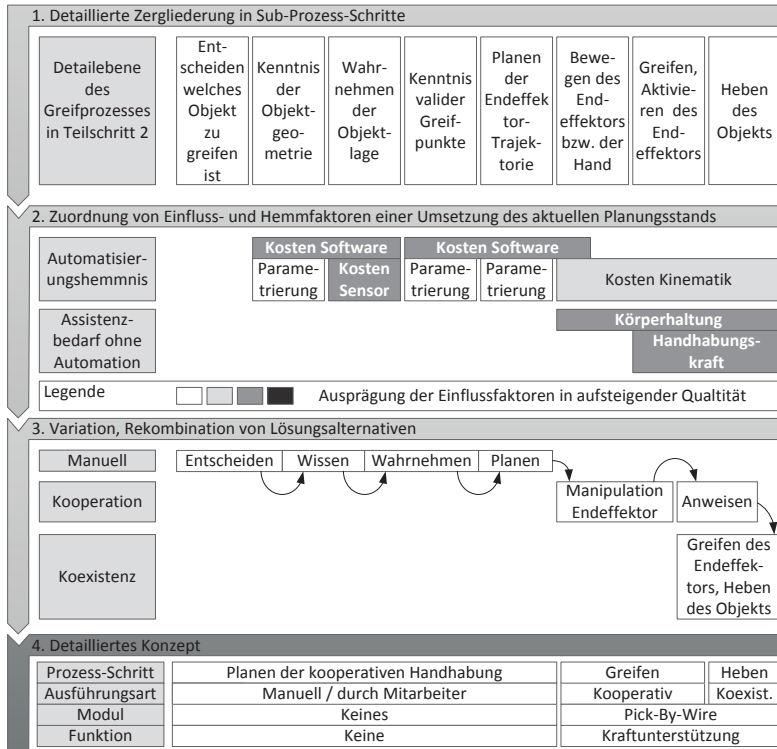


Abbildung 43: Ermittlung eines Detailkonzepts für ein kooperatives Greifen

Das Detailkonzept sieht damit zusammengefasst folgende Abläufe vor: Der Mitarbeiter führt Montageschritte an der Montagelinie aus. Der Roboter wartet mit dem Pick-By-Wire Modul in Nähe der Gitterbox auf eine Bedienung durch den Mitarbeiter. Der Mitarbeiter prüft, ob Fügestelle des Basisteils frei ist. Dann geht er zum Pick-By-Wire Modul (Teilschritt 1), befestigt den Endeffektor und löst die weitere automatische Handhabung durch den Roboter aus (Teilschritt 2). Daraufhin geht der Mitarbeiter zurück an die Montagelinie. Der Roboter hebt das Bauteil aus der Gitterbox, transportiert dieses zum Montageort (Teilschritt 3), setzt dieses in das Basisteil (Teilschritt 4) und bringt das Pick-By-Wire Modul wieder in Ausgangsstellung.

Das weitere Planvorgehen wird anhand der Ausgestaltung dieses Ansatzes dargestellt.

## 6.4 Konzeptdetaillierung und -prüfung

### 6.4.1 Prüfung der Arbeitsinhalte

In den bestehenden Arbeitsinhalten wird die Handhabung eines Bauteils durch die Handhabung eines Endeffektors bzw. der Bedienung eines Roboterassistenten ersetzt. Die Arbeitsinhalte der Arbeit bleiben für den Mitarbeiter somit weitgehend gleich. Auch die Ausführungsdauer bleibt für den Mitarbeiter weitgehend gleich, wobei Zeitmessungen eines vergleichbaren Szenarios (siehe Abschnitt 9.9.3 im Anhang) zugrunde gelegt werden. Eine Verschlechterung der Arbeitsinhalte hinsichtlich Monotonie oder Einseitigkeit ist auszuschließen. Je Schicht wird ein Maschinenführer erforderlich, was eine Qualifizierung und ein Job-Enrichment für einzelne Mitarbeiter ermöglicht. Eine zusätzliche Erweiterung der Gestaltungs- oder Entfaltungsmöglichkeiten am Arbeitsplatz wird nicht erzielt. Insgesamt stellen sich die Arbeitsinhalte als akzeptabel dar.

### 6.4.2 Integration zusätzlicher Aufgaben

Die Integration zusätzlicher Aufgaben erfordert für Mensch oder Roboter zum einen verfügbare Arbeitszeit, zum anderen geeignete Aufgaben. Die zusätzlichen Aufgaben können in Arbeitsschichten mit und ohne Assistenzbedarf liegen.

**Arbeitsschicht mit Assistenzbedarf:** In der Beschreibung des Pick-By-Wire Moduls ist Ausführungsdauer einer mit dem Anwendungsszenario vergleichbaren Aufgabe erfasst worden (siehe Abschnitt 9.9.3 im Anhang). Auf Basis dieser Daten wird davon ausgegangen, dass in der Kooperation der zuordenbare Zeiteinsatz des Mitarbeiters mit dem Zeiteinsatz einer manuellen Ausführung gleich bleibt. Für die automatische Ausführung verbleiben ca. 30 s je Takt. Die dafür notwendigen Ausführungsgeschwindigkeiten liegen oberhalb der bisher mit dem Pick-By-Wire Modul getesteten. Dadurch ergibt sich die Anforderung, das Modul vor einer Planungsentscheidung hinsichtlich der zulässigen Ausführungsdauer zu validieren. Es wird hier davon ausgegangen, dass keine für weitere Aufgaben verwendbare Arbeitszeit verfügbar ist.

**Arbeitsschicht ohne Assistenzbedarf:** Da im Zweischichtbetrieb gearbeitet wird, könnte das Robotersystem in einer dritten Achtstunden-Schicht als Automat eingesetzt werden. Da es sich um eine Änderungs- und keine Neuplanung handelt, ist eine Zuordnung neuer Aufgaben generell erschwert, da die derzeit vorhandenen Aufgaben bereits erfüllt werden und das Layout bereits

definiert ist. Für den vorliegenden Fall werden keine geeigneten Aufgaben gefunden.

### **6.4.3 Layout**

#### **6.4.3.1 Auswahl der Kinematik**

Die zu greifenden Bauteile werden als teilgeordneter Stapel in einer Gitterbox bereitgestellt. Die glatten Kunststoffflächen der Bauteile lassen sich im Stapel gut von oben mit Vakuumgreifern greifen und sichern. Das vom Roboter handzuhabende Gewicht summiert sich mit dem Pick-By-Wire Modul (23 kg), Vakuumgreifer (1 kg) und den Bauteilen (6,5 kg) aufgerundet zu 30 kg. Der Abstand des Masseschwerpunkts dieses Gewichts zum Roboterflansch wird auf 26,5 cm geschätzt. Die mindestens erforderliche Reichweite des Roboters bzw. der Mindestdurchmesser dessen Arbeitsraums wird mit 3,6 m angeschlagen. Dies ergibt sich aus der Transportstrecke zwischen Gitterbox und Montageband (2,6 m) und der Strecke von der oberen Kante der Gitterbox bis zu deren Boden (1 m).

Zunächst wird eine Bauform ausgewählt. Das Pick-By-Wire Modul erfordert sechs Freiheitsgrade in der Bewegung, was Palettierer, SCARA und Portalroboter ausschließt. Geeignet sind Sechssachs-Vertikal-Knickarmroboter. In dieser Klasse weisen Konsolroboter einen nach unten erweiterten Arbeitsraum auf, was als vorteilhaft für das Greifen in die Gitterbox erachtet wird. Beim Hersteller KUKA AG wird dieser Robotertyp in Traglastbereiche und Reichweite gestaffelt angeboten. Da die Preise im Allgemeinen mit steigender Traglast zunehmen, wird der Roboter mit der geringsten Traglast bestimmt, welcher die Mindestanforderungen erfüllt. Ausgewählt wird ein Roboter vom Typ Kuka KR60-4 KS mit einer Traglast von 60 kg und einer maximalem Arbeitsraumradius in der Horizontalen von 2,233 m.

#### **6.4.3.2 Anordnung der Kinematik**

Zur Anordnung des Roboters im Layout wird ein maßstäbliches Robotermodell erstellt und so positioniert, dass die Bahn des handzuhabenden Bauteils vom Arbeitsraum des Roboters eingeschlossen wird. Anschließend wird anhand des beweglichen Modells überprüft, ob die Roboterkinematik samt Pick-By-Wire Modul die bodenseitigen Ecken in der Gitterbox durch linear-senkrechte Bewegungen kollisions- und singularitätsfrei erreichen kann. Durch iterative Anpassung wird eine gültige Roboterposition gefunden und festgelegt. Analog

wird die Zugänglichkeit des Montageorts überprüft. Abbildung 44 zeigt die so bestimmte Position sowie die Prüfung der Erreichbarkeit in der Seitenansicht.

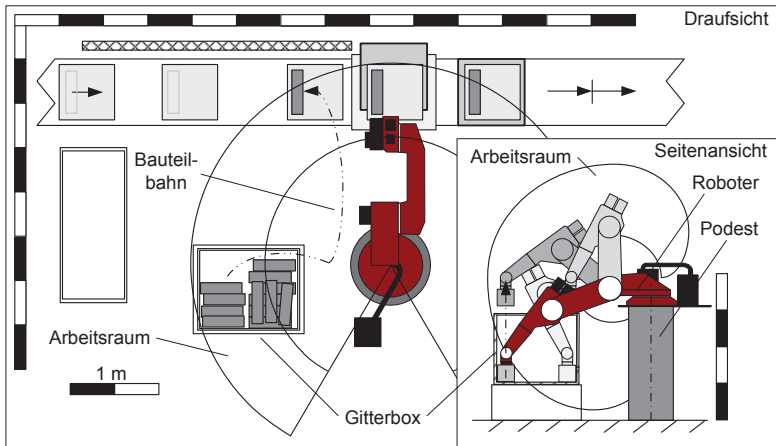


Abbildung 44: Positionierung und Prüfung der Roboterposition hinsichtlich Zugänglichkeit

Als nächstes werden die Bedienschnittstellen eingeplant. Die erste Bedienschnittstelle des Pick-By-Wire Moduls besteht aus Griffen und Tastern am Endeffektor, der vom Bediener zu führen ist. Die Anordnung dieser Schnittstellen ergibt sich aus geometrischen Bedingungen: Die Position bzw. der Standpunkt des Bedieners wird durch die Zugänglichkeit der Gitterbox auf einen Punkt bzw. einen schmale Fläche begrenzt. Um den Endeffektor von dort auf horizontal verdrehte oder tiefe gelagerte Bauteile befestigen zu können, muss daher der Endeffektor von vorn, von den Seiten und von oben gut (d.h. mit möglichst geringen Abweichungen von der natürlichen Handgelenkstellung) greifbar sein, vgl. (RIEDEL 2003). Um auch körperfern gelagerte Bauteile zu erreichen, sollte zudem neben der zweihändigen auch eine einhändige Handhabung des Endeffektors möglich sein, wegen der dadurch erhöhten Reichweite oder der Möglichkeit sich abzustützen. Als weitere Bedingung dürfen die Griffe nicht über die Grundfläche des Bauteils hinausragen, um Kollisionen mit der Gitterbox beim automatischen senkrechten Herausheben der Bauteile zu vermeiden. Ferner muss die Griffposition genügend Platz für die Hände lassen, damit die Hände oder Finger nicht zwischen Griff und Gitterbox eingequetscht werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden drei Griffe in unterschiedlichen Neigungen am Endeffektor vorgesehen, wie in Abbildung 45 dargestellt. Je Griff sind zwei

Taster zur Steuerung des Endeffektors vorgesehen, die mit dem Daumen erreicht werden können.

Der Endeffektor mit den so definierten Schnittstellen wird dann in das Layout übertragen. Mit einer Mensch-Schablone wird dann die Erreichbarkeit der äußersten Positionen überprüft, vgl. Abbildung 45. Anschließend wird die Ausgangsposition des Pick-By-Wire Moduls festgelegt. Die Mindesthöhe des Moduls ergibt sich aus der Anforderung, dass beim Hineinbeugen ein Anstoßen des Kopfes zu vermeiden ist. Da ferner die Seile beim Handhaben des Endeffektors nicht mit dem Körper oder Kopf des Bedieners in Kontakt treten sollen ergibt sich eine Mindestentfernung in der horizontalen Ebene bzgl. der Arbeitspositionen des Bedieners. Die dritte Einschränkung folgt aus der Anforderung geringer Bedien- bzw. Führkräfte. Je weiter der Endeffektor von der lotrechten Position unterhalb des Pick-By-Wire Modulgehäuses entfernt wird, umso mehr Haltekraft muss der Bediener aufbringen (vgl. Abschnitt 9.9.5 im Anhang). Als Grenze wird eine Seilauslenkung bzgl. der Lotrechten von  $30^\circ$  definiert. Bei einem geschätzten Gewicht des Endeffektors von 3 kg wird damit entsprechend der für das Modul tabellierten Handhabungskräfte (siehe Abschnitt 9.9.5 im Anhang) eine maximale Bedienkraft von ca. 15 N erwartet.

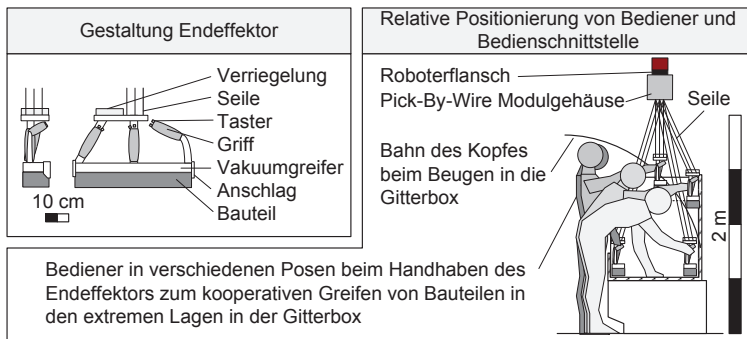


Abbildung 45: Gestaltung des Endeffektors und Prüfung der Erreichbarkeit der Bedienschnittstellen im Einsatz

Nach dieser Festlegung im Layout folgt eine Prüfung der Assistenzziele: Mit der gewählten Anordnung wird eine Kraftunterstützung in der zuvor festgelegten Höhe voraussichtlich erreicht und überschritten. Das Integrationsziel wird damit erreicht, so dass mit der weiteren Ausgestaltung fortgefahren werden kann. Eine Verbesserung der Körperhaltung ist nicht oder nur in sehr geringem Maß zu



erwarten. Die Umgebungsbedingungen werden durch zusätzliche Unfallgefahren durch den Robotereinsatz erweitert und bleiben für den Mitarbeiter sonst unverändert.

#### 6.4.3.3 Sicherheitsmaßnahmen

In einem ersten Schritt werden die Gefährdungen identifiziert. Abbildung 46 zeigt die mechanischen Gefährdungen im Normalbetrieb auf. Dies ist analog für andere Gefährdungsquellen und Betriebsarten im gesamten Lebenszyklus durchzuführen.

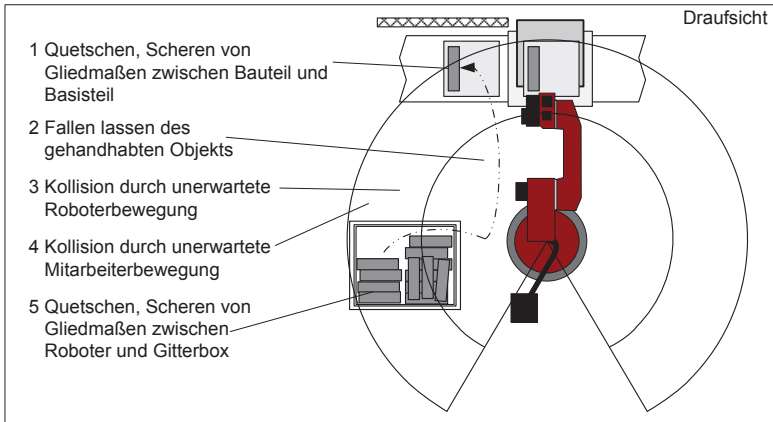


Abbildung 46: Mechanische Gefährdungen im Normalbetrieb

Für die Gefährdungen wird anschließend deren Risiko bzw. das erforderliche Performance Level  $PL_r$  einer zugehörigen Sicherheitsfunktion qualitativ beurteilt (vgl. ISO 13849). Dabei gehen Einschätzungen zur Verletzungsschwere, Gefährdungsexposition und Möglichkeiten zur Vermeidung oder Schadensbegrenzung ein. Das Risiko der meisten Gefährdungen entspricht der zweithöchsten Kategorie d, im Einzelfall der mittleren Kategorie c, siehe Tabelle 30. Eine vollständige Vermeidung der Risiken durch Änderung in Konstruktion oder Layout erscheint nicht umsetzbar. Eine Reduzierung der Risiken ist z.B. durch Verkleinerung der Überlappung der Arbeitsbereiche von Mensch und Roboter durch Versetzen der Roboterposition erzielbar, wie auch durch Polsterung des Modulgehäuses. Eine niedrigere Einstufung in der Risiko-beurteilung wird dadurch aber nicht erwartet, weswegen geeignete Schutzmaßnahmen entsprechend Performance Level nach Tabelle 30 zu integrieren sind.

*Tabelle 30: Risiken und Ansätze zugehöriger Sicherheitsfunktionen*

Gefährdung	Risikobeurteilung	Lösungsansatz
1	D	Sensorische Arbeitsraumüberwachung
2	C	Redundantes Greifsystem mit Ausfallsicherung
3	D	Sichere Steuerung nach ISO 13849
4	D	Sensorische Arbeitsraumüberwachung
5	D	Sensorische Arbeitsraumüberwachung

Die KRC4-Steuerung des gewählten Robotertyps entspricht bereits den Anforderungen bzgl. Gefährdung 3. Um ein unbeabsichtigtes Lösen des Handhabungsobjekts zu vermeiden (Gefährdung 2), werden redundant zwei Vakuumerzeuger samt Saugnapfen verwendet (stromlos offen mit Rückschlagventil, z.B. OVEM der Fa. Festo AG), die das Objekt jeweils auch allein sichern können. Für die sensorische Arbeitsraumüberwachung wird das Safety Eye der Fa. Pilz GmbH & Co.KG gewählt, welches eine Schaltzeit von 0,24 s und einen maximalen Sichtbereich von 9,8 m x 7,4 m aufweist. Das Safety Eye wird mehrere Meter über dem Roboter montiert.

Für die sensorische Arbeitsraumüberwachung sind Schutzraumgrößen und Sensorstandort zu bestimmen. Als erstes wird der Schutzraum an der Gitterbox (Gefährdungen 3, 4, 5) betrachtet.

Für den Robotertyp sind vom Hersteller Angaben zu Nachlaufweg und Nachlaufzeit achsspezifisch je nach Geschwindigkeit, Lastgewicht und Ausladung verfügbar. Diese Wege und Zeiten sind abhängig von der Masse der manipulierten Objekte, der Geschwindigkeit und der Auskrugung der Kinematik, die jeweils prozentual zum maximal zulässigen bzw. möglichen Wert angegeben werden, siehe Tabelle 31. Als kinematische Limitierung wird eine auf 60 % reduzierte Geschwindigkeit gewählt.

*Tabelle 31: Nachlaufwege und -zeiten des Roboters für Stoppkategorie 1 nach DIN EN 10218-1*

Achse	Maximalgeschwindigkeit	Auskragung	Masse	Geschwindigkeit	Nachlaufweg, -zeit	
A1	138 °/s	33 %	66 %	60 %	14 °	0,31 s
A1	138 °/s	100 %	66 %	60 %	19 °	0,45 s
A2	130 °/s	100 %	66 %	60 %	15 °	0,32 s
A3	166 °/s	100 %	66 %	60 %	16 °	0,29 s

Als Nächstes werden die äußersten Stopppositionen der Kinematik samt Endeffektor bestimmt. Dazu werden die Nachlaufwege der einzelnen Achsen durch eine Vorwärtstransformation bestimmt, wobei als Ausgangslage die Kinematikkonfigurationen in und an der Gitterbox gewählt werden. Es wird eine zulässige Lageabweichung der Gitterbox von 10 cm angenommen und auf die Ausgangslagen aufgeschlagen. Zur Vereinfachung werden nur die horizontalen Abstände betrachtet. Abbildung 47 stellt den so bestimmten Bereich äußerster Positionen des Endeffektors nach einem Stopp der Kategorie 1 dar. Zwischen dem Erkennen einer unsicheren Situation via Safety Eye und dem Stopp des Roboters liegen nach Addition von Schaltzeit und Nachlaufzeit bis zu 0,69 s. Bei einer Schrittgeschwindigkeit von 1 m/s legt eine Person in der Zeit 0,69 m zurück. Der zuvor bestimmte Stoppbereich wird um diese Strecke erweitert und ergibt damit den Sicherheitsabstand 1 für die Gefährdungen 3 und 4, vgl. Abbildung 47. Für die Gefährdung 5 (Klemmen und Quetschen im Bereich der Gitterbox) ist auch ein Eingreifen der Gliedmaßen zu berücksichtigen, womit sich die Annäherungsgeschwindigkeit einer Person auf 2 m/s erhöht. Der Gefährdungsbereich der Gitterbox wird entsprechend um einen Abstand von 1,38 m erweitert, was den Sicherheitsabstand 2 definiert. Beide Sicherheitsabstände sind einzuhalten.

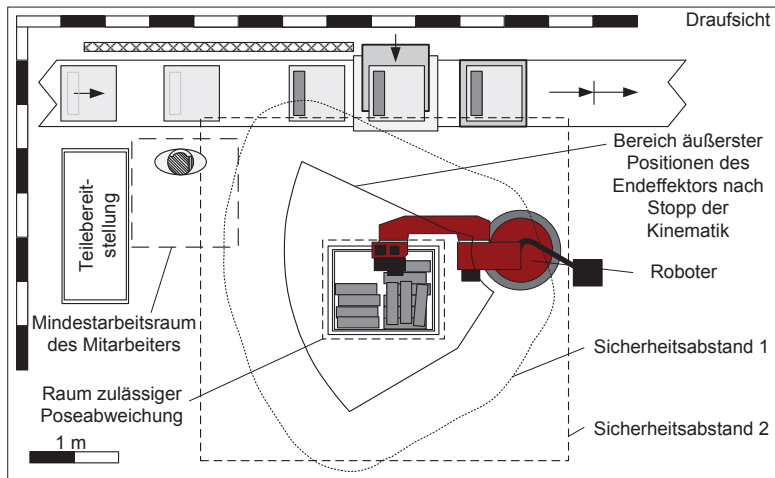


Abbildung 47: Sicherheitsabstände für Teilschritt

Nun wird die Anordnung überprüft. Die Größe der Sicherheits- bzw. Schutzbereiche ist vom gewählten Sicherheitssensor abdeckbar. Die Sicherheitsbereiche ragen in den Mindestarbeitsraum (1,5 m²) des Mitarbeiters hinein. Dadurch kann sich der Mitarbeiter dort nicht frei bewegen ohne ein Sicherheitsstopp auszulösen, was als ungünstig angesehen wird. Daher ist eine weitere Anpassung erforderlich.

Eine entsprechende Anpassung kann exemplarisch durch Änderung der Anordnung von Roboter und Gitterbox realisiert werden, wie in Abbildung 48 dargestellt. Der Roboter wird hierzu auf einem Podest über dem Montageband befestigt und die Gitterbox wird direkt an das Montageband positioniert. Der Sicherheitsabstand am Fügeort (Gefährdung 1) wird analog bestimmt und ergänzt. Von einer Änderung der Ausführungszeit der Aufgaben für den Mitarbeiter wird nicht ausgegangen, da Bedienung und zurückzulegende Wegstrecke gleich bleiben.

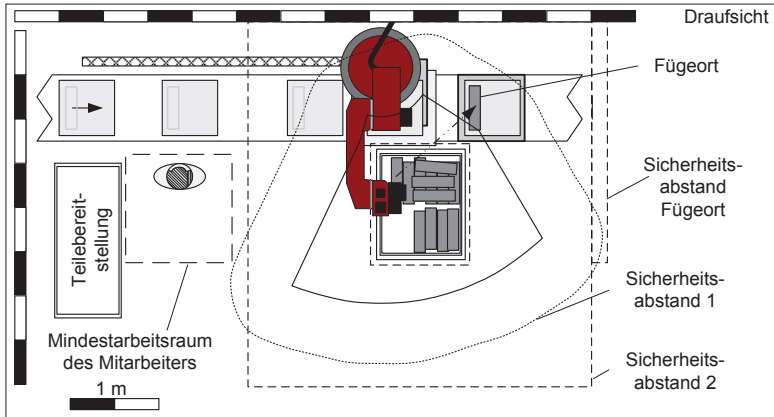


Abbildung 48: Nach Sicherheitskriterien angepasste Anordnung

#### 6.4.4 Bewertung von Assistenz und Ergonomie

Das Assistenzziel wird erreicht. In Abschnitt 6.2.2 wird der Assistenzbedarf festgelegt. Darin wird eine Reduzierung der effektiv gehandhabten Masse auf unter 5 kg (49 N Gewichtskraft) oder alternativ eine wesentliche Verbesserung der Körperhaltung vorgegeben. Wie bereits bei der Layouterstellung in Abschnitt 6.4.3.2 beschrieben wird bei der vorliegenden Lösung eine maximale Bedienkraft von 15 N erwartet. Damit wird die angestrebte Reduzierung der Handhabungskräfte erreicht. Durch den Robotereinsatz treten zusätzliche Gefährdungen auf, die aber technisch abgesichert werden. Darüber hinaus ist keine Änderung des Anforderungs-/Belastungsprofils des Arbeitsplatzes gegenüber der Ausgangssituation zu erwarten, vgl. Abschnitt 6.2. Eine Unterforderung für nicht leistungsgewandelte Mitarbeiter wird nicht gesehen.

#### 6.4.5 Einschätzung zur Akzeptanz

Zur Einschätzung der Akzeptanz wird die Checkliste nach Tabelle 22 angewendet. Es werden davon hier nur jene Punkte diskutiert, die nach Bewertung des Assistenzsystems eine Verschlechterung der Akzeptanz bewirken könnten.

Erstens liegt ein Hindernis in der Aufgabenerfüllung darin, dass die Nutzung des Assistenzsystems ungünstige Körperhaltungen erfordert. Hierin besteht allerdings kein Unterschied zur manuellen Ausführung, was dieses Kriterium abschwächt und keine Maßnahmen erforderlich macht.

Zweitens ist die Aufgabe von einem Einzelnen ohne Roboterassistenz ausführbar, wenngleich möglicherweise unter körperlichen Beschwerden. Um eine Nutzung dennoch sicherzustellen werden drei Maßnahmen vorgesehen: Zunächst muss die Einsicht und Zustimmung der betroffenen Mitarbeiter hergestellt werden. Weiterhin wird die Nutzung des Assistenzsystems in der Betriebsanweisung zwingend vorgeschrieben und durch den Gruppenleiter kontrolliert. Zuletzt wird eine 1 m lange Barriere am Montageband angebracht, die den Weg einer manuellen Objekthandhabung verlängert und damit die manuelle Ausführung gegenüber der assistierten zusätzlich erschwert.

Eingedenk der vorgesehenen Maßnahmen erscheint eine Akzeptanz gegeben.

### **6.4.6 Kostenbewertung**

Um die Gültigkeit der entwickelten Lösung zu prüfen und einen finanziellen Vergleich mit Realisierungsalternativen zu ermöglichen werden die jeweiligen Kostenwerte auf- und gegenübergestellt, siehe Tabelle 32. Es werden dabei vier Alternativen verglichen: Erstens die Variante ohne Assistenz mit einer Versetzung zweier Mitarbeiter. Zweitens das im Planungsvorgehen zuerst entwickelte Grobkonzept mit einem automatischen Greifen des Bauteils und einem kooperativen Fügevorgang. Drittens der im Planungsvorgehen entwickelte Einsatz eines Pick-By-Wire Moduls zum kooperativen Greifen und automatischen Fügen. Viertens eine Automation des gesamten Handhabungsvorgangs ohne Sichtprüfung an der Fügestelle. Da für das Pick-By-Wire Modul kein Angebot vorliegt, werden die Kosten des Prototypen (siehe Abschnitt 9.9.4 im Anhang) mit 10 % Entwicklungskosten und 25 % Marge pro Stück beaufschlagt. Es zeigt sich, dass unter den Gegebenheiten die Ausführungsvariante ‚Pick-By-Wire‘ günstiger als die Varianten 2 und 4 ist. Um den Kostenwert der Vergleichsalternative 1 (Versetzung) zu unterschreiten, muss auf 12.200 € des bereitgestellten Sonderbudgets zugegriffen werden. Damit erfüllt das entwickelte Pick-By-Wire System die finanziellen Anforderungen. Vorbehaltlich der Prüfung weiterer hier nicht betrachteter Maßnahmen ohne Robotereinsatz kann diese Variante damit zur Umsetzung freigegeben werden.

Tabelle 32: Kostenvergleich von Realisierungsalternativen

Kostenbeschreibung		Ausführungsvarianten			
		1) Versetzung	2) Grobkonzept	3) Pick-By-Wire	4) Automation
Hardware (HK) [€]	Roboter, sichere Steuerung, Podest	0	60.000	60.000	60.000
	Pick-By-Wire	0	0	15.000	0
	Sensoren, Software ‚Griff in die Kiste‘	0	70.000	0	70.000
	Sensorüberwachung Arbeitsbereich	0	15.000	15.000	15.000
	Zustimmeinrichtung	0	1.000	0	0
	Fixierung Basisteil	0	1.500	1.500	1.500
	Endeffektor	0	1.000	1.000	1.000
	<b>Summe HK</b>	<b>0</b>	<b>147.500</b>	<b>92.500</b>	<b>147.500</b>
Zuschläge [€]	Aufbau, Inbetriebnahme (10 % HK)	0	14.850	9.250	14.750
	Außerbetriebnahme (5 % HK)	0	7.425	4.625	7.375
	Wartung, Energie, Betriebsstoffe pro Jahr (5 % HK)	0	7.425	4.625	7.375
Personal (PK)	Lohn-, -nebenkosten Mitarbeiter	36.264	36.264	36.264	36.264
	Zuordenbare Arbeitszeiteile	16,6 % LK	16,6 % LK	16, 6 % LK	0 % LK
	Opportunitätskosten Versetzung	40 % LK	0 % LK	0 % LK	0 % LK
	Arbeitsschichten	2	2	2	2
	<b>Summe PK [€]</b>	<b>41.051</b>	<b>12.040</b>	<b>12.040</b>	<b>0</b>
Sonstige	Laufzeit	5 a	5 a	5 a	5 a
	Zinssatz für Zahlungsreihen	10 %	10 %	10 %	10 %
<b>Kostenwert [€]</b>		<b>155.615</b>	<b>241.657</b>	<b>167.794</b>	<b>194.786</b>
<b>Kostenwert [€] abzüglich 12.200 €</b>		<b>-</b>	<b>229.201</b>	<b>155.594</b>	<b>-</b>

### 6.4.7 Verallgemeinerung der wirtschaftlichen Einsatzbereiche

Für einen gegebenen Anwendungsfall ist die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes eines Assistenzsystems unter Anwendung von Standardverfahren der Investitionsrechnung (siehe KRUSCHWITZ 2005) zu prüfen. Für Einsatz wie auch für Entwurf und Auslegung eines Assistenzsystems sind insbesondere zwei Fragestellungen entscheidend: Wie viel darf das System bzw. die Hardware kosten? Wie umfangreich darf die Kooperation von Mensch und Maschine gestaltet werden?

Im Folgenden werden Gleichungen bestimmt, die eine schnelle Abschätzung der Eignung bzw. Anforderungsermittlung ermöglichen.

Dabei sind zunächst einige Annahmen festzulegen. Es wird von einer regel- und gleichmäßigen Gebrauchshäufigkeit des Assistenzsystems ausgegangen, mit im Durchschnitt gleichbleibenden Anteilen automatischer, kollaborativer und manueller Teiltätigkeiten. Die zuordenbaren Personalkosten von jenen Zeitanteilen, in denen keine Mensch-Roboter-Kollaboration vorliegt, werden nicht zu den Kosten des Assistenzsystems gezählt. Im Vergleich zu den Realisierungsalternativen seien Stückzahl bzw. Einsatzhäufigkeit, Laufzeit und Platzbedarf gleich.

Grundsätzlich soll gelten:

$$\min(CA, CM) > CH$$

*CA: Gesamtkosten einer automatischen Ausführung*

*CM: Gesamtkosten einer manuellen Ausführung*

*CH: Gesamtkosten einer hybriden Ausführung*

Das Haupteinsatzfeld robotergestützter Assistenz ist dadurch gekennzeichnet, dass eine rein manuelle Ausführung nicht möglich oder nachteilig ist. Daher bietet sich vornehmlich der Vergleich der automatischen und hybriden Ausführungen der Realisierungsalternativen an, womit gelte:

$$CA > CH$$

Formel 6-2

$$C_a \frac{(1 + C_e + C_b)}{D} > C_h \frac{(1 + C_e + C_b)}{D} + T_{hi} C_L S$$



$C_a$ : Hardwarekosten Automation [GE]

$C_b$ : Faktor von Betriebskosten und Außerbetriebnahmekosten proportional zu Hardwarekosten

$C_e$ : Proportionalitätsfaktor für Kosten von Ingenieursleistungen und Inbetriebnahmekosten

$C_h$ : Kosten der Hardware der hybriden Lösung (PBW System) [GE]

$C_L$ : Jahreskosten für zuordenbares Personal [GE]

$D$ : Abschreibungszeitraum [Jahre]

$T_{hi}$ : Dauer, Zeitanteil der Kollaboration pro Einsatz bzw. pro Zyklus oder Takt [%]

$S$ : Arbeitsschichten pro Tag (1 – 4)

GE: Geldeinheiten

Die Ungleichung lässt sich nun nach einzelnen Größen umstellen, die dann Grenzwerte eines wirtschaftlichen Einsatzes darstellen.

Die maximalen Hardwarekosten ergeben sich zu:

Formel 6-3

$$C_h < C_a - \frac{D}{(1 + C_e + C_b)} T_{hi} C_L S$$

Der maximale Zeitanteil der Kollaboration je Einsatz ergibt sich zu:

Formel 6-4

$$T_{hi} < (C_h - C_a) \frac{(1 + C_e + C_b)}{D C_L S}$$

Für Handhabungsaufgaben sind Einschätzung und Vergleich der Handhabungs- oder Bedienzeiten z.B. über Fitts Gesetz, vgl. (GÖBEL 2009) oder zeitwirtschaftliche Methoden wie MTM (LANDAU 2004) möglich.

Die maximalen Lohnkosten ergeben sich zu:

Formel 6-5

$$C_L < (C_h - C_a) \frac{(1 + C_e + C_b)}{D T_{hi} S}$$

Anhand dieser Kennzahlen lassen sich Einsatzbereiche und Märkte für das Pick-By-Wire System im Speziellen und für robotergestützte Assistenzsysteme im Allgemeinen schnell eingrenzen und Anforderungen für die Entwicklung neuer Systeme quantitativ formulieren.

### **6.5 Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wird das zuvor entwickelte Planungsvorgehen zur Darstellung roboterassistierter Assistenz in der Produktion durch Anwendung in einem Beispielszenario illustriert und plausibilisiert. Zunächst wird das Anwendungsszenario beschrieben und Anforderungen an eine Umsetzung werden festgelegt. Anschließend werden die Planungsteilschritte nacheinander durchgeführt. Das entwickelte Konzept erreicht eine Detaillierungsstufe, die ein Vergleich mit den Realisierungsalternativen erlaubt. Damit wird nachgewiesen, dass mit dem Vorgehen ein gültiges Planungsergebnis erarbeitet werden kann, welches die Anforderungen an Vergleichbarkeit, Validität und Vollständigkeit erfüllt. Die Reproduzierbarkeit des Verfahrens ist stark von der Konzeptphase abhängig, in welcher ein hohes Maß an Entscheidungsräumen und Freiheitsgraden vorliegt.

## 7 Resümee

Durch den demographischen Wandel, die Alterung der Bevölkerung, werden in Deutschland und Europa weniger Arbeitskräfte verfügbar sein, während der Bevölkerungsanteil der Rentner zunimmt. Das heißt: Weniger müssen Mehr versorgen. Doch auch die Arbeitskräfte werden durchschnittlich älter sein. Mit dem Alter nimmt das Auftreten von gesundheitsbedingten Leistungswandlungen zu, welche Berufsausführung und Produktivität einschränken. Mit seinem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten ist hiervon insbesondere auch der Produktionssektor betroffen, welcher einen wesentlichen Wohlfandsfaktor darstellt.

Zur Erhaltung des Wohlfands sind daher verstärkte Anstrengungen zur Wiederherstellung, Erhaltung und Förderung der Gesundheit, Arbeits- und Leistungsfähigkeit der Arbeitskräfte sowie die Erhöhung der Pro-Kopf-Produktivität unumgänglich. Hierzu erscheint die Mensch-Roboter-Kooperation einen vielversprechenden Ansatz zu bieten. In einer derartigen Zusammenarbeit von Mensch und Maschine kann zum einen der Roboter dem Menschen assistieren und dessen Arbeit erleichtern, zum anderen kann der Mensch automatische Prozesse des Roboters flexibilisieren.

Um sich diesem Thema zu nähern wird in dieser Arbeit zunächst der Stand der Technik und Erkenntnisse von den zwei Bereichen erfasst, in deren Schnittmenge das Thema der ‚Roboterassistenz von Leistungsgewandelten in der Produktion‘ liegt.

Als Erstes werden die betrieblichen Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen betrachtet. Nach der Definition des Leistungswandlungsbegriffs und einer kurzen Einführung in die Montagesystemplanung werden Maßnahmen und Maßnahmeneinführung besprochen. Entsprechend der eingeführten Gliederung können die Maßnahmen präventiv, integrativ und reintegrativ wirken und an Mitarbeiter, Arbeitsinhalt und Arbeitsstruktur oder Arbeitsplatzgestaltung gerichtet sein. Im Zuge der Aufarbeitung werden unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung von Belegschaftsanforderungen in der Montagesystemplanung zusammengefasst und in eine gemeinsame Darstellung überführt.

Als Zweites wird die Mensch-Roboter-Kooperation betrachtet. Nach einer Begriffsdefinition von Assistenzrobotern und der Einführung einiger Grundlagen wird der Stand der Technik anhand von sieben Schlüsselementen gegliedert und dargelegt. Dabei wird neben technischen Aspekten auch auf bestehende

Planungsansätze und Akzeptanzfaktoren eingegangen. Im Speziellen werden zudem kooperative Handhabungsprozesse und Roboterassistenz in diesen beleuchtet und eine entsprechende Taxonomie eingeführt.

Aus dem Stand der Technik werden drei Defizite für einen gezielten Einsatz von Assistenzrobotern für Leistungsgewandelte in der Produktion abgeleitet. Erstens fehlt eine Übersicht, für welche betrieblichen Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen sich die Mensch-Roboter-Kooperation eignet. Zweitens fehlt ein angepasstes Vorgehen, welches eine zielgerichtete Planung der Roboterassistenz für Leistungsgewandlungen auf Arbeitsplatzebene ermöglicht. Drittens mangelt es an Beispielen von robotergestützten Maßnahmen für Leistungsgewandelte in der Produktion.

Um das erste Defizit anzugehen werden für alle betrieblichen Maßnahmen robotergestützte Einsatzmöglichkeiten besprochen und mit einem Expertenverfahren hinsichtlich ihres Einsatzpotenzials bewertet. Die im Ergebnis als praktikabel bewerteten Fälle lassen sich in drei Gruppen einordnen: Maßnahmen zur Unterstützung der Einführung von Roboterassistenz, Maßnahmen an die Qualifikation der Mitarbeiter und Maßnahmen zur Belastungsreduktion durch Roboterunterstützung am Arbeitsplatz. In ähnlicher Weise werden die Ausführungsarten kooperativer Handhabung hinsichtlich ihres Assistenzpotenzials einzelner Leistungswandlungsklassen bewertet. Als Ergebnis wird eine Zuordnung von Handhabungsschritt, Kooperationsform und leistungswandlungsspezifisches Assistenzpotenzial erstellt, die zur Unterstützung der Montageplanung und Konzepterstellung dient. Darüber hinaus werden Anwendungsfälle von Roboterassistenz für Leistungsgewandelte archetypisch dargelegt und illustriert.

Um das zweite Defizit anzugehen wird ein methodisches Vorgehen zur Planung von Roboterassistenz-Lösungen in der Montage entwickelt. Dabei werden als erstes Einstiegszeitpunkte für das Vorgehen in der bestehenden Montagesystemplanung identifiziert. Ferner wird eine Maßnahmenbeschreibung definiert, um die dadurch aufbereiteten Anwendungsbeispiele und Lösungen in einem Maßnahmenkatalog für die Planung verwenden zu können.

Das neu entwickelte Planungsvorgehen ist eng an ein erprobtes Vorgehen zur Montagesystemplanung angelehnt und erweitert dieses. Die wesentlichen Merkmale des iterativen Vorgehens bestehen darin, dass zu Beginn ein Assistenzbedarf ermittelt und durch einen Maßnahmenkatalog geeignete

Lösungen zugeordnet werden. Weiterhin wird für die Konzeption neuer roboter-gestützter Assistenzlösungen im Bereich der Handhabung die Betrachtung auf der Ebene von Subprozess-Schritten mit der Ergänzung kognitiver Fähigkeiten vorgeschlagen. Es wird eine Empfehlung gegeben, bei welchem Verhältnis von Assistenzbedarf und Automatisierbarkeit der Prozessschritte sich eine Betrachtung der Mensch-Roboter-Kooperation zur Bildung wirtschaftlicher Lösungen anbietet. Um die Wirtschaftlichkeit der geplanten Lösung ermöglichen oder steigern zu können, wird eine frühzeitige Prüfung der Integration zusätzlicher wertschöpfender Aufgaben vorgenommen. Für Systemgestaltung und Layout werden die Planungsschritte spezifisch für eine mensch-roboter-kollaborative Handhabung detailliert. Schließlich sind zur Absicherung der Eigenschaften der Entwicklung wie z.B. Assistenz, Akzeptanz und Kosten mehrere Prüf- und Bewertungsschritte innerhalb des schrittweisen Vorgehens vorgesehen.

Zur Validierung und Plausibilisierung des entwickelten Vorgehens wird dieses an einem Anwendungsbeispiel durchgeführt. Um das dritte Defizit anzugehen, dem Mangel an Beispielen roboterassistierter Maßnahmen, wird dabei ein hierfür neu entwickeltes Modul zur Mensch-Roboter-Kooperation eingeplant.

Zusammenfassend sind in dieser Arbeit drei wesentliche Defizite für den Einsatz und die Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen gelöst worden, um durch die spezifische Anwendung von Mensch-Roboter-Kooperationen zum Wohlstandserhalt in Deutschland und Europa beizutragen.

### 8 Literaturverzeichnis

ARBFLEXIG 2008

Gesetz zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für die Absicherung flexibler Arbeitszeitregelungen und zur Änderung anderer Gesetze (ArbFlexiG). Bundesgesetzblatt Nr. 64 (2008), S. 2940–2948.

EN ISO 9283

EN ISO 9283: 1998 - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethode. Berlin: Beuth 1999.

DUDEN 2012

Bibliographisches Institut (Hrsg.): Duden - Das große Wörterbuch der deutschen Sprache. 4. Auflage. Berlin: 2012. ISBN: 978-3-411-71003-4

ABELE & REINHART 2011

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

ADENAUER 2004

Adenauer, S.: Die Reintegration leistungsgewandelter Mitarbeiter in den Arbeitsprozess. Das Projekt FILM bei Ford Köln. Angewandte Arbeitswissenschaft 181 (2004), S. 1–18.

AKELLA ET AL. 1999

Akella, P.; Peshkin, M.; Colgate, J. E.; Wannasupphrasit, W.; Nagesh, N.; Wells, J. Holland S. et al.: Cobots for the mobile assembly line. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, Michigan, 10.-15. Mai. Piscataway, NJ: IEEE 1999, S. 728–733.

ALBU-SCHÄFFER & HIRZINGER 2002

Albu-Schäffer, A.; Hirzinger, G.: Cartesian Impedance Control Techniques for Torque Controlled Light-Weight Robots. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, D.C., 11.-14. Mai. Piscataway, NJ: IEEE 2002, S. 657–663.

ALBU-SCHÄFFER 2011

Albu-Schäffer, A.: "Soft Robotics": Robotertechnologien für die sichere Interaktion mit Menschen und unbekannten Umgebungen. In: 14. IFF-Wissenschaftstage 2011. Tagungsband: Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben Technischer Systeme. 8. Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken, 28.-30. Juni 2011 in Magdeburg. Stuttgart: Fraunhofer 2011, S.48.

AL-JARRAH & ZHEN 1997

Al-Jarrah, O.M.; Zhen, Y.F.: Arm-Manipulator Coordination for Load Sharing using Reflexive Motion Control. In: Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 20-25, 1997, Albuquerque, New Mexico. Piscataway: IEEE 1997, S. 2326–2331.

## ALLES 2012

Alles, T.: Online-Datenbank Assessmentinstrumente. Institut für Qualitätssicherung in Prävention und Rehabilitation GmbH (Hrsg.). Deutsche Sporthochschule Köln. Köln: 2012. <<http://www.assessment-info.de>> - 1.10.2013

## ARAI ET AL. 2000

Arai, H.; Takubo, T.; Hayashibara, Y.; Kazuo, T.: Human-Robot Cooperative Manipulation Using a Virtual Nonholonomic Constraint. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. April 24-28, 2000, San Francisco Hilton Hotel, San Francisco, California. Piscataway: IEEE 2000, S. 4063–4069.

## ARAI ET AL. 2010

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

## ARNOLD &amp; LANG 1990

Arnold, K.; Lang, E.: Altern und Leistung. medizinische, psychologische und soziale Aspekte. Hamburg: Hamburg-Mannheimer Stiftung für Informationsmedizin; Hamburg-Mannheimer-Stiftung für Informationsmedizin. Reihe sozialwissenschaftlicher Daten der Hamburg-Mannheimer Stiftung für Informationsmedizin (1990) 6.

## ARTIGAS ET AL. 2006

Artigas, Jordi; Vilanova, Jordi; Preusche, Carsten; Hirzinger, Gerd: Time Domain Passivity Control-based Telepresence with Time Delay. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 9.-15. 10. 2006, Beijing, China. IEEE 2006: S. 4205–4210.

## ASCARI ET AL. 2009

Ascari, L.; Bertocchi, U.; Corradi, P. Laschi C.; Dario, P.: Bio-inspired grasp control in a robotic hand with massive sensorial input. Biol Cybern 100 (2009) 2, S. 109-128.

## ASFLOUR ET AL. 2000

Asfour, T.; Berns, K.; Dillmann, R.: The Humanoid Robot ARMAR: Design and Control. In: Proceedings of the 1st IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS 2000). Boston, USA, S. 7–8.

## AXHAUSEN ET AL. 2002

Axhausen, S.; Christ, M.; Röhrig, R.; Zemlin, P.: Ältere Arbeitnehmer - eine Herausforderung für die berufliche Weiterbildung. Abschlußbericht und Dokumentation zum Modellversuch "Qualifizierung älterer Arbeitnehmer und Arbeitnehmerrinnen in den neuen Bundesländern aus Metall- und Elektroberufen und aus der industriellen Produktion"; wissenschaftliche Grundlagen und Ziele. Bielefeld: Bertelsmann 2002.

### BADURA & ASTOR 2003

Badura, B.; Astor, M. (Hrsg.): Demographischer Wandel. Herausforderung für die betriebliche Personal- und Gesundheitspolitik. Fehlzeiten-Report. Berlin [u.a.]: Springer 2003.

### BAINBRIDGE 1983

Bainbridge, L.: Ironies of Automation. *Automatica* 19 (1983) 6, S. 775-779.

### BANNAT ET AL. 2009

Bannat, A.; Gast, J.; Rehrl, T.; Rösel, W.; Rigoll, G.; Wallhoff, F.: A Multimodal Human-Robot-Interaction Scenario: Working Together with an Industrial Robot. In: Jacko, J.A. (Hrsg.): Human-computer interaction. Novel interaction methods and techniques. 13th international conference, HCI International 2009, San Diego, CA, USA, July 19 - 24, 2009 ; proceedings, part II. Berlin: Springer 2009, S. 303–311. (Lecture Notes in Computer Science, 5611)

### BANNAT ET AL. 2011

Bannat, Al.; Bautze, T.; Beetz, M.; Blume, J.; Diepold, K.; Ertelt, C. et al.: Artificial Cognition in Production Systems. *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng* 8 (2011)1, S. 148–174.

### BARTHELMESS 1987

Barthelmess, P. : Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozessgestaltung. Berlin, New York: Springer 1987.

### BARTNECK ET AL. 2009

Bartneck, C.; Kulić, D.; Croft, E.; Zoghbi, S.: Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots. *Int J of Soc Robotics* 1 (2009)1, S. 71–81.

### BAUA 2001

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (Hrsg.): Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten, Tragen. 2001. <<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/Gefahrungsbeurteilung.html>> - 1.10.2013

### BAUA 2008

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA) (Hrsg.): Mit durchdachten Arbeitsplätzen in die Zukunft: Die Salzburg AG rüstet sich mittels Generationen-Managements für den demographischen Wandel. Berlin: 2008. <<http://www.inqa.de/Inqa/Navigation/Gute-Praxis/datenbank-gute-praxis,eDid=6582.html>> - 19.01.2010.



BECK 2012

Beck, S.: Jenseits von Mensch und Maschine. Ethische und rechtliche Fragen zum Umgang mit Robotern, künstlicher Intelligenz und Cyborgs. Nomos. 2012. ISBN 978-3-8329-7188-5.

BECK 2009

Beck, S. (2009): Grundlegende Fragen zum rechtlichen Umgang mit der Robotik. Juristische Rundschau (2009) 6, S. 225–230.

BECKER ET AL. 2009

Becker, B.C; Voros, S.; MacLachlan, R.A; Hager, G.D; Riviere, C.N: Active Guidance of a Handheld Micromanipulator using Visual Servoing. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Kobe, Japan, 12.-17. Mai. Piscataway: IEEE 2009, S. 339–344.

BECKER 2007

Becker, M.: Fallbeispiel zur alternsbedingten Leistungsentwicklung eines Montagesystems. In: Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab) (Hrsg.): ifab Tätigkeitsbericht 2007. Karlsruhe: 2007, S. 30–31.

BEETZ ET AL. 2007

Beetz, M.; Buss, M.; Wollherr, D.: Cognitive Technical Systems - What Is the Role of Artificial Intelligence? In: Hertzberg, J. (Hrsg.): Advances in artificial intelligence. Proceedings, Bd. 4667. Berlin: Springer 2007, S. 19–42.

BEIDERWIEDEN 2001

Beiderwieden, K.: Langfristige Wiedereingliederung nach der beruflichen Rehabilitation. Ergebnisse einer Langzeituntersuchung der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Berufsförderungswerke. Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung 34 (2001) 2, S. 182–206.

BENDIG ET AL. 2010

Bendig, A.; Michel, J.; Mütze-Niewöhner, S.; Hasenau, K.; Köttendorf, N.: Demographie-Wissen kompakt: Qualifizierung zum Demographie-Lotsen. Zusammenfassung des Abschlussberichts. Agentur Mark (Hrsg.). <[http://www.inqa.de/SharedDocs/PDFs/DE/Projekte/demographielotse-abschlussbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.inqa.de/SharedDocs/PDFs/DE/Projekte/demographielotse-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile)> - 1.10.2012

BERG ET AL. 2008

Berg, K.; Schaub, Kh; Wakula, J: Montagespezifischer Kraftatlas. Technische Universität Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft. BGM Mainz, 16.04.2008.

### BEUMELBURG 2005

Beumelburg, K: Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Diss. Univ. Stuttgart (2005). Heimsheim: Jost-Jetter 2005. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 413)

### BGIA 2009

BGIA (Hrsg.): BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie. Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern. Sankt Augustin: BGIA 2009.

### BICCHI ET AL. 2008

Bicchi, A.; Peshkin, M.A.; Colgate, J.E: Safety for Physical Human-Robot Interaction. In: Siciliano, B. und Khatib, O. (Hrsg.): Springer handbook of robotics. Berlin: Springer 2008, S. 1335–1348.

### BIERMANN & WEIBMANTEL 1995

Biermann, Holger; Weißmantel, Heinz: Seniorengerechtes Konstruieren SENSI. das Design seniorengerechter Geräte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (Fortschrittberichte : 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, 247).

### BIERWIRTH ET AL. 2011

Bierwirth, M.; Bruder, R.; Schaub, K. (2011): Total Ergonomics Management. A Modular Concept for the Integration of Ergonomics into Production Systems. In: Karwowski, W. und Salvendy, G. (Hrsg.): Advances in human factors, ergonomics, and safety in manufacturing and service industries. Boca Raton, FL: CRC Press 2011, S. 108–118.

### BLEY ET AL. 2004

Bley, H.; Reinhart, G.; Selinger, G.; Bernardi, M.; Korne, T.: Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly. In: CIRP Annals 53 (2004) 2, S. 487-509.

### BMW 2002

Arbeitskreis Ergonomie, BMW AG (Hrsg.): Leitfaden zur Anforderungs- und Belastbarkeitsanalyse (ABA). Version 3.0. München: 2002.

### BOGUS & DORN 2010

Bogus, T.; Dorn, R.: Berücksichtigung des Arbeitsplatzbedarfs für einsatzkritische leistungsgewandelte Mitarbeiter im Planungsprozess. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. Bericht zum 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 24.-26. März 2010. Dortmund: GfA-Press 2010, S. 265–268.

BÖRSCH-SUPAN ET AL. 2007

Börsch-Supan, A.; Düzgün, I.; Weiss, M. (2007a): Der Zusammenhang zwischen Alter und Arbeitsproduktivität: Eine empirische Untersuchung auf Betriebsebene. Abschlussbericht. Hans-Böckler-Stiftung (Hrsg.). Mannheim 2007. <[http://www.boeckler.de/pdf\\_fof/S-2004-697-3-5.pdf](http://www.boeckler.de/pdf_fof/S-2004-697-3-5.pdf)> -1.10.2012

BÖRSCH-SUPAN ET AL. 2009

Börsch-Supan, A.; Erlinghagen, M.; Hank, K.; Jürges, H.; Wagner, G.G. (Hrsg.): Produktivität in alternden Gesellschaften. Stuttgart: Wiss. Verl.2009. (Nova acta Leopoldina, N.F., 366 = Bd. 102). ISBN: 978-3-8047-2545-4

BORTOT ET AL. 2012

Bortot, D.; Hawe, B.; Schmidt, S.; Bengler, K.: Industrial robots - the new friends of an aging workforce? In: S. Trzcieliński und W. Karwowski (Hrsg.): Advances in ergonomics in manufacturing. 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. San Francisco, 21.-25.7. 2012, S. 253–262.

BRACHMAN 2002

Brachman, R.J.: Systems that know what they're doing. IEEE Intell. Syst 17 (2002) 6, S. 67–71.

BRANDENBURG & NIEDER 2009

Brandenburg, U.; Nieder, P.: Betriebliches Fehlzeiten-Management. Instrumente und Praxisbeispiele für ein erfolgreiches Anwesenheits und Vertrauensmanagement. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH 2009. ISBN: 978-3-8349-1194-0.

BRANDENBURG & DOMSCHKE 2007

Brandenburg, U.; Domschke, J.-P.: Die Zukunft sieht alt aus. Herausforderungen des demografischen Wandels für das Personalmanagement. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2007. <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-9532-2>> 1.10.2012.

BRAU 2011

Brau, H.: Cobot - Psychologie der Mensch-Roboter Kooperation. Forum des Clusters Mechatronik & Automation "Kollege Roboter". Augsburg, 11.11.2011.

BRECHER 2006

Brecher, C.: Portable Handhabungssysteme für den ortsflexiblen Einsatz in der Produktion.Abschlussbericht zum Projekt Porthos. Aachen: Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre 2006.

BRECHER ET AL. 2010

Brecher, C.; Roßmann, J.; Schlette, C.; Herfs, W.; Ruf, H.; Göbel, M. (2010): Intuitive Roboterprogrammierung in der automatisierten Montage. *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) 9, S. 681–686.

BROBERG 2007

Broberg, O.: Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing* 17 (2007) 4, S. 353–366.

Brogård, T. (2009): Physically harmless and low-cost kinematics. In: Fraunhofer IPA (Hg.): *SMErobot - Final Project Workshop*. Stuttgart, 7.-8. Mai.

BROOKS 2002

Brooks, R. A. (2002): *Flesh and machines. How robots will change us*. 1. Aufl. New York: Pantheon Books 2002.

BROWN ET AL. 2010

Brown, E.; Rodenberg, N.; Amend, J.; Mozeika, A.; Steltz, E.; Zakin, M. R. et al.: Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (2010) 44, S. 18809–18814.

BRUDER ET AL. 2009

Bruder, R.; Rademacher, H.; Schaub, K.-H.; Geiss, C.: Modular Concepts for Integrating Ergonomics into Production Processes. In: Schlick, C.M. (Hrsg.): *Industrial Engineering and Ergonomics*. Berlin Heidelberg: Springer 2009, S. 383-394.

BUCK 2002

Buck, H.: Alternsgerechte und gesundheitsförderliche Arbeitsgestaltung - ausgewählte Handlungsempfehlungen. In: Martina Morschhäuser (Hrsg.): *Gesund bis zur Rente. Konzepte gesundheits- und alternsgerechter Arbeits- und Personalpolitik*. Stuttgart:Fraunhofer-IRB-Verlag 2002, S. 73–85.

BUCK 2007

Buck, Hartmut: *Demographischer Wandel und öffentlicher Dienst*. Das Bundesministerium des Innern, Referat Internationale Zusammenarbeit für Verwaltungsfragen demographische Entwicklung bürgerschaftliches Engagement (Hrsg.). Berlin: 2007.

<[http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/OED\\_Verwaltung/Oeffentlicher\\_Dienst/Demographischer\\_Wandel\\_und\\_oeffentlicher\\_Dienst\\_de.pdf?jsessionid=B20C61BA9F886F1AD8F02E5FE27B4DB5.2\\_cid295?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/OED_Verwaltung/Oeffentlicher_Dienst/Demographischer_Wandel_und_oeffentlicher_Dienst_de.pdf?jsessionid=B20C61BA9F886F1AD8F02E5FE27B4DB5.2_cid295?__blob=publicationFile)> - 1.10.2013.

BUCK & SCHLETZ 2004

Buck, H.; Schletz, A. (Hrsg.): Ergebnisse des Transferprojektes Demotrans. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2004. ISBN 978-3-8167-6428-1.

BUCK ET AL. 1994

Buck, H.; Hermann, S.; Reif, A.: Altersadäquate Montagesystemgestaltung. In: Gersten, K. und Stieler-Lorenz, B. (Hrsg.): Arbeit und Technik in den neuen Bundesländern: Bilanzierung der AuT- Vorhaben in den neuen Bundesländern. Ergebnisse des 3. Bad Schandauer Innovationsgespräches 1994. Berlin: trafo1994, S. 401–414.

BUCK ET AL. 2002

Buck, H.; Kistler, E.; Mendius, H. G.: Demographischer Wandel in der Arbeitswelt. Chancen für eine innovative Arbeitsgestaltung. Stuttgart: Bundesministerium für Bildung und Forschung 2002. ISBN: 3-8167-6099-6. (Broschürenreihe: Demographie und Erwerbsarbeit).

BÜHLER ET AL. 1995

Bühler, C.; Hoelper, R.; Hoyer, H.; Humann, W.: Autonomous robot technology for advanced wheelchair and robotic aids for people with disabilities. Robotics and Autonomous Systems 14 (1995) 2-3, S. 213–222.

BULLINGER 1986

Bullinger, H. J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis. München: Hanser 1986. ISBN: 3-446-14606-7.

BULLINGER & WARSCHAT 1996

Bullinger, H. -J; Warschat, J (Hrsg.): Concurrent Simultaneous Engineering Systems. The way to successful product development. Springer 1996. ISBN 978-1-4471-1477-2.

SGB IX

Bundesministerium der Justiz (Hrsg.): Sozialgesetzbuch (SGB) Neuntes Buch (IX) Rehabilitation und Teilhabe behinderter Menschen. <[http://www.gesetze-im-internet.de/sgb\\_9/index.html](http://www.gesetze-im-internet.de/sgb_9/index.html)> - 1.10.2013

BMAS 2012

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (Hrsg.): Instrumentenkasten für eine altersgerechte Arbeitswelt in KMU. Analyse der Herausforderungen des demografischen Wandels und Systematisierung von Handlungsoptionen für kleine und mittlere Unternehmen. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von G. Richenhagen, S. Heinzelmann, C. Münch, D. Riesenberger, E. Schindler und I. Pfeiffer. 2012. (Forschungsbericht, 424).

BÜSCHER ET AL. 2012

Büscher, C.; Schilberg, D.; Jeschke, S.: Measurement of the Cognitive Assembly Planning Impact. In: Chun-Yi Su, Subhash Rakheja und Honghai Liu (Hrsg.): Intelligent robotics and applications. 5th International Conference, ICIRA 2012, Montreal, QC, Canada, October 3-5, 2012, proceedings, Bd. 1. Heidelberg, New York: Springer 2012, S. 686–696.

CAFFIER ET AL. 1999

Caffier, G.; Steinberg, U.; Liebers, F.: Praxisorientiertes Methodeninventar zur Belastungs- und Beanspruchungsbeurteilung im Zusammenhang mit arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.). Dortmund/Berlin: 1999. ISBN: 3-89701-368-1.

CHAPMAN 2005

Chapman, L. S.: Meta-evaluation of worksite health promotion economic return studies: 2005 update. The American Journal of Health Promotion 19 (2005) 6, S. 1-11.

CONSIGLIO ET AL. 2007

Consiglio, S.; Seliger, G.; Weinert, N.: Development of Hybrid Assembly Workplaces. CIRP Annals 56 (2007) 1, S. 37–40.

CRAIG 2005

Craig, J.J.: Introduction to robotics. Mechanics and control. 3. Aufl. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall 2005. ISBN: 0-13-123629-6.

CZESKLEBA ET AL. 2004

Czeskleba, R.; Maurer, S.; Reifinger, I.: Ältere ArbeitnehmerInnen: Das verborgene Gold im Unternehmen. Arbeit alternsgerecht gestalten. Österreichischer Gewerkschaftsbund (Hrsg.). Wien: 2004.

DAS 2001

Das, B.: Ergonomics Considerations and Management Action in the Implementation of Industrial Robots. In: John Wiley & Sons Inc. (Hrsg.): Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, Bd. 11, S. 269–285.

DAVIS 2006

Davis, S.: The team that changed the world - with robots and humans forming ever more complex partnerships the industrial robotic landscape is evolving quickly. Manufacturing Engineer 85 (2006) 4, S.28-31. ISSN: 0956-9944.

DENKENA ET AL. 2008

Denkena, B.; Wratil, P.; Friederichs, J.; Wedler, A. (2008): Sichere Antriebsfunktionen für Roboter - Safety Inside (9), S. 745–751.

DESTATIS 2010

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.): STATmagazin Später in den Ruhestand? Unter Mitarbeit von C. Wingerter. Wiesbaden 2010

<[http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/STATmagazin/Arbeitsmarkt/2010\\_\\_09/2010\\_\\_09PDF.property=file.pdf](http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/STATmagazin/Arbeitsmarkt/2010__09/2010__09PDF.property=file.pdf)> - 18.03.2011

DIN EN ISO 6385

DIN EN ISO 6385:2004-05: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth: 2004.

DIN EN ISO 8373

DIN EN ISO 8373:1996: Industrieroboter - Wörterbuch. Berlin: Beuth 1996.(Entwurf: prEN

ISO8373:2010: Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch. Berlin: Beut 2010).

DIN EN ISO 10218-1

DIN EN ISO 10218-1:2006, einschließlich Berichtigung 1:2007 Industrieroboter -  
Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter.; Deutsche Fassung EN ISO 10218-1:2008. Berlin: Beuth  
2009.

DIN EN ISO 10218-2: Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersystem und  
integration (ISO 10218-2:2008); Deutsche Fassung prEN ISO 10218-2:2008. Berlin: Beuth 2009.

DIN EN ISO 13849

DIN EN ISO 13849: 2008-12: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen -  
Teil 1: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze (ISO 13849-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2008.  
Berlin: Beuth 2008.

DIN EN ISO 12100

DIN EN ISO 12100:2011-03: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung  
(integriert die ISO 14121-1:2007, risk assessment).Berlin: Beuth 2011.

DIN EN ISO 13855

DIN EN ISO 13855:2010-10: Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungs-  
geschwindigkeiten von Körperteilen. Berlin: Beuth 2010.

DIN 69901

DIN 69901: Projektmanagement - Projektmanagementsysteme . Berlin: Beuth 2009.

DIECKMANN ET AL. 2006

Dieckmann, H.; Kaiser, H.; Kleffmann, A.; Schian, H. -M; Weinmann, S. Ramsauer F.; Rexrodt C. et al.:  
Integration von Menschen mit Behinderungen in die Arbeitswelt (IMBA). Bundesministerium für  
Gesundheit und Soziale Sicherung (Hrsg.) Wenden: 2006.

DILLMANN 2004

Dillmann, R. (2004): Teaching and learning of robot tasks via observation of human performance. *Robotics and Autonomous Systems* 47 (2004) 2-3, S. 109-116.

DRESSELHAUS 2006

Dresselhaus, M.: Sichere Steuerungstechnik für die Mensch-Roboter Kooperation. VDI GMA Fachausschuss 4.13, 25.01.2006.

DRESSELHAUS 2009

Dresselhaus, M.: Kompaktes, modulares Robotersystem als Schreinerassistent. In: Fraunhofer IPA (Hrsg.): SMERobot - Final Project Workshop. Stuttgart, 7.-8. Mai 2009.

DRIEMEYER WILBERT ET AL. 2012

Driemeyer Wilbert, A.; Behrens, B.; Dambon, O.; Klocke, F.: Robot assisted manufacturing system for high gloss finishing of steel molds. In: Chun-Yi Su, Subhash Rakheja und Honghai Liu (Hrsg.): Intelligent robotics and applications. 5th International Conference, ICIRA 2012, Montreal, QC, Canada, October 3-5, 2012, proceedings, Bd. 1. Heidelberg, New York: Springer 2012, S. 673–686.

DUBIAN 2009

Dubian, C.: Modellierung und Realisierung eines IT-Systems zur Verwaltung und Analyse industrieller Arbeitsplätze unter Einbeziehung von ergonomischen und gesundheitlichen Aspekten. Diss. Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen: 2009.

EBENER 2011

Ebener, M.: Why WAI? Der Work Ability Index im Einsatz für Arbeitsfähigkeit und Prävention - Erfahrungsberichte aus der Praxis. 4. Aufl. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2011.

EBERT & HENRICH 2002

Ebert, D.; Henrich, D.: Das SIMERO-System. In: Ross, P. (Hrsg.): OTS-Systeme in der Robotik. Roboter ohne trennende Schutzeinrichtungen. München, 25. Juni 2002. Workshop: OTS-Systeme in der Robotik. München: Utz 2002, S. 5-2 - 5-17.

EBERT 2003

Ebert, D. (2003): Bildbasierte Erzeugung kollisionsfreier Transferbewegungen für Industrieroboter. Diss. Univ. Kaiserslautern (2003).



EGBERS & SCHILP 2010

Egbers, J.; Schilp, J.: Integration Leistungsgewandelter in die Planung von Montagesystemen. In: Gerhäuser, H.; Günthner, W. A.; Lang, F. R.; Reinhart, G. und Schilling, K. (Hrsg.): Alternsgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik. Ergebnisse aus dem Bayerischen Forschungsverbund FitForAge. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik 2010, S. 108-120 ISBN: 978-3941702165

EGBERS ET AL. 2010

Egbers, J.; Neuberger, M.; Spillner, R.; Walch, D.; Williger, B.: Definition einer alternsgerechten Arbeitsgestaltung. In: H. Gerhäuser, W. A. Günthner, F. R. Lang, G. Reinhart und K. Schilling (Hrsg.): Alternsgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik. Ergebnisse aus dem Bayerischen Forschungsverbund FitForAge. München 2010, S. 10–14.

EGBERS ET AL. 2012

Egbers, J.; Reinhart, G.; Hees, A.; Neumann, W. P. (2012): The influence of assembly design methods on work exposures - an analytical examination. In: J.S Hu (Hrsg.): Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization. Ann Arbor, 20.-22.05. University of Michigan 2012, S. 138–141.

EGBERS 2012

Egbers, J.F.: Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses. Diss. Technische Universität München (2012). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. <<http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1177630>> - 1.10.2013.

EHRENMANN ET AL. 2002a

Ehrenmann, M.; Becher, R.; Giesler, B.; Zöllner, R.; Rogalla, O.; Dillmann, R.: Interaction with Robot Assistants: Commanding Albert. In: Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 30.9.-4.10.2002, EPFL Lausanne, Switzerland. Piscataway, NJ: IEEE 2002.

EHRENMANN ET AL. 2002b

Ehrenmann, M.; Rogalla, O.; Zöllner, R.; Dillmann, R. (2002b): Belehrung komplexer Aufgaben: Programmieren durch Vormachen in Werkstätten und Haushalten. In: Robotik 2002. Ludwigshafen, Juni 2002.

EHRMANN & SECKNER 2006

Ehrmann, M.; Seckner, M.: Ein Ansatz zur nutzergerechten Programmierung von Industrierobotern. Automatisierungstechnische Praxis (atp) 48 (2006) 4, S. 56-62.

EK RSDA 2007

Europäische Kommission Referat Soziale und Demografische Analyse: Europe's demographic future. Facts and figures on challenges and opportunities. Luxembourg, Office for Official Publ. of the Europ. Communities 2007.

<[http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc\\_library=BVB01&doc\\_number=016242633&line\\_number=0001&func\\_code=DB\\_RECORDS&service\\_type=MEDIA\\$zInhaltsverzeichnis](http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=016242633&line_number=0001&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA$zInhaltsverzeichnis)> – 1.10.2012.

ELKMANN ET AL. 2010

Elkmann, N.; Schulenburg, E.; Fritzsche, M.: Mobile robot system "LiSA" for safe human-robot interaction. In: J. Billingsley, R. Chanchaenroen und M. Parnichkun (Hrsg.): Robotics. Proceedings of the IASTED international conference : November 24-26, 2010, Phuket, Thailand. Anaheim, CA: International Association of Science and Technology for Development 2010, S. 47–54.

ENRÍQUEZ-DÍAZ ET AL. 2012

Enríquez-Díaz, J.-A.; Kotzab, D.; Sytch, A.; Frieling, E.: Impact of increasing productivity on work content and psychosocial work characteristics in Chaku-Chaku assembly lines. a follow-up study in a German automotive manufacturing company. Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation 41 (2012) 1, S. 5121–5128.

ERDEN & MARIĆ 2011

Erden, M. S.; Marić, B.: Assisting manual welding with robot. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27 (2011) 4, S. 818–828.

ETHIER ET AL. 2002

Ethier, S.; Wilson, W.J.; Hulls, C.: Telerobotic Part Assembly with Shared Visual Servo Control. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, D.C., 11.-14. Mai. Piscataway: IEEE 2002, S. 3763–3768.

EUROPEAN AGENCY FOR SAFETY AND HEALTH AT WORK 2010

European Agency for Safety and Health at Work (Hrsg.): OSH in figures: work-related musculoskeletal disorders in the EU - Facts and figures. (European risk observatory report). Luxembourg: Office for Official Publ. of the Europ. Communities 2010.

EWERT ET AL. 2012

Ewert, D.; Schilberg, D.; Jeschke, S.: Selfoptimized Assembly Planning for a ROS Based Robot Cell. In: Chun-Yi Su, Subhash Rakheja und Honghai Liu (Hrsg.): Intelligent robotics and applications. 5th International Conference, ICIRA 2012, Montreal, QC, Canada, October 3-5, 2012, proceedings, Bd. 1. Heidelberg, New York: Springer 2012, S. 696–706.

FALCK & ROSENQVIST 2012

Falck, A.-C.; Rosenqvist, M. (2012): A calculation model for ergonomics cost-benefit analyses in early product development stages. In: AHFE (Hrsg.): 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE). San Francisco, California, USA, 21-25 Juli 2012. California: The Printing House, Inc. 2012, S. 8260–8269.

Festo AG & Co. KG (Hg.): BionicTripod mit FinGripper. Online verfügbar unter [www.festo.com](http://www.festo.com), zuletzt geprüft am 2009.

FÖHRES ET AL. 2005

Föhres, F.; Kleffmann, A.; Weinmann, S.: MELBA: Merkmalprofile zur Eingliederung Leistungsgewandelter und Behinderter in Arbeit. 5. Aufl. Siegen: Miro 2003.

FRANK 2011

Frank, R.: Perspektiven in der Realisierung von Roboterapplikationen mithilfe moderner Sensorik. Von der statischen zur dynamischen Applikation. In: 14. IFF-Wissenschaftstage 2011. Tagungsband: Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben Technischer Systeme. 8. Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken, 28.-30. Juni 2011 in Magdeburg. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2011, S. 35.

FRIEBEL & BOYSEN 2010

Friebel, H.; Boysen, W.: Betriebliche Konzepte zur Integration älterer Mitarbeiter am Beispiel der Automobilindustrie. In: B. Badura, H. Schröder, J. Klose und K. Macco (Hrsg.): Fehlzeiten-Report 2010. Berlin: Springer 2010, S. 183-188.

FRIEDRICH 1986

Friedrich, W.: Massnahmen zur altersadäquaten Anpassung der Arbeitsbedingungen. Arbeitsplatzgestaltung für leistungsgewandelte und behinderte ältere Arbeitnehmer. Diss. Universität Oldenburg (1986).

FRIELING & HOYOS 1978

Frieling, E.; Hoyos, C. G.: Fragebogen zur Arbeitsanalyse (FAA). Deutsche Bearbeitung des "Position Analysis Questionnaire" (PAQ). Bern, Stuttgart, Wien: Huber 1978.

FRIELING ET AL. 2007

Frieling, E.; Buch, M.; Weichel, J.; Urban, D.: Altersgerechte Montage in der Automobilindustrie. In: GfA (Hrsg.): Die Kunst des Alterns. Tagungsband zur Herbstkonferenz 2007 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. E.ON Mitte AG, Kassel, 13. und 14. September 2007. Dortmund: GfA-Press 2007, S. 101–113.

FUKUDA ET AL. 2002

Fukuda, T.; Fujisawa, Y.; Kosuge, K.; Arai, F.; Muro, E.; Hoshino, H. et al.: Manipulator/Vehicle System for Man-Robot Cooperation. In: Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, Frankreich, 12.-14. 3. Los Alamitos, Calif. Piscataway: IEEE 1992 c2002, S. 74–79.

GECKS & HENRICH 2004

Gecks, T.; Henrich, D. (2004): SIMERO: Camera Supervised Workspace for Service Robots. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Advances in Service Robotics, May 21, 2004, Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2004, S.5.

GECKS & HENRICH 2005

Gecks, T.; Henrich, D.: Human-robot cooperation: safe pick-and-place operations. In: ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005. Piscataway: IEEE 2005, S. 549–554.

GERHÄUSER ET AL. 2010

Gerhäuser, H.; Günthner, W. A.; Lang, F. R.; Reinhart, G.; Schilling, K. (Hrsg.): Alternsgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik. Ergebnisse aus dem Bayerischen Forschungsverbund FitForAge. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik 2010. ISBN: 978-3941702165

GLATZ ET AL. 2007

Glatz, A.; Anneken, V.; Heipertz; Schian, H. -M; Weber, A.: Zur ärztlichen Beurteilung arbeitsbezogener körperlicher Leistungsfähigkeit anhand des FCE-Assessments ERGOS® Work Simulator. Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin (2007) 2, S. 56–63. <<http://www.asu-arbeitsmedizin.com/ASU-2007-2/Zur-aerztlichen-Beurteilung-arbeitsbezogener-koerperlicher-Leistungsfahigkeit-anhand-des-FCE-Assessments-ERGOS-Work-Simulator,QUIEPTIwMTIxNSZNSUQ9MzAwMTA.html>> - 1.10.2012.

GÖBEL 2009

Göbel, M.: Produktivität und sensumotorische Fertigkeiten. In: Landau, K. und Ahmadi, K. (Hrsg.): Produktivität im Betrieb. Tagungsband der GfA Herbstkonferenz 2009 ; Millstatt, 23. - 25. September 2009. Stuttgart: ergonomia 2009, S. 273-286.

GÖBEL 2012

Göbel, Martin: Verfahren zur intuitiven Programmierung von Industrierobotern durch Demonstration. 1. Aufl. Aachen: Apprimus 2012. ISBN: 3863590678.

GÖRNEMANN 2008

Görnemann, O.: Abstand halten. Optimieren von Sicherheitsabständen bei optoelektronischen Schutzeinrichtungen. S&I-Kompodium (2012), S. 96–99.

GOTO ET AL. 2010

Goto, S.; Naka, T.; Matsuda, Y.; Egashira, N.: Teleoperation system of robot arms combined with remote control and visual servo control. In: Proceedings of the SICE Annual Conference 2010. Taipei, Taiwan, 18.-21. August 2010. Tokyo: SICE 2010, S. 1975–1981. ISBN: 978-4-907764-36-4.

GOUTTEBARGE ET AL. 2004

Gouttebarge, V.; Wind, H.; Kuijper, P.P.; Frings-Dresen, M.H.: Reliability and validity of Functional Capacity Evaluation methods: a systematic review with reference to Blankenship system, Ergos work simulator, Ergo-Kit and Isernhagen work system. International Archives of Occupational and Environmental Health 77 (2004) 8, S. 527–537.

GUIZZO & GOLDSTEIN 2005

Guizzo, E.; Goldstein, H.: The rise of the body bots (robotic exoskeletons). IEEE Spectrum 42 (2005) 10, S. 50–56.

HACKER 2000

Hacker, W.: Auswirkungen von Ziel- und Leistungsvorgaben auf die Regulation von Arbeitstätigkeiten. Institut für Arbeitsberatung und Arbeitsforschung Dresden. Dresden: 2000.

<[https://www.dmtm.com/medienverwaltung/medien/Inhalt\\_Hacker\\_2000.pdf?inlink=1](https://www.dmtm.com/medienverwaltung/medien/Inhalt_Hacker_2000.pdf?inlink=1)> – 1.10.2013.

HACKER 1996

Hacker, W. (Hrsg.): Erwerbsarbeit der Zukunft. Auch für "Ältere"? Zürich, Stuttgart: Vdf Hochschulverl. an der ETH; B.G. Teubner 1996.

HADDADIN & ALBU-SCHÄFFER 2009

Haddadin, S.; Albu-Schäffer, A.: Sichere Mensch-Roboter Interaktion: Kollisionsuntersuchungen und regelungstechnische Methoden. In: 12. IFF-Wissenschaftstage 2009. Tagungsband: "LISA" Abschlusspräsentation: Assistenzroboter für Life-Science-Unternehmen. Fachtagung Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion, 17. bis 18. Juni 2009; Magdeburg: Fraunhofer IFF 2009, S. 61.

HADDADIN ET AL. 2007

Haddadin, S.; Albu-Schäffer, A.; Hirzinger, G.: Approaching Asimov's 1st Law: "Impact" of the Robot's Weight Class. In: Robotics: Science and Systems Conference Workshop: Robot Manipulation: Sensing and Adapting to the Real World. RSS 2007. Atlanta, USA: 2007, S. 6.

HADDADIN ET AL. 2012

Haddadin, S.; Khoury, A.; Rokahr, T.; Parusel, S.; Burgkart, R.; Bicchi, A.; Albu-Schaffer, A.: On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control. The International Journal of Robotics Research 31 (2012) 13, S. 1578-1602.

HADDADIN ET AL. 2011

Haddadin, S.; Suppa, M.; Fuchs, S.; Bodenmüller, T.; Albu-Schäffer, A.; Hirzinger, G.: Towards the Robotic Co-Worker. In: Cédric Pradalier, Roland Siegwart und Gerhard Hirzinger (Hrsg.): Robotics research. Springer Tracts in Advanced Robotics, Bd. 70 (2011), S. 261–282. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISSN: 1610-7438

HAGER 2010

Hager, G. D.: Human-machine Cooperative Manipulation with Vision-based Motion Constraints. In: M. Morari, M. Thoma, G. Chesi und K. Hashimoto (Hrsg.): Lecture Notes in Control and Information Sciences. London: Springer 2010, S. 55-70.

HAHN 2007

Hahn, D. (2007): Robotereinsatz in der werkstatorientierten Fertigung. Dissertation, Stuttgart.

HAMMER 1996

Hammer, S.: Entwurf eines Modells zur altersgerechten Montageplanung. In: Bullinger, H.J. (Hrsg.): Betriebliche Folgen veränderter Altersstrukturen in der Montage. 1996. Chemnitz: IBF1996, S. 93-110.

HAMNER ET AL. 2010

Hamner, B.; Koterba, S.; Shi, J.; Simmons, R.; Singh, S. (2010): An autonomous mobile manipulator for assembly tasks. *Auton Robot* 28 (2010) 1, S. 131–149.

HATTESOHL ET AL. 2007

Hattesohl, S.; Pletke, M.; Gerst, D.: Wie leistungsfähig sind ältere Arbeitnehmer? *Unimagazin Hannover* Nr.3/4 (2007), S. 24–27.

HAYASHIBARA & SONODA 1999

Hayashibara, Y.; Sonoda, Y.: Assist System for Carrying a Long Object with a Human - Analysis of a Human Cooperative Behavior in the Vertical Direction. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Human and environment friendly robots with high intelligence and emotional quotients. October 17-21, 1999, Hyundai Hotel, Kyongju, Korea. Piscataway: IEEE 1999, S. 695–700.

HAYASHIBARA ET AL. 1996

Hayashibara, Y.; Tanie, K.; Arai, H.; Tokashiki, H. (1996): Development of Power Assist System with Individual Compensation Ratios for Gravity and Dynamic Load. In: Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, IROS '97s. Innovative robotics for real-world applications, September 7-11, 1997, World Trade Center Atria, Grenoble, France. [New York]: Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 640–646.

#### HEILIGENSETZER 2005

Heiligensetzer, P.: Safe Operation - Safe Handling. In: Schraft, R.D. (Hrsg.): 4. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik. Sichere Mensch-Roboter-Interaktion ohne trennende Schutzsysteme ; Fraunhofer IPA Workshop, 2. November 2005, Stuttgart. Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung Produktionstechnischer Forschung 2005, S. 7–14.

#### HEILIGENSETZER 2003

Heiligensetzer, P.: Sichere Mensch-Roboter-Kooperation durch Fusion haptischer und kapazitiver Sensorik. Diss.Universität Aachen. Aachen: Shaker 2003.

#### HEINZMANN & ZELINSKY 1999

Heinzmann, J.; Zelinsky, A.: Building Human-Friendly Robot Systems. In: Proceedings of the International Symposium on Robotics Research. USA, 9.-12.10..

#### HELMS & MEYER 2005

Helms, E.; Meyer, C.: Assistor - Mensch und Roboter rücken zusammen. Einsatz von sicheren und einfach bedienbaren Assistenzrobotern im Produktionsalltag. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 9, S. 677–683.

#### HELMS 2006

Helms, E.: Roboterbasierte Bahnführungsunterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen. Diss. Univ. Stuttgart (2006). Heimsheim: Jost-Jetter 2007. ISBN 978-3-939890-04-1. (IPA-IAO Forschung und Praxis 451) .

#### HENRICH & GECKS 2008

Henrich, D.; Gecks, T.: Multi-Camera Collision Detection Betewwn Known And Unknown Objects. In: 2008 Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras. Piscataway: IEEE 2008, S. 10.

#### HENRICH & KUHN 2006

Henrich, D.; Kuhn, S.: Modeling Intuitive Behavior for Safe Human/Robot Coexistence and Cooperation. In: Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 15.-19. Mai 2006. IEEE 2006, S. 3929-3934.

#### HENRICH ET AL. 2008

Henrich, D.; Fischer, M.; Gecks, T.; Kuhn, S. (2008): Sichere Mensch/Roboter-Koexistenz und Kooperation. In: Tagungsband der 5. Fachtagung Robotik 2008. Robotik 2008. München, 11.-12.6 2008. <[http://www.ai3.uni-bayreuth.de/resypub/?mode=pub\\_show&pub\\_ref=henrich2008a](http://www.ai3.uni-bayreuth.de/resypub/?mode=pub_show&pub_ref=henrich2008a)> - 1.10.2012

HENTZE 1994

Hentze, H.: Motivation älterer Mitarbeiter. Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. Personalführung (1994) 2, S. 150–157.

HERZER 2007

Herzer, H.: Betriebliche Handlungsansätze zur Gestaltung des demographischen Wandels in zehn Industrieunternehmen. Recherchebericht 2007. Unter Mitarbeit von T. Müller, T. Wagner und M. Hanfler. IG Metall (Hrsg.). 2007.

HESSE 2010

Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. 2. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3446418721

HEYER & GRAESER 2012

Heyer, T.; Graeser, A.: Rückkehr in den Beruf mit Hilfe von Roboterassistenz. In: Tagungsband 5. Deutscher AAL-Kongress, Technik für ein selbstbestimmtes Leben. Berlin, 24.-25. Januar. VDI-VDE Innovation + Technik GmbH. Berlin: VDE-Verlag 2012.

HIRZINGER ET AL. 2001

Hirzinger, G.; Albu-Schäffer, A.; Hahnle, M.; Schaefer, I.; Sporer, N.: On a new generation of torque controlled light-weight robots. In: Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Bd. 4. Piscataway: IEEE 2001, S. 3356–3363.

HOC 2001

Hoc, J-M: Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. International Journal of Human-Computer Studies 54 (2001) 4, S. 509–540.

HOEHNE-HÜCKSTÄDT ET AL. 2007

Hoehne-Hückstädt, U.; Ellegast, R.; Luckau, M.: BGIA-Report 1/2007. Heben und Tragen, knieende Tätigkeiten und Zwangshaltungen im Raumaussatterhandwerk. Handlungsanleitung zur Vermeidung von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren für das Muskel-Skelett-System. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg.). 2007.

HOYER ET AL. 2012

Hoyer, G.; Hauke, M.; Lungfiel, A.; Nickel, P.; Huelke, M.; Bömer, T. : Gestaltungsanforderungen an dreidimensionale Schutzräume für Fertigungszellen mit Mensch-Roboter-Interaktion. Eine Pilotstudie in virtueller Realität. In: Schütte, M. (Hrsg.): Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme - Wege zur gesunden, effizienten und sicheren Arbeit. Vom 22. - 24. Februar 2012. Dortmund: GfA-Press 2012, S. 643–646.



HUBER ET AL. 2008

Huber, M.; Rickert, M.; Knoll, A.; Brandt, T.; Glasauer, S: Human-Robot Interaction in Handing-Over Tasks. In: The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008 ; 1 - 3 Aug. 2008, Technische Universität München. Piscataway: IEEE 2008, S. 107–112.

HUELKE 2011

Huelke, M.: Sichere Mensch-Roboter-Interaktion. Neues aus Arbeitsschutzforschung und Normung. Vortrag. In: 14. IFF-Wissenschaftstage 2011. Tagungsband: Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben Technischer Systeme. 8. Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken, 28.-30. Juni 2011 in Magdeburg. Stuttgart, Fraunhofer Verlag 2011, S.27.

IAD 2009

Institut für Arbeitswissenschaft (IAD), Technische Universität Darmstadt (Hg.) (2009): European Assembly Worksheet. v.1.3.2c.

IKEURA & INOOKA 2002

Ikeura, R.; Inooka, H.: Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human. In: Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya Congress Center, May 21-27, Nagoya, Aichi, Japan.: Piscataway: IEEE c1995 2002, S. 3097–3102.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS 2009

International Federation of Robotics (IFR) - statistical department (Hrsg.): World Robotics 2009. 2009. <<http://www.worldrobotics.org>> - 1.10.2012

ISO 9999

ISO 9999:2011-10: Hilfsmittel für Menschen mit Behinderungen. Berlin: Beuth 2011.

JAHN 2001

Jahn, H.-P.: Datenerfassung und -verarbeitung bei der ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen - mehrere Jahre nach Abschluss eines HdAProjektes für Leistungsgewandelte. Herbstkonferenz der GfA, 12.10.2001.

JANSCHKE 2010

Janschek, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme. Methoden, Modelle, Konzepte. Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3540788768

RASMUSSEN 1983

Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs and Symbols and Other Distinctions in Human Performance Models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-13 (3).

### JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz (Forschungsberichte iwb, 145).

### KAISER ET AL. 2000

Kaiser, H.; Kersting, M.; Schian, H. -M: Der Stellenwert des Arbeitssimulationsgerätes ERGOS als Bestandteil der leistungsdiagnostischen Begutachtung. Rehabilitation 93 (2000), S.175-184.

### KALTENBRUNNER 2008

Kaltenbrunner, S.: Alternsgerechte Arbeitsbedingungen. Konzeption eines ganzheitlichen Massnahmenpaketes zur Gestaltung alternsgerechter Arbeitsbedingungen in der Fahrzeugmontage. Diss. Wirtschaftsuniversität Bratislava (2008).

### KALTENBRUNNER & SPILLNER 2013

Kaltenbrunner, S.; Spillner, R.: Untersuchungen zur Akzeptanz von Handhabungsgeräten. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2013) 4, S. 244-248.

### KARHU ET AL. 1981

Karhu, O.; Härkönen, R.; Sorvali, P.; Vepsäläinen, P.: Observing working postures in industry: Examples of OWAS application. Applied Ergonomics 12 (1981) 1, S. 13–17.

### KAWAKAMI ET AL. 1999

Kawakami, M.; Inoue, F.; Kumashiro, M.: Design of a Work System Considering the Needs of Aged Workers. Experimental Aging Research. An International Journal Devoted to the Scientific Study of the Aging Process, 25 (1999) 4, S. 477-483.

### KAWAKAMI ET AL. 2000

Kawakami, M.; Inoue, F.; Okhubo, T.; Ueno T.: Evaluating elements of the work area in terms of job redesign for older workers. International Journal of Industrial Ergonomics 25 (2000) 5, S. 525–533.

### KEIL ET AL. 2009

Keil, M.; Spanner-Ulmer, B.; Scherf, C.: Änderungen der menschlichen Leistungsfaktoren im Alter - Entwicklung eines interdisziplinären Altersmodells. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert. 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Bd. 55. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. Dortmund: GfA Press 2009, S. 145–148.

KEMPE & REIF 1996

Kempe, G.; Reif, A.: Altersadäquate Montageorganisation und -planung. In: H. -J Bullinger und H. Enderlein (Hrsg.): Betriebliche Folgen veränderter Altersstrukturen in der Montage, Bd. 7 (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme) (1996), S. 23–44.

KENNY ET AL. 2008

Kenny, G.P; Yardley, J.E; Martineau, L.; Jay, O. (2008): Physical Work Capacity in Older Adults: Implications for the Aging Worker. American Journal of Industrial Medicine 51 (2008), S. 610–625. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ajim.20600/abstract>> -17.06.2012.

KISTLER ET AL. 2006

Kistler, E.; Ebert, A.; Guggemos, P.; Lehner, M.; Buck, H.; Schletz, A.: Altersgerechte Arbeitsbedingungen. Machbarkeitsstudie (Sachverständigengutachten) für die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Berlin. Unter Mitarbeit von J. Kopske und J. Bauer.. Dortmund, Berlin, Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2006. <[http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd49.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd49.pdf?__blob=publicationFile&v=6)> - 1.10.2013

KLAUSMANN 2002

Klausmann, P.: Tracking und Verfolgung von Personen und Objekten. In: Fraunhofer Allianz Vision (Hrsg.): Leitfaden zu praktischen Anwendungen in der Bildverarbeitung. Fraunhofer IRB: S. 26–28. ISBN: 978-3816760948.

KLUGE 2011

Kluge, S. J.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Diss. Universität Stuttgart (2011). ISBN: 978-3-939890-81-2. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 510).

KONOLD & REGER 2003

Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2003. (Vieweg Praxiswissen).

KORTENKAMP & SIMMONS 2008

Kortenkamp, D.; Simmons, R.: Robotic Systems Architectures and Programming. In: Bruno Siciliano und Oussama Khatib (Hrsg.): Springer handbook of robotics. Berlin: Springer 2008, S. 187–204.

KOSUGE & KAZAMURA 2001

Kosuge, K.; Kazamura, N.: Control of a Robot Handling an Object in Cooperation with a Human. In: RO-MAN'97 Sendai. Proceedings, 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication : 29 Sept. - 1 Oct. 1997, Tohoku University, Sendai, Japan. Piscataway: IEEE 2001, S. 142–147.

KOSUGE ET AL. 2002

Kosuge, K.; Sato, M.; Kazamura, N.: Mobile Robot Helper. In: 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. April 24-28, 2000, San Francisco Hilton Hotel, San Francisco, California : proceedings. Piscataway, NJ: IEEE 2002, S. 583–588.

KRÄMER 2002

Krämer, K.: Lebensarbeitszeitgestaltung in der Altenpflege - Handlungsleitfaden für eine altersgerechte Personalentwicklung. Informationen und Erfahrungen aus einem Beratungsprojekt. Fraunhofer IAO - Institut Arbeitswirtschaft und Organisation (Hrsg.). Stuttgart: 2002.

<[http://www.demotrans.de/documents/BR\\_DE\\_BR8.pdf](http://www.demotrans.de/documents/BR_DE_BR8.pdf)> - 1.10.2012

KRENN & VOGT 2004

Krenn, M.; Vogt, M.: Ältere Arbeitskräfte in belastungsintensiven Tätigkeitsbereichen: Probleme und Gestaltungsansätze. Forschungs- und Beratungsstelle Arbeitswelt. Wien: 2004.

KRIEGER 2010

Krieger, R. D.: Automatisiertes Einrichten von Sicherheitssystemen zur Mensch-Roboter-Kooperation mit Industrierobotern. Diss. München: Dr. Hut Verlag 2008. ISBN: 978-3868536058.

KROHN & HAHN 2000

Krohn, B.; Hahn, H. Qualifizierung bei Arbeitsstrukturierungsmaßnahmen im Montagebereich. Dortmund: BAuA 2000. ISBN: 3-88261-309-2

KRUG 2013

Krug, S.: Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug & Produce).Diss. Technische Universität München. München: Utz 2013. (Forschungsberichte iwv, 270).

KRÜGER & SURDILOVIC 2008

Krüger, J.; Surdilovic, D.: Robust control of force-coupled human–robot-interaction in assembly processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008)1, S. 41–44.

KRÜGER ET AL. 2006

Krüger, J.; Bernhardt, R.; Surdilovic, D.; Spur, G.: Intelligent Assist Systems for Flexible Assembly. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 55 (2006) 1, S. 29-32.

KRÜGER ET AL. 2009

Krüger, J.; Lien, T.K.; Verl, A.: Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009) 2.

KRÜGER ET AL. 2005

Krüger, J.; Nickolay, B.; Heyer, P. (2005): Image based 3D Surveillance for flexible Man-Robot-Cooperation. In: *CIRP Annals* 54 (2005) 1, S. 19–22.

KRUIJFF ET AL. 2008

Kruijff, G.-J.M.; Brenner, M.; Hawes, N.: Continual Planning for Cross-Modal Situated Clarification in Human-Robot Interaction. In: The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008 ; 1 - 3 Aug. 2008, Technische Universität München. Piscataway: IEEE 2008, S. 592-597.

KRUSCHWITZ 2005

Kruschwitz, L.: Investitionsrechnung. 10. Aufl. München, Wien: Oldenbourg (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

KRUSE 2002

Kruse, A. (2002): Gesund altern. Stand der Prävention und Entwicklung ergänzender Präventionsstrategien. Baden-Baden: Nomos-Verl.-Ges.

KUGELMANN 1999

Kugelmann, Doris: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. Diss. Technische Universität München. München: Utz 1999. (Forschungsberichte iwb 127)

KUGLER ET AL. 2010

Kugler, M.; Bierwirth, M.; Schaub., K.; Sinn-Behrendt, A.; Feith, A.; Ghezal-Ahmadi, K.; Bruder, R.: Ergonomie in der Industrie - aber wie? Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements. KoBRA - Kooperationsprogramm zu normativem Management von Belastungen und Risiken bei körperlicher Arbeit. Institut für Arbeitswissenschaften (Hrsg.). Darmstadt: 2010. ISBN: 978-3-00-032123-8.

KUHN ET AL. 2006

Kuhn, S.; Gecks, T.; Henrich, D.: Velocity control for safe robot guidance based on fused vision and force/torque data. In: Proceedings of the 2006 IEEE international conference on multisensor fusion and integration for intelligent systems. Heidelberg, Germany : September 3-6, 2006. IEEE 2006, S. 8.

KULIC & CROFT 2004

Kulic, D.; Croft, E.: Safe Planning for Human-Robot Interaction. In: 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings. April 26-May 1, 2004, Hilton New Orleans Riverside, New Orleans, LA, USA. Piscataway, N.J: IEEE 2004, S. 1882-1887.

KUROKAWA ET AL. 2007

Kurokawa, H.; Tomita, K.; Kamimura, A.; Kokahi, S.; Hasuo, T.; Murata, S. (2007): Self-reconfigurable modular robot M-TRAN: distributed control and communication. Article No. 21. In: Winfield, A.F.T. and Redi, J. (Hrsg.): RoboComm 2007. 2007 First International Conference on Robot Communication and Coordination, Athens, Greece, October 15-17, 2007. Brussel, Belgium: Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering 2007.

### LACEVIC & ROCCO 2010a

Lacevic, B.; Rocco, P. (2010a): Kinetostatic Danger Field - a Novel Safety Assessment for Human-Robot Interaction. In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems : (IROS 2010), Taipei, Taiwan, 18 - 22 October 2010. Piscataway, NJ: IEEE 2010, S. 2169–2174.

### LACEVIC & ROCCO 2010b

Lacevic, B.; Rocco, P. (2010b): Sampling-based Safe Path Planning for Robotic Manipulators. In: 2010 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010). Bilbao, Spain, 13 - 16 September 2010. Piscataway, NJ: IEEE 2010, S. 7.

### LACEVIC & ROCCO 2010c

Lacevic, B.; Rocco, P.: Towards a Complete Safe Path Planning for Robotic Manipulators. In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: (IROS 2010), Taipei, Taiwan, 18 - 22 October 2010. Piscataway, NJ: IEEE 2010, S. 5366–5371.

### LACHELLO 2009

Lachello, L. (2009): Three Day Deployable Plug integrated robot system. Architecture and technologies for Plug-and-Produce of robot workcells. In: Fraunhofer IPA (Hrsg.): SMERobot - Final Project Workshop. Stuttgart, 7.-8. Mai.

### LAFRENZ 2011

Lafrenz, R.: Cognitive Aspects of safe human-robot interaction. In: 14. IFF-Wissenschaftstage 2011. Tagungsband: Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben Technischer Systeme. 8. Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken, 28.-30. Juni 2011 in Magdeburg: Stuttgart: Fraunhofer 2011, S. 23.

### LAMBRECHT ET AL. 2011

Lambrecht, J.; Chemnitz, M.; Kruger, J.: Control layer for multi-vendor industrial robot interaction providing integration of supervisory process control and multifunctional control units. In: 2011 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications, Boston, MA, 11.-12.4.2011. Piscataway: IEEE 2011, S. 115–120.

### LANDAU & LUCZAK 2001

Landau, K.; Luczak, H. (2001): Ergonomie und Organisation in der Montage. München: Carl Hanser 2001.

### LANDAU 2002

Landau, K.: Ergonomie und Wirtschaftlichkeit – "rechnet" sich die Arbeitsgestaltung? Angewandte Arbeitswissenschaft 172 (2002), S. 49–67.

LANDAU 2003

Landau, K.: Good practice. Ergonomie und Arbeitsgestaltung Stuttgart: Ergonomia 2003. ISBN: 978-3935089630

LANDAU 2004

Landau, K. (Hrsg.): Montageprozesse gestalten. Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation. Vorträge des Kolloquiums Ergonomie und Organisation in der Montage, Darmstadt, Januar 2004. Kolloquium Ergonomie und Organisation in der Montage. Stuttgart: Ergonomia 2004. ISBN: 3935089732.

LANGHOFF 2009

Langhoff, T. (Hrsg.): Den demographischen Wandel im Unternehmen erfolgreich gestalten. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.

LAURIG 1990

Laurig, W.: Grundzüge der Ergonomie. Erkenntnisse und Prinzipien. Berlin: Beuth 1990. ISBN: 978-3410365808.

LAVATELLI ET AL. 2012

Lavatelli, I.; Schaub, K.; Caragnano, G.: Correlations in between EAWS and OCRA Index concerning the repetitive loads of the upper limbs in automobile manufacturing industries. In: IOS Press (Hg.): IEA 2012: 18th World congress on Ergonomics. Designing a sustainable future (Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, 41 (2012) 1, S. 4436–4444.

LAWITZKY ET AL. 2010

Lawitzky, M.; Mortl, A.; Hirche, S.: Load sharing in human-robot cooperative manipulation. In: 19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication. 13.-15. Sep., Viareggio, Italy. Pistataway: IEEE 2010, S. 185-191.

LAY & SCHIRRMEISTER 2001

Lay, G.; Schirrmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung (2001) 22, S. 1–12.

LAY ET AL. 2001

Lay, K.; Prassler, E.; Dillmann, R.; Grunwald, G.; Hägele, M.; Lawitzky, G. et al.: MORPHA: Communication and interaction with Intelligent, Anthropomorphic Robot Assistants. In: Tagungsband Statustage Leitprojekte Mensch-Technik-Interaktion in der Wissensgesellschaft. Saarbrücken, Oktober 2001.

LEDERMANN 2010

Ledermann, T.: Blick ins Chaos - Griff in die Kiste - Lösungen zur verlässlichen Vereinzelung von Schüttgut. Technikforum industrielle Bildverarbeitung. TCW Nördlingen, 25.02.2010.

LEE ET AL. 2011

Lee, S.; Yu, S.; Choi, J.; Han, C.: A methodology to quantitatively evaluate the safety of a glazing robot. *Applied Ergonomics* 42 (2011), S. 445–454.

LEE ET AL. 2007

Lee, Seung Yeol; Lee, Kye Young; Lee, Sang Heon; Kim, Jin Woo; Han, Chang Soo (2007): Human-robot cooperation control for installing heavy construction materials. In: *Auton Robot* 22 (3), S. 305–319.

LEITNER ET AL. 2009

Leitner, A.; Jacobi, E.; Enderle, G.: Betriebsärztliche Einleitung der Rehabilitationsmaßnahme und Begleitung der Rückkehr an den Arbeitsplatz. In: *Phys. Rehab. Kur. Med.* 19 (2009) 04. DOI: 10.1055/s-0029-1238193.

LENHARDT ET AL. 1997

Lenhardt, U.; Elkeles, T.; Rosenbrock, R.: Betriebsproblem Rückenschmerz. Eine gesundheitswissenschaftliche Bestandsaufnahme zu Verursachung, Verbreitung und Verhütung. Weinheim, München: Juventa-Verlag 1997.

LIEBERS ET AL. 2013

Liebers, F.; Brendler, C.; Latza, U.: Alters- und berufsgruppenabhängige Unterschiede in der Arbeitsunfähigkeit durch häufige Muskel-Skelett-Erkrankungen. In: *Bundesgesundheitsblatt* 56 (2013) 3, S. 367–380.

LOTTER 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Optimierte Abläufe, rationelle Automatisierung. Berlin: Springer 2006.

LUCZAK & FRÄDRICH 1993

Luczak, H.; Frädrich, J.: Arbeitswissenschaft. Berlin: Springer 1993. ISBN: 978-3540546368.

LUNZE 2013

Lunze, J.: Regelungstechnik 2. Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung. 7. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer 2013. ISBN: 978-3642295614

LUNZE 2012

Lunze, J.: Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. 9. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3642295324



## LÜTH 2009

Lüth, C.: SAMS Formale Methoden für Sichere Servicerobotik. In: 12. IFF-Wissenschaftstage 2009. Tagungsband: "LISA" Abschlusspräsentation: Assistenzroboter für Life-Science-Unternehmen. Fachtagung Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion, 17. bis 18. Juni 2009. Magdeburg: Fraunhofer IFF, 2009, S. 21.

## MAITIN-SHEPARD ET AL. 2010

Maitin-Shepard, J.; Cusumano-Towner, M.; Lei, J.; Abbeel, P.: Cloth Grasp Point Detection based on Multiple-View Geometric Cues with Application to Robotic Towel Folding. In: Proceedings of the IEEE 2010 International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, USA, 3.-8. Mai.

## MARGOSHES 1998

Margoshes, B.: Disability management and occupational health. *Occup. Med.* 13 (1998) 4, S. 693-703 iii.

## BRAUN 2009

Braun, M.: Automatisierte Fertigungssysteme menschengerecht gestalten. Produktivitätsfortschritt und Qualitätssicherung durch zweckmäßiges Zusammenwirken von Mensch und Technik. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 3, S. 152–156.  
<[http://www.technikwissen.de/wt/article.php?data%5Barticle\\_id%5D=47554](http://www.technikwissen.de/wt/article.php?data%5Barticle_id%5D=47554)> - 1.10.2012

## MATSUMOTO ET AL. 2011

Matsumoto, Y.; Nishida, Y.; Motomura, Y.; Okawa, Y. (2011): A concept of needs-oriented design and evaluation of assistive robots based on ICF. In: IEEE (Hrsg.): 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), Zürich, Schweiz, 29.6.-1.7. S. 1–6.

## MATTHÄI &amp; MORSCHHÄUSER 2009

Matthäi, I.; Morschhäuser, M.: Länger arbeiten in gesunden Organisationen. Praxishilfe zur alternsgerechten Arbeitsgestaltung in Industrie, Handel und Öffentlichem Dienst. 1. Aufl. Institut für Sozialforschung und Sozialwirtschaft e.V. Saarbrücken (Hrsg.). Saarbrücken.; Leupelt 2009. ISBN: 978-3-935084-27-7.

## MATTHIAS 2009

Matthias, B.: Mensch-Roboter-Kooperation in der industriellen Praxis - Stand und Ausblick. Vortrag. In: 12. IFF-Wissenschaftstage 2009. Tagungsband: "LISA" Abschlusspräsentation: Assistenzroboter für Life-Science-Unternehmen. Fachtagung Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion, 17. bis 18. Juni 2009. Magdeburg: Fraunhofer IFF 2009, S. 19.

MAYER & SCHLICK 2012

Mayer, M.; Schlick, C.C (2012): Improving operator's conformity with expectations in a cognitively automated assembly cell using human heuristics. In: AHFE (Hrsg.): 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE). San Francisco, California, USA, 21-25 Juli 2012. California: The Printing House, Inc. 2012.

MCATAMNEY & NIGEL CORLETT 1993

McAtamney, L.; Nigel Corlett, E.: RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics* 24 (1993) 2, S. 91–99.

MELENHORST ET AL. 2006

Melenhorst, A.-S.; Bouwhuis, D.G.; Rogers, W.A.: Older Adults' Motivated Choice for Technological Innovation: Evidence for Benefit-Driven Selectivity. *Psychology and Aging* 21 (2006) 1, S. 190–195.

MENEVIDIS ET AL. 2006

Menevidis, Z.; Heyer, P.; Nickolay, B.; Krüger, J.: Kooperative Arbeitsplätze. Visuelle Arbeitsraumüberwachung mittels 3D-Objektverfolgung. *Werkstattstechnik online* 96 (2006) 1/2, S. 61–65.

MEYER & NYHUIS 2012

Meyer, G.; Nyhuis, P.: Age-appropriate workplace engineering with the aid of cardboard engineering. In: AHFE (Hrsg.): 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE). San Francisco, California, USA, 21-25 Juli 2012. California: The Printing House, Inc. 2012.

MOECKEL ET AL. 2006

Moeckel, R.; Jaquier, C.; Drapel, K.; Dittrich, E.; Upegui, E.; Ijspeer, A.: YaMoR and Bluemove - an autonomous modular robot with Bluetooth interface for exploring adaptive locomotion. In: M. O. Tokhi, G. S. Virk und M. A. Hossain (Hrsg.): Climbing and walking robots. *Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2005)*. Berlin: Springer 2006, S. 685–692.

MORI 1970

Mori, M.: Bukimi no Tani (Das unheimliche Tal). *Energy* (1970) 7, S. 33–35.

MORIOKA & SAKIBARA 2010

Morioka, M.; Sakakibara, S.: A new cell production assembly system with human–robot cooperation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 9-12.

MORSCHHÄUSER ET AL. 2005

Morschhäuser, M.; Ochs, P.; Huber, A.: Erfolgreich mit älteren Arbeitnehmern. Strategien und Beispiele für die betriebliche Praxis. 2. Aufl. Gütersloh: Bertelsmann-Stiftung 2005. ISBN 978-3-89204-738-4.

MÜHLBAUER ET AL. 2008

Mühlbauer, Q.; Kühnlenz, K.; Buss, M.: A Model-based Algorithm to Estimate Body Poses using Stereo Vision. In: The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008 ; 1 - 3 Aug. 2008, Technische Universität München, Munich, Germany. Piscataway, NJ: IEEE 2008, S. 285–290.

MÜHLSTEDT ET AL. 2008

Mühlstedt, J.; Kaußler, H.; Spanner-Ulmer, B.: Programme in Menschengestalt: Digitale Menschmodelle für CAX- und PLM-Systeme. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 62 (2008) 2, S. 79–86.

MÜLLER 2009

Müller, A: Selbstreferenzierendes personalisiertes miniaturisiertes Dosimeter (PMD) zur Bestimmung individueller Belastungs-Beanspruchungs-Beziehungen. Diss. Technische Universität Ilmenau. Ilmenau: Univ.-Verl.2009. (Berichte aus der Biomechatronik, 4).

MÜLLER ET AL. 2007

Müller, T.; Wagner, T.; Hanfler, M.: Betriebliche Handlungsansätze zur Gestaltung des demographischen Wandels in zehn Industrieunternehmen. IG Metall. Frankfurt am Main: 2007.

<[http://www.gute-arbeit-weltweit.de/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=121&Itemid=112](http://www.gute-arbeit-weltweit.de/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=121&Itemid=112)> - 03.12.2009.

MUSAHL 2001

Musah, H.-P.: Eher schlau als klug - psychologische Hemmnisse vorausschauenden Handelns. In: Radandt, S: und Vorath, B.J. (Hrsg.): Instandhaltung. XIX. Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium der GfS.. Wuppertal, 6.-7. November 2000. Wuppertal: GfS 2001.

NASA 2012

NASA (Hrsg.): Definition Of Technology Readiness Levels.<[http://esto.nasa.gov/files/trl\\_definitions.pdf](http://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf)> - 01.12.2012.

NEE ET AL. 2012

Nee, A.Y.C; Ong, S.K; Chryssolouris, G.; Mourtzis, D. (2012): Augmented reality applications in design and manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012) 2, S. 657–679.

NEFF & KAISER 2007

Neff, J.; Kaiser, E.: Altersgerechte Arbeitsgestaltung und Gesundheitsförderung bei der Rowenta Werke GmbH. 2. INQA KNOW HOW KONGRESS 2007 Demographie Werkstatt Deutschland. AOK Hessen; Rowenta Werke GmbH. Berlin, 14.03.2007.

NEUMANN 2008

Neumann, M.: Taktile Bedienung redundanter mobiler Manipulatoren mit einem sechsdimensionalen Kraft-Momenten-Sensor. Diss.. Technische Universität Berlin (2008).

NEUMANN ET AL. 2002

Neumann, W. P.; Kihlberg, S.; Medbo, P.; Mathiassen, S. E.; Winkel, J.: A case study evaluating the ergonomic and productivity impacts of partial automation strategies in the electronics industry. *International Journal of Production Research* 40 (2002) 16, S. 4059–4075.

NONAKA ET AL. 2004

Nonaka, S.; Inoue, K.; Arai, T.; Mae, Y. (2004): Evaluation of human sense of security for coexisting robots using virtual reality. 1st report: evaluation of pick and place motion of humanoid robots. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2004*, Bd. 4. Piscataway: IEEE 2004, S. 2770–2775.

NOVK & FEDDEMA 2002

Novak, J.L. Feddema J.T: A Capacitance-Based Proximity Sensor for Whole Arm Obstacle Avoidance. In: *1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings, Nice, France, May 12-14, 1992*. Los Alamitos, Calif. IEEE Computer Society Press 2002, S. 1307–1314.

NUNO ET AL. 2011

Nuño, E.; Basañez, L.; Ortega, R.: Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial. *Automatica* 47 (2011) 3, S. 485–495.

OBERER ET AL. 2006

Oberer, S.; Malosio, M.; Schraft, R.D.: Investigation of Robot-Human Impact. In: *Proceedings of the joint conference on robotics. ISR 2006, 37th International Symposium on Robotics and ROBOTIK 2006, 4th German Conference on Robotics*. Düsseldorf: VDI Verlag 2006, S. 17. (VDI-Berichte).

ONG & WANG 2011

Ong, S.K; Wang, Z.B: Augmented assembly technologies based on 3D bare-hand interaction. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011) 1, S. 1–4.

ORLOFF 2006

Orloff, M. A.: *Grundlagen der klassischen TRIZ. Ein praktisches Lehrbuch des erfinderischen Denkens für Ingenieure*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (VDI) 2006.

OSAKI ET AL. 2008

Osaki, A.; Kaneko, T.; Miwa, Y. (2008a): Embodied navigation for mobile robot by using direct 3D drawing in the air. In: *The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Technische Universität München, 1 - 3 Aug. 2008. Piscataway: IEEE 2008, S. 671–676.

OSTERMANN ET AL. 2011

Ostermann, B.; Huelke, M.; Kahl, A.: Von Zäunen befreit - Industrieroboter mit Ultraschall absichern. atp - Automatisierungstechnische Praxis (2011) 9, S. 52-59.

PACKEBUSCH & WEBER 2003

Packebusch, L.; Weber, B.: Demographie-Initiative. Betriebliche Strategien einer altersgerechten Arbeits- und Personalpolitik; Schwerpunkte, Lösungsansätze, Ergebnisse. Stuttgart: 2003. ISBN 3-8167-6404-5.

PANGERT & HARTMANN 1999

Pangert, R.; Hartmann, H.: Zur Wirkung von Alter und Belastung auf die Lendenwirbelsäule. In: Freistaat Sachsen Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): Fachtagung Ergonomie und Arbeitssicherheit. Freiberg, 27.-28. 09. 1999, S. 119–125.

<<http://old.arbeitsschutz-sachsen.de/publications/mitteilungshefte/2000/tagungsband%20freiberg/Pangert.PDF>> - 1.10.2012

PAPANIKOLOPOULOS & KHOSLA 2002

Papanikolopoulos, N.P.; Khosla, P.K.: Shared and Traded Telerobotic Visual Control. In: Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, Frankreich, 12.-14. 3. Los Alamitos, Calif: IEEE 2002 c1992, S. 878–885.

PARASURAMAN 1997

Parasuraman, R.: Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. In: Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 39 (1997) 2, S. 230–253.

PARENT-THIRION ET AL. 2007

Parent-Thirion, A.; Macías, E.F.; Hurley, J.; Vermeylen, G.: Fourth European working conditions survey. Dublin: European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions 2007.

PETERS & ZELEWSKI 2005

Peters, M. S.; Zelewski, S.: Competence and Preference-based Workplace Assignment. An Application of Weighted, Non-pre-emptive and Pre-emptive Goal Programming Model. In: Zülch, G.; Jagdev, H.-S.; Stock, P. (Hrsg.): Integrating Human Aspects in Production Management. IFIP TC5 / WG5.7 Proceedings of the International Conference on Human Aspects in Production Management 5-9 October 2003, Karlsruhe, Germany. S. 31–43.

<[http://www.pim.wiwi.uni-due.de/uploads/tx\\_itochair3/publications/Peters\\_Zelewski\\_-\\_Competence\\_Workplace\\_Assignment.pdf](http://www.pim.wiwi.uni-due.de/uploads/tx_itochair3/publications/Peters_Zelewski_-_Competence_Workplace_Assignment.pdf)> -1.10.2013

PFEIFFER ET AL. 2010

Pfeiffer, I.; Kaiser, S.; Maetzel, J.: Recherche und Darstellung betrieblicher Demographieprojekte. Endbericht. Auftraggeber Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Prognos AG

(Hrsg.). <<http://www.inqa.de/Inqa/Redaktion/Projekt-Datenbank/PDF/prognos-bericht-2010,property=pdf,bereich=inqa,sprache=de,rwb=true.pdf>> - 25.08.2010.

### PFOSER 2008

Pfoser, R.: Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung bei steigendem Lebensalter. BMW Werk Steyr, Arbeitssicherheit. Steyr, 05.06.2008.

### PFRANG 1990

Pfrang, W.: Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze. Diss. Technische Universität München (1990).

### POOK & BALLARD 1996

Pook, P. K.; Ballard, D. H.: Deictic human/robot interaction. Robotics and Autonomous Systems 18 (1996) 1-2, S. 259–269.

### PRASCH 2006

Prasch, M.: Wirtschaftliche und dennoch ergonomische Integration manueller Arbeitsplätze in hoch automatisierte Montagesysteme. Wolf Produktionssysteme. Freudenstadt, 27.09.06.

### PRASCH 2010

Prasch, M. G.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Diss. Technische Universität München. München: Herbert Utz 2010.

### PUTZING 2009

Putzing, M.: Praxishilfe Nr. 19 Zeit zum Handeln - Instrumente zur Gestaltung des demografischen Wandels. Potsdam: Landesagentur für Struktur und Arbeit (LASA) Brandenburg GmbH 2009.  
<[www.lasa-brandenburg.de/Praxishilfen.227.0.html](http://www.lasa-brandenburg.de/Praxishilfen.227.0.html)> - 1.10.2010.

### RADEMACHER ET AL. 2012

Rademacher, H.; Bruder, R.; Sinn-Behrendt, A.; Landau, K.: Influences of mechanical exposure biographies on physical capabilities of workers from automotive industry. A study on possible dose-response relationships and consequences for short and long term job rotation. In: IOS Press (Hrsg.): IEA 2012: 18th World congress on Ergonomics. Designing a sustainable future. Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, 41 (2012) 1, S. 5114–5120.

### RADEMACHER ET AL. 2010

Rademacher, H.; Sinn-Behrendt, A.; Bruder, R.; Landau, K.: Tätigkeitsbezogene Analyse körperlicher Fähigkeiten von jüngeren und älteren Beschäftigten in der Produktion. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 64 (2010) 3, S. 187–203.

RADEMACHER ET AL. 2006

Rademacher, H.; Sinn-Behrendt, A.; Schaub, K.; Landau, K.: Ein Verfahren zur Ermittlung altersbedingter Engpässe hinsichtlich muskuloskelettaler Belastungen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 60 (2006) 4, S. 230–244.

RADI ET AL. 2010

Radi, M.; Nitsch, V.; Reiter, A.; Zaidan, S.; Gunther, R.; Färber, B.: Telepresence in Industrial Applications: Implementation Issues for Assembly Tasks. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 19 (2010) 5, S. 415–429.

RADI 2012

Radi, M (2012): Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators. Diss. Technische Universität München (2012). München: Herbert Utz 2012.

RADOJICIC ET AL. 2009

Radojicic, J.; Surdilovic, D.; Schreck, G.: Modular hybrid robots for safe human-robot interaction. In: Proceedings of the International Conference on Control, Robotics and Vision (ICCARV), Bangkok 2009, S. 832–838.

REFA 1993

REFA (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Grundlagen der Arbeitsgestaltung. 2. Aufl. München: Hanser 1993.

REINHART & EGBERS 2011

Reinhart, G.; Egbers, J.: Integration Ability Limitations into Assembly System Design. In: 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production. Montreal: 2011, S. 35–40.

REINHART & SPILLNER 2010

Reinhart, G.; Spillner, R.: Assistenzroboter in der Produktion. In: Intelligente Mechatronische Systeme. Tagungsband : Winterthur 3.-4. November 2010. Internationales Forum Mechatronik. Winterthur: IMS Institut für Mechatronische Systeme 2010.

REINHART & TEKOUO 2009

Reinhart, G.; Tekouo, W.: Automatic programming of robot-mounted 3D optical scanning devices to easily measure parts in high-variant assembly. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 48 (2009) 1, S. 25–28.

REINHART ET AL. 2010a

Reinhart, G.; Egbers, J.; Schilp, J.; Rimpau, C.: Demographiegerechte und doch wirtschaftliche Montageplanung. Integration individueller und kollektiver Mitarbeiteranforderungen in die Montageplanung. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 1, S. 9–14.

REINHART ET AL. 2010b

Reinhart, G.; Egbers, J.; Bortot, D. (2010b): 3P zur Gestaltung alternsgerechter Arbeitsplätze. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.): Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. Bericht zum 56. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 24.-26. März 2010 an der Technischen Universität Darmstadt. Dortmund: GfA-Press 2010, S. 827–830

REINHART ET AL. 2010c

Reinhart, G.; Spillner, R.; Egbers, J.; Schilp, J.: Individualisierung an Montagearbeitsplätzen. Konzeption und Auslegung flexibel individualisierbarer Arbeitsplätze in der Montage. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 9, S. 665–669.

REINHART ET AL. 2009a

Reinhart, G.; Spillner, R.; Egbers, J.: Werkzeug zur individuellen Belastungsdosimetrie. In: K. Landau & K. Ahmadi (Hrsg.): Produktivität im Betrieb. Tagungsband der GfA Herbstkonferenz 2009, Millstatt, 23. - 25. September 2009. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Stuttgart: ergonomia 2009, S. 145-150.

REINHART ET AL. 2009b

Reinhart, G.; Radi, M.; Reiter, A.: Haptisch geführtes Robotersystem für die Montage. Roboter zur Unterstützung der Montage in einem manuell geführten Modus. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 9, S. 648–654.

REINHART ET AL. 2007

Reinhart, G.; Tekuou, W.; Rösel, W.; Wiesbeck, W.; Vogl, W.: Robotergestützte kognitive Montagesysteme. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 9.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Spillner, R.; Shen, Y.: Approaches of Applying Human-Robot-Interaction-Technologies to Assist Workers with Musculoskeletal Disorders in Production. In: Chun-Yi Su, Subhash Rakheja und Honghai Liu (Hrsg.): Intelligent robotics and applications. 5th International Conference, ICIRA 2012, Montreal, QC, Canada, October 3-5, 2012, proceedings, Bd. 2. Heidelberg, New York: Springer 2012, S. 74–85.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Spillner, R.; Shen, Y.; Schilp, J.: Anwendung und Ansätze für die ortsflexible Roboterassistenz in der Produktion. In: Internationales Forum Mechatronik, Tagungsband 2011. Cham, 21.-22.11., S. (17).



REINKENSMEYER ET AL. 2007

Reinkensmeyer, David J.; Wolbrecht, Eric; Bobrow, James: A Computational Model of Human-Robot Load Sharing during Robot-Assisted Arm Movement Training after Stroke. In: 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 23.-26. Aug. 2007, Lyon, France. Piscataway: IEEE 2007, S. 4019-4023.

REIS 2008

Reis GmbH & CoKG Maschinenfabrik (Hrsg.): Handhabung via 6D-Mouse.

REMAZEILLES ET AL. 2008

Remazeilles, A.; Lereux, C.; Chalubert, G.: SAM: a robotic butler for handicapped people. In: The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008 ; 1 - 3 Aug. 2008, Technische Universität München, Munich, Germany. Piscataway: IEEE 2008, S. 315–321.

RIEDEL 2003

Riedel, S.: Die Grundlagen der ergonomischen Griffgestaltung am Beispiel einer Heckenschere. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (2003) 2, S. 12.

ROBERT & BRANGIER 2009

Robert, J.-M.; Brangier, E.: What is Prospective Ergonomics? A Reflection and a Position on the Future of Ergonomics. In: Ben-Tzion Karsh (Hrsg.): Ergonomics and health aspects of work with computers. Proceedings of the International conference, EHAWC 2009, held as part of HCI International 2009, San Diego, CA, USA, July 19-24, 2009. Berlin (etc.): SpringerLink 2009 S. 162-169.

ROSS 2002

Ross, Paul: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. DISS. Technische Universität München (2002). München: Utz 2002. (Forschungsbericht IWB, 170).

ROTHLING ET AL. 2007

Rothling, Frank; Haschke, Robert; Steil, Jochen J.; Ritter, Helge: Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-DOF shadow and 9-DOF TUM hand. In: 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE 2007, S. 2951–2956.

SAM GE ET AL. 2008

Sam Ge, S.; Aghaebrahimi Samani, H. OngY.H.J.; Chieh Hang, C.: Active Affective Facial Analysis For Human-Robot Interaction. In: The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008 ; 1 - 3 Aug. 2008, Technische Universität München. Piscataway: IEEE 2008, S. 83–88.

SARODNICK ET AL. 2005

Sarodnick, F.; Kohler, P.; Lum, T.; Schulze, H.; Giessler, R. (2005): Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kooperation. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 59 (2005) 5, S. 441–448.

SATAKE ET AL. 2009

Satake, S.; Kanda, T.; Glas, D.F.; Imai, M.; Ishiguro, H.; Hagita, N. (2009): How to Approach Humans? Strategies for Social Robots to Initiate Interaction. In: ACM (Hg.): HRI'09. La Jolla, Kalifornien, USA, 11.-13.3.

SCHAUB 2004

Schaub, K.: Das "Automotive Assembly Worksheet" (AAWS). In: Kurt Landau (Hrsg.): Montage-prozesse gestalten. Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation. Vorträge des Kolloquiums Ergonomie und Organisation in der Montage, Darmstadt, Januar 2004. Stuttgart: Ergonomia 2004, S. 91–111.

SCHAUB ET AL. 2006

Schaub, K.; Sinn-Behrendt, A.; Mnich, H.-P.; Gaber, W.: Instrumente zum fähigkeitsgerechten Mitarbeiterinsatz: Methoden und Ansätze aus der Praxis. In: GfA (Hrsg.): Innovationen für Arbeit und Organisation. 52. Frühjahrskongress der GfA 2006 in Stuttgart. Bericht zum 52. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 20. - 22. März 2006. Dortmund: GfA-Press, 2006 S. 747–750.

SCHIAN & KAISER 2000

Schian, H.-M.; Kaiser, H.: Profilvergleichssysteme und leistungsdagnostische, EDV-gestützte Technologie. Ihr Einsatz zur Verbesserung der Beantwortung sozialmedizinischer Fragestellungen und Begutachtungen sowie der Planung von Rehabilitationsmaßnahmen. Die Rehabilitation 39 (2000), S. 56–64.

SCHLICK ET AL. 2010

Schlick, Christopher M.; Bruder, Ralph; Luczak, Holger: Arbeitswissenschaft. Unter Mitarbeit von M. Mayer und K. Fuchs. 3. Aufl. Berlin: Springer 2010.

SCHMAL ET AL. 2001

Schmal, A.; Niehaus, M.; Heinrich, T.: Betrieblicher Umgang mit der Gruppe leistungsgewandelter und behinderter Mitarbeiter/innen: Befragungsergebnisse aus der Sicht unterschiedlicher Funktionsträger. Die Rehabilitation 40 (2001), S. 241–246.

SCHMALLENBERG 1994

Schmallenberg, H.J.: Arbeitsplätze für Behinderte und Leistungsgewandelte. Gesundheitsschutz. 1. Aufl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund: BAuA 1994.

SCHMID 2008

Schmid, A.: Intuitive Human-Robot Cooperation. Diss. Univ. Fridericiana zu Karlsruhe (2008).

SCHMIDT 2007

Schmidt, M.: Aus der Arbeitsschutzforschung: FUNKtionierender Arbeitsschutz Intelligente RFID-Systeme auf dem Vormarsch. Zeitschrift für betriebliche Prävention und Unfallversicherung BPUVZ (2007) 4, S. 158–159.

SCHMIDTKE & BERNOTAT 1993

Schmidtke, Heinz; Bernotat, Rainer (1993): Ergonomie. 3. Aufl. München: Hanser 1993.

SCHMIDT-ROHR ET AL. 2008

Schmidt-Rohr, S.R; Lösch, M.; Dillmann, R.: Human and robot behavior modeling for probabilistic cognition of an autonomous service robot. In: Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. Technische Universität München, 1.-3. August, S. 635–640.

SCHMITT 2005

Schmitt, I.: Ähnlichkeitssuche in Multimedia-Datenbanken. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 9783486579079

SCHRADER ET AL. 1995

Schrader, K.; Meyer-Falcke, A.; Munker, H.: Einsatz leistungsgewandelter Arbeitnehmer. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1995.

SCHRAFT ET AL. 2004

Schraft, R. D.; Helms, E.; Meyer, C. Assistenzfunktionen des ASSISTOR-Demonstrators rob@work. In: Robotik 2004. Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends : Tagung München, 17. und 18. Juni 2004 : Deutschland Robotik 2004. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004, S. 176-172.

SCHRAFT ET AL. 2005

Schraft, R.D; Meyer, C.; Parlitz, C.; Helms, E.: PowerMate - A Safe an Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Barcelona, Spain, 18 - 22 April 2005. Piscataway, NJ: IEEE 2005, S. 4074–4079.

SCHUH ET AL. 2008

Schuh, G.; Brecher, C.; Müller, R.; Giehler, F.; Göbel, M.: Modulare Systeme zur temporären Montageautomation. Mietroboter zu Erhöhung der Flexibilität in der automatisierten Produktion. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 9, S. 727–732.

SCHÜHLEIN 1997

Schühlein, W.H.R.: Neben den Olympics brauchen wir auch die Paralympics. Für eine Ethik der Personalentwicklung. *Personalführung* 30 (1997) 6, S. 484–485.

SCHULTETUS 1987

Schultetus, Wolfgang: Montagegestaltung. Daten, Hinweise und Beispiele zur ergonomischen Arbeitsgestaltung. 2. Aufl. Köln: Verl. TÜV Rheinland 1987. (Praxis der Ergonomie).

SEBANZ ET AL. 2006

Sebanz, N.; Bekkering, H.; Knoblich, G.: Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences* 10 (2006)2, S. 70–76.

SENECA

Seneca, L.A.: *Epistularum Moraliū Ad Luciliū Liber Quartus*. XXXIII, 11.

SILVERSTEIN 2008

Silverstein, M.: Meeting the Challenges of an Aging Workforce. *American Journal of Industrial Medicine* 51 (2008) 4, S. 269–280. DOI: 10.1002/ajim.20569

SINN-BEHRENDT 2006

Sinn-Behrendt: Assistenzsystem zur altersdifferenzierten Arbeitsgestaltung und zum Mitarbeiterersatz. In: F. Lösel und D. Bender (Hrsg.): *Humane Zukunft gestalten*. 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie., 17.-21. September 2006., S. 336.

SISBOT ET AL. 2010

Sisbot, E.A.; Marin-Urias, L. F.; Broquère, X.; Sidobre, D.; Alami, R.: Synthesizing Robot Motions Adapted to Human Presence. *Int J of Soc Robotics* 2 (2010) 3, S. 329-343.

SOM 2005

Som, F.: Sichere Steuerungstechnik für den OTS-Einsatz von Robotern. In: Schraft, R.D. (Hrsg.): 4. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik. Sichere Mensch-Roboter-Interaktion ohne trennende Schutzsysteme ; Fraunhofer IPA Workshop, 2. November 2005, Stuttgart. Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung Produktionstechnischer Forschung 2005.

SPILLNER ET AL. 2010

Spillner, R.; Leutert, F.; Reinhart, G.; Schilling, K. (2010): Roboterunterstützung an Montagearbeitsplätzen. In: H. Gerhäuser, W. A. Günthner, F. R. Lang, G. Reinhart und K. Schilling (Hrsg.): *Alternsgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik*. Ergebnisse aus dem Bayerischen Forschungsverbund FitForAge. München, S. 110–118. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik 2010, S.110-118. ISBN: 978-3941702165

SPILLNER 2014

Spillner, R.: Pick-By-Wire. Funktion, Auslegung und Eigenschaften eines Moduls zur kollaborativen Objekthandhabung durch Mensch und Roboter. E-Book. Utz. 2014. ISBN: 978-3-8316-7029-1 (in Vorbereitung)

SPITZER ET AL. 1982

Spitzer, H.; Hettinger, T.; Kaminsky, G.: Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit. 6. Aufl. Berlin: Beuth 1982.

SPORKET 2009

Sporket, M.: Alternsmanagement in der betrieblichen Praxis. Motive, Umsetzung und Effekte. Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie 42 (2009), S. 292–298.

SPRÖWITZ ET AL. 2008

Spröwitz, A.; Moeckel, R.; Maye, J.; Ijspeert, A.J.: Learning to move in modular robots using central pattern generators and online optimization. The International Journal of Robotic Research (IJJR) 27 (2008) 3-4, S. 423–443.

STEINBERG ET AL. 2007

Steinberg, U.; Behrendt, S.; Caffier, G.; Schultz, K.; Jakob, M.: Leitmerkmalmethode Manuelle Arbeitsprozesse. Erarbeitung und Anwendungserprobung einer Handlungshilfe zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen. Abschlussbericht zum Projekt "Handlungshilfe zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen bei repetitiver Arbeit - Begründung von Hypothesen und Prüfung eines Arbeitsentwurfes unter Praxisbedingungen " - Projekt F 1994. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.). Dortmund: 2007.

STOLKA & HENRICH 2004

Stolka, P.; Henrich, D.: A Hybrid Force Following Controller For Multi-Scale Motions. In: I. Duleba und J. Sasiadek (Hg.): Robot control 2003 (SYROCO '03). A proceedings volume from the 7th IFAC Symposium, Wrocław, Poland, 1-3 September 2003. Oxford: Elsevier 2004, S. 247–252.

STOPP ET AL. 2001

Stopp, A.; Horstmann, S.; Kristensen, S.; Lohnert, F.: Towards interactive learning for manufacturing assistants. In: Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Bordeaux, 18.-21.Sep. 2001. Piscataway: IEEE 2001, S. 338–342.

STORK ET AL. 2008

Stork, S.; Stöbel, C.; Schubö, A.: Optimizing Human-Machine Interaction in Manual Assembly. The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008.1 - 3 Aug. 2008, Technische Universität München (2008).  
<<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4591422>> - 1.10.2012

STRAßER 2012

Straßer, G.: Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2012.

STROTMANN & HESS 2003

Strotmann, H.; Hess, W.: Eigenschaften und Beschäftigungschancen älterer Arbeitnehmer sowie betriebliche Maßnahmen für ältere Arbeitnehmer in Baden-Württemberg. Institut für angewandte Wirtschaftsforschung. Tübingen: 2003.

SUN ET AL. 2006

Sun, L.; Sun, W.; Liu, J.; Huang, X.; Du, J.: A Human-Assisted Based Visual Servo Approach for Tele-Assembly. In: Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) 2006. Dalian, China, 21.-23.6.. Piscataway: IEEE Xplore, S. 9312-9316.

SURDILOVIC & BERHARDT 2005

Surdilovic, D.; Berhardt, R.: Novel Interactive Human-Robot-Systems. In: Zitek, P. (Hrsg.): Proceedings of the 16th IFAC World Congress, 2005. 4.-8. Juli 2005, Prag. Elsevier 2005, S. 1314–1320. ISBN: 978-3-902661-75-3.

SURDILOVIC & RADOJICIC 2007

Surdilovic, D.; Radojicic, J.: Robust Control of Interaction with Haptic Interfaces. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 10.-14. April, Rom, Italien. New York: IEEE 2007, S. 3237–3244.

SZYMANSKI ET AL. 2009

Szymanski, H.; Lange, A.; Berens, T.: Die Bilanzierung von Instrumenten zur Gestaltung des demografischen Wandels. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.). Dortmund/Berlin/Dresden: 2009.

TAKATA & HIRANO 2011

Takata, S.; Hirano, T.: Human and robot allocation method for hybrid assembly systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 1, S. 9–12.

TAKUBO ET AL. 2000

Takubo, T.; Arai, H.; Tanie, K.: Virtual nonholonomic constraint for human-robot cooperation in 3-D space. In: Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000). Piscataway: IEEE 2000, S. 300–305.

TÄUBERT & REIF 1997

Täubert, J.; Reif, A.: Leitfaden zur altersgerechten physiologischen Arbeitsgestaltung in der Montage. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme (1997) 14. ISSN: 0947-2495

TEKOUO MOUTCHIHO 2012

Tekouo Moutchiho, W.B (2012): A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection Systems. Forschungsbericht Band 272. Dissertation. Technische Universität München, München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

THIEMERMANN 2005

Thiemermann, S.: Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter. Diss. Universität Stuttgart (2005). Heimsheim: Jost-Jetter 2005. ISBN: 3-936947-50-3. (IPA-IAO Forschung und Praxis 411).

THOMAS ET AL. 2011a

Thomas, C.; Busch, F.; Kühlenkoetter, B.; Deuse, J. (2011a): Process and Human Safety in Human-Robot-Interaction – A Hybrid Assistance System for Welding Applications. In: Intelligent robotics and applications. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 112–121.

THOMAS ET AL. 2011b

Thomas, C.; Busch, F.; Kühlenkötter, B.; Deuse, J. (2011b): Ensuring Human Safety with Realtime Workspace Surveillance in Human-Robot interaction. In: VDI Berichte 2143 (2011), S. 259–262.

TICKEL ET AL. 2002

Tickel, T.; Hannon, D.; Lynch, K.M; Peshkin, M.A; Colgate, J.E: Kinematic constraints for assisted single-arm manipulation. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE 2002, S. 2034–2041.

TSUMUGIWA ET AL. 2002

Tsumugiwa, T.; Yokogawa, R.; Hara, K.: Variable Impedance Control Based on Estimation of Human Arm Stiffness for Human-Robot Cooperative Calligraphic Task. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, D.C., 11.-14. Mai. Piscataway: IEEE 2002, S. 644–650.

ULICH & WÜLSER 2010

Ulich, E.; Wülser, M.: Gesundheitsmanagement in Unternehmen. Arbeitspsychologische Perspektiven. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2010.

VDI 2004

Verein Deutscher Ingenieure (2004): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Design methodology for mechatronic systems : VDI 2206. Berlin: Beuth Verlag GmbH (VDI-Richtlinien, 2206).

VDI 2222

VDI 2222, Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf: Beuth 1997.

VDI 2411

VDI 2411: 1970-06: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Düsseldorf: Beuth 2006.

VDI 2860

VDI 2860: 1990: Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen ; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: Beuth 1990.

VERL ET AL. 2009

Verl, A.; Fritsch, D.; Winkler, B.: Hybride Systeme in der Montage. Volle Wirtschaftlichkeit bei halber Automation. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 9, S. 606–613.

VETTER 2003

Vetter, C.: Einfluss der Altersstruktur auf die krankheitsbedingten Fehlzeiten. In: B. Badura und M. Astor (Hrsg.): Demographischer Wandel. Herausforderung für die betriebliche Personal- und Gesundheitspolitik (Fehlzeiten-Report). Berlin [u.a.]: Springer 2003, S. 249–275.

WAIBEL ET AL. 2011

Waibel, M.; Beetz, M.; Civera, J.; d'Andrea, R.; Elfiring, J.; Galvez-Lopez, D. et al.: RoboEarth - A World Wide Web for Robots. IEEE Robotics & Automation Magazine 18 (2011) 2, S. 69–82.

WALDHERR & ZÜLCH 2010

Waldherr, M.; Zülch, G.: Altersrobuste Planung von gekoppelten Montagelinien. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.): Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. Bericht zum 56. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 24.-26. März 2010 an der Technischen Universität Darmstadt. Dortmund: GfA-Press 2010, S. 819–822.

WALLHOFF ET AL. 2010

Wallhoff, F.; Blume, J.; Bannat, A.; Rösel, W.; Lenz, C.; Knoll, A.: A skill-based approach towards hybrid assembly. Advanced Engineering Informatics 24 (2010) 3, S. 329–339.



WALTER 2009

Walter, C.: Flexible Arbeitsraumüberwachung mit ortsfesten und mobilen Sensoren für die Mensch-Roboter-Koexistenz. im Anwendungsbereich "Produktions-/Robotertechnik" des Forschungsprojekts "ViERforES". In: 12. IFF-Wissenschaftstage 2009. Tagungsband: "LISA" Abschlusspräsentation: Assistenzroboter für Life-Science-Unternehmen. Fachtagung Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion, 17. bis 18. Juni 2009. Magdeburg: Fraunhofer IFF 2009, S. 22.

WALTER 2011

Walter, C.: Neue Technologien für sichere Mensch-Roboter-Interaktion. Überblick aktuelle Entwicklungsaktivitäten am IFF. Vortrag. In: 14. IFF-Wissenschaftstage 2011. Tagungsband: Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben Technischer Systeme. 8. Fachtagung Digitales Engineering und virtuelle Techniken, 28.-30. Juni 2011 in Magdeburg. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2011, S. 49.

WATERS ET AL. 1994

Waters, T.R; Putz-Anderson, V.; Garg, A.: Applications Manual for the revised NIOSH Lifting Equation. U.S. Department of Health and Human Services (Hrsg.). Cincinnati, Ohio: 1994.  
<<http://www.cdc.gov/niosh/docs/94-110/>> - 01.08.2012.

WEGENER 2007

Wegener, K.: Ein flexibles Greifsystem für Roboterassistenten im Haushalt. Diss. Universität Stuttgart (2007). Heimsheim: Jost-Jetter 2007.

WEIßGERBER 2001

Weißgerber, B.: Akzeptanz sicherheitstechnischer Einrichtungen. In: R. Trimpop, B. Zimolong und A. Kalveram (Hrsg.): Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit. Neue Welten - Alte Welten. 11. Workshop 2001. Heidelberg: 2002, S. 173–178. ISBN 978-3-89334-374-4.

WERNER 2008

Werner, J.: Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie. Diss. Technische Universität München (2008). München: Herbert Utz Verlag 2008. (Forschungsberichte iwb, 225).

WHO 2001

World Health Organization: International Classification of Functioning Disability and Health (ICF). Genf: 2001.

### WHO 1946

World Health Organization (Hrsg.): Preamble to the Constitution of the World Health Organization as adopted by the International Health Conference, New York, 19-22 June, 1946; signed on 22 July 1946 by the representatives of 61 States (Official Records of the World Health Organization, no. 2, p. 100) and entered into force on 7 April 1948. New York: 1946.

### WHYSALL ET AL. 2006

Whysall, Z.; Haslam, C.; Haslam, R.: Implementing health and safety interventions in the workplace: An exploratory study. *International Journal of Industrial Ergonomics* 36 (2006), S. 809–818.

### WICHERT ET AL. 2002

Wichert, G. v.; Kimowicz, C.; Neubauer, W.; Wösch, Th; Lawitzky, G.; Caspari, R. et al.: The Robotic Bar – An Integrated Demonstration of Man-Robot Interaction in a Service Scenario. In: *Proceedings 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication ROMAN-02*. Piscataway: IEEE 2002, S. 374-379. ISBN: 0-7803-7545-9.

### WINKLER 2006

Winkler, A.: Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion. Diss. Technische Universität Chemnitz (2006).

### WINTER ET AL. 2009

Winter, G.; Schaub, K.; Bruder, R.; Landau, K.: Entwicklung integrativer Präventionsansätze am Beispiel von Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie. Bericht zum 55. Arbeitswissenschaftlichen Kongress. In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert. 55. Kongreß der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. Dortmund: GfA Press 2009.

### WOHLFAHRT 2005

Wohlfahrt, A.: Reibschlüssige Greifsysteme für die automatische Handhabung im Materialfluss. *Logistics Journal* 2005.

### WOJTARA ET AL. 2009

Wojtara, T.; Uchihara, M.; Murayama, H.; Shimoda, S.; Sakai, S.; Fujimoto, H.; Kimura, H.: Human–robot collaboration in precise positioning of a three-dimensional object. *Automatica* 45 (2009) 2, S. 333–342.

### WU ET AL. 2008

Wu, K.; Meusel, P.; Seitz, N.; Hirzinger, G.; Jin, M.H; Liu, Y.W et al.: Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 22.-26.9.. Piscataway, IEEE 2008, S. 3692–3697.

XU ET AL. 2012

Xu, Z.; Ko, J.; Cochran, D.J; Jung, M.-C: Desing of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers & Industrial Engineering* 62 (2012), S. 431–441.

YAMADA ET AL. 1999

Yamada, Y.; Konosu, H.; Morizino, T.; Umetani, Y.: Proposal of Skill-Assist: A System of Assisting Human Workers by Reflecting Their Skills in Positioning Tasks. In: *IEEE SMC'99 conference proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. October 12-15, 1999, Tokyo, Japan. Piscataway: IEEE 1999, S. IV 11-16.

YANCO & DRURY 2002

Yanco, H.A; Drury, J. (2002): A Taxonomy for Human-Robot Interaction. In: Schultz, A.C. (Hrsg.): *Human-robot interaction. Papers from the 2002 AAAI fall symposium* ; November 15 - 17, North Falmouth, Massachusetts. Menlo Park, Calif: AAAI Press 2002, S. 111–119.

YANCO & DRURY 2004

Yanco, H.A; Drury, J. (2004): Classifying Human-Robot Interaction: An Updated Taxonomy. In: *IEEE (Hrsg.) 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Bd. 3, 2004 S. 2841–2846. ISBN 0-7803-8566-7.

YIGIT 2005

Yigit, S.: *Methoden zur taktil gekoppelten Kooperation zwischen Mensch und anthropomorphen Roboterarm*. Diss. Universität Fridericiana zu Karlsruhe (2005).

ZAEH ET AL. 2009

Zaeh, M. F.; Beetz, M.; Shea, K.; Reinhart, G.; Bender, K.; Lau, C. et al.: *The Cognitive Factory*. In: ElMaraghy H.(Hrsg.): *Springer Series in Advanced Manufacturing*. London: Springer 2009, S. 355–371.

ZAEH & ROESEL 2009

Zaeh, M.; Roesel, W.: Safety Aspects in a Human-Robot Interaction Scenario: A Human Worker Is Co-operating with an Industrial Robot. In: Jong-Hwan et al Kim (Hrsg.): *Progress in robotics. FIRA RoboWorld Congress 2009, Incheon, Korea, August 16-20, 2009, proceedings*. Berlin; New York: Springer 2009, S. 53–62.

ZAEH & VOGL 2006

Zaeh, M.F; Vogl, W.: Interactive Laser-Projection for Programming Industrial Robots. In: *Proceedings of the fifth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2006)*, S. 125–128.

ZÄH & PRASCH 2007

Zäh, M. F.; Prasch, M. G. (2007): Systematic workplace and assembly redesign for aging workforces. *Production Engineering* 1 (2007) 1, S. 57–64.

ZÄH ET AL. 2005a

Zäh, M. F.; Wagner, W.; Guserle, R.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter mit Hilfe von Roboterunterstützung. Menschengerechte Anpassung von Produktionsstrukturen zur Berücksichtigung des demografischen Wandels. *wt Werkstatttechnik online* 95 (2005) 3, S. 97-101.

ZÄH ET AL. 2005b

Zäh, M. F.; Wagner, W.; Prasch, M.: Montagestrukturen für alternde Belegschaften. *wt Werkstatttechnik online* 95 (2005) 9, S. 637–642.

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M. F.; Wiesbeck, M.; Engstler, F.; Friesdorf, F.; Schubö, A.; Stork, S. et al.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage. Adaptive Montageführung mittels zustandsbasierter, umgebungsabhängiger Anweisungsgenerierung. *wt Werkstatttechnik online* 97 (2007) 9, S. 644–649.

ZANGEMEISTER 1976

Zangemeister,.; Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. E. Methodik zur multidimensionalen Bewertung u. Ausw. von Projektalternativen. 4. Aufl. Hamburg. (1976)

ZÜLCH & BECKER 2010

Zülch, G.; Becker, M.: A simulation-supported approach for man-machine configuration in manufacturing. *International Journal of Production Economics* 125 (2010) 1, S. 41–51.

ZÜLCH & WALDHERR 2009

Zülch, G.; Waldherr, M.: Planung von Arbeitssystemen unter Berücksichtigung der Leistungsentwicklung einer alternden Belegschaft. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert. Tagungsband des 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA Press 2009, S. 141-144.

ZÜLCH ET AL. 2009

Zülch, G.; Becker, M.; Linsenmaier, J.: Modeling and simulation of human performance changes in assembly systems due to aging. In: International Ergonomics Association (Hrsg.): Proceedings of the 17th World Congress on Ergonomics IEA2009, Beijing, China, August 9-14, 2009. .

ZÜLCH & BECKER 2008

Zülch, G.; Becker, M. Nachhaltigkeit bei der Planung von Fertigungssystemen: Simulation unter dem Aspekt der Leistungsentwicklung einer Belegschaft. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag 2008, S. 377–386.

ZÜLCH & STOCK 2009

Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.) (2009): Auswirkungen der demographischen Entwicklung in Montagesystemen. Tagungsunterlagen zum Workshop im Rahmen des DFG-Projektes "Auswirkungen einer alternden Belegschaft auf die Leistungsfähigkeit von Fertigungssystemen" am 16.03.2009 in der Universität Karlsruhe (TH), 25.03.2009. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH) 2009.

ZÜLCH ET AL. 1999

Zülch, G.; Kiparski, R. v.; Brinkmeier, B.: Messen, Beurteilen und Gestalten von Arbeitsbedingungen. Handbuch für die betriebliche Praxis zur Umsetzung ergonomischer Erkenntnisse. 2., überarb. Aufl. Heidelberg: Haefner 1999. (Schriftenreihe Ergo-Med, 4).

ZÜLCH ET AL. 2009

Zülch, G.; Waldherr, M.; Schmidt, D.: Altersdifferenzierte Neuplanung von Montagesystemen. In: Zülch, G. & Stock, P. (Hrsg.): Auswirkungen der demographischen Entwicklung in Montagesystemen. Karlsruhe: Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation 2009, S. 103-119. ISBN 978-3-9812620-0-1.

ZWACK & SCHWEITZER 2011

Zwack, J.; Schweitzer, J.: Resilienzfördernde Möglichkeiten der Teamsupervision bei Changeprozessen. Organisationsberatung, Supervision, Coaching 18 (2011), S. 31–37.

DE ZWART ET AL. 1996

Zwart, Bart C. H. de; Frings-Dresen, Monique H. W.; van Dijk, Frank J. H.: Physical workload and the ageing worker: a review of the literature. International Archives of Occupational and Environmental Health 68 (1996) 1, S. 1-12.



## 9 Anhang

### 9.1 Vergleich Montageplanungsverfahren

	Bullinger 1986	Lotter 1992	Konold 2003 (Bosch)
Vorbereitung	<b>1. Projektorganisation</b> - Projektmanagement <b>2. Konzeption</b> - Planungsdaten - Planungsziele - Prinziplösung - Montagekostenkalkulation	<b>1. Anforderungsliste</b> - Mengengerüst - Nutzungsdauer - Nutzungsgrad - Soll-Leistung - Amortisationszeit	<b>1. Aufgabenstellung</b> - Ziele, Verantwortliche, Terminrahmen, Ablauf festlegen - Planungsdaten beschaffen - Situationsanalyse - Aufgabe abgrenzen - verfügbare Hallenfläche vorgeben
Grobplanung	<b>3. Ablaufplanung</b> - Erzeugnisstrukturierung - Montageablaufstruktur - Vorgabezeiten - Arbeitswert - Bestimmung automatisierbarer Teilverrichtungen - Kapazitätsteilung - Bildung, Bewertung, Verbesserung Arbeitsinhalte <b>4. Montagesystementwurf</b> - Technik - Organisation - Prinzipanordnung - Materialbereitstellung - Auswahl Montagesystem - Simulation	<b>2. Produktanalyse</b> - Teileanzahl - Anlieferungszustand - Handhabungseigenschaften - Fügerichtungen - Fügeverfahren - Qualitätsanforderungen <b>3. Montageablaufanalyse</b> - Produktaufbau und Füge-situation - Füge-rangfolge - Werkstückträger-konstruktion <b>4. Funktionsanalyse</b> - Einzelschritte - Zeitbestimmung <b>5. Taktzeitermittlung</b> <b>6. Layoutplanung</b>	<b>2. Grobplanung</b> - Montagesystem-Ausbringung - Arbeitsabläufe und Montagestruktur entwickeln - Montageabschnitte bilden - Montagesystemalternativen entwickeln - notwendige Hallenfläche ermitteln - Personalbedarf planen - Lösungsvarianten bewerten und auswählen - Projektkalkulation und Wirtschaftlichkeitsrechnung
Feinplanung	- Einplanung des Produktprogramms <b>5. Ausarbeitung</b> - Organisatorische und technische Gestaltung manueller Arbeitspl. - Strukturierung Montagefunktionen und technische Gestaltung automatischer Montagesysteme - Bewertung, Überprüfung Vorgaben - Erstellung Montageunterlagen	<b>7. Personalbedarfsbestimmung</b> <b>8. Verfügbarkeitsermittlung</b> - Teilequalität - Stationenzahl und Einzelverfügbarkeit - Anlagenstrukturierung - Anlaufverhalten - Personalqualifizierung <b>9. Pflichtenheft</b> <b>10. Investitionsrechnung</b> <b>11. Bewertung und Auswahl</b> - Platzkostenvergleich	<b>3. Feinplanung</b> - Gesamt- und Teilsystem detaillieren - Terminplan - kritische Prozesse absichern - Personaleinsatz planen - Wirtschaftlichkeitsnachweis prüfen
Umsetzung	<b>6. Realisierung</b> - Betriebsmittelkonstruktion, -bau, und -beschaffung - Analyse Personalanforderung und -eignung - Personalbedarf		<b>4. Realisierung</b> - Beschaffung veranlassen - Arbeitsplätze nach MTM gestalten - Personal schulen - Montagesystem installieren - Dokumentation erstellen - Ausprobe
Betrieb	<b>7. Betrieb</b> - Controlling - Rationalisierung		<b>5. Fertigungsanlauf</b> - Systemanlauf analysieren - Fehler beseitigen - Dokumentation ggf. korrigieren - Abnahme durchführen

Abbildung 49: Varianten typischer Montageplanungsverfahren in der Gegenüberstellung (BULLINGER 1986; LOTTER 1992; KONOLD & REGER 2003)

## 9.2 Beispiele von Arbeitsplatzanpassungen

*Tabelle 33: Beispiele von Möglichkeiten zur Arbeitsplatzanpassungen für Leistungswandlungen*

Bereich	Beispiel
Körperhaltung	Höhen- und Neigungsverstellung von Arbeitsoberfläche, Bereitstellungsbehälter Werkstückpuffer vorsehen (TÄUBERT & REIF 1997)
	Individualisierung von Arbeitsplätzen, Sicherstellung der Nutzung individueller Arbeitsplatzkonfiguration durch automatische Einstellung (REINHART ET AL. 2010c)
	Vermeidung von Überkopfarbeit (ZÄH ET AL. 2005b)
	Belastungs- bzw. Haltungswechsel ermöglichen (Stehen, Sitzen, Gehen, Steh-Sitzen) (TÄUBERT & REIF 1997)
	Einsatz mitfahrender Sitze in der Fließmontage (PRASCH 2010, S.108)
	Ausziehbare Arbeitsflächen, Dreh-Hub-Tische zur Erweiterung des Greif- und Sehraums (SCHMALLENBERG 1994), S. 24, S. 28
	Paternoster, z.B. für Bereitstellungsbehälter in stets optimaler Höhe (SCHMALLENBERG 1994), S. 28
Zeitregime, Leistungsflexibilisierung	Leistungsflexibilisierung, Reduzierung bzw. Entkopplung von der Taktbindung (bzw. vom fremdbestimmten Arbeitstempo und Pausenrhythmus (BUCK 2002) durch Puffer, Parallelarbeitsplätze, flexible Unterstützung durch Springer, Unterstützung durch Mitarbeiter vor-/nachgelagerter Arbeitsplätze, (PRASCH 2010)
	Entkopplung vom Fließbetrieb (Pfoser 2008)
	Integration und Duplikation von Arbeitsvorgängen und Arbeitsstationen (PRASCH 2010, S.112)
	One-Set-Flow zur Ausnutzung von Schöpfgreifen und geringeren Belastung der Gedächtnisleistung, vgl. (PRASCH 2010)
	Vermeidung kurzer Zyklen oder hoher Geschwindigkeiten bei Handhabungsaufgaben (Kawakami et al. 2000)
	Vermeidung von Unterbeanspruchung für nicht Leistungsgewandelte, vgl. (SCHRADER ET AL. 1995 S. 28), z.B. durch Abfrage, ob die jeweilige Maßnahme für alle Mitarbeiter nutzbringend ist (Zäh und Prasch 2007) S.62
	Schaffung von Bereichen einfacherer Arbeit (SCHMAL ET AL. 2001)



Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten	Vermeiden von Übernahmegriffe von einer Hand in die andere, Hindernisse in der Bewegungsbahn, geradlinigen Bewegungsbahnen, statischer Haltearbeit durch Einsatz von Hilfsvorrichtungen (TÄUBERT & REIF 1997)
	Vermeidung von Handhabungsoperationen durch Anpassung der Bereitstellung, z.B. unter Nutzung von Schwerkraft (REINHART ET AL. 2010b)
	Gewährleisten der Zugänglichkeit an Greif- und Fügstellen, rutschfreie Oberflächen, fördern von Beidhandarbeit, ortskonstante Ausrüstungs-Lagerung (TÄUBERT & REIF 1997)
	Bereitstellen gewichtsloser Aufhängungen für schwere Handwerkzeuge, Anschläge zur Reduzierung des Fügeaufwands, höhenverstellbare Werkstückspeicher (TÄUBERT & REIF 1997)
	Einsatz von Hebegeräte für schwere Lasten (PRASCH 2010; TÄUBERT & REIF 1997), Greifhilfen und Vakuum-pinzetten für kleine Teile (TÄUBERT & REIF 1997), Hebezeuge, Kipphilfen, Manipulatoren (SCHMALLENBERG 1994)
	Berücksichtigung von Alter, Geschlecht und Training des Mitarbeiters sowie Richtung und Art der Kraftwirkung für die Bewertung von Kräften, (TÄUBERT & REIF 1997; SCHMIDTKE & BERNOTAT 1993) siehe auch: montagespezifischer Kraftatlas (BERG ET AL. 2008).
	Vorsehen von definierten Aufnahmemöglichkeiten für eine einfache Integration oder für ein Nachrüsten von Handhabungshilfen (ZÄH ET AL. 2005b)
Sensomotorik, Bedienschnittstellen	Für Anzeigeelemente: Reduzierung der Anzahl, Anordnung in einer Ebene; einheitliche, logische, bildhafte Darstellung; reflexionsfreie Oberflächen; Einsatz von Vorsignalen wenn schnelle Reaktionen erforderlich (TÄUBERT & REIF 1997; BIERMANN & WEIßMANTEL 1995)
	Vergrößern von Schrift, Steigerung von Kontrast (BIERMANN & WEIßMANTEL 1995)
	Vermeidung von Drucktastern, insbesondere wenn ohne klar erkennbar abfallende Kraftkennlinie am Druckpunkt vgl. (BIERMANN & WEIßMANTEL 1995)
	Anpassungen von Tastaturen (SCHMALLENBERG 1994)
	Adaptive bzw. interaktive Informationsbereitstellung am Arbeitsplatz, z.B. für Arbeitsanweisungen (ZÄH ET AL. 2007)
Umgebung	Steigern der Beleuchtung (TÄUBERT & REIF 1997)
	Lärm, Hitze, Kälte, als allgemeine Stressoren, reduzieren (SCHRADER ET AL. 1995, S.28)

### 9.3 Funktionen der Montage und Handhabung

Montage				
Fügen (DIN 8593)	Handhaben (VDI 2860)	Kontrollieren (VDI 2860)	Justieren (DIN 8580)	Sonder- operationen
Zusammensetzen	Speichern	Prüfen	Justieren durch	Markieren
Füllen	geordnet	Anwesenheit	Einformieren	Erwärmen
An-/Einpressen	teilgeordnet	Identität	Umformen	Kühlen
Kleben	ungeordnet	Form	Trennen	Reinigen
textil	Mengen verändern	Farbe	Fügen	Entgraten
Fügen durch	Teilen	Gewicht	Einstellen	Bedrucken
Umformen	Vereinigen	Position	Nachbehandeln	Abziehen
Schweißen	Abteilen	Orientierung		Auspacken
Löten	Zuteilen	Zählen		Ölen
	Zusammenführen	Messen		Einsprühen
	Sortieren	Orientierung		Abdichten
	Bewegen	Position		
	Schwenken			
	Orientieren			
	Positionieren			
	Ordnen			
	Führen			
	Weitergeben			
	Fördern			
	Sichern			
	Halten			
	Lösen			
	Spannen			
	Entspannen			

Abbildung 50: Funktionen der Montage und Teilfunktionen der Handhabung, nach LOTTER & WIENDAHL (2006,S.2) und VDI 2860

## 9.4 Regelungen für Robotereinsatz in Personennähe

*Tabelle 34: Relevante Regelungen für den Robotereinsatz in Personennähe*

Allgemeine Gesetze und Regelungen	
Richtlinie 2006/42/EG	Maschinenrichtlinie
Gesetz (ProdSG)	Produktsicherheitsgesetz
Gesetz (ArbSchG)	Arbeitsschutzgesetz
Verordnung (ArbStättV)	Arbeitsstättenverordnung, §3 Gefährdungsbeurteilung nach §5 Arbeitsschutzgesetz; §3a Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten; §4 Abs. 3 Sicherheitseinrichtungen
Verordnung (BetrSichV)	Betriebssicherheitsverordnung
Verordnung (LasthandhabV)	Lastenhandhabungsverordnung; §2 Maßnahmen
Normen: Sicherheit von Maschinen	
DIN EN 349:2008-09	Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen
DIN EN 953:2009-07	Trennende Schutzeinrichtungen - Allgemeine Anforderungen an Gestaltung und Bau von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen
DIN EN 1005:2009	Menschliche körperliche Leistung (Begriffe, Manuelle Handhabung von Gegenständen in Verbindung mit Maschinen und Maschinenteilen, empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung, Bewertung von Körperhaltungen und Bewegungen bei der Arbeit an Maschinen)
DIN EN 1037:2008-11	Vermeidung von unerwartetem Anlauf
DIN EN 1760:2009	Druckempfindliche Schutzeinrichtungen (Schalmmatten, -platten, -leisten, -stangen, -puffer, -flächen, -leinen)
DIN EN 1088:2008-10	Verriegelungseinrichtungen in Verbindung mit trennenden Schutzeinrichtungen – Leitsätze für Gestaltung und Auswahl

DIN EN 61496:2004+A1:2007 +Corrigendum:2008	Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen
DIN EN ISO 12100:2011-03	Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung (integriert die ISO 14121-1:2007, risk assessment)
DIN EN ISO 13849-1:2008-12	Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze
DIN EN ISO 13849-2:2010-06	Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung
ISO 13851:2002-03	Zweihandschaltungen – Funktionelle Aspekte und Gestaltungsleitsätze
DIN EN ISO 13855:2010-10	Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen
DIN EN ISO 13857:2008-06	Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen
DIN EN 13861:2012-01	Leitfaden für die Anwendung von Ergonomie-Normen bei der Gestaltung von Maschinen
BS DD CLC/TS 61496-2:2008-09 61496-3:2009-04	Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (Vornorm)
Normen: Industrieroboter	
DIN EN ISO 8373:1996-08	Wörterbuch
EN ISO 9283:1998	Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethoden
DIN EN ISO 10218-1:2012-01	Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter
DIN EN ISO 10218-2:2012-06	Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration
ISO / TS 15066	Robots and Robotic Devices – Collaborative industrial robots; soll die ISO 10218 mit biomechanische Grenzwerte erweitern; in Bearbeitung

Normen: Sonstige	
DIN EN 1525:1997-12 (DIN EN ISO 3691-4:2006-05)	Sicherheit von Flurförderfahrzeugen – Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme
DIN EN 1526:2009-07	Sicherheit von Flurförderfahrzeugen – Zusätzliche Anforderungen für automatische Funktionen von Flurförderzeugen
DIN EN ISO 3691-5:2009	Sicherheit von Flurförderfahrzeugen – Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung – Teil 5: Mitgängerbetriebene Fahrzeuge
DIN EN 14238:2010-02	Krane – Handgeführte Manipulatoren
Empfehlungen	
BG/BGIA U 001/2009 (2011-02)	BG/BGIA Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie – Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern

## 9.5 Ansätze betrieblicher Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen mit Roboterunterstützung

Tabelle 35: Ansätze betrieblicher Maßnahmen zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen mit Roboterunterstützung

#	Maßnahmeneinordnung und –beschreibung	Bewertung				
		Nutzenhäufigkeit	Nutzenhöhe	Einführungskosten	Betriebskosten	Potenzialkennziffer
I	<b>Robotergestützte Prävention</b>					
a	<b>Gesundheitsförderung, Information, Aufklärung</b>					
1	Beratung zur Arbeitsausführung	1	1	3	4	0,15
	Menschliche Ansprechpartner und Berater werden am Ort der Arbeitsausführung durch mobile Roboter mit Telepräsenzausstattung verfügbar oder durch autonome Agentensysteme ersetzt. Beispiel: Die Beobachtung einer ungünstigen Körperhaltung löst eine Präsentation von Hinweisen zum richtigen Heben aus.					
2	Beratung zur Bedienung	2	1	2	2	0,25
	Der Assistenzroboter bietet Anleitung und Hinweise zur richtigen, gesunden Benutzung seiner Funktionen und gibt bei falscher und gefährdender Ausführung Feedback.					
3	Training	1	2	3	4	0,29
	Ein Roboter dient als Hilfsmittel zur Durchführung von Ausgleichsübungen. Dies kann mit Robotern am Arbeitsplatz realisiert werden oder auch mit dedizierten Servicesystemen im Pausenbereich der Mitarbeiter.					
b	<b>Erfassung, Begrenzung, Mischung von Belastung</b>					
1	Belastungs- und Beanspruchungsmessung	1	1	2	2	0,25
	Bei der Mensch-Roboter-Kooperation können Daten zur Körperhaltung, Kraftausübung, Verhalten oder auch Biosignale erfasst werden. Dadurch sind dann aktuelle Belastung, Belastungsprofile oder –historien darstellbar. Eine Bewertung z.B. der Müdigkeit kann geeignet sein, um weitere Maßnahmen zur Unfallverhütung zu unterstützen. Überbeanspruchung können angezeigt werden um Mitarbeiter zu Verhaltensanpassungen zu bewegen.					

2	Belastungsmischung	2	2	2	3	0,67
	Zur Belastungsmischung kann eine Assistenzfunktion zum einen mit wechselnden Parametern oder Ausführungsvarianten (z.B. unterschiedliche Arbeitshöhen) realisiert werden. Zum anderen ist ein Wechsel zwischen unterschiedlichen Assistenzfunktionen bzw. -aufgaben realisierbar, was jedoch eine entsprechend Anzahl an assistierbaren oder zeitweise automatisierbaren Teilaufgaben am Arbeitsplatz voraussetzt.					
3	Begrenzung, Reduktion	3	4	2	2!	1,75!
	Durch gemeinsame Arbeitsausführung, robotergestützte Hilfsmittel, Automation am Arbeitsplatz ist eine Reduktion von Belastungen insbesondere in der Handhabung erzielbar. Ungünstige Umweltbedingungen lassen sich mit telepräsenten und ferngesteuerten Systemen negieren.					
c	Qualifikation, Laufbahnplanung					
1	Weiterqualifikation	1	2	2	2!	0,5!
	Durch Unterweisungen zur Bedienung, Schulungen zum Programmieren, Einrichten oder Warten von Roboter- und Roboterassistenzsystemen sind eine Qualifikationssteigerung und ein Wandel der Arbeitsinhalte für den jeweiligen Mitarbeiter erreichbar.					
d	Prävention in der Arbeitsplatzgestaltung					
1	Arbeitsplatz-Individualisierung	2	2	2	3!	0,8!
	Hierfür passt das Assistenzsystem vor Beginn der Arbeitsaufgabe im Rahmen der Arbeitsvorbereitung den Arbeitsplatz, sich selbst oder seine Funktionen an die späteren Benutzer und Arbeitsinhalte an. Anpassungsbeispiele sind Arbeitshöhe, Anordnung der Teilebereitstellung, Einstellung bevorzugter Arbeitsabläufe, Auswahl und Parametrierung der Bedien- oder Assistenzfunktion.					
e	Produkt- und Prozessänderungen					
1	Einsatzhemmnisse abbauen	3	2	1	3	1,5
	Dieser Ansatz zielt auf den Abbau von technischen und wirtschaftlichen Hemmnissen eines Robotereinsatzes durch Anpassungen von Produkt- oder Prozess, insbesondere in Richtung Automationsgerechtigkeit. Dies kann sowohl zur Prävention oder Integration von Leistungswandelten in der Planungsphase dienen, wie auch ein späteres Nach- oder Umrüsten zur Integration Leistungswandelter während des Betriebs erleichtern.					

II	<b>Roboterassistierte Integration</b>					
a	<b>Profilvergleich</b>					
1	Profilierter Roboterassistent Durch Beschreibung der Roboterfähigkeiten und -fertigkeiten analog der Profilvergleichsverfahren ist eine erleichterte Zuordnung von Roboterassistent oder dessen Konfiguration zu Arbeits- oder Mitarbeiteranforderungen bzw. Leistungswandlungen möglich. Die fördert die Einsatzfähigkeit des Roboterassistenten.	3	2	2	2	1,5
2	Autonome Assistenz Kennt der Roboter seine eigenen Fähigkeiten kann dieser im Abgleich mit den Arbeitsanforderungen oder den Mitarbeiterfähigkeiten gezielt selbständig Assistenz anbieten oder Assistenzfunktionen ausführen.	2	3	3	4	0,85
b	<b>Prospektive, kompensative und alter(n)sgerechte Planung</b>					
1	Planungsunterstützung In Referenz auf das reduzierte Planungsvorgehen nach Abbildung 5 kann die Montageplanung bzgl. Roboterassistenz auf folgende Arten unterstützt werden: Eingrenzung geeigneter Zeitpunkte für eine Maßnahmenberücksichtigung, Vorgehensbeschreibung für Auswahl, Layout, Gestaltung sowie Feedback zur Verbesserung der Maßnahmenkataloge oder Vorgehensweisen. Die Berücksichtigung in der Planungsphase begünstigt einen späteren Einsatz des Roboterassistenzsystems.	3	2	2	2	1,5
c	<b>Job-Enlargement, -Enrichment, -Rotation</b>					
1	Job-Enlargement Die gezielte, koexistente Automation von Teilaufgaben kann zur Homogenisierung des Aufgabenspektrums eines Mitarbeiters genutzt werden. Stark belastende oder einsatzeinschränkende Teilaufgaben werden gezielt eliminiert. Die durch Automation erzielten Zeitgewinne und Belastungsreduktionen ermöglichen den Anteil gleichartiger Arbeits(teil)aufgaben für den Menschen zu steigern.	2	3	1	2!	2!
2	Job-Enrichment Die Arbeitsinhalte werden durch zusätzliche Qualifikationsanforderungen und Aufgaben im Zuge eines Roboter-/Roboterassistenteneinsatzes erweiterbar. Hierzu zählen beispielsweise Bedienung, Einrichten, Wartung oder auch Einsatzplanung und Systembereitstellung.	1	2	1	1	1
3	Job-Rotation 1 Roboterassistenzsysteme können eine personalisierte Unterstützung darstellen und mit dem assistierten Mitarbeiter zu unterschiedlichen Arbeitsplätzen rotieren. Die Eignung dazu steigt mit Zunahme der Reichweite bzw. Mobilität des Assistenzsystems.	1	3	3	4	0,43



4	Job-Rotation 2	2	3	2!	2!	1,5!
	Der Roboter kann an einem Arbeitsplatz (ortsfest, gebunden oder als handhabbares Werkzeug) verbleiben und den rotierenden Mitarbeitern in gleicher Art oder individualisiert Assistenz bereitstellen.					
5	Job-Rotation 3	1	3	3	3	0,5
	Mobile Systeme, einschließlich der handhabbaren, können bedarfsgerecht zur jeweiligen Kombination von Mitarbeiter, Arbeitsplatz/Arbeitsinhalt, Rotationszyklus verbracht werden und dort assistieren.					
6	Job-Rotation 4	1	2	3	4	0,29
	Ortsfeste und gebundene Assistenzsysteme mit genügend Reichweite sowie ortsflexible und selbstfahrende Varianten können durch zeitweise Automation der Arbeitsinhalte eine Stelle in der Mitarbeiterrotation einnehmen. Damit kann eine Mitarbeiterrotation ermöglicht oder erweitert werden sowie mit dem Roboter als Springer robuster gegenüber Schwankungen in der Produktion gestaltet werden.					
d	Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung					
1	Roboterassistenz als Mittel ergonomischer Arbeitsplatzgestaltung	2	3	-	-	-
	Die zielgerichtete robotergestützte Automation oder Assistenz in Teilaufgaben kann zur Belastungsreduktion, Erreichung der Arbeitsausführbarkeit, Minderung von Unfallrisiken und Leistungs- bzw. Effizienzsteigerung am Einsatzort beitragen. Dies wird weiter in den Ansätzen II-d-2 bis II-d-4 detailliert.					
2	Roboterassistiertes Herstellen ergonomischer Arbeitsplatzbedingungen	2	2	2	3!	0,8!
	Analog ‚Arbeitsplatz-Individualisierung‘ (I-d-1)					
3	Einhalten ergonomischer Arbeitsbedingungen durch Roboterassistenz	2	3!	2	2!	1,5!
	Die Unterstützung des Robotersystems kann typische Merkmale bzw. Kriterien der Arbeitsplatzgestaltung ansprechen. Beispiele sind das Anreichen von Bauteilen in idealer Arbeitshöhe zur Verbesserung der Körperhaltung, die Verkürzung von Greifwegen und -zeiten durch Aushändigen von Bauteilen oder Werkzeugen, die Reduzierung auszuübender Handhabungs- oder Fügekräfte durch Automation oder kollaboratives Führen des Teilprozesses.					

4	Einhaltung ergonomischer Arbeitsbedingungen bei der Roboter-Bedienung	2	2	1	2	1,33
	Durch die Programmierbarkeit der Mensch-Maschine-Schnittstellen und Assistenzfunktionen ist Robotern eine höhere Gestaltungsfreiheit zu Eigen als z.B. rein mechanischen, passiven Hilfsmitteln. Dadurch kann in gesteigertem Maß Rücksicht auf den Bediener genommen und eine Verbesserung der Arbeits- bzw. Ausführungsbedingungen erzielt werden.					
e	Alternsgerechte Arbeitsgestaltung					
1	Körperhaltung: Höhe-, Neigungsverstellung	2	3	1	4	1,2
	Durch robotergestütztes Anreichen oder Aushändigen von Objekten (Bauteilen, Werkzeugen oder Bedienschnittstellen) in geeigneter Arbeitshöhe und Neigung ist eine für den Menschen weniger belastende Körperhaltung erreichbar. Zu diesem Punkt kann ferner der Ansatz ‚Arbeitsplatz-Individualisierung‘ gezählt werden, der anderer Stelle bewertet wird, siehe (I-d-1).					
2	Körperhaltung: Körperstützen, Auflagen	2	2	2	3	0,8
	Tragende Robotersysteme (z.B. Exoskelette) können körperstützende Funktionen erfüllen. Ferner sind Bedienelemente oder der Roboter selbst als Auflage oder Stütze verwendbar.					
3	Körperhaltung: Überkopfarbeit	2	4	2	4	1,33
	Zur Eliminierung von Überkopfarbeit sind Automation oder telepräsenste Arbeit nutzbar. In der Verwendung als Hebebühne hebt der Roboter den Menschen zum Arbeitsort. Als Haltevorrichtung senkt der Roboter den Arbeitsort bzw. das zu bearbeitende Objekt zum Menschen herab.					
4	Körperhaltung: Haltungswechsel, Steh-Sitz-Arbeitsplätze	2	3	2	3	1,2
	Das kooperierenden Handhaben (Führen, Anreichen, Aushändigen,...) kann bei geeigneter Positionierung, Mobilität bzw. Reichweite des Robotersystems sowohl im Stehen wie auch im Sitzen durchgeführt werden. Die Nutzung tragbarer, handhabbarer und telepräsenster Systeme ist weitgehend haltungsunabhängig, was Haltungswechsel erlaubt.					
5	Körperhaltung: Aufrichthilfen	1	2	1	2	0,67
	Neben tragenden bzw. körperstützenden Systeme können Roboter mit entsprechender Traglast den Menschen ziehen bzw. ein Widerlager zum Festhalten bieten um beim Aufstehen zu helfen.					
6	Zeitregime: Entkopplung von Taktbindung 1	1	3	1	2	1
	Durch Automation von Teilaufgaben kann dem Mitarbeiter mehr Zeit zur Erfüllung der übrigen Aufgaben eingeräumt werden.					

7	Zeitregime: Entkopplung von Taktbindung 2	1	2	3	4	0,29
	Zusätzliche Pausen oder Verteilzeiten können in taktgebundenen Systemen durch einen roboterbasierten Springereinsatz realisiert werden. Dazu führt der Roboter die Gesamtaufgabe oder hinreichend viele Teilaufgaben ggf. mit einem Puffer aus.					
8	Zeitregime: Vermeidung kurzer Zyklen oder hoher Geschwindigkeiten bei der Handhabung	1	3	2	3	0,6
	Hierzu kann bei einer kollaborativen Aufgabenausführung per ‚shared control‘ das Robotersystem grobe, langsame, kleine Eingaben des Bedieners in präzise, schnelle, große Bewegungen umsetzen. Ferner lässt die Automation von Teilaufgaben dem Assistenten mehr Zeit zur langsameren Ausführung der übrigen Tätigkeiten und erlaubt so längere Zyklen oder langsamere Bewegungen.					
9	Flexibilisierung der Leistungserbringung: Duplikation von Arbeitsstationen und Arbeitsvorgängen	1	3	3	2!	0,6!
	Hierzu kopiert das Robotersystem die Arbeitsschritte eines Menschen an einer anderen Arbeitsstation. Der Roboter wird dabei z.B. durch ‚Programmieren durch Vormachen‘ vom Mitarbeiter instruiert. Eine andere Einsatzvariante besteht darin, dem Roboter gleichartige Teilaufgaben an allen duplizierten Stationen zu übertragen.					
10	Flexibilisierung der Leistungserbringung: One-Set-Flow	1	3	3	2!	0,6!
	Siehe Duplikation von Arbeitsvorgängen (II-e-9)					
11	Flexibilisierung der Leistungserbringung: Schaffung von Bereichen einfacherer Arbeit	2	4	1	3	2
	Der Einsatz eines Assistenzroboters an einem Arbeitsplatz oder in einem Arbeitsbereich kann dortige Tätigkeiten vereinfachen: Zum einen können stark belastende Aufgaben durch Delegation an automatische Robotersysteme ausgegliedert werden. Zum anderen können kooperierende und kollaborative Assistenzfunktionen integriert werden. Die Definition bzw. Begrenzung des Bereiches einfacherer Arbeit begründet sich z.B. in der Immobilität des Robotersystems oder in erforderlichen Anpassungen der assistierten Arbeitsplätze.					
12	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Vermeidung statischer Haltearbeit, Bereitstellung gewichtsloser Aufhängung, Hebegeräte, Hebezeuge, Manipulatoren	2	4	1	3	2
	Objekte können vom Roboter automatisch oder gemeinsam mit dem Menschen manipuliert werden, was Haltearbeit reduziert oder eliminiert.					

13	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Gewährung der Zugänglichkeit an Greif- und Fügestellen	1	3	3	4	0,43
	Das Robotersystem kann entweder den Menschen oder das zu bearbeitende Objekte günstiger positionieren, das Objekt bzw. die Umgebung verändern um Hindernisse für den Menschen auszuräumen oder den Handhabungs- oder Bearbeitungsvorgang selber ausführen. Letztere kann automatisch oder vom Menschen telepräsent oder direkt geführt realisiert werden.					
14	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Anschläge zur Reduzierung des Fügeaufwands	1	3	2	2	0,75
	Beim Führen des Roboters durch einen menschlichen Bediener können derartige Anschläge z.B. durch virtuelle Wände dargestellt werden.					
15	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Positionierhilfe	1	3	2	2	0,75
	Bei gemeinsamer Arbeitsausführung ist durch shared control eine leichtere oder präzisere Positionierung möglich.					
16	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Greifhilfen 1	2	3	2	3	1,2
	Präzises Greifen, z.B. im Mikro-/Nanobereich, ist durch Automation, telepräsente Systeme oder Systeme mit shared control darstellbar. Übernimmt der Roboter das eigentliche Greifen entfallen für den Bediener das Aufbringen von Greifkraft und sensomotorische Anforderungen.					
17	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Greifhilfen 2	2	4	1	3	2
	Durch Roboterunterstützung können Objekte mit Eigenschaften gehandhabt werden, die eine manuelle Handhabung sonst ausschließen könnten, wie z.B. Gefahrstoffe, scharfkantige Oberflächen oder empfindliche Strukturen.					
18	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Reichweitenvergrößerung	1	3	2	4	0,5
	Roboter können durch Positionierung, Mobilität oder Arbeitsraumgröße der Kinematik vom Menschen weiter entfernte Handlungen durchführen. So können Menschen mit z.B. durch Sitzen oder reduzierte Beweglichkeit eingeschränkter Reichweite Bauteile angereicht oder ausgehändigt werden.					

19	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Kipphilfen	1	3	1	3	0,75
	Das Robotersystem kann das Kippen zum einen selbst ausführen, etwa wenn es das zu kippende Objekt bereits hält. Zum anderen kann es die vom Bediener ausgeübte Kraft verstärken und ein Kippen so erleichtern.					
20	Ausüben von Kräften, Manipulation von Lasten: Berücksichtigung der Krafrichtung	1	3	2	2	0,75
	Kräfte, die ein Bediener auf Eingabegeräte des Roboters ausübt können vektoriell ausgewertet werden. Mit Kenntnis von Standort und Pose des Bedieners sind Verstärkungsfaktoren bzw. Funktionen richtungsspezifisch einstellbar.					
21	Sensomotorik: Bedienschnittstellen	1	2	2	4	0,33
	Um eine Sichtverbesserung herbeizuführen können am Roboter befestigte Projektions- oder Anzeigeelemente bedarfsgerecht in das Sichtfeld bewegt oder daraus entfernt werden. Siehe ferner ‚Bedienung des Assistenzsystems‘ (II-d-4).					
22	Umgebungsbedingungen	1	4	1	3	1
	Durch Einsatz von Automation, Fernsteuerung und telepräsenste Robotersysteme ist eine Exposition von Gefahrenquellen oder ungünstigen Umwelteinflüssen wie Lärm oder Hitze durch Distanz eliminierbar. Bei direkter Bedienung des Roboters ist die Distanz des Menschen von der Gefahrenquelle durch die Reichweite der Roboterkinematik begrenzt und keine oder nur eine teilweise Expositionsreduktion möglich.					
f	Fallspezifische Anpassung					
1	Nachrüsten von Roboterassistenz	1	4	2!	4	0,67!
	Zur fallspezifischen Anpassung kann das gezielte Nachrüsten von Roboterassistenz an bestehende Arbeitsplätze zur Kompensation spezifischer Leistungswandlungen gezählt werden. Als Beispiele können Maßnahmen der robotergestützten ergonomischen oder alternsgerechten Arbeitsgestaltung herangezogen werden. Dabei ist durch das Nachrüsten wie auch durch die Einzelfallbehandlung mit einer Kostenzunahme zu rechnen.					
2	Adaption durch Modularität	1	3	3	4	0,43
	Hochgradig modulare Robotersysteme erlauben den Mitarbeitern aus einer Art Baukastensystem selbstständig Verbesserungen bzw. Assistenzfunktionen am Arbeitsplatz zu integrieren.					

g	Mechanisierung, Hilfsmiteileinsatz					
1	Roboter als Hilfsmittel	3	3!	2!	3!	1,8!
	Roboterassistenzsysteme können zahlreiche mechanische Hilfsmittel ersetzen, z.B. Hebehilfen, Einpress- oder Messvorrichtungen. Eine wesentliche Charakteristik dieser Klasse von (robotergestützten) Hilfsmitteln ist deren Passivität, d.h. der Mitarbeiter nimmt eine auslösende oder bedienende Rolle bei der gemeinsamen Arbeitsausführung ein.					
h	Automatisierung					
1	Automatisierung am Arbeitsplatz	2	3!	1	2!	2!
	Durch Automatisierung können stark belastende Arbeits(teil)inhalte ausgegliedert werden. Technologien zur Koexistenz erlauben zudem ein Integrieren des Roboters am Arbeitsplatz. Diese Integration am Arbeitsplatz ermöglicht eine höhere Flexibilität bzgl. Art und Dauer des Assistenzeinsatzes.					
III	Robotergestützte Wiedereingliederung					
a	Arbeitsplatzanpassung					
1	Arbeitsplatzanpassung für einen Robotereinsatz	1	4	2!	4	0,67!
	Siehe „Fallspezifische Anpassung“ (II-f)					
b	Arbeitsaufteilung, Arbeitsgruppe					
1	Kollege Roboter	1	3	3	4	0,43
	Hinreichend autonome und kognitive Robotersysteme lassen sich in eine Arbeitsgruppe wie ein weiterer Kollege integrieren. Die Gruppenmitglieder können dann dem Roboter die stark belastenden Aufgaben übertragen oder Assistenz anfordern, z.B. für eine kollaborative Handhabung schwerer oder großer Objekte.					
2	Assistenz-Allokation	1	3	3	4	0,43
	Ist das Roboterassistenzsystem nicht an einzelne Stationen, Aufgaben oder Konfigurationen gebunden kann die Arbeitsgruppe über den Einsatz entscheiden.					
c	Reduktion Taktzeit, Zielvorgaben; Schonarbeitsplatz					
1		-	-	-	-	-
	Siehe „Flexibilisierung der Leistungserbringung“					

d	Reduktion Taktzeit, Zielvorgaben; Schonarbeitsplatz					
1	Teilzeit-Automation	1	1	2	2	0,25
	Durch z.B. Pausen oder arbeitsfreie Schichten sind Arbeitsstationen nicht immer besetzt. Durch zeitweise Automatisierung der Arbeitsinhalte einer Arbeitsstation ist in solchen Phasen eine produktive Überbrückung möglich. Ferner kann ein solcher Einsatz auch dazu verwendet werden, den Mitarbeitern mehr Pausen zu ermöglichen.					
e	Rehabilitation					
1	Diagnose- und Therapiegerät	1	2	3	4	0,29
	Roboter können z.B. auf Gelenke und Gliedmaßen definierte Bewegungen und Kräfte aufprägen oder Bewegungsfreiheit und Kraft messen. Dies kann Diagnostik oder Therapie unterstützen. Wie beim ‚Training‘ (I-a-3) ist die Durchführung auch im Unternehmen vorstellbar.					
2	Orthese, Prothese	1	4	3	4	0,57
	Tragbare Robotersysteme können z.B. als Orthesen oder Prothesen Leistungswandlungen kompensieren und dem Mitarbeiter damit einen Arbeitseinsatz vor vollständiger Rekonvaleszenz bzw. Rehabilitation ermöglichen.					
f	Schaffung neuer Arbeitsplätze					
1	Einrichtung assistierter Arbeitsplätze	1	4	2	2	1,00
	Bei der Einrichtung neuer Tätigkeiten für die jeweiligen Mitarbeiter kann eine Assistenz durch Roboter integriert werden. Im Vergleich zu bestehenden Arbeitsinhalten besteht dabei eine größere Gestaltungsfreiheit um vorteilhafte Lösungen zu generieren.					
2	Einrichtung dedizierter Programmier- oder Servicetätigkeiten	1	4	2	2	1,00
	Der Mitarbeiter kann Planung, Inbetriebnahme, Programmierung, Wartung, etc. von Roboter- oder Roboterassistenzsystemen übernehmen. Im Vergleich zum ‚Job-Enrichment‘ oder zur Weiterqualifikation ist hier auch eine vollständige Abkehr von der bisherigen Tätigkeit des Mitarbeiters inbegriffen.					
g	Kündigung, Verrentung					
1	Mitarbeiter als Berater	1	1	-	1	-
	Nach Ende des regulären Arbeitsverhältnisses können erfahrene Mitarbeiter dem Unternehmen weiter als Berater zur Verfügung stellen. Sie können andere in die Bedienung, Konfiguration, Wartung etc. der Roboterassistenzsysteme einweisen und Hinweise zur Auslegung oder Beschaffung geben.					

2	Heimarbeit	1	1	3	4	0,14
	Durch telepräsenste Robotersysteme können ehemalige Mitarbeiter z.B. von zu Hause aus einen direkten Beitrag leisten und z.B. Programme einrichten oder Tätigkeiten ausführen und überwachen.					
h	Qualifikation					
1	Qualifikation	1	2	1	1	1
	Siehe „Job-Enrichment“ (II-c-2)					

## 9.6 Diskussion der Ausführungsarten kooperativer Handhabung

*Tabelle 36: Diskussion der Ausführungsarten kooperativen Handhabung bezüglich der Unterstützung von Leistungswandlungsklassen*

A	Unterstützung beim Aufnehmen, Greifen
1	Führen am Objekt
a	Diese Kooperationsart ist für den Handhabungsprozess nicht zutreffend.
2	Führen am Roboter
a	Unterstützung der Kraft: Führt der Mitarbeiter den Roboter zum Objekt um es dort vom Roboter greifen zu lassen ist eine Entlastung von den Greif- und Haltekräften sowie ggf. beim Heben gegeben – hinreichend kleine Führkräfte oder große Objektgewichte vorausgesetzt.
b	Unterstützung der Körperhaltung: Durch Nutzung von ergonomischen Eingabegeräten ist eine Verbesserung der Handstellung bedingt möglich. Eine Verbesserung der restlichen Körperhaltung oder Gelenkstellung beim Führen des Roboters in Flansch- oder Effekternähe ist ohne weitere Maßnahmen (wie eine Umpositionierung der Bereitstellungsbehälter) nicht zu erreichen. Die Zugänglichkeit wird tendenziell abnehmen, da das Robotersystem zusätzlichen Raum beansprucht und der Mitarbeiter zur Bedienung in der Nähe sein muss. Eine Haltungsverbesserung wie auch eine Erleichterung der Zugänglichkeit wären möglich, wenn die Eingabe an anderer Stelle am Roboter erfolgen kann, bspw. wenn ein Objekt in Bodennähe gegriffen werden soll und ein Joystick in Hüfthöhe am Roboter befestigt ist. Durch die dann folgende Distanz von Eingabegerät und Greifpunkt kann eine Verschlechterung der Sichtverhältnisse auftreten, die Zwangshaltungen (Nacken, Rumpf) des Bedieners verursachen können. Dem kann mit zusätzlichen Anzeigen oder sensorgestützten Funktionen (shared visual control, shared control) begegnet werden.



c	Unterstützung der Sensomotorik: Kleine oder eng beieinander stehende Objekte können durch angepasste Effektoren gegriffen werden und so Anforderungen an Fingerkräfte und Fingerfertigkeit reduzieren. Die Präzision der kollaborativen Bewegung kann durch sensorgestütztes shared control oder adaptives Regelverhalten unterstützt werden.
d	Unterstützung bzgl. Zeitregime und Leistungsflexibilisierung: Wegstrecke und Häufigkeit der Handhabung bleiben durch die Roboterassistenz weitgehend unbeeinflusst. Die Dauer des kollaborierenden Greifvorgangs wird durch die erzielbare Führgeschwindigkeit, das Ansprechverhalten des Robotersystems und die Qualität des Feedbacks für den Bediener beeinflusst. Die Dauer dürfte im Allgemeinen zunehmen. Eine Beschleunigung würde durch zusätzliche Roboterfunktionen wie virtuelle Wände oder virtuelle Federn ermöglicht. Diese setzen voraus, dass entweder das zu greifende Objekt in einer bekannten Pose bereitgestellt wird oder dass zusätzliche Sensoren zur Objekt- oder Merkmallokalisation integriert werden. Sicherheitsbedingt müssen kollisionsvermeidende Robotersysteme wegen der Nähe zu den zu greifenden Objekten, der Bereitstellungsbehälter und des Menschen die Bewegungsgeschwindigkeit reduzieren. Inhärent sichere bzw. schadensbegrenzende Robotersysteme auf der anderen Seite ließen sich ggf. schneller führen, weisen aber eine nur geringe Traglast bis 15 kg auf. In beiden Fällen kann eine Akzeptanz des Systems fraglich sein, vgl. (KALTENBRUNNER & SPILLNER 2013).
e	Unterstützung bzgl. Umgebungsbedingungen: Durch die Nähe zum Roboter ist im Regelfall davon auszugehen, dass keine Entlastung von Umgebungsbedingungen des Arbeitsplatzes darzustellen ist. Das Robotersystem selbst stellt eine neue Unfall- und Gefahrenquelle dar.
3	Fernsteuern
a	Kraft: Die Fernsteuerung entkoppelt den Bediener von den Handhabungskräften.
b	Körperhaltung: Die freiere Positionierung der Eingabegeräte erlauben dem Bediener günstige Körperhaltung und Gelenkstellungen. Sitzarbeit ist gut umsetzbar. Zwangshaltungen können weiterhin durch schlechte Sichtbedingungen verursacht werden. Ein Ausgleich durch Anzeigelemente ist bedingt möglich.
c	Sensomotorik: Fingerkräfte, Handgelenksstellung und Zugänglichkeit werden durch das Eingabegerät, nicht durch die Bereitstellung des Objekts determiniert. Die Präzision des Greifvorgangs kann durch sensorgestützte Roboterfunktionen gesteigert werden.

d	Zeitregime: Beschränkte Sicht bzw. allgemeiner beschränktes Feedback können zur Reduktion der Ausführungsgeschwindigkeit führen. Sensor- oder modellgestützte Funktionen (shared control, feedback) können diese beschleunigen. Durch die potenziell größere Entfernung des Bedieners können diesbezügliche sicherheitstechnische Geschwindigkeitsbeschränkungen ggf. entfallen. Eine Entlastung von hohen zeitlichen Anforderungen in der Ausführung ist damit im Allgemeinen nicht zu erzielen.
e	Umgebungsbedingungen: Der Mitarbeiter ist beim Steuern mit direkter Sicht bzw. in der Nähe vom Roboter von den Umgebungsbedingungen am Ort der Handhabung bedingt entkoppelt. Über Displays bzw. Telepräsenzausstattung ist eine vollständige Entkopplung möglich.
4	Anweisen
a	Kraft: Da der Mitarbeiter per Anweisung das Aufnehmen bzw. Greifen des Objekts an den Roboter delegiert, ist eine Entlastung von Halte-, Hub-, Greifkräften gegeben.
b	Körperhaltung: Die Ausprägung hängt von der Modalität ab. Sind Kontakt oder Nähe zum Handhabungsobjekt erforderlich ist eine Änderung der Anforderungen an die Körperhaltung zur Arbeitsausführung nur bedingt möglich. Implizite Anweisungen, die dies nicht erfordern erscheinen geeignet die Körperhaltung von der Handhabungsaufgabe zu entkoppeln
c	Sensomotorik: Die sensomotorischen Anforderungen beschränken sich auf die Eingabemodalitäten, vorwiegend bei expliziten Anweisungsverfahren. Eine entsprechende Entlastung oder Kompensation ist gut möglich.
d	Zeitregime: Die Dauer expliziter Anweisungen zum Greifen eines Objekts unspezifizierter Pose erscheint einer manuellen Ausführung bisher nicht ebenbürtig. Implizite Verfahren setzen in der Regel voraus, dass das Objekt bzw. Objektlage dem Robotersystem bekannt ist oder sensorisch erfasst wird. Ein zeitlicher Vorteil bzw. eine Entlastung für den assistierten Mitarbeiter dürfte sich tendenziell nur bei großem Greifweg oder Vereinzelungsaufwand ergeben.
e	Umgebungsbedingungen: Eine Entkopplung von den Umgebungsbedingungen ist bedingt möglich, je nach erforderlicher Nähe zum Ausführungsort.
5	Aushändigen, Ablegen
a	Kraft: Nach dem Aushändigen an den Mitarbeiter sind die erforderlichen Greif- und Haltekräfte zur Handhabung des Objekts für den Mitarbeiter gleich wie beim nicht assistierten Fall. Ein Entlastung tritt bedingt auf, wenn beim Vereinzeln bzw. der Entnahme aus der Bereitstellung weitere Kräfte aufzubringen wären, etwa bei Schüttgut oder verpressten Stapeln.

b	Körperhaltung: Bei der Übergabe eines Objekts vom Roboter an den Mitarbeiter kann dieses in eine ergonomisch günstige Position gebracht werden und dadurch eine Entlastung realisieren.
c	Sensomotorik: wie zuvor bei der Körperhaltung
d	Zeitregime: Greifwege und -zeiten können durch das Aushändigen oder Ablegen reduziert werden und einen Zeitvorteil bzw. eine Entlastung vom Zeitregime darstellen.
e	Umgebungsbedingungen: Es tritt keine Entlastung auf, insofern das vom Roboter gegriffene Objekt nicht in anderer, belastenderer Umgebung bereitgestellt wird.
6	Übergabe
a	Eine Objektübergabe vom Mitarbeiter an den Roboter entlastet den Mitarbeiter nicht beim Aufnehmen oder Greifen ggf. aber in nachfolgenden Handhabungsschritten. Das Anreichen eines Objekts nach dem Greifen ohne dass der Mitarbeiter das Objekt erhält zählt zur koexistenten Ausführung.
7	Kontrollübergabe
a	Die Übergabe der teilweisen oder vollständigen Kontrolle über den Handhabungsprozess vom Mitarbeiter zum Roboter und vice versa ermöglicht ein Wechsel in eine der anderen Ausführungsarten, wo dann deren Vorzüge und Nachteile für den Mitarbeiter wirksam werden. Dies kann vor, während und nach dem jeweiligen Handhabungsschritt geschehen. Da dies im Weiteren unverändert bleibt, wird nicht erneut darauf eingegangen.
8	Automation, Koexistenz
a	Umgebungsbedingungen: Bei einem automatischen Greifen kann der Mitarbeiter in allen Bereichen entlastet werden. Bei koexistierenden Systemen, wo Objekte in Nähe des Mitarbeiters z.B. am Arbeitsplatz gegriffen werden, ist eine Entlastung von Umgebungsbedingungen nur bedingt möglich. Bei der Koexistenz ist der Roboter als zusätzliche Unfall- und Gefährdungsquelle in den Umgebungsbedingungen einzuschätzen. Einschränkungen des Einsatzes der Automation werden im Wesentlichen durch die Automatisierbarkeit und sicherheitstechnische Anforderungen des Handhabungsschrittes limitiert. Da dies im Weiteren unverändert bleibt, wird nicht erneut darauf eingegangen.

B	Unterstützung beim Transportieren, Tragen
1	Führen am Objekt
a	Kraft: Wird das Objekt vom Roboter und Mensch zusammen getragen (load sharing), liegt nur eine teilweise Entlastung vor. Nimmt das Robotersystem die Gewichts- und Trägheitskräfte des transportierten Objekts vollständig auf, ist eine wesentliche Entlastung von Halte-, Greifkräften erzielbar. Eine Belastungswandlung vom Halten, Tragen hin zum Schieben und Ziehen ist möglich. Die erforderlichen Mindestkräfte zur Bedienung werden durch Eigenschaften der Regelung vorgegeben, insbesondere durch Prinzip, Auflösung und Rauschen der Messsysteme. Bei kraftmessenden Prinzipien ist damit ein Zusammenhang zum Objektgewicht gegeben. Sollen z.B. 10 N an Eingabekraft nicht überschritten werden, so ist bei 1 % Messgenauigkeit eines Kraftsensors ein Transportieren eines Gewichts über 1000 N mit diesem Verfahren zunächst auszuschließen, da das Eingabekraft-Maximum dann unterhalb der Messgenauigkeit liegt.
b	Körperhaltung: Eine Verbesserung der Körperhaltung ist nur bedingt zu erwarten. Können am Objekt ergonomisch günstigere oder den Fähigkeiten besser entsprechende Greif- oder Kontaktpunkte erreicht werden als bei nicht roboterassistierter Handhabung desselben Objekts, ist eine Verbesserung im Bereich der Rumpf- und Gelenkstellung erzielbar. Die Schwerpunkte Stehen, Sitzen, Überkopfarbeit lassen sich hingegen nur schlecht adressieren.
c	Sensomotorik: Die Fingerkräfte werden reduziert. Ein Steigern von Präzision und Ausführungsgeschwindigkeit beim Führen am Objekt lässt sich u.a. mit virtuellen Handhabungsprimitiven erzielen, die allerdings Modellierung oder Sensorüberwachung erfordern. Ein einhändiges Führen ist bedingt möglich.
d	Zeitregime: Eine Verbesserung ist nicht zu erwarten.
e	Umgebungsbedingungen: Durch die Nähe zum Handhabungsobjekt ist keine Entlastung von Umgebungsbedingungen zu erwarten. Das Robotersystem stellt eine weitere Gefahrenursache dar.
2	Führen am Roboter
a	Kraft: Eine Entlastung von Greif- und Haltekräften sowie vom Schieben, Ziehen ist zu erzielen. Gewichts- und Trägheitskräfte können kompensiert werden. Insbesondere auch Belastungen von Rumpf, Rücken, Schultern und Knie, die bei Richtungswechsel, lateralem Schieben, Drehen oder Heben von Objekten auftreten, können reduziert werden (z.B. durch virtuelle Förderbänder).

b	Körperhaltung: Die Körperhaltung wird neben der Bewegungsbahn des Objekts, die der Bediener aufprägen muss, durch die Position und Zugänglichkeit der Bedienelemente beeinflusst. Zwangshaltungen, die wegen Hindernissen in der Bewegungsbahn, der Bewegungsbahn selbst oder beschränkter Sichtbedingungen auftreten können, sind bedingt adressierbar durch Anzeigelemente und unterstützende Roboterfunktionen, die Teilbewegungen ausführen oder begrenzen (shared control).
c	Sensomotorik: Fingerkräfte werden durch das Führen kaum beansprucht. Mit shared control werden eine Steigerung der Bahntreue oder die Ausführung komplexer mehrdimensionale Bewegungen möglich.
d	Zeitregime: Assistenzfunktionen (shared control, virtuelle Förderbänder) und schnelles Ansprechverhalten können den Transport beschleunigen. Dies wird durch sicherheitstechnische Vorgaben und der Fähigkeit des Menschen der Bewegung zu folgen oder diese zu führen limitiert. Eine Entlastung im Zeitregime ist nur in geringem Maße zu erwarten.
e	Umgebungsbedingungen: Es sind keine Verbesserungen zu erwarten
3	Fernsteuern
a	Kraft: wie zuvor beim Greifen
b	Körperhaltung: wie zuvor beim Greifen
c	Sensomotorik: wie zuvor beim Greifen
d	Zeitregime: Ohne Menschen im Arbeitsraum des Roboters ist bei einfachen Bewegungen oder größeren Strecken eine beschleunigte Ausführung zu erwarten. Ein Zeitvorteil bzw. eine Entlastung vom Zeitregim ist erzielbar. Komplexe Bewegungen dürften dazu zusätzliche Unterstützungsfunktionen (shared control) erfordern.
e	Umgebungsbedingungen: wie zuvor beim Greifen
4	Anweisen
a	Kraft: wie zuvor beim Greifen
b	Körperhaltung: wie zuvor beim Greifen
c	Sensomotorik: wie zuvor beim Greifen
d	Zeitregime: Eine Entlastung zeitlicher Anforderungen ist abhängig von den Dauern der Anweisung auf der einen und der ausgeführten Aktion auf der anderen Seite. Ein zeitlicher Vorteil ist durch die Assistenz daher eher bei größeren Wegstrecken zu erwarten.

e	Umgebungsbedingungen: wie zuvor beim Greifen
5	Anreichen, Aushändigen, Ablegen
a	Nicht zutreffend
6	Automation, Koexistenz
a	Wie beim Greifen
C	Unterstützung beim Positionieren
1	Führen am Objekt
a	Kraft: wie zuvor beim Transport
b	Körperhaltung: Wie zuvor beim Transport. Zusätzlich können durch Verdeckung ungünstige Sichtbedingungen erzeugt werden, die zu Zwangshaltung führen können. Diese lassen sich mit Anzeigen oder zusätzlichen Assistenzfunktionen (z.B. virtuelle Wände, virtuelle Federn, Handhabungsprimitive) teilweise kompensieren.
c	Sensomotorik: wie zuvor beim Transport
d	Zeitregime: Es sind kaum Verbesserungen zu erwarten.
e	Umgebungsbedingungen: Es sind keine Verbesserungen zu erwarten. Beim Positionieren liegt häufig eine gleichzeitige Nähe zu anderen Objekten (Montageort, Basisteil) vor, die das Unfall- und Gefährdungsrisiko (besonders: Quetschung, Scherung) zusammen mit dem Roboter erhöhen.
2	Führen am Roboter
a	Kraft: wie zuvor beim Transport
b	Körperhaltung: wie zuvor beim Transport
c	Sensomotorik: Die Anforderung an Fingerkräfte (schwere, schlecht zu greifende Bauteile) oder Fingerfertigkeit (kleine Objekte) werden reduziert. Mit Methoden des shared control können die Präzision beim Positionieren und Ausrichten verbessert oder komplexe Bewegungen vereinfacht werden. Kollisionen mit Hindernissen können durch Modellierung oder sensorische Erfassung vermieden werden.
d	Zeitregime: Das Positionieren durch Führen am Roboter kann durch shared control beschleunigt werden.

e	Umgebungsbedingungen: wie zuvor beim Greifen
3	Fernsteuern
a	wie zuvor beim Greifen
4	Anweisen
a	wie zuvor beim Greifen
5	Automation, Koexistenz
a	wie zuvor beim Greifen
6	Anreichen
a	Kraft: Beim Anreichen eines Objekts kann der Mitarbeiter von Greif- und Haltekräften entlastet werden.
b	Körperhaltung: Das Anreichen in ergonomisch günstige oder fähigkeitsgerechter Pose kann die Anforderungen an die Körperhaltung gezielt reduzieren. Diese Pose kann vordefiniert, durch Erfassung der Mitarbeiter-Körperhaltung bestimmt oder vom Mitarbeiter nach Kontrollübernahme eingestellt werden. Damit lassen sich z.B. Überkopparbeit oder auch sitzende Tätigkeiten adressieren.
c	Sensomotorik: Fingerkräfte können reduziert werden. Der Mitarbeiter hat beide Hände frei und kann das Objekt ein- oder zweihändig bearbeiten. Dies reduziert den Koordinationsaufwand und erleichtert die Ausführung von Bearbeitungsaufgaben mit hohen Präzisionsanforderungen.
d	Zeitregime: Bei einer Parallelisierung von Tätigkeiten ist ein bedingter zeitlicher Vorteil für den Mitarbeiter erzielbar.
e	Umgebungsbedingungen: Eine Verbesserung ist kaum zu erzielen. Zusätzliche Gefährdungen können durch den Roboter und insbesondere durch das vom Roboter bewegte Objekt auftreten.
D	Montieren
1	Führen am Objekt
a	Kraft: Wie beim Positionieren. Beim Führen am Objekt ist es darüber hinaus schwer Eingabekräfte vom Bediener von weiteren Kontaktkräften zu unterscheiden, so dass eine Unterstützung hinsichtlich Fügekräfte ohne Weiteres nicht möglich ist.
b	Körperhaltung: wie beim Transportieren
c	Sensomotorik: wie beim Transportieren

d	Zeitregime: Ein zeitlicher Vorteil ist nicht zu erwarten.
e	Umgebungsbedingungen: Wie beim Transportieren. Dadurch, dass die Hände beim Ablegen oder Montieren Kontakt zum Objekt haben besteht überdies eine erhöhte Gefahr des Einguetschens oder Scherens an den Ablege- oder Fügestellen.
2	Führen am Roboter
a	Kraft: Wie beim Greifen. Zusätzlich kann eine Unterstützung beim Aufbringen von Fügekräften realisiert werden.
b	Rest: wie beim Greifen
3	Fernsteuern
a	Wie beim Greifen
4	Anweisen
a	Wie beim Greifen
5	Ablegen
a	Analog zur Automation, Koexistenz
6	Anreichen
a	Kraft: Der Roboter kann bereits positionierte Objekte während deren Montage halten, andrücken oder wie eine dritte Hand in ihrer Pose fixieren. Dadurch ist eine Entlastung von Greif- und Haltekräften zu realisieren.
b	Körperhaltung: Eine Verbesserung der Körperhaltung ist nicht zu erwarten. Die Zugänglichkeit und Sichtbedingungen können durch den Platzbedarf des Roboters beeinträchtigt werden.
c	Sensomotorik: Fingerkräfte und Koordinationsaufwand können reduziert werden. Einhand und Beidhandoperationen am Objekt werden ermöglicht.
d	Zeitregime: Durch Parallelisierung von Tätigkeiten und Erleichterung der eigentlichen Montage kann eine geringe zeitliche Entlastung erzielt werden.
e	Umgebungsbedingungen: keine Verbesserung
7	Automation, Koexistenz
a	Wie beim Greifen



## 9.7 Eingrenzung gültiger Arbeitsbereiche

Um eine eventuell erforderliche Neupositionierung zu erleichtern erscheint es vorteilhaft, im Ergebnis der Prüfung gültige und ungültige Lösungsräume aufzuzeigen. Nachfolgend wird eine Methode hierzu vorgestellt: Zunächst wird der Raum um einen definierten Teil der Flanschbahn in Gitterpunkte gerastert. Der Rasterabstand wird nach Bedarf, aber zur Aufwandsreduktion möglichst grob gewählt. Ausgehend von einem vorzugebenden Startpunkt mit einer Startkonfiguration der Roboterkinematik wird schrittweise für jeden benachbarten Gitterpunkt geprüft, ob dieser translatorisch entlang der Strecke zwischen den Punkten ohne Singularität oder Kollision erreicht wird. Analog wird für jeden Gitterpunkt geprüft, ob eine kollisions- und singularitätsfreie Rotation um die Hauptachsen des Werkzeugpunkts bis zu einem vorher definierten Winkel möglich ist. Jeder Punkt der einer der beiden Anforderungen nicht erfüllt wird aus der Menge der gültigen Lösung entfernt. Durch graphisches Auftragen der Rasterpunkte mit Unterscheidung zwischen gültigen und ungültigen Punkten ist der Lösungsraum als Punktwolke dargestellt. Es ist zu beachten, dass durch Vereinfachung des Problems durch Rasterung und Trennung von Rotation und Translation eine kritische Prüfung der Ergebnisse erforderlich ist.

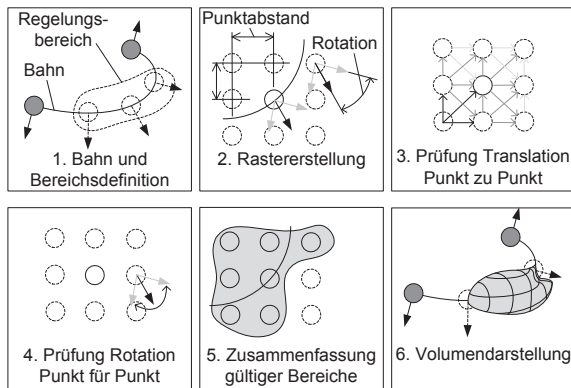


Abbildung 51: Iterative Eingrenzung des Arbeitsbereichs des Roboters unter Vorgabe zulässiger Translation und Rotation zur Ermittlung einer Volumendarstellung

## 9.8 Diskussion unterschiedlicher Ausführungsvarianten

Diskussion der Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlicher Ausführungsvarianten einzelner Handhabungsschritte:

**Manuelles Greifen:** Die manuelle Ausführung von Teilschritt 2 und 4 ist wegen der zuvor beschriebenen Belastungssituation möglichst zu vermeiden.

**Handführen eines Manipulators:** Das Handhaben des Bauteils über einen passiven handgeführten Manipulator ist unter Anwendung des Verfahrens nach KALTENBRUNNER & SPILLNER (2013) hinsichtlich der Akzeptanz als problematisch einzuschätzen, das heißt eine Nichtnutzung erscheint als wahrscheinlich. Als Hauptursache in diesem Anwendungsszenario kann die Ausführungsdauer des so assistierten Handhabungsprozesses gelten, die bei rein manueller Ausführung geringer ist. Daher erscheint dieser Ansatz als untauglich. Die Argumentation gilt analog für das Handführen eines Roboters, wenn dies durchgängig für alle drei Handhabungsteilschritte ausgeführt wird.

**Handführen eines Roboters:** Beim Handführen eines Roboters zum Greifen bzw. Aufnehmen der Bauteile aus der Gitterbox besteht durch den beengten Raum in der Gitterbox ein hohes Risiko einer Kollision mit Quetschgefahren für die Gliedmaßen des Führenden. Roboterkinematiken, die eine verletzungssarme Kollision ermöglichen, weisen derzeit nicht gleichzeitig die notwendige Reichweite oder Traglast auf, um Bauteil und Endeffektor handhaben zu können. Kollisionsvermeidende Ansätze führen hingegen zu reduzierten Bewegungsgeschwindigkeiten der Kinematik. Die Dauer des so assistierten Teilschritts kann dadurch die Gesamtdauer einer rein manuellen Handhabung überschreiten, womit der Ansatz ungeeignet ist. Ein Bauteiltransport in Schrittgeschwindigkeit (1 m/s) ist beim Handführen durchaus erzielbar, vgl. (REINHART ET AL. 2012). Da dieser Teilschritt aber auch aufwandsarm automatisiert werden könnte, erscheint dies kein vorteilhafter Ansatz zu sein. Für das Positionieren und Einsetzen des Bauteils durch Handführen des Roboters sind in einem vergleichbaren Szenario Dauern zwischen 8 und 11 Sekunden ermittelt worden (REINHART ET AL. 2012) – eine zu hohe Dauer. Eine Verkürzung der Dauer dieses Teilschritts auf drei Sekunden wird in REINHART ET AL. (2012) durch Einführung von Zwangsbedingungen realisiert, durch welche der Bediener nur noch die Einsetzbewegung auslöst statt führt. Die Positionierung des Bauteils vor dem Einsetzen erfolgt dabei automatisch oder flexibler aber zeitaufwändiger durch shared control (ebenda). Die geringe Technologiereife des Positionierens durch shared control lässt diesen Ansatz für den Anwendungsfall ausscheiden.

**Anreichen oder Übergeben:** Das Anreichen oder Übergeben des Bauteils in Teilschritt 3 kann vom Mensch zum Roboter oder anders herum ausgeführt werden. Die Übergabe vom Roboter zum Menschen wird bevorzugt, wegen der hohen Belastung einer manuellen Ausführung von Teilschritt 2. Eine solche Variante setzt eine Automation von Teilschritt 2 voraus.

**Fernsteuern:** Das Fernsteuern, insbesondere der Teilschritte 2 und 4, wird als zu langsam und daher als ungeeignet erachtet. Basis für diese Einschätzung bilden experimentelle Handhabungsversuche, wie z.B. von RADI (2012).

**Automation:** Teilschritt 2 stellt, entsprechend der zuvor durchgeführten Bewertung zur wirtschaftlichen Automatisierbarkeit, hohe Anforderungen an eine Automation, die die Wirtschaftlichkeit einer solchen Umsetzung in Frage stellen. Die allgemeine Form oder das Alter der Methode können jedoch neuartige oder spezielle Lösungen nicht berücksichtigen, so dass eine Prüfung des Stands der Technik obligatorisch bleibt. In dem Fall von Teilschritt 2 entsprechen die Anforderungen weitgehend denen eines ‚Griffs in die Kiste‘, für welchen mehrere Lösungen verfügbar sind. Eine weitere Möglichkeit Teilschritt 2 zu automatisieren besteht darin, die Bereitstellung der Bauteile automationsgerechter zu gestalten. Da befürchtet wird, dass dies die Logistikkosten wesentlich erhöht, wird davon jedoch abgesehen. Der automatische Transport in Teilschritt 3 erscheint unproblematisch durchführbar. Das automatische Einsetzen in Teilschritt 4 erfordert entweder den Einsatz von Sensorik oder das Fixieren des Basisteils. Als kostengünstiger wäre die Fixierung zu bevorzugen. Die Prüfung, ob die Fügestellen frei sind, lässt sich sensorisch, z.B. kamera-basiert darstellen. Ist die Fügestelle durch Fremdkörper oder andere Bauteile nicht zugänglich, erfordert das Beheben dieser Störung Personaleinsatz. Hier erscheint es kostengünstiger, die Prüfung und Behebung vorab vom Mitarbeiter ausführen zu lassen, der dann das automatische Einsetzen freigibt und gegebenenfalls überwacht.

## 9.9 Pick-By-Wire Modul

### 9.9.1 Einführung

„Das Pick-By-Wire Modul (PBW Modul) ist ein Peripheriegerät mit welchem Industrieroboter ausgestattet werden können um spezielle Formen einer Mensch-Roboter-Kollaboration zu ermöglichen. Das Modul wird hierzu zwischen Roboterflansch und Endeffektor befestigt und eine Datenkommunikation zwischen Modul und Robotersteuerung eingerichtet, vgl. Abbildung 52. Der Endeffektor kann vom Pick-By-Wire Modul abgekoppelt werden, wobei eine physische Verbindung über ein oder mehrere leicht gespannte Seile erhalten bleibt. Sensoren im Pick-By-Wire Modul erfassen die Auslenkung und ggf. die Auszugslänge der Seile. Die gemessene Positionsänderung der Seile wird bedarfsabhängig als Steuergröße für die Regelung von Roboterbewegungen verwendet. Eine Mensch-Roboter-Kooperation ergibt sich aus der aufgabenbezogenen Beeinflussung von Seilauszug oder -position durch den Menschen. Das Modul lässt sich damit auch als Eingabemedium beschreiben.

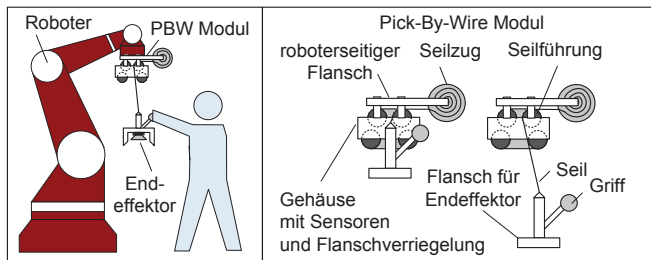


Abbildung 52: Skizze eines Pick-By-Wire Moduls und Beschreibung der skizzierten Elemente

Mit dem Modul lässt sich eine Kollaboration in verschiedener Weise darstellen, wie Abbildung 53 illustriert. So ist ein Einsatz zum kollaborativen Greifen, Transportieren, Positionieren und Absetzen von Objekten, wie auch zum Führen von Werkzeugen oder zur Programmierung möglich. Durch die Kollaboration sind eine Unterstützung der Körperkraft, teils auch eine Verbesserung der Körperhaltung des Ausführenden erzielbar, was den Einsatz des Moduls als Hebe-, Transport- oder Positionierhilfe erschließt.

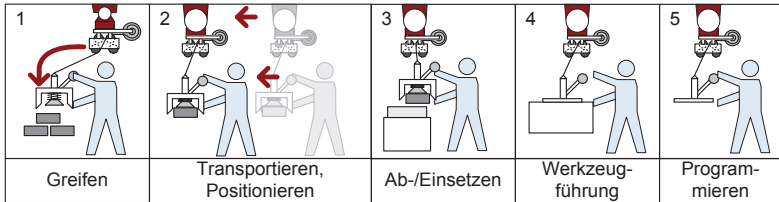


Abbildung 53: Anwendung und kollaborativer Einsatz des Pick-By-Wire Moduls

Die Hauptanwendung des Moduls besteht darin, einen kollaborativen Greifvorgang zu ermöglichen. Hierzu löst ein Mitarbeiter den Endeffektor vom PBW Modul und befestigt diesen auf das zu greifende Objekt. Der Roboter folgt dann den Seilen bis zum Endeffektor, wo dann das PBW Modul den Endeffektor bzw. dessen Flansch greift und sichert. Die weitere Handhabung des gegriffenen Objekts kann dann automatisch ablaufen. Tabelle 37 fasst die Vorteile eines solchen Einsatzes zusammen.

Tabelle 37: Allgemeine Vorteile des PBW Moduls für das kollaborierende Greifen

Stichwort	Erklärung
Simplizität	Einfaches, robustes Funktionsprinzip
Flexibilität	Funktion und Modul sind unabhängig von Objekt oder Endeffektor
	Endeffektor ist abwechselnd von Mensch und Roboter einsetzbar
Assistenz	Entlastung von Gewichtskräften von Objekt und Endeffektor
Bedienung	Mitarbeiter kann sensomotorische und kognitive Fähigkeiten einbringen
	Intuitive Bedienung; vorhersehbares Bewegungsverhalten des Roboters
Sicherheit	Manuelle Seilmanipulation ist auch bei Stillstand des Roboters möglich
	Manuelle Seilmanipulation erlaubt Distanz vom Roboter

Die anderen Anwendungsfelder werden als Ergänzungen gesehen, die die Einsatzflexibilität des PWB Moduls erhöhen. Bei diesen Anwendungen besteht das wesentliche Funktionsprinzip darin, dass das handzuhabende Objekt (Bauteil, Werkzeug, Eingabegerät) am Seil vom Modul herabhängt und die vom Mitarbeiter auf das Objekt aufgeprägten translatorische oder rotatorische Bewegungen vom Roboter nachvollzogen werden. Da hier der Effektor bzw. das Werkzeug nicht am PBW Modul fixiert werden, werden deren Gewichtskräfte über die Seile oder zusätzliche Vorrichtungen übertragen. Optional kann der Seilauszug durch programm- oder mitarbeitergesteuerte Bremsen oder Aktuatoren eingestellt werden.“ (SPILLNER 2014)

## 9.9.2 Illustration der Funktion

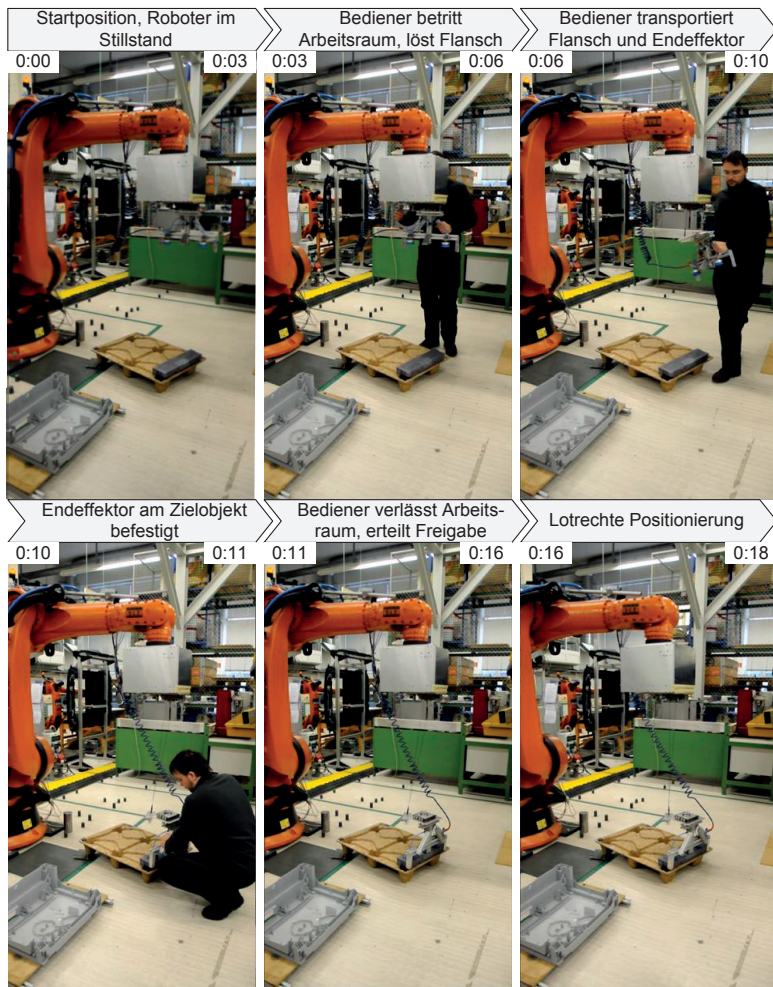


Abbildung 54: Demonstration eines kollaborativen Greifvorgangs mit dem Pick-By-Wire Modul, Teil 1 (SPILLNER 2014)



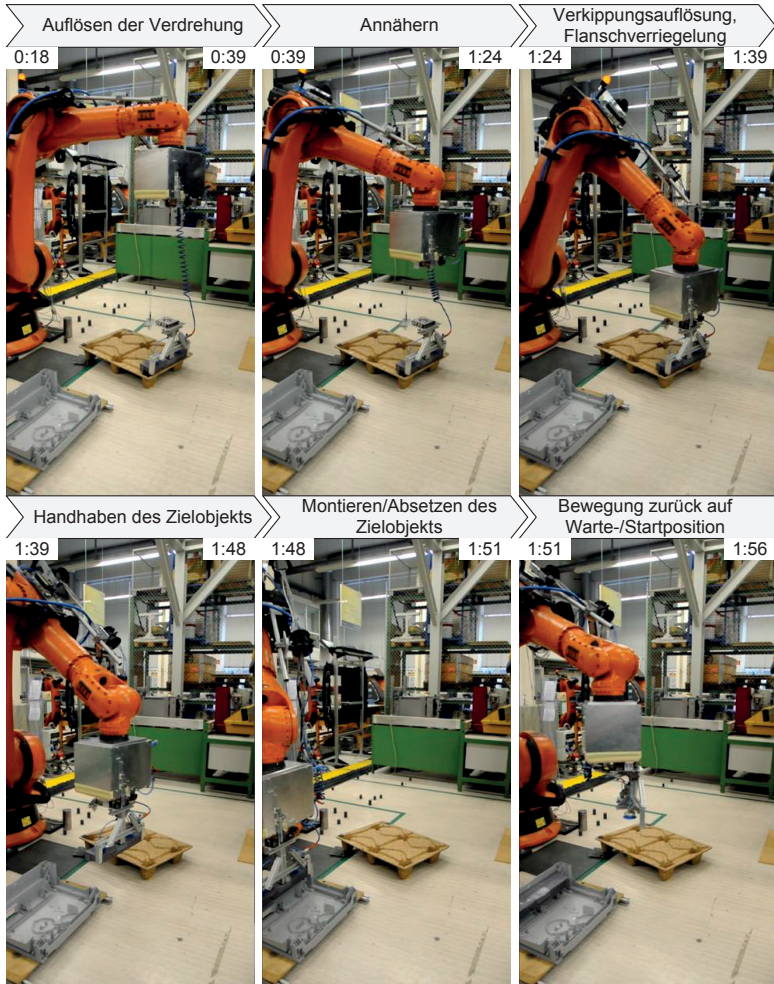


Abbildung 55: Demonstration eines kollaborativen Greifvorgangs mit dem Pick-By-Wire Modul, Teil 2 (SPILLNER 2014)

### 9.9.3 Arbeitserleichterung und Kraftunterstützung

„Die Handhabungsaufgabe besteht darin, ein Bauteil von ca. 7 kg Gewicht aufzuheben und auf eine entfernte Ablage zu transportieren, wie es in Abbildung 56 illustriert wird. Bei der assistierten Ausführung mit dem PBW Modul wird hierzu ein Flansch mit Endeffektor vom Modul getrennt und auf dem Bauteil befestigt, wobei die sich anschließende automatische Handhabung des Bauteils durch das Assistenzsystem nicht mehr betrachtet wird.“ (SPILLNER 2014)

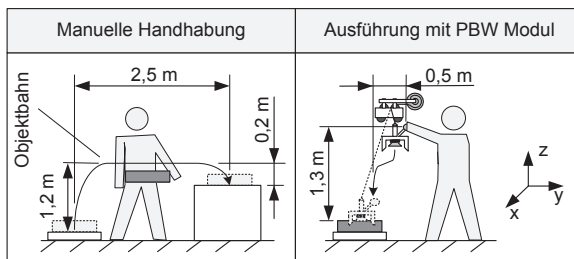


Abbildung 56: Bewegungsbahnen der handzuhabenden Objekte (Bauteil oder Flansch) mit und ohne Assistenz (SPILLNER 2014)

„(...) Die Arbeitserleichterung wird hier durch Vergleich der vom Ausführenden aufzuwendenden Energie für einen Handhabungszyklus beschrieben. Die jeweiligen Arbeitsmengen werden in Tabelle 38 und Tabelle 39 zusammengefasst. Die verwendeten Kräfte, Wege und Zeiten ergeben sich aus dem Versuchsaufbau und den Messergebnissen“ (Abbildung 57). „Der Energieumsatz der Körperhaltungen wird nach SPITZER ET AL. (1982) verwendet. (...)“ (SPILLNER 2014).

„(...)Die Effekte der Arbeitserleichterung und Kraftunterstützung für dieses spezifische Szenario lassen sich damit wie folgt zusammenfassen:

Die aufzubringenden Maximalkräfte werden um 78 % reduziert. Die Arbeit wird ca. 1 s schneller ausgeführt. Die nur zur eigentlichen Objekthandhabung erforderliche Arbeit wird um 91 % reduziert. Die Arbeit unter Berücksichtigung des haltungsbedingten Energieumsatzes des Ausführenden wird um 23 % erleichtert. Die grundsätzliche Möglichkeit bzw. Assistenzfähigkeit zur Kraftunterstützung kann damit als nachgewiesen angesehen werden.“ (ebenda)



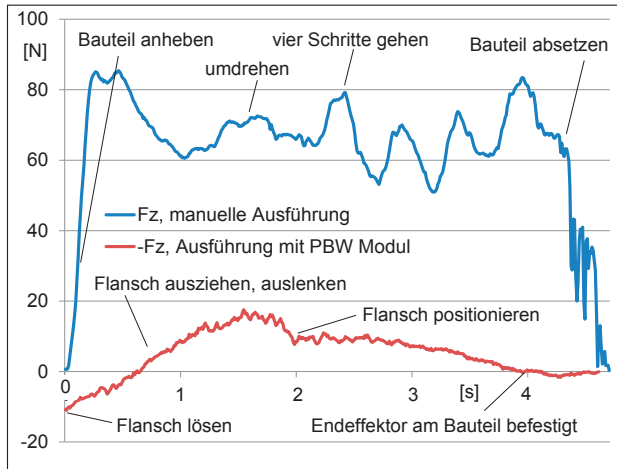


Abbildung 57: Gemessene vertikale Handhabungskräfte (z-Richtung) beim Manipulieren von Bauteil oder Flansch im zeitlichen Verlauf (SPILLNER 2014)

Tabelle 38: Arbeit manueller Ausführung (SPILLNER 2014)

Arbeit, Energieumsatz bei manueller Ausführung			
Handhabungsteilschritt	Mittlere Kraft [N]	Weg [m]	Arbeit [J]
Heben	39,7	1,2	47,7
Halten, Umdrehen	70,8	0,5	35,4
Gehen	70,1	2	140,3
Absetzen	43,9	0,2	8,8
Körperhaltung	Energieumsatz [kJ/min]	Dauer [s]	Arbeit [J]
Hocken	5	1	83,3
Gehen	11	4	733,3
Stehen	2,5	2	83,3
Haltungswechsel	Körpergewicht [N]	Weg [m]	Arbeit [J]
Hocken → Stehen	800	0,5	400
Summe			Arbeit [J]
Nur Objektmanipulation			232
Gesamtarbeit je Handabungszyklus			1532

Tabelle 39: Arbeit bei Ausführung mit PBW Modul (SPILLNER 2014)

Arbeit, Energieumsatz mit dem PBW Modul			
Handhabungsteilschritt	Mittlere Kraft [N]	Weg [m]	Arbeit [J]
Lösen, Ausziehen,	12	1,3	15,7
Positionieren	6,3	0,5	3,2
Beschleunigen	4	0,1	0,4
Verzögern	4	0,1	0,4
Körperhaltung	Energieumsatz	Dauer [s]	Arbeit [J]
Hocken	5	2	166,7
Gehen	11	3	550
Stehen	2,5	1	41,7
Haltungswechsel	Körpergewicht [N]	Weg [m]	Arbeit [J]
Hocken→ Stehen	800	0,5	400
Summe			Arbeit [J]
Nur Objektmanipulation			20
Gesamtarbeit je Handhabungszyklus			1178

#### 9.9.4 Kosten

Tabelle 40: Kosten eines PBW Moduls wie realisiert (SPILLNER 2014)

Posten	Kosten [€]
Flansche	400
Gehäuse	600
Greiferwechselsystem	3.300
Seilzüge	200
sbRIO	1.800
Zeilensensoren	2.800
Sonstiges	100
Montage und Fertigung	1.800
Summe	11.000

### 9.9.5 Seilzug- und Führkräfte

Tabelle 41: Messwerte der Seilzugkräfte (Leerlauf) (SPILLNER 2014)

Auslenkungswinkel	Messwerte der Seilzugkraft [N]			
	Quasistatisch		Dynamisch mit 1 m/s	
	Auszug	Einholen	Auszug	Einholen
0°	13,2	4,9	14,7	3,9
45°	14,8	3,9	20,6	2,9
90°	20,6	2,0	24,5	1,9

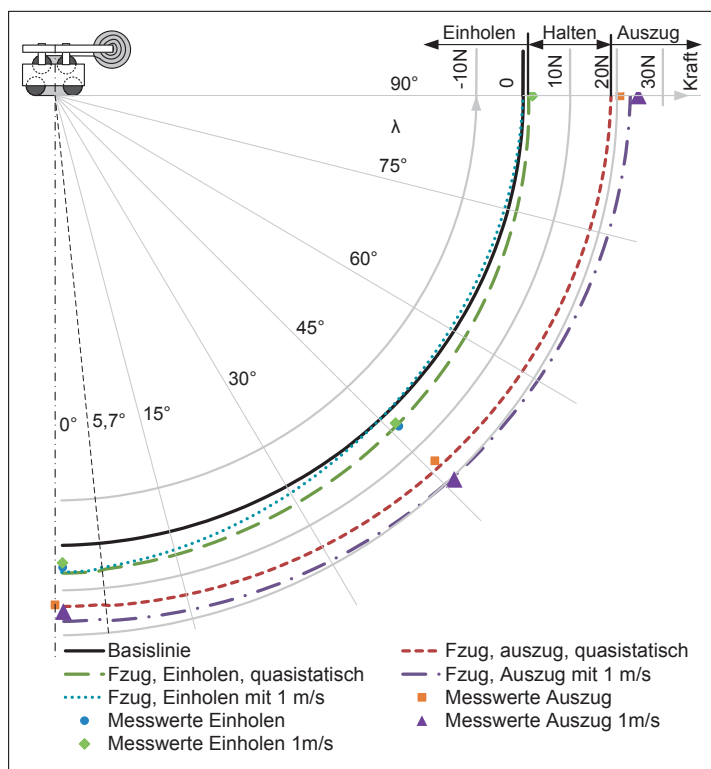


Abbildung 58: Zugkraft eines Seils des PBW Moduls in Abhängigkeit von Auslenkungswinkel, Auszugsgeschwindigkeit und -richtung (SPILLNER 2014)

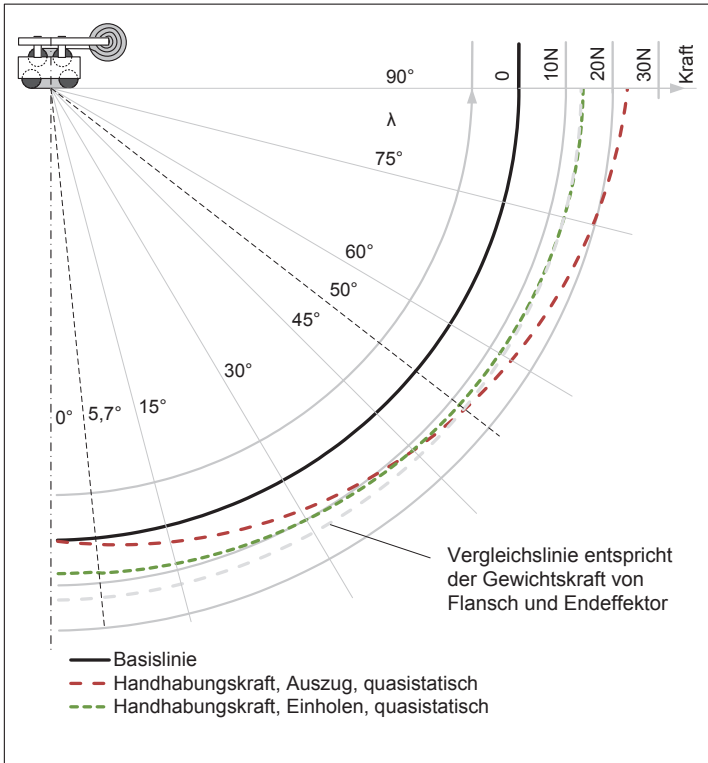


Abbildung 59: Führ- bzw. Handhabungskräfte beim Handhaben von Flansch und Endeffektor mit abgestimmtem Gewicht in Abhängigkeit vom Auslenkungswinkel und Zugrichtung für ein Seil (SPILLNER 2014)

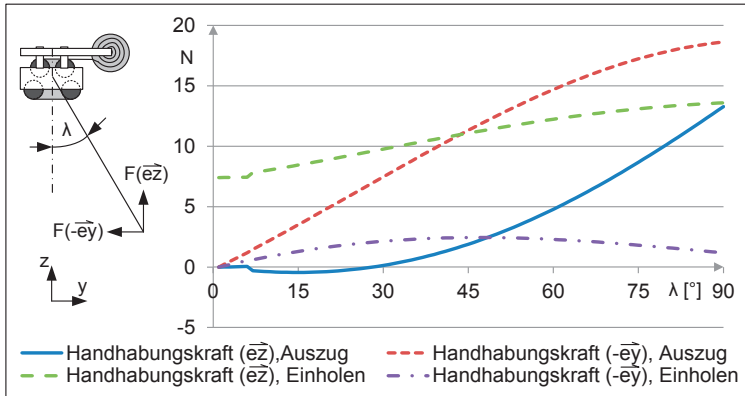


Abbildung 60: Vektoriell aufgeschlüsselte Handhabungskräfte beim Manipulieren von Flansch und Endeffektor mit abgestimmten Gewicht in Abhängigkeit vom Auslenkungswinkel und Zugrichtung für ein Seil (SPILLNER 2014)

## 10 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) in den Jahren 2008 bis 2013 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die folgenden studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Mensch-Roboter-Kooperation untersucht und technische Systeme entwickelt und getestet wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende(r)	Studienarbeit
Breyer, M.	Validierung einer aktorbasierten Messbereichserweiterung und Auflösungsverbesserung von Kraftsensoren.
Dieterle, J.	Ableitung standardisierbarer Greifpunkte zur typpflexiblen Handhabung am Beispiel der Vordersitzmontage in der Automobilindustrie. Semesterarbeit. 2009.
Dieterle, J.	From Manual to Automated Assembly – Technical Solution to and Economic Evaluation of a Case Study. Semesterarbeit. 2011.
Dietz, R.	Einbindung und Optimierung kamerabasierter Positionsregelung für teilautomatische Handhabungsprozesse mit Industrierobotern. Bachelorarbeit. 2012.
Hanöfner, R.	Entwicklung eines Greifsystemkonzepts zur Bauteilhandhabung mit aktiver Greifpunktänderung durch einen Abrollvorgang. Semesterarbeit. 2009.
Khoury, B.	Entwicklung einer methodischen Entscheidungshilfe zur Beurteilung von Montagearbeitsplätzen hinsichtlich einer Mensch-Roboter-Kooperation. Diplomarbeit. 2011.
Jehle, C.	Entwicklung und Verifikation einer Vorsteuerung zur Kompensation nachgiebiger Auslenkungen eines Endeffektors zur Trajektoriensteuerung der Werkzeugspitze. Semesterarbeit. 2010.
Leovac, D.	Entwicklung und Umsetzung eines Sicherheitskonzepts für die intuitive, manuell gesteuerte Lasthandhabung in der Mensch-Roboter-Kooperation. Diplomarbeit. 2010.
Li, A.	Entwicklung von Funktionsprinzipien zur Bauteilhandhabung mit aktiver Greifpunktänderung. Semesterarbeit. 2009.

Nottensteiner, K.	Schätzung des Kontaktzustands bei robotergestützten Montageaufgaben. Diplomarbeit. 2012.
Rietzler, T.	Entwicklung und Konstruktion einer kraft- und momenten-skalierenden Aufhängung. Diplomarbeit. 2009.
Seifert, B.	Quantifizierung der Störeinflüsse bei Fügeaufgaben mit impedanzgeregelten Robotern. Diplomarbeit. 2012.
Stötter, M.	Entwicklung eines modularen, flexiblen Versuchstands für innovative, roboter- und sensorgestützte Montageprozesse. Diplomarbeit. 2011.
Orlandi, C.	Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Auswahl multikriteriell geeigneter Werkerunterstützungssysteme in der Automobileendmontage. Diplomarbeit. 2010.
Orlov, V.	Konstruktion eines mechatronischen Moduls für flexible Handhabungsprozesse in der Mensch-Roboter-Kooperation. Semesterarbeit. 2012.
Ott, M.	Manuelles Führen eines Industrieroboters mittels Kraft-Momenten-Sensorik. Semesterarbeit. 2011.
Witzmann, M.	Entwicklung einer Steuerung für das intuitive Führen von Industrierobotern mit Kraft-Momenten-Sensoren. Semesterarbeit. 2011.
Yuzuk, E.	Entwicklung eines neuartigen Greifsystems für das Innengreifen von komplexen Bauteilen. Bachelorarbeit. 2012.

# 11 Veröffentlichungen

## VERÖFFENTLICHUNGEN

### 2008

Thiemann, C.; Spillner, R.; Schilp, J.: Montage im Demographischen Wandel. iwb Newsletter (2008) 2, S. 2–3.

Reinhart, G.; Thiemann, C.; Spillner, R.; Schilp, J.: Demographische Herausforderungen in der Montage. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 9, S. 681-686.

Spillner, R.; Sauer, M. Reinhart, G.; Schilp, J.: Roboterunterstützung an manuellen Arbeitsplätzen. In: FitForAge Forschungsverbund der Bayerischen Forschungsförderung (Hrsg.): FitForAge Zwischenbericht 2008. S.175-209.

### 2009

Reinhart, G.; Spillner, R.; Egbers, J.: Werkzeug zur individuellen Belastungsdosimetrie. In: K. Landau und K. Ahmadi (Hrsg.): Produktivität im Betrieb. Tagungsband der GfA Herbstkonferenz 2009. Millstatt, 23. - 25. September 2009..Stuttgart: ergonomia 2009, S. 145–150.

Reinhart, G.; Schilp J.; Egbers, J.; Walch, D.; Spillner, R.: Fit4Work: Lösungsansätze für den demographischen Wandel in Produktion und Logistik. In: Zülch, G. und Stock, P. (Hrsg.): Auswirkungen der demographischen Entwicklung in Montagesystemen. Tagungsunterlagen zum Workshop im Rahmen des DFG-Projektes "Auswirkungen einer alternden Belegschaft auf die Leistungsfähigkeit von Fertigungssystemen" am 16.03.2009 in der Universität Karlsruhe. Karlsruhe: Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation 2009, S. 10–26.

Spillner, R.; Leutert, F. ; Schilp, J.; Reinhart, G.: Roboterunterstützung an manuellen Arbeitsplätzen. In: FitForAge Forschungsverbund der Bayerischen Forschungsförderung (Hrsg.): FitForAge Zwischenbericht 2009. S.96-104.

### 2010

Egbers, Jörg; Neuberger, M.; Spillner, R.; Walch, D.; Williger, B.: Definition einer altersgerechten Arbeitsgestaltung. In: H. Gerhäuser, W. A. Günther, F. R. Lang, G. Reinhart und K. Schilling (Hrsg.): Altersgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik. Ergebnisse aus dem Bayerischen Forschungsverbund FitForAge . München: Bayerischer Forschungsverbund FitForAge 2010, S. 11–14.

Spillner, R.; Leutert, F.; Schilp, J. Schilling K. (2010): Mensch-Roboter-Kooperation zur Erhöhung der Mitarbeiterinsetzbarkeit. In: H. Gerhäuser, W. A. Günther, F. R. Lang, G. Reinhart und K. Schilling (Hrsg.): Altersgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik. München: Bayerischer Forschungsverbund FitForAge 2010, S. 79–111.



Reinhart, G.; Spillner, R.; Egbers, J.; Glonegger, M.: Strategien für eine Produktion im demographischen Wandel. In: Bayme vbm (Hrsg.): Tagungsband FitForAge-Kongress 2010 - Produktionsstrategie 2020. Arbeitsplätze der Zukunft vor dem Hintergrund des demografischen Wandels. München, 10.11.2010. München: bayme vbm 2010, S. 11–16.

Reinhart, G.; Spillner, R.; Egbers, J.; Schilp, J. (2010): Individualisierung an Montagearbeitsplätzen. Konzeption und Auslegung flexibel individualisierbarer Arbeitsplätze in der Montage. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 9, S. 665-669.

Reinhart, G.; Spillner, R.: Roboterassistenz in der Produktion. In: Institut für Mechatronische Systeme ZHAW (Hrsg.): Tagungsband Internationales Forum Mechatronik 2010. Winterthur. ZHAW, Institut für Mechatronische Systeme. Winterthur: Peter Gehring AG 2010, S. 3–22.

Spillner, R.; Leutert, F.; Reinhart, G.; Schilling, K.: Roboterunterstützung an manuellen Arbeitsplätzen. In: FitForAge Forschungsverbund der Bayerischen Forschungsförderung (Hrsg.): FitForAge Abschlussbericht 2010. S.110-118.

## **2011**

Reinhart, G.; Spillner, R.; Shen, Y.; Schilp, J.: Anwendung und Ansätze für die ortsflexible Roboterassistenz in der Produktion. In: Cluster Mechatronik & Automation (Hrsg.): Internationales Forum Mechatronik 2011. Cham, 21. - 22. September 2011, Session 9.3.

Reinhart, G.; Ehinger, C.; Philipp, T.; Schilp, J.; Shen, Y.; Spillner, R.; Thiemann, C.: Novel automation technologies for an efficient production of fiber reinforced plastics (FRP) structures at a glance. In: SAMPE EUROPE Conference Management (Hrsg.): SAMPE EUROPE TECHNICAL CONFERENCE - SETEC 11. Leiden, Holland, 14-16.09.2011. Basel: SAMPE Europe Conferences 2010, S. 411-418.

Leutert, F.; Spillner, R.; Schilling, K.; Reinhart, G.: Ein roboterbasiertes Assistenzsystem zur Entlastung von Arbeitern in der Industriemontage. In: BMBF; VDE e.V.; AAL Association; VDE/VDE/IT (Hrsg.): Technik für ein selbstbestimmtes Leben (AAL 2012), Tagungsbeiträge vom 5. Deutscher AAL-Kongress mit Ausstellung, 24. - 25. Januar 2012. Berlin. ISBN 978-3-8007-3400-9.

Spillner, R.; Krug, S.: Roboter in industriellen Anwendungen – Der Bereich Robotik stellt sich vor! iwb newsletter (2011) 4., S. 2.

## **2012**

Leutert, F.; Spillner, R.; Schilling, K.; Reinhart, G.: Ein roboterbasiertes Assistenzsystem zur Entlastung von Arbeitern in der Industriemontage. In: VDE (Hrsg.): Tagungsband zum fünften Deutschen AAL-Kongress 2012 "Technik für ein selbstbestimmtes Leben". ISBN 978-3-8007-3400-9.

Reinhart, G.; Shen, Y.; Spillner, R.; Schilp, J.: Modellbasiertes MRK-Sicherheitssystem. Ein Ansatz für das sichere automatisierte Fügen in der Mensch-Roboter-Kooperation. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 6, S. 425-430.

Reinhart, G.; Spillner, R.; Shen, Y.: Approaches of Applying Human-Robot-Interaction-Technologies to Assist Workers with MSD in Production. In: Chun-Yi Su, Subhash Rakheja und Honghai Liu (Hrsg.): ICIRA 2012 - International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 74-84.

### **2013**

Shen, Y.; Spillner, R.; Reinhart, G.: Hybride Systeme – Arbeitsplätze der Zukunft. Nachhaltige und flexible Produktivitätssteigerung in hybriden Arbeitssystemen. In: wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 6.

Kaltenbrunner, S.; Spillner, R.: Untersuchungen zur Akzeptanz von Handhabungsgeräten. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 108 (2013) 4.

### **2014**

Spillner, R.: Pick-By-Wire. Funktion, Auslegung und Eigenschaften eines Moduls zur kollaborativen Objekthandhabung durch Mensch und Roboter. E-Book. Herbert Utz. 2014. ISBN: 978-3-8316-7029-1

Spillner, R.; Reinhart, G.: Pick-By-Wire\*. Ein Modul zur robotergestützten Handhabungsassistenz. In: wt Werkstattstechnik online 104 (2014) 9, S.541-545.

## **VORTRÄGE**

### **2009**

Spillner, R. (2009): Mensch und Roboter – Kooperation in der Montage. Vortrag auf dem 6. Technologie-Forum Robotik am 31.03.2009 am TCW in Nördlingen.

### **2010**

Spillner, R. (2010): Einsatzpotenziale Aml-basierter Technologien zur individuellen Belastungsdosimetrie. Vortrag auf der BAuA Tagung Aml und Arbeitswissenschaft – Chancen und Risiken neuer I&K-Technologien in der Arbeitsumgebung. Dortmund, 15.01.2010.

Schilp, J.; Egbers, J.; Spillner, R.: Bayerischer Forschungsverbund FitForAge Themenfeld „Menschen bleiben länger im Arbeitsleben“. Vortrag beim ZVEI Bayern AK Personal am 09.02. 2010.

Spillner, R. (2010): Robotergestützte Integration leistungsgewandelter Montagemitarbeiter. Vortrag auf dem Doktorandenseminar des iwB der TUM. Garching, 12.7.2010

Reinhart, G.; Spillner, R.: Ambient Assistive Technologies at Work - current and future topics. 13.10.2010.

**2011**

Spillner, R.: Robotergestützte Integration Leistungsgewandelter in der Produktion. Vortrag auf dem Doktorandenseminar des iwv der TUM. Garching, 21.11.2011.

**2012**

Spillner, R.; Eschey, C.: Autarkes Greifen :: Quickpick. Patenttag der Bayerischen Patentallianz, Haus der bayerischen Wirtschaft, München, 17.10.2012.

**ERFINDUNGSMELDUNGEN UND SCHUTZRECHTMELDUNGEN**

Griebel, S., Spillner, R., Bessler, P., Klee, S., Haueisen, J., Zentner, L., Zano, F.: Vorrichtung und Verfahren zum Positionieren, Halten und Manipulieren von Sensoren auf der Oberfläche eines biologischen Objektes. Vom 01.07.2009 unter Aktenzeichen 10 2009 032 246.9

Spillner, R.; Eschey, C.: Autarker Greifer. Deutsche Patentanmeldung unter Aktenzeichen 10 2011 082 211.9, Internationale Patentanmeldung unter PCT/EP2012/067358.

Spillner, R.: Pick-By-Wire. Erfindungsmeldung. 16.02.2011

Spillner, R.: Smart Powertool. Erfindungsmeldung. 08.04.2011

Spillner, R.; Krol, T.A.: Verfahren und Vorrichtung für ein strahlbasiertes und/oder formenloses Tiefziehen. Erfindungsmeldung. 02.02.2012



# Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag  
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen  
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen  
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand  
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik · Durch Innovation schnell und flexibel am Markt  
100 Seiten · ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion – Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing · Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik · Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten · ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten · ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik · Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten · ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld · Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten · ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 · Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten · ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltpeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltpeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag,  
Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden  
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heilmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schliffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmekanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehmer:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teielbereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fahrer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräserter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingner:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohn:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9



- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgessysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schickenrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrensbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmekanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transientser Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungsoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schweißrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten · ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten · ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten · ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sanja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten · ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irrenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spannenden Werkzeugmaschinen  
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation  
198 Seiten · ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen  
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahner:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)  
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärrens  
128 Seiten · ISBN 978-3-8316-4448-3

