

HERBERT UTZ VERLAG WISSENSCHAFT

FORSCHUNGSBERICHTE

296

Rüdiger Spillner

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

Rüdiger Spillner

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

Herbert Utz Verlag · München 2015

Forschungsberichte IWB
Band 296

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7114-4 Version: 1 vom 18.03.2015
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4450-6
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

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

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

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Formelzeichen	V
Verzeichnis der Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
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
2 Integration Leistungswandelder	6
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 Einsatzbeschränkungen	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
3 Mensch-Roboter-Kooperation und Roboterassistenz	35
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
4	Möglichkeiten robotergestützter Assistenz innerhalb betrieblicher Maßnahmen	77
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
5	Planung von Roboterassistenz	99
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
6	Beispielhafte Anwendung des Vorgehens	141
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
7	Resümee	165
8	Literaturverzeichnis	168
9	Anhang	A-1
9.1	Vergleich Montageplanungsverfahren	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
10	Studienarbeiten	A-40
11	Veröffentlichungen	A-42

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	-	Index zur Zuordnung von Arbeitsplatz, -aufgabe, -schritt
\ddot{a}	[m/s ²]	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
$C_1 \dots C_n$	-	Konstanten für die Regelparаметer 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

Verzeichnis der Formelzeichen

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-Arbeitstägigen-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.

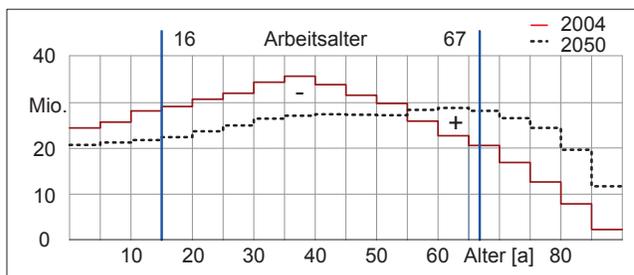


Abbildung 1: Alterskohorten der EU-25 nach EK RSDA (2007)

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 Einsatzbeschränkungen einer Produktionsbelegschaft, interpoliert nach DUBIAN (2009)

Ältere weisen mehr Fehltag 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 schmerzhaft 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 Einsatzbeschränkungen, 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 Einsatzbeschränkungen an zuvor für sie geeigneten Arbeitsplätzen führen und nicht den Grad einer Behinderung erreichen. Leistungsgewandelte sind Personen, die mindestens einer Leistungswandlung unterliegen.

Einsatzbeschränkungen sind Eigenschaften von Arbeitspersonen, die die Verwendung dieser Arbeitspersonen an bestimmten Arbeitsplätzen ausschließt, für die sie sonst verwendbar wären. Einsatzbeschränkungen 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 Einsatz einschränkungen 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 Einsatz einschränkungen 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 Gefährdungsmerkmale	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, Schwergängigkeit von Handhabungsgeräten, ungünstige Ausführungsbedingungen
Körperhaltung	Stehen, Sitzen, Beugen, Knien, Liegen; Überkopf-, Über-schulterarbeit; Belastung von Nacken, Handgelenk; Beweglichkeit von Arm, Rumpf, Kniegelenk;	Schlechte Zugänglichkeit, Sicht, Arbeits-höhe; Entfernung und Position von Bereit-stellungsbehältern;
Sensomotorik	Präzision, Positioniergenauigkeit z.B. beim Ziehen, Schieben; Fingerbelastung	Sehr große, sehr kleine Objekte, hohes Objektgewicht; Objektverhalten im Haufwerk; Erschwerungen durch Schutz aus-rüstung; Schwergängigkeit, Trägheit von Handhabungsgeräten; schlechte Sicht; monotone, schnelle oder hochfrequente Tätigkeit

Zeitregime	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 mitarbeiterunspecifische 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.