



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Entwicklung einer Bewertungsmethode zur Auswahl kollaborierender Roboter für Cyber-Physikalische Montagesysteme

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Hold

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Clemens Leidl

0925383 (066 482)

Kefergasse 22/2/3

1140 Wien

Wien, im Februar 2016

Clemens Leidl



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Februar 2016

Clemens Leidl

Danksagung

Ich möchte mich herzlichst bei meinen Studienkollegen, Freunden und meiner Familie bedanken, die mir im Zuge dieser Arbeit ein offenes Ohr geliehen haben und mit aufmunternden Worten zur Seite gestanden sind.

Meinem Betreuer, Philipp Hold, bin ich nicht nur für die Geduld und die genaue Korrekturarbeit, sondern auch für die Möglichkeit ein so aktuelles Thema bearbeiten zu können zu Dank verpflichtet.

Hervorheben möchte ich auch meine Kollegen bei Fraunhofer Austria, Christoph Biegler, Henrik Gommel und Peter Schieder, die mit ihrem Engagement mir die nötige Motivation in der Endphase der Arbeit gegeben haben.

Kurzfassung

Die Montage nimmt eine besondere Stellung in den Entwicklungen der Industrie 4.0 ein. Aufgrund ihrer Marktnähe müssen Montagesysteme veränderungsfähig gestaltet sein. Dem wird im Zuge der Industrie 4.0 mittels Cyber-Physikalischer Systeme (CPS) begegnet. Diese Systeme zeichnen sich durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) aus und führen zu einer steigenden Vernetzung von Mensch, Maschine und Organisation. Vom Einsatz dieser in der Montage stammt der Begriff Cyber-Physikalischer Montagesysteme (CPMS). Stellvertretend hierfür können visuelle Werkerassistenzsysteme und kollaborierende Roboter genannt werden. Dabei ist es schwer aufgrund komplexer Einsatzmöglichkeiten den konkreten Nutzen solcher Systeme abzuschätzen. Auf Betriebsmittelebene liefert die fach einschlägige Literatur hierzu keine Hilfestellung. Daraus ergibt sich die Zielstellung der vorliegenden Arbeit. Es wird eine praxisnahe Bewertungsmethodik, welche der Auswahl der geeignetsten CPS-Lösung für ein betrachtetes Einsatzgebiet am Beispiel kollaborierender Roboter dient, entwickelt. Anhand von Literaturrecherchen werden aktuelle Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen im Bereich Montage und CPS erarbeitet. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen der Ableitung von Anforderungen an die Bewertungsmethodik. Diese Anforderungen fungieren zur Identifikation für die Zielstellung in Frage kommender Methoden aus der Literatur und der Bewertung hinsichtlich ihrer Eignung. Daraus resultiert eine Kombination aus einer qualitativen, multikriteriellen Methodik, wie dem Quality Function Deployment (QFD) oder der Nutzwertanalyse, mit einer monetären Betrachtung als geeignete Vorgehensweise. Die darauf aufbauende entwickelte Methodik wird im Zuge einer Validierung auf Plausibilität und Erfüllung der entwickelten Anforderungen geprüft. Trotz höherem Aufwand gegenüber der Nutzwertanalyse hat sich der Einsatz einer adaptierten QFD-Methodik aufgrund erhöhter Objektivität und der Möglichkeit einer differenzierteren Betrachtung bewährt. In zukünftigen Arbeiten wird es erforderlich sein, die Methodik im Feld zu evaluieren und auf weitere Anwendungsgebiete auszuweiten. Dadurch kann der konkrete Nutzen von CPS im Vergleich zu konventionellen Alternativen dargestellt werden.

Abstract

Assembly occupies a special position in the development of Industrie 4.0. Due to the proximity to the market, assembly systems must be designed capable of change. In course of Industrie 4.0 this is encountered by using cyber-physical systems (CPS). These systems are characterized by the use of Information and Communication Technology (ICT) and lead to increased integration of man, machine and organization. The usage of such systems in assembly leads to the term cyber-physical assembly systems (CPMS). CPMS are represented by visual assistant systems and collaborative robots. Due to complex applications it is difficult to assess the benefits of such systems. For this assessment the relevant literature provides no assistance on the operating level, leading to the aim of this thesis. A practically oriented assessment methodology is developed, which is used to select CPS, and is executed in the example of collaborative robots. Based on the literature review, current challenges and future developments in the field of assembly and CPS are identified. The lessons learned are used to derive requirements on the assessment methodology. These requirements serve to identify relevant assessment methodologies targeting the objective of this thesis and help in evaluation of their suitability. The result is a combination of a qualitative, multi-criteria methodology – as the Quality Function Deployment (QFD) or the cost-utility analysis – with monetary considerations as a suitable procedure. The developed methodology is examined in the course of a validation for plausibility and compliance with the mentioned requirements. Despite higher efforts in executing the methodology compared to the cost-utility analysis, the use of an adapted QFD methodology has proven to match the requirements in a better way. This is due to increased objectivity and the ability to serve as a tool for a better differentiation of the observed alternatives. In future work it will be necessary to evaluate the methodology in the field and extend it to other areas of application. This allows for a representation of the benefits of CPS compared to conventional alternatives.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Ausgangssituation.....	3
1.2	Problemstellung	4
1.3	Zielsetzung	5
1.4	Methodische Vorgehensweise	6
2	Grundlagen der Montage	8
2.1	Definition und Funktionen der Montage	8
2.2	Erweiterter Kontext der Montage	13
2.3	Betriebsmittel in der Montage	15
2.4	Aktuelle Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen in der Montage	21
3	Grundlagen Cyber-Physikalischer Systeme.....	24
3.1	Begriffsabgrenzung: Technologie, Technik und Innovation	24
3.2	Klassifikation CPS.....	25
3.3	Beschreibung und Strukturierung von CPMS am Beispiel kollaborierender Roboter	26
3.4	Detailbetrachtung von CPMS am Beispiel ausgewählter kollaborativer Roboter	32
3.5	Aktuelle Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen von CPMS am Beispiel kollaborierender Roboter	41
4	Methoden zur Bewertung von Betriebsmitteln	43
4.1	Anforderungen an Methoden zur Bewertung und Auswahl von Produktionsmittel in der Montage.....	44
4.2	Ausgewählte Methoden	46
4.2.1	Monetäre Bewertung	51
4.2.2	Nutzenbewertung	53
4.2.3	Duale Bewertung	54
4.3	Eignung der Methoden.....	55
5	Entwicklung der Bewertungsmethodik	57
5.1	Konzeptentwicklung	57
5.2	Konkretisierung des Einsatzgebietes	59
5.3	Zielkatalog der Anforderungen an die kollaborierenden Roboter.....	65

5.4	Technische Spezifikationen von CPMS	67
5.5	Korrelationen der Zielgrößen mit den Spezifikationen	67
5.6	Ausprägung der Spezifikationen der alternativen kollaborierenden Robotern	72
5.7	Monetäre Bewertung.....	74
5.8	Duale Bewertung	76
6	Validierung der Bewertungsmethodik	78
6.1	Validierung der Nutzenbewertung.....	78
6.1.1	Szenario 1 – Komplexer Arbeitsablauf und enge Zusammenarbeit mit dem Menschen	78
6.1.2	Szenario 2 – Flexibler Einsatz und einfache Bedienung.....	82
6.1.3	Szenario 3 – Zwischenszenario.....	85
6.2	Validierung der monetären Bewertung und der Endbewertung	88
6.3	Fazit	90
7	Schlussbemerkungen	92
7.1	Zusammenfassung	92
7.2	Ausblick	96
8	Abbildungsverzeichnis	98
9	Tabellenverzeichnis	100
10	Abkürzungsverzeichnis	101
11	Literaturverzeichnis.....	102

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Industrieunternehmen in Hochlohnländern agieren in volatilen und komplexer werdenden Märkten. Dabei müssen die Strukturen der Organisationen auf die beschleunigten Marktdynamiken zeitgerecht und auf geeignete Weise reagieren können. Eine Herausforderung stellt dabei eine Dynamisierung der Produktlebenszyklen dar. Die angesprochenen Unternehmen sind gefordert Produkte in kürzer werdenden Zeiträumen und in einer steigenden Variantenzahl auf den Markt zu bringen. Dem kann mit verkürzten Produktentwicklungszeiten und einer schnellen Anpassung und Neuorganisation der Produktionssysteme begegnet werden. (u.a. Abele und Reinhart 2011; Wiendahl et al. 2009).

Im Kontext der Industrie 4.0 soll den dargestellten Herausforderungen durch die Einführung von Cyber-Physikalischen Systemen (CPS) begegnet werden. Industrie 4.0 bezeichnet den Einzug von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in die Fabrikhalle. Cyber-physikalische Systeme sind „...offene soziotechnische Systeme, die durch die hochgradige Vernetzung der physikalischen, sozialen und virtuellen Welt sowie durch die intelligente Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien entstehen“ (Geisberger et al. 2012, S. 17). Dabei wird unter soziotechnischen Systemen eine Vernetzung menschlicher Handlungssystemen mit technischen Sachsystemen verstanden (Eßer 2015).

Montagesysteme stehen am Ende der Wertschöpfungsketten. Aufgrund der daraus resultierenden Marktnähe werden solche Systeme von den eingangs angeführten Aspekten am stärksten beeinflusst (Auerbach et al. 2011, S. 917; Spath 2013, S. 12–14). Die Durchführung der Montageaufgaben durch CPS führt zu Cyber-Physikalische Montagesysteme (CPMS). Durch diese lassen sich nicht nur Kriterien wie Kosten, Durchlaufzeiten, Bestände und Ressourcenverbrauch sondern auch einer altersgerechten, ergonomischen und lernförderlichen Montagegestaltung optimieren¹. Der Montagemitarbeiter wird dabei zunehmend durch technische Assistenzsysteme, wie kollaborierende Roboter und digitale Assistenzsysteme in Echtzeit unterstützt. CPMS ermöglichen eine flexible Umgestaltung und Erweiterbarkeit und werden zunehmend selbst regulierend und steuernd agieren (Geisberger et al. 2012; Spath 2013, S. 18).

¹ Siehe UR:

http://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20141211_OTS0028/produktivitaetssteigerungen-durch-ergonomische-arbeitssystem-gestaltung-und-cyber-physikalische-montagesysteme (16.01.2016).

1.2 Problemstellung

Hirsch-Kreinsen (2015) zufolge wird in der einschlägigen sozialwissenschaftlichen Literatur übereinstimmend davon ausgegangen, dass allein eine komplementäre Systemauslegung zu einer optimalen Ausschöpfung der Potentiale von Cyber-physikalischen Systemen führt. Durch solch ein Automatisierungskonzept werden die Funktionsfähigkeit und eine hinreichende Kontrollierbarkeit komplexer Anlagen durch eine Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine realisiert. Hirsch-Kreinsen führt weiter aus, dass die Einführung solche „Industrie 4.0-Systeme“ jedoch von einer lang laufenden Einführungs- und Anfahrphase geprägt sein wird. In dieser werden zunächst nur autonome Insellösungen technologisch realisierbar sein. Dies wird unter Umständen in einem langwierigen und aufwendigen wechselseitigen Abstimmungsprozess zwischen den neuen Systemen und den bestehenden betrieblichen Bedingungen resultieren (Hirsch-Kreinsen 2015).

Dies führt zu der Schwierigkeit einer unternehmensindividuellen Adaption von CPMS für anwendende Unternehmen mit den in der Literatur vorhandenen herkömmlichen Planungs- und Steuerungsmethoden (Schenk et al. 2014, S. 90; Bildstein und Seidelmann 2014, S. 581 ff.). Einerseits erschweren konventionelle Montageplanungsvorgehensweisen eine aufwandsarme Planung veränderungsfähiger Montagesysteme (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 40–41), andererseits wird der Montageplaner durch diese Systematiken nicht befähigt die Vorteile von CPMS auf Stations- bzw. Arbeitsplatzebene (SA-Ebene) gegenüber konventionellen Technologien qualitativ und quantitativ zu bewerten und diese dadurch in der Planung zielführend zu berücksichtigen. Als Beispiel können hierfür Lotters (2012a, S. 3) und Pachow-Frauenhofers (2012) Ausführungen angeführt werden.

Lotter führt als Auswahlkriterien für automatische, halbautomatische und manuelle Montagesysteme die drei Dimensionen Investment, Flexibilität und Losgröße an. Demnach erfordert die automatische Montage große Stückzahlen und hohe Investitionen und schränkt die Flexibilität stark ein. Dies steht in Kontrast zu den Entwicklungen im Kontext der Industrie 4.0, in dem Automatisierung und Flexibilität nicht mehr im Widerspruch zu einander stehen (Müller-Dauppert 2014, S. 30). Pachow-Frauenhofer erstellt eine Planungsmethode für Montagesysteme basierend auf der Life-Cycle-Cost Methode mit zugrunde liegender Kapitalwertmethode und unter Berücksichtigung der Dimension der Veränderungsfähigkeit von Systemen. Dadurch wird eine Ausrichtung von Montagesystemen anhand von Wandlungsbefähigern ermöglicht. Unter Wandlungsbefähigern wird in der fach einschlägigen Literatur „... eine individuelle, ungerichtete, abrufbare Eigenschaft eines Wandlungsobjektes zum Wandel“ (Hernández Morales 2003, S. 54) verstanden. Im wissenschaftlichen Diskurs finden die Wandlungsbefähiger

Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität die meiste Verbreitung (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 25). In Ihren Ausführungen ist Pachow-Frauenhofer dabei bemüht, einen Bogen in die Praxis zu schlagen. Es fehlt jedoch an einer detaillierten Betrachtung auf SA-Ebene, um Technologien anhand ihrer Eignung für das geplante veränderungsfähige Montagesystem zu bewerten und die geeignetste zu wählen. Einschlägige Literatur, die sich gezielt mit Betriebsmitteln und Robotern auf SA-Ebene befassen, enthalten keinen speziellen Fokus auf CPMS und bieten keine Systematiken, um diese für eine zu treffende Investitionsentscheidung zu bewerten und deren konkreten Nutzen den die erwähnten Eigenschaften dieser neuartigen Betriebsmittel mit sich führen abschätzen zu können. (Karl 2014; Spillner 2015; Naumann und Fechter 2015; Müller 2008).

1.3 Zielsetzung

Im Zuge der Planung von Montagesystemen gilt es ein System zu gestalten, dass Eigenschaften, wie eine bestimmte Ausprägung an Wandlungsfähigkeit, aufweist, mit denen den Anforderungen auf dem Markt begegnet werden kann (Pachow-Frauenhofer 2012). Die Eigenschaften von (Montage-) Systemen ergeben sich aus den Systemelementen und deren Verknüpfung (u.a. (Wiendahl et al. 2009; Pachow-Frauenhofer 2012)). Betriebsmittel und Menschen stellen dabei die Systemelemente bei einer Betrachtung auf SA-Ebene dar. Unter Betriebsmittel wird die Gesamtheit an Einrichtungen, Geräte und Anlagen verstanden, die der Erfüllung der Produktionsaufgabe dienen (Wiendahl et al. 2009, S. 177). Verknüpft sind die Systemelemente durch Organisation und dem Fluss von Material, Energie, Information und Kommunikation (Wiendahl et al. 2009). Im Zuge der Planung solcher soziotechnischer Systeme werden Anzahl und Ausprägung der Bestandteile und deren Zusammenspiel erarbeitet.

Diese Kriterien müssen durch soziotechnischen Lösungsalternativen auf SA-Ebene erfüllt werden. Dabei stehen einerseits konventionelle Lösungsansätze zur Verfügung, deren Anwendung erprobt ist. Andererseits stellen CPS-Technologien neu aufkommende Alternativen dar, deren konkreter Nutzen schwer einzuschätzen ist. Diese Technologien bieten durch den Einfluss von IKT Eigenschaften aus denen neue Einsatzgebiete für Betriebsmittel resultieren. Jedoch geht mit dem steigenden Einsatz von IKT auch ein Komplexitätsanstieg der Systeme und fehlendes Praxiswissen bei der Anwendung einher. Beispielsweise bieten neu am Markt erhältliche kollaborierende Roboter die Möglichkeit direkt mit dem Menschen zusammenzuarbeiten, sind durch ihre einfache Programmierbarkeit und ihr geringes Eigengewicht flexibel einsetzbar und bieten dies zu immer geringeren Anschaffungskosten. Beschränkt sind diese Produkte durch geringere Traglasten und Prozessgeschwindigkeiten. Dies führt zu einer fehlenden Transparenz hinsichtlich des geeigneten Einsatzgebietes.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen ersten Schritt in diesem Spannungsfeld zu unternehmen. Es wird eine Bewertungsmethodik entwickelt, die technische Spezifikationen von CPS analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für einen konkreten Anwendungsfall bewertet. Um eine praxisnahe Vorgehensweise zu erstellen, dienen kollaborierende Roboter in der Montage als Anwendungsszenario. Die Gegenüberstellung alternativer Produkte derselben Produktklasse ermöglicht eine für die Anwendung nötige Betrachtungstiefe. Zukünftige Arbeiten können darauf aufbauend Analysen von CPS unterschiedlicher Produktklassen und anderweitige soziotechnische Alternativen für den betrachteten Anwendungsfall durchführen. Daraus resultiert die Möglichkeit den konkreten Nutzen von CPS im Vergleich zu konventionellen Lösungen darstellen zu können.

1.4 Methodische Vorgehensweise

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut. In Kapitel 2 liegt der Fokus auf der Darstellung der theoretischen Grundlagen der Montage. Es wird die Funktion von CPMS und der Kontext in dem sich diese befinden anhand von Literaturrecherchen erarbeitet. Ein besonderes Augenmerk gilt der Betrachtung von Betriebsmitteln in der Montage und deren Ausführungsformen in Praxis zufolge verschiedener Montagestrukturen und Organisationsformen. Im darauffolgenden Kapitel 3 werden CPS am Beispiel kollaborierender Roboter näher definiert. Die Roboter werden mittels Internetrecherche und Herstellerangaben einer Detailanalyse unterzogen. Dabei werden vier alternative Modelle gleicher Produktklasse für ähnliche Anwendungsgebiete identifiziert und für die weiterführenden Betrachtungen gewählt. Die in diesen beiden Kapiteln erarbeiteten aktuellen Herausforderungen und zukünftigen Entwicklungen dienen der Entwicklung von Anforderungen für die zu entwickelnde Methodik. Mit deren Hilfe werden geeignete Methoden zur Erfüllung der Zielsetzung in der fach einschlägigen Literatur identifiziert und die Eignung dieser Methoden überprüft. Diese stellen den Anfang von Kapitel 4 dar indem die relevanten Methoden einer Analyse unterzogen werden. Aus diesen Betrachtungen resultiert der Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Bewertungsmethodik. Diese wird in Kapitel 5 im Detail dargestellt. Die Methodik wird anhand von drei fiktiven Szenarien in Kapitel 6 angewendet und validiert. Anhand der Erkenntnisse aus den Grundlagen der Kapitel 2 und 3 sind die Szenarien so gestaltet, dass im Vorfeld definierte Ergebnisse erwartet werden können. Anhand unerwarteter Abweichungen von diesen Erwartungen wird die Bewertungsmethodik einer kritischen Betrachtung unterzogen. In Kapitel 7 wird die Vorgehensweise der gesamten Arbeit abschließend zusammengefasst und ein Ausblick für Maßnahmen und zukünftige Arbeiten gegeben.

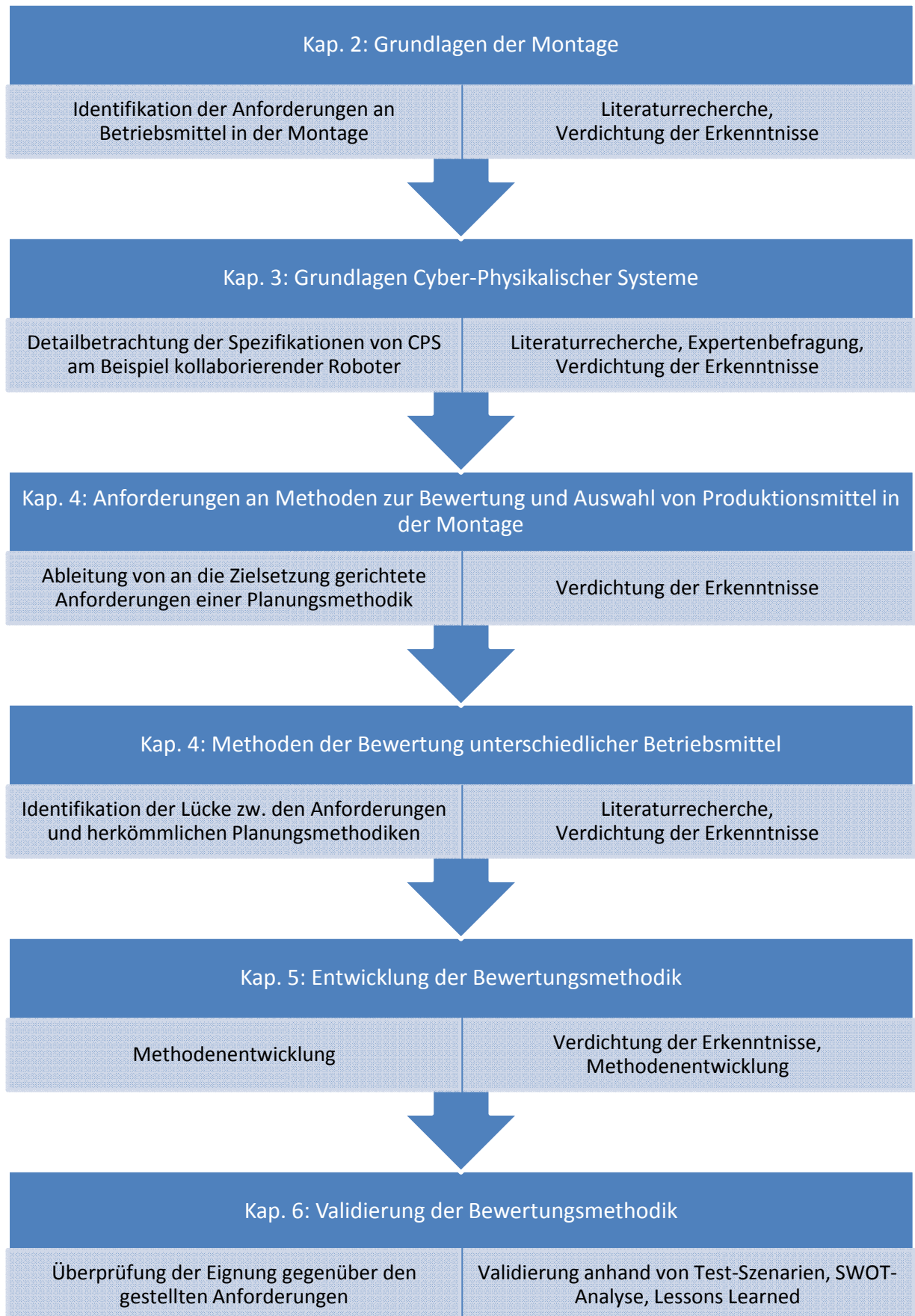


Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise – Ziele (links) und eingesetzte Methoden (rechts) der jeweiligen Kapitel

2 Grundlagen der Montage

Anhand dieses Kapitels wird der Begriff der Montage sowie der Funktion innerhalb eines ganzheitlichen Produktionskontextes betrachtet. Der erweiterte Kontext – in dem sich Arbeitsstationen befinden und eine Aufstellung jener Fabrikobjekte, die dem Arbeitsplatz zugeordnet werden können und derer, die diesen beeinflussen – wird gegeben. Die unterschiedliche Ausgestaltung der Betriebsmittel in der Montage hinsichtlich existierender Montageprinzipien wird erläutert und daran anschließend werden Spezifika der Montage, die diese von der Fertigung unterscheiden angeführt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit aktuellen Herausforderungen in der Montage im Kontext zukünftiger Produktionsanforderungen und deren Auswirkungen auf die Betriebsmittel auf Arbeitsplatz- bzw. Stationsebene.

2.1 Definition und Funktionen der Montage

Der Begriff der Montage ist nicht genormt, wird aber in der VDI-Richtlinie 2860 als Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen, definiert. Es werden Einzelteile, Baugruppen und formlose Betriebs- und Hilfsstoffe zu einem funktionsfähigen Produkt vereint. Dies wird durch ebenfalls in der VDI-Richtlinie 2860 definierte Funktionen realisiert. Darunter fallen **Fügen**, **Handhaben**, **Kontrollieren** im Sinne der Qualitätsprüfung, **Justieren** und **Sonderoperationen**. Unter dem Justieren wird die geometrische Feineinstellung funktional in Beziehung stehender Teile einer Baugruppe verstanden. „Es ist oft ein Zusammenspiel aus den Funktionen Messen, Prüfen, Kontrollieren und anderer Handhabungsfunktionen“ (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 130). Unter Sonderoperationen versteht man laut Pachow-Frauenhofer (2012, S. 130) im Wesentlichen Funktionen zur Montagevorbereitung. Eine detaillierte Auflistung ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Montagefunktion – Sonderoperation nach Lotter (2012a, S. 2)

Markieren	Reinigen	Abdecken	Ölen
Erwärmen	Entgraten	Abziehen	Einsprühen
Kühlen	Bedrucken	Auspacken	Abdichten

Das Fügen und das Handhaben können als die Kernfunktionen der Montage betrachtet werden, da die notwendigen Stationen zur Ausführung der anderen Funktionen sich aus Sicht der Fabrikplanung nicht von einer Fügestation unterscheiden (Wiendahl et al. 2009, S. 164). Das Fügen ist eine der in DIN 8593 genormten Hauptgruppe der Fertigungsverfahren und wird selbst in DIN 8593

abgebildet (Abbildung 2). Wiendahl et al. definieren das Fügen unter Rücksichtnahme auf die Norm folgendermaßen:

„Die Verfahrensgruppe Fügen dient in ihren vielfältigen Ausprägungen der unlösbaren oder lösbaren Verbindung von Werkstücken zu komplexen Bauteilen sowie zu Komponenten, Baugruppen und Produkten“ (2009, S. 159).

Des Weiteren führen die Autoren aus, dass die Fügetechnik mit komplexen Bauteilformen, zunehmenden Funktionsansprüchen und steigenden Sicherheitsanforderungen sowie leichter Demontierbarkeit zum Zwecke des Recycling weitere Anforderungen erfährt. Dabei weisen sie darauf hin, dass der Funktion des Kontrollierens während des Fügeprozesses ein besonderes Augenmerk gilt. Es soll während der Prozessdurchführung die Prozesssicherheit durch Messung wesentlicher Prozessparameter sichergestellt werden (Wiendahl et al. 2009, S. 159). Als Beispiele führen die Autoren die Überwachung des Schweißstromes beim Schweißen und die Drehmomentmessung beim Verschrauben an.

Zusammen-setzen	Füllen	An-pressen Ein-pressen	Fügen durch Urformen	Fügen durch Umformen	Fügen durch Schwei-ßen	Fügen durch Löten	Kleben	Textiles Fügen
Auflegen Aufsetzen Schichten	Einfüllen	Schrauben	Ausgießen	Draht-förmiger Körper	Pressver-bindungs-schweißen	Ver-bindungs-weichlöten	mit physi-kalisch ab-bindenden Klebstoffen	
Einlegen Einsetzen	Tränken Imprä-gnieren	Klemmen	Einbetten	bei Blech-, Rohr- und Profiltteilen	Schmelz-ver-bindungs-schweißen	Ver-bindungs-hartlöten	mit chemisch ab-bindenden Klebstoffen (Reak-tionskleb-stoffen)	
In-einander-schieben		Klammern	Vergießen	durch Niet-verfahren				
Einhängen		Fügen durch Press-passung	Eingalvani-sieren					
Einrenken		Nageln Verstiften Ein-schlagen	Um-manteln					
Federnd ein-spreizen		Verkeilen	Kitten					
		Ver-spannen						

Abbildung 2: Gliederung der Fertigungsgruppe Fügen (DIN 8593)

Das Handhaben wird in der VDI-Richtlinie 2860 definiert:

„Handhaben ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung (Orientierung und Position) von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem“ (VDI 2860).

Es stellt neben dem Fördern und Lagern eine Teilfunktion des Materialflusses dar und kann laut Wiendahl et al. (2009, S. 165) gewissermaßen als die Mikrologistik einer Montagestation im unmittelbaren Vorfeld des Fügens aufgefasst werden. Das Handhaben wird in fünf Unterfunktionen geteilt, welche sich wiederum in die so genannten zusammengesetzte Funktionen unterteilen lassen (Abbildung 3). Diese zusammengesetzten Funktionen dienen der vereinfachten Beschreibung von Handhabungsvorgängen und lassen sich auf sieben Elementarfunktionen zurückführen: Teilen, Vereinigen, Drehen, Verschieben, Halten, Lösen und Prüfen. Dabei muss die Kontrollfunktion als Teilfunktion des Handhabens von dem Kontrollieren als Teilfunktion der Montage unterschieden werden. Letzteres wurde bereits als Überprüfung der Qualität des Ergebnisses der Fügeoperation definiert. Bei der Kontrollfunktion im Sinne der Handhabung handelt es sich um das Prüfen handhabungsrelevanter Merkmale, wie sie in Abbildung 3 aufgelistet sind (Wiendahl et al. 2009, S. 165).

Die beschriebenen grundlegenden Montagefunktionen werden an einer Arbeitsstation durchgeführt. Wiendahl et al. (2009, S. 155) beschreiben Arbeitsstationen als den kleinsten Baustein der Prozessgestaltung aus fabrikplanerischer Sicht. Sie stellen den Ablauf und Zusammenhang der Montagefunktionen anhand dieser Betrachtungsebene in einem einfachen praxisbezogenem Grundschema dar (Abbildung 4). Übergeordnete Ebenen stellen die Bereichs-, Fabrik- und Werksebene dar. In Abbildung 4 werden Produkt- und Teilefluss unterschieden. Im Produktfluss werden durch ein Transportsystem der unternehmensinternen Logistik teilmontierte Baugruppen auf einem Werkstückträger von Station zu Station transportiert. Der Werkstückträger erlaubt dabei eine Fixierung und Identifizierung des Montageobjekts. In der Montagestation werden der Fügevorgang, meist gefolgt von einer Qualitätsprüfung durchgeführt. Im Teilefluss wird der Handhabevorgang durch die interne Unternehmenslogistik beliefert (Teilebereitstellung). Die Teile werden lokal in einer definierten Menge gespeichert (Bunkern; Speichern). Aus diesem Haufwerk folgt das Herauslösen einzelner Teile (Vereinzeln; Mengen verändern), welche dann in einer räumlich definierten Lage geordnet (Orientieren; Bewegen) und in einer vorbestimmten Lage am Werkstückträger positioniert werden (Positionierung; Bewegen). Dabei können die Teile in einem Magazin zwischengepuffert werden (Magazinieren; Speichern), um kleinere Störungen und Taktzeitunterschiede überbrücken zu können oder bereits in vorgeordnetem Zustand angeliefert werden. Die hier in Klammer angemerkten Begriffe stellen die Verbindung zu den Teilfunktionen einer Montagestation

(Abbildung 4) und den Handhabeteilfunktionen (Abbildung 3) her (Wiendahl et al. 2009, S. 155).

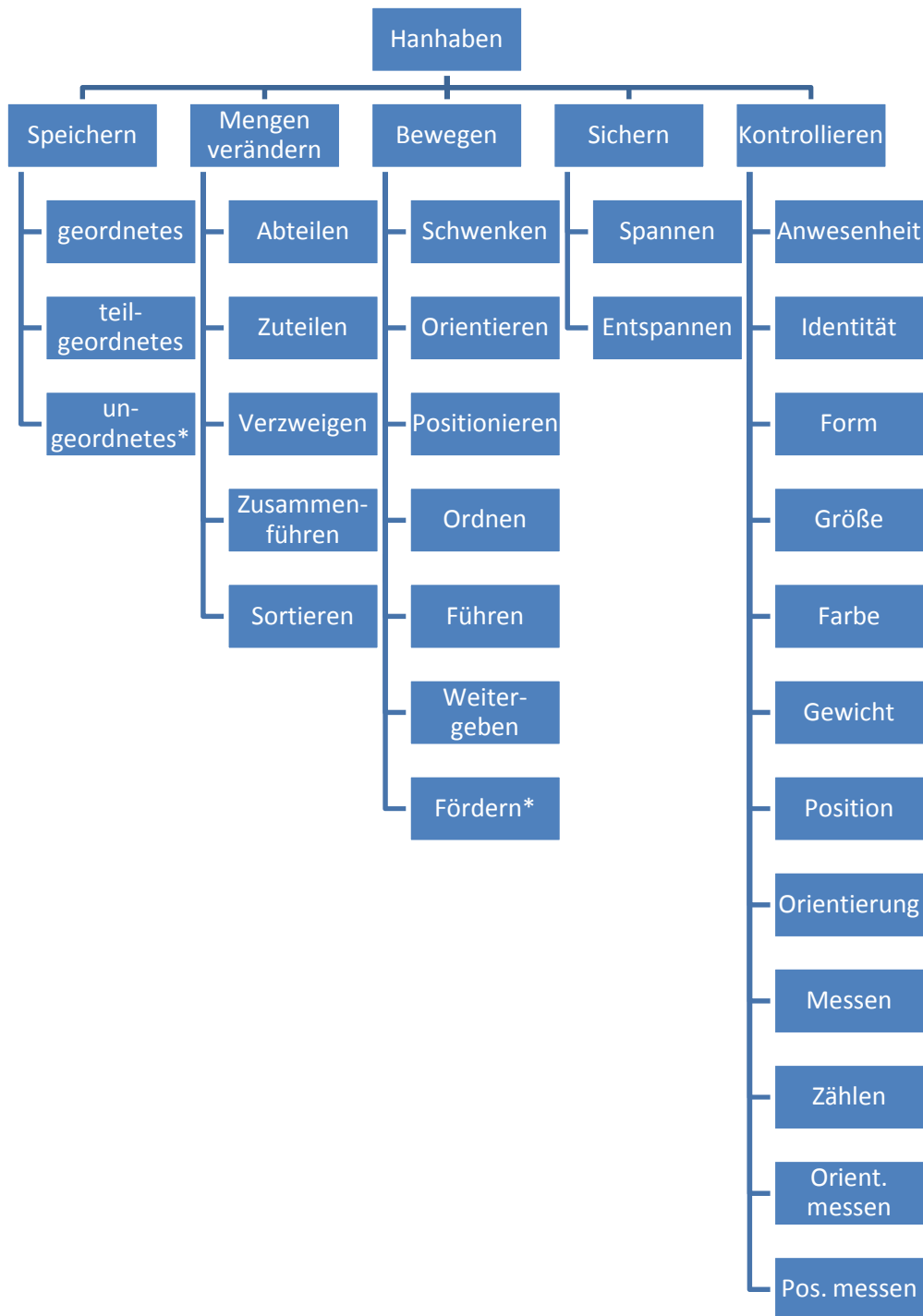


Abbildung 3: Teilfunktionen des Handhabens (VDI 2860)

Zu dieser vereinfachten Darstellung sei Folgendes hinsichtlich des Handhabungssystems und des Produktflusses angemerkt. Das Handhabungssystem umfasst auch Tätigkeiten im Produktfluss. Laut VDI-Richtlinie wird hier explizit von geometrisch bedingten Körpern gesprochen. Das Handhabungssystem kann daher nicht ausschließlich dem Teilefluss zugeordnet werden. Das gezeichnete Bild lässt

jedoch die im Produktfluss ablaufenden Handhabungsvorgänge unberücksichtigt. Die eingehende, bei Bedarf auf einem Werkzeugträger befestigte Baugruppe, muss zuerst aufgenommen, orientiert, positioniert und fixiert werden, um dann wieder gelöst und dem Weitertransport zugeführt zu werden. Darauf wird in Abbildung 5 Rücksicht genommen indem das blaue Handhabungssystem-Feld erweitert wurde, sodass Bereiche der Transportfunktion und die Fügefunktion mit eingeschlossen werden. Ebenso wurden die Handhabungsfunktionen des Sicherns und Kontrollierens ergänzt. Der erwähnte Fixier- und Lösevorgang entspricht der Handhabeteilfunktion Sichern (Spannen, Entspannen), auf den ansonsten nicht explizit hingewiesen worden wäre. Gleiches gilt für die handhabungsbezogene Kontrollfunktion. Die durchführende Prüfeinrichtung liefert nach der Kontrolle handhabungsrelevanter Merkmale ein Signal, dass erst gewisse Operationen, wie z.B. Greifen, Fügen oder den Weitertransport auslöst (Wiendahl et al. 2009, S. 168). Auch wird in Abbildung 5 darauf hingewiesen, dass die Fügestation ebenfalls das Justieren und etwaige Sonderoperationen durchführt (Wiendahl et al. 2009, S. 164). Abschließend gilt für den Produktfluss anzumerken, dass es nicht bei jedem Montageverfahren überhaupt zu einem Fluss kommt. Die in Abschnitt 2.3 näher ausgeführte Baustellen- und Gruppenmontage sind durch ein stationäres Montageobjekt charakterisiert und das Produkt wird daher nur an einer Montagestation zusammengefügt (Lotter 2012b, S. 147 und auch Wiendahl et al. 2009, S. 268).

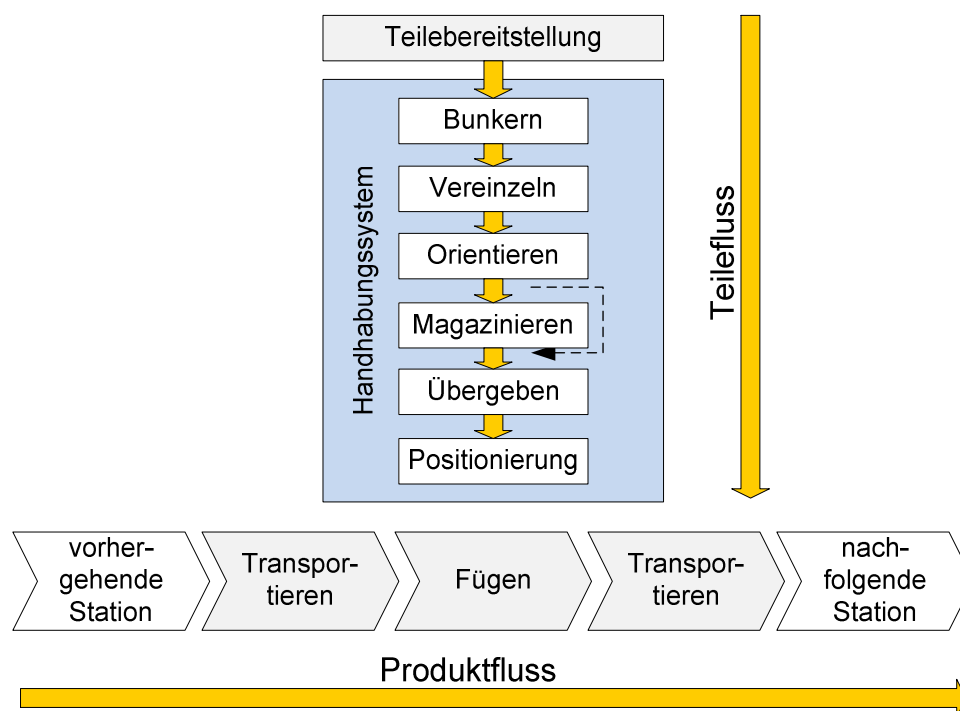


Abbildung 4: Teilfunktionen einer Montagestation (Wiendahl et al. 2009, S. 163)

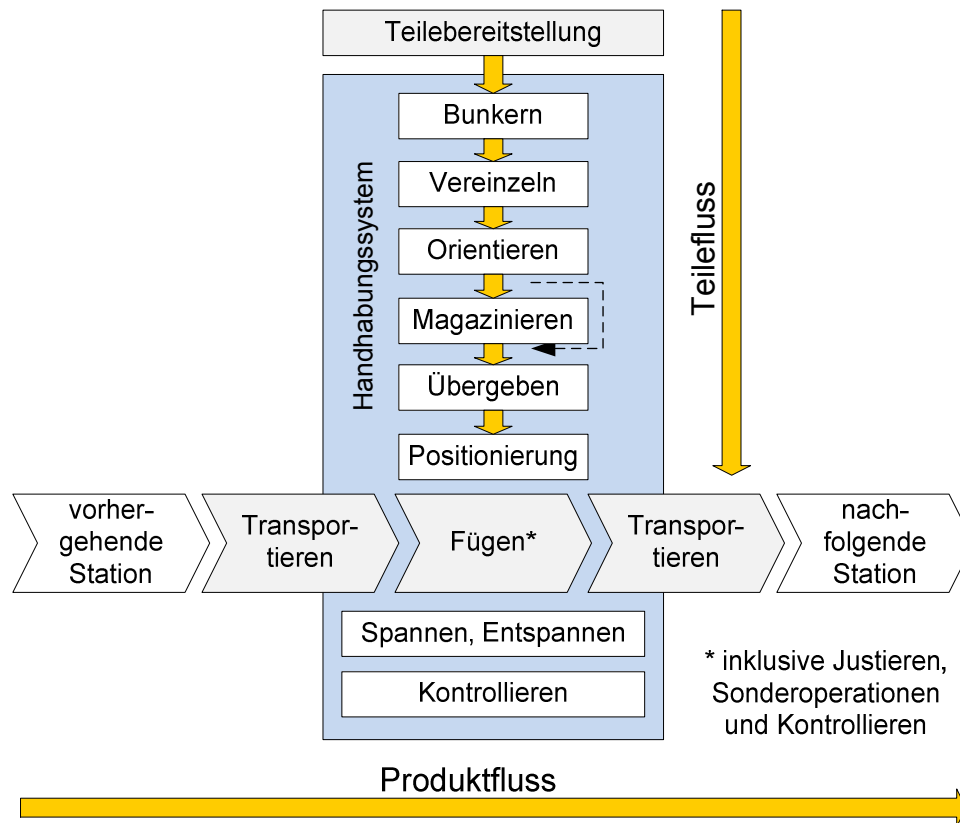


Abbildung 5: Teilfunktionen einer Montagestation – Anpassungen Wiendahl et al.'s Ausführung

2.2 Erweiterter Kontext der Montage

Mit der Betrachtung der Montagefunktionen ist die Kernaufgabe von Montagestationen abgebildet worden. Dabei tauchten bereits ansatzweise Bezüge zu anderen Elementen des Produktionssystems auf. Erwähnt wurden unternehmensinterne Logistikprozesse und andere Arbeitsstationen. Arbeitsstationen als Systemelemente haben zwar allgemein das Ziel „...bei geringstmöglichem Aufwand eine Werterhöhung eines Einzelteils, einer Komponente oder einer Baugruppe zu bewirken“ (Wiendahl et al. 2009, S. 155), ein Gesamtsystem kann aber nur effizient zur Zielerfüllung eines Unternehmens beitragen, wenn nicht nur seine Subkomponenten an sich optimiert, sondern diese auch optimal auf einander abgestimmt sind und Einflüsse aus darüber liegenden Betrachtungsebenen berücksichtigt werden (Wiendahl 2002; Pachow-Frauenhofer 2012, S. 54 und 66; Wiendahl et al. 2009, S. 460; Spath 2013, S. 366). Daher muss bei der Betrachtung von Montagearbeitsplätzen mehr als die Erfüllung der Montagefunktion betrachtet werden. Eine weitere Abbildung von Wiendahl et al. (2009, S. 321) liefert hierzu den umfassenden Kontext und die Bestimmungsgrößen in denen sich Arbeitsstationen befinden (Abbildung 6).

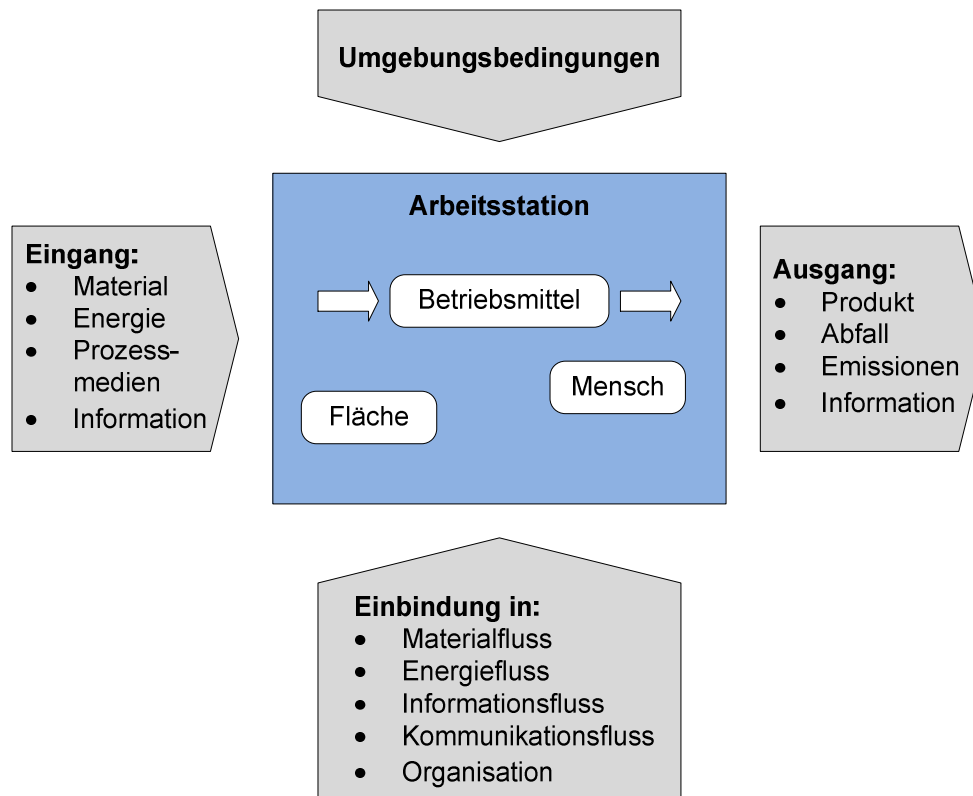


Abbildung 6: Kontext und Bestimmungsgrößen einer Arbeitsstation (Wiendahl et al. 2009, S. 155)

Im Gegensatz zu den Betrachtungen in Abbildung 5 wird hier auf weitere Eingangs- und Ausgangsgrößen hingewiesen, die zwar nicht direkt der Erfüllung der Montagefunktion an sich dienen, jedoch in der praktischen Ausführung unerlässlich sind und darauf hinweisen, wie eine Arbeitsstation in einem Produktionssystem integriert ist. Es wird hier nicht mehr von einem Produkt- und Teilefluss sondern von einem allgemeinen Materialfluss gesprochen. Dieser berücksichtigt neben dem Eingangsmaterial, dass nach der Wertschöpfung zu einem Produkt und Abfall verarbeitet wurde auch die Prozessmedien wie Wasser oder Schutzgas. In (Herrmann 2010, S. 321) wird auch der Ausschuss in die Betrachtung mit einbezogen. Energie in Form von Strom, Dampf, Brenngas und Information in Form von Zeichnungen, Arbeitsplänen, Steuerprogrammen und Arbeitsanweisungen gehen ebenfalls in die Betrachtung mit ein. Der Arbeitsprozess wird durch eine Zusammenarbeit von Mensch und Betriebsmitteln auf einer dafür bereitgestellten Fläche durchgeführt. Die dabei anfallenden Emissionen, wie Lärm, Schwingungen, Wärme, Gase, Stäuben und Dämpfen sind unter gesundheitlichen Aspekten zu beherrschen. Unter Umgebungsbedingungen fallen Aspekte, wie z.B. Klimatisierung, Reinräume, Belüftung, Beleuchtung und Farbgebung. Über die genannten Faktoren aus Abbildung 6 und die dabei abgebildeten Material-, Energie-, Informations- und Kommunikationsflüsse sowie die Arbeitsorganisation sind Arbeitsstationen in der nächsthöheren Ebene, dem Arbeitsbereich, eingebunden. Dieser stellt wiederum eine Teilkomponente des Gebäudes auf einem Standort dar.

Den unterschiedlichen Betrachtungsebenen liegen unterschiedliche Lebenszyklen zu Grunde, deren Berücksichtigung ebenfalls zu einem tieferen Verständnis der Einflussgrößen auf eine Arbeitsstation beiträgt. Eine grobe Einteilung ergibt laut Schenk et al. (2014, S. 147–149) vier übergeordnete Lebenszyklen: Produktlebenszyklus, Prozesslebenszyklus, Gebäude-/Fabriklebenszyklus und Flächennutzungszyklus. Dabei wird der Produktlebenszyklus aufgrund der Variantenvielfalt immer kürzer, was ein Auseinanderdriften der Lebenszyklen zur Folge hat. Der Prozesslebenszyklus wird durch technische Neuerungen, deren Wirtschaftlichkeit und Abschreibungsdauer bestimmt und in der Regel für mehrere Produktgenerationen genutzt. Beim Fabrikzyklus wird zwischen Tragwerk und technischer Gebäudeausrüstung unterschieden. Deren Dauer beträgt meist ein Vielfaches der Prozess- und Produktzyklen. Der Flächennutzungszyklus ist von der Lage des Grundstückes und dem damit verbundenen Bebauungsrecht abhängig. Dieser überdauert auch die Nutzungsdauer der Gebäude. Herrmann (2010, S. 306–309) liefert weitere Ausführungen hinsichtlich des technische Produktionssystems. Dieses umfasst die Lebenszyklen der Maschinen und der Anlagen, die wie das Gebäude selbst als Produkt eines anderen Herstellers angesehen werden können. „Die Nutzungsphase der Maschinen und Anlagen sowie des bzw. der Gebäude schneiden sich mit der Produktionsphase des Primärproduktes“ (Herrmann 2010, S. 307). Auch die Lebenszyklen der Prozessmedien müssen in Betracht gezogen werden (z.B. laut (Herrmann 2010, S. 308) eingesetzte Kühlschmierstoffe in der Metallbearbeitung). Aus dieser ganzheitlichen Betrachtung der Lebenszyklen können Unternehmen etwaige Kooperationspotentiale ableiten und Umwelteinflüsse besser einschätzen.

2.3 Betriebsmittel in der Montage

In dem gezeichneten Kontext wird die Montagefunktion je nach Automatisierungsgrad vom Menschen in Zusammenarbeit mit **Betriebsmitteln** durchgeführt. Letztere stellen laut Wiendahl et al. (2009, S. 177) im Zuge der Erfüllung der Produktionsaufgabe die Gesamtheit der Einrichtungen, Geräte und Anlagen dar. Sie werden als körperliche Einheit verstanden, die hinsichtlich des Material-, des Informations- und des Energiefluss in sich verknüpft und daher nicht in Teilen funktionsfähig sind. Als Ausnahme gelten sehr große Anlagen für Großserien- oder Massenprodukte mit durchgängigem Fertigungs- und/oder Montageprozess. Solche Anlagen der automatischen Fließfertigung, werden aufgrund ihrer nicht vorhandenen Relevanz hinsichtlich der Zielsetzung dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Um im Sinne der Darstellung der vorangegangenen Abschnitte alle Betriebsmittel zu erfassen, die direkt und indirekt zur Erfüllung der Montagefunktion beitragen, sind in Tabelle 2 die Ausführungen von Heger (2007) dargestellt. Es handelt sich hierbei um

Fabrikobjekte ersten Grades, die in (Wiendahl et al. 2009) in Form von Fabrikobjekten zweiten Grades weiter detailliert und ausführlich beschrieben werden. In der Kategorie „Zugehörig“ sind jene Objekte abgebildet, die der Montage auf Stationsebene direkt zugeordnet werden können. Diese sind für die Durchführung der Montagefunktion im engeren Sinne (vgl. Abschnitt 2.1) zuständig und werden von Wiendahl et al. folgendermaßen definiert. Die **Produktionstechnologie** umfasst Wissen, dass „[...] das zu einer Problemlösung anwendbare naturwissenschaftlich-technische Know-how, die mit der Problemlösung verbundenen Tätigkeiten sowie die materielle Ausprägung der Problemlösung [...]“ (Wiendahl et al. 2009, S. 4 in Anhang A1) beinhaltet. Unter **Produktionsmittel** werden Einrichtungen zur Fertigung und Montage, als auch Handarbeitsplätze und unter **sonstigen Mitteln** Einrichtungen für die Qualitätssicherung sowie zum Handhaben, Kommissionieren, Sortieren, Bereitstellen und Verpacken verstanden. „Das **Qualitätssicherungskonzept** umfasst alle Zielsetzungen und Tätigkeiten zur Aufrechterhaltung der Produkt- und Logistikqualität“ (Wiendahl et al. 2009, S. 7 in Anhang A1). **Arbeitsplatzgestaltung** befasst sich mit dem Arbeitsplatz an sich und seiner Ausgestaltung und kann daher mit den Umgebungsbedingungen aus Abbildung 6 gleichgesetzt werden. Die Fabrikobjekte in den drei weiteren Kategorien sind nach ihrem Einfluss auf die Arbeitsstationsebene unterteilt und bedingen diese mehr oder minder (Heger 2007; Wiendahl et al. 2009).

Tabelle 2: Fabrikobjekte ersten Grades und ihr Bezug zur Arbeitsstationsebene nach (Wiendahl et al. 2009, S. 135); Bei den Werten in der Klammer steht T für Technik, O für Organisation und R für Raum

Zugehörig:	Hohe Bedeutung:	Mittlere Bedeutung:	Geringe Bedeutung:
<ul style="list-style-type: none"> • Produktions-technologie (T) • Produktionsmittel (T) • Sonstige Mittel (T) • Qualitäts-sicherungskonzept (O) • Arbeitsplatz-gestaltung (R) 	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Anlagen – Verteilung (T) • Informationstechnik (T) • Transportmittel (T) • Aufbauorganisation (O) • Arbeitsorganisation (O) • Layout (R) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lagermittel (T) • Produktionskonzept (O) • Logistikkonzept (O) • Struktur (O) • Ausbau (R) 	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Anlagen – Zentralen (T) • Tragwerk (R) • Hülle (R) • Anmutung (R)

Im Zuge dieser Arbeit stehen die Fabrikobjekte der Technik, welche mit einem (T) in Tabelle 2 gekennzeichnet sind im Fokus. Die Fabrikobjekte Produktionsmittel und sonstige Mittel sind die Betriebsmittel, die zur Ausführung der Teilfunktionen einer Montagestation nach Abbildung 5 dienen. Durch die technischen Fabrikobjekte mit hoher Bedeutung auf die Arbeitsplatzebene werden Arbeitsstationen in die Flüsse aus Abbildung 6 eingebunden. Die **technischen Anlagen der Verteilung** führen den Arbeitsstationen Energie, Prozessmedien und Information zu und ab. Die

Informationstechnik dient zur Übermittlung, Speicherung, Verarbeitung und Bereitstellung der Informationen. Die **Transportmittel** dienen dem innerbetrieblichen Transport (Wiendahl et al. 2009, Anhang A1). Wie diese Fabrikobjekte zusammenspielen wird über die organisatorischen und räumlichen Fabrikobjekte (mit (O) und (R) in Tabelle 2 gekennzeichnet) geregelt.

Die im besonderen Fokus stehenden technischen Fabrikobjekte mit Zugehörigkeit zur Arbeitsstationsebene können weiter in Fabrikobjekte zweiter Ordnung untergliedert werden. Dabei liefert Wiendahl et al. (2009, Anhang A1) die Bestandteile dieser Betriebsmittel:

- Gestell
- Antriebe
- Kinematisches System
- Systeme für Steuerung, Regelung, Messung und Diagnose
- Peripheriesysteme und Hilfsmittel
- Werkzeuge/Werkstückspeicher bzw. spezifische Vorrichtungen

Dabei wurde der Begriff der Gründung ausgespart, da diese nach den Ausführungen in (Wiendahl et al. 2009, S. 186–194) für Montagebetriebsmittel nicht relevant sind, da solche Arbeitsplätze nur Gewichtskräfte aufnehmen müssen. Die Peripheriesysteme schaffen die Verknüpfung zu den technischen Anlagen der Verteilung.

Betriebsmittel in Montagesystemen haben je nach technisch-organisatorischem Grundmuster unterschiedliche Ausprägungen (Hesse 2012a, S. 198). Diese fallen in den Bereich des Fabrikobjektes **Produktionskonzept**. Tabelle 3 gibt einen Überblick über Gestaltungsmöglichkeiten von Montagesystemen und deren wirtschaftlichen Einsatzbereiche. Die Zahlen und Einschätzungen stellen dabei grobe Richtwerte dar, da sie aus Abbildungen in (Wiendahl et al. 2009, S. 186), (Hesse 2012b, S. 16) und (Lotter 2012d, S. 168) abgeleitet wurden.

Bei der manuellen Einzelplatz- und der One-Piece-Flow-Montage gilt zu beachten, dass laut Wiendahl et al. (2009, S. 186) bei steigender Leistung die zu realisierende Produktkomplexität sinkt. Darauf weisen die durch einen Strichpunkt getrennten Werte hin. Demnach ist es mit der manuellen Einzelplatzmontage wirtschaftlich sinnvoll bei einer Leistung von 70 Stück pro Stunde ein Produktkomplexitätsspektrum von 1-18 Teilen/Vorgängen und bei 290 Stück pro Stunde eines von 1-12 Teilen/Vorgängen abzudecken. Die One-Set-Flow-Montage und verkettete Montageautomaten waren in den Abbildungen, der oben genannten Zitate, die als Basis für Tabelle 3 fungieren, nicht vorhanden und wurden den sonstigen Ausführungen dieser Werke entnommen.

Tabelle 3: Gestaltungsmöglichkeiten von Montagesystemen

Montage-system	Leistung bzw. Produktivität [Stück je Stunde]	Produkt-komplexität [Anzahl Teile bzw. Vorgänge]	Flexibilität	Varianten-vielfalt	Investment
Manuelle Einzelplatz-montage	70-290	1-18;12	Hoch	Groß	Niedrig
Hybride Montage	30-740	9-40	Hoch-Mittel	Groß-Mittel	Niedrig-Mittel
One-Piece/Set-Flow Montage	70-500	7-60;58	Hoch-Mittel	Groß-Mittel	Niedrig-Mittel
Manuelle Fließmontage	120-690	15-45	Hoch-Mittel	Groß-Mittel	Niedrig-Mittel
Automatische Einzelplatz-Montageeinheit	300-1750	3-25	Mittel-Niedrig	Mittel-Klein	Mittel-Hoch
Verkettete Montage-automaten	Zwischen-stufe	Zwischen-stufe	Mittel-Niedrig	Mittel-Klein	Mittel-Hoch
Automatische Fließmontage	800-1800	13-70	Niedrig	Klein	Hoch

In der **manuellen Einzelplatzmontage** werden die Montagefunktionen von einem Montagewerker durchgeführt. Ihm stehen dabei in der grundlegendsten Ausführung ein Arbeitstisch, Greifbehälter inklusive zugehörigem Aufbewahrungssystem und Fügemitel zur Verfügung. Der Begriff Fügemitel soll dabei jene Betriebsmittel, die in Anlehnung an Abbildung 5 die weitgefasste Fügefunktionen erfüllen, umfassen. Damit werden die Funktionen des Justierens und Sonderoperationen inkludiert. Bei der Gestaltung des Arbeitsplatzes gilt, „...dass im Rahmen einer auch ästhetisch anregenden räumlichen Umgebung sicherheits- und gesundheitsgerechtes Arbeiten gewährleistet ist“ (Wiendahl et al. 2009, S. 237). Dies erfordert eine Sitzgelegenheit inklusive Fußstütze, die dem Arbeitenden die Möglichkeit bietet jederzeit zwischen sitzender und stehender Tätigkeit frei zu wählen (Lotter 2012c, S. 111). Die Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bewirkt einen erhöhten Montagewirkungsgrad gegenüber ergonomisch schlecht gestalteter Arbeitsplätze und die dabei entstehenden Zusatzkosten amortisieren sich in der Regel unterhalb eines Jahres (Lotter und Wiendahl 2012b, S. 489).

Die detaillierte Ausgestaltung der Betriebsmittel für die manuelle Einzelplatzmontage wird durch die organisatorisch ausgestaltete Montagetätigkeit bedingt. Manuelle Montage findet grundsätzlich nach den Prinzipien der stückweisen und der

satzweisen Montage statt (z.B. (Lotter 2012c, S. 113)). Die **stückweise Montage** wird dadurch charakterisiert, dass alle Montagevorgänge an einem Produkt ausgeführt werden, bis dieses vollständig zusammengebaut ist. Erst anschließend wird das nächste Produkt des Loses in Angriff genommen. Dagegen werden bei der **satzweisen Montage** die Montagevorgänge bei einem definierten Satz gleicher Teile schrittweise so durchgeführt, dass der nächste Prozessschritt erst erfolgt, wenn der vorangegangene an allen Teilen abgeschlossen ist (Lotter 2012c).

Die satzweise Montage ist demnach nur für die Kleingerätemontage wirtschaftlich einsetzbar. Die stückweise Montage ist universal einsetzbar und erfolgt durch die Werkbankmontage, Baustellenmontage oder Gruppenmontage. Lotter (2012c, S. 114 und 148) liefert eine Übersicht der Einsatzgebiete. Die Einzelplatzmontage ist dadurch charakterisiert, dass dem Werker die zu fügenden Teile und das dafür benötigte Werkzeug am Arbeitsplatz zur Verfügung stehen. Bei der **Baustellenmontage** wird ein stationäres Montageobjekt in einer Baustelle von einem oder mehreren Monteuren zusammengefügt. In der Regel ist das Montageobjekt von allen Seiten zugänglich und das Werkzeug und die Einzelteile müssen von den umliegenden Einrichtungen, die der Baustelle zugeordnet sind, besorgt werden. Angesichts der kurzen Wege gilt das Montagepersonal als stationär, da es die Baustelle bei der Durchführung der Montagetätigkeit nicht verlässt (Lotter 2012b, S. 147–149). Die **Gruppenmontage** ist durch ebenfalls stationäre Montageobjekte, aber durch wechselndes Personal gekennzeichnet. Nach vorgegebenem Ablaufplan führen die Werker ihnen zugeordnete Prozessschritte an dem Werkstück durch (Lotter 2012b, S. 147).

Die Detailausführungen der Werkstückaufnahme, -ablage und des Arbeitstisches werden davon bedingt ob die Arbeitsstation in eine Fließmontage eingebettet ist oder als One-Piece-Flow-Ausführung, einer Spezialform der Fließmontage, angelegt ist. Im Unterschied zu den zuvor genannten Organisationsprinzipien ist das Montageobjekt bewegt. Der Monteur ist im Falle der **Fließfertigung** stationär und im Falle des **One-Piece-Flow-Prinzips** bewegt er sich mit dem Montageobjekt von einer Material- und Werkzeugbereitstellungsstation zur nächsten (Wiendahl et al. 2009; Lotter 2012b, S. 147). Bei der Fließfertigung ist ausschlaggebend ob es sich um eine manuelle, mechanisch ungeordnete oder mechanisch geordnete Werkstückweitergabe handelt. Erst die mechanischen Weitergabeformen haben ein aufwendigeres Werkstückaufnahme und -ablagensystem zur Folge, da hier Förderbänder zum Einsatz kommen. Hier wird auch in einen periodischen Bewegungsablauf und einen kontinuierlichen Montageablauf unterschieden. Bei ersterem Verfahren erfolgt die Montage am ruhenden Objekt, bei letzterem am bewegten Objekt. Das One-Piece-Flow-Prinzip kann durch einen komplexen Arbeitstisch mit Kugelrollbahnen und Werkzeugschlitten in der Kleingerätemontage oder durch selbst fahrende Flurförderfahrzeuge in der Großgerätemontage realisiert

werden. Dabei ist es auch möglich die Montage nach dem satzweisen Arbeitsablauf zu gestalten. Dies wird dann **One-Set-Flow-Montage** genannt (Lotter 2012c).

In manuellen Arbeitsstationen können Maschinen integriert werden, die dem Menschen gewisse Funktionen abnehmen und zu einer systembedingten zeitlichen Kopplung zwischen Mensch und Automat führen (Lotter 2012d, S. 168). In sogenannten **hybriden Montagesystemen** werden bevorzugt die Fügefunktion und die Qualitätssicherung durch Maschinen ausgeführt. Zusätzliche Technologien wie Lichtgitter als Arbeitsschutz und Sensorik zur Bauteilerkennung kommen zum Einsatz. Diese Ausführung hat besondere Vorteile durch die satzweise Ausführung. Die übernommenen Tätigkeiten werden parallel zur manuellen Tätigkeit durchgeführt ohne den Arbeitsrhythmus der manuellen Montage zu stören (Lotter 2012c, S. 127).

In einem weiteren Schritt hin zur **Vollautomatisierung** des Montagesystems wird die komplette Arbeitsstation in Form eines Montageautomaten (z.B. in Rundtaktausführung) eingesetzt. Dieser kann mit manuellen Arbeitsplätzen über eine Fließmontage verkettet werden.

Wie schon bei der Betrachtung der Fabrikobjekte zweiter Ordnung der Produktions- und sonstiger Mittel am Beispiel der für Montagearbeitsplätze nicht nötigen Gründung angemerkt wurde, gibt es deutliche Unterschiede zwischen Arbeitsstationen zur Fertigung und zur Montage. Wiendahl et al. (2009, S. 186–194) stellen einen Vergleich zwischen Fertigungs- und Montagemittel an, der einen guten Praxisbezug liefert. Die folgenden Punkte fassen daraus zentrale montagebezogenen Merkmale heraus:

- Ausgangsmaterial:
Meist sehr viele, völlig unterschiedliche Teile in z.T. mehreren Varianten, die zu fügen und auf einen funktions- und lagerichtigen Einbau zu prüfen sind.
- Fokus:
Positionsgenauigkeit der Fügeteile und die Sicherheit der Fügeprozesse durch vergleichsweise geringe Prozesskräfte.
- Taktzeiten:
Wegen der kurzen Greif- und Fügezeiten sind diese bedeutend geringer. Beispiel: variantenreiche Serienfertigung – Sekunden- bis Minutenbereich, untere Grenzwerte bei 2-3 Sekunden.
- Unterbrechungen:
Wegen der vielen Teile, viel häufiger Störungen im automatischen Montageprozess. Diese sind im Minutentakt möglich. Entstörzeit bedürfen ebenfalls einer Dauer im Minutenbereich.
- Überwachungs- und Eingriffsbereitschaft:
Ständiges Personal vor Ort nötig.

- Automatisierungsgrad:
Mehr als 20-30% an Automatisierung eher selten.
- Gewicht:
Leichter, weil die Gestelle praktisch nur Gewichtskräfte aufnehmen müssen, während die Fügekräfte innerhalb des Wirkraums der Fügestation bleiben.
- Informationsfluss:
Nicht so umfangreich, aufgrund weniger erforderlicher Steuerungsdaten des Fügeprozesses.
- Permanente Qualitätsprüfung:
Entweder während oder nach dem Fügeprozess – hohe Zuverlässigkeit erforderlich.

Abschließend können noch Kennzahlen gegeben werden, die die besondere Bedeutung der Montage-, Handhabungstechnik und Robotik für die Produktionstechnik verdeutlichen. In der Einzel- und Serienmontage werden Wertschöpfungsanteile bis zu 70% der Gesamtwertschöpfung erreicht (März und Langsdorff 2001), mit einem Zeitanteil der einzelnen Montageschritte 15-70% der Gesamtbearbeitungszeit (Lotter 2012a). Demgegenüber stehen ein Anteil der Montage je nach Produkt von 28 bis 44% an den Produktionskosten und bis zu 40% an der Produktionsfläche (Abele und Reinhart 2011, S. 99).

2.4 Aktuelle Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen in der Montage

Konventionelle wandlungsträge Fabriken müssen unter neue Leitsätze gestellt werden und an die Marktanforderungen angepasst werden. Als wandlungsträge Fabrik charakterisieren Wiendahl et al. (2009, S. 5) Unternehmen mit unzureichender Innovations- und Anpassungsfähigkeit an die enorme Dynamisierung der Märkte und Technologien und führen detaillierte Merkmale an. Diese Merkmale werden in vier Übergruppen gegliedert: mangelnde Marktorientierung, komplexe Organisation, fehlende Entwicklungsplanung und ausgeprägtes Sicherheitsdenken. Dem stehen die von Wiendahl et al. (2009, S. 74) zusammengefassten Leitsätze einer zukünftigen Produktion gegenüber:

- Reaktionsschnell
- Mengen- und variantenflexibel
- Grenzwertorientiert
„Bekannte Grenzen überwinden und natürliche physikalische und logische Grenzen zum Maßstab machen“ (Wiendahl et al. 2009, S. 74).
- Selbstorganisiert
- Vernetzt
- Kulturbewusst

- Nachhaltig

Diese Leitsätze werden von der wandlungsfähigen Fabrik erfüllt. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich je nach Veränderungsimpuls auf einer oder mehreren Ebenen an neue Forderungen anpassen kann. Mit ihnen wird eine sinnvolle Balance zwischen kurzen Lebenszyklen von Produkten und Prozessen einerseits und längeren Nutzungsdauern der Fabrikanlage (Maschinen, Anlagen und Gebäude) andererseits angestrebt (Schenk et al. 2014). Dies wird von Abele und Reinhart (2011, S. 75) als Wandel der Produktionsparadigmen von leistungsorientierten Einzelprozessen zu intelligenten Prozessketten zusammengefasst. Durch hochflexible Montagesysteme und qualifiziertem Personal wird die notwendige Reaktionsfähigkeit der Montage auf die Marktdynamiken angestrebt (Lotter und Wiendahl 2012b, S. 485). Dies schöpft das volle Potential der Erfahrungsqualitäten des Menschen, die in allen für die Montage relevanten Bereichen eine Rolle spielen und beim Neuanlauf, der Qualitätssicherung und bei der Gestaltung und Optimierung der Montagesysteme und -prozesse unverzichtbar sind (Adami et al. 2008, S. 23). „Die Produktionstechnik und Ausrüstung von morgen wird charakterisiert durch „intelligente“ Betriebsmittel mit der Fähigkeit zur Kognition, teilautonomen Selbststeuerung und Integration von Expertenwissen, Einsatz wandlungsfähiger und rekonfigurierbarer Produktionstechnik und anhand der Erweiterung des Zielkatalogs um Zeit, Wandlungsfähigkeit, Ressourcenorientierung und Nachhaltigkeit“ (Abele und Reinhart 2011, S. 75). Neue Ansätze, die durch die Anwendung von CPS möglich werden, können zu einer Reduktion der Dichotomie zwischen Produktdifferenzierung im Zuge der Economies-of-Scope und Preisführerschaft im Zuge der Economies-of-Scale führen (Auerbach et al. 2011, S. 917), aber auch dazu, dass Flexibilität und Automatisierung nicht mehr im Widerspruch zu einander stehen (Müller-Dauppert 2014, S. 30). Auch werden im Kontext der Industrie 4.0 bisher getrennte Funktionen wie Fertigung, Montage und Logistik intelligent miteinander verzahnt und verschmelzen so zu einem Gesamtsystem (Soder 2014, S. 101–102). Damit entstehen neben hybriden Montagesystemen, flexible und selbstoptimierte Systeme, die gegenüber herkömmlichen Systemen, wie in Abbildung 7 dargestellt, eingeordnet

werden.

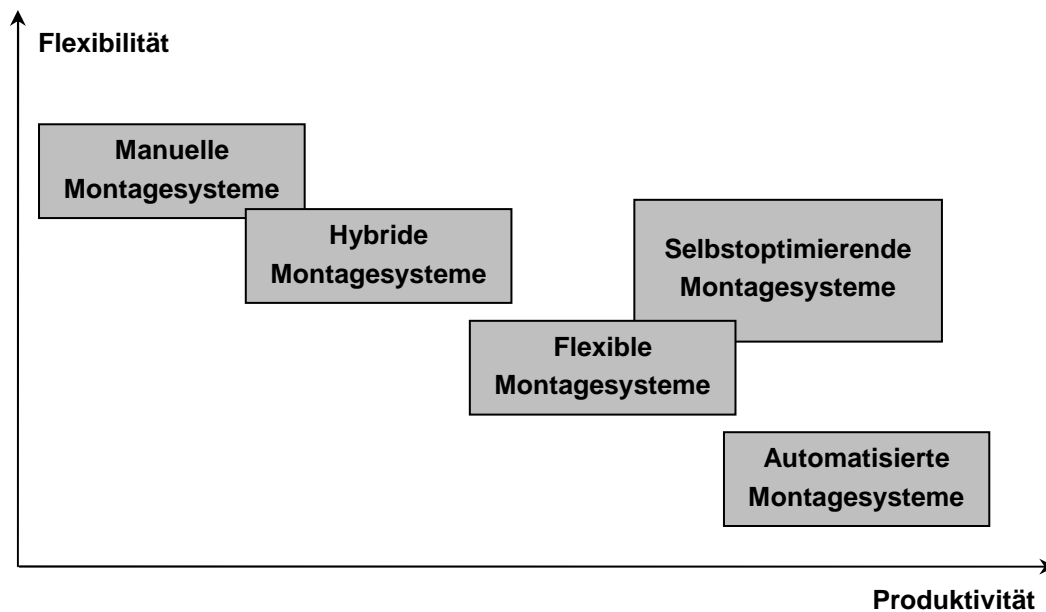


Abbildung 7: Neue Einordnung von Montagesystemen nach (Auerbach et al. 2011, S. 198)

Diesen Anforderungen kann in Montagesystemen auf Arbeitsstationsebene anhand folgender Punkte begegnet werden (Wiendahl et al. 2009, S. 194):

- „Gliederung der Fügestationen, Montagemaschinen und -systeme in transportfähige, funktional selbstständige und vorgetestete Module, die rasch auswechselbar sind.“
- Einfache Umstellung der Zuführsysteme auf Varianten der Zuführteile durch Vermeidung mechanischer Ordnungselemente.
- Aufstellung der Montagemittel in Gebäuden mit großer Stützweite, um eine unproblematische Erweiterung zu ermöglichen.
- Energie- und Medienanschlüsse der Montagestationen über ein modulares, im Raster angeordnetes Versorgungssystem sicherstellen, z.B. durch einen Doppelboden oder eine Versorgungsebene über den Betriebsmitteln.
- Werkerinformationssysteme an den Arbeitsplätzen über Bildschirme statt Einsatz von Papierdokumenten“.

3 Grundlagen Cyber-Physikalischer Systeme

Cyber-Physikalische Montagesysteme sind eine spezielle Art von Betriebsmitteln, die zur Erfüllung der Montagefunktion dienen. Um ein ganzheitliches Verständnis bei der Betrachtung dieser zu schaffen, wird eine globale Abgrenzung zentraler Begriffe dargestellt. Dabei handelt es sich um die Begriffe der Technologie, Technik und Innovation. Darauf folgen eine Klassifikation Cyber-Physikalischer Systeme und eine Fokussierung auf kollaborierende Robotersysteme, die einen Anwendungsfall dieser darstellen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Betrachtung aktueller Herausforderungen von CPS anhand dieses Anwendungsfalles und zukünftiger Entwicklungen.

3.1 Begriffsabgrenzung: Technologie, Technik und Innovation

Als Grundlage für ein besseres Verständnis der Überlegungen dieses Kapitels gilt es, die Begriffe der Technologie und Technik zu erläutern und voneinander abzugrenzen. Besonders der Begriff der Technologie wird im deutschen Sprachgebrauch sehr breit und diffus verwendet (Hall 2002, S. 7). Wie bereits in Abschnitt 2.3, definiert handelt es sich bei **Technologien** um Wissen, dass „[...] zur produkt-, prozess- und systemorientierten Nutzung von natur-, sozial- und ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnissen“ (Tschirky 1998, S. 38ff.) genutzt wird. **Technik** hingegen „[...] bezeichnet [...] die konkrete Anwendung von Technologien in Gestalt von Produkten, Produktionsprozessen und anderen Ergebnissen menschlichen Handelns“ (Hall 2002, S. 7). Technologie ist damit die Wissenschaft von der Technik (Arentzen 1995, S. 3249).

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Analyse und Bewertung von Techniken – im Sinne von Produkten, die als Betriebsmittel eingesetzt werden – basierend auf technologischem Wissen bzw. einer oder mehreren Technologien. Die Dynamiken dieses Umfeldes (Produkt-Technik-Technologie) können durch Lebenszyklusmodelle beschrieben werden. Dem Technologielebenszyklus-Modell nach Arthur D. Little zufolge durchschreiten Technologien die Lebensphasen Entstehung, Wachstum, Reife und Alter. Dabei entwickeln sich ihre Leistungsfähigkeiten bzw. ihre Nutzen/Kosten-Verhältnisse über die Zeit bzw. den kumulierten F&E-Aufwandes entlang einer S-Kurve, solange es zu keiner Ablöse einer konkurrierenden Technologie kommt (Hall 2002, S. 27; Bullinger 1994, S. 123; Herrmann 2010, S. 75). Zur Verbindung von Technologie und Technik hat Höft (1992) ein erweitertes Technologie-Technik-Lebenszykluskonzept eingeführt. Demzufolge gibt es vier überlappende Lebensphasen: Beobachtung, Technologieentstehung, Technologienutzbarmachung und Anwendung. Dabei wird unter dem

Anwendungszyklus der Technik-Zyklus verstanden, der wiederum in die Phasen Einführung, Wachstum, Reife und Rückgang/Verfall unterteilt ist (Höft 1992; Herrmann 2010, S. 74–76). Ein Produkt, das auf dem Markt verkauft wird, durchläuft selbst bestimmte Lebensphasen: Werkstoff-/Vorproduktherstellung, Produktherstellung, Nutzung, Recycling und Entsorgung (Herrmann 2010, S. 64).

Produkte können nicht nur über ihre Reife und der Reife der ihnen zugrunde liegenden Technologien, sondern auch über ihren Innovationsgrad charakterisiert werden. Der **Innovationsbegriff** hat viele Definitionen und unterschiedliche Auslegungen (Hall 2002; Bullinger 1994; Crossan und Apaydin 2010; Granstrand 2000; Roberts 1988). Im Zuge dieser Arbeit ist die Anwendung des Begriffes auf Technologie und Produkt von Bedeutung. Diese sind dann innovativ, wenn sie eine neuartige Alternative zu existierenden Lösungen mit einem merklichen Anstieg des Mehrwertes und Nutzens für den Anwender darstellen. Diese Definition ist in Einklang mit den oben genannten Autoren. Der Innovationsgrad wird nach Schlaak (1999, S. 99ff.) durch sieben Faktoren bestimmt (Produkttechnologie, Absatzmarkt, Produktionsprozess, Beschaffungsbereich, Kapitalbedarf, formale Organisation und informale Organisation). Dies verdeutlicht den breiten Einfluss den Innovationen auf ihr Umfeld haben und muss daher bei der Einführung innovativer Betriebsmittel beachtet werden (Hauschildt und Salomo 2011, S. 14). Besonders radikalen Innovationen berühren dabei alle wichtigen Funktionsbereiche des gesamten Unternehmens (Hauschildt und Salomo 2011, S. 16).

3.2 Klassifikation CPS

Cyber-Physikalische Systeme stellen innovative Techniksysteme dar, deren Umsetzung im Kontext der Industrie 4.0 zu revolutionären Anwendungen und disruptiven Änderungen führen (Geisberger et al. 2012, S. 9). Ihnen ist es aufgrund leistungsstarker eingebetteter Systeme, „[...] die bereits heute als geschlossene Systeme kooperativ und vernetzt agieren“ (Geisberger et al. 2012, S. 20), möglich ihre Umwelt durch Sensoren zu erfassen, diese über die Nutzung des Internets mit weltweit verfügbaren Daten und Diensten auszuwerten und über Aktoren wiederum auf die physische Welt einzuwirken (Bauernhansl 2014, S. 16). Dies führt zu zunehmender Offenheit der Systeme, intelligenter teilautonomen Vernetzung, Adaption und neuen Formen der Mensch-Maschine-Interaktion und trägt damit zu gesteigerter Dezentralisierung, Autonomie und Intelligenz, aber auch Komplexität bei (Bauernhansl 2014, S. 15; Geisberger et al. 2012, S. 18). Bezugnehmend auf die Ausführungen in Abschnitt 3.1 werden CPS als radikale Innovation angesehen, die umfassende Auswirkungen auf Unternehmen haben.

Zusammenfassen können nach (Geisberger et al. 2012, S. 60) fünf aufeinander aufbauende Dimension zur Charakterisierung von voll ausgereiften CPS angeführt werden:

- Verschmelzung von physikalischer und virtueller Welt,
- System of Systems mit dynamisch wechselnden Systemgrenzen,
- kontextadaptive und ganz oder teilweise autonom handelnde Systeme; aktive Steuerung in Echtzeit,
- kooperative Systeme mit verteilter, wechselnder Kontrolle und
- umfassende Mensch-System-Kooperation.

Die Entwicklung von Maschinen und Anlagen zu dieser Endstufe kann laut (Bauernhansl 2014, S. 16–17) anhand von vier Entwicklungsstufen charakterisiert werden. Auf einer ersten noch passiven Entwicklungsstufe bietet der Einsatz von RFID-Chips die Möglichkeit einer eindeutigen Identifizierbarkeit von Gegenständen. Das System an sich weist noch keine Speicher- oder Auswertemöglichkeit auf und Intelligenz wird über zentrale Dienste bereitgestellt. Auf der darauffolgenden Stufe kommen aktive Sensoren und Aktoren mit einem genau definierten und relativ geringen Funktionsumfang zum Einsatz. Darauf wird es in einer dritten Phase über eine Netzwerkfähigkeit inklusive entsprechender Schnittstellen möglich werden, dass die Systeme bestehend aus mehreren Aktoren und Sensoren selbst mit anderen Systemen intelligent Kontakt aufnehmen. In der letzten und ausgereiften Stufe verknüpfen sich die CPS dann zu sogenannten System of Systems. Die CPS können ihre Einzelfähigkeiten selbstständig intelligent miteinander kombinieren und so ganz neue Fähigkeiten entwickeln und selbst Dienstleistungen anbieten. In dieser Endausbaustufe wird es den Systemen möglich sein sich selbst zu konfigurieren, plug-and-produce-Fähigkeiten zu nutzen und autonom und dezentral das Gesamtsystem zu entwickeln und gestalten. Laut (Geisberger et al. 2012, S. 82) folgt dabei mit jeder Entwicklungsstufe eine steigende nutzerzentrierte Funktionalität, Vernetzung und Einbettung in die Umgebung, Komplexität möglicher Wirkketten, Koordination beteiligter Systeme, Mensch-Maschine-Kooperation und vielfältige Nutzungsrisiken.

3.3 Beschreibung und Strukturierung von CPMS am Beispiel kollaborierender Roboter

Sogenannte kollaborierende Roboter sind in den letzten Jahren durch den Einsatz von Sensortechnik möglich geworden und erfreuen sich einer „steigenden Beliebtheit“ (Hagerty 2015; Guizzo 2015). Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch Sensoren in allen Gelenken die auftretenden Kräfte messen und auf Schwankungen reagieren können. Dadurch erkennen sie unvorhergesehene Zusammenstöße und reagieren mit einem Stopp. Dies ermöglicht einen Einsatz der

nicht durch Schutzzäune oder Lichtschranken gesichert sein muss. Der Mensch kann mit diesen Robotern in einem gemeinsamen Arbeitsbereich tätig sein. Daher stammt der Name kollaborierender Roboter².

Des Weiteren ermöglicht die eingesetzte Sensortechnik, dass diese Roboter per Hand geführt und ihnen im Zuge dessen Positionspunkte beigebracht werden können. In Kombination mit benutzerfreundlichen Bedienplattformen macht dies aufwändiges Programmieren hinfällig, da den Maschinen so ihre Bewegungsabläufe kurzerhand beigebracht werden können (Dierig 2015). Durch das Wegfallen von Sicherheitszonen können diese Roboter platzsparend und flexibel immer besser in herkömmlichen Montageprozessen integriert werden. Durch diese Ausgestaltung der Montagesysteme in hybrider Form können sie bei Hochfahrtszenarien von Stückzahlen und bei Stückzahlschwankungen eine zentrale Rolle spielen (Naumann und Fechter 2015). Auch können diese dabei dem Montagemitarbeiter nicht ergonomisch optimierte, monotone Tätigkeiten, bei denen den Mitarbeitern eventuell auch die nötige Kraft und Präzession fehlt, abnehmen und ihnen für andere Aufgaben Raum schaffen (Hagerty 2015). Dabei kommen aktuell am Markt erhältliche kollaborierende Roboter nicht an die Traglast und Prozessgeschwindigkeit konventioneller Roboter heran.

Bevor im Detail auf am Markt erhältliche Produkte eingegangen werden kann, werden im Folgenden nach (DIN EN ISO 8373) genormte allgemeine Begriffe erläutert. Ein **Industrie-/Roboter** ist ein „automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist [...]“ (DIN EN ISO 8373, S. 3). Dabei umfasst der Roboter den Manipulator (einschließlich Aktuatoren) und die Steuerung (Hardware und Software). Unter einem **Manipulator** definiert die Norm eine „Maschine, deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht – durch Gelenke oder gegeneinander verschieblich verbunden – mit dem Zweck, Gegenstände (Werkstücke oder Werkzeuge) zu greifen und/oder zu bewegen [...]“ (DIN EN ISO 8373, S. 3). Aktuatoren sind laut Duden Bauelemente, die elektrische Signale in mechanische Bewegung oder in andere physikalische Größen umsetzen (Bibliographisches Institut GmbH). Daraus folgt, dass Roboter alleine noch nicht fähig sind Montageaufgaben durchzuführen. Dies wird durch ein **Robotersystem** ermöglicht, welches der Norm entsprechend aus folgenden Einheiten besteht (DIN EN ISO 8373, S. 3):

- Roboter
- Endeffektor(en)
- alle Einrichtungen, Geräten oder Sensoren, die für den Roboter zur Ausführung der Aufgabe notwendig sind

² Siehe URL: <http://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean> (16.02.2016).

- alle Datenübertragungsschnittstellen, über die der Roboter, die Einrichtungen oder Sensoren betrieben und überwacht werden, soweit diese Peripheriegeräte durch die Steuerung des Roboters überwacht werden

Erst durch das Anbringen eines **Endeffektors** (z.B. Greifer, Schrauber, Schweißbrenner, Spritzpistole) ist es dem Roboter möglich seine Aufgabe zu erfüllen (DIN EN ISO 8373, S. 3). Von einem Roboter und einem Robotersystem ist die **Robotik** als die Konstruktion, der Bau und der Einsatz von Robotern abzugrenzen (DIN EN ISO 8373, S. 3).






Bei den aktuell am Markt erhältlichen kollaborierenden Robotern konnten sechs verschiedenen Ausführungsformen identifiziert werden. Dabei gibt es unterschiedliche Abstufungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit zum menschlichen Körper. Starken Bezug zu diesem weisen die Roboter Nextage und Baxter auf (vgl. Tabelle 4). Diese bestehen aus einem Kopf mit Kamerasystem, zwei Armen und einem Sockel mit Rädern (nicht selbstfahrend). Eine reduzierte Version stellt der Yumi, der in etwa einen menschlichen Oberkörper repräsentiert, dar. Gefolgt werden diese von den gängigsten kollaborativen Robotervarianten: den vier- bis sechssachsigen Einarmrobotern. Diese sind größtenteils dadurch charakterisiert, dass sie durch ihr geringes Eigengewicht (10-20kg) und ihre immer einfacher gestaltete Programmierbarkeit (Guizzo 2015) flexibel an unterschiedlichen Arbeitsplätzen eingesetzt werden können. Jedoch besitzen diese Versionen auch geringere Traglasten und eine eingeschränkte Reichweite im Vergleich zu gängigen Industrierobotern (Vogel Business Media GmbH & Co. KG 2015b). Diese Roboterart wird durch den CR-35iA mit seiner, im Vergleich zu anderen kollaborativen Robotern, hohen Traglast erweitert. Abgesehen von diesen Roboterarten gibt es klassische SCARA (selective compliance assembly robot arm) und kartesische Roboter in einer kollaborierenden Ausführung – PF400 bzw. PP100. Diese dienen Anwendungsmöglichkeiten bei denen weniger komplexe Bewegungsabläufe gefordert sind und bieten dadurch Vorteile durch höhere Systemsteifigkeiten (Hesse 2012a, S. 267).

Den Robotern ist gemein, dass sie durch spezielle Sensortechnik mit entsprechender Programmierung darauf reagieren, wenn sie auf Hindernisse in ihrem Bewegungsablauf stoßen. Im Vergleich zu herkömmlichen Robotern ermöglicht diese Eigenschaft eine Zusammenarbeit mit dem Menschen ohne Schutzzaun. Um eine sichere Zusammenarbeit zu gewähren sind bestimmte Normen und Gesetze einzuhalten. Davon sind Roboterhersteller, Integrator und Anlagenbetreiber betroffen, da Roboter auch nach diesen Normen nicht als vollständige Maschine gesehen werden dürfen. Für die Sicherheitsanforderungen des gesamten Robotersystems ist der Integrator verantwortlich und für den sicheren Betrieb dieses der Anlagenbetreiber. In Europa werden die Pflichten und Verantwortungen der








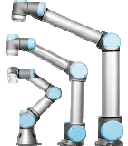
beteiligten Gruppen durch die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG geregelt. Die Sicherheitsanforderungen für die Roboterhersteller sind in weiteren Normen geregelt. Die grundlegenden hierfür sind EN ISO 10218 (Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen), EN ISO 13849 (Sicherheit von Maschinen) und die für Anfang 2016 erwarteten technischen Spezifikationen TS 15066 (Vogel Business Media GmbH & Co. KG 2015a; Schinnerl 17.12.2015)³. Letztere wird weiterführende Empfehlungen für den kollaborierenden Betrieb enthalten. Trotz dieser Vorkehrungen sind diese Systeme nicht risikofrei. Beispielsweise sei hierbei auf die Kombination eines kollaborierenden Roboters mit einem spitzen Greifendeffektors verwiesen. Diese können auch bei raschem Abstoppen Verletzungen verursachen. Auch wurden in einem Sicherheitstest von (Bonev 2014b) Gefahrenpotenziale bei dem Umgang mit dem UR 5 aufgezeigt. Auch (Kaiser 2014) weist darauf hin, dass mit absoluter Sicherheit die neue industrielle Revolution nicht zu haben sei. Die Robotersysteme erfreuen sich jedoch „steigender Beliebtheit“ und dürften bei geeigneter Handhabung das halten, was sie versprechen, da die anwendenden Unternehmen weitere Zukäufe planen (Hagerty 2015; Guizzo 2015).

³ Siehe auch UR: <http://www.kuka-lbr-iiwa.com/public/360/de/150312/start.html> (10.11.2016).

Tabelle 4: Aktuell am Markt erhältliche kollaborierende Roboter – basierend auf (Bélanger-Barrette 2015a); die hochgestellten Zahlen der Modellbezeichnungen weisen auf die Art des Roboters hin – 1) Zweiarmer Roboter; 2) Zweiarmer Roboter inkl. Fahrsystem; 3) Einarmiger Roboter; 4) Einarmiger Roboter inkl. Fahrsystem; 5) SCARA; 6) Kartesischer Roboter

Firma – Modelle		Anzahl der Achsen	Traglast	Reichweite	Eigengewicht	Geschwindigkeit
ABB – Yumi¹⁾		7 je Arm	0,5 kg je Arm	500 mm	38 kg	1,5 m/s
ABB/Gomtec – Roberta³⁾		6	8 kg	800 mm	19,5 kg	110 °/s
Bionic Robotics – BioRob³⁾		4-5	0,5 kg im kollaborierenden Betrieb	956 mm	6 kg inkl. Steuerung	Achsen: 80-330°/s; Am Endeffektor: 1,3 m/s
Bosch – APAS⁴⁾		6	2 kg	911 mm	230 kg	0,5 m/s
Fanuc – CR-35iA³⁾		6	35 kg	1813 mm	990 kg	0,25 m/s
F&P Personal Robotics – Prob 1U³⁾ bzw. Prob 1R³⁾		4 bzw. 6	3 kg, 1,5 kg mit P-Grip	481 mm bzw. 771 mm	11 kg bzw. 16 kg	95-165°/s
Kawada Industries – NEXTAGE²⁾		6 je Arm (zwei-armig)	1,5 kg je Arm	k.A.	130 kg	133-300°/s
KUKA – LBR iiwa 7³⁾ bzw. LBR iiwa 14³⁾		7	7 kg bzw. 14 kg	911 mm bzw. 931 mm	22,3 kg bzw. 29,5 kg	90-180°/s bzw. 70-180°/s

Fortsetzung Tabelle 4

<p>MABI – Speedy 10³⁾</p>		<p>6</p>	<p>10 kg</p>	<p>1385 mm</p>	<p>28 kg</p>	<p>120-180°/s</p>
<p>MRK Systeme – KR 5 Si³⁾</p>		<p>6</p>	<p>5 kg</p>	<p>1423 mm</p>	<p>127 kg</p>	<p>k.A.</p>
<p>Precise Automation – PAVP6³⁾</p>		<p>6</p>	<p>2 kg</p>	<p>432 mm</p>	<p>28 kg</p>	<p>k.A.</p>
<p>Precise Automation – PF400⁵⁾</p>		<p>4</p>	<p>0,5 kg</p>	<p>576 mm oder 731 mm</p>	<p>20 kg</p>	<p>1 m/s</p>
<p>Precise Automation – PP100⁶⁾</p>		<p>3</p>	<p>1 kg inkl. Greifer</p>	<p>635 x 300 x 225 mm</p>	<p>20 kg</p>	<p>1,5 m/s</p>
<p>Rethink Robotics – Sawyer³⁾</p>		<p>7</p>	<p>4 kg</p>	<p>[1260 mm] (Korrektur!)</p>	<p>19 kg</p>	<p>1 m/s ohne Last; 0,6 m/s mit Last</p>
<p>Rethink Robotics – Baxter²⁾</p>		<p>7 je Arm (zwei-armig)</p>	<p>2,3 kg inkl. Greifer</p>	<p>1041 mm</p>	<p>75 kg ohne optio-nalem Sockel</p>	<p>1 m/s</p>
<p>Universal Robots – UR3³⁾ bzw. UR5³⁾ bzw. UR10³⁾</p>		<p>6</p>	<p>3 kg bzw. 5 kg bzw. 10 kg</p>	<p>500 mm bzw. 850 mm bzw. 1300 mm</p>	<p>11 kg bzw. 18,4 kg bzw. 28,9 kg</p>	<p>1 m/s</p>

Kollaborierende Roboter werden anhand dieser Entwicklungen – im Speziellen sei hier auf den CR-35iA von Fanuc verwiesen – konventionelle Roboter schrittweise ersetzen. Solange kollaborierende Roboter in technischen Spezifikationen wie Traglast, Prozessgeschwindigkeit und Reichweite herkömmlichen nachstehen, werden diese in neuen Anwendungsgebieten, wie in der Montage, wo eine hohe Flexibilität und die Zusammenarbeit mit dem Menschen gefordert sind, Verbreitung

finden. Durch die neuen Fähigkeiten der Kollaboration, einfachen Programmierbarkeit und Ortsflexibilität in Kombination mit sinkenden Anschaffungskosten ermöglichen kollaborierende Roboter die von (Geisberger et al. 2012) beschriebenen Eigenschaften, die eine Entwicklung zu einer höheren CPS-Stufe führen (vgl. Ende Abschnitt 3.2).

3.4 Detailbetrachtung von CPMS am Beispiel ausgewählter kollaborativer Roboter

Für die Detailbetrachtung wurden jene Roboter aus Tabelle 4 herangezogen, die den State-of-the-Art möglichst am geeignetsten repräsentieren und Konkurrenzprodukte für ähnliche Anwendungsgebiete darstellen. Bei einer zu tätigenen Investitionsentscheidung stellen diese daher alternative Kaufoptionen dar und erfordern eine detaillierte Kosten/Nutzen-Betrachtung. Die gewählten Roboter sind KUKA's LBR iiwa 7, Universal Robots' UR 3 und UR 5 und Rethink Roboti's Sawyer. Nach (Tobe 2015a) wird den dabei nicht betrachteten Robotern, abgesehen von dem Yumi, ein entweder nicht vergleichbarer Preis oder fehlende Marktreife nachgesagt. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Produktspezifikationen der gewählten Roboter sind in Tabelle 5 zu finden und dient als Basis für die folgenden Betrachtungen.

Gemein ist den Robotern eine gleiche Wiederholgenauigkeit von +/- 0,1 mm und ähnliche Lebensdauern von mindestens 30.000 Betriebsstunden im Fall des LBR iiwa 7 und 35.000 Betriebsstunden der anderen Modelle. Konventionelle Industrieroboter weisen eine Wiederholgenauigkeit zwischen +/- 0,05 mm und +/- 0,01 mm und ähnlichen Betriebsstunden auf⁴. Die drei Produkte weisen die Schutzklasse IP54 auf. Schutzklassen geben Aufschluss darüber, wie elektrische Geräte bestimmten Umwelteinflüssen ausgesetzt werden können⁵. IP54 besagt, dass die Roboter im Betrieb ohne Sicherheitsrisiko berührt werden können, einen Schutz gegen Staubablagerungen im Inneren der Maschine und gegen Sprühwasser aufweisen. Auch im Aufbau und den mitgelieferten Komponenten weisen die gewählten Roboter Gemeinsamkeiten auf. Das Gesamtsystem weist bei allen einen Manipulator, ein Steuerungsgerät und ein Bediengerät auf. Die Steuerungskästen weisen am Beispiel von KUKA – zu sehen in Abbildung 8 – in etwa eine Größe von 500x483x190mm und ein Gewicht von 23kg auf⁶. Des Weiteren können die Modelle,

⁴ Zur Überprüfung dieser Aussage wurden Produktdaten herkömmliche Roboter, die aktuell von den Firmen KUKA, Fanuc und ABB angeboten werden, in den vorhandenen Internetkatalogen im nachgeschlagen (12.11.2015).

⁵ Siehe unter anderem UR: <http://www.reinmedical.com/de/technik/ip-schutzklassen.html> (01.01.2016).

⁶ Siehe hierzu die Hersteller-Produktspezifikationen von KUKA, unter UR: http://www.kuka-robotics.com/res/sps/e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa_Spez_LBR_iiwa_de.pdf (01.01.2016).

wie am Anfang von Abschnitt 3.3 erwähnt, per Hand geführt und ihnen so Positionen beigebracht werden, die abgespeichert und wieder automatisch angefahren werden können. Dieser Vorgang wird als Handteaching bezeichnet. Daraus resultiert auch die Fähigkeit, dass der Mitarbeiter die Roboter als Halte- und Transportvorrichtungen von gegriffenen Werkstücken verwenden kann⁷.

Unterschieden können die Roboter grundlegend nach den Herstellern werden. Einerseits handelt es sich bei diesen um zwei europäischen (KUKA und Universal Robots) und einen nordamerikanischen Hersteller (Rethink Robotics), andererseits steht hier in Form von KUKA, ein etablierter Roboterhersteller, zwei Neueinsteigern gegenüber. Im Folgenden soll getrennt auf die einzelnen Hersteller mit ihren Produkten eingegangen werden.

Die Firma **KUKA** produziert seit 1973 Industrieroboter. Passend zu dem daraus resultierenden Know-How bieten sie mit dem **LBR iiwa 5** 2013 (Bélanger-Barrette 2015a) ein Produkt, das seiner Konkurrenz technologisch überlegen ist. Dies rührt von der Tatsache her, dass KUKA ein anspruchsvolles Design, mit dem Ziel „Klemm- und Scherstellen“ zu vermeiden⁸, mit Drehmomentsensoren in allen Gelenken kombiniert. Die integrierten Drehmomentsensoren ermöglichen nicht nur eine besonders feinfühligke Reaktion auf Hindernisse⁹, sondern ermöglichen auch besondere Eigenschaften. Der LBR iiwa kann unter anderem so programmiert werden, dass er über eine definierte Krafteinwirkung mittels geeignetem Endeffektor unebene Flächen abfahren kann, ihm können per Handteaching nicht nur einzelne Positionen sondern auch Bewegungsabläufe beigebracht werden¹⁰, eine Punkt- und Achsenfixierung bzw. variabel einstellbarer Nachgiebigkeit ermöglicht wird und er besitzt die Funktion gegriffene Bauteile durch „wackeln“ in nicht positionsgetreue Öffnungen blind einzusetzen. Der LBR iiwa ermöglicht es ebenfalls elektrische oder pneumatische Medien direkt durch den Roboterarm zu führen und an der mechanischen Schnittstelle¹¹ bereitzustellen. Diese Sensortechnologie macht den LBR iiwa 7 zu dem sichersten Modell, der hier angeführten Roboter (Bonev 2014a) und schneidet daher auch mit dem besten Sicherheitszertifikat ab. Diese Zertifizierung entspricht den Sicherheitsanforderungen nach EN ISO 13849, wo Roboter dem Performance Level d zugeordnet werden. Darunter fallen Maschinen, die ernste Verletzungen (üblicherweise irreversible Verletzungen einschließlich Tod),

⁷ Zu sehen unter UR: https://www.youtube.com/watch?v=tCss_TjSs7Y (01.01.2016).

⁸ Siehe hierzu die Hersteller-Produktbroschüre von KUKA, unter UR: http://www.kuka-robotics.com/res/sps/a737ee03-5832-4c95-9d91-84e0de80c664_LBR_iiwa_Produkt_Broschuere_DE.pdf (01.01.2016).

⁹ Der vom Roboter unvorhergesehene Zusammenstoß mit einem Glas Wasser führt z.B. nicht dazu, dass dieses umgestoßen wird, siehe UR <http://blog.robotiq.com/bid/65588/Collaborative-Robot-Series-KUKA-s-New-IIWA-LWR-5> (01.01.2016).

¹⁰ Siehe hierzu UR: <https://www.youtube.com/watch?v=kUxJEYeCRQg> (01.01.2016).

¹¹ Die mechanische Schnittstelle ist als die Montagefläche, die am Ende des Manipulators an dem der Endeffektor angebracht wird, definiert DIN EN ISO 8373, S. 3

hohe Häufigkeit und/oder lange Dauer der Gefährdungsexposition und die Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens mit sich bringen (DIN EN ISO 13849-1, S. 55). Der Roboter hat eine Lautstärke von unter 75dB was zwischen den Lautstärken an einem Rand (5m) einer Verkehrsstraße (80dB) und einem ein Meter entfernten Staubsauger (70dB) entspricht¹². Das Produkt kann in einer Umgebung von 5-33°C betrieben werden. All diese Eigenschaften realisiert das Unternehmen mit einem überlegenen Verhältnis von Traglast zu Eigengewicht, welches eine Aussage über den allgemeinen und flexiblen Einsatz des Roboters trifft (Bélanger-Barrette 2015b). Dem steht der mit Abstand höchste Preis von geschätzten € 60.000-70.000 gegenüber (Schinnerl 17.12.2015). Bedient wird der Roboter durch das mitgelieferte Bedienhandgerät (siehe Abbildung 8) und kann an einem beliebigen Rechner mit der mitgelieferten Software programmiert werden. KUKA hat auf die speziellen Anforderungen kollaborierender Roboter reagiert und die LBR iiwa Serie im Gegensatz zu den anderen von ihnen angebotenen Industrierobotern 2013 mit einem neuen Roboterbetriebssystem (ROS), dem Java basierendem KUKA Sunrise.OS, ausgestattet¹³. Das System ermöglicht es ohne zusätzlichem manuellem Programmierbedarf externe Komponenten, wie Endeffektoren oder Bildverarbeitungssystemen anzusteuern¹⁴. Die Bedienung und Programmierung von Bewegungsabläufen kommt derzeit jedoch noch nicht an die der Konkurrenz heran. Für diese Vorgänge werden, wie bei herkömmlichen Robotern das Know-How eines Ingenieurs mit Roboter- und Programmierkenntnis benötigt (Bonev 2014a). Dadurch wird der einfache flexible Einsatz des Roboters im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Produkten maßgeblich erschwert. KUKA bietet für Programmierer und Inbetriebnehmer des LBR iiwa extra Schulungsservice um € 4.410 an¹⁵.

¹² Siehe unter UR: <http://www.sengpielaudio.com/TabelleDerSchallpegel.htm> (01.01.2016).

¹³ Siehe z.B. UR: <http://www.automationspraxis.de/news/-/article/33568397/38136883?returnToFullPageURL=back> (01.01.2016).

¹⁴ Nähere Details unter UR: <http://www.kuka-lbr-iiwa.com/public/360/de/150227/start.html> (01.01.2016).

¹⁵ Siehe unter UR: [http://www.kuka-robotics.com/austria/de/college/cs/csSeminarDetail/?SEM_ID=MB\\$\\$\\$Z4B\\$\\$\\$CS\\$---1](http://www.kuka-robotics.com/austria/de/college/cs/csSeminarDetail/?SEM_ID=MB$$$Z4B$$$CS$---1) (01.01.2016).

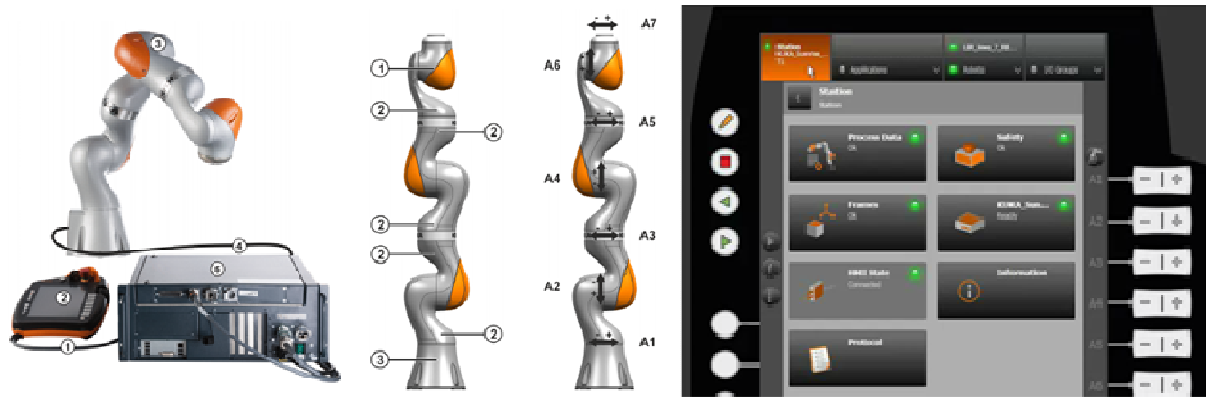


Abbildung 8: KUKA LBR iiwa Produktdarstellung: Bild link – Übersicht Robotersystem: 1) Verbindungsleitung, 2) Bedienhandgerät KUKA smartPAD, 3) Manipulator, 4) Verbindungsleitung, 5) Robotersteuerung KUKA Sunrise Cabinet; Bilder mitte – Hauptgruppen und Roboterachsen: 1) Zentralhand, 2) Gelenkmodul, 3) Grundgestell; KUKA Sunrise.OS am KUKA smartPAD (Bilder aus den Hersteller-Spezifikationen oder von der KUKA Internetseite)

Die dänische Firma **Universal Robots** wurde 2005 gegründet und brachte die ersten Produkte, den UR 5 und den UR 10, 2009 auf den Markt (Tobe 2015b). 2015 erfolgten im März die Einführung eines kleineren Bruders, dem UR 3 und die Übernahme durch den amerikanischen Hersteller von Testsystemen für Mikroprozessoren und weiteren elektronischen Bausteinen Teradyne (McCall 2015; Vogel Business Media GmbH & Co. KG 2015c). Die UR-Serie, die sich in der dritten Generation befindet (Guizzo 2015; Schürmann 2014), ist dem der LBR iiwa-Serie und, wie folgend zu sehen sein wird, dem Sawyer technologisch und sicherheitstechnisch unterlegen. Dies beruht auf der Tatsache, dass hier keine Drehmoment- oder Kraftsensoren zur exakten Messung¹⁶ zum Einsatz kommen, sondern über Algorithmen Geschwindigkeit und Kräfte in den einzelnen Gelenken berechnet werden (Bonev 2014b; Guizzo 2015). Mithilfe dieser Algorithmen ist es Universal Robots möglich die UR-Serie nur hinsichtlich der Normanforderungen eines Performance Levels b¹⁷ zu zertifizieren (Schinnerl 17.12.2015). Was das Produkt charakterisiert sind seine geringen Kosten und seine patentierte Bedienplattform, Polyscope. Hinsichtlich der Kosten wird eine Amortisationsdauer von einem halben Jahr auf der Herstellerinternetseite postuliert¹⁸. Anhand der Bedienung ist es möglich den Roboter, aufgrund seiner einfachen bedienerfreundlichen Gestaltung in kurzer Zeit und ohne das Know-How eines Ingenieurs einsatzbereit zu machen und zu betreiben (Bonev 2014a). Siehe in Abbildung 9 beispielhaft die Bedienoberfläche. Dabei ist die Rede von ein paar Minuten, bei einfachen Tätigkeiten, bis zu 2 Tagen, bei aufwändigeren Aufgaben, die

¹⁶ Grundlegende Informationen werden von KUKA angeboten, UR: <http://www.kuka-lbr-iiwa.com/public/360/de/150325/start.html> (01.01.2016).

¹⁷ Abgedeckt sind leichte, häufig bis dauernd auftretende, kaum vermeidbare Verletzungen, siehe UR: <http://www.safetyteams-ce-kennzeichnung.de/ce-kennzeichnung-newsletter-Performance-Level.htm> (01.01.2016).

¹⁸ Siehe UR: <http://www.universal-robots.com/products/ur-robot-benefits/> (01.01.2016).

programmiert werden müssen (Guizzo 2015)¹⁹. Da das Betriebssystem basierend auf Linux und die grafische Benutzeroberfläche PolyScope basierend auf Java aufgebaut sind, stehen Ingenieuren auch mit diesem Roboter komplexere Programmierungsmöglichkeiten zur Verfügung. Dabei ist es, wie beim LBR iiwa, möglich ohne großen Aufwand die Zusammenarbeit mit externen Geräten, wie Kamerasystemen, zu realisieren (Larson 2013). Des Weiteren bieten die Achsen einen hohen Bewegungsspielraum. Bei dem UR3 ist es zusätzlich möglich die letzte Achse direkt an der mechanischen Schnittstelle frei zu drehen, was einfache Schraubvorgänge zulässt²⁰. Dies wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass Kabeln, die beispielsweise der Stromversorgung des angebrachten Endeffektors dienen, entlang der Außenkontur angebracht werden müssen. Dafür wird ein modularer Aufbau der UR-Produkte ermöglicht (siehe Abbildung 9), der einen schnellen Austausch einzelner Gelenks zur Folge hat²¹. Der Anbieter wirbt abgesehen davon mit Energieeffizienz, vergleichsweise geräuscharmen Betrieb und einem Einsatzgebiet von 0-50°C. Die UR-Serie scheint durch die genannten Vorteile die aktuellen Anforderungen gut zu treffen, was mit jährlich steigenden Verkaufszahlen belegt werden kann (Guizzo 2015). Dies schafft Universal Robots auch speziell durch das Anbieten kompletter Lösungen und der engen Zusammenarbeit mit einem weltweiten Netzwerk von Vertriebspartner und Systemintegratoren wie z.B. Faude Automatisierungstechnik, die Mai 2015 von KUKA gekauft wurden (Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH 2014; Bonev 2014a; Guizzo 2015)²².

¹⁹ Meinungen unter UR: <https://www.youtube.com/watch?v=glq3-rEsn6c> (01.01.2016) und UR: <https://www.youtube.com/watch?v=iWm1FeUzcWI> (01.01.2016).

²⁰ Siehe Universal Robots' Herstellerproduktblätter oder z.B. in Minute 2:22 UR: https://www.youtube.com/watch?time_continue=143&v=Unszztoh_Pk (01.01.2016).

²¹ Ein Tag Lieferzeit, 30 min Austausch, UR: <http://www.universal-robots.com/pt/sobre-a-ur/news-centre/universal-robots-launches-ur3/> (01.01.2016).

²² UR: http://www.automationspraxis.de/c/document_library/get_file?p_l_id=35080690&folderId=40315512&name=DLFE-25491801.pdf (01.01.2016).



Abbildung 9: UR-Reihe Produktdarstellung: Bild links oben – Darstellung des UR3; Bild rechts – Transport des UR5 und des zugehörigen Steuerungsgerätes; Bild links unten – Beispielhafte Darstellung des Bediengerätes und der Bedienoberfläche²³

Rethink Robotics ist ein Spin-off des Massachusetts Institute of Technology. Die Firma wurde 2008 gegründet und brachte ihr erstes Produkt, den Baxter (siehe Tabelle 4), 2012 auf den Markt. Es kann angenommen werden, dass aufgrund der schwachen Absatzzahlen des ersten Produktes und um andere Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen, Rethink Robotics reagiert hat und deswegen im März 2015 mit seinem zweiten Produkt, dem **Sawyer**, seine Produktlinie erweitert hat (Bélanger-Barrette 2015b; Hagerty 2015). Dieses ist mit seinem Preis und Traglast zwischen dem UR 3 und UR 5 angesiedelt und mit seinem Eigengewicht etwas über dem UR 5. Der Roboter besitzt damit zwar das geringste Traglast zu Eigengewicht Verhältnis, jedoch weist er dabei auch die größte Reichweite auf. Was den Roboter im Vergleich zu seiner Konkurrenz auszeichnet, ist das integrierte Bildverarbeitungssystem und der als Kopf fungierender Bildschirm. Diese stehen in direktem Zusammenhang. Im Betrieb werden auf dem Bildschirm, dass die Abmessungen eines herkömmlichen Tablets aufweist, zwei Augen mit Augenbrauen animiert²⁴ (Abbildung 10). Diese dienen dazu dem Menschen in seinem Umfeld Feedback über seine Bewegungsrichtungen zu geben, indem die Augen in diese Richtung blicken, und bei Warnungen der Bildschirm Rot zu leuchten beginnt (Guizzo und Ackerman 2012). Auf diesem Bildschirm können aber auch die von den Kameras aufgenommenen Bilder wiedergegeben werden, was das Handling für den Mitarbeiter vereinfacht. Die eine Kamera ist über dem Bildschirm montiert und dient

²³ Siehe hierzu UR: https://www.youtube.com/watch?v=Unsztoz_Pk (01.01.2016).

²⁴ Siehe hierzu UR: <https://www.youtube.com/watch?v=H3tqJktCvvM> (01.01.2016).

zur Aufnahme des weiteren Umfeldes, wogegen die zweite Kamera am Handgelenk des Roboters montiert ist und mit einer integrierten Lichtquelle den im Fokus stehenden Arbeitsbereich erfassen kann. Hiermit kann der Roboter auch auf den Arbeitsflächen angebrachte QR-Codes scannen und dadurch Informationen sammeln²⁵. Auch können mit Hilfe der Armkamera Produkte gegriffen werden, für die ein bestimmter Raum und nicht eine exakte Position vordefiniert wurden²⁶. Der Kopf des Roboters macht den Roboter aber auch sperriger zu transportieren²⁷ und es wird vermutet, dass dadurch eine Installation kopfüber nicht möglich ist. Bedient wird der Roboter über die unternehmensinterne Plattform Intera, die Linux und ROS basiert ist. Der Roboter verspricht, wie bei der UR-Serie, eine einfache Handhabung und Installation²⁸. Dabei werden der Kopf-Bildschirm und die Tasten am Roboterarm, wie schon bei dem Baxter, zur Bedienung verwendet. In Sachen Sicherheit ist der Roboter nicht nach den europäischen Normen zertifiziert. Trotzdem wird dieser im Gegensatz zu Universal Robots in einem Zug mit europäischen Herstellern wie KUKA und ABB genannt (Bonev 2014a). Dies liegt daran, dass es in den USA einerseits den europäischen Maschinenrichtlinien entsprechende Gesetze²⁹ gibt und andererseits die Gelenke des Sawyers Kraftsensoren in Form von Titanfedern verbaut haben. Durch diese Sensoren soll es dem Roboter, wie auch dem LBR iiwa, möglich sein, Bauteile durch fühlen in Öffnungen zu platzieren (Guizzo und Ackerman 2012; Guizzo). Abschließend bietet der Hersteller passend zur kompakten Bauart mit integriertem Bildbearbeitungs- und Bediensystem noch einen Sockel auf Rädern, mit dessen Hilfe der Roboter auf der Höhe von etwa einem Meter frei verschoben werden kann³⁰. Dieser ist in Abbildung 10 zu sehen. Dabei ist ein Platz für das Steuerungsgerät vorgesehen.

²⁵ UR: <https://www.youtube.com/watch?v=sDnwE75WjG4> (01.01.2016).

²⁶ UR: <https://www.youtube.com/watch?v=gXOkWuSCKRI> (01.01.2016).

²⁷ Siehe UR: <https://www.youtube.com/watch?v=tlJNg3uCvS8> (01.01.2016) – Transport durch zwei Rethink Robotics Mitarbeiter und dem Hinweis, diesen nicht am Kopf anzupacken.

²⁸ UR: <http://www.rethinkrobotics.com/intera/> (01.01.2016).

²⁹ Siehe z.B. UR: http://nieuwsbrief.pilz.nl/nieuws/nieuwsbrief/Safety-Update/pilz050225_005_files/hbmV_3.pdf (01.01.2016, S45) und UR: <https://www.pilz.com/de-AT/company/news/articles/073804> (01.01.2016).

³⁰ UR: <https://www.youtube.com/watch?v=tlJNg3uCvS8> (01.01.2016).

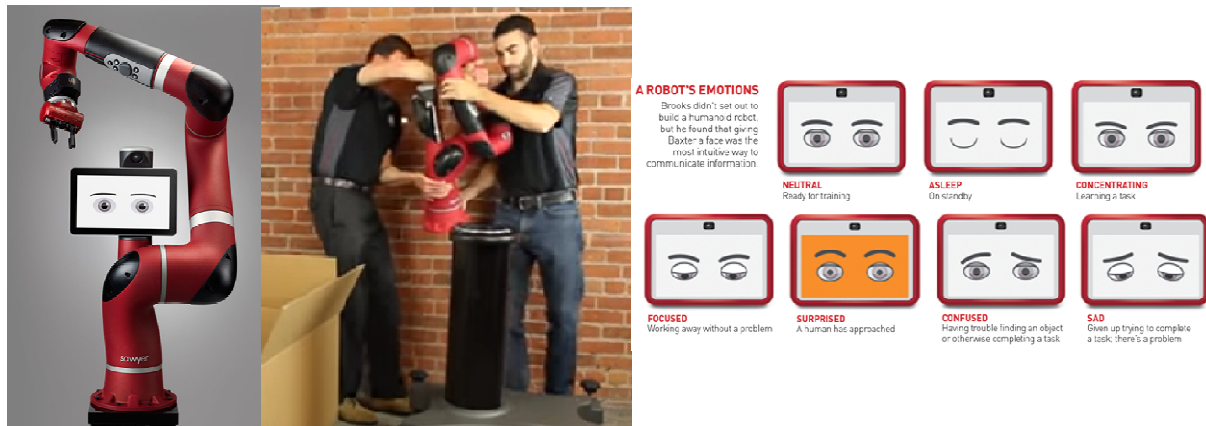


Abbildung 10: Sawyer Produktdarstellung: Bild links – Darstellung des Sawyers; Bild in der Mitte – Transport des Sawyers und Transportsockel³¹; Bild rechts – verschiedene Ausdrucksformen des Sawyers³²

Tabelle 5: Detaillierte Darstellung der technischen Spezifikationen gewählter kollaborierender Roboter

Spezifikationen	LBR iiwa 7	UR 3	UR 5	Sawyer
Hersteller	KUKA	Universal Robots		Rethink Robotics
Herkunft	Deutschland	Dänemark		USA
Firmengründung	1898; Industrieroboterherstellung seit 1973	2005		2008
Markteinstieg mit kollaborierenden Robotern	k.A	2009		2012
Markteinstieg mit diesem kollaborierenden Roboter	2013	2015	2009	2015
Preis	Ca. € 65.000	US\$ 23.000 (ca. € 21.400)	US\$ 35.000 (ca. € 32.500)	US\$ 29.000 (ca. € 27.000)
Anzahl der Achsen	7	6		7
Traglast	7 kg	3 kg	5 kg	4 kg
Reichweite	911 mm	500 mm	850 mm	1260 mm
Eigengewicht	22,3 kg	11 kg	18,4 kg	19 kg

³¹ Siehe hierzu UR: <https://www.youtube.com/watch?v=tIJNg3uCVs8> (01.01.2016).

³² Siehe hierzu UR: <http://www.inc.com/magazine/201210/david-h-freedman/the-rise-of-the-robotic-workforce.html> (01.01.2016).

Fortsetzung Tabelle 5

Geschwindigkeit	90-180°/s in den Gelenken	1 m/s am Endeffektor; max. 180°/s in den Gelenken		1 m/s ohne Last; 0,6 m/s mit Last am Endeffektor
Verhältnis Traglast zu Eigengewicht	0,29	0,27		0,21
Wiederholgenauigkeit	+/- 0,1 mm			
Min. Lebensdauer	30.000 h	35.000 h		
Schutzklasse nach DIN EN 60529	IP 54			
Sicherheitszertifizierung nach EN ISO 13849	PL d	PL b		-
Betriebssystem	Java	Java-basiertes User-Interface Polyscope; Linux-basiertes System		User-Interface Intera (Linux- und ROS-basiert)
Ausstattung	Roboterarm + Bedienplattform + Steuerungskasten			
Achsen 360° verdrehbar	Nein	Ja	Nein	Nein
Stromverbrauch	Ca. 1kW (Schinnerl 17.12.2015)	Ca. 100 W	Ca. 200 W	k.A.
Eingesetzte Sensoren	Drehmoment-sensoren	Strommessung	Strommessung	Kraftsensoren
Lautstärke	<75db (A)	leise		k.A.
Umgebungsbedingungen für den Einsatz	5-33 °C	0-50 °C		k.A.
Mögliche Anwendungslage	Keine Einschränkung			Vermutlich nur wie in Abbildung 10
Bei Bedienung / Installation Experte nötig?	Ja	Nein		
Integriertes Bildverarbeitungssystem	Nein			Ja

Anhand dieser Ausführungen kann der in der Zielsetzung der Arbeit geforderte Bogen in die Praxis geschlagen werden. Die Detailbetrachtung der vier am Markt

erhältlichen kollaborierenden Roboter liefert ein breiteres Verständnis wie die neuen Eigenschaften (Kollaborationsfähigkeit, einfache Programmierbarkeit, Ortsflexibilität, geringe Anschaffungskosten) realisiert werden und eine Differenzierung unterschiedlicher Erfüllungsgrade dieser. Dabei wird dargestellt, was bei dem Ankauf und der Installation solcher Roboter zu beachten ist.

3.5 Aktuelle Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen von CPMS am Beispiel kollaborierender Roboter

Anhand der Ausführungen in diesem Kapitel werden CPS als radikale Innovationen identifiziert, deren Einführung in einem Unternehmen alle wichtigen Funktionsbereiche berühren. Solche disruptiven Änderungen durch revolutionäre Anwendungen sind das Ziel im Zuge der Industrie 4.0, mit denen Industrieunternehmen in Hochlohnländern auf die hohen Dynamiken am Markt reagieren können. Am Beispiel kollaborierender Roboter kann ein Übergang zu einer neuen Phase in der Entwicklung zu voll ausgereiften CPS identifiziert werden. Die neuen Eigenschaften solcher Roboter der Kollaborationsfähigkeit, der einfachen Programmierbarkeit, der Ortsflexibilität und der geringen Anschaffungskosten führen zu einer steigenden nutzerzentrierten Funktionalität, der Möglichkeit einer Vernetzung und Einbettung in die Umgebung, dem Anstieg in der Komplexität der Wirkketen und vielfältigen Nutzungsrisiken. Solche Entwicklungen charakterisieren laut (Geisberger et al. 2012, S. 83) den Wandel zu einer höheren CPS-Entwicklungsstufe.

Die Detailbetrachtungen kollaborierender Roboter stellen diese Entwicklungen konkret dar. Sie weisen gesteigerte nutzerzentrierte Funktionalität auf in dem sie flexibel an unterschiedlichen Arbeitsplätzen eingesetzt werden, dem Menschen immer mehr nicht ergonomisch optimierte monotone Tätigkeiten abnehmen und mit diesem auf engem Raum zusammenarbeiten können. Bei dieser Zusammenarbeit ergeben sich vermehrt Nutzungsrisiken, da die Roboter ihre Kollaborationsfähigkeit durch Gelenkssensoren und nicht durch ein Bildverarbeitungssystem erhalten. Die Roboter sind am aktuellen technischen Stand sozusagen blind. Schnittstellen, um die Roboter mit der in den Unternehmen vorhandenen Infrastruktur zu vernetzen und sie so in das Umfeld verbessert einzubetten, werden durch offene Programmierplattformen, wie Java ermöglicht. Jedoch ist die Netzwerkfähigkeit von den vorhandenen Infrastrukturen abhängig und die Technologien sind noch nicht selbstständig in der Lage zu kommunizieren. Anhand des Demonstratorbeispiels im Zuge der smeRobotics Initiative kann unter Verwendung des LBR iiwa (vgl. Abschnitt 3.4) gezeigt werden, wie die Maschinen in naher Zukunft in unternehmensweite Systeme eingebunden werden und basierend auf den

vorhandenen Informationen, wie z.B. CAD-Modelle der Produkte, aktiv mit den Mitarbeitern kommunizieren könnten³³. Im Zuge dessen sei aber auch auf die nötige flexible Bereitstellung von Prozessmedien, wie Strom und Druckluft, hingewiesen. Damit befinden sich die kollaborierenden Roboter auf der zweiten Entwicklungsstufe auf dem Weg zu vollausgereiften CPS. Auf der nächsten Stufe wird es den Maschinen möglich werden intelligent mit anderen Systemen Kontakt aufzunehmen, jedoch noch nicht plug-and-produce Fähigkeiten zu nutzen und autonom und dezentral an der Gestaltung eines Gesamtsystems mitzuwirken.

Durch die Ausführung als Leichtbauroboter stellen kollaborierende Roboter transportfähige, funktional selbstständige und vorgetestete Module, die rasch auswechselbar sind, dar, wie dies am Ende von Abschnitt 2.4 gefordert wurde. Damit wird der Einsatz solcher Systeme entscheidend zur Realisierung der am Anfang von Abschnitt 2.4 angeführten Leitsätze zukünftiger Produktion beitragen (siehe auch (Naumann und Fechter 2015, S. 362)).

Anhand der Erkenntnisse dieses Kapitels liegt ein konkreter Praxisbezug der Arbeit vor. Dadurch werden die Eigenschaften kollaborierender Roboter anhand der technischen Spezifikationen der gewählten Produkte spezifiziert und die Schwierigkeit einer differenzierten Betrachtung wird aufgezeigt. Es bedarf einer Vorgehensweise, die die technischen Spezifika der verschiedenen kollaborierenden Roboter in den Kontext eines Anwendungsfalles setzt, um das geeignete Produkt wählen zu können. Dabei sei darauf verwiesen, dass die aus Literaturrecherche stammenden Informationen nicht so detailliert ausfallen, wie dies mit dem Test an den Produkten selber möglich gewesen wäre. Jedoch bieten die Erkenntnisse der dargestellten Praxistests fundierte Einblicke, die eine ausreichende Basis für die kommenden Ausführungen liefert.

³³ Siehe UR: <http://www.smerobotics.org/demonstrations/d3.html> (01.01.2016) und UR: <https://www.youtube.com/watch?v=Qpvr57GYDV4> (01.01.2016).

4 Methoden zur Bewertung von Betriebsmitteln

„Unter Bewertung ist die Zuordnung einer Vergleichsgröße zu einem Objekt zu verstehen. Die anschließende Auswahl ist die systematische Suche nach einer möglichst optimalen Lösung aus mehreren zulässigen Lösungen“ (Hartel und Lotter 2012, S. 377). Entwickelte Methodiken stellen neben Konstrukten, Modellen und Implementierungen eine von vier synthetischen Artefakten zur Lösung von praktischen Problemen³⁴ dar (March und Smith 1995, S. 256ff.). *Methoden* bieten einen geregelten Ablauf zur Lösung von Aufgaben und basieren, auch wenn nicht explizit darauf hingewiesen, auf Konstrukten und Modellen (March und Smith 1995, S. 257). *Konstrukte* oder auch Meta-Modelle nach Becker et al. (1995, S. 437) geben die Sprache vor in denen die Probleme und Lösungen definiert und kommuniziert werden (March und Smith 1995, S. 256ff.). Sie bilden die Basis für die Modellbildung. *Modelle* werden als immaterielle Abbildung der Realwelt verstanden, die dazu dienen sollen, Zusammenhänge der Realwelt zu visualisieren und dienen daneben zur Gestaltung neuer Systeme (Becker et al. 1995, S. 435). Die Realisierbarkeit und Effektivität von Modell und Methoden werden nach ihrer Erstellung durch die reale *Implementierung* demonstriert (March und Smith 1995, S. 258).

Zur Entwicklung von Methoden wird in der Literatur ein rationaler Problemlösungsprozess skizziert der iterativ durchlaufen wird (Wieringer 2009, S. 4). Dieser Kreislauf besteht aus vier Phasen. Er startet mit der *Problemdefinition* (vgl. Kapitel 1-3), welche selbst das Ergebnis eines Artefakts bzw. der Lösung einer vorangegangenen praktischen Problemstellung sein kann. Die daraus resultierenden Diagnosen und definierten Ziele bilden die Ausgangslage für das *Erarbeiten des Lösungsdesigns* (Kapitel 4-5) des Artefaktes. Darauf folgt eine *Validierung* (Kapitel 6) in der überprüft wird, ob die erarbeiteten Lösungsvorschläge die Interessensgruppen, den sogenannten Stakeholdern, auch zu den gewünschten Zielen führen. Wenn die Validierung abgeschlossen ist und man sich der möglichen Effekte bewusst ist, folgt die *Ausführung/Implementierung*. Diese wird in erster Linie im Labor oder in Testanwendungen stattfinden. Anhand der Implementierung wird das erstellte Artefakt dann *evaluiert*. Dabei wird überprüft ob die validierte Methodik auch im tatsächlichen Einsatz die gewünschten und erwarteten Effekte zur Folge hat. Diese letzte Phase kann zugleich wieder der Anfang eines weiteren Kreislaufes darstellen, da hier eine Problemstellung generiert werden kann.

In diesem Kapitel ist die Identifikation, Analyse und Auswahl relevanter Methoden und Werkzeuge, die der Unterstützung von Bewertungs- und Auswahlentscheidungen von Betriebsmitteln auf SA-Ebene dienen, dargestellt. Damit

³⁴ Praktische Probleme werden wie folgt definiert: „*Practical problems call for a change of the world so that it better agrees with some stakeholder goals*“ (Wieringer 2009, S. 1).

wird hier die erste Phase (Problemdefinition) des rationalen Problemlösungsprozesses abgeschlossen und die zweite Phase (Erarbeitung des Lösungsdesigns) gestartet. Zuerst werden aus dem in den vorangegangenen Kapiteln beleuchtetem Spannungsfeld entwickelte Anforderungen beschrieben. Darauf folgt eine Analyse der anhand der Zielstellung der Arbeit in der Literatur identifizierten Vorgehensweisen. Diese werden hinsichtlich ihres Einsatzgebietes, ihres Ablaufes und ihrer Vor- und Nachteile einer Detailbetrachtung unterzogen. Abgeschlossen wird mit einer Bewertung der Methodiken anhand der Anforderungen und einem Ableiten von Handlungsempfehlungen.

4.1 Anforderungen an Methoden zur Bewertung und Auswahl von Produktionsmittel in der Montage

Die in diesem Abschnitt dargestellten Anforderungen dienen einerseits der Filterung und Bewertung relevanter Methodiken, die für die Umsetzung der Zielstellung dieser Arbeit als geeignet betrachtet werden. Andererseits wird anhand der Anforderungen eine abschließende kritische Betrachtung im Zuge der Validierung in Kapitel 6 durchgeführt. Die Anforderungen resultieren aus den Erkenntnissen vorangegangenen Kapiteln und konnten unter Berücksichtigung von allgemeinen Richtlinien zur Methodenentwicklung (March und Smith 1995; Becker et al. 1995; Wieringer 2009) und der in (Karl 2014) und (Pachow-Frauenhofer 2012) entwickelten Anforderungen erstellt werden.

Anforderung 1: Ganzheitliche Darstellung des Einsatzgebietes

Im Zuge der Durchführung der Methode ist es zu ermöglichen, die Ziel- und Zustandsgrößen der relevanten Montagestationen in geeigneter Weise abzubilden, sodass das Einsatzgebiet der zu bewertenden Betriebsmittel auf SA-Ebene ganzheitlich dargestellt werden kann (vgl. Kapitel 2). Dabei sind Stückzahlschwankungen, das Auftreten neuer Produktvarianten und neue Prozessgestaltungen über den gesamten Lebenszyklus in die Bewertung aufzunehmen (Naumann und Fechter 2015).

Anforderung 2: Ganzheitliche Darstellung der Betriebsmittel

Neben dem Zielsystem muss die Methode auch eine geeignete Darstellung der Betriebsmittel auf SA-Ebene über deren Lebenszyklus ermöglichen (vgl. Kapitel 3). Es muss ein Rahmen geboten werden in dem umfassende Eigenschaften und technische Spezifika aufgenommen werden können. Dabei gilt es mit schwer quantifizierbaren aber maßgebenden Eigenschaften umgehen zu können. Darunter fallen z.B. Flexibilität und ihre Ausprägung in mehreren Dimensionen (siehe z.B. Pachow-Frauenhofer 2012; Wiendahl et al. 2009), softwarebezogenen Eigenschaften, wie die Bedienfreundlichkeit und die Fülle programmierbarer Abläufe,

Feinfühligkeit und Vernetzbarkeit. Dieses Problem besteht im Besonderen bei einer Detailbetrachtung ähnlicher Produkte derselben Produktklasse ohne diese einem Anwendungs-/Produkttest unterziehen zu können. Um eine ganzheitliche Betrachtung zu gewährleisten muss ebenfalls die Abhängigkeit der Betriebsmittel von der vorhandenen Infrastruktur berücksichtigt werden. Diese können zum Beispiel ohne vorhandene ortsflexible Bereitstellung nötiger Prozessmedien, wie Strom, ihre Eigenschaft der Mobilität nur eingeschränkt entfalten.

Anforderung 3: Objektive Diskussionsgrundlage für Investitionsentscheidungen unterschiedlichster Alternativen

Die Methode soll die Darstellungen der Zielgrößen mit der Darstellung der Betriebsmittelspezifika verknüpfen können (vgl. Kapitel 1). Einerseits soll dabei eine objektive Diskussionsgrundlage für nachhaltige Investitionsentscheidung geboten werden. Andererseits soll durch eine geeignete Entkoppelung der Betrachtungsebenen eine Plattform geschaffen werden, auf der auch weitgefässere Alternativen miteinander verglichen werden können. Dadurch kann der Forderung die Methodik in zukünftigen Arbeiten auszuweiten, um den Nutzen von CPS ganzheitlich gegenüber konventionellen Lösungen bewerten zu können.

Anforderung 4: Hilfestellung der Datenermittlung

Die Methodik soll einen Rahmen bieten in dem der Anwender bei einer gezielten Suche nach den für die Investitionsentscheidung relevanten Daten Unterstützung findet und nicht Aufwand durch die Betrachtung von für den Anwendungsbereich unbedeutenden Informationen entsteht. Dabei erfährt das Umgehen der Methode mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden an Daten eine zentrale Rolle. Daten basierend auf Literatur- und Internetrecherche müssen zu geeigneten Diskussionsgrundlagen führen, wie Daten aus Produkttests. Diese Anforderung resultiert aus der aufwändigen Informationsbeschaffung zur ganzheitlichen Darstellung kollaborierender Roboter (vgl. Kapitel 3).

Anforderung 5: Einfache Handhabbarkeit

Um den praktischen Einsatz mit geringem Schulungsaufwand zu erleichtern, muss die Methode eine einfache Handhabbarkeit aufweisen und dies auch bei einer großen Menge an Eingangsdaten ermöglichen. Dabei hat der Nutzen der durch den Einsatz entsteht den Aufwand zu überschreiten (Pachow-Frauenhofer 2012; Hevner et al. 2004).

Anforderung 6: Flexibilität und Nachhaltigkeit

Aufgrund des mit hohen Unsicherheiten behafteten Umfeldes in dem diese Methodik entwickelt wird, muss die Methode selbst flexibel, erweiterbar und anpassungsfähig

aufgebaut werden, um nachhaltig gestaltet zu sein. Dadurch soll auch der in der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit geforderten Erweiterbarkeit hinsichtlich der Analyse breiter gefasster Alternativen Rechnung getragen werden (vgl. Kapitel 1). Dies stimmt auch überein mit der von (Klein und Scholl 2004) geforderten Vergleichbarkeit von Alternativen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften. Diese muss entweder gegeben sein oder erzeugt werden (Klein und Scholl 2004, S. 129).

4.2 Ausgewählte Methoden

Allgemein können Bewertungsmethoden in mono- und multikriterielle bzw. ein- und mehrdimensionale Verfahren eingeteilt werden (vgl. Abbildung 11; Pachow-Frauenhofer 2012; Hartel und Lotter 2012; Hall 2002). Monokriterielle stellen Verfahren dar, die Alternativen anhand eines Faktors bewerten. Hierbei handelt es sich im Normalfall um eine monetäre Bewertung und nur solche werden im Weiteren zufolge der Zielstellung dieser Arbeit betrachtet. Diese Investitionsrechnungen können in statische und dynamische Methoden untergliedert werden. Erstere basieren auf den zum Zeitpunkt der Berechnung gültigen Parametern. Letztere werden angewandt, wenn die zeitliche Entwicklung über den Nutzungszeitraum von Bedeutung ist. Multikriterielle Verfahren befassen sich mit einem Problem indem dieses in Zielgrößen gegliedert wird, die nicht oder nur schwer monetär bewertbar sind – sogenannte weiche Faktoren (Karl 2014, S. 36). Sie stellen sozusagen den Nutzen der zu bewertenden Alternativen bei der Erfüllung bestimmter Zielgrößen dar. Diese Verfahren werden daher im Weiteren unter Nutzenbewertung (-smethoden) angeführt. Erst die Kombination der monetären und der Nutzenbewertung erlaubt eine ganzheitliche Bewertung (Hartel und Lotter 2012, S. 371&377; Wiendahl et al. 2009; Müller 2008, S. 58; Pawellek 2008, S. 46–47). Dies wird als dualer Bewertungsansatz bezeichnet.

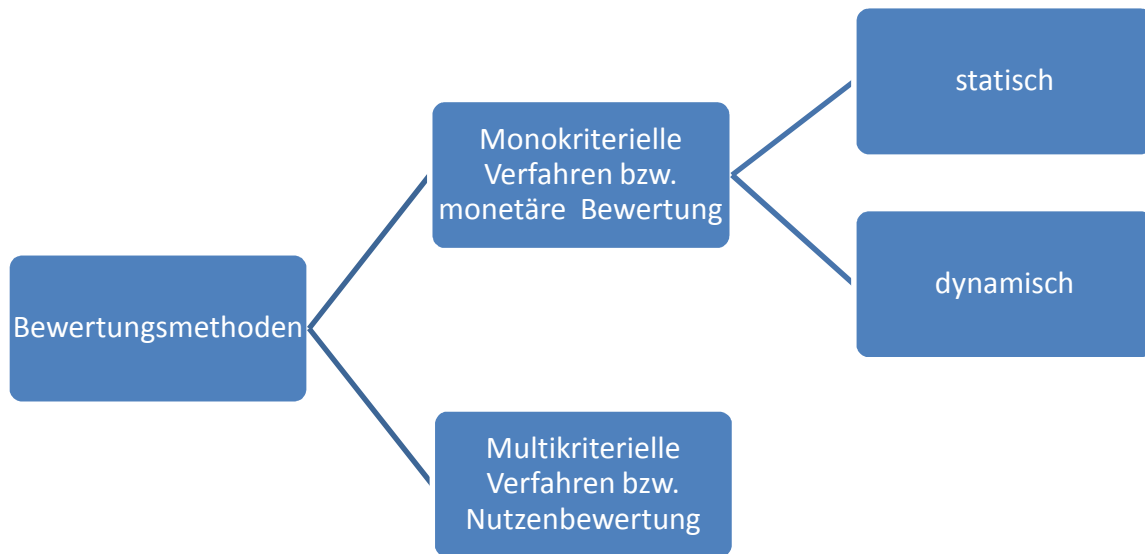


Abbildung 11: Einteilung von Bewertungsmethoden

Die in den folgenden Abschnitten im Detail betrachteten Methoden werden anhand der anschließenden Analyse als relevant identifiziert und in den nächsten Abschnitten einer Detailuntersuchung unterzogen, um die für diese Arbeit geeignetsten Methoden und Werkzeuge zu ermitteln. Da die fach einschlägige Literatur keine Methode beinhaltet, die die Zielstellung dieser Arbeit in vollem Umfang erfüllt, wurde eine Recherche durchgeführt, die einerseits Literatur zur Planung von Betriebsmitteln und Produktionsalternativen in ähnlichen Anwendungsfällen (Karl 2014; Müller 2008; Hall 2002; Spillner 2015) und andererseits allgemeine Grundlagen der Montagesystemgestaltung (Lotter und Wiendahl 2012a; Pachow-Frauenhofer 2012) und der Fabrikplanung (Wiendahl et al. 2009; Schenk et al. 2014; Pawellek 2008) anhand der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 untersucht.

Um der geforderten **dualen Bewertung** nachzukommen, sind relevante monetäre und Nutzenbewertungsmethoden zu identifizieren. Anhand der Literaturrecherche gingen das Life-Cycle-Costing aufbauend auf der Kapitalwertmethode stellvertretend für dynamische Investitionsrechnungen und die statische Amortisationsrechnung und die Maschinenstundensatzrechnung stellvertretend für statische Investitionsrechnungen als für eine Detailbetrachtung relevant hervor (vgl. Tabelle 6). Ob in dieser Arbeit eine dynamische oder statische monetäre Bewertung anzuwenden ist, wird im Zuge der Methodenentwicklung (vgl. Kapitel 5) ermittelt. Für die Nutzenbewertung wurden die Nutzwertanalyse und das Quality Function Deployment herangezogen. Für die Kombination im Zuge der dualen Bewertung wurde unter anderem die erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung als geregelter Rahmen identifiziert.

Das **Life-Cycle-Costing (LCC)** ist eine allgemeine Vorgehensweise, um alle im Lebenszyklus anfallende Kosten eines Systems berücksichtigen zu können (Wiendahl et al. 2009, S. 505). Damit kommt diese Methodik den Aspekten der Ganzheitlichkeit und Nachhaltigkeit am geeignetsten nach. Mit diesem Fokus wird dann ein traditionelles Verfahren der dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 38). Die Verfahren der dynamischen Bewertung befassen sich mit denselben Berechnungen, nur betrachten sie diese unter unterschiedlichen Aspekten. Die **Kapitalwertmethode** befasst sich mit dem verbleibenden Kapitalwert eines Investitionsgutes am Ende der Nutzungsdauer (vgl. 4.2.1). Die **dynamische Amortisationsrechnung** gibt den Zeitpunkt über der Nutzungsdauer an dem der Kapitalwert Null wird und sich die Investition damit amortisiert. Die **interne Zinsfußmethode** ermittelt die Verzinsung bei der der Kapitalwert über die Nutzungsdauer Null wird und stellt dadurch ebenfalls eine Erweiterung der Kapitalwertmethode dar (Müller 2008, S. 55). Die **Annuitätenmethode** repräsentiert „...nur eine finanzmathematische Variation der Kapitalwertmethode...“ (Hoffmeister 2008, S. 124). Einzig der **Realoptionsansatz** ist eine eigenständige Methodik, die aus der Finanzwirtschaft entlehnt ist und keine transparente Ergebnisse und keine einfache Handhabung liefert (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 36). Die Kapitalwertmethode wurde für die Detailbetrachtung gewählt, da sie „...das zentrale und wissenschaftlich am stärksten akzeptierte Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung...“ (Schenk et al. 2014, S. 736) bildet und besonders geeignet für das LCC ist (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 38). Erstgenannte Meinung ist in der Fachliteratur weit verbreitet (vgl. „Referenz“ in Tabelle 6 und Brieke 2009).

Die Wahl für eine Detailbetrachtung der Methoden der statischen Investitionsrechnung stammt daher, dass die **statische Amortisationsrechnung**, die Basis für die dynamischen Verfahren legt, und nur diese und die **Montagestückkostenrechnung** von den Experten in (Hartel und Lotter 2012) als gleichwertige Methoden (Hartel und Lotter 2012, S. 381) in Betracht gezogen werden. Die erhöhte Relevanz dieser beiden Methoden den anderen gegenüber ist auch, durch die höhere Präsenz in der Literatur auszumachen (vgl. Tabelle 6). Anhand der beiden genannten Methoden kann die Wirtschaftlichkeit von Investitionsgütern vollständig dargestellt werden. Die statische Amortisationsrechnung ermittelt den Kapitaleinsatz je Einsparung in Geldeinheit pro Jahr (Hartel und Lotter 2012, S. 381) und anhand der Montagestückkostenrechnung kann der Maschinenstundensatz als Teil der Herstellkosten ermittelt werden. Alternativ zu diesen Verfahren können die folgenden durchgeführt werden, die ähnliche Ergebnisse liefern, in dieser Arbeit aber nicht näher betrachtet werden. In der **Kostenvergleichsrechnung** werden Betriebs- und Kapitalkosten von alternativen Produktionssystemen für eine Periode bei gegebener Kapazität gegenübergestellt (Müller 2008, S. 54–55). Die **Gewinnvergleichsrechnung**

erweitert die Kostenvergleichsrechnung um die Berücksichtigung von Erträgen. „Sie zielt auf die Bestimmung und den Vergleich von Gewinnen der Investitionsalternativen ab“ (Müller 2008, S. 55). „Im Zuge der **Rentabilitätsrechnung** wird diejenige Investition ermittelt, welche die höchste Rentabilität [als Verhältnis von erzieltm Gewinn (bzw. Kostenersparnis) zum Kapital des Betriebs] bezogen auf eine Periode aufweist“ (Müller 2008, S. 55).

Die **Nutzwertanalyse (NWA)** wurde gewählt, da sie relative einfach an unternehmensspezifische Rahmenbedingungen angepasst werden kann (Müller 2008, S. 118–121) und einen in der Industrie weitverbreiteten Ansatz darstellt (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35). Der **Analytisch-Hierarchischer Prozess** bzw. Vorrangmethode nach Saaty baut auf den Überlegungen der Nutzwertanalyse auf und stellt eine „...viel aufwändigere Vorgehensweise dar“ (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35). Die **Portfolioanalyse** betrachtet Alternativen anhand von zwei bis drei Dimensionen und ist daher nicht geeignet. Im Zuge der Recherchen ist das **Quality Function Deployment (QFD)** aufgefallen, das eine Methodik zur Produktentwicklung darstellt. Dies geschieht anhand einer mehrphasigen Betrachtung von ineinandergreifenden Korrelationsmatrizen, die der Nutzwertanalyse ähneln. Damit birgt dieses Vorgehen das Potential die Anforderungen 3 und 6 (vgl. Abschnitt 4.1) besser als die Nutzwertanalyse zu erfüllen und wird daher in die Detailbetrachtung aufgenommen.

Die Methode der **erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR)** bietet neben herkömmlichen Verfahren der dualen Bewertung (wie die **Kosten-Wirksamkeitsanalyse**) einen Rahmen zur Betrachtung monetärer, aber auch nichtmonetärer Zielstellung (Wiendahl et al. 2009, S. 507). Sie kombiniert den Kapital- mit dem Nutzwert (Wiendahl et al. 2009, S. 506; Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35). Daher wird diese einer Detailbetrachtung im Zuge der dualen Bewertung ebenso unterzogen, wie die Kosten-Wirksamkeitsanalyse. Letztere stellt die Kosten einer Variante einem aggregierten, nicht-monetären Gesamtnutzenwert gegenüber (Hall 2002, S. 59).

Tabelle 6: Für die Zielstellung dieser Arbeit als geeignet identifizierte Methoden

Methoden	Referenz	Kategorie	Detailbetrachtung
Kapitalwertmethode	(Karl 2014, S. 34–35), (Müller 2008, S. 55), (Hartel und Lotter 2012, S. 386), (Wiendahl et al. 2009, S. 505), (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 34), (Brieke 2009), (Schenk et al. 2014, S. 736–737)	monetär / dynamisch	Ja
Life-Cycle-Costing	(Wiendahl et al. 2009, S. 505), (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 38), (Schenk et al. 2014, S. 742–745)	monetär / dynamisch	Ja
Realloptionsansatz	(Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35–36)	monetär / dynamisch	Nein
Interne Zinsfußmethode	(Müller 2008, S. 55), (Hartel und Lotter 2012, S. 386), (Schenk et al. 2014, S. 738–739)	monetär / dynamisch	Nein
Annuitätenmethode	(Müller 2008, S. 55), (Schenk et al. 2014, S. 737–738)	monetär / dynamisch	Nein
Kostenvergleichsrechnung	(Müller 2008, S. 54)	monetär / statisch	Nein
Gewinnvergleichsrechnung	(Müller 2008, S. 55)	monetär / statisch	Nein
Rentabilitätsrechnung	(Müller 2008, S. 55)	monetär / statisch	Nein
Amortisationsrechnung	(Müller 2008, S. 55), (Hartel und Lotter 2012, S. 381), (Hartel und Lotter 2012, S. 385–386), (Schenk et al. 2014, S. 739)	monetär / statisch bzw. dynamisch	Ja
Montagestückkosten- bzw. Maschinenstundensatzrechnung	(Hartel und Lotter 2012, S. 381–383), (Müller 2008, S. 49)	monetär / statisch	Ja

Fortsetzung Tabelle 6

Nutzwertanalyse	(Karl 2014, S. 36), (Müller 2008, S. 58), (Hartel und Lotter 2012, S. 378–381), (Wiendahl et al. 2009, S. 504–505), (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35), (Hall 2002, S. 57–58), (Schenk et al. 2014, S. 746–747)	Nutzen	Ja
Analytisch-Hierarchischer Prozess	(Karl 2014, S. 36), (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35), (Schenk et al. 2014, S. 747–748)	Nutzen	Nein
Portfoliomethode	(Hall 2002, S. 59)	Nutzen	Nein
Quality Function Deployment (QFD)	(Hall 2002, S. 59), (Müller 2008, S. 36), (Schenk et al. 2014, S. 258)	Nutzen	Ja
Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR)	(Wiendahl et al. 2009, S. 505–507), (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35)	Duale Bewertung	Ja
Kosten-Wirksamkeits-Analyse	(Hall 2002, S. 59), (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35)	Duale Bewertung	Ja

Die dargestellten Methoden, die für eine Detailbetrachtung ausgewählt wurden, werden im Folgenden anhand ihres Einsatzgebietes, ihres Ablaufes und ihrer Vor- und Nachteile betrachtet. Daraus kann dann auf die Erfüllung der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 geschlossen werden und Handlungsempfehlungen für die Methodenentwicklung in Kapitel 5 abgeleitet werden.

4.2.1 Monetäre Bewertung

Bei der **Kapitalwertmethode** handelt es sich um ein monokriterielles dynamisches Bewertungsverfahren. Bei ihr dient der Barwert von verschiedenen zukünftigen Kostenströmen alternativer Investitionen als Bewertungsgrundlage (DIN EN 60300-3-3, S. 27; Müller 2008, S. 121ff.). Dieser wird anhand von auf den Zeitpunkt der Anschaffung abgezinste Ein- und Auszahlungen über den Lebenslauf eines Investitionsgutes berechnet (Wiendahl et al. 2009, S. 505). Die Investition mit dem höchsten Barwert erhält die beste Bewertung. Werte größer Null geben Auskunft darüber, dass sich das Investitionsgut am Ende der Laufzeit amortisiert hat (Hartel und Lotter 2012, S. 386).

Die Kapitalwertmethode ist eine weit verbreitete Methodik, die eine prinzipiell einfache Handhabung und Transparenz aufweist (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 34; Brieke 2009). Dem steht gegenüber, dass die Vorgehensweise bei einer starken Detaillierung der Bewertungsobjekte aufgrund erhöhter Unsicherheiten und der Datenvielfalt und -menge erschwert wird (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 34).

Diese Methode eignet sich besonders für Lebenszyklusbewertungen (Wiendahl et al. 2009, S. 505; Pachow-Frauenhofer 2012; Abele und Reinhart 2011, S. 129). Für die Durchführung des sogenannten **Life-Cycle-Costings** existiert bisher jedoch noch kein allgemeingültiger Standard (VDI 2884, S. 6). Dabei geht es um eine ganzheitliche Betrachtung der Kosten, die durch die Anschaffung eines Investitionsgutes entstehen: Entwicklungskosten, Herstellkosten, Anschaffungskosten, Instandhaltungskosten, Betriebskosten (Energieverbrauch), Entsorgungskosten (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 38). Um zu prüfen ob der mit der Anwendung einer Lebenszyklusbetrachtete hohe Aufwand gerechtfertigt ist, gilt es eine überwiegende Mehrheit der folgenden Fragen mit „Ja“ zu beantworten (VDI 2884, S. 8):

- Verursacht das Produktionsmittel im Verhältnis zu den einmaligen Beschaffungskosten hohe wiederkehrende Kosten und Folgekosten?
- Hat das Produktionsmittel eine hohe geplante Nutzungsdauer?
- Gewinnen die Folgekosten bei fortschreitender Nutzungsdauer des Produktionsmittels an Bedeutung?
- Handelt es sich um ein Produktionsmittel, das einen hohen Kapitaleinsatz über die Lebensdauer hinaus erfordert?
- Ist ein Kostensenkungspotenzial zu vermuten, das durch den Einsatz von LCC identifiziert werden kann?

Wenn diese Fragen überwiegend mit „Nein“ beantwortet werden, Daten über den Lebenslauf schwer zu ermitteln oder im Vergleich zu den Anschaffungskosten gering sind, kommen statische Verfahren, wie die **statische Amortisationsrechnung** und die **Montagestückkostenkalkulation**, zur Bewertung verschiedener Montagelösungen zur Anwendung (Hartel und Lotter 2012, S. 381; VDI 2884, S. 8). Bei der statischen Amortisationsrechnung wird der Zeitpunkt der Amortisation über den Kapitaleinsatz und die jährlichen Einsparungen ermittelt. Die Montagestückkosten werden über den Maschinenstundensatz (Müller 2008, S. 107), den Personalkostensatz und der Nettoleistung (Stück je Stunde) errechnet. Dem liegt eine Platzkostenkalkulation zugrunde (Hartel und Lotter 2012, S. 381–383).

4.2.2 Nutzenbewertung

Die **Nutzwertmethode** stellt das multikriterielle Pendant zur Kapitalwertmethode dar. Diese ist ebenfalls in der Praxis breit vertreten und bietet eine einfache und plausible Handhabung solange der Detaillierungsgrad nicht zu groß ist (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35; Müller 2008, S. 118ff.). Hier werden Alternativen und Zielgrößen in einer Matrix aufgetragen. Die Zielgrößen werden nach ihrer Relevanz für den Anwendungsfall gewichtet. Die Alternativen werden dann hinsichtlich der Erfüllung der jeweiligen Zielgröße bewertet. Über die Summe jeder Alternative aus den Produkten der Gewichtung jeder Zielgröße mit dem Erfüllungsgrades werden die jeweiligen Nutzwerte errechnet. Die Gewichtung der Zielgrößen erfolgt bei einer überschaubaren Menge an Zielgrößen über die Methode des paarweisen Vergleiches. Dabei wird jede der Anforderungen mit den anderen Anforderungen verglichen und gefragt, welches wichtiger ist. Die Gewichtung kann dann über die Häufigkeit der Nennung (Wiendahl et al. 2009, S. 504) ermittelt werden. Liegt eine zu große Menge an Zielgrößen vor, können die Gewichtungen in einem Projektteam eingeschätzt werden (Hartel und Lotter 2012, S. 379). Abgesehen von den eingangs erwähnten Nachteilen wird die Methode hinsichtlich ihrer Subjektivität und der zugrunde liegenden Annahme kritisiert, dass die Anforderungskriterien unabhängig voneinander sind (Hall 2002, S. 58).

Das **Quality Function Deployment (QFD)** wurde zur Umsetzung einer kundenorientierten Produktentwicklung im Qualitätsmanagement entwickelt. Hier wird über vier vorgegebene Phasen ausgehend von den Kundenanforderungen ein Produkt bis hin zu den sich daraus ergebenden Arbeits- und Prüfanweisungen auf Anlagenebene entwickelt (Regius 2006, S. 17; Saatweber 2011). Dies geschieht anhand einer Reihe von Matrizen, die ähnlich der Nutzwertanalyse arbeiten. In der ersten und bekanntesten Phase wird im sogenannten House of Quality (HoQ) anhand der eingangs erarbeiteten Kundenanforderungen funktionale Produktausprägungen bewertet. Dies geschieht anhand von Gewichtungen der Zielgrößen und von Erfüllungsgraden der jeweiligen Qualitätsmerkmale. Die daraus gewonnenen kritischen Designanforderungen dienen in der nächsten Phase einer neuen Matrix als Eingangsgrößen. In den kommenden Phasen werden kritische Designanforderungen der Komponenten, kritische Prozessmerkmale und die Arbeits- und Prüfanweisungen als kundenorientierte Qualitätsmerkmale erarbeitet (Saatweber 2011).

Das House of Quality kann nicht nur zur Produktentwicklung angewandt werden, sondern auch auf unterschiedliche Entwicklungsprozesse umgelegt werden. Einerseits können hiermit Dienstleistungen und Geschäftsmodelle kundenorientiert entwickelt werden (Saatweber 2011). Andererseits können anhand des sogenannten

House of Technologies auch Technologieentscheidungen getroffen werden (Spath 2004, S. 221; Heubach 2009, S. 69).

Mittels der QFD können Unternehmen ihre Produkte gezielt von denen der Konkurrenten differenzieren und die Erwartungen der Kunden schon in der Entwicklung erfassen und bewerten und nicht erst lange nach der Markteinführung (Regius 2006, S. 17 & 23). Dabei gelten verbessertes Teamwork, verbesserte Kommunikation, Erhöhung und Erhalt des Unternehmenswissens und ein Anstieg der Kundenzufriedenheit als die Hauptvorteile (Carnevalli et al. 2010, S. 3). Die Möglichkeit einer hohen Detaillierung und Strukturierung kann auch hier als Vor- und Nachteil gesehen werden. Nachteilig führt die Methodik dadurch zur Bindung vieler Ressourcen und stellt einen zeitaufwändigen Methodenprozess dar (Regius 2006, S. 22). Dabei bietet die Methodik jedoch die Möglichkeit sich auf die kritischen Qualitätsmerkmale zu fokussieren und durch die gezielte Kundenorientierung kostenintensive Fehlentwicklungen zu vermeiden. Sonst konnten das Umgehen mit subjektiven Datenanalysen, das Interpretieren der Kundenstimme und das Treffen von Entscheidungen anhand der Matrizen, da Beziehungen zwischen den Qualitätsanforderungen nicht klar sind, und der Größe der Matrix selbst als Hauptprobleme bei der Anwendung des House of Quality identifiziert werden (Carnevalli et al. 2010, S. 3).

4.2.3 Duale Bewertung

Anhand der **Erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR)** können die Verfahren der Kapitalwertmethode und der Nutzwertanalyse kombiniert werden (Pachow-Frauenhofer 2012, S. 35; Wiendahl et al. 2009). Hier werden nichtmonetäre Ziele in monetäre Ausprägungen transformiert. Brieke (2009) beschreibt hierzu für die Fabrikplanung relevante Einzelkriterien und gibt Skalierungsmöglichkeiten und Anhaltspunkte zur monetären Bewertung an (Wiendahl et al. 2009, S. 505). Dadurch kann den Alternativen ein erweiterter Kapitalwert zugewiesen werden und diese anhand eines Kriteriums verglichen werden. Diesen Vorteilen steht ein nicht unerhebliche Aufwand gegenüber (Wiendahl et al. 2009, S. 506). Bei einer **Kosten-Wirksamkeits-Analyse** werden die Kosten beispielsweise einer Kapitalwertmethode mit dem Nutzen beispielsweise aus einer Nutzwertanalyse unterschiedlicher Alternativen zu einem Bewertungskriterium zusammengenommen (Hall 2002, S. 59). In (Müller 2008, S. 124ff.) ist eine **grafische Darstellung** ähnlich der EWR vorzufinden. Es werden Betrachtungsobjekte³⁵ über den Nutzwert als Ordinate und den Fertigungskosten und dem Kapitalwert als zwei Abszissen aufgetragen. Hartel und Lotter (2012, S. 387) führen eine duale Bewertung folgendermaßen durch. Es werden Alternativen einerseits anhand einer Gegenüberstellung der

³⁵ In diesem Fall handelt es sich um Verfahrensketten.

Investitionskosten, der Einsparung pro Jahr und der Amortisationszeit und andererseits anhand des Nutzwertes aus der Nutzwertanalyse bewertet.

4.3 Eignung der Methoden

Anhand der Detailbetrachtungen der im vorangegangenen Abschnitt gewählten alternativen Methoden ist eine Bewertung dieser anhand der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 durchgeführt worden (vgl. Abbildung 12). Dabei sind die Vor- und Nachteile der Methoden und deren Eignung hinsichtlich der Anforderungen abgeschätzt worden. Die relevanten Erkenntnisse der Ergebnisse dieser Analyse werden im Folgenden betrachtet.

Methoden / Anforderungen	Ganzheitliche Darstellung des Einsatzgebietes	Ganzheitliche Darstellung der Betriebsmittel	Objektive Diskussionsgrundlage für Investitionsentscheidungen unterschiedlichster Alternativen	Hilfestellung der Datenermittlung	Einfache Handhabbarkeit	Flexibilität und Nachhaltigkeit
Kapitalwertmethode (LCC)	o	-	+	-	o	+
statische Amortisationsrechnung	-	-	+	-	o	-
Montagestückkostenkalkulation	-	-	+	-	o	-
Nutzwertanalyse	+	o	-	o	+	+
Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung	+	+	o	o	-	+
Quality Function Deployment	+	+	+	o	-	+

Abbildung 12: Eignung der betrachteten Methoden anhand der definierten Anforderungen („+“ hohe Erfüllung, „o“ mittelmäßige Erfüllung, „-“ geringe Erfüllung)

Eine Bewertung der im vorherigen Abschnitt erarbeiteten Methoden zeigt, dass keine Methode alle Anforderungen vollständig erfüllt. Die multikriteriellen Bewertungsmodelle (Nutzwertanalyse, QFD) und die EWR wurden bzgl. der ersten beiden Anforderungen („Ganzheitliche Darstellung des Einsatzgebietes“ und „Ganzheitliche Darstellung der Betriebsmittel“) zur Darstellung des Einsatzgebietes und der Alternativen, hoch bewertet, da anhand dieser diese umfassender abgebildet werden können. Dabei darf jedoch nicht übersehen werden, dass erst die Kombination mit den monetären Aspekten ein ganzheitliches Bild liefert. Zur Erfüllung von Anforderung 3 („Objektive Diskussionsgrundlage für Investitionsentscheidungen unterschiedlichster Alternativen“) ist die QFD besonders geeignet, denn, obwohl bei dieser Methode ebenfalls eine hohe Subjektivität herrschen kann, ermöglicht diese anhand der über mehrere Ebenen verbundenen Matrizen eine sachlichere Darstellung. Anforderung 4 („Hilfestellung der Datenermittlung“) ist eine anwendungsorientierte Anforderung, die erst anhand der Berücksichtigung der in den Kapiteln 2 und 3 erarbeiteten Informationen erfüllt werden kann. Die einfache Handhabbarkeit, gefordert durch Anforderung 5, wird am besten von der

Nutzwertanalyse erfüllt und Flexibilität und Nachhaltigkeit (Anforderung 6) werden nur von den statischen Investitionsrechnungen (statische Amortisationsrechnung und Montagestückkosten) gering erfüllt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen ist die in den folgenden Kapiteln erarbeitete Methode grundsätzlich auf der QFD aufgebaut. Dabei wurde eine 2-Matrizen-QFD entwickelt. In der ersten Korrelationsmatrix werden die technischen Spezifika der kollaborierenden Roboter aus Kapitel 3 hinsichtlich der Erfüllung der Zielgrößen der gegebenenfalls wechselnden Montagearbeitsstationen dargestellt. Die QFD hilft im Zuge dessen dabei, die für die Bewertung relevantesten technischen Spezifika zu identifizieren. In einer zweiten Matrix werden dann die alternativen kollaborierenden Roboter hinsichtlich der Ausprägung ihrer technischen Spezifikationen dargestellt. Damit wird auf eine einfache Handhabung und eine möglichst objektive Bewertungs- und Alternativenfindung abgezielt und eine Grundlage zur geeigneten Informationssuche zukünftiger Betrachtungen geschaffen. Im Fokus der Entwicklung steht dabei der Aspekt der nachhaltigen und flexiblen Anpassbarkeit (Anforderung 6). Abschließend wird im Zuge der Validierung (Kapitel 6) eine Nutzen/Aufwand-Bewertung im Vergleich zu einer Nutzwertanalyse durchgeführt. Bei dieser ist derselbe Anwendungsfall anhand einer nutzwertanalytischen Matrix (Zielgrößen zu alternativen kollaborierenden Robotern) dargestellt.

Die EWR findet hier aufgrund ihrer aufwendigen Datenermittlung keine Beachtung. In (Brieke 2009) werden lediglich Hinweise zur Transformation weicher Faktoren auf Systemebene und nicht auf Arbeitsstationsebene ausgewiesen. Die Methode sollte jedoch bei weiterführenden Arbeiten Berücksichtigung finden, da sie bei der Abbildung des schwer quantifizierbaren Nutzens von CPS hilfreich sein könnte.

Um eine monetäre Bewertung in geeigneter Form einfließen lassen zu können, werden die Methoden dieser Kategorie in der zu erstellenden QFD mitberücksichtigt. Anhand der im Abschnitt 4.2.1 aus (VDI 2884) identifizierten Fragestellungen kann geschlossen werden, dass sich eine Lebenszyklusbetrachtung und damit eine dynamische Kapitalwertmethode bei den vorliegenden Betriebsmitteln nicht rechnet. Diese Vorgehensweisen werden trotzdem so weit als möglich in der Methodenentwicklung des kommenden Kapitels berücksichtigt, um Anforderung 6 („*Flexibilität und Nachhaltigkeit*“) entsprechen zu können. Dabei werden ebenfalls Vorgehen nach der statischen Amortisationsrechnung und der Montagestückkostenkalkulation integriert. Je nach den Ergebnissen in der Methodenentwicklung gilt es die geeigneten monetären Betrachtungen zu wählen.

5 Entwicklung der Bewertungsmethodik

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Analyse, Bewertung und Auswahl kollaborierender Roboter, die für Montagetätigkeiten eingesetzt werden, erarbeitet. Dies stellt die zweite Phase des rationellen Problemlösungsprozesses dar (vgl. Einleitung Kapitel 4). Zuerst wird das Konzept aus den Ausführungen aus Abschnitt 4.3 konkretisiert. Anschließend folgt eine allgemeine Erarbeitung zu berücksichtigender Variablen möglicher Anwendungsfälle für Betriebsmittel (Abschnitt 5.2). Darauf basierend werden die einzelnen Bereiche schrittweise erarbeitet. Zuerst werden anhand der Erkenntnisse aus Kapitel 2 ein Zielgrößenkatalog erarbeitet. Dieser soll als Grundlage für konkrete Anwendungsfälle dienen und eine Hilfestellungen geben, um relevante Aspekte nicht unberücksichtigt zu lassen. Darauf folgt anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 3 eine Erarbeitung der Spezifikationen von CPS am Beispiel kollaborierender Roboter. Hier wird dieselbe Zielsetzung, wie bei dem Zielgrößenkatalog verfolgt. Anhand dieser Ausführungen wird die Funktionsweise der ersten Matrix, die die Beziehungen/Korrelationen zwischen den genannten Ausprägungen darstellt, entwickelt. Anschließend folgt die Darstellung der zweiten Matrix, die die Abbildung der Alternativen hinsichtlich der relevanten Spezifika ermöglicht. Parallel wird hier die Durchführung einer Nutzwertanalyse mit besprochen, da diese die QFD im Falle einer besseren Eignung ersetzen wird. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Ausführung einer monetären Bewertung und der Verknüpfung dieser mit den aus den QFD-Matrizen stammenden Punktebewertungen. Die Durchführung der Methodik wird anhand der Validierung des anschließenden Kapitels 6 demonstriert.

5.1 Konzeptentwicklung

Wie bereits in Abschnitt 4.3 ausgeführt basiert die in diesem Kapitel dargestellte neu entwickelte Methodik auf der QFD. Dabei werden die ersten zwei Entwicklungsphasen dieser Methodik herangezogen. In der ersten wird im herkömmlichen Vorgehen anhand von eingangs erarbeiteten Kundenanforderungen das Konzept des Produktes erarbeitet. Dabei werden technische Spezifika des Produktes hinsichtlich der Erfüllung der einzelnen Zielgrößen bewertet. Daraus lassen sich kritische technische Produktmerkmale ableiten. Anhand dieses Schrittes wird die Stimme des Kunden in die Sprache des Unternehmens übersetzt. Diese Ergebnisse stellen den Input für das Pflichtenheft dar. In der darauffolgenden Matrix dienen diese konzeptuellen technischen Spezifikationen in gleicher Weise zur Identifikation kritischer Produktkomponenten. Daraus wird ein Konstruktionsplan entwickelt. Die erste Matrix, das sogenannte House of Quality, stellt dabei die bedeutendste Grundlage dar und dient als Basis für die ersten zwei Phasen (Saatweber 2011, S. 245). Diese wird daher auch in der Literatur ausführlich

behandelt (Chan und Wu 2002; Carnevalli et al. 2010; Saatweber 2011; Akao 1988; Regius 2006; Steinwender 2007) und ermöglicht noch weitere Betrachtungen, wie Vergleiche mit der Konkurrenz (hinsichtlich der Zielgrößenerfüllung und der Erfüllung der technischen Spezifika) und eine Darstellung der Korrelationen der technischen Spezifika.

Im Zuge dieser Arbeit wird in der ersten Phase das Grundgerüst des House of Quality übernommen. Dabei wird auf die Matrix selbst fokussiert, die ident Verwendung findet. Anders als bei der QFD zur Produktentwicklung verhält sich die Erarbeitung der zwei Achsen der Matrix. Bei der herkömmlichen Anwendung werden kundenorientierte Zielgrößen erarbeitet, die in technische Spezifikationen des zu entwickelnden Produktes übersetzt werden und deren Relation zueinander in der Matrix verglichen wird. In der Anwendung dieser Arbeit werden bereits bestehende Produkte miteinander verglichen. Daher können ein allgemein gültiger Zielkatalog und Spezifikationenkatalog entwickelt werden. Deren Beziehungen sind unveränderlich und daher kann die Relationenbewertung in der Matrix vorgegeben werden. In der ersten Matrix muss daher von Anwendern lediglich eine Gewichtung der Zielgrößen vorgenommen werden. Daraus ergibt sich ein Punktwert der jeweiligen Spezifikationen. Dies gibt den Eingang in die nachfolgende Matrix, die einer Nutzwertanalyse ähnelt. Hier werden die Spezifikationen herangezogen und eine Gewichtung anhand der erreichten Punktwerte abgeleitet. Die Matrix enthält eine Bewertung, wie gut die einzelnen Alternativen die technischen Spezifikationen erfüllen. Aus dieser Gegenüberstellung ergeben sich Punktwerte, die der Eignung der Alternativen für den spezifischen Anwendungsfall entsprechen. Abgeschlossen soll die Vorgehensweise durch eine Grafik werden, in der die Erfüllung der Zielgrößen der einzelnen Alternativen dargestellt wird. Diese Darstellung stellt anhand der Nutzwerte und einer monetären Bewertung, wie im vorherigen Kapitel erwähnt, die Alternativen ganzheitlich gegenüber und dient als Diskussionsgrundlage für die Investitionsentscheidung. Damit wird den Entscheidungsträger geholfen die zentralen Kriterien der Kaufentscheidung zu identifizieren und so ein zielführenderes Gespräch mit den Herstellern führen zu können. Das Konzept der Bewertungsmethodik ist in Abbildung 13 dargestellt.

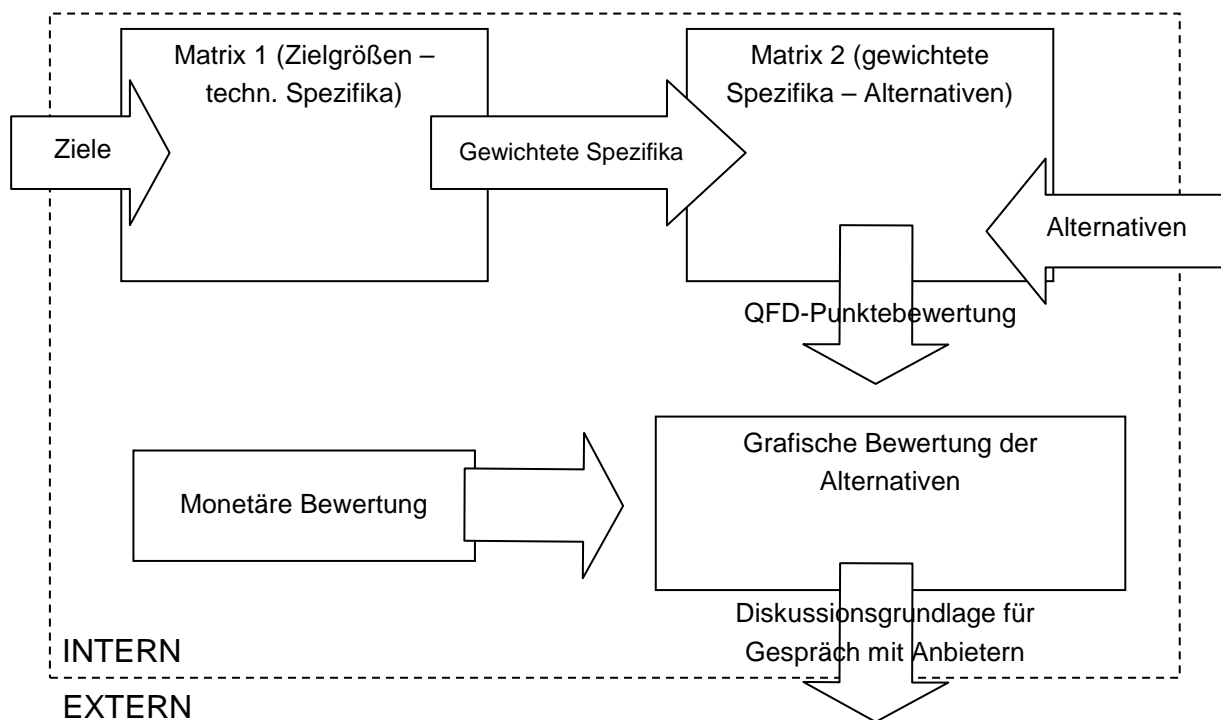


Abbildung 13: Konzept der Bewertungsmethodik

5.2 Konkretisierung des Einsatzgebietes

In diesem Abschnitt wird das Einsatzgebiet (Arbeitsstationen und Merkmale) von Betriebsmitteln unter der Berücksichtigung zukünftiger Anforderungen, die sich aus den immer flexibler zu gestaltenden Produktionssystemen ergeben, und Möglichkeiten, die CPS mit sich bringen, möglichst ganzheitlich abgebildet. Es kann dabei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden, jedoch wird versucht das Anwendungsfeld möglichst allgemein abzubilden und die zentralen Merkmale zu behandeln. Da diese Arbeit mit dem Fokus zur Bewertung alternativer kollaborierender Roboter erstellt wurde, sind manche Gesichtspunkte voreingenommen und dadurch wird ein gewisses Maß an Allgemeingültigkeit verloren. Im Folgenden besteht ein Fokus auf Betriebsmittel die mechatronische, programmierbare Systeme darstellen, klein relativ zu den Arbeitsstationen und leicht für menschliche Kraftaufbringung sind und dadurch gewisse Mobilität ermöglichen. Nichts desto weniger wird erst dadurch die nötige Betrachtungstiefe für den Einsatz in der Praxis ermöglicht. Die folgenden Ausführungen dienen dazu einen guten Überblick zur Integration spezifischer Zielgrößen und technischer Spezifikationen eines betrachteten Anwendungsfalls aus allgemeinen zu berücksichtigenden betriebsmittelrelevanten Gesichtspunkten zu geben und wie daraus eine Investitionsentscheidung abgeleitet werden kann. Die Entscheidung soll danach getroffen werden können, welcher Roboter mit bestimmten Eigenschaften und Anforderungen am besten zu dem Montageumfeld, in dem dieser eingesetzt werden soll, passt, ohne relevante Details zu übersehen.

Anhand der Ausführungen in Kapitel 2 dienen CPMS grundsätzlich der Durchführung oder der Unterstützung bei der Erfüllung der Montagefunktion. Wie in Kapitel 3 erarbeitet, können kollaborierende Robotersysteme, also die betrachteten Manipulatoren, alleine keine Montagefunktion erfüllen. Sie dienen den Ausführungen in Kapitel 3 zur Folge der Aufnahme von Kräften, der Führung und der Integration der Endeffektoren. Die Endeffektoren werden im Normalfall an die Roboterarme angeschraubt und erfordern dann eine eigene Stromzufuhr und eine Verbindung mit der Robotersteuereinheit, um diese ebenfalls über das Bedienhandgerät des Roboterarms steuern zu können. Die erforderlichen Verbindungskabel müssen entweder bereits innerhalb des Roboters vorhanden sein und an der mechanischen Schnittstelle bereitgestellt werden³⁶ oder werden außen entlang des Roboterarms befestigt³⁷. Dabei wird die Software des UR-Bedienhandgerätes über ein Add-On erweitert um den Greifer ebenfalls bedienen zu können³⁸. Die betrachteten Alternativen müssen daher einerseits anhand ihrer **betriebsmittelbezogenen Spezifika** (siehe Tabelle 5 in Abschnitt 3.4, z.B. Kosten, Reichweite, Eigengewicht,...) und andererseits anhand der Integration in den Kontext in dem sie sich befinden betrachtet werden. Der **Kontext** setzt sich dabei aus der Verknüpfung mit anderen Systemen zur Durchführung der Montagefunktion, wie Endeffektoren oder Bildverarbeitungssystemen, dem Produkt, der Arbeitsstation, dem Arbeitsprozess und den Mitarbeitern zusammen. Dieser Betrachtungsraum wird in Abbildung 14 zur Übersicht systematisch dargestellt und in der Folge näher konkretisiert. Dabei gilt es im Sinne der Leitsätze zukünftiger Produktion (Abschnitt 2.4) einen veränderlichen Kontext zu berücksichtigen und wie die Roboter diesen ermöglichen. Beispiele hierfür wäre die Kombination mit anderen Endeffektoren, die Verwendung an anderen Arbeitsstationen oder die Adaptierung des Arbeitsprozesses. Dabei spielt das betriebsmittelbezogene Spezifikum der Transportfähigkeit/Mobilität eine zentrale Rolle.

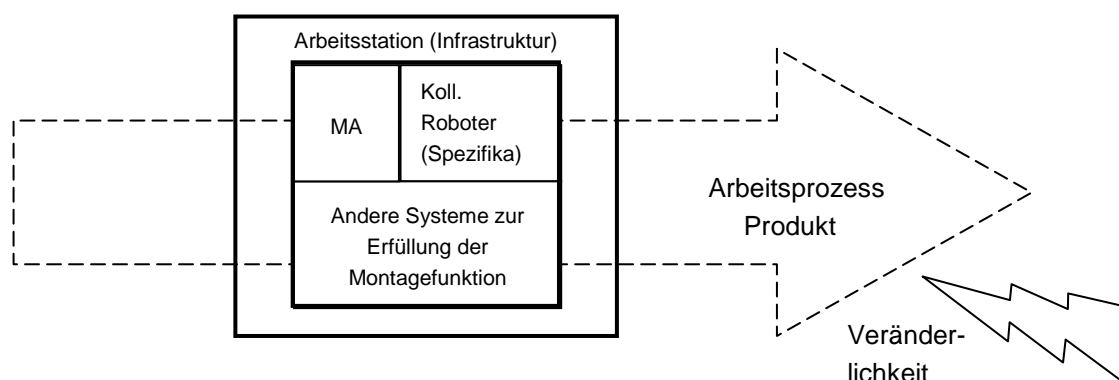


Abbildung 14: Systemdarstellung koll. Roboter in einer Montagestation

³⁶ Dies ist bei dem LBR iiwa 7 der Fall. Siehe dazu Abschnitt 3.4.

³⁷ Siehe hierzu die Integration eines Robotiq Greif-Endeffektors an einem UR5, UR: https://www.youtube.com/watch?v=j51XCuQCR_8 (03.01.2016).

³⁸ Siehe z.B. UR: <https://www.youtube.com/watch?v=JIA-jtKbFQ8> (03.01.2016).

In (Karl 2014) ist eine Systematik zur Einschätzung von Betriebsmittelanforderungen und -eigenschaften anhand von 25 Kriterien angeführt. Dabei werden in dieser Arbeit „[...] Fertigungs- und Montagemittel auf Zellen-Ebene, die mindestens einen Primärprozess der Produktion nach DIN 8580 ausführen [...]“ (Karl 2014, S. 5) und eine unbegrenzte Anzahl an unterstützenden Sekundärprozessen verrichten können, als Betriebsmittel gesehen. Die Zellenebene besteht dabei nach (Zäh et al. 2006) aus unterschiedlichen Funktionsgruppen (z.B. Roboter, Greifer). Diese weiter gefassten Betriebsmittelanforderungen und -eigenschaften werden hier mit den auf Kapitel 2 basierenden Ausführungen eine ganzheitliche Grundlage für die in den nächsten Abschnitten folgende Darstellung des Zielkatalogs und der Spezifikationen bieten. Dabei stellt die Arbeit von Heger (2007) ebenfalls eine wichtige Basis dar.

Grundsätzlich werden in der QFD aus den Anforderungen bzw. Zielgrößen, die nötigen technischen Spezifikationen erarbeitet. Aus den **betriebsmittelbezogenen Spezifika** können jedoch, mögliche Spezifikationen, die nicht übersehen werden dürfen und Aufschluss über die Eigenschaften der Betriebsmittel geben, für konkrete Anwendungsfälle entwickelt:

- Lebenszykluskosten des Betriebsmittels
- Medien und Energiebedarf
- Arbeitsbereich
- Abmessungen
- Gewicht
- Transportfähigkeit
- Verbindungsgrad
- Produktionskosten (Maschinenstundensatz)
- Rüstvorgänge
- Inbetriebnahme
- Verfügbarkeit (aus Mean Time to Repair und Mean Time Between Failures)
- Produkt- und Variantenflexibilität
- Standardisierung
- Stückzahl bzw. Arbeitsgeschwindigkeit
- Arbeitsgenauigkeit
- Ausschuss
- Wartungskosten
- Emissionen (Belastung)
- Unempfindlichkeit (bspw. gegenüber Vibrationen, Temperatur usw.)
- Funktionen/Produktionsverfahren nach DIN 8580
- Automatisierungsgrad
- Informationstechnik
- Sonderanforderungen (Brandschutz, Arbeitssicherheit etc.)

- Systemarchitektur (Modularität)
- Dokumentation (Bedienungsanleitung)

Dabei haben nicht alle Punkte für jegliche Art von Betriebsmitteln Relevanz. Der Punkt Stückzahl bezieht sich z.B. auf die Ausbringung einer Maschine. Bei einem Roboterarm wird hierbei die Geschwindigkeit seiner Bewegung relevanter sein. Für nähere Details siehe (Karl 2014, S. 150–169) und Heger's Ausführungen (2007) in (Wiendahl et al. 2009, S. Anhang A2). Jedes Spezifikum erfüllt dabei mehrere Aufgaben und dabei überschneiden sie sich, sodass mehrere Spezifikationen auch jeweils einzelne Zielgrößen bedienen. Dies macht eine Betrachtung und Verknüpfung mit Zielgrößen in Form einer Matrix erforderlich.

Für die Entwicklung des Zielkatalogs sind die Anforderungen aus dem **Kontext** des Betriebsmittels von Bedeutung, da dieser die Anforderungen an die eingesetzten Betriebsmittel stellen. Bei der **Verbindung mit anderen Systemen** verdeutlichen folgende Fragestellungen die zentralen Gesichtspunkte:

- Wie wird die Verbindung umgesetzt?
 - Mechanisch Schnittstelle: Anschrauben des Endeffektors, Bereitstellung der Prozessmedien
 - Elektronische Schnittstelle: Wie wird Informationsaustausch technisch umgesetzt.
 - Virtuell: Bedienung und Steuerung/Programmierung
- Was folgen für Einflüsse auf das Betriebsmittel durch die Verbindung?
Exemplarisch:
 - Nötige Traglasten anhand des Gewichtes des Endeffektors und der schwersten zu handhabenden Komponente (Produkt),
 - Nötige Presskräfte (Prozess) oder
 - Nötige Nachgiebigkeit in eine Bewegungsrichtung (Prozess)

Die zuletzt genannten Punkte weisen darauf hin, dass die Betriebsmittel bzw. Roboter durch andere Systeme mit denen diese zusammenarbeiten eine zusätzliche Vernetzung mit den im Folgenden genannten Merkmalen des Anwendungskontextes erfahren.

Betriebsmittel müssen auch Anforderungen, die vom **Produkt** gestellt werden erfüllen können. Diese fließen hauptsächlich in die Bewertung der von den Endeffektoren abgegrenzten Betrachtung kollaborierender Roboter über die oben dargestellte Verbindung der Komponenten mit ein. Bei der Betrachtung der produktbezogenen Informationen gilt dabei spezieller Fokus der Handhabbarkeit der Baugruppen:

- Was für Abmessungen haben die Komponenten? (Länge, Breite, Höhe) – Differenzierung zwischen handhab-, bereitstell-, speicher- und bearbeitbaren Produkte/Komponenten (Karl 2014, S. 161)
- Wie sperrig sind diese? (Geometrie) – Differenzierung zwischen handhab-, bereitstell-, speicher- und bearbeitbaren Produkte/Komponenten (Karl 2014, S. 162)
 - Wie einfach sind diese zu greifen?
 - Wie fragil sind diese?
- Wie schwer sind diese? (Masse) – produzier- bzw. handhabbare Masse (Karl 2014, S. 165)
- Produktionsparameter, z.B. Oberflächeneigenschaft bzw. -qualität (Fertigung), Prozesskräfte

Neben diesen Einflussgrößen können für Betriebsmittel auf SA-Ebene weitere relevante Fragestellungen identifiziert werden:

- Wie viele verschiedene Varianten gibt es bzw. wird es vermutlich in Zukunft geben?
- Wie entwickeln sich die Stückzahlen im Unternehmen zu montierender Produkte?
- Was bedeutet das für die Arbeitsstation?
- Wie viele verschiedene Komponenten welcher Eigenschaften sind zu handhaben?
- Von wo sind diese aufzunehmen? (Schüttkiste, Magazin, nicht hundertprozentig genau definierte Lage auf der Arbeitsfläche)

Unter dem Aspekt der **Arbeitsstation** wird der konkrete Arbeitsbereich betrachtet. Hier wird einerseits bei ortsfixen Betriebsmitteln die Möglichkeit der Fixierung dieses betrachtet. Ist genügend Platz zur Fixierung vorhanden und können die auftretenden Kräfte, Momente und Flächenlasten aufgenommen werden bzw. ist eine Fundamentierung gefordert. Ausgehend davon kann der nötige Arbeitsraum, den das ortsfixierte Betriebsmittel abdecken kann, betrachtet und mit den Anforderungen abgeglichen werden. Weitere Gesichtspunkte sind die der Umgebungsbedingungen/Infrastruktur (z.B. Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftqualität (Reinraum)) und der benötigten Medienzufuhr (Absaugung, el. Strom, el. Spannung, Druckluft, Wasser, Kühlschmierstoff, Prozessgase,...).

Für den **Arbeitsprozess** gilt es folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Welche Funktionen können bzw. sollen mit dem Betriebsmittel durchgeführt werden?
- Was für eine DLZ/Takt/Stückzahl soll an Arbeitsstation/-en erreicht werden?

- Wie ist das Betriebsmittel in den Prozess eingebunden und wie arbeitet dieses mit anderen Betriebsmitteln und den Mitarbeitern zusammen?

Dabei wird unter dem Punkt des Prozesses nicht nur der Prozess der Montage an sich (produktbezogen) sondern auch folgende betriebsmittelbezogene Prozesse berücksichtigt:

- Erstinstallation (erste Inbetriebnahme)
- Installation an unterschiedlichen Arbeitsstationen (Trennung von der Stromquelle und eventuell Trennung von Systemkomponenten (Endeffektor, Steuerung und Roboterarm) für den Transport)
- Programmierung eines neuen Arbeitsprozesses
- Adaption programmierter Arbeitsprozesses
- Wartung/Instandhaltung

Im Kontext in dem die Betriebsmittel sich befinden, gilt es auch den Einfluss den die folgenden **mitarbeiterbezogenen** Punkte haben zu berücksichtigen:

- Erforderliche Mitarbeiteranzahl zur Bedienung und Wartung (muss nicht ganzzahlig sein)
- Erforderliche Mitarbeiterqualifikation
- Ergonomische Aspekte

Abgerundet wird der Kontext nicht nur unter dem Verweis, das alle betrachteten Punkte sich über die Zeit ändern können und diesbezüglich eine Abschätzung zu tätigen ist, sondern auch durch allgemeine Zielgrößen der **Veränderlichkeit**:

- Universalität
- Mobilität
- Skalierbarkeit
- Modularität
- Kompatibilität
- Standardisierung
- Objektspezifischer Wandlungspotentialart

In (Heger 2007) wird der Zusammenhang dieser mit betriebsmittelbezogenen Spezifikationen behandelt. Eine ausführliche Diskussion der Dimensionen ist der Literatur zu entnehmen. Folgende Werke können hierfür exemplarisch angeführt werden (Wiendahl et al. 2009; Pachow-Frauenhofer 2012).

5.3 Zielkatalog der Anforderungen an die kollaborierenden Roboter

Aus den allgemeinen Betrachtungen des vorangegangenen Abschnittes können Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalles an die zu integrierenden kollaborierenden Roboter abgeleitet werden. Dabei wurden Zielgrößen erfasst anhand derer die Produkte voneinander abgegrenzt werden können. Damit fallen Anforderungen, die von den alternativen Robotern in etwa gleich bedient werden weg. Diese Zielgrößen stellen den Eingang in die erste adaptierte QFD-Matrix dar. Dabei wurden sieben zentrale Anforderungen, deren Ausprägung je nach betrachtetem Anwendungsfall unterschiedlich gewichtet wird, identifiziert. Diese werden in Tabelle 7 dargestellt, erläutert und ein Bezug zum vorangegangenen Abschnitt hergestellt. Die Größen dieses Zielkatalogs werden von Anwendungsfall zu Anwendungsfall unterschiedlich hohe Bedeutung aufweisen und manche eventuell gar keine Berücksichtigung finden. Dieser Tatsache wird anhand einer individuell zu erarbeitende Gewichtung Rechnung getragen. Eine detaillierte Betrachtung zu der Gewichtung der einzelnen Zielgrößen wird in Abschnitt 5.5 gegeben.

Tabelle 7: Zielkatalog und Erläuterungen

Zielkatalog	Thematik
1.) Arbeitsstation: Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	Mit dieser Anforderung wird berücksichtigt, ob der Roboter hauptsächlich stationär an ein und demselben Ort eingesetzt wird oder ob dieser wechselt. Der Ortswechsel und damit verbundenen Wechsel einer Arbeitsstation steht in Zusammenhang mit einem veränderten Bewegungsablauf, da ein Wechsel zu einer anderen Arbeitsstation, die den selben Arbeitsprozess durchführt nur in Einzelfällen Sinn ergibt. Daher wird angenommen, dass sich dies in geringem Maße hält und wird daher nicht näher berücksichtigt. Fragestellung: <i>Wie häufig wird der Roboter jetzt oder in Zukunft an unterschiedlichen Orten benötigt?</i>
2.) Arbeitsstation: Hohe Reichweite	Hier wird die Möglichkeit abgedeckt, dass zukünftig eine höhere Reichweite erforderlich sein könnte, um nicht einen knapp bemessenen Roboter anzuschaffen, der für neue Anwendungen nicht mehr geeignet ist. Fragestellung: <i>Werden die räumlichen Ausprägungen (Abmessungen) zukünftiger Arbeitsplätze voraussichtlich zunehmen?</i>

Fortsetzung Tabelle 7

3.) Arbeitsstation: Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme, wie Bildverarbeitung und Endeffektoren	Fragestellung: <i>Mit was für anderen Systemen wird der Roboter zusammengeführt? Wie komplex sind dieser und deren Integration und wie oft müssen diese ausgetauscht werden?</i>
4.) Prozess: Ausführung komplexer und/oder häufig wechselnder Bewegungsabläufe	Dieser Aspekt adressiert im Gegensatz zu Punkt 1 unter anderem eine Programmierung, die von zu einfach gestalteten Systemen nur mit gesteigertem Aufwand realisiert werden können. In Punkt 1 ist eine einfache Bedienung und Programmierung von hoher Bedeutung. Fragestellung: <i>Wie komplex sind die durchzuführenden Bewegungsabläufe und wie oft müssen diese adaptiert werden?</i>
5.) Produkt: Hohe Traglast	Verhält sich parallel zu dem Punkt der hohen Reichweite. Fragestellung: <i>Wie entwickeln sich zukünftige zu handhabende Traglasten (Summe aus dem Gewicht der schwersten Komponente eines Produktes und des Endeffektors oder sonstigem an dem Roboter angebrachtem System)?</i>
6.) Mitarbeiter: Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	Diese Anforderung richtet sich nach dem im Unternehmen vorhandenen und für den Arbeitsprozess tatsächlich verfügbaren Know-How der Mitarbeiter zum Umgang mit Robotik. Fragestellung: <i>Gibt es im Unternehmen Ingenieure, die im Stande sind Roboter zu programmieren?</i>
7.) Mitarbeiter: Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	Diese Anforderung aus dem Risk-Assessment und der Arbeitssicherheit richtet sich danach wie eng die Zusammenarbeit eines Mitarbeiters mit dem Roboter erfolgen wird. Fragestellung: <i>Arbeiten ein oder mehrere Mitarbeiter direkt mit dem Roboter zusammen und können jederzeit mit diesem Zusammenstoßen?</i>

Anmerkung: ad 1.) Allgemeine Begriffe wie „häufig“ werden in Abschnitt 5.5 detailliert. Ad 2.) Die Anforderungen der Reichweite und der Traglast führten bereits zu einer ersten Auswahl an Robotern, die in der erarbeiteten Methodik gegenübergestellt werden. Die zugehörigen oben angeführten Anforderungen helfen zusätzlich die zukünftige Relevanz einer hohen Reichweite oder Traglast näher zu spezifizieren. Ad 7.) Die Anforderung der erforderlichen Sicherheit des Roboterarms

muss aus einem Risk-Assessment des Gesamtsystems erarbeitet werden. Eine angepasste Sicherheit schützt die Anwender vor einer zu hohen, dem Arbeitsprozess und der Flexibilität hinderlichen Sicherheit.

5.4 Technische Spezifikationen von CPMS

Die technischen Spezifikationen der kollaborierenden Roboter dienen der Erfüllung der angeführten Anforderungen des Zielkatalogs. Dabei wurden die Spezifika auf teils globale Eigenschaften heruntergebrochen, da eine zu hohe Detaillierung die Methodik unhandbar machen würde und die differenzierte Betrachtung der zu bewertenden Roboter erschwert werden würde. Damit geht die Betrachtung auch mit der QFD-Vorgehensweise in Einklang, wonach im HoQ neben den Anforderungen Funktionen und keine fertigen Lösungen angeführt werden müssen (Saatweber 2011, S. 222). Auch ist eine detaillierte Betrachtung nur durch Daten aus Labortests möglich, welche dem Autor dieser Arbeit unzugänglich sind. Nichts desto weniger helfen die Abschätzungen anhand der angeführten Spezifika eine sinnvolle Bewertung durchzuführen. Die Spezifikationen wurden analog zu der herkömmlichen Produktentwicklungs-QFD um Ausprägungen, wie „hoch“, „einfach“ oder „gering“ erweitert, um in Matrix 1 Zusammenhänge zu den gerichteten Zielgrößen herstellen zu können. Aus den Ausführungen in Abschnitt 5.2 wurden die folgenden sieben zentralen Spezifika entwickelt:

- 1.) Hochauflösend Sensorik, um schnell auf unvorhergesehene Widerstände reagieren zu können. Dieses Spezifikum ist von der Wiederholgenauigkeit die in Tabelle 5 im Abschnitt 3.4 angeführt wird abzugrenzen.
- 2.) Einfache Programmier- und Bedienbarkeit – dabei wird der Aufwand und das nötige Know-How adressiert.
- 3.) Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle (direkte Versorgung mit Prozessmedien, wie Strom und Luft) und nicht behindernde Kabelführung
- 4.) Hohe Reichweite – dieser Punkt gilt primär der Zielgröße 2. Nähere Details folgen in Abschnitt 5.3.
- 5.) Hohe Traglast – dieser Punkt gilt primär der Zielgröße 5.
- 6.) Geringes Eigengewicht
- 7.) Hoher Bewegungsumfang (entspricht hoher Achszahl und Bewegungsumfang jeder einzelnen)

5.5 Korrelationen der Zielgrößen mit den Spezifikationen

Matrix 1 beinhaltet den Zusammenhang zwischen den Zielgrößen und den technischen Spezifikationen. Es wird jede Zielgröße durch eine bestimmte Anzahl an Spezifika mehr oder minder erfüllt. Dabei können die Spezifikationen auch mehrere

Anforderungen bedienen. Diese Matrix zeigt, wie stark die betrachtete Spezifikation die jeweilige Anforderung unterstützt (Saatweber 2011, S. 223). Dies wird durch Symbole (\odot = starke Beziehung = 9 Punkte, \circ = mittlere Beziehung = 3 Punkte, Δ = schwache Beziehung = 1 Punkt, leer = keine Beziehung = 0 Punkte) dargestellt, die Bewertungsstufen der Beziehungsverhältnisse repräsentieren (Saatweber 2011, S. 221). Anhand dieser wird, wie in der QFD üblich, die Matrix übersichtlich und einfach zu lesen. Diese Übersichtsdarstellung (obere in Abbildung 15) dient dazu schnell Zusammenhänge und Beziehungen erkennen zu können. Für eine detaillierte Betrachtung um Ergebnisse besser nachvollziehen zu können, dient eine Detaildarstellung (untere in Abbildung 15). In dieser sind nicht nur die Punktwerte zusätzlich zu den Symbolen angeführt sondern ebenfalls die zellenmäßigen Punktebewertungen der jeweiligen Spezifikation gegenüber der jeweiligen Zielgröße³⁹. Dadurch soll dem Anwender eine geeignetere Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse ermöglicht werden, da in Kombination mit Einfärbung der Felder in denen sich Zahlenwerte befinden möglichst einfach hohe Zahlenwerte, die die Bewertung maßgeblich beeinflussen analysierbar sind. Abbildung 15 stellt eine Rohfassung dar. In Kapitel 6 werden mehrere Abbildungen mit Zahlenwerten gefüllte Darstellungen dargestellt.

Die Beziehungen wurden so erstellt, dass jede technische Spezifikation schrittweise anhand jeder einzelnen Zielgröße betrachtet wurde und die Beziehung anhand der Symbole notiert wurde. Im Folgenden werden einzelne Beziehungen herausgegriffen, um den Bezug zu Abschnitt 3.4 herzustellen. Die starke Beziehung (\odot) zwischen dem Spezifikum „Hochauflösende Sensoren“ und der Anforderung „Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe“ ergibt sich z.B. dadurch, dass komplexe Bewegungsabläufe, wie Achsfixierung, Nachgiebigkeiten und das „Rütteln“ von Bauteilen in Öffnungen, durch einen verbesserten Tastsinn, der durch die Sensorik bedingt wird, ermöglicht werden. Die schwache Beziehung (Δ) zwischen „Einfache Programmier- und Bedienbarkeit“ und den Zielgrößen „Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme“ und „Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe“ im Gegensatz zu den starken Beziehungen mit den anderen Größen rührt von der Annahme her, dass dies erstgenannten Anforderungen eher von einer komplexeren, aber dadurch einfacher reproduzierbareren Programmierung realisiert werden können. Dieser Punkt zeigt, dass eine zusätzliche Spezifikation wie „Umfangreiche Programmierbarkeit“ auch zielführend sein hätte können. Ein „Ortswechsel“ wird von „Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung“ mit einer schwachen Beziehung berücksichtigt, da z.B. ein außen angebrachtes Kabel einerseits wieder gelöst werden muss oder andererseits hinderlich beim Transport ist. Interessant ist

³⁹ Die detaillierte Betrachtung der Berechnung folgt am Ende dieses Abschnittes 5.5.

die Verknüpfung zwischen dem geringen Eigengewicht und sicherer Zusammenarbeit mit dem Menschen. Diese Einschätzung basiert auf den physikalischen Gesetzen, wonach eine höhere Kraftentwicklung durch eine höhere Masse erzielt wird. Hierbei sei erneut auf die Ausführungen von (Bonev 2014b) verwiesen. Anhand dieses Beispiels kann auch auf das Fehlen negativer Korrelationen verwiesen werden. Eine höhere Kraftereinwirkung wird auch durch einen höheren Hebelarm aufgrund der höheren erreichbaren Beschleunigungen erreicht. Daher könnte für mehr Sicherheit ein geringerer Hebelarm gefordert werden. Negative Korrelationen sind jedoch in der Beziehungsmatrix des HoQ nicht möglich. Weitere Beispiele für mögliche negative Korrelationen stellt die Beziehung zwischen hohem Bewegungsumfang und den Zielgrößen niedrigem Programmier- und Bedienaufwand und sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen dar. Ein sich komplex bewegnender Roboter mit vielen Achsen erschwert das in Abschnitt 3.3 eingeführte Handteaching und erhöht das Sicherheitsrisiko, da das Abschätzen der Bewegungen durch den Menschen nicht mehr intuitiv geschehen kann. Mit diesen Problemstellungen muss sich eine Evaluierung der Methodik anhand von Robotern in Testanwendungen auseinandersetzen.

Zielgrößen		Gewichtung (Pkte) rel. Bedeutung	Technische Spezifikationen																				
			Hochauflösende Sensoren		Einfache Programmier- und Bedienbarkeit		Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung		Hohe Reichweite		Hohe Traglast		Geringes Eigengewicht		Hoher Bewegungsumfang								
			Bez.	Bez. * rel.	Bez.	Bez. * rel.	Bez.	Bez. * rel.	Bez.	Bez. * rel.	Bez.	Bez. * rel.	Bez.	Bez. * rel.	Bez.	Bez. * rel.							
Zielgrößen	Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	0			⊖	9	0	Δ	1	0	Δ	1	0	Δ	1	0	⊕	9	0		0	0	
	Hohe Reichweite	0									⊕	9	0										
	Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	0			Δ	1	0	⊕	9	0													
	Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	0	⊕	9	0	Δ	1	0	○	3	0									⊕	9	0	
	Hohe Traglast	0										⊕	9	0									
	Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	0			⊕	9	0																
	Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	0	⊕	9	0												○	3	0				
Sich daraus ergebende Gewichtung der Spezifika			0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		

Zielgrößen		Gewichtung (Pkte) rel. Bedeutung	Technische Spezifikationen																											
			Hochauflösende Sensoren				Einfache Programmier- und Bedienbarkeit				Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung				Hohe Reichweite				Hohe Traglast				Geringes Eigengewicht				Hoher Bewegungsumfang			
			Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.				
Zielgrößen	Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	0		0	0	⊕	9	0	Δ	1	0	Δ	1	0	Δ	1	0	⊕	9	0		0	0		0	0				
	Hohe Reichweite	0		0	0							⊕	9	0																
	Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	0		0	0	Δ	1	0	⊕	9	0																			
	Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	0	⊕	9	0	Δ	1	0	○	3	0												⊕	9	0					
	Hohe Traglast	0		0	0										⊕	9	0													
	Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	0		0	0	⊕	9	0																						
	Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	0	⊕	9	0																		○	3	0					
Sich daraus ergebende Gewichtung der Spezifika			0				0				0				0				0				0							

Abbildung 15: Matrix 1 – Übersichtsdarstellung (obere Darstellung) und Detaildarstellung (untere Darstellung)

Die dargestellte Beziehungsmatrix ist statisch und verändert sich nicht mit den Anwendungsfällen, da Spezifikationen, egal in was für einem Umfeld die betrachteten Betriebsmittel eingesetzt werden, die Zielgrößen immer gleich gut oder schlecht erfüllen können. Die Veränderlichkeit der Matrix kommt durch die veränderliche Gewichtung des fixierten Zielkatalogs. Im jeweiligen Anwendungsfall sind im Expertenteam, die jeweiligen Zielgrößen je nach Bedeutung zu gewichten. Dazu wird in der Literatur der paarweisem Vergleich oder eine Experten-Punktevergabe empfohlen. Siehe hierzu (Wiendahl et al. 2009, S. Anhang C3; Saatweber 2011). Der paarweise Vergleich darf auf den Zielkatalog jedoch erst angewendet werden, wenn dieser vorgefiltert wurde. Gibt es Anforderungen, bei denen fest steht, dass diese unberücksichtigt bleiben können und damit mit Null gewichtet werden, dürfen diese nicht in die Gewichtung anhand des paarweisen Vergleiches mit aufgenommen werden. Diese Vorgehensweise erstelle die Gewichtung von Zielgrößen anhand von schrittweisem Vergleich der Zielgrößen in Paaren und zählt, welche Zielgrößen am häufigsten als wichtiger eingeschätzt wurden. Dadurch kann es passieren, dass Anforderungen, die zwar egal sind, doch eine Gewichtung erhalten, da eine Nennung geschieht sobald zwei vernachlässigbare Ziele einander gegenübergestellt werden. Die folgende Tabelle 8 kann als Diskussionsgrundlage für eine Gewichtung anhand einfacher Punktevergabe dienen, um den aufwendigen paarweisen Vergleich auszusparen. Dabei ist eine ganzzahlige Skala von 0-5 (wobei 5 die beste Bewertung und 0 die schlechteste darstellt) empfehlenswert. Diese ist ausreichend genau und enthält abschätzbare Abstufungsmöglichkeiten. Bei der Gewichtung ist auf eine Bewertung der Anforderungen relativ zueinander zu achten und somit ein Zielkatalog bei dem alle Größen, die Werte 5 erhalten nicht zielführend. Es sind die wichtigsten Größen abzuschätzen und die rückgereihten danach abzuschätzen. Kapitel 6 liefert auch hierfür Ausführungen.

Tabelle 8: Gewichtungshinweise für die Größen des Zielkatalogs

Zielkatalog	Gewichtungshinweise
1.) Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	<p>Unter häufigem Wechsel wird ein Zeitraum unter einer Woche an derselben Arbeitsstation verstanden wird.</p> <p>Wenn der Roboter regelmäßig an vielen verschiedenen Orten eingesetzt werden soll, dann ist diese Anforderung höher zu bewerten. Sollte der Roboter nur an einem Ort eingesetzt werden ist diese Zielgröße belanglos und daher mit Null zu gewichten.</p>
2.) Hohe Reichweite	Wenn es wahrscheinlich erscheint, dass der Roboter in Zukunft einen weiteren Arbeitsraum bedienen muss, ist diese Anforderung kritisch und höher zu gewichten.

Fortsetzung Tabelle 8

3.) Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme, wie Bildverarbeitung und Endeffektoren	Wenn der Roboter mit wechselnden und/oder aufwendig zu integrierenden Systemen zusammenarbeiten soll, muss diese Anforderung höher bewertet werden.
4.) Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	Bei wechselnden und/oder aufwendig zu programmierenden Bewegungsabläufen, stellt diese Anforderung eine kritische dar.
5.) Hohe Traglast	Wenn es wahrscheinlich erscheint, dass der Roboter in Zukunft einen höheren Traglastbereich bedienen muss, ist diese Anforderung kritisch.
6.) Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	Wenn im Unternehmen keine Ingenieure mit Know-How in der Mechatronik vorhanden sind oder für die Programmierung der Montagefunktionen nicht bereit gestellt werden können, gilt es diese Zielgröße höher zu bewerten.
7.) Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	Wenn der Roboter auf engem Raum direkt mit anderen Mitarbeitern zusammenarbeitet oder leicht mit diesen zusammenstoßen könnte, ist dieser Zielgröße ein hoher Stellenrang beizumessen. Sollte der Roboter eingerichtet werden und dann in einem abgegrenzten Bereich arbeiten, der von geschultem Personal unregelmäßig betreten wird, ist diese Anforderung von geringerer Bedeutung. (Wichtig ist die Durchführung eines Risk-Assessments, siehe (DIN EN ISO 13849-1))

Aus der jeweiligen Gewichtung bzw. Punktevergabe ist die relative Bedeutung, die in Abbildung 15 als zweite Spalte neben den Zielgrößen angeführt ist, nach (Saatweber 2011, S. 208) mit folgender Formel zu berechnen:

$$rB_{n,10} = \frac{P_n \cdot 10}{\text{Max.-Wert}} \quad (\text{F } 1)$$

Wobei $rB_{n,10}$ als ganze Zahl ausgedrückt wird und n eine Zielgröße repräsentiert. Damit werden die Gewichtungen in eine Skala von 0-10, wobei 10 dem höchsten Punktwert entspricht, übersetzt, mit der dann in den weiteren Schritten gerechnet wird. Wenn die Gewichtungen und damit die relativen Bedeutungen des jeweiligen Anwendungsfalles ermittelt wurden, können die Spezifika anhand der vorliegenden Beziehungsmatrix numerisch bewertet werden. Dies wird in (Saatweber 2011, S. 224–225) vorgemacht. Die Bewertung der einzelnen Spezifika (B_i) ergibt sich aus dem Skalarprodukt aus dem relativen Bedeutungsvektor (\vec{rB}) und dem Korrelationsvektor der jeweiligen Spezifikation (\vec{K}_i):

$$B_i = \vec{rB} \cdot \vec{K}_i = \sum_n rB_{n,10} \cdot K_{i,n} \quad (\text{F } 2)$$

i stellt dabei die betrachtete Spezifikation dar. Diese Bewertungen können in der Matrix (siehe Abbildung 15) in der untersten Zeile abgelesen werden. Die untere Darstellung in Abbildung 15 bietet eine Detailbetrachtung der einzelnen Summanden aus (F 2) anhand der Werte in den Spalten „Bez. * rel. Bed.“. Daraus kann abgelesen werden, welche Beziehungen den größten Anteil an der Bewertung ausmachen und das Ergebnis einerseits besser nachvollzogen werden, aber auch gezielt Beziehungen bei der Entwicklung der Methodik und zukünftige Anwendungen anderer Betrachtungsgebiete adaptiert werden können.

Die jeweiligen Spezifikationen und die sich ergebenden Bewertungen bilden die Eingangsgröße in die folgende Matrix.

5.6 Ausprägung der Spezifikationen der alternativen kollaborierenden Robotern

Während aus Matrix 1 über eine möglichst objektive Erarbeitung der Anforderungen eine Gewichtung der technischen Spezifikationen erzielt wurde, ergibt Matrix 2 eine Bewertung der auf dem Markt erhältlichen Produkte. In Matrix 2 wird wie in Matrix 1 eine relative Bewertung der Eingangsgrößen erstellt. Diese Bewertung kann man jedoch besser mit einer Nutzwertanalyse als mit dem HoQ vergleichen, da es hier nicht sinnvoll ist mit den Werten 0, 1, 3 und 9 zu arbeiten. Diese schnell ansteigende Skala ergibt einen Sinn, dass sich die zentralen technischen Spezifikationen besser herauskristallisieren können. Anhand dieser soll jedoch in Matrix 2 nicht die beste Alternative überbewertet werden sondern ein realistischer Vergleich der zu untersuchenden Betriebsmittel gegeben werden. Im Anschluss an die Bewertung und der daraus resultierende interne Diskussion wird empfohlen, je nach Umfang der betrachteten Alternativen mit den Herstellern der zwei bis drei höchst gereihten Produkte in nähere Verhandlungen zu gehen. Dies kommt von der Tatsache, dass nach den Detailgesprächen mit den Herstellern manche Gewichtungen eventuell doch zugunsten anderer Anforderungen interpretiert werden können. Es wird daher eine Skala von 1-5, wie in der Nutzwertanalyse, gewählt, wobei 5 die beste und 1 die schlechteste Bewertung darstellt. Dies führt dazu, dass die Darstellung ohne die übersichtliche Symboldarstellung der HoQ auskommen muss. Stattdessen wird versucht durch die farbliche Markierung der zwei höchsten Werte (4 und 5) ähnliche Vorteile zu erzielen. Aufgrund dieser Nähe zur Nutzwertanalyse ist es sinnvoll die im Zuge dieser Arbeit analog durchgeführte Nutzwertanalyse auch in diesem Abschnitt näher zu beschreiben. In Abbildung 16 ist der ähnliche Aufbau gut zu erkennen. Unterschieden werden die zwei Darstellung einerseits durch die Gegenüberstellung der Alternativen mit den technischen Spezifikationen im Fall der Matrix 2 und direkt mit den Zielgrößen im Fall der Nutzwertanalyse. Andererseits unterscheiden die beiden einander durch die Darstellung der Endbewertungsgrößen. In der Matrix 2

sind diese anhand von Punktwerten und in der Nutzwertanalyse anhand von Prozentpunkten dargestellt. Erstere sind analog zu den Formeln (F 1) und (F 2) berechnet. Letztere werden analog zu den Berechnungen in (Wiendahl et al. 2009, S. Anhang C3) ermittelt. Der einzige Unterschied zu den Formeln (F 1) und (F 2) ist, dass die jeweiligen Produkte der Summe, aus dem das Skalarprodukt besteht, noch zusätzlich nach dem Höchstwert⁴⁰ der gewählten Skala gewichtet werden. Dadurch gibt die Bewertung eine Aussage darüber, wie weit die einzelnen Alternativen von der absoluten Erfüllung der Zielgrößen entfernt sind.

$$B_{i_NW} = \overrightarrow{rG_{NW}} \cdot \overrightarrow{K_{i_NW}} = \sum_n \frac{rB_{n,\%} \cdot K_{i,n_NW}}{5} \quad (\text{F } 3)$$

Dabei stellt B_{i_NW} die prozentuelle Bewertung der unterschiedlichen Alternativen dar, $\overrightarrow{rG_{NW}}$ den Vektor der relativen Gewichtungen der Zielgrößen, $\overrightarrow{K_{i_NW}}$ den Vektor der Bewertung der jeweiligen Alternativen bzgl. der Zielgrößen dar und $rB_{n,\%}$ und K_{i,n_NW} repräsentieren die Argumente des Vektors. Letztere werden, wie oben beschrieben, durch den Höchstwert 5 der Skala dividiert, damit die Ergebnisse im Bereich von 0-100% liegen.

Die Bewertungen in Matrix 2 wurden so erstellt, dass die unterschiedlichen Alternativen gemeinsam schrittweise hinsichtlich der Erfüllung der jeweiligen technischen Spezifikation analysiert wurden. Somit stehen die Werte in den Zeilen (siehe Abbildung 16) in Relation zu einander. Dies ermöglicht das aus Abschnitt 3.4 gewonnene Gesamtbild in die Methodik am geeignetsten einfließen zu lassen und die kollaborierenden Roboter so gut wie möglich zu differenzieren. Dies ist durch die Darstellung der Matrix 2, in der die Alternativen hinsichtlich der technischen Spezifikationen bewertet werden, besonders gut möglich, da sich die alternativen Produkte anhand der meisten technischen Spezifikationen durch die Ausführungen in Abschnitt 3.4 und Tabelle 5 gut durch messbare Kennzahlen voneinander unterscheiden lassen. Bei der Kategorie „Hochauflösende Sensoren“ kann zwar bei dem Sawyer nicht auf eine europäische Sicherheitszertifizierung zur Einschätzung zurückgegriffen werden, jedoch wird hierzu erneut von (Bonev 2014b) ausreichende Information zur Verfügung gestellt. Einzig die Spezifikation „Einfache Programmier- und Bedienbarkeit“ musste komplett anhand von Testanwendungen in Youtube-Videos und Interrecherchen abgeschätzt werden. Über die Klasse „Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung“ wurden der Bildschirmkopf und die integrierten Kameras des Sawyers und die technisch anspruchsvolle Führung der Medienkabel durch den Arm des LBR iiwas berücksichtigt. Abgesehen davon muss darauf hingewiesen werden, dass es aufgrund der Neuheit des Sawyers eine größere Herausforderung war, diesen im Gegensatz zu den anderen zwei Modellreihen, zu denen aktuell viele Informationen

⁴⁰ Der Höchstwert der Skala 1-5 ist 5.

erhältlich sind, zu bewerten. Abgeschlossen wurde die Bewertung durch eine Gegenprüfung jeder einzelnen Alternative hinsichtlich des sich ergebenden Gesamtbildes der technischen Spezifikationen.

Die Bewertung in der Nutzwertanalyse wurde, wie dies in dieser üblich ist, um eine höhere Objektivität zu erreichen Zelle für Zelle durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass in jeder Zeile die Zahlen 1-5 dem gleichen Maßstab unterzogen wurden. Dabei konnte eine höhere Subjektivität aufgrund der allgemein formulierten Zielgrößen beobachtet werden. Um dies zu verringern wurden anschließend noch die Zeilen und Spalten auf Plausibilität untersucht und Adaptionen vorgenommen. Der LBR iiwa und die UR-Modelle wurden als Gegenpole identifiziert. Die Stärken des einen stellen die Schwächen des anderen dar. Der Sawyer stellt den spärlicheren Informationen zufolge einen guten Allrounder dar. Unter der Zielgröße „Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme“ sind der Bildschirm und die integrierten Kamerasysteme mit der Tatsache zusammengefasst, dass schwer abzuschätzen ist, wie gut das Modell Systeme anderer Hersteller integrieren kann⁴¹.

5.7 Monetäre Bewertung

Die aus den vorherigen Abschnitten ermittelte Bewertungspunktezahl der alternativen kollaborierenden Roboter werden, wie in Abschnitt 4.3 gefordert, um monetäre Betrachtungen erweitert. Darüber fließt die allgemeine Anforderung ein, wonach Investitionen möglichst wenig bei möglichst guter Erfüllung des Nutzens kosten. Die statische Amortisationsrechnung kann in dieser Betrachtung keine Berücksichtigung finden, da die hierbei benötigten Einsparungen sich auf bisherige Gegebenheiten des Montagesystems beziehen. Diese werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, können aber in zukünftigen Ausführungen in denen mehrere unterschiedlicher Alternativen verglichen werden sollen, entwickelt werden. Dies verhält sich gleich mit Life-Cycle-Costing und zur EWR analogen Betrachtungen. In der Berechnung des Maschinenstundensatzes, könne kalkulatorische Zinsen, Raum- und Energiekosten vernachlässigt werden, da sich diese für die hier betrachteten kollaborierenden Roboter anzunehmender weise kaum unterscheiden. Das Ziel des Autors war es die Energiekosten nicht nur aus ökonomischer sondern auch ökologischer Sicht in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Da diese jedoch von Rethink Robotics nicht angegeben werden und auch auf Anfragen nicht reagiert wurde, muss dieser Punkt ausgespart bleiben. Dieser Kosten sind in zukünftigen Arbeiten zu berücksichtigen. Für diese Arbeit sei stattdessen auf (Hartel und Lotter 2012, S. 383) verwiesen, die anführen, dass bei investitionsintensiven Betriebsmitteln die Energiekosten einen vernachlässigbaren Anteil an den gesamten Montagestückkosten darstellen und

⁴¹ In den Youtube-Videos zur Abbildung der Funktionen und den Herstellerinformationen des Sawyers und des Baxters konnten keine Beispiele identifiziert werden, bei denen Systeme anderer Hersteller integriert waren.

daher für erste Bewertungen vernachlässigt werden können. Die monetäre Bewertung erfolgt somit anhand des verbleibenden Anteils der Berechnung des Maschinenstundensatzes. Diesen Anteil stellt die kalkulatorische Abschreibung K_A dar und wird wie folgt berechnet:

		Gewichtung (Pkte) rel. Bedeutung		Alternativen							
				LBR iiwa 7		UR3		UR5		Sawyer	
				Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.
Technische Spezifikationen	Hochauflösende Sensoren	180	10	5	50	1	10	1	10	2	20
	Einfache Programmier- und Bedienbarkeit	48	3	1	3	5	15	5	15	3	9
	Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung	50	3	5	15	1	3	1	3	5	15
	Hohe Reichweite	2	0	4	0	2	0	3	0	5	0
	Hohe Traglast	2	0	5	0	2	0	4	0	3	0
	Geringes Eigengewicht	48	3	2	6	5	15	3	9	3	9
	Hoher Bewegungs-umfang	90	5	3	15	5	25	4	20	3	15
Sich daraus ergebende Bewertungen:				89		68		57		68	

		Gewichtung (Pkte) rel. Gewichtung		Alternativen							
				LBR iiwa		UR3		UR5		Sawyer	
				Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.
Zielgrößen	Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel		0,00%	3	0,00%	4	0,00%	4	0,00%	3	0,00%
	Hohe Reichweite		0,00%	4	0,00%	2	0,00%	3	0,00%	5	0,00%
	Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme		0,00%	2	0,00%	4	0,00%	4	0,00%	2	0,00%
	Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe		0,00%	5	0,00%	2	0,00%	2	0,00%	3	0,00%
	Hohe Traglast		0,00%	5	0,00%	2	0,00%	4	0,00%	3	0,00%
	Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand		0,00%	1	0,00%	5	0,00%	5	0,00%	3	0,00%
	Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum		0,00%	5	0,00%	1	0,00%	1	0,00%	2	0,00%
Sich daraus ergebende Bewertungen:				0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	

Abbildung 16: Matrix 2 (oben) und eine analog durchgeführte Nutzwertanalyse (unten)

$$K_A = \frac{K_{WB}}{n} \quad (\text{F4})$$

Dabei setzt sich der Wiederbeschaffungswert K_{WB} aus der Investitionssumme und den Installations- und Anlaufkosten zusammen. n beschreibt die Nutzungsdauer und wird in diesem Fall mit der mindesten Lebensdauer⁴² (in Betriebsstunden) gleichgesetzt. Die Investitionssummen sind Tabelle 5 zu entnehmen und Abschnitt 3.4 liefert Kosten zur Schulung für die Verwendung des LBR iiwa bei nicht vorhandenem Programmier-Know-How für Java. Eine Beispielberechnung wird in Abschnitt 6.2 angeführt.

5.8 Duale Bewertung

Die monetäre und multikriterielle Bewertung werden anhand eines zweidimensionalen Diagramms miteinander verknüpft. Dabei stellen die unterschiedlichen Alternativen Punkte in diesem Diagramm dar, deren Ausprägungen in Richtung der Ordinate (y-Achse) den jeweiligen kalkulatorischen Abschreibungen K_A aus dem vorangegangenen Abschnitt und in Richtung Abszisse (x-Achse) den jeweiligen multikriteriellen Punktwerten entsprechen. Für diese Darstellung können sowohl die multikriteriellen Punktwerte der herkömmlichen Nutzwertanalyse als auch die der in dieser Arbeit erstellten QFD-Bewertung als Eingangsgrößen dienen. Zur Abschätzung, welche der Alternativen die geeignetsten sind, dient die lineare Optimierung. Dabei wird eine Bewertungsgerade abgeleitet, die die Wichtigkeit der beiden Dimensionen berücksichtigt und anhand derer sich erkennen lässt, welche der Alternativen die geeignetste Verknüpfung der zwei Kriterien aufweist. Die Gewichtung der Dimensionen ist erforderlich, da abgebildet werden muss, welchen Stellenrang im anwendenden Unternehmen die zwei Eingangsgrößen (monetär und multikriteriell) gegeneinander aufweisen. Ist dem Unternehmen der Nutzen den das einzusetzende Betriebsmittel bieten soll größer als die Summe der nötigen Investitionen wert muss dies berücksichtigt werden. Um dies in anschaulicher Weise graphisch darstellen zu können, werden die Dimensionen in Prozent angegeben, wobei die Ausprägung der Alternativen mit dem höchsten Wert als 100% angenommen wird. Die Bewertungsgerade lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$y_{kA \text{ in } \%} = k_{DG} * x_{mB \text{ in } \%} + d_{EB} \quad (\text{F 5})$$

Dabei stellt $y_{kA \text{ in } \%}$ die Ausprägung der Alternativen hinsichtlich der errechneten kalkulatorischen Abschreibung in Prozent, $x_{mB \text{ in } \%}$ die Ausprägung der Alternativen hinsichtlich der multikriteriellen Bewertung in Prozent, k_{DG} die Dimensionsgewichtung und d_{EB} die Endbewertung der jeweiligen Alternative dar. Dabei gilt:

$$k_{DG} = \frac{Gew_{mult \text{ Bew}}}{Gew_{mon \text{ Bew}}} \quad (\text{F 6})$$

⁴² Siehe Abschnitt 3.4.

Wenn die Kosten in einem Unternehmen eine geringere Bedeutung spielen und mehr Wert auf eine höhere Erfüllung des Nutzens gelegt wird, ist der Wert der für die Gewichtung der monetären Bewertung ($Gew_{mon\ Bew}$), geringer als der Wert der Gewichtung der multikriteriellen Bewertung ($Gew_{mult\ Bew}$) anzusetzen. Empfehlenswert sind prozentuell angegebene Werte, die sich zwischen 0 und 100% bewegen und gesamt 100% ergeben. Dadurch wird der Anstieg der Bewertungsgerade erhöht. Zur Endbewertung d_{EB} gelangt man, indem die Werte der Alternativen in (F 5) eingetragen werden. Die geeignetste Alternative stellt dabei jene mit dem geringsten d_{EB} -Wert dar. Damit wird bei einer gleichen Gewichtung der Dimensionen die Alternative identifiziert, die den größten Nutzen und die geringsten Kosten aufweist. Dies ist graphisch in Abbildung 17 angedeutet. In diesem Fall stellt Alternative 3, die geeignetste Lösung dar, gefolgt von Alternative 2.

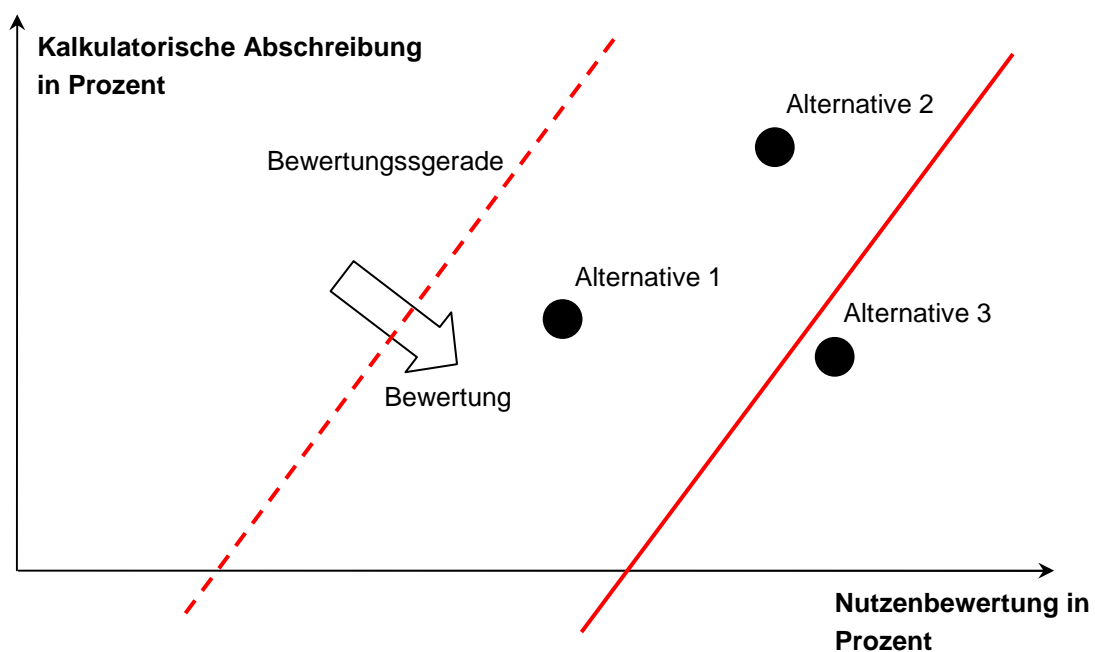


Abbildung 17: Verknüpfung der monetären und multikriteriellen Bewertung

6 Validierung der Bewertungsmethodik

Im vorliegenden Kapitel wird, die in dieser Arbeit entwickelte Methodik einer Validierung unterzogen (Phase 3 des rationalen Problemlösungsprozesses; vgl. Einleitung Kapitel 4). Dabei ist zu prüfen, ob die Durchführung der Methodik mit der Recherche übereinstimmende sinnvolle Ergebnisse liefert und ob diese die gestellten Anforderungen aus Abschnitt 4.1 erfüllt. Im Detail bedeutet das, dass analysiert werden muss, ob die Methodik ihren zusätzlichen Aufwand gegenüber einer einfachen Nutzwertanalyse in einer Nutzen/Aufwand-Betrachtung durch eine differenziertere objektivere Diskussionsgrundlage für eine Investitionsentscheidung rechtfertigt und ob sie plausible Ergebnisse liefert. Dies wird anhand von drei entwickelten Validierungsszenarien durchgeführt. Diese wurden so modelliert, dass sie logisch nachvollziehbar sind und die sich ergebenden Gewichtungen der Anforderungen dazu führen, dass als Ergebnis der Methode im Vorhinein definierte Produkte erwartungsgemäß eine höhere Bewertung erfahren. Diese erwarteten Ergebnisse werden dann nach der jeweiligen Durchführung der beiden Methoden den tatsächlichen Resultaten gegenübergestellt und dadurch Rückschlüsse gezogen. Eine Implementierung im Feld und eine darauf basierende Evaluierung sind zukünftigen Arbeiten vorbehalten.

Das Kapitel ist so strukturiert, dass die Szenarien nacheinander beleuchtet werden. Dabei werden zuerst die Gewichtungen der Anforderungen und sich daraus ergebende erwartete Ergebnisse beschrieben. Danach werden die Durchführungen der entwickelten Methodik und der Nutzwertanalyse betrachtet. Diese werden im Abschluss einander gegenübergestellt und die Ergebnisse analysiert. Für die Gewichtungen der Anforderungen und die Bewertungen der Nutzwertanalyse wird eine übliche Skala von 1-5 verwendet. Darauf folgt eine Durchführung und Beleuchtung der Gesamtbewertung. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer kritischen Betrachtung anhand der Anforderungen aus Kapitel 4.

6.1 Validierung der Nutzenbewertung

6.1.1 Szenario 1 – Komplexer Arbeitsablauf und enge Zusammenarbeit mit dem Menschen

In Szenario 1 wird erwartet, dass zukünftige Veränderungen der Reichweiten und Traglasten von jedem einzelnen der vier kollaborierenden Roboter abgedeckt werden könnten. Damit stellt dieses Szenario einen Anwendungsfall dar in dem diese Anforderungen nicht berücksichtigt werden müssen und daher mit Null gewichtet werden. Im hier gestalteten Szenario wird ein Unternehmen betrachtet, das das nötige Know-How zur Roboterprogrammierung zur Verfügung hat, der Roboter

dauerhaft mit einem Greif-Endeffektor zusammenarbeiten wird und geringe Änderungen in Ortswechsel und damit verbundenen Bewegungsablaufänderungen auftreten werden. Diese Punkte sind nicht vollends unwichtig, jedoch geringer als die folgenden zwei Punkte und werden daher mit 1 gewichtet. Bedeutende Anforderungen stellen komplexe Bewegungsabläufe und eine Zusammenarbeit mit Mitarbeitern auf engem Raum dar. Diese Punkte werden daher mit 5 gewichtet. Die Gewichtungen sind in Abbildung 18 dargestellt.

Szenario:	1
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	1
Hohe Reichweite	0
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	1
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	5
Hohe Traglast	0
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	1
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	5

Abbildung 18: Gewichtung der Anforderungen zufolge Szenario 1

Zu Folge dieser Gewichtungen wird eine höhere Punkte-Bewertung des LBR iiwa erwartet, da nötiges Know-How hinsichtlich der Programmierung von Robotern im Unternehmen zur Verfügung steht und auf eine hohe Sicherheit Wert gelegt werden muss. Dies basiert auf den Detailbetrachtungen in Abschnitt 3.4, die den Anwendern in der Praxis durch Internetrecherche zur Verfügung stehen.

Die parallele Durchführung der entwickelten Methodik und einer Nutzwertanalyse ergibt in beiden Fällen, wie erwartet, eine höchste Bewertung für den LBR iiwa (Abbildung 19). Wobei dieser im Falle der QFD niedriger bewertet wird, als dies in der Nutzwertanalyse der Fall ist. Hierzu können die letzten Zeilen der QFD-Matrix 2 und der Nutzwertanalyse miteinander verglichen werden. Bei den anderen Alternativen enthält das Ergebnis der beiden Methoden auch Unterschiede hinsichtlich der Reihung. In der QFD-Methodik werden der Sawyer und der UR3 an zweite Stelle gereiht, gefolgt vom UR3. In der Nutzwertanalyse schneiden die UR-Modelle jedoch ex aequo an letzter Stelle ab.

Die Nutzwertanalyse spiegelt anhand der Ausführungen in Abschnitt 3.4 das erwartete Ergebnis am besten wieder. Nicht nur durch den mit Abstand höchsten Punktestand des LBR iiwa, sondern auch durch die ex aequo Schlussreihung der UR-Modelle. Die hohe Bewertung des ersteren Modells kommt aufgrund der guten Erfüllung der am höchsten gewichteten Zielerfordernisse zustande. Die Bewertung der restlichen Modelle, die ca. die Hälfte der Punkte erzielten, setzt sich aus einer durchschnittlichen Bewertung zufolge aller Zielgrößen zusammen. Die bessere Reihung gegenüber den UR-Modellen erzielte der Sawyer aufgrund einer besseren Erfüllung der hochgewichteten Zielerfordernisse.

Demgegenüber ist das Ergebnis der QFD-Methodik nicht so intuitiv greifbar. Die eingangs gewichteten Zielgrößen führen zu einer fast dreifach so hohen Reihung im Falle der „Hochauflösenden Sensoren“ und zu einer fast doppelt so hohen Reihung im Falle des „Hohen Bewegungsumfangs“ im Vergleich zu den anderen drei technischen Spezifikationen, die als bedeutend identifiziert werden (Abbildung 19 QFD-Matrix 1 – oben). Bei diesen Spezifika handelt es sich um die „Einfache Programmier- und Bedienbarkeit“, die „Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung“ und den „Hohen Bewegungsumfang“. Die hohe Punktezahl des Merkmals „Hochauflösenden Sensoren“ kommt durch die starke Beziehung zu den Punkten „Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe“ und „Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen“ zustande. Dies sind die Anforderungen mit der höchsten Bedeutung. Der „Hohe Bewegungsablauf“ erzielt die hohe Bewertung durch die starke Beziehung zur „Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe“. Dies in Kombination zu den Beziehungsverhältnisse der restlichen technischen Spezifikationen zu den Anforderungen führt zu einer Umverteilung der Gewichtungen. Aus einer durch zwei Merkmale dominierten Gewichtung ergibt sich eine neue Gewichtung mit einer dominierenden, einer deutlich zweitgereihten und drei nicht unterrepräsentierten Merkmalen. Hierzu sei auf die rel. Bedeutungen der QFD-Matrix 1 und der QFD-Matrix 2 verwiesen. In der aus der QFD-Matrix 1 abgeleiteten Gewichtung dominiert der LBR iiwa durch die hohe Erfüllung der Spezifikation „Hochauflösende Sensoren“ und den guten Bewertungen zufolge der Punkte über die „Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung“ und „Hohem Bewegungsumfang“. Der interessanteste Punkt an der QFD-Bewertung ist jedoch, dass es der UR3 hier schafft sich von dem UR5 abzuheben und mit dem Sawyer an zweiter Stelle gleichzuziehen. Dies kommt einerseits von der Fähigkeit des UR3 die direkt an der mechanischen Schnittstelle befindliche Drehachse frei zu drehen und damit eine bessere Bewertung hinsichtlich der Erfüllung von komplexeren Bewegungsabläufen erzielt. Andererseits ist der UR3 aufgrund seines geringen Eigengewichtes sicherer gegenüber dem UR5 (vgl. Abschnitt 5.5) und leichter zu transportieren.

Das erwartete Ergebnis wird von der Nutzwertanalyse genauer wiedergespiegelt. Dies wird aber in diesem Fall als nachteilig betrachtet, da die QFD-Methodik Merkmale berücksichtigt, die sonst nicht in die Bewertung mit eingegangen wären. Sie führt dadurch zu einem realistischeren und differenzierterem Bild. Der Aufwand der QFD-Methodik ist dabei doppelt so hoch bei erster Matrizenentwicklung. Bei wiederholten Anwendungen ist der Aufwand mit dem der Nutzwertanalyse gleichzusetzen. Vorteile bringt die Nutzwertanalyse in der einfachen Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Dieser Nachteil der QFD birgt jedoch das Potential Zusammenhänge zu erkennen, die mit der Nutzwertanalyse nicht greifbar gemacht werden.

QFD-Matrix 1

Zielgrößen	Technische Spezifikationen																	
	Gewichtung (Pkte)		Hochauflösende Sensoren		Einfache Programmier- und Bedienbarkeit		Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung		Hohe Reichweite		Hohe Traglast		Geringes Eigengewicht		Hoher Bewegungsumfang			
	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.		
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	1	2	0	0	9	18	1	2	1	2	1	2	9	18	0	0		
Hohe Reichweite	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0		
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	1	2	0	0	1	2	9	18	0	0	0	0	0	0	0	0		
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	5	10	9	90	1	10	3	30	0	0	0	0	0	0	9	90		
Hohe Traglast	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0		
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	1	2	0	0	9	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	5	10	9	90	0	0	0	0	0	0	0	3	30	0	0	0		
Sich daraus ergebende Gewichtung der Spez. Matr.			180	48	50	2	2	48	90									

QFD-Matrix 2

Technische Spezifikationen	Alternativen									
	Gewichtung (Pkte)		LBR Iiwa 7		UR3		UR5		Sawyer	
	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.
Hochauflösende Sensoren	180	10	5	50	1	10	1	10	2	20
Einfache Programmier- und Bedienbarkeit	48	3	1	3	5	15	5	15	3	9
Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung	50	3	5	15	1	3	1	3	5	15
Hohe Reichweite	2	0	4	0	2	0	3	0	5	0
Hohe Traglast	2	0	5	0	2	0	4	0	3	0
Geringes Eigengewicht	48	3	2	6	5	15	3	9	3	9
Hoher Bewegungsumfang	90	5	3	15	5	25	4	20	3	15
Sich daraus ergebende Bewertungen:			89	68	57	68				
Vergleichswerte zur Nutzwertanalyse:			75,33%	55,62%	47,05%	58,98%				
Reihung:			1	2	4	2				

Nutzwertanalyse

Zielgrößen	Gewichtung (Pkte)		Alternativen							
	Bez.	rel. Gewichtung	LBR Iiwa		UR3		UR5		Sawyer	
			Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	1	7,69%	3	4,62%	4	6,15%	4	6,15%	3	4,62%
Hohe Reichweite	0	0,00%	4	0,00%	2	0,00%	3	0,00%	5	0,00%
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	1	7,69%	2	3,08%	4	6,15%	4	6,15%	3	4,62%
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	5	38,46%	5	38,46%	2	15,38%	2	15,38%	3	23,08%
Hohe Traglast	0	0,00%	5	0,00%	2	0,00%	4	0,00%	3	0,00%
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	1	7,69%	1	1,54%	5	7,69%	5	7,69%	3	4,62%
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	5	38,46%	5	38,46%	1	7,69%	1	7,69%	2	15,38%
Sich daraus ergebende Bewertungen:			86,15%	43,08%	43,08%	52,31%				
Reihung:			1	3	3	2				

Abbildung 19: Parallele Durchführung der QFD-Methodik und der Nutzwertanalyse in Szenario 1

6.1.2 Szenario 2 – Flexibler Einsatz und einfache Bedienung

Auch in diesem Szenario wird eine Entwicklung in Richtung höheren Reichweitebedarfs nicht vermutet. Der Roboter wird mit einem Greif-Endeffektor die Montagefunktionen erfüllen. Die dazu nötigen Bewegungsabläufe werden als nicht zu komplex angenommen und werden ohne direkte Zusammenarbeit mit Mitarbeitern durchgeführt. Der Roboter wird von einem Mitarbeiter programmiert (Handteaching) und führt seine Arbeit eigenständig durch. Der Mitarbeiter, der den Roboter programmiert ist kein Robotik-Experte und es darf daher kein zu hoher Schulungsbedarf entstehen. Der Roboter soll dazu flexibel an mehreren Arbeitstationen eingesetzt werden können, wo Prozesse mit schwankenden erforderlichen Stückzahlausbringungen durch diesen kurzfristig automatisiert werden sollen. Die Komponenten zukünftiger Produkte werden vermutlich schwerer werden und daher ein höherer Wert auf den Traglastbereich gelegt. Dieses Anwendungsfeld und die sich daraus ergebenden Gewichtungen sind in Abbildung 20 dargestellt.

Szenario:	2
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	3
Hohe Reichweite	0
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	1
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	1
Hohe Traglast	3
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	5
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	1

Abbildung 20: Gewichtung der Anforderungen zufolge Szenario 2

In diesem Szenario wird zufolge der geringen Sicherheitsanforderungen und des flexiblen Einsatzes ohne nötigem Robotik-Know-How im Unternehmen eine Bevorzugung der UR-Modelle erwartet. Im Speziellen wird der UR5 als geeignetstes Modell eingeschätzt, da dieser die Anforderung nach einem höheren zukünftig verfügbaren Traglastspektrum besser bedienen kann.

Die Bewertungen aus der QFD-Methodik und der Nutzwertanalyse unterscheiden sich auch in diesem Szenario. Bei der Nutzwertanalyse schneiden, wie erwartet, die UR-Modelle am besten mit einem deutlichen Vorteil für den UR5 ab. Abgeschlagen und gleichgereiht schneiden der LBR iiwa und der Sawyer ab. In der QFD-Methodik schneiden die UR-Modelle ebenfalls mit Abstand am besten ab. Jedoch wird der UR3 hier um einen Punkt besser bewertet. Der LBR iiwa und der Sawyer werden in dieser Bewertung auch unterschieden. Der LBR iiwa ist um 4% schlechter und der Sawyer um 4% besser bewertet, als dies in der Nutzwertanalyse der Fall ist. Die Durchführung ist in Abbildung 21 dargestellt.

In der Nutzwertanalyse ergibt sich die hohe Bewertung des UR5 aus den Zielgrößen „Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel“, „Hohe Traglast“ und

„Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand“. Diese sind die höchst gewichteten und werden durch den UR5 besonders erfüllt. Einzig bei der Anforderung des hohen Traglastspektrums schneidet der LBR iiwa besser ab. Diese Kategorie aus dem Zielkatalog ist es auch, die den UR3 vom UR5 unterscheidet. Der Sawyer kann die schlechtere Bewertung dieses Merkmals durch einen niedrigeren Programmieraufwand gegenüber dem LBR iiwa ausgleichen und somit denselben Punktwert erreichen.

In der QFD-Methodik werden die Gewichtungen der Zielgrößen wieder in neuer Form auf die technischen Spezifikationen umgelegt. In diesem Szenario ist der Unterschied jedoch nicht so groß wie in dem vorangegangenen. Es bleibt ein dominantes Merkmal bestehen. Die mittleren bis unbedeutender gewichteten Anforderungen werden durch ein zusammengerücktes Feld an Spezifika ersetzt. Aus den Zielgrößen wird die hohe Bedeutung einer „einfachen Programmierung und Bedienbarkeit“ abgeleitet. Diese ist umso bedeutender, da sie zwei wichtige Zielerfordernisse in starkem Maße bedient. Daneben erhalten die Spezifikationen der „hohen Traglast“ und des „geringen Eigengewichtes“ mittelmäßige Gewichtungen, die im Grunde den zwei mittelmäßig gewichteten Zielgrößen entsprechen. Aus der guten Erfüllung der einfachen Programmierbarkeit resultieren die hohen Ergebnisse der UR-Modelle. In der Ausführung der QFD-Matrix 2 ist zu erkennen, wieso der UR3 in etwa gleich dem UR5 bewertet wird. Dieser weist zwar eine geringere Bewertung zufolge des Traglastspektrums auf, jedoch gleicht dieser dies durch das geringe Eigengewicht wieder aus. Der Anwender kann also in einer Expertendiskussion analysieren, ob er der leicht zu transportierenden UR3 oder der mit einem höheren Traglastspektrum ausgestatteten UR5 besser für die Anwendung geeignet ist. Die Differenzierung des Sawyers gegenüber dem LBR iiwa ergibt sich dadurch, dass der Spezifikation der „hohen Traglast“, in der sich der LBR iiwa auszeichnet, eine deutlich geringere Bedeutung beigemessen wird, als der einfachen Programmierung, in der der Sawyer relativ gut abschneidet.

Anhand dieses Szenarios zeigt sich erneut, dass die Nutzwertanalyse die erwarteten Ergebnisse widerspiegelt, die QFD-Methodik jedoch einen Mehrwert für eine Diskussionsgrundlage bietet. Damit lassen sich die erwarteten Ergebnisse kritisch hinterfragen und werden weitere Aspekte aufgezeigt. Die Reihung der QFD-Methodik macht Sinn und bildet ein realistisches Bild besser ab.

QFD-Matrix 1

Zielgrößen		Technische Spezifikationen																
		Hochauflösende Sensoren		Einfache Programmier- und Bedienbarkeit		Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung		Hohe Reichweite		Hohe Traglast		Geringes Eigengewicht		Hoher Bewegungsumfang				
		Bez.	Bew. * rel. Bed.	Bez.	Bew. * rel. Bed.	Bez.	Bew. * rel. Bed.	Bez.	Bew. * rel. Bed.	Bez.	Bew. * rel. Bed.	Bez.	Bew. * rel. Bed.	Bez.	Bew. * rel. Bed.			
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	3	6	0	0	9	54	1	6	1	6	1	6	0	0	9	54	0	0
Hohe Reichweite	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	1	2	0	0	1	2	9	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	1	2	9	18	1	2	3	6	0	0	0	0	0	0	9	18	0	0
Hohe Traglast	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	9	54	0	0	0	0	0	0
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	5	10	0	0	9	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	1	2	9	18	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	0	0
Sich daraus ergebende Gewichtung der Spezifika:			36		148		30		6		60		60		18			

QFD-Matrix 2

Technische Spezifikationen		Alternativen								
		LBR iiwa 7		UR3		UR5		Sawyer		
		Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.	
Hochauflösende Sensoren	36	2	5	10	1	2	1	2	2	4
Einfache Programmier- und Bedienbarkeit	148	10	1	10	5	50	5	50	3	30
Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung	30	2	5	10	1	2	1	2	5	10
Hohe Reichweite	6	0	4	0	2	0	3	0	5	0
Hohe Traglast	60	4	5	20	2	8	4	16	3	12
Geringes Eigengewicht	60	4	2	8	5	20	3	12	3	12
Hoher Bewegungsumfang	18	1	3	3	5	5	4	4	3	3
Sich daraus ergebende Bewertungen:		61		87		86		71		
Vergleichswerte zur Nutzwertanalyse:		54,53%		74,19%		73,52%		62,01%		
Reihung:		4		1		2		3		

Nutzwertanalyse

Zielgrößen		Alternativen									
		LBR iiwa		UR3		UR5		Sawyer			
		Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.		
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	3	21,43%	3	12,86%	4	17,14%	4	17,14%	3	12,86%	
Hohe Reichweite	0	0,00%	4	0,00%	2	0,00%	3	0,00%	5	0,00%	
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	1	7,14%	2	2,86%	4	5,71%	4	5,71%	3	4,29%	
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	1	7,14%	5	7,14%	2	2,86%	2	2,86%	3	4,29%	
Hohe Traglast	3	21,43%	5	21,43%	2	8,57%	4	17,14%	3	12,86%	
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	5	35,71%	1	7,14%	5	35,71%	5	35,71%	3	21,43%	
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	1	7,14%	5	7,14%	1	1,43%	1	1,43%	2	2,86%	
Sich daraus ergebende Bewertung:		58,57%		71,43%		80,00%		58,57%			
Reihung:		3		2		1		3			

Abbildung 21: Parallele Durchführung der QFD-Methodik und der Nutzwertanalyse in Szenario 2

6.1.3 Szenario 3 – Zwischenszenario

Dieses Szenario bewegt sich zwischen den ersten beiden extrem gestalteten Szenarien, wobei im ersten komplexe Abläufe und hohe Sicherheit bedient werden musste und im zweiten Flexibilität und einfache Bedienung gefordert wurden. Hier liegt der Hauptfokus auf zukünftiger Unsicherheit hinsichtlich der nötigen Reichweiten- und Traglastspektren. Daneben muss zusätzlich zu einem Greif-Endeffektor ein Bildverarbeitungssystem integriert werden. Niedrigerer Programmieraufwand soll in gewissem Maße und eine gewisse Nähe zu Mitarbeitern ermöglicht werden. Die zugehörigen Gewichtungen sind Abbildung 22 zu entnehmen.

Szenario:	3
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	1
Hohe Reichweite	5
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	3
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	1
Hohe Traglast	5
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	3
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	2

Abbildung 22: Gewichtung der Anforderungen zufolge Szenario 3

In diesem Szenario wird ein besseres abschneiden der Bewertung des Sawyer erwartet, da dieser die mit Abstand größte Reichweite aufweist und Bildverarbeitungssysteme bereits integriert mit sich führt. Hinzu kommen seine relativ einfache Programmierung, relativ hohe Traglast und seine relative Sicherheit. An zweiter Stelle wird eine knappe Bewertung des UR5 und des LBR iiwa erwartet.

Entgegen der Erwartungen erhält der LBR iiwa zufolge der beiden Methoden die höchste Bewertung. Dieser wird in der Nutzwertanalyse dicht gefolgt von dem UR5 und dem Sawyer und in der QFD-Methodik nur von dem Sawyer. Der Sawyer erhält dabei in beiden Methoden denselben Abstand in der Bewertung zu dem erstgereihten LBR iiwa. Die Erwartungen hinsichtlich des UR3 wurden erfüllt, indem dieser keine Rolle unter den bestbewerteten Modellen spielt. Siehe hierzu Abbildung 23.

In der Nutzwertanalyse ergibt sich eine knappe Bewertung der ersten drei Modelle. Die höchste Bewertung des LBR iiwa ergibt sich aus den hohen Anteilen durch die gute Erfüllung der nötigen hohen Reichweite und Traglast. In diesen Punkten schneidet der Sawyer am zweitbesten ab. Der UR 5 hat jedoch eine bessere Bewertung in den Kategorien der „Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme“ und des „Niedrigen Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand“.

Durch die QFD-Matrix 1 ergibt sich eine Gewichtung der technischen Spezifikationen mit drei bedeutenden und zwei relativ bedeutenden Merkmalen im Gegensatz zu den zwei bedeutenden und 2 relativ bedeutenden Merkmalen und einem mittelmäßig bedeutenden Merkmal. Die hohe Bewertung des LBR iiwa ergibt sich aus dem guten Abschneiden in den vier Kategorien „Hochauflösende Sensoren“, „Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung“, „Hohe Reichweite“ und „Hohe Traglast“. Der Sawyer kann bei den drei letztgenannten Merkmalen noch mithalten, schafft es jedoch nicht durch den Ausgleich durch seine gute Erfüllung der „Einfachen Programmier- und Bedienbarkeit“ die Gesamtheit der hochbewerteten Anteile des LBR iiwa auszugleichen. In größerem Ausmaße verhält es sich mit dem UR5 gegenüber dem Sawyer und dem UR3 gegenüber dem UR5.

In diesem Szenario zeigt die Nutzwertanalyse, dass sie nicht nur erwartete Ergebnisse liefert. Aufgrund der Vielzahl an berücksichtigten Zielgrößen werden die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und die Prüfung der Plausibilität erschwert. Die beiden Methodiken können an den unterschiedlichen Bewertungen des UR5 voneinander abgegrenzt werden. Ausschlaggebend ist die Erfüllung der „Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme“. Diese Anforderung wird durch die QFD-Matrix 1 zu geringen Teilen in die „Einfache Programmier- und Bedienbarkeit“ und zu einem großen Teil in die „Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung“ übersetzt. In letzterer Kategorie schneidet der Sawyer deutlich besser ab als der UR5. Hier gehen die Bewertungen die in der Nutzwertanalyse und die in der QFD-Matrix 2 gemacht worden sind auseinander, obwohl diese in etwa gleich sein müssten. Dies kommt davon, dass es schwer ist einzuschätzen, wie gut der Sawyer andere Systeme integrieren kann und wie die bereits integrierten Systeme⁴³ am geeignetsten bewertet werden können. Einerseits sei darauf verwiesen, dass Änderung diesbezüglich keinen Unterschied hinsichtlich der Reihung der Modelle und der höchsten Bewertung des LBR iiwa's ausmachen. Adaptionsbedarf bestünde in diesem Fall eher in den Bewertungen der „Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme“ der Nutzwertanalyse, was erneut die Erkenntnisse der vorangegangenen Szenarien erhärtet. Andererseits sei anhand dieses Punktes auf den Bedarf der Evaluierung anhand von Feldtests verwiesen. Damit muss der Zielkatalog und die in der Methodik verwendeten technischen Spezifika und deren Beziehung zueinander analysiert und eventuell adaptiert werden. Damit muss auf das Problem, dass bei der Methodenentwicklung zufolge von Literatur- und Internetrecherchen entstanden ist eingegangen werden, wonach gewisse Anforderungen und technische Merkmale zusammengefasst werden mussten, da es nicht möglich war diese näher zu quantifizieren und gewisse Beziehungen unbemerkt oder unzureichend berücksichtigt geblieben sind.

⁴³ Die zwei Kameras zur Bildverarbeitung – siehe Abschnitt 3.4.

Zielgrößen		Gewichtung (Pkte) rel. Bedeutung		Technische Spezifikationen																						
				Hochauflösende Sensoren				Einfache Programmier- und Bedienbarkeit				Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung				Hohe Reichweite			Hohe Traglast			Geringes Eigengewicht			Hoher Bewegungsumfang	
				Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	Bez.	Bez. * rel. Bed.	
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	1	2	0	0	⊕	9	18	Δ	1	2	Δ	1	2	Δ	1	2	⊖	9	18	0	0					
Hohe Reichweite	5	10	0	0	0	0	0	0	0	⊕	9	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	3	6	0	0	Δ	1	6	⊕	9	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	1	2	⊕	9	18	Δ	1	2	○	3	6	0	0	0	0	0	0	0	⊖	9	18					
Hohe Traglast	5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	⊕	9	90	0	0	0	0	0	0					
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	3	6	0	0	⊕	9	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	2	4	⊕	9	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	○	3	12	0	0	0					
Sich daraus ergebende Gewichtung der Spezifika:				54				80				62				92			92			30			18	

Technische Spezifikationen		Gewichtung (Pkte) rel. Bedeutung		Alternativen							
				LBR Iiwa 7		UR3		UR5		Sawyer	
				Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.	Bew.	Bew. * rel. Bed.
Hochauflösende Sensoren	54	6	5	30	1	6	1	6	2	12	
Einfache Programmier- und Bedienbarkeit	80	9	1	9	5	45	5	45	3	27	
Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle und Kabelführung	62	7	5	35	1	7	1	7	5	35	
Hohe Reichweite	92	10	4	40	2	20	3	30	5	50	
Hohe Traglast	92	10	5	50	2	20	4	40	3	30	
Geringes Eigengewicht	30	3	2	6	5	15	3	9	3	9	
Hoher Bewegungsumfang	18	2	3	6	5	10	4	8	3	6	
Sich daraus ergebende Bewertungen:				176		123		145		169	
Vergleichswerte zur Nutzwertanalyse:				74,86%		52,52%		61,76%		71,87%	
Reihung:				1		4		3		2	

Zielgrößen		Gewichtung (Pkte) rel. Gewichtung		Alternativen							
				LBR Iiwa		UR3		UR5		Sawyer	
				Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.	Bew.	gew. Bew.
Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	1	5,00%	3	3,00%	4	4,00%	4	4,00%	3	3,00%	
Hohe Reichweite	5	25,00%	4	20,00%	2	10,00%	3	15,00%	5	25,00%	
Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	3	15,00%	2	6,00%	4	12,00%	4	12,00%	3	9,00%	
Ausführung komplexer und/oder wechselnder Bewegungsabläufe	1	5,00%	5	5,00%	2	2,00%	2	2,00%	3	3,00%	
Hohe Traglast	5	25,00%	5	25,00%	2	10,00%	4	20,00%	3	15,00%	
Niedriger Programmier-, Bedien- und Installationsaufwand	3	15,00%	1	3,00%	5	15,00%	5	15,00%	3	9,00%	
Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	2	10,00%	5	10,00%	1	2,00%	1	2,00%	2	4,00%	
Sich daraus ergebende Bewertungen:				72,00%		55,00%		70,00%		68,00%	
Reihung:				1		4		2		3	

Abbildung 23: Parallele Durchführung der QFD-Methodik und der Nutzwertanalyse in Szenario 3

6.2 Validierung der monetären Bewertung und der Endbewertung

Die monetäre Bewertung und Endbewertung werden an Szenario 1 durchexerziert. In dieser Ausführung müssen im Gegensatz zu den anderen beiden Szenarien zusätzlich zu den Investitionssummen und mindesten Lebensdauern aus Tabelle 5 der Schulungsaufwand des LBR iiwa nicht mitberücksichtigt werden. Somit ist der Wiederbeschaffungswert aus Formel (F 4) ident mit der Investitionssumme. Durch die geringere mindeste Lebensdauer und die doppelt so hohen Anschaffungskosten schneidet der LBR iiwa im Vergleich zu den anderen Modellen am deutlich schlechtesten ab. Abbildung 24 stellt die Berechnungsgrundlagen für die kalkulatorische Abschreibung dar.

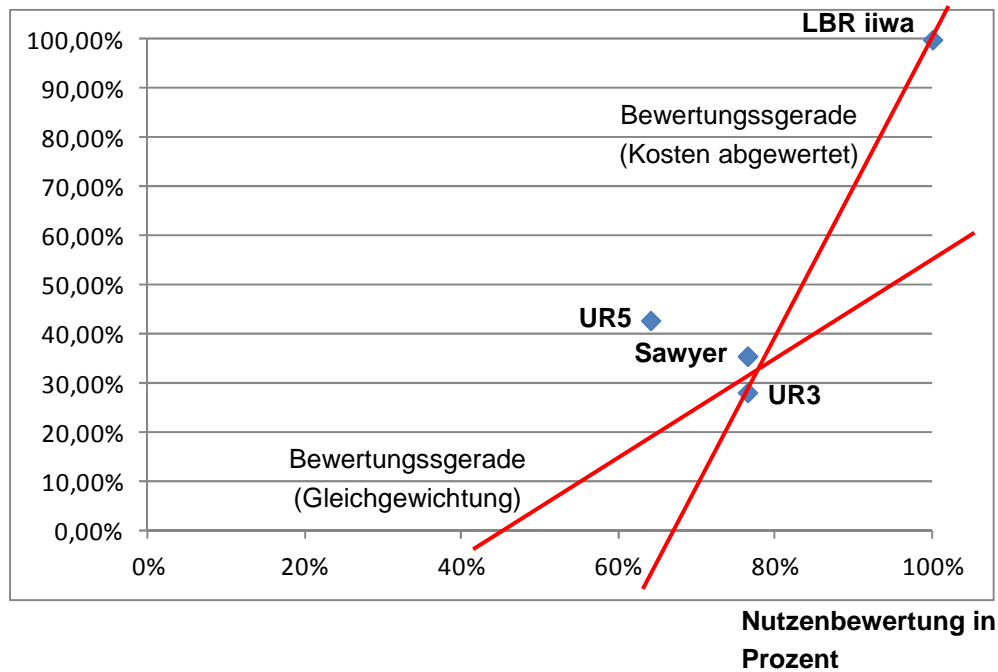
	Alternativen			
	LBR iiwa 7	UR3	UR5	Sawyer
Investitionssumme	€ 65.000	€ 21.400	€ 32.500	€ 27.000
Schulungsbedarf bei fehlendem Programmier-Know-How	€ -	€ -	€ -	€ -
Wiederbeschaffungswert	€ 65.000	€ 21.400	€ 32.500	€ 27.000
Mindeste Lebensdauer (in Betriebsstunden)	30000	35000	35000	35000
Kalkulatorische Abschreibung (in € pro Betriebsstunde)	2,17	0,61	0,93	0,77

Abbildung 24: Monetäre Bewertung in Szenario 1

Die Verknüpfung der Nutzenbewertung mit der monetären Bewertung liefert ein anderes Bild als in der Bewertung in Abschnitt 6.1.1. Trotz der besten Erfüllung der Zielgrößen schneidet der LBR iiwa in der Endbewertung am schlechtesten ab. Erst bei einer Gewichtung der monetären mit 25% und der Nutzen-Dimension mit 75%⁴⁴ schneidet der LBR iiwa gleich gut wie der UR3 ab, der durch seine geringe kalkulatorische Abschreibung in Szenario 1 und 2 dominiert. Einzig in Szenario 3 führt der Sawyer bei Gleichgewichtung und monetärer Niedriggewichtung das Feld an. Diese Ausführungen können in Abbildung 25 nachgeschlagen werden.

⁴⁴ Dies führt zu einer neuen Steigung von $k=3$ der Bewertungsgeraden.

Kalkulatorische Abschreibung in Prozent



Bewertung Gleich-Gewichtung (k=1)										
Szenarien:		1			2			3		
		Mul. Bew.	EB	ER	Mul. Bew.	EB	ER	Mul. Bew.	EB	ER
Alternativen	Sawyer	89	-0,41	2	61	-0,48	3	176	-0,63	1
	UR5	68	-0,21	3	87	-0,59	2	123	-0,42	3
	UR3	57	-0,48	1	86	-0,74	1	145	-0,43	2
	LBR iiwa	68	0,00	4	71	0,30	4	169	0,00	4

Bewertung mit Gewichtung zugunsten der multikriteriellen Bewertung (k=3)										
Szenarien:		1			2			3		
		Mul. Bew.	EB	Reihung	Mul. Bew.	EB	Reihung	Mul. Bew.	EB	Reihung
Alternativen	Sawyer	89	-1,94	3	61	-2,11	3	176	-2,55	1
	UR5	68	-1,49	4	87	-2,56	2	123	-2,07	2
	UR3	57	-2,01	1	86	-2,74	1	145	-1,83	4
	LBR iiwa	68	-2,00	2	71	-1,10	4	169	-2,00	3

Abbildung 25: Endbewertung – Graphische Darstellung (oben); Tabellarische Darstellung (Mitte – Gleichgewichtung; unten – Ungleichgewichtung)

Zu erkennen ist, dass der LBR iiwa trotz der höchsten Bewertung in den Szenarien 1 und 3 selbst bei einer geringen Gewichtung der Kosten-Dimension nicht gut abschneidet. Dies deckt sich mit den Angaben aus dem Telefoninterview mit einem KUKA-Verantwortlichen (Schinnerl 17.12.2015), wonach an einer besseren Programmierbarkeit gearbeitet wird. Dies ist der kritische Punkt. Wenn von KUKA hier deutliche Fortschritte gemacht werden, dann wird der LBR iiwa voraussichtlich nicht nur die überwiegenden Nutzenbewertungen dominieren, sondern auch besser in einer dualen Gesamtbewertung abschneiden.

6.3 Fazit

Die im Zuge der Validierung analysierten Methodiken werden hier anhand der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 bewertet.

Methoden bzw. Anforderungen:	Ganzheitliche Darstellung des Einsatzgebietes	Ganzheitliche Darstellung des Betriebsmittel	Objektive Darstellung der Investitionsentscheidungen	Hilfestellung der Datenermittlung für unterschiedlichster Alternativen	Einfache Handhabbarkeit	Flexibilität und Nachhaltigkeit
Neue Methodik (QFD-basiert)	+	+	+	+	o	+
Neue Methodik (NWA-basiert)	+	+	o	o	+	+

Abbildung 26: Eignung der entwickelten Methode anhand der definierten Anforderungen („+“ hohe Erfüllung, „o“ mittlere Erfüllung, „-“ geringe Erfüllung)

Wie in Kapitel 4 bereits analysiert bewirkt eine Kombination der monetären und der Nutzenbewertungsmethoden die umfassendste Abdeckung der Anforderungen und führt zu der geforderten dualen Bewertung. Die ersten beiden Anforderungen werden erfüllt egal ob die QFD oder die Nutzwertanalyse der Nutzenbewertung zugrunde liegen (Abbildung 26). Dabei sei darauf verwiesen, dass bei der Methodenentwicklung keine reine QFD-Basis angewandt wurde, sondern die QFD-Matrix 2 einen starken Bezug zu der Nutzwertanalyse aufweist (vgl. Abschnitt 5.6). Davon abgesehen ermöglichen beide entwickelten Methoden die Ziel- und Zustandsgrößen der relevanten Montagestationen in geeigneter Weise abzubilden und damit das Einsatzgebiet ganzheitlich zu erfassen (Anforderung 1). Obwohl es die QFD erlaubt die Betriebsmittel detaillierter darzustellen, erreicht auch die Nutzwertanalyse eine ausreichende Tiefe der Betrachtung (Anforderung 2). Hierzu liefert die monetäre Bewertung einen maßgebenden Anteil. Eine objektive Diskussionsgrundlage wird durch die QFD besser erfüllt (Anforderung 3). Durch die Aufspaltung der Betrachtung in zwei Ebenen kann objektiver diskutiert werden, da die direkten Auswirkungen der getroffenen Entscheidungen auf das Endergebnis nicht sofort erkennbar sind. Dies verringert jedoch die Handhabbarkeit der Methodik (Anforderung 5). Der Nutzen, der hierdurch erreicht wird, ist größer als der zusätzliche Aufwand einzuschätzen. Zusätzlich zu der erhöhten Objektivität werden hierdurch weitere Vorteile erzielt. Es wird die Möglichkeit geboten Zusammenhänge durch das Erarbeiten der Inhalte der Methodik zu erkennen, die durch einfache Literatur- und Internetrecherche deutlich schwieriger zu fassen gewesen wären. Damit wird zugleich auch eine Hilfestellung der Datenermittlung gegeben (Anforderung 4). Des Weiteren wird auch angenommen, dass durch die granulare Darstellung eine zukünftige Evaluierung erleichtert wird, da die Darstellung besser auf messbare Spezifikationen zurückgeführt werden können. Durch die

Entkoppelung der QFD-basierten Methodik können dann auch in zukünftigen Arbeiten weitgefasterer Alternativen zu einer gemeinsamen objektiven Bewertung zusammengefasst werden. Die Methodik bietet daher auch die geforderte nötige Flexibilität, Erweiterbarkeit und Anpassungsfähigkeit um in dem Umfeld hoher Unsicherheiten nachhaltig bestehen zu können (Anforderung 6). Die entwickelte QFD-basierte Methodik vereint somit eine relativ einfache Handhabung angelehnt an die Verknüpfung mit der Nutzwertanalyse in Matrix 2 und eine relativ geringe Subjektivität durch das Aufspalten in zwei Ebenen. Der Aufwand der QFD-basierten Methodik ist bei erster Anwendung größer als der der NWA-basierten, hält sich aber bei weiteren Anwendungen genauso in Grenzen wie bei der Nutzwertanalyse (Anforderung 5). Anhand dieser Betrachtung ist die QFD-basierte Methodik der NWA-basierten vorzuziehen.

7 Schlussbemerkungen

7.1 Zusammenfassung

Im Zuge von Industrie 4.0 wird Industrieunternehmen in Hochlohnländern Technologie geboten, um besser auf volatile und komplexer werdende Märkte reagieren zu können. Dies wird durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ermöglicht. Anhand dieser Technologien können in Zukunft an Produktionssystemen schnelle Anpassungen durchgeführt und eine Neuorganisation der Strukturen erreicht werden. Als zentral gilt hierfür der Einsatz sogenannter Cyber-Physikalischer Systeme (CPS). Solche Systeme nutzen IKT und ermöglichen damit eine hochgradige Vernetzung der physikalischen, sozialen und virtuellen Welt.

Da Montagesysteme am Ende der Wertschöpfungsketten und somit dem Markt am nächsten stehen, sind diese besonders von den skizzierten Herausforderungen betroffen. Montagesysteme zeichnen sich bis heute noch durch einen überwiegenden Anteil an manuellen Tätigkeiten aus. Daher wird mit dem Einsatz von CPS in der Montage ein besonders hohes Potential in Verbindung gebracht. Der Montagemitarbeiter wird dabei zunehmend durch technische Assistenzsysteme, wie kollaborierende Roboter und digitale Assistenzsysteme in Echtzeit unterstützt.

Der Übergang von konventionellen Produktionssystemen und den in diesen eingesetzten Technologien hin zu voll ausgereiften Cyber-Physikalischen Systemen wird durch eine langwierige und aufwendige Anfahrphase geprägt sein. Einen Anfang machen Insellösungen, wie die oben genannten Assistenzsysteme, aus. Neue Anwendungsgebiete, die CPS durch den Einsatz von IKT bieten, erschweren die Abschätzung des Nutzens solcher Produkte in der praktischen Anwendung. Aktuell zur Verfügung stehende Planungsmethodiken befassen sich mit der Umsetzung veränderungsfähiger Systeme auf Systemebene, aber schaffen den Bogen in die Praxis anhand von Bewertungsmöglichkeiten der einzusetzenden Betriebsmittel nicht.

Um diese Lücke zu schließen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode zur Bewertung von kollaborierenden Robotern auf Stations- bzw. Arbeitsebene (SA-Ebene) entwickelt. Diese Betriebsmittel stellen eben solche CPS-Insellösungen dar, die im Vergleich zu herkömmlich eingesetzten Robotern anderweitige Einsatzgebiete aufweisen. Kollaborierende Roboter können ohne Schutzzaun direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten, weisen eine einfache Programmierbarkeit auf, können durch ihr geringes Eigengewicht ortsflexibel eingesetzt werden und weisen geringere Anschaffungskosten als herkömmliche Alternativen auf. Dem stehen jedoch geringe Traglasten und Prozessgeschwindigkeiten im Gegensatz zu

konventionellen Robotern gegenüber. Diese Betrachtung auf SA-Ebene ermöglicht es erst, gezielt die Probleme, die Entscheidungsträger in Industrieunternehmen bei der Auswahl geeigneter Lösungen zur Umsetzung veränderungsfähiger Montagesysteme haben, zu adressieren.

Diese Aufgabenstellung wird anhand eines rationalen Problemlösungsprozesses erarbeitet. Die Problemstellung und der Kontext, in dem der Bedarf nach einer neu zu entwickelnden Methodik bestand, wurden anhand der Grundlagen der Montage und der Cyber-Physikalischen Systeme erarbeitet. Die Funktion der Montage, das Arbeitsumfeld in dem diese stattfindet, die dazu eingesetzten Betriebsmittel und die dafür nötige Infrastruktur wurden erarbeitet. Daraus ergaben sich Herausforderungen zukünftiger Anwendungen. Einerseits wurden montageseitig Leitsätze zukünftiger Produktion (reaktionsschnell, mengen- und variantenflexibel, grenzwertorientiert, selbstorganisiert, vernetzt, kulturbewusst und nachhaltig) und Lösungen (unter anderem Gliederung der Betriebsmittel in transportfähige, schnell auswechselbare, funktional selbstständige und vorgetestete Module; Organisation der Energie- und Medienanschlüsse über ein modulares, im Raster angeordnetes Versorgungssystem; digitale Werkerinformationssysteme) auf SA-Ebene identifiziert. CPS garantieren eben diese Ansprüche. Diese Eigenschaften macht sie zu radikalen Innovationen, die alle wichtigen Funktionsbereiche in Unternehmen beeinflussen. Diesen im Gegensatz zu konventionellen Betriebsmitteln deutlich erweiterten Kontext gilt es in einer geeigneten Bewertungsmethodik zu berücksichtigen. Diese Entwicklungen können anhand der erweiterten Eigenschaften kollaborierender Roboter in der Praxis beobachtet werden. Konkret wurden vier direkt konkurrierende Modelle im Detail analysiert, mit deren Hilfe eine für die Praxis relevante Methodik erstellt werden kann. Die betrachteten Produkte sind der LBR iiwa 7 der Firma KUKA, der UR 3 und UR 5 der Firma Universal Robots und der Sawyer der Firma Rethink Robotics.

Anhand dieser Erkenntnisse wurden sechs Anforderungen entwickelt mit deren Hilfe in der Literatur verfügbare Methodiken auf die Eignung hinsichtlich der vorliegenden Zielstellung untersucht werden können:

1. Ganzheitliche Darstellung des Einsatzgebietes
2. Ganzheitliche Darstellung der Betriebsmittel
3. Objektive Diskussionsgrundlage für Investitionsentscheidungen unterschiedlichster Alternativen
4. Hilfestellung der Datenermittlung
5. Einfache Handhabung
6. Flexibilität und Nachhaltigkeit

In Folge der Literaturrecherche wurden einzelne Methoden für eine Detailbetrachtung herausgefiltert. Dabei handelt es sich um das Life-Cycle-Costing im Zuge der Kapitalwertmethode, der statischen Amortisationsrechnung, der

Montagestückkostenkalkulation bzw. der Maschinenstundensatzrechnung, der Nutzwertanalyse (NWA), dem Quality Function Deployment (QFD) und der erweiterten Wirtschaftlichkeitsrechnung (EWR). Diese Vorgehensweisen ermöglichen eine duale Bewertung. Dabei werden monetäre Betrachtungen mit Nutzenbewertungen kombiniert. Erst durch diese Kosten/Nutzen-Integration lässt sich eine ganzheitliche Investitionsentscheidung treffen. Aus dieser Methodeneingrenzung wurden für die Entwicklung (zweiter Schritt des rationalen Problemlösungsprozesses) das Quality Function Deployment bzw. die Nutzwertanalyse in Kombination mit der Maschinenstundensatzrechnung herangezogen. Die zwei erstgenannten Methoden ermöglichen die Nutzenbewertung. Die NWA ist eine etablierte einfach handhabbare Methodik, die jedoch eine hohe Subjektivität aufweist. Die QFD ist ähnlich wie die NWA eine in Matrizenform aufgebaute Methodik, mit dem Vorteil, dass hier eine Erarbeitung eines Betrachtungsobjektes über mehrere zusammenhängende Ebenen durchgeführt werden kann. Dadurch bietet die QFD das Potenzial, die einfache Handhabbarkeit der NWA mit einer erhöhten Objektivität zu vereinen. Die Maschinenstundensatzrechnung musste aufgrund mangelnder Informationen gewählt werden. Dabei ist die Rede von den Energiekosten und Ersparnisse (in Geldeinheiten) gegenüber herkömmlichen Alternativen. Die Entwicklung der Nutzenbewertungsmethoden wurde parallel vorgenommen, um diese in der Validierung einer Analyse hinsichtlich Sinnhaftigkeit und Plausibilität der Ergebnisse und dem dabei benötigten Aufwand zu unterziehen. Im Zuge der Entwicklung wurde ein sieben Kriterien umfassender Zielgrößenkatalog und sieben zusammengefasste Spezifikationen kollaborierender Roboter erstellt:

Zielkatalog	Spezifikationen
1.) Häufig wechselnde Bewegungsabläufe inkl. Ortswechsel	1.) Hochauflösende Sensorik
2.) Hohe Reichweite	2.) Einfache Programmier- und Bedienbarkeit
3.) Integration komplexer und/oder wechselnder Systeme	3.) Multifunktionelle Gestaltung der mechanischen Schnittstelle
4.) Ausführung komplexer und/oder häufig wechselnder Bewegungsabläufe	4.) Hohe Reichweite
5.) Hohe Traglast	5.) Hohe Traglast
6.) Niedriger Programmier, Bedien- und Installationsaufwand	6.) Geringes Eigengewicht
7.) Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen auf engem Raum	7.) Hoher Bewegungsumfang

Im Zuge der Methodenentwicklung wurden Beziehungen zwischen diesen Dimensionen und den alternativen kollaborierenden Robotern entwickelt. Im Falle der NWA wurde in einer Phase die Erfüllung der Zielgrößen der unterschiedlichen Alternativen betrachtet. Im Falle der QFD wurden über zwei Phasen zuerst die Beziehungen zwischen den Zielgrößen und den Spezifikationen beleuchtet und dann die Erfüllung der zu bewertenden Produkte hinsichtlich der Spezifikationen. Die sich aus diesen Bewertungen ergebenden Nutzwerte werden mit den Ergebnissen der monetären Bewertung durch einen Index zusammengefasst und grafisch dargestellt.

In der dritten Phase des rationalen Problemlösungsprozesses folgt die Validierung. Diese wurde im Zuge der Arbeit anhand von drei entwickelten Szenarien durchgeführt, an denen die Durchführung der Methoden erprobt werden konnte. Die Szenarien wurden so gestaltet, dass vor der Methodendurchführung eine bestimmte Reihung der Produkte zufolge der Erkenntnisse aus der Grundlagenausarbeitung erwartet werden konnte. Dieser Weg musste eingeschlagen werden, da keine Bewertungen aus in der Praxis eingesetzten kollaborierenden Robotern recherchiert werden konnten, die als Validierungsrichtwerte dienen hätten können. Die gewonnenen Erkenntnisse veranschaulichten, dass der zusätzliche Aufwand für die Erstellung der QFD-Matrizen gegenüber der NWA-Matrix sich lohnt. Die Entkoppelung anhand der Zielgrößen/Spezifika- und Spezifika/Alternativen-Betrachtung lieferte andere als die erwarteten Ergebnisse. Anhand der Methodik wurden Zusammenhänge erkannt, die eine bloße Bewertung anhand der Erkenntnisse aus dem Grundlagenkapitel oder der NWA übersehen werden. Daraus ergibt sich das Ergebnis, dass die entwickelte 2-Phasen-QFD Methodik durchaus dem Anspruch einer erhöhten Objektivität gerecht wird. Dies erreicht die Methodik bei doppeltem Aufwand in der Erstanwendung. Sind die Beziehungsmatrizen erstellt ist der Aufwand der NWA und der QFD ident und entsteht durch die Übersetzung eines Anwendungsfalles in eine Gewichtung der Zielgrößen.

Die duale Bewertung lässt erkennen, wie wichtig die Kombination monetärere und Nutzenbetrachtungen sind. Der LBR iiwa, der das technisch ausgereifteste Produkt darstellt, und in zwei der Szenarien eine höchste Nutzenbewertung erreichte, wurde im Zuge der dualen Betrachtung immer an letzte Stelle gereiht. Erst bei einer erhöhten Gewichtung der Nutzenbewertung (75% Gewicht auf dem Nutzen und 25% Gewicht auf den Kosten) konnte dieses Modell zumindest in Szenario 1 wieder Rang 1 erreichen.

7.2 Ausblick

Eine SWOT⁴⁵-Analyse veranschaulicht die Stärken und Schwächen eines betrachteten Objektes und mögliche Chancen und Risiken. Entwickelt wurde die Methodik zur strategischen Ausrichtung von Unternehmen. An diesem Beispiel ausgedrückt, wird mit den ersten beiden Ausprägungen die interne Sicht auf das Unternehmen und mit den letzteren Ausprägungen die externe Sicht betrachtet. Bezüglich der entwickelten Methodik, werden die Stärken und Schwächen zusammengefasst, die die Methodik aufweist und die Chancen und Risiken, die bei der Anwendung entstehen und sich durch zukünftige Entwicklungen ergeben können (vgl. Tabelle 9). In der SWOT-Analyse werden diese Ausprägungen jeweils einander gegenübergestellt und daraus Maßnahmen abgeleitet. Es wird versucht anhand der Stärken die Chancen zu verstärken und Risiken zu minimieren und die Schwächen in Stärken zu wandeln oder Vorsichtsmaßnahmen abzuleiten.

Den Dargestellten Risiken und Schwächen muss im Zuge einer Evaluierung anhand eines Feldtestes begegnet werden. Dadurch müssen betriebsmittelseitig beispielsweise Bewegungsabläufe, die Programmierung, bereits integrierte Systeme (Bsp. Bildverarbeitungssysteme des Sawyer) und die Feinfühligkeit der Sensoren konkret untersucht werden. Neben dieser Analyse müssen die Zielgrößen auf ihre Eignung untersucht werden. Des Weiteren gilt es die Beziehungen zwischen den Spezifikationen und den Zielgrößen sowie zwischen den Spezifikationen und der Erfüllung der unterschiedlichen Alternativen zu untersuchen. Einen besonders kritischen Aspekt stellt die Übersetzung des Anwendungsfalles auf die Gewichtung der Zielgrößen dar.

⁴⁵ SWOT steht für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken). Siehe hierzu UR: <https://de.wikipedia.org/wiki/SWOT-Analyse>.

Tabelle 9: Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der entwickelten Methodik im Zuge einer SWOT-Analyse

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diskussionsgrundlage (Rückverfolgbarkeit der Daten möglich; interne/externe Grundlage, also im Team und mit Anbietern) • Objektiv (Berücksichtigung der technischen Spezifikationen → Rückführung auf messbare Größen) • Ganzheitliche Betrachtung (monetär, Nutzen) • Erweiterbarkeit (auf andere Betriebsmittel, weitgefassere Alternativen, andere Betrachtungsebenen) • Hilfestellung zur Datenermittlung (zentralen Punkte in möglichst kurzer Zeit) • Komplexere Zusammenhänge erkennen 	<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufwand bei Erstanwendung (gering bei Folgeanwendung) • Komplexe Darstellung (nicht so leicht nachvollziehbar, bringt Unsicherheit der Ergebnisse) • Übersetzung von Anwendungsfällen auf Gewichtung der Zielgrößen (bietet subjektiven Spielraum) • Statische monetäre Bewertung (keine Lebenszykluskostenbetrachtung) • Noch nicht evaluiert
<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Methodik hat gute Chancen auf Anwendung, wenn es weiterhin in Industrie 4.0 schwierig ist den Nutzen von CPS aufzuzeigen. • Anwendung durch Unternehmensberater (Aufwandverringering zufolge einer Erstanwendung und mehrerer Folgebewertungen) • Wenn sich weitere Einsatzgebiete ergeben: Chance eines Entwicklungsbaukasten und Evaluierung durch Vergleich verschiedenster Anwendungen einer Community 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Methodik verliert Nutzen, wenn die Vernetzung in Industrie 4.0 es schafft den Nutzen von CPS einfacher und mit höherer Sicherheit darzustellen • Anwendung durch ungeschulte (in QFD und den Betriebsmitteln) Personen → Probleme: hoher Aufwand, keine ausreichende Differenzierung erzielen bis hin zu falsche Schlüsse ziehen (Subjektivität)

Neben der Evaluierung, die Unsicherheiten beseitigt und die Methodik erst für die Praxis einsetzbar macht, gilt es in zukünftigen Arbeiten die monetäre Bewertung anhand zu ermittelnder Unternehmensdaten (Richtwerte) auf Lebenszyklusbetrachtungen im Zuge einer dynamischen Investitionsrechnung zu erweitern. Damit wird nicht nur eine ganzheitlichere und nachhaltigere wirtschaftliche Bewertung ermöglicht sondern, kann die Bewertung auf Alternativen jeglicher Art erweitert werden.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise – Ziele (links) und eingesetzte Methoden (rechts) der jeweiligen Kapitel	7
Abbildung 2: Gliederung der Fertigungsgruppe Fügen (DIN 8593)	9
Abbildung 3: Teilfunktionen des Handhabens (VDI 2860)	11
Abbildung 4: Teilfunktionen einer Montagestation (Wiendahl et al. 2009, S. 163).....	12
Abbildung 5: Teilfunktionen einer Montagestation – Anpassungen Wiendahl et al.'s Ausführung.....	13
Abbildung 6: Kontext und Bestimmungsgrößen einer Arbeitsstation (Wiendahl et al. 2009, S. 155).....	14
Abbildung 7: Neue Einordnung von Montagesystemen nach (Auerbach et al. 2011, S. 198).....	23
Abbildung 8: KUKA LBR iiwa Produktdarstellung: Bild link – Übersicht Robotersystem: 1) Verbindungsleitung, 2) Bedienhandgerät KUKA smartPAD, 3) Manipulator, 4) Verbindungsleitung, 5) Robotersteuerung KUKA Sunrise Cabinet; Bilder mitte – Hauptgruppen und Roboterachsen: 1) Zentralhand, 2) Gelenkmodul, 3) Grundgestell; KUKA Sunrise.OS am KUKA smartPAD (Bilder aus den Hersteller-Spezifikationen oder von der KUKA Internetseite).....	35
Abbildung 9: UR-Reihe Produktdarstellung: Bild links oben – Darstellung des UR3; Bild rechts – Transport des UR5 und des zugehörigen Steuerungsgerätes; Bild links unten – Beispielhafte Darstellung des Bedienhandgerätes und der Bedienoberfläche ²³	37
Abbildung 10: Sawyer Produktdarstellung: Bild links – Darstellung des Sawyers; Bild in der Mitte – Transport des Sawyers und Transportsockel ³¹ ; Bild rechts – verschiedene Ausdrucksformen des Sawyers ³²	39
Abbildung 11: Einteilung von Bewertungsmethoden	47
Abbildung 12: Eignung der betrachteten Methoden anhand der definierten Anforderungen („+“ hohe Erfüllung, „o“ mittelmäßige Erfüllung, „-“ geringe Erfüllung)	55
Abbildung 13: Konzept der Bewertungsmethodik	59
Abbildung 14: Systemdarstellung koll. Roboter in einer Montagestation	60
Abbildung 15: Matrix 1 – Übersichtsdarstellung (obere Darstellung) und Detaildarstellung (untere Darstellung)	69
Abbildung 16: Matrix 2 (oben) und eine analog durchgeführte Nutzwertanalyse (unten).....	75
Abbildung 17: Verknüpfung der monetären und multikriteriellen Bewertung	77
Abbildung 18: Gewichtung der Anforderungen zufolge Szenario 1	79

Abbildung 19: Parallele Durchführung der QFD-Methodik und der Nutzwertanalyse in Szenario 1	81
Abbildung 20: Gewichtung der Anforderungen zufolge Szenario 2	82
Abbildung 21: Parallele Durchführung der QFD-Methodik und der Nutzwertanalyse in Szenario 2	84
Abbildung 22: Gewichtung der Anforderungen zufolge Szenario 3	85
Abbildung 23: Parallele Durchführung der QFD-Methodik und der Nutzwertanalyse in Szenario 3	87
Abbildung 24: Monetäre Bewertung in Szenario 1	88
Abbildung 25: Endbewertung – Graphische Darstellung (oben); Tabellarische Darstellung (Mitte – Gleichgewichtung; unten – Ungleichgewichtung)	89
Abbildung 26: Eignung der entwickelten Methode anhand der definierten Anforderungen („+“ hohe Erfüllung, „o“ mittlere Erfüllung, „-“ geringe Erfüllung)	90

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Montagefunktion – Sonderoperation nach Lotter (2012a, S. 2)	8
Tabelle 2: Fabrikobjekte ersten Grades und ihr Bezug zur Arbeitsstationsebene nach (Wiendahl et al. 2009, S. 135); Bei den Werten in der Klammer steht T für Technik, O für Organisation und R für Raum.....	16
Tabelle 3: Gestaltungsmöglichkeiten von Montagesystemen.....	18
Tabelle 4: Aktuell am Markt erhältliche kollaborierende Roboter – basierend auf (Bélanger-Barrette 2015a); die hochgestellten Zahlen der Modellbezeichnungen weisen auf die Art des Roboters hin – 1) Zweiarmroboter; 2) Zweiarmroboter inkl. Fahrsystem; 3) Einarmroboter; 4) Einarmroboter inkl. Fahrsystem; 5) SCARA; 6) Kartesischer Roboter	30
Tabelle 5: Detaillierte Darstellung der technischen Spezifikationen gewählter kollaborierender Roboter	39
Tabelle 6: Für die Zielstellung dieser Arbeit als geeignet identifizierte Methoden	50
Tabelle 7: Zielkatalog und Erläuterungen	65
Tabelle 8: Gewichtungshinweise für die Größen des Zielkatalogs	70
Tabelle 9: Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der entwickelten Methodik im Zuge einer SWOT-Analyse	97

10 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
CPMS	Cyber-Physikalisches Montagesystem
CPS	Cyber-Physikalisches System
EWR	erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung
HoQ	House of Quality
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
inkl.	inklusive
k.A.	keine Angabe
LCC	Life-Cycle-Costing
NWA	Nutzwertanalyse
ROS	Roboterbetriebssystem
SA-Ebene	Stations- bzw. Arbeitsplatzebene
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche

11 Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard; Reinhart, Gunther (2011): Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser Verlag.
- Adami, Wilfried; Lang, Christa; Pfeiffer, Sabine; Rehberg, Frank (Hg.) (2008): Montage braucht Erfahrung. Erfahrungsbasierte Wissensarbeit in der Montage. 1. Auflage. München: Rainer Hampp Verlag. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/68588>.
- Akao, Yoji (1988): QFD - Quality Function Deployment. Wie die Japaner Kundenwünsche in Qualität umsetzen. Unter Mitarbeit von Günter Liesegang. Landsberg: verlag moderne industrie.
- Arentzen, Ute (Hg.) (1995): Gabler Wirtschafts-Lexikon. 13., vollst. überarb. Aufl., Nachdr. 1995, ungekürzte Wiedergabe der Orig.-Ausg. 1992. Wiesbaden: Gabler.
- Auerbach, Thomas; Bauhoff, Fabian; Beckers, Marion; Behnen, Daniel; Brecher, Christian; Brosze, Tobias et al. (2011): Selbstoptimierende Produktionssysteme. In: Christian Brecher (Hg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 747–1057.
- Bauernhansl, Thomas (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 5–35.
- Becker, Jörg; Rosemann, Michael; Schütte, Reinhard (1995): Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. In: *Wirtschaftsinformatik* 37 (5), S. 435–445.
- Bélanger-Barrette, Mathieu (2015a): Collaborative Robot eBook. Robotiq, zuletzt aktualisiert am 15.10.2015.
- Bélanger-Barrette, Mathieu (2015b): Universal Robots' UR3 VS Sawyer from Rethink Robotics. Online verfügbar unter <http://blog.robotiq.com/universal-robots-ur3-vs-rethink-robotics-sawyer>, zuletzt aktualisiert am 09.04.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- VDI 2884, Dezember 2005: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC), zuletzt geprüft am August 2012.

- Bibliographisches Institut GmbH (Hg.): Duden. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/Aktuator>, zuletzt geprüft am 12.11.2015.
- Bildstein, Andreas; Seidelmann, Joachim (2014): Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 581–597.
- Bonev, Ilian (2014a): What is so special about the robot arms of Universal Robots? Online verfügbar unter <http://coro.etsmtl.ca/blog/?p=225>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2014, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Bonev, Ilian (2014b): Should we fence the arms of Universal Robots? Online verfügbar unter <http://coro.etsmtl.ca/blog/?p=299>, zuletzt aktualisiert am 07.04.2014, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Brieke, Michael (2009): Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung. Dissertation. Leibniz-Universität Hannover, Hannover. Instituts für Fabrikanlagen und Logistik.
- Bullinger, Hans-Jörg (1994): Einführung in das Technologiemanagement. Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. Stuttgart: Teubner (Technologiemanagement).
- Carnevali, José Antonio; Miguel, Paulo Augusto Cauchick; Calarge, Felipe Araújo (2010): Axiomatic design application for minimising the difficulties of QFD usage. In: *International Journal of Production Economics* 125 (1), S. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.01.002.
- Chan, Lai-Kow; Wu, Ming-Lu (2002): Quality function deployment: A literature review. In: *European Journal of Operational Research* 143, S. 463–497.
- Crossan, Mary M.; Apaydin, Marina (2010): A Multi-Dimensional Framework of Organizational Innovation. A Systematic Review of the Literature. In: *Journal of Management Studies* 47 (6), S. 1154–1191. DOI: 10.1111/j.1467-6486.2009.00880.x.
- Dierig, Carsten (2015): Wenn der Roboter beim Abwasch hilft. Online verfügbar unter <http://www.welt.de/wirtschaft/article139728735/Wenn-der-Roboter-beim-Abwasch-hilft.html>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Eßer, Gerd (2015): Soziotechnisches Potenzial cyber-physischer Systeme. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (3), S. 142–144.
- DIN 8593, Sept 2003: Fertigungsverfahren Fügen.
- Geisberger, Eva; Broy, Manfred Hans Bertold; Cengarle, María Victoria; Keil, Patrick; Niehaus, Jürgen; Thiel, Christian; Thönnißen-Fries, Hans-Jürgen (2012): > agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical

- Systems. Hg. v. Eva Geisberger und Manfred Hans Bertold Broy. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. München, Berlin (acatech Studie).
- Granstrand, Ove (2000): The economics and management of intellectual property. Towards intellectual capitalism. Paperback ed. Cheltenham: Edward Elgar.
- Guizzo, Erico: Rethink Robotics' Sawyer Goes on Sale, Rodney Brooks Says 'There May Be More Robots'. Online verfügbar unter <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/rethink-robotics-sawyer-robots>, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Guizzo, Erico (2015): Universal Robots Wants to Conquer the Universe (of Robotic Arms). Online verfügbar unter <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/universal-robots>, zuletzt aktualisiert am 12.03.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Guizzo, Erico; Ackerman, Evan (2012): How Rethink Robotics Built Its New Baxter Robot Worker. Online verfügbar unter <http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/rethink-robotics-baxter-robot-factory-worker>, zuletzt aktualisiert am 18.09.2012, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Hagerty, James R. (2015): Meet the New Generation of Robots for Manufacturing. The Wall Street Journal. Pittsburgh. Online verfügbar unter <http://www.wsj.com/articles/meet-the-new-generation-of-robots-for-manufacturing-1433300884>, zuletzt aktualisiert am 02.06.2015, zuletzt geprüft am 12.11.2015.
- Hall, Karl (2002): Ganzheitliche Technologiebewertung. Ein Modell zur Bewertung unterschiedlicher Produktionstechnologien. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag (Techno-ökonomische Forschung und Praxis). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-08516-4>.
- Hartel, Marko; Lotter, Bruno (2012): Planung und Bewertung von Montagesystemen. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 365–388.
- Hauschildt, Jürgen; Salomo, Sören (2011): Innovationsmanagement. 5., überarb., erg. und aktual. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10602052>.
- Heger, Christoph Lutz (2007): Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Univ., Diss.--Hannover, 2006. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum (Berichte aus dem IFA, 2007,1).

- Hernández Morales, Roberto (2003): Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Univ., Diss.--Hannover, 2002. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, 149).
- Herrmann, Christoph (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin: Springer (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10358567>.
- Hesse, Stefan (2012a): Automatische Montagemaschinen. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 195–272.
- Hesse, Stefan (2012b): Montagegerechte Produktgestaltung. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 9–48.
- Heubach, Daniel (2009): Eine funktionsbasierte Analyse der Technologierelevanz von Nanotechnologie in der Produktplanung. Univ., Diss.--Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter (IPA-IAO Forschung und Praxis, 478).
- Hevner, Alan R.; March, Salvatore T.; Park, Jinsoo; Ram, Sudha (2004): Design Science in Information Systems Research. In: *MIS Quarterly* 28 (1), S. 75–105.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2015): Entwicklungsperspektiven von Produktionsarbeit. In: Alfons Botthof und Ernst Andreas Hartmann (Hg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 89–98.
- Hoffmeister, Wolfgang (2008): Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse. Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen. 2., überarb. Aufl. Berlin: BWV Berliner Wiss.-Verl. Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3084642&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- Höft, Uwe (1992): Lebenszykluskonzepte. Grundlage für das strategische Marketing- und Technologiemanagement. Freie Univ., Diss.--Berlin. Berlin: E. Schmidt (Technological Economics, 46).
- DIN EN ISO 8373, Aug 1996: Industrieroboter - Wörterbuch, zuletzt geprüft am Aug 2012.
- Kaiser, Arvid (2014): Wie sicher sind kollaborative Roboter in der Industrie - manager magazin. Online verfügbar unter <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/industrie/wie-sicher-sind-kollaborative-roboter-in-der-industrie-a-995806.html>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2014, zuletzt geprüft am 01.01.2016.

- Karl, Florian (2014): Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln. Dissertation. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb).
- Klein, Robert; Scholl, Armin (2004): Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH (2014): Preferred-Partner-Award verliehen - Universal Robots zeichnet erfolgreichste Vertriebspartner aus - Konradin Verlag. Online verfügbar unter http://www.automationspraxis.de/news/-/article/33568397/39023656/Universal-Robots-zeichnet-erfolgreichste-Vertriebspartner-aus/art_co_INSTANCE_0000/maximized/, zuletzt aktualisiert am 10.02.2014, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Larson, Andy (2013): Universal Robots: Top 10 FAQs. Online verfügbar unter <http://cross-automation.com/blog/universal-robots-top-10-faqs>, zuletzt aktualisiert am 28.02.2013, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Lotter, Bruno (2012a): Einführung. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch der Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 1–8.
- Lotter, Bruno (2012b): Manuelle Montage von Großgeräten. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch der Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 147–165.
- Lotter, Bruno (2012c): Manuelle Montage von Kleingeräten. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 109–146.
- Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hg.) (2012a): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (2012b): Zusammenfassung. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 485–489.
- Lotter, Edwin (2012d): Hybride Montagesysteme. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 167–193.
- March, Salvatore T.; Smith, Gerald F. (1995): Design and natural science research on information technology. In: *Decision Support Systems* 15, S. 251–266.

- März, Lothar; Langsdorff, Philipp von (2001): Flexibilität und Marktorientierung in der Montage. In: Engelbert Westkämper, Hans-Jörg Bullinger, Péter Horváth und Erich Zahn (Hg.): Montageplanung — effizient und marktgerecht. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 3–10.
- McCall, Mette (2015): Universal Robots Launches UR3—The World’s Most Flexible, Light-Weight Table-Top Robot to Work Alongside Humans. Online verfügbar unter <http://www.reuters.com/article/universal-robots-idUSnBw175250a+100+BSW20150317#VzzZsuhc34l2zl6c.97>, zuletzt aktualisiert am 17.03.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- VDI 2860, Mai 1990: Montage- und Handhabungstechnik, Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.
- Müller, Stefan (2008): Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Techn. Univ., Diss.--München, 2007. München: Utz (IWB Forschungsberichte, 209).
- Müller-Dauppert, Bernd (2014): Erfolgsfaktoren integrierter Produktion & Logistik 2014. Miebach Consulting GmbH. Frankfurt am Main.
- Naumann, Martin; Fechter, M. (2015): Robots as enablers for changeability in assembly applications. In: Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Jochen Wiedemann (Hg.): 15. Internationales Stuttgarter Symposium. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Proceedings), S. 1155–1171.
- Pachow-Frauenhofer, Julia (2012): Planung veränderungsfähiger Montagesysteme. Univ., Diss.--Hannover, 2012. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum (Berichte aus dem IFA, 2012,1).
- Pawellek, Günther (2008): Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-78403-6>.
- Regius, Bernd von (2006): Qualität in der Produktentwicklung. Vom Kundenwunsch bis zum fehlerfreien Produkt. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446405295>.
- Roberts, Edward B. (1988): Managing Invention and Innovation. In: *Research Technology Management* 31 (1), S. 11–29.
- Saatweber, Jutta (2011): Kundenorientierung durch Quality Function Deployment. Produkte und Dienstleistungen mit QFD systematisch entwickeln. 3., vollst. überarb. Aufl. Düsseldorf: Symposion Publ.

- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05459-4>.
- Schinnerl, Wolfgang (17.12.2015): Application-Engineer bei KUKA Roboter CEE GmbH, Gruberstraße 2-4, 4020 Linz, Austria - Telefoninterview.
- Schlaak, Thomas M. (1999): Der Innovationsgrad als Schlüsselvariable. Perspektiven für das Management von Produktentwicklungen. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag (Betriebswirtschaftslehre für Technologie und Innovation, 31). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-08355-9>.
- Schürmann, Hans (2014): Mittelstand entdeckt Roboterlösungen. Hg. v. VDI Nachrichten. Online verfügbar unter <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Mittelstand-entdeckt-Roboterloesungen>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2014, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- DIN EN ISO 13849-1, Dez 2008: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze.
- Soder, Johann (2014): Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 85–102.
- Spath, Dieter (Hg.) (2004): Forschungs- und Technologiemanagement. Potenziale nutzen - Zukunft gestalten. München: Hanser.
- Spath, Dieter (Hg.) (2013): Zukunftsfähige Montagesysteme. Wirtschaftlich, wandlungsfähig und rekonfigurierbar. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Spillner, Rüdiger (2015): Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion. Techn. Univ., Diss.--München, 2014. München: Utz Herbert (Forschungsberichte IWB, 296).
- Steinwender, Arko (2007): Kundenorientierte Produkt- und Variantenplanung in der Produktentwicklung mit Hilfe von QFD. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, Wien. Institut für Managementwissenschaften E330, Betriebstechnik und Systemplanung. Online verfügbar unter <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC06043763>, zuletzt geprüft am 06.12.2015.
- Tobe, Frank (2015a): ABB launches YuMi and acquires gomTec. Roboticstomorrow. Online verfügbar unter

- <http://www.roboticstomorrow.com/article/2015/04/abb-launches-yumi-and-acquires-gomtec/5919>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2015, zuletzt geprüft am 16.11.2015.
- Tobe, Frank (2015b): Danish co-bot maker Universal Robots sells for \$350 million | Robohub. Online verfügbar unter <http://robohub.org/danish-co-bot-maker-universal-robots-sells-for-350-million/>, zuletzt aktualisiert am 13.05.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Tschirky, H. (1998): Konzept und Aufgaben des Integrierten Technologie-Managements. Vorlesungsskript. ETH, Zürich. BWI.
- Vogel Business Media GmbH & Co. KG (2015a): Arbeitssicherheit bei der Mensch-Maschine-Kollaboration. Vogel Business Media GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/betriebstechnik/arbeitschutz_umweltschutz/articles/473552/, zuletzt aktualisiert am 30.01.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Vogel Business Media GmbH & Co. KG (2015b): Fanuc öffnet grüne Roboterwelt. Vogel Business Media GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/montage-handhabung-robotik/articles/485721/>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Vogel Business Media GmbH & Co. KG (2015c): Teradyne übernimmt Universal Robots. Vogel Business Media GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/montage-handhabung-robotik/articles/489288/>, zuletzt aktualisiert am 13.05.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2016.
- Wiendahl, Hans-Peter (2002): Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: *wt Werkstatttechnik online* 92 (4), S. 122–127.
- Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2009): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Wieringer, Roel (2009): Design Science as Nested Problem Solving. In: Vijay Vaishanvi (Hg.): Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology. New York, NY: ACM.
- Zäh, Michael F.; Werner, J.; Prasch, M. (2006): Changeable Means of Production. In: Engelbert Westkämper (Hg.): First CIRP International Seminar on Assembly Systems, November 15 - 17, 2006. Stuttgart, S. 33–38.

DIN EN 60300-3-3, September 2014: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten (IEC 56/1549/CD:2014), zuletzt geprüft am März 2015.