

**Analyse und Bewertung zukünftiger Einsatzgebiete von  
Assistenzrobotern in produzierenden Unternehmen**

Masterthesis im Studiengang  
**Wirtschaftsingenieurswesen (M.Sc.)**

an der NORDAKADEMIE gemeinnützige AG,  
private Hochschule der Wirtschaft,  
in 25337 Elmshorn,

vorgelegt von

**B. Sc. Katrin Berger**  
Wachtelweg 2  
27576 Bremerhaven  
MWING14o - 6618  
Tel: 0471/48146191

Erstgutachter: Dipl.-Inf. Björn-Helge Busch  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Ahrens

Bearbeitungszeitraum: 18.04.2016 bis 19.09.2016



NORDAKADEMIE GRADUATE SCHOOL

## *Zusammenfassung*

Nordakademie - Graduate School

Master of Science (M.Sc)

### **Analyse und Bewertung zukünftiger Einsatzgebiete von Assistenzrobotern in produzierenden Unternehmen**

von Katrin BERGER

Assistenzroboter befinden sich in einem frühen Stadium ihrer Entwicklung und industriellen Reife. Sie sind eine neue Generation der Robotertechnologie, die vor allem dort Anwendungsmöglichkeiten erbringen, wo eingezäunte Industrieroboter begrenzte Fähigkeiten besitzen. In den vergangenen Jahren ist die Entwicklung und Forschung soweit vorangeschritten, dass kooperierende Arbeitssysteme zwischen dem Menschen und einer Maschine heute möglich sind. Mit dem gegenwärtigen Forschungsstand können Assistenzroboter als Assistent des Mitarbeiters oder für automatisierte Arbeitsprozesse eingesetzt werden. Für eine Erweiterung der Anwendungsszenarien, arbeiten Technologiezentren an die Umsetzung eines autonomen und intelligent agierenden Roboters. Dabei fördert die Politik zusätzlich die noch zu klarenden Fragestellungen hinsichtlich IT-Sicherheitsstandards und der Entwicklung von Softwarearchitekturmodellen. Im Zuge der industriellen Entwicklung nehmen Assistenzroboter eine wesentliche Bedeutung ein. Mit ihnen wird nicht nur der Automatisierungsgrad erweitert, sondern auch gleichzeitig zusätzliche Möglichkeiten der Digitalisierung für eine selbst-organisierende Produktionsplanung und -steuerung geschaffen. Aus diesem Grund ist das Interesse, in dieser neuen Technologie weiter zu forschen und zu entwickeln, gegeben.

Die vorliegende Arbeit analysiert und bewertet die Einsatzmöglichkeiten von Assistenzrobotern, um für Unternehmen eine Handlungsempfehlung für eine zukünftig Implementierung von Assistenzroboterlösungen auszusprechen. Im ersten Teil der Arbeit wird eine Sachstandserhebung der technischen und informationstechnischen Funktionsweisen und der heute bestehenden ganzheitlichen Anwendungsmöglichkeiten von Assistenzrobotern vorgenommen. Daraus werden die wesentlichen Funktionsweisen und der Nutzen für die Produktion eines Assistenzroboters abgeleitet. Im zweiten Teil der Arbeit werden auf Basis einer SWOT-Analyse die zukünftigen Chancen und Risiken einer Investition in Assistenzroboterlösungen bewertet und daraus Handlungsstrategien für Unternehmen abgeleitet. In Verbindung beider Teilergebnisse wird abschließend eine Handlungsempfehlung für produzierende Unternehmen gegeben.



## *Danksagung*

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich bei all denjenigen zu bedanken, die mich in den vergangenen Monaten bei der Erstellung der Masterthesis unterstützt und motiviert haben.

An erster Stelle möchte ich mich außerordentlich bei meinem Betreuer Herrn Busch für die sehr gute Unterstützung und das fachliche Interesse meiner Arbeit bedanken. Die wegweisenden Anregungen zu Beginn sowie die konstruktive Kritik motivierten mich bei der Ausarbeitung der einzelnen fachlichen Themen. Herzlichen Dank dafür.

Mein Dank gilt auch meinem Teamleiter Wilfried und meinen Kollegen, die mir in der Zeit der Masterarbeit ihre berufliche Unterstützung gaben und zur jeder Zeit Verständnis zeigten. Ebenfalls danke ich meinen Kollegen Gabi und Christian für die fachlichen Diskussionen und hilfreichen Anregungen zum Thema der Arbeit.

Einen besonderen Dank gilt meinen Freundinnen, Isabel und Lisa, für ihren Rückhalt. Jona danke ich für die vielen Gespräche zur Ausarbeitung der Arbeit. Die gegenseitige Hilfestellung während des Studiums haben mich stark voran gebracht.

Für den seelische Beistand und das Vertrauen gilt ein besonderer Dank an meine Familien und meinem Freund, Marco. Ihr habt mich, wann immer es notwendig war, unterstützt, aufgebaut und mir Ruhe und Kraft gegeben, die dieses Studium erforderte. Dafür, dass ich mich immer auf euch verlassen konnte, danke ich euch herzlich. Widmen möchte ich diese Arbeit meinem Opa und meinem Papa, die uns zu früh verlassen mussten.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>i</b>
<b>Danksagung</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Akronyme</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Eingrenzung des Untersuchungsfeldes . . . . .	4
1.2 Forschungsfrage . . . . .	5
1.3 Vorgehensweise . . . . .	6
<b>2 Grundlagen für die Betrachtung von Assistenzrobotern</b>	<b>7</b>
2.1 Der Begriff Assistenzroboter . . . . .	7
2.2 Fähigkeiten eines Assistenzroboters . . . . .	11
2.2.1 Autonomie . . . . .	11
2.2.2 Lernfähigkeit . . . . .	12
2.2.3 Rationalität . . . . .	14
2.2.4 Intelligenz . . . . .	14
2.2.5 Kontext-sensitives Kooperieren und adaptives Verhalten . . . . .	15
<b>3 Situationsanalyse der heutigen Technik von Assistenzrobotern</b>	<b>17</b>
3.1 Technische Grundlagen . . . . .	18
3.1.1 Software-Architektur . . . . .	19
3.1.1.1 Planungsbasierte Architekturen . . . . .	19
3.1.1.2 Subsumtionsarchitektur . . . . .	20
3.1.1.3 Hybride Architektur . . . . .	20
3.1.2 Hardware-Komponenten . . . . .	21
3.1.2.1 Externe Sensoren . . . . .	22
3.1.2.2 Interne Sensoren . . . . .	24
3.1.2.3 Aktuatoren . . . . .	26
3.1.2.4 Sensorische Herausforderungen in der Robotik . . . . .	26

3.1.3	Lösungen für Navigationssysteme . . . . .	28
3.1.3.1	Lokalisierung basierend auf Wahrscheinlichkeitsverfahren . . . . .	28
3.1.3.2	Lokalisierung basierend auf Signalen . . . . .	30
3.1.4	Software für die Robotersteuerung . . . . .	31
3.1.4.1	Middleware und Interoperabilität für kohärente Systeme . . . . .	31
3.1.4.2	Zukünftige Softwareeigenschaften . . . . .	34
3.1.5	Multimodale Kommunikation . . . . .	37
3.1.6	Programmierung durch Vormachen . . . . .	38
3.2	Rahmenbedingungen für eine sichere Kooperation . . . . .	39
3.2.1	Relevante Normen für kooperierende Roboter . . . . .	40
3.2.2	Anforderungen an kooperierende Roboterapplikationen . . . . .	42
3.2.2.1	Sicherheitstechnische Anforderungen . . . . .	42
3.2.2.2	Ergonomische Anforderungen . . . . .	43
3.2.2.3	Arbeitsorganisatorische und arbeitsmedizinische Anforderungen . . . . .	43
3.2.2.4	Biomechanische Anforderungen . . . . .	44
3.2.3	IT - Sicherheit . . . . .	45
3.3	Anwendungsbeispiele des Einsatzes von Assistenzrobotern in der Industrie . . . . .	46
3.3.1	Assistenzlösungen aus dem Bereich Forschung und Entwicklung . . . . .	46
3.3.1.1	Lisa . . . . .	47
3.3.1.2	Care-O-Bot 4 . . . . .	47
3.3.1.3	Mantis . . . . .	49
3.3.2	Verfügbare Assistenzlösungen aus der Roboterindustrie . . . . .	50
3.3.2.1	iiwa LBR . . . . .	50
3.3.2.2	Sawyer . . . . .	51
3.3.2.3	YuMi . . . . .	52
3.3.2.4	URx-Roboter . . . . .	53
3.3.2.5	CR-35iA . . . . .	53
3.3.3	Integrierte Assistenzroboter in produzierenden Unternehmen . . . . .	54
3.3.3.1	Luftfahrtindustrie . . . . .	54
3.3.3.2	Automobilindustrie . . . . .	55
3.3.3.3	Elektroindustrie . . . . .	56
3.4	Zwischenergebnis zum heutigen Stand der Technik . . . . .	57
<b>4</b>	<b>SWOT-Analyse</b>	<b>61</b>
4.1	Erläuterung der SWOT-Analyse . . . . .	61
4.2	Umfeldperspektive . . . . .	63
4.2.1	Ökonomische Einflüsse . . . . .	63
4.2.2	Technologische Einflüsse . . . . .	65
4.2.3	Sozio-kulturelle Einflüsse . . . . .	67
4.2.3.1	Demographischer Wandel . . . . .	68
4.2.3.2	Wandel der Arbeitsinhalte . . . . .	69
4.2.3.3	Ethische Verantwortung . . . . .	70
4.2.4	Rechtlich-politische Einflüsse . . . . .	72
4.2.5	Chancen-Risiken Profil der Umfeldanalyse . . . . .	74
4.3	Unternehmensperspektive . . . . .	75
4.3.1	Stärken . . . . .	75

4.3.1.1	Sicherung der Arbeitspakete in Hochlohnländern durch Sen- kung der Produktionskosten . . . . .	76
4.3.1.2	Flexibilität / Qualitätssteigerung / Präzision . . . . .	77
4.3.1.3	Neugestaltung der Produktionslinien . . . . .	77
4.3.1.4	Automatisierung als Basis der Digitalisierung . . . . .	77
4.3.2	Schwächen . . . . .	79
4.3.2.1	Abhängigkeit zum Lieferanten . . . . .	79
4.3.2.2	Schwächung der Wettbewerbsintensität . . . . .	80
4.4	Normstrategien der SWOT-Analyse . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Handlungsempfehlung für den Einsatz von Assistenzrobotern in produzierenden Bereichen</b>	<b>83</b>
5.1	Diskussion - Funktionsweise und Nutzen . . . . .	83
5.2	Forschungsbedarf . . . . .	86
5.3	Handlungsstrategien . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>93</b>
<b>A</b>	<b>Anhangverzeichnis</b>	<b>95</b>
A.1	Auflistung aller relevanten Normen und Richtlinien für die Herstellung und An- wendung kooperierender Roboter . . . . .	95
A.2	Grenzwerte der einwirkenden Kraft und des Druckes . . . . .	96
A.3	Lisa - Steuerungssystem . . . . .	97
A.4	MANTIS - Sensoraufbau . . . . .	98
A.5	Technische Daten der Assistenzroboter: iiwa, Sawyer, YuMi, CR-35iA . . . . .	99
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>101</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b>		<b>115</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung einer intelligenten Fabrik . . . . .	2
1.2	Zukünftig etablierte Assistenzsysteme in der Automobilbranche . . . . .	3
2.1	Formen der Assistenz eines Roboters . . . . .	10
2.2	Eigene Darstellung: Fähigkeiten eines Assistenzroboters . . . . .	11
2.3	Kontextsensitive Wahrnehmung eines Agentens . . . . .	16
3.1	Eigene Darstellung: Allgemeines Arbeitssystem eines Assistenzroboters . . . . .	18
3.2	Beispiel einer planungsbasierten Aktionsgenerierung . . . . .	19
3.3	Beispiel einer Subsumtionsarchitektur nach Brooks . . . . .	20
3.4	Beispiel der Hybriden-Software-Architektur am Care-O-bot II . . . . .	21
3.5	Eigene Darstellung: Taxonomie der Sensoren eines Assistenzroboters . . . . .	22
3.6	Aufnahme dreidimensionaler Punktekarte mit Kamera . . . . .	23
3.7	Schematische Darstellung der parallelen Kraft-/ Positionsregelung . . . . .	25
3.8	Sandia Hand . . . . .	27
3.9	Ebenen der Interoperabilität . . . . .	32
3.10	Semantic Web . . . . .	33
3.11	Entwicklung eines Datenhandschuhs bei Siemens . . . . .	39
3.12	Darstellung einer Kollisionsfolge zwischen Oberarm und Roboterteil . . . . .	44
3.13	Ganzheitliche Lösungsansätze aus dem Bereich Forschung und Entwicklung: a) Lisa, b) Care-O-Bot 4, c) Mantis . . . . .	46
3.14	Auf dem Markt verfügbare Assistenzroboter: a) iiwa Leichtbauroboter, b) Sawyer, c) YuMi, d) UR10 e) CR-35iA . . . . .	50
3.15	VALERIE . . . . .	54
3.16	Armaturenbrettmontage, unterstützt durch einen Assistenzroboter . . . . .	56
3.17	Automatisierte Herstellung von Straßenlichtern mit UR10 . . . . .	57
4.1	Interne und externe Betrachtung als integrative SWOT-Analyse . . . . .	62
4.2	Absatzzahlen Industrie-Roboter 2013 - 2018 . . . . .	63
4.3	Konfigurierter Bohrroboter (KUKA) des Team Naist . . . . .	67
4.4	Analyse der gefährdeten Berufsgruppen durch die zukünftige Automatisierung und Digitalisierung . . . . .	71
A.1	Lisa - Aufbau Steuerungssystem . . . . .	97
A.2	Aufbau Sensornetz . . . . .	98



# Tabellenverzeichnis

2.1	Eigene Darstellung: Vorteilige Fähigkeiten des Menschen und der Maschine . . . . .	9
4.1	Entwicklung der Verkaufszahlen von Assistenzrobotern 2012 - 2015 . . . . .	64
4.2	Preisentwicklung von Assistenzrobotern (2015 - 2025) . . . . .	65
4.3	Eigene Darstellung: Weltweite Technologiezentren für Robotersysteme . . . . .	65
4.4	Eigene Darstellung: Ableitung der Chancen und Risiken aus der Umfeldanalyse	75
4.5	Eigene Darstellung: Kostendarstellung eines Roboters . . . . .	76
4.6	Eigene Darstellung: Normstrategien für den Einsatz von Assistenzrobotern . . . . .	81
A.1	Eigene Darstellung: Relevante Normen und Richtlinien für kooperierende Roboter	95
A.2	Auflistung der Grenzwerte für die Kraft- und Druckeinwirkung auf Körperteile	96
A.3	Eigene Darstellung: Technische Daten der Assistenzroboter: iiwa, Sawyer, Yu-Mi, UR3 . . . . .	100



# Akronyme

<b>CPS</b>	Cyber Physical Systems
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>MMI</b>	Mensch Maschine Interaktion
<b>IPA</b>	Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
<b>RPC</b>	Remote Procedure Calls
<b>IDL</b>	Interface Definition Language
<b>RDF</b>	Resource Description Framework
<b>WOL</b>	Web Ontologie Language
<b>ROS</b>	Robot Operation System
<b>MSDN</b>	Microsoft Develop Network
<b>ZVEI</b>	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie
<b>GI</b>	Gesellschaft für Informatik
<b>ITG</b>	Informationstechnischen Gesellschaft
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>LBR</b>	Leichtbauroboter
<b>DFKI</b>	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
<b>RIC</b>	Robotik Innovations Centrum
<b>KQK</b>	Klemm-/Quetschkraft
<b>STK</b>	Stoßkraft
<b>DFP</b>	Druck-/ Flächenpressung
<b>IFA</b>	Institut für Arbeitsschutz
<b>BIC</b>	Business Incubation Centre
<b>BIP</b>	Bruttoinlandsprodukt
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network



# Kapitel 1

## Einführung

Die jüngste Vergangenheit zeigt, dass der industrielle Fortschritt entscheidend durch die Entwicklung von Informationssystemen und immer besser werdenden Rechenleistungen beeinflusst wird. Mit Beginn der ersten speicherprogrammierbaren Steuerung kam die Vision einer vollkommen automatisierten Fertigungsline auf. Unter dem Begriff Computer Integrated Manufacturing<sup>1</sup> (CIM) entstand 1980 die Vision einer menschenleeren Fabrik. Die CIM-Vision wurde zu einem entscheidenden Wegbegleiter einer zunehmenden Automatisierung von Produktionslinien. Jedoch waren heterogene Computersysteme sowie geringe Rechnerleistungen wesentliche Hindernisse für das Erlangen einer Vollautomatisierung der Fertigung. In den vergangenen Jahren sind Rechnerleistungen um ein Vielfaches verbessert worden. Das Internet gewann immer mehr an Bedeutung und vernetzungsfähige Geräte und Prozesse, Cyber Physical Systems (CPS), verbreiteten sich zunehmend. Diese Entwicklungen sind heute bereits zu einem ständigen und teilweise unmerklichen Begleiter unserer Gesellschaft geworden. Die VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik beschreibt CPS als die Kopplung physischer und virtueller Objekte und Prozesse, deren Informationen und Daten jederzeit einsehbar und verwertbar in Informationsnetzen, wie dem Internet, hinterlegt werden können [VDI/VDE, 2013a]. Hierbei können die einzelnen CPS-Komponenten ihre Informationen untereinander so austauschen, dass Produktionsprozesse selbst-lernend, selbst-optimierend und selbst-organisierend ablaufen

<sup>1</sup> Ursprung des CIM-Ansatzes entstand in den USA. Die Amerikaner Wisnosky und Shunk erhielten vom Vertheidigungsministerium den Auftrag, ein Konzept zu entwickeln, mit dem die Integrationsaufgaben in Produktionsunternehmen der Luftwaffe effizienter und einfacher zu integrieren sind. Daraus entstand das Programm Integrated Computer-Aided Manufacturing. Dieses verfolgt erstmalig den Gedanken, dass eine effiziente Produktionssteuerung auf Basis eines Netzes von fachlichen und informatorischen Wechselwirkungen geführt werden kann. Aus diesem Ansatz entstand die CIM-Philosophie, die eine komplette Vernetzung der direkten und indirekten Produktionsbereiche für eine automatisierte Produktionsplanung und -steuerung betrachtet. Ziel des CIM-Ansatzes ist es, die Produktionsflexibilität zu steigern und die Durchlaufzeiten zu verkürzen [Gabler Wirtschaftslexikon, 2016].

Weitere Quelle: Jacobi, Hans-Friedrich (2013) *Computer Integrated Manufacturing (CIM)*

[VDI/VDE, 2013a]. Der neue industrielle Fortschritt begibt sich damit auf den Weg einer durchgängigen Digitalisierung der Produktionsabläufe und Unternehmensprozesse bei weiterführender Automatisierung. Dieser heute noch theoretische Ansatz wird in Deutschland unter dem allumfassenden Begriff „Industrie 4.0“<sup>2</sup> zusammengefasst. Antreiber der neuen industriellen Entwicklung in Europa ist unter anderem die Politik. Nicht zuletzt gab die EU-Kommission bekannt, in den nächsten fünf Jahren 50 Mrd. EUR in die Industrie 4.0 investieren zu wollen, um digitale Innovationen finanziell zu unterstützen [Friedrich, 2016]. Speziell in Deutschland wurde im Jahr 2014 die Hightech-Strategie für Innovationen entworfen. Mit dieser Strategie strebt Deutschland eine weltweite Innovationsführung an, um den Wohlstand und die Lebensqualität im Land zu steigern<sup>3</sup>. Im Bereich Industrie ist die intelligente Fabrik von morgen ein angestrebtes Ziel (vgl. Abb. 1.1). Auf Basis der digitalen Durchdringung aller Prozesse und Teile sollen Produktionsumgebung, Fertigungsanlagen und die Logistiksysteme so untereinander vernetzt sein, dass der Mensch nur im Notfall eingreifen muss.

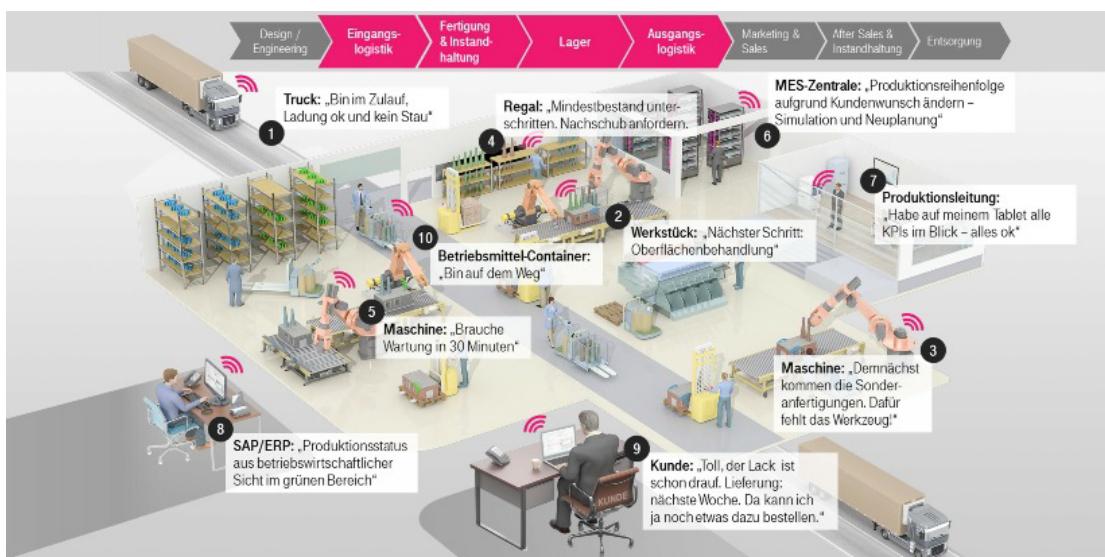


ABBILDUNG 1.1: Schematische Darstellung einer intelligenten Fabrik

Quelle: [Zillmann, 2016]

<sup>2</sup>In den USA wird diese industrielle Entwicklung unter dem Programm *Advanced Manufacturing Partnership (AMP)* zusammengefasst. Im Allgemeinen sind die unterschiedlichen Themenbereiche unter dem internationalen Dachbegriff *Industrial Internet of Things* bekannt.

<sup>3</sup>Die Hightech-Strategie bezieht sich auf gesellschaftliche und wirtschaftliche Bereiche, in denen ein innovativer Denkansatz platziert werden kann, um folgende Ziele zu erreichen: Gesundes Leben, Digitale Wirtschaft und Gesellschaft, Nachhaltiges Wirtschaften und Energie, Innovative Arbeitswelt, Intelligente Mobilität, Zivile Sicherheit. Hierfür wurden einzelne übergeordnete Projekte gebildet, die dieser Strategie folgen. Eines davon ist das Programm Industrie 4.0. Die Regierung implementierte die Hightech-Strategie, um die Innovationsdynamik voranzutreiben [BMBF, 2014]

Wo der CIM-Ansatz den Menschen aus der Produktion verdrängen wollte, verfolgt die Industrie 4.0 den Ansatz einer gemeinsamen Interaktion zwischen Mensch und Maschine. In den vergangenen Jahren wurde die Automatisierung durch Automatisierungsanlagen und Industrieroboter gestaltet. Der Roboter kam vor allem für wiederholende oder gefährliche Arbeiten zum Einsatz. Bohren, Nieten, Verschrauben oder großflächiges Lackieren sind prädestinierte Tätigkeiten des Industrieroboters bei hohen Stückzahlen. Dabei ist der Roboter durch einen Schutzkäfig vom restlichen Arbeitsumfeld abgeschirmt. Heute erlebt die Roboterindustrie einen Wandel der Einsatzmöglichkeiten von Robotern. Der Trend geht in Richtung kooperierende Arbeitssysteme zwischen Mensch und Roboter (siehe Abb. 1.2). Zusammen können die jeweils besonderen Fähigkeiten der Maschine und des Menschen kombiniert werden. Eher ermüdende und belastende Tätigkeiten übernimmt der Roboter, der Mensch übt hingegen die geistig anspruchsvollen Tätigkeiten aus. Die hierfür entwickelten Assistenzroboter arbeiten Hand in Hand mit Produktionsmitarbeitern zusammen. Mit Hilfe von Sensorsystemen und verschiedenen Algorithmen wird der Roboter zukünftig in die Lage versetzt, sich in seinem Umfeld selbstständig zu bewegen, mit dem Mitarbeiter zu kommunizieren und zu interagieren sowie eigene Entscheidungen zu treffen.



ABBILDUNG 1.2: Zukünftig etablierte Assistenzsysteme in der Automobilbranche  
Quelle: [Volkswagen AG, 2015]

Dabei ist die Motivation, in Assistenzroboter zu investieren, unter heutigen Gesichtspunkten vielfältig. Die Industrie muss sich alten und neuen Herausforderungen stellen. Diese sind zum Beispiel der Druck des internationalen Wettbewerbs, eigene Prozesse effizient und kostengünstig zu gestalten, der demographische Wandel der Bevölkerung sowie die Zunahme der Teilevarianz<sup>4</sup>. Diese Herausforderungen sind zugleich als Chance zu sehen. Assistenzroboter können

<sup>4</sup>Hierbei stehen die äußere und innere Varianz im Spannungsfeld. Äußere Varianz ist die wahrnehmbare Produktvielfalt für den Kunden. Unternehmen erweitern diese, um einen höheren Kundennutzen zu erzielen und damit Einfluss auf das Kaufverhalten zu bewirken. Die Innere Varianz beschreibt die vertretbare Vielfalt der Produkte,

an dieser Stelle für die Gestaltung effizienter und flexibler Produktionsprozesse genutzt werden sowie bei ergonomisch ungünstigen Arbeitsabläufen Entlastung für den Mitarbeiter schaffen. Der Zeitpunkt, in diese neue Technologie zu investieren, ist gegeben, vor allem weil mit der Industrie 4.0 Forschungs- und Entwicklungsprojekte für neue Innovationen finanziell unterstützt werden.

Die Zukunft wird zeigen, wie sich Assistenzroboter im industriellen Umfeld etablieren können. Die Technik ist vorangeschritten, doch bleibt die Frage offen, welche unterschiedlichen möglichen Einsatzgebiete der neue Robotertrend aufweisen kann und welchen Vorteil Unternehmen für sich daraus ziehen können.

## 1.1 Eingrenzung des Untersuchungsfeldes

Assistenzroboter wurden speziell für die Mensch-Maschine-Kooperation in produzierenden Bereichen entwickelt. Wo herkömmliche Industrieroboter in einem fest-definierten und abgezäunten Raum agieren und in diesem Bereich ihrer vorgegebenen Programmierung folgen, sind Assistenzroboter teilweise selbstständig agierend, ohne einen trennenden Käfig. So haben Assistenzroboter den besonderen Vorteil, dass diese sich in einer dynamisch ändernden Umgebung bewegen können. Hierbei wird der Käfig durch eine sichere Technik ersetzt. Dies stellt erweiterte Anforderungen bezüglich der Umgebungswahrnehmung, Fähigkeiten der künstlichen Intelligenz sowie der Informationssicherheit gegenüber herkömmlichen Industrierobotern.

Aus diesem Grund wird der Schwerpunkt der Arbeit auf die technische Betrachtung der erweiterten Anforderungen an Assistenzroboter und ihren zusätzlichen Fähigkeiten gelegt. Zusätzlich wird der Bezug ausschließlich zum produzierenden Bereich hergestellt, da Assistenzroboter auf das Produktionsumfeld spezialisiert sind. Anwendungen aus dem Bereich Service, Haushalt oder Militär sind Gegenstand der Servicerobotik und werden nicht betrachtet.

---

Komponenten oder Prozesse im Unternehmen, um die äußere Varianz zu erzielen. Diese ist so weit wie möglich zu minimieren, da eine hohe innere Varianz steigende Gesamtkosten verursacht [Wiendahl, 2004, S.12].

Weitere Quelle: Wiendahl, Hans-Peter; Gerst, Detlef; Keunecke, Lars (2004) *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*.

## 1.2 Forschungsfrage

Die International Federation of Robotics (IFR), ein Dachverband weltweiter Roboterverbände und Roboterunternehmen, sieht die Branche der industriellen Roboter zunehmend im Wachstum und zugleich als eine zukunftsweisende Technologie in der Robotikbranche [IFR, 2015]. Jedoch gibt es aufgrund der noch jungen Technologie heute kaum praktische Erfahrungswerte. Damit sind eine Analyse der Einsatzmöglichkeiten sowie der daraus abgeleitete Nutzen für die Industrie ausstehend. Um Investitionen für neue Techniken umzusetzen, sind die gewinnbringenden Faktoren für Unternehmen von Interesse. Aus diesem Grund stellt sich für die Masterarbeit die folgende zentrale Forschungsfrage:

*Welche Einsatzgebiete ergeben sich im Rahmen der neuen Technologien von Assistenzrobotern zukünftig in der Produktion?*

Um diese Frage zu beantworten, sind ebenfalls zusätzlich nachfolgende Fragen wesentlich:

- Wie ausgereift ist die heutige Entwicklung von Assistenzrobotern?
- Welche Anwendungsfelder sind heute in der Industrie zu sehen?
- Welcher Nutzen wird aus dem Einsatz von Assistenzrobotern erlangt?

In den nachfolgenden Kapiteln werden diese drei Fragen im Rahmen einer Sachstandserhebung ausgearbeitet. Diese bildet die Basis für eine anschließende Diskussion der heutigen und zukünftigen Einsatzmöglichkeiten und Funktionsweisen von Assistenzrobotern sowie der Ausarbeitung von Handlungsstrategien für Unternehmen. Eine derartige Ausarbeitung für die Industrie ist gegenwärtig nicht existent. Vor diesem Hintergrund erlangt diese Arbeit einen wissenschaftlichen Fortschritt bezüglich der Generierung empfohlener Handlungsstrategien für Unternehmen und deren mögliche Investition in Assistenzroboter. Dabei wird sich zeigen, in wieweit die Technik in den vergangenen Jahren vorangeschritten ist, um eine sichere Mensch-Maschine-Interaktion zu gewährleisten und welche monetären und nicht-monetären Vorteile diese Zusammenarbeit gegenwärtig und zukünftig den Unternehmen erbringen wird.

### 1.3 Vorgehensweise

Für die Beantwortung der Forschungsfrage ist eine Analyse und Bewertung der möglichen Einsatzgebiete von Assistenzrobotern im industriellen Umfeld zu erarbeiten. Hierzu wird im ersten Teil der Arbeit der Sachstand des technischen und industriellen Fortschritts der Assistenzrobotik erhoben. Dabei ergeben sich erste Erkenntnisse zum Stand der Technik und offenen Forschungsthemen im Bezug der Robotertechnik und der digitalen Vernetzung mit den Produktionsabläufen. Weiterhin umfasst die Betrachtung des ersten Teils eine Marktanalyse der heute industriell eingesetzten Assistenzroboterlösungen. Aus diesen Ergebnissen werden zum Abschluss der Sachstandserhebung bestehende und in der Industrie zukünftig vorstellbare Anwendungsszenarien für Assistenzroboter in den produzierenden Branchen zusammengetragen und bewertet. Neben der Analyse des technischen und industriellen Fortschritts gilt es im zweiten Teil der Arbeit, die inneren und äußeren wirkenden Faktoren zu analysieren, die Einfluss auf die Investition in Assistenzroboter nehmen. Grundlage dieser Betrachtung ist die SWOT-Analyse, bei der zunächst die Chancen und Risiken nach dem PEST-Modell<sup>5</sup> von Fahey und Narayanan erörtert und anschließend die internen Stärken und Schwächen aufgezeigt werden. Aus den gewonnenen Ergebnissen und Merkmalen der SWOT Analyse werden Normstrategien abgeleitet, die die Basis der abschließenden Handlungsempfehlung bilden.

---

<sup>5</sup>Das PEST Modell ist eine Methode der Umweltanalyse und umfasst die Betrachtung der politischen (political), wirtschaftlichen (economical), sozio-kulturellen (socio-cultural) und technologischen (technological) Einflüsse.

## **Kapitel 2**

# **Grundlagen für die Betrachtung von Assistenzrobotern**

Ein kooperierendes Arbeitssystem zwischen einem Menschen und einem Roboter kann in unterschiedlichen Formen zusammengesetzt sein. Beginnend bei unterstützenden, bis hin zu unabhängigen Tätigkeiten sind an den Assistenzrobotern unterschiedliche Fähigkeiten gefordert. In diesem Kapitel wird ein Überblick der allgemeinen Grundlagen der Assistenzrobotik gegeben. Hierzu werden die angrenzenden Begrifflichkeiten eines Assistenzroboters erläutert, um auf dieser Basis eine eigene Definition zu entwickeln. Anschließend folgt eine Erläuterung der charakteristischen Fähigkeiten eines Assistenzroboters, die diesen von den Industrierobotern deutlich abgrenzt.

### **2.1 Der Begriff Assistenzroboter**

Der Begriff Roboter wurde im Jahr 1921 erstmalig in einem russischen Theaterstück des Künstlers Karel Capek aufgegriffen. Von dem Titel „Rossum’s Universal Robots“ leitete Capek den Begriff „robota“ vom tschechischen Ausdruck für Zwangsarbeit ab [Nehmzow, 2002, S.7]. Heute wird ein Roboter nicht als Zwangsarbeiter verstanden, vielmehr wird mit dem Begriff der Kernnutzen eines Roboters assoziiert: monotone, gefährliche oder ergonomisch anstrengende Arbeit zu verrichten. Technisch betrachtet ist der Roboter eine Maschine. Die EU-Richtlinie 2006/42/EG, eine überarbeitete Version von 1989 über Maschinen, regelt europaweit die Anforderungen an Sicherheit und Gesundheitsschutz für Maschinen oder unvollständige Maschinen

sowie den freien Verkehr dieser auf dem EU-Markt. In der Maschinenrichtlinie wird eine Maschine wie folgt beschrieben:

*„eine mit einem anderen Antriebssystem [...] ausgestattete oder dafür vorgesehene Gesamtheit miteinander verbundener Teile oder Vorrichtungen, von denen mindestens eine(s) beweglich ist und die für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt sind.“* [Frick, 2008].

Demnach sind Roboter Maschinen, doch ist nicht jede Maschine ein Roboter. Die nachfolgenden drei wesentlichen Kriterien zeichnen einen Roboter aus und grenzen ihn von Maschinen ab:

- Mobilität: Roboter können sich entweder in einem Raum frei bewegen (mobile Roboter) oder ihre Bewegung über Achsen an einem definierten Ort ausüben (stationäre Roboter).
- Autonomität: Der Roboter ist bei der Ausführung seiner Tätigkeit im Rahmen seiner festgelegten Entwicklungsumgebung selbstständig und autonom (vgl. Kap. 2.2) [Roboterwelt, 2015]. Dies bedeutet, dass er nicht immer auf Impulse der Umgebung angewiesen ist, sondern auch eigenständig in seinem Umfeld agieren kann.
- Flexibilität: Der Roboter ist flexibel bezüglich seiner Einsatzmöglichkeiten, da eine Umprogrammierung bei wechselnden Tätigkeiten einfach zu realisieren ist.

Zusammenfassend bezeichnet der Verband der Deutschen Ingenieure (VDI) einen Roboter als universelles Betriebsmittel und definiert den Roboter in der VDI Richtlinie 2860 wie folgt:

*„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkel frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und ggf. sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“* [Verein Deutscher Ingenieure, 1990]

Der universelle Einsatz wird durch die Konfiguration der Bedienschnittstellen entsprechend der Fertigungsaufgabe ermöglicht. Damit ist der Roboter grundsätzlich flexibel und vielfältig in Produktionsabläufen anwendbar. In diesem Punkt besteht ein signifikanter Unterschied darin, ob der Roboter sich in einem abgesperrten oder freien Arbeitsraum bewegt. Agieren Roboter und Mensch in demselben Arbeitsraum, dann ist die Rede von einer Mensch-Maschine-Interaktion (MMI). Assistenzroboter sind MMI-Anwendungen, sprich arbeitsteilige Handlungen zwischen Mensch und Maschine. MMI haben zum Ziel, ein Arbeitssystem so aufzustellen, dass die jeweils

stärkeren Fähigkeiten eines Menschen und einer Maschine vereint werden. Die Intelligenz, Flexibilität und kognitiven Fähigkeiten des Menschen werden kombiniert mit der Kraft, Ausdauer und Präzision einer Maschine. Zusammenfassend betrachtet die nachfolgende Tabelle die jeweils vorteiligen Fähigkeiten des Menschen und des Roboters, die in einem Arbeitssystem einer MMI Anwendung genutzt werden.

Mensch	Maschine
Fähigkeit, das komplexe Gesamte eines Ablaufes einzusehen	Hohe Präzisionsleistung
Fähigkeit, schnell auf Ereignisse zu reagieren und Handlungssentscheidungen zu treffen	Arbeit unter hoher Geschwindigkeit möglich
Flexible Einsatzfähigkeit verschiedener Arbeitsbereiche (ohne Programmierung)	Kraftvoll, keine Ermüdungserscheinungen
Geschicklichkeit und kognitive Fähigkeit (Beweglichkeit, Fühlen, Tasten, Sehen)	Optimal geeignet für monotone Arbeiten
Besitzt Fachexpertise über den gesamten Produktionsablauf und das Produkt	kontinuierliche Einsatzfähigkeit (keine Pausen, freie Tage)

TABELLE 2.1: Eigene Darstellung: Vorteilige Fähigkeiten des Menschen und der Maschine

Grundsätzlich überwiegen beim Menschen die kognitiven und geistigen Fähigkeiten. Der Mensch hat stets den Überblick über die Gesamtheit der ablaufenden Prozesse und verknüpft diesen mit seinem Erfahrungswissen. Daher sind monotone und hochfrequentierte Abläufe nicht zufriedenstellend für den Menschen. Diese Tätigkeit übernimmt die Maschine mit den Fähigkeiten, vor allem schnell und sehr präzise zu arbeiten. Ferner erbringt die Maschine eine kontinuierliche Leistung. Sie erzielt stets das gleiche Ergebnis zur gleichen Qualität, sodass eine niedrige bis keine Variabilität des Endproduktes zu erwarten ist. Der Mensch zeigt in diesem Punkt schwankende Tagesformen sowie die natürliche Gegebenheit, mit der Zeit Ermüdungserscheinungen zu zeigen. Hinsichtlich der Ergonomieverbesserung nehmen Roboter eine Schlüsselfunktion in Produktionsprozessen ein. Dennoch ist der hauptsächliche Vorteil des Menschen seine flexible Einsatzmöglichkeit. Mit MMI-Arbeitssystemen wird das Spannungsfeld der Produktionsabläufe zwischen hoher Flexibilisierung und Automatisierung aufgegriffen und sie geben eine Möglichkeit der eleganten, effizienten Problemlösung. Für die Anwendung eines Assistenzroboter ergeben sich aus dem Vergleich und dem Zusammenschluss der vorteiligen Fähigkeiten nachfolgende Eigenschaften: [Wegener, 2004, S.119]

- Konstante Qualität durch Präzision
- Effizienzsteigerung durch paralleles Arbeiten
- Flexibilität bezüglich der Einsatzmöglichkeiten
- Ergonomie durch Stärke- und Schwächeausgleich zwischen Mensch und Roboter

Die Kombinationen der jeweils stärkeren Fähigkeiten des Menschen und der Maschine kann in einem Arbeitssystem unterschiedliche Formen annehmen. Die vier vorstellbaren Assistenzarten der interaktiven Zusammenarbeiten sind in der Abbildung 2.1 zu sehen:

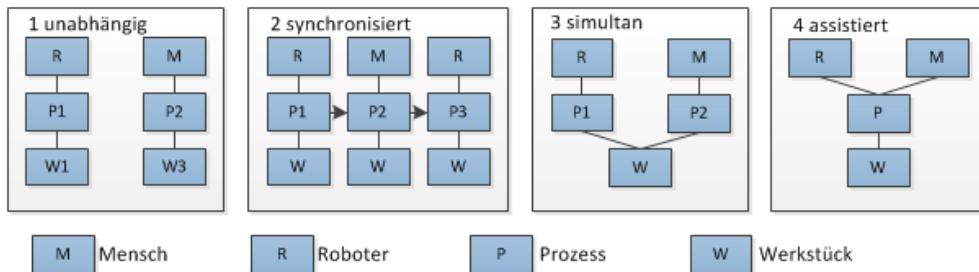


ABBILDUNG 2.1: Formen der Assistenz eines Roboters

Quelle: [Wegener, 2004, S.119]

- Eine unabhängige Tätigkeitsfolge [1] bedeutet, dass der Roboter und der Mensch in unterschiedlichen Arbeitssystemen tätig sind, folglich an verschiedenen Werkstücken und Prozessen arbeiten. Dabei gibt es keine direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter.
- Synchronisiertes Arbeiten [2] entspricht der aufeinanderfolgenden Prozesstätigkeit zwischen Roboter und Mensch. Beide agieren in einem Arbeitssystem und erzielen jeweils ein Teilergebnis in einer Abfolge von Arbeitsschritten. Die Tätigkeit wird in einem gemeinsamen Arbeitsraum ausgeführt, doch ist ein direkter Kontakt nicht gegeben [Wegener, 2004, S.119].
- Eine andere Form der Zusammenarbeit ist das simultane Arbeiten [3]. Roboter und Mensch arbeiten gleichzeitig in zwei unterschiedlichen Prozessen, die am selben Werkstück zur Fertigstellung des Endprodukts ausgeführt werden. Diese Form ist vor allem häufig zu sehen, wenn der Roboter die einfachen und der Mensch die komplizierten Montageschritte an einem Produkt ausübt.
- Die direkteste Form der Mensch-Maschine-Interaktion ist die assistierende [4]. Bei dieser führen Mensch und Roboter am selben Werkstück gleiche Montageprozesse aus, sodass eine Interaktion im selben Arbeitsprozess stattfindet. Wie bei Form 3 besteht ein direkter Kontakt zwischen Mensch und Roboter.

Je nach Form des Assistenzsystems sind die Anforderungen an den Assistenzroboter bezüglich Sensorik/Aktorik und der Software unterschiedlich. Ein technischer Einblick wird hierzu in

Kapitel 3 gegeben. Zusammenfassend betrachtet, ergibt sich aus den Eigenschaften eines Roboters, der MMI-Anwendungen ausführt, für diese Arbeit folgende selbst entwickelte technische Definition des Assistenzroboters:

**Definition 2.1** (Assistenzroboter). Mobiler oder statischer Roboter, der mit dem Menschen im selben Arbeitsraum in Interaktion tritt mit dem Ziel, ergonomisch ungünstige, einfache und hochfrequente Arbeit mit hoher Präzision auszuführen. Durch Umprogrammierung, wie durch interaktive Benutzerschnittstellen, ist der Assistenzroboter flexibel einsatzfähig. Die hierbei engste Interaktion ist die assistierende Form, bei der der Roboter mit dem Menschen im gemeinsamen Montageprozess und am selben Bauteil Arbeiten ausübt.

## 2.2 Fähigkeiten eines Assistenzroboters

Die Fähigkeiten eines Assistenzroboters lassen sich aus der Grundanforderung, in einem arbeitsteiligen Raum zu agieren, ableiten. Im Vergleich zu einem abgetrennten Käfig befindet sich der Roboter in einer dynamischen Umgebung. Beispielsweise können Personen in den Arbeitsbereich eintreten oder Objekte zum vorherigen Zustand verrückt sein. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren die Eigenschaften eines Roboters dahingehend weiterentwickelt, dass sich dieser auf ändernde Situationen einstellen und selbstständig eine neue Lösung suchen kann. Hierfür benötigt ein Assistenzroboter die folgenden wesentlichen Fähigkeiten:

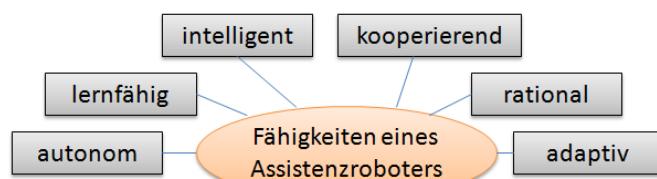


ABBILDUNG 2.2: Eigene Darstellung: Fähigkeiten eines Assistenzroboters

### 2.2.1 Autonomie

Ein Roboter agiert autonom, wenn sich dieser selbstständig in einer Umgebung bewegen kann und ohne Einwirkungen von außen seine Handlungen selbst bestimmt und ausführt. Für die Beschreibung des Autonomiebegriffs ist bis zum heutigen Zeitpunkt keine allgemein gültige Definition akzeptiert [Spektrum, 2016]. Doch gelten als wesentliche Eigenschaften, dass der

Roboter einen geschlossenen Regelkreis besitzt, in dem Sensordaten verarbeitet werden, um anhand dieser sich selbstständig im Raum zu orientieren, Entscheidungen zu treffen und sich den dynamisch veränderten Umgebungseinfluss anpassen zu können (vgl. Kap. 3.1.2.2) [Spektrum, 2016]. Folglich beschreibt die Autonomie die Fähigkeit eines Roboters, eigene Handlungsscheidungen zu treffen. Dabei plant dieser seine Handlungsabfolge auf Basis des ihm zugrundeliegenden Planungswissens sowie den wahrgenommenen Eigenschaften aus der Umgebung. Auf Grund dessen, dass der Roboter mit Abweichungen bzw. verändernden Umgebungseinflüssen zum Planungsmodell umgehen kann, bleibt er gleichzeitig reaktiv. Hieran knüpfen sich die Fähigkeiten der künstlichen Intelligenz und Lernfähigkeit an. Ein Roboter wirkt als Agent, der aus seinen Handlungen lernt und damit sein Handlungswissen steigert. Damit ein Agent die richtige Entscheidung trifft, kennt dieser das „Modell der Welt“ und hinterfragt jede Handlung, was diese bewirken würde. Diese beiden Eigenschaften sind wesentlich zur Bewertung und Planung der Handlungen eines zielorientierten Agentens [Norvig, 2012, S.80]. Allgemein bedeutet dies, dass der Roboter soweit autonom ist, wie dieser selbst Erfahrungen aus seinen Aktionen gesammelt hat [Spektrum, 2016]. Mit der Weiterentwicklung autonomer Roboter beschäftigen sich Forschungsinstitute wie das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz<sup>6</sup> (DFKI) (vgl. Kap. 3.3.1) oder Forschungsprojekte die ihre Ergebnisse in Wettbewerben wie zum Beispiel dem RoboCup vorstellen (vgl. Kap. 4.2.2).

## 2.2.2 Lernfähigkeit

Die Lernfähigkeit ist besonders charakteristisch für den Assistenzroboter. Der Roboter wird in die Lage versetzt, sich durch Lernen kontinuierlich im Rahmen seiner selbstständigen Tätigkeitsausführung zu verbessern. Es gibt verschiedene Arten und Ansätze des Lernens, die dem Roboter als Fähigkeit übertragen werden. Nachfolgend sollen die Lernfähigkeiten des lernbasierten Agentens, des Reinforcement Learning und Supervised Learning vorgestellt werden:

- Auf zwei unterschiedliche Weisen kann sich der Roboter als lernbasierten Agenten weiterentwickeln. Im ersten Fall ist der Roboter mit anderen Cyber Physischen Komponenten verknüpft und nimmt von diesen Kritik aus der Umgebung auf. Diese verarbeitet er so, dass ein Fehler einer vorangegangenen Handlung beim nächsten Mal korrigiert ist. Im

---

<sup>6</sup>Zum Beispiel das Projekt VirGo legt den Fokus auf adaptives und antizipatives Verhalten,  
URL: <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/virgo4.html>

zweiten Fall versucht er selbstständig durch Experimente zusätzliches Wissen zu erlangen, um seine Unwissenheit zu kompensieren [Nehmzow, 2002, S.48]. Zum Beispiel fährt ein Staubsaugerroboter neue Wege ab, um Veränderungen im Raum wahrzunehmen. Beide neu gewonnenen Erkenntnisse werden bei der Planung von Handlungsentscheidungen mit berücksichtigt.

- Bei dem Reinforcement Learning (verstärktes Lernen) lernt der Agent durch die ihm zurückgespielte Belohnung oder Bestrafung, das etwas gutes oder schlechtes passiert ist. Zum Beispiel erhält der Roboter zum Ende des Schachspiels zwei Punkte für den Sieg. Daraus leitet der Agent ab, dass er etwas richtig gemacht hat [Norvig, 2012, S.811]. Mittels Algorithmen ermittelt der Agent, welche der Aktionen zu dieser Verstärkung beigebracht haben und nimmt diese Erfahrung in seinen Strategieplan<sup>7</sup> auf. Mit Reinforcement Learning entwickelt der Roboter über seine Lebenszeit einen immer wieder verbesserten Strategieplan für die Ausführung seiner Handlungen.
- Das Supervised Learning (überwachtes Lernen) ist ein Teilgebiet des maschinellen Lernens, bei dem es darum geht, dass der Roboter bereits im Voraus die richtige Antwort kennt<sup>8</sup>. Um eine richtige zukünftige Vorhersage zu treffen, sind bekannte Daten notwendig. Diese Daten besitzen sogenannte „Labels“, die aus einem Paar von bekannten Eingabewerten und den gewünschten Ausgabewerten bestehen. Jedes dieser Paare wird auch als Trainingsbeispiel verstanden und kann in Form einer mathematischen Formel beschrieben werden. Die richtige Vorhersage wird durch einen Supervised Learning Algorithmus generiert. Dieser analysiert die Beispiele und verwendet die einzelnen Funktionen, um neue Testbeispiele bzw. Labels zu bilden. Wenn zum Beispiel zwei Eigenschaften bekannt sind (X-Eingabewerte), dann bildet der Algorithmus daraus ein Label mit den entsprechenden Y-Ausgabewerten. Anders beschrieben ist beim überwachten Lernen die richtige Antwort im Voraus bekannt, da diese bereits im Label hinterlegt worden ist<sup>9</sup><sup>10</sup> [Klose, 2015].

<sup>7</sup>Eine Belohnung dient dazu, die optimale Strategie auf Basis der Markov-Entscheidungsprozesse zu verbessern. Ziel der kontinuierlichen Verbesserung der Strategie ist die Maximierung des erwarteten Erfolgs. Unterschieden wird in passives und aktives Lernen. Beim passiven Lernen steht die Strategie des Agenten fest. Der Agent soll lediglich den Nutzen eines Zustandes erlernen. Beim aktiven Lernen muss der Agent selbst in Erfahrung bringen, was in diesem Zustand zu tun ist, indem er so viele Informationen aus der unbekannten Umgebung sammelt, um daraus sein Handeln zu lernen.

Weitere Quelle zu Reinforcement Learning:

Deisenroth, Marc Peter, Neumann, Gerhard und Peters, Jan: *A Survey on Policy Search for Robotics*  
Kober, Jens; Bagnell, Andrew J.; Peters, Jan (2013) *Reinforcement Learning in Robotics: A Survey*

<sup>8</sup>Im Gegensatz zum Supervised Learning steht das Unsupervised Learning. Bei diesem geht es darum, die vorhandenen Daten zu verstehen.

<sup>9</sup>Hierzu gibt es weitere Verfahren für die Herangehensweise des Lernproblems wie die Klassifizierung und Regressionsanalyse.

<sup>10</sup>Weitere Quellen zu Supervised Learning:

Mohri, Mehryar; Rostamizadeh, Afshin; Talwalkar, Ameet (2012) *Foundations of Machine Learning*  
Eberl, Ullrich (2016) *Smarte Maschinen: Wie Künstliche Intelligenz unser Leben verändert*

### 2.2.3 Rationalität

Norvig [2012] [S.64] definiert einen rationalen Agenten wie folgt:

*„Ein rationaler Agent soll für jede mögliche Wahrnehmungsfolge eine Aktion auswählen, von der erwartet werden kann, dass sie seine Leistungsbewertung maximiert, wenn man seine Wahrnehmungsfolge sowie vorhandenes Wissen, über das er verfügt, in Betracht zieht.“*

Einfach zusammengefasst ist ein Roboter rational, wenn er das Richtige tut. Dies bedeutet nicht, dass er immer die perfekte Lösung findet, sondern vielmehr, dass er zu einem bestimmten Zeitpunkt eine rationale Entscheidung entsprechend seines aktuellen Wissens und der Umgebungs-informationen trifft . Hierbei unterscheidet Norvig [2012][S.22] zwischen der Bedeutung der Wörter „rational“ und „perfekt“. Es kann vorkommen, dass während der Handlungsausführung ein Ereignis passiert, welches nicht vorhersehbar ist, zum Beispiel wenn ein Gegenstand auf den Weg fällt und diesen versperrt. Nachträglich betrachtet, war die Entscheidung des Roboters, diesen Weg zu befahren, nicht perfekt, doch konnte dieses Ereignis nicht vorausgesehen werden, sodass er rational richtig gehandelt hat. Dies bedeutet, dass der Roboter bzw. ein Agent ein unsicheres Wissen über seinen Zustand in seiner aktuellen Umgebung besitzt. Aus diesem Grund kann er den Zustand nur auf Basis probabilistischer Methoden schätzen [Nüchter, 2009, S.128]. Der Agent selbst nimmt einen definierten Zustand ein.

### 2.2.4 Intelligenz

Eine erste Definition zur künstlichen Intelligenz gab Alan Turing bereits 1950 mit dem gleichnamigen *Turing-Test*. Er stellte den Vergleich einer menschlichen und maschinellen Intelligenz an und behauptete, dass eine Maschine künstliche Intelligenz besitzt, wenn sie schriftliche Fragen eines menschlichen Fragestellers so beantwortet, dass der Mensch nicht erkennen kann, dass diese von einer Maschine geschrieben worden sind [Norvig, 2012, S.23]. Genauer beschrieben ist eine Maschine intelligent, wenn sie in der Lage ist, wie ein Mensch zu handeln und zu denken. Dass eine Maschine einen Menschen in Denksportarten besiegen kann, wurde bereits 2006 mit dem Sieg einer Maschine über den damaligen Schachweltmeister bewiesen. Zuletzt entwickelte Google eine Maschine, die im Januar 2016 den Go-Weltmeister bezwingen konnte [nTV, 2016]. Diese Ereignisse zeigen, dass das menschliche Denken unter hohen Rechenleistungen vom Roboter adaptiert werden kann. Als deutlich schwieriger gestaltet sich die Entwicklungsaufgabe, einer Maschine menschliches Handeln beizubringen, zum Beispiel dahingehend, dass sich ein

Roboter ganz normal im Alltag in seiner Umgebung bewegen kann. Für den Menschen ist das eine triviale Aufgabe, doch scheint es für die Maschine bei weitem schwieriger zu sein als zum Beispiel Schach zu spielen [Nehmzow, 2002, S.10]. Die hierbei größte Herausforderung ist die Realisierung der menschlichen Sinneswahrnehmung. Selbst für Sensoren mit gleichen Fähigkeiten wie bei einem Menschen erscheint dies kaum möglich [Wegener, 2004, S.161].

Wird der Roboter bzw. der Agent nicht isoliert betrachtet, sondern als ein Teil eines Multi-Agentensystems mit mehreren Agenten, ergeben sich neue Möglichkeiten einer optimierten selbstbestimmten Handlungsweise. Die Rede ist hierbei von der Schwarmenintelligenz, die die Eigenschaft der Emergenz trägt<sup>11</sup>. In der bionischen Umgebung sind Schwarmensysteme wie das Ameisen-Kolonie-System bekannt. Mit diesem System beschäftigte sich der Wissenschaftler Marco Dorigo. Dieser betrachtete das Verhalten der Ameisen in ihrem System und leitete daraus einen Algorithmus zur Optimierung des Planungswissens eines Agenten ab [Bogon, 2013, S.34]. Mit dem sogenannten Ameisenalgorithmus werden Planungsprobleme wie zum Beispiel die Suche nach der kürzesten Route gelöst. Bei derartigen heuristischen Verfahren kann das Erzielen der optimalen Lösung nicht garantiert werden, weshalb der Algorithmus nur anzuwenden ist, wenn dies nicht zwingend erforderlich ist. Vorteilig dieser heuristischen Methode ist, dass sowohl die Berechnungszeit als auch die Speicherkapazität gering sind [Bogon, 2013].

## 2.2.5 Kontext-sensitives Kooperieren und adaptives Verhalten

Die weitere charakteristische Fähigkeit des Assistenzroboters ist sein kooperierendes Verhalten gegenüber dem Menschen, indem er mit diesem direkt zusammenarbeiten und interagieren kann. Gerke [2015][S.114] beschreibt die multimodale Mensch-Maschine-Interaktion als eine Fähigkeit des Roboters, mit einem Menschen über Sinneswahrnehmung, wie Sprache und Gestik, zu kommunizieren (vgl. Kap. 3.1.5). Dabei nimmt der Roboter direkte Sprach- oder Eingabebefehle vom Menschen auf und verarbeitet diese. Andersherum ist ebenfalls die Erkennung von kontext-sensitiven Belangen vorstellbar, durch die der Roboter assoziativ dem Menschen zum Beispiel den nächsten Arbeitsschritt vorschlägt oder Informationen auf einem Display aufbereitet. Kontextsensitivität ist eine wesentliche Voraussetzung für autonom agierender Roboter. Damit sich der Roboter angemessen auf Einflüsse aus der Umgebung verhalten bzw. auf eintretende Veränderungen regieren kann, nimmt dieser Informationen aus der Umgebung auf (vgl. Abb. 2.3). Nach Want [1994] beziehen sich die wesentlichen relevanten Kontextinformationen

<sup>11</sup>Emergenz beschreibt die Generierung neuer Eigenschaften und Strukturen eines Systems durch die Kopplungen einzelner Agenten in einem System.

auf die Fragen: wo sich der Roboter selbst gerade befindet und welche sonstigen Ressourcen und Objekte in der nahen Umgebung sind [Abowd, 1999, S.3]. Mit diesen Daten erfasst der Roboter die für ihn wahrnehmbare Situation und berücksichtigt diese bei der Ausführung seiner Ziele<sup>12</sup>.

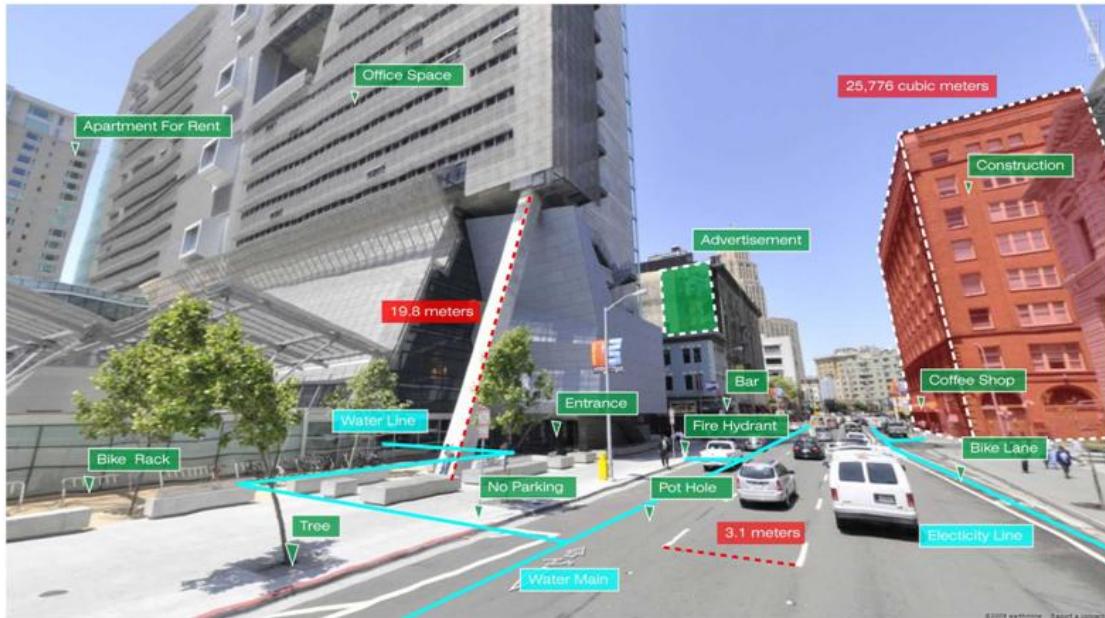


ABBILDUNG 2.3: Kontextsensitive Wahrnehmung eines Agentens

Quelle: [SAP Mobile Tech, 2013]

Im Zusammenschluss der erläuterten Fähigkeiten ist der Roboter in der Lage, adaptiv in seiner Umwelt zu agieren. Wojke [2012][S.1090] beschreibt die Adaptivität als Fähigkeit, sich in unterschiedlichen äußereren Umständen anzupassen. Das Lernverfahren und das kontext-sensitive Verhalten sind hierfür Voraussetzungen. Der Roboter ist in der Lage, sich den verändernden Umgebungen anzupassen, seine Ziele neu zu definieren und mit dem Menschen zusammen zu kooperieren. Hierfür sind neben dem maschinellen Lernen die sensorische Umgebungswahrnehmung sowie die Systemsteuerung wesentlich, um das adaptive Verhalten des Roboters zu erreichen. Die hierzu notwendigen technischen und informationstechnischen Eigenschaften werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

---

<sup>12</sup>Weitere Quellen: B. Schilit; N. Adams; R. Want. (1994) *Context-aware computing applications*  
Schmidt, A.; Aidoo, K.A.; Takaluoma, A.; Tuomela, U.; Van Laerhoven, K; Van de Velde W. (1999) *Advanced Interaction in Context*

## **Kapitel 3**

# **Situationsanalyse der heutigen Technik von Assistenzrobotern**

Für die in Kapitel 2.2 erläuterten Fähigkeiten stellen sich besondere Herausforderungen an die Technik und die einzelnen Komponenten eines Assistenzroboters. Auf dem heutigen Stand der Technik sind eine Vielzahl technischer und informationstechnischer Komponenten für die Interaktionsfähigkeit des Roboters notwendig, die Lösungen für die funktionalen Herausforderungen eines Assistenzroboters bieten. Weil ein Assistenzroboter die Fähigkeit besitzen soll, sich autonom in der Umgebung zu bewegen und sicher mit dem Menschen zu kooperieren, werden an die Systemeigenschaften hohe Anforderungen aus dem Wissenschaftsbereich der verteilten künstlichen Intelligenz gestellt. Im ersten Teil des Kapitels wird ein Umriss zu den technischen und informationstechnischen Lösungen wie der Steuerungsarchitektur, der Navigation und der Mensch-Roboter-Interaktion gegeben. Um für den Menschen eine sichere Technik zu gewährleisten, wurden speziell für kooperierende Assistenzroboter in der Produktion Normen definiert. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Anschließend gibt der dritte Abschnitt einen Überblick über ganzheitliche Lösungen von Assistenzrobotern in den Bereichen Forschung und Entwicklung, auf dem Markt sowie in den produzierenden Unternehmen. In Zusammenchluss der drei Abschnitte wird abschließend eine erste Einschätzung zu den heutigen technischen Fortschritten von Assistenzsystemen gegeben.

### 3.1 Technische Grundlagen

Landau [2012] schlägt das Arbeitssystem-Modell als Methode zur Messung der Produktivität vor<sup>13</sup>. Dieses entwickelte er, um komplexe Systeme abstrahiert darzustellen. Dabei werden bewusst detaillierte Informationen vernachlässigt, um sich auf das Wesentliche zu beschränken [Landau, 2012, S.18]. In Anlehnung an dieses Modell wird einleitend zu diesem Kapitel auf Basis des Arbeitssystem-Modell die Funktionsweise eines Assistenzroboters und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten und Systeme vereinfacht vorgestellt.

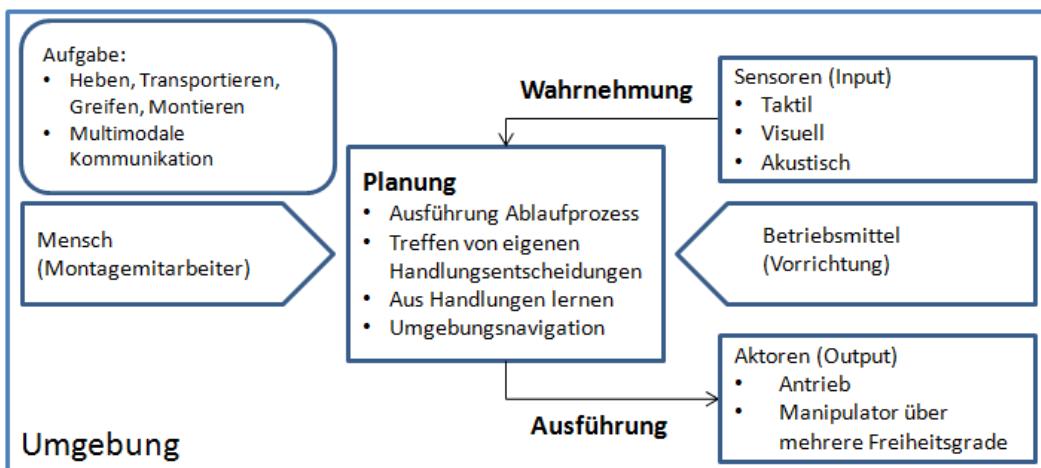


ABBILDUNG 3.1: Eigene Darstellung: Allgemeines Arbeitssystem eines Assistenzroboters

In diesem Modell ist der wesentliche Funktionsablauf eines Assistenzroboters dargestellt. Die drei Hauptkomponentengruppen eines Assistenzroboters sind die Sensoren, die Aktuatoren und die Software-Architektur. Jeweils in dieser Reihenfolge sind die Komponenten verantwortlich für die Umgebungswahrnehmung, das Planen und schließlich das Ausführen von Aktionen. Eine Aufgabe eines Roboters könnte das Ausführen eines Montageprozesses sein, welcher im Planungsmodell hinterlegt ist. Wie im vorangegangenem Kapitel beschrieben, soll der Roboter sich zusätzlich autonom verhalten und eigenständig Handlungentscheidungen treffen sowie aus seinen Aktionen lernen. In der Umgebung des Assistenzroboters können zudem Menschen im Arbeitsprozess mitwirken, die teilweise in Kooperation mit ihm arbeiten. Das interaktive Zusammenwirken, teilweise über die multimodale Kommunikation zwischen Mensch und Roboter,

<sup>13</sup>Das Arbeitssystem ist nach der DIN EN ISO 6385:2004 normiert.

Nach REFA (Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung) besteht ein Arbeitssystem aus den folgenden sieben Größen: Aufgabe, Eingabe, Mensch, Betriebsmittel, Ablauf, Ausgabe, Umwelt. Diese sind ebenfalls in dem Modell von Bokranz und Landau wiederzufinden.

wird über das Roboter-Betriebssystem gesteuert. Zusätzlich sind Betriebsmittel, wie zum Beispiel eine Vorrichtung in der Umgebung vorhanden, die vom Roboter ebenfalls mit berücksichtigt werden müssen. Mit diesem kurz und abstrakt erläuterten Arbeitssystem wird die allgemeine Funktionsweise und die des Umfeldes eines Assistenzroboters deutlich.

### 3.1.1 Software-Architektur

Um einzelne Softwarekomponenten zu strukturieren und diese untereinander in Beziehung zu setzen, werden Software-Architekturen benötigt. Hierbei entwickelt jede Software-Architektur eine eigene Philosophie darüber, wie die einzelnen Verhaltensweisen und Fähigkeiten des Assistenzroboters untereinander in Beziehung stehen [Nehmzow, 2002, S.19]. Mit der Komplexitätszunahme der Roboterfunktionen musste sich die System-Architektur ebenfalls anpassen, um das intuitive und verhaltensbasierte Koordinieren des Assistenzroboters zu realisieren. Die nachfolgenden vier Architekturmodelle beschreiben diese Entwicklung.

#### 3.1.1.1 Planungsbasierte Architekturen

Zu Beginn der Robotersteuerung wurden planungsbasierte Architekturen favorisiert. Die Architektur besteht aus fünf funktionalen Modulen, die von der Informationseingabe durch Sensoren bis zur Aktionsausgabe an die Aktoren durchlaufen werden (vgl. Abb. 3.2). Dabei werden zunächst die neuen Informationen wahrgenommen und soweit verarbeitet, um diese dem „Modell der Welt“ hinzuzuführen. Das Weltmodell ist die Basis für die Planung der Handlungsentscheidungen und weiteren Ausführungen der Aktionen mittels der Motorsteuerung und der angeschlossenen Aktoren. Diese Architektur ist für die Regelungstechnik sehr einfach und erfolgreich. Problematisch ist jedoch, dass das Weltmodell immer größer wird und deshalb Grenzen im Bereich der Rechnerleistung erreicht werden. Zudem müssen alle fünf Module hintereinander durchlaufen werden, um ein sicheres Ergebnis zu erzielen, sodass die Abhängigkeiten und der zeitliche Faktor weitere Nachteile bilden [Nehmzow, 2002, S.19].



ABBILDUNG 3.2: Beispiel einer planungsbasierten Aktionsgenerierung  
Quelle: In Anlehnung an Wegener [2004][S.165]

### 3.1.1.2 Subsumtionsarchitektur

Die Subsumtionsarchitektur oder auch verhaltensbasierte Robotik verfolgt das Prinzip einer parallelen Anordnung der verschiedenen Verhaltensmodule ohne einen definierten Handlungsplan. Jedes der einzelnen Module ist autonom, verfolgt seine eigene Zielstellung und gibt unabhängig von den anderen Modulen Aktionen an die Aktoren weiter. Zusätzlich erfolgt eine Priorisierung der einzelnen Befehle aller Module, sodass das Verhalten der niedrigsten Ordnung vernachlässigt bzw. subsummiert wird [Wegener, 2004, S.165]. Nach Brooks [1985] wurden die in Abbildung 3.3 zu sehenden Verhaltenskomponenten, wie beispielsweise „Wandere umher“, definiert. Durch diese verhaltensbezogene Steuerung eines Roboters erhält jede dieser Komponenten einen direkten Zugriff auf die freien Sensorinformationen, um an die Motorsteuerung die entsprechenden Befehle zu senden. Wegener [2004][S.165] stellt heraus, dass dieses Verfahren für komplexe Mechanismen vorteilig ist, da die Architektur enger zwischen der Wahrnehmung und dem Handeln verknüpft ist. Nachteilig daran ist der fehlende Statusspeicher, um vorgegebene Handlungsabfolgen auszuführen.



ABBILDUNG 3.3: Beispiel einer Subsumtionsarchitektur nach Brooks  
Quelle: In Anlehnung an Wegener [2004][S.165]

### 3.1.1.3 Hybride Architektur

Das Problem des fehlenden Statusspeichers löst die Hybride Architektur, die im Gegenteil zur Subsumtionsarchitektur nicht verhaltens-, sondern funktionsorientiert ist. Als Beispiel ist in der Abbildung 3.4 der Aufbau der Softwarearchitektur des Care-O-bot II dargestellt. In dieser ist zu sehen, dass sie sich aus drei Schichten zusammensetzt. Eine übergeordnete symbolbasierte Schicht übernimmt die abstrakte Planung für komplexe Aufgaben. Der Zyklus einer Handlungentscheidung kann bei mehreren Minuten liegen, weshalb nur wenige Aufgaben in dieser Schicht ausgeführt werden. Die darunterliegende ausführende Schicht übernimmt

die Steuerung der mobilen Roboterplattform. Sie vermittelt zusätzlich Befehle zwischen der symbolbasierten und reaktiven Schicht und ist für die Repräsentation der Sensordaten verantwortlich. Schließlich stößt die reaktive Schicht einfache Aktionen an, die in einer direkten Sensor-Aktions-Schleife stehen, sodass Entscheidungsgeschwindigkeiten in Millisekunden erreicht werden [Norvig, 2012, S.1156].

Mit der Entwicklung des autonomen Fahrens wurden neue Softwarearchitekturen erstellt, die sich von der hybriden Architektur lediglich in dem Punkt unterscheiden, dass mehrere Prozesse parallel ausgeführt werden können<sup>14</sup> [Norvig, 2012, S.1156].

Sowohl der verhaltensorientierte als auch der funktionsorientierte Ansatz findet für autonome Roboter in der Softwarearchitektur seine Anwendung. Als Erweiterung werden kognitive Architekturen wie etwa SOAR oder ACT-R<sup>15</sup> eingesetzt. Schack [2010][S.12] geht davon aus, dass der Einblick in das Architekturmodell menschlicher Bewegungen Erkenntnisse für die kognitive Architekturstruktur gibt. Als Ergebnis führt er an, dass mit Hilfe einer Kategorisierung der Bewegungsabläufe sich die motorischen Abläufe eines autonomen Roboters verbessern lassen.

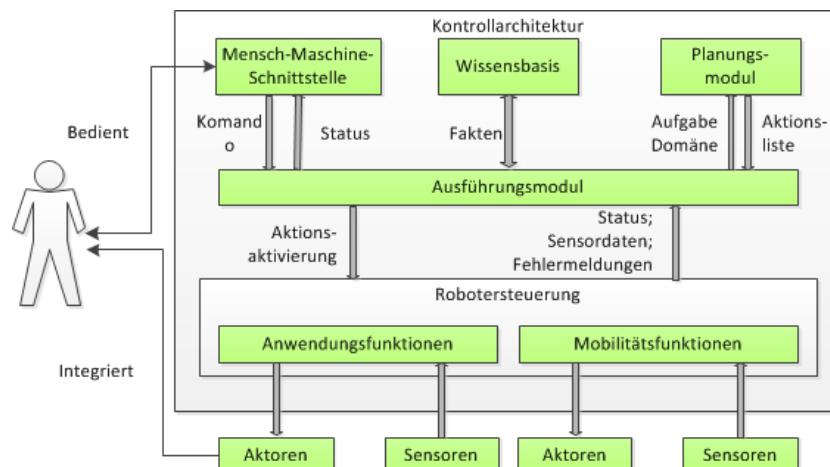


ABBILDUNG 3.4: Beispiel der Hybriden-Software-Architektur am Care-O-bot II

Quelle: In Anlehnung an Wegener [2004][S.166]

### 3.1.2 Hardware-Komponenten

Neben der Steuerungsarchitektur verfügt der Roboter über eine Vielzahl von Sensoren und Aktoren als weitere Hardwarekomponenten. Dabei lässt sich eine einfache Unterteilung in externe

<sup>14</sup>Elektrobit stellte im Juni 2016 eine Softwarelösung für die Markteinführung bei autonomen Fahrzeugen vor. Siehe EB robinos: <http://www.presseportal.de/pm/110529/3365798>

<sup>15</sup>Weitere Quellen:

SOAR Homepage: <https://soar.eecs.umich.edu/>  
ACT-R Homepage: <http://act-r.psy.cmu.edu/about/>

Sensoren zur äußereren Umgebungswahrnehmung und interne Sensoren zur Messung des inneren Zustands eines Roboters unterteilen. Die Abbildung 3.5 gibt hierzu eine taxonomische Übersicht der Sensoren und Aktuatoren eines Assistenzroboters.

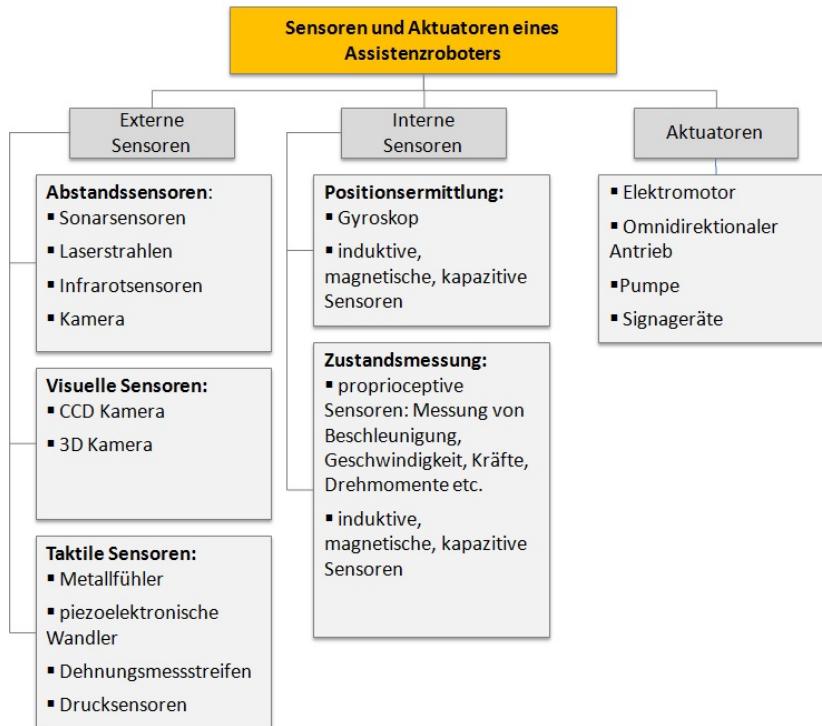


ABBILDUNG 3.5: Eigene Darstellung: Taxonomie der Sensoren eines Assistenzroboters

### 3.1.2.1 Externe Sensoren

#### Abstandssensoren

Eine Gruppe von Sensoren misst den Abstand zu umliegenden Objekten. In der Vergangenheit wurden hierzu häufig mit Schallwellen arbeitende Sonarsensoren angewendet. Heutige Anwendungen arbeiten mit Laser, Infrarotsensoren oder Kameras zur Abstandsmessung. Dabei handelt es sich um aktive Sensoren, die vom Roboter ausgehend Signale absenden. Lasermessungen<sup>16</sup> werden am häufigsten an Robotern eingesetzt, um die Entfernung sowie die Beschleunigung und Geschwindigkeit des umliegenden Objektes zu messen [Nehmzow, 2002, S.32].

<sup>16</sup>Das Prinzip eines Lasers ist so zu beschreiben, dass die Zeitspanne, die der Laser bis zum Auftreffen auf das Objekt sowie die Reflektion benötigt, in Weg bzw. Abstand umgerechnet wird. Laser können bis zu mehreren 100 Meter ausgestrahlt werden und zeigen bei geringer Entfernung sehr genaue Messwerte

### *Visuelle Sensoren*

Neben der Abstandmessung durch Sensoren ist das visuelle Erkennen eine weitere wichtige Funktion des Roboters. Wenn es sich um die visuelle Erkennung von Objekten handelt sowie die Wahrnehmung der Umgebung für die Navigation, werden hauptsächlich Kamerasysteme eingesetzt wie beispielsweise eine CCD Kamera (Charge Coupled Devices)<sup>17</sup>. In den vergangenen Jahren hat sich vor allem die dreidimensionale Kamera (3D-Kamera) entwickelt. 3D-Kameras sind für die schnelle und eindeutige Erkennung von Objekten bei dynamischen Umgebungen vorteilhaft. Ebenso sind sie für die kollisionsfreie Ausführung der Greif- oder Montagearbeit wichtig, damit die Assistenzroboter die Aufgabe präzise ausführen können.<sup>18</sup>

Ferner dient die Kamera zur Umgebungswahrnehmung bei der Navigation mobiler Assistenzroboter. Das Bild wird mehrfach in Form einer Punktwolke aufgenommen (vgl. Abb. 3.6), die zusammen in einem Koordinatensystem abgebildet werden. Hieraus lassen sich Konturen oder Punkte von Objekten feststellen, sodass Objekte während des Fortbewegens identifiziert werden können [IPA, 2014].

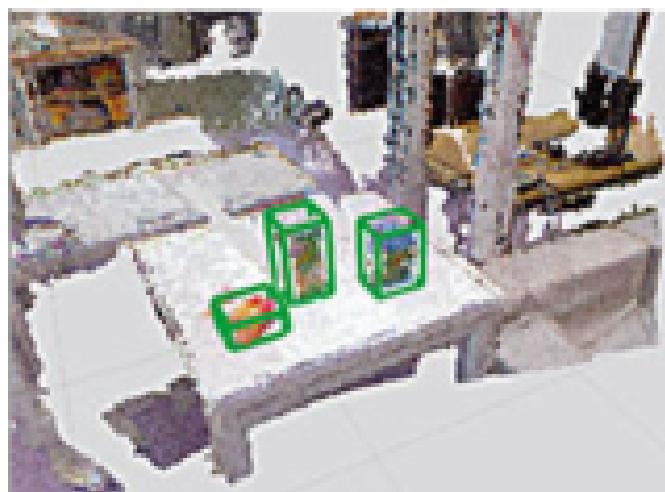


ABBILDUNG 3.6: Aufnahme dreidimensionaler Punktekarte mit Kamera  
Quelle: [IPA, 2014]

<sup>17</sup>Eine CCD Kamera verwendet ladungsgekoppelte Halbleiterbausteine, um das Sichtfeld in einzeln nummerierte Felder der Bildpunkte zu zerlegen. Jeder dieser Bildpunkte erhält einen eigenen Lichtintensitätswert, der durch Photodioden aufgenommen wird. Aus diesen Werten lässt sich das Bild zweidimensional entweder in einzelne Grauwerte oder Farbwerte aufteilen und darstellen [Nehmzow, 2002, S.39]

<sup>18</sup>Für die Objekterkennung wird das Kamerabild auf markante Merkmale untersucht, aus denen ein Modell abgeleitet werden kann. Dieses Modellbild liegt abgespeichert vor, um bei verändernden Lichtintensitäten dieses wieder zu erkennen. Des Weiteren geben die Marker des Modells Hinweise auf Geometrieformen. Dies gibt dem Roboter die Möglichkeit, sich selbst Objekte zu merken und zum Beispiel zu wissen, ob ein Tisch eckig ist und eine flache Platte besitzt oder das Glas oval und einige Zentimeter hoch ist. Mit diesem Wissen ordnet der Roboter die einzelnen erkannten Objekte in Kategorien ein [IPA, 2014]. So legt sich der Roboter selbst eine Wissensbasis an, in der er auf Basis der Kategorisierung und Objekterkennung immer wieder aufkommende Objekte sehr einfach, sicher und schnell identifizieren kann.

*Taktile Sensoren*

Weitere wichtige Funktionen von Sensoren sind die Wahrnehmung von Hindernissen bzw. Störungen in der unmittelbaren Umgebung bis hin zur Berührung. Der Roboter soll wie die menschliche Haut „fühlen“ können. Einfach realisieren lässt sich dies zum Beispiel durch Dehnungsmessstreifen, Metallfühler oder piezoelektrische Wandler. Neben den eher konventionellen Sensoren beschäftigt sich das Fraunhofer Institut mit einem taktilen Sensorsystem für Roboter, mit dem Ziel, das Umfeld sicher erkennen und den Menschen schützen zu können. Taktile Sensorsysteme basieren auf verteilten Drucksensoren, die mittels der Messung der Druckverteilung Berührungen feststellen können. Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie sind taktile Sensorsysteme am Roboter zur Kollisionserkennung, zur Überwachung des Arbeitsraumes durch taktile Fußbodenbeläge sowie zur Steuerung des feinen Greifprozesses (vgl. Kap. 3.1.2.4) eines Manipulators [IFF, 2013].

Bei der Kollisionserkennung verlangsamt oder stoppt der Roboter seine Bewegungen, wenn der Sicherheitsabstand entsprechend überschritten wird oder es zur Berührung kommt. Dieses zweistufige Sicherheitskonzept wird realisiert durch kapazitive Sensoren, die eine Annäherung eines Objektes erkennen und eine Verlangsamung der Roboterbewegung einleiten. Kommt es zu einer Kollision mit Überschreitung der definierten Wirkkraft, löst die Druckveränderung das sofortige Stoppen des Roboters aus. Auf die hier vorgeschriebenen Druck- und Kraftgrenzwerte wird im Kapitel 3.2.2.4 näher eingegangen. Ebenfalls ist die Forschung über taktile Sensoren soweit vorangeschritten, dass eine Arbeitsraumüberwachung durch ein verteiltes Drucksensorsystem auf dem Boden möglich ist. So stoppt der Roboter beim Eintreten eines Objektes in den definierten Bereich [IFF, 2013].

**3.1.2.2 Interne Sensoren***Zustandsmessung*

Um den inneren Zustand eines Roboters zu messen, gibt es eine Reihe von internen Sensoren. Die sogenannten propriozeptiven (selbstwahrnehmenden) Sensoren kontrollieren die Bewegungsabläufe [Norvig, 2012, S.1124]. Einfache Messungen sind zum Beispiel die Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsmessung. Des Weiteren ist die Messung der Kraft und des Drehmoments für die Greiffunktionen notwendig, um hierüber den richtigen Druck auf das zu haltende Bauteil auszuüben.

Um im Allgemeinen eine saubere Steuerungsregelung des Roboters zu realisieren, wirken geschlossene Regelkreise für die jeweiligen Größen. Mit Hilfe eines Regelkreises werden Abweichungen des Ist- und Wunschwertes einer Regelgröße gegebenenfalls korrigiert. In der Abbildung 3.7 ist schematisch eine parallele Kraft-/ Positionsregelung zu sehen, wobei die Regelung im äußeren Kraftregelkreis und im inneren Positionsregelkreis in diesem Beispiel dargestellt ist<sup>19</sup>. Mit Hilfe dieses Regelsystems werden Kräfte und die Positionierung eines Roboters sauber gesteuert. Gleiches Prinzip gilt für eine verbesserte Servoregelung oder Bahnbewegungssteuerung mit entsprechenden Regelkreisen.

Im Rahmen der Robotersteuerung sind zusätzlich adaptive und Fuzzy Regelungen notwendig. Wenn die Parameter des Soll-Wertes über die Zeit nicht stabil bleiben, sind Anpassung der Parameter notwendig [Dapper, 2004, S.6]. Wie bereits erläutert, bewegt sich ein autonomer Roboter in einer dynamischen Umgebung. Dies hat zur Folge, dass das System eines Regelkreises nicht ausreichend beschrieben werden kann, da einzelne Parameter nicht bekannt sind. In diesem Fall arbeitet die Robotik mit Fuzzy-Logiken, mit denen das gelernte Wissen des Roboters angewendet wird, um eigene Regelparameter zu definieren [Dapper, 2004, S.6]. Dies ist ein Teilbereich des maschinellen Lernens, worauf bereits im Kapitel 2.2.2 hingewiesen worden ist.

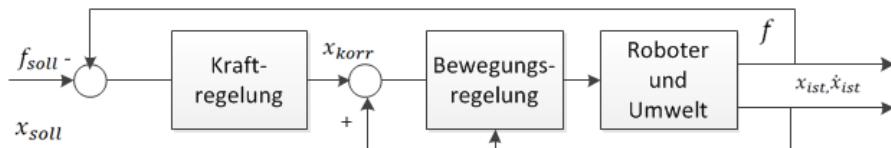


ABBILDUNG 3.7: Schematische Darstellung der parallelen Kraft-/ Positionsregelung  
Quelle: In Anlehnung an Milighetti [2010]

### Positionsermittlung

Außerdem wird über interne Sensoren die genaue Positionierung eines Robotergelenks gesteuert. Der Motor besitzt hierfür Drehimpulsgeber, die die Umdrehungen messen. Die Drehimpulsgeber werden vor allem bei mobilen Robotern für die Radumdrehungsmessung eingesetzt.

<sup>19</sup>Funktion des Kraft-/Positionsreglers: In den jeweiligen Regelkreisen wird die Differenz der Soll- und Ist-Werte ermittelt und korrigiert. Der im äußeren Regelkreis ermittelte Korrekturwert wird mit dem Sollwert des inneren Kreises verrechnet, wobei in diesem Fall die Kraftregelung eine höhere Priorität besitzt als die Positionsregelung. Kurz beschrieben bedeutet dies, dass eine saubere Kraftregelung gewünscht ist, auch wenn eine fehlerhafte Position entsteht [Milighetti, 2010, S.15]. Dies ist ein Beispiel für eine direkte Kraftregelung. Wenn eine unabhängige Regelung erwünscht ist, werden hybride Kraft-/Positionsregler eingesetzt. Zusätzlich gibt es die Impedanzregelung, die Krafteinwirkung bei einem Kontakt mit einem Objekt regelt.

Diese Verfahren stützen sich auf fest definierte Parametereingaben, die zum Beispiel durch Messungen festgelegt worden sind.

Damit liefern sie wichtige Informationen zur Positionsänderung als Teilinformation der Odometrie<sup>20</sup>. Zu den Odometriesensoren eines Roboters zählen kapazitive, induktive, magnetische oder optische Sensoren, die zusammen über die aktuelle Lage und Position des Roboters zu seinem Nullpunkt des Koordinatensystems, der Ausgangslage, Auskunft geben. Eine Schwäche von Odometriesensoren ist, dass sie bei externen Einflüssen, wie beispielsweise Wind, ungenau werden. Dies wird ausgeglichen durch Trägheitssensoren wie beispielsweise dem Gyroskop oder dem Global Positioning System (GPS) [Norvig, 2012, S.1124].

### 3.1.2.3 Aktuatoren

Für die Aktionsausführung werden Antriebs- und Manipulationssysteme benötigt. Als allgemeine Kraftquellen mobiler Roboter sind elektrische, pneumatische (Druckluft) oder hydraulische (Öl) Antriebssysteme denkbar. In der Praxis wird häufig der Elektromotor eingesetzt, da dieser ein sehr präzises Drehmoment für die Bewegungsabläufe sowie für den Manipulator hervorbringen kann [Nehmzow, 2002, S.42]. Bewirkt wird dies durch eine spezielle Art des Elektromotors, dem Servomotor. Dieser wird bei hohen Anforderungen der Positionsgenauigkeit angewendet und ist damit bedeutend für eine feine Robotersteuerung. An einem Servomotor sind zur Regelstruktur des Motors zusätzlich Regelkreise für die Lage, Drehzahl und Strom eingesetzt, die eine feine Lagerregelung (Positionierung) bewirken [Findeisen, 1994, S.72].

Des Weiteren besitzen mobile Roboter zur Fortbewegung Antriebsräder. Häufig verwendet werden bei Robotern omnidirektionale Antriebe, die in alle Richtungen fahren können und daher sehr manövrierfähig sind. Je nach Anwendungsfall sind weitere Aktuatoren denkbar, wie zum Beispiel Signalgeräte<sup>21</sup> oder Pumpen.

### 3.1.2.4 Sensorische Herausforderungen in der Robotik

Grunwald [2008][S.7] erklärt, dass das Tastsinnessystem eines Menschen aus verschiedenen Sensoren besteht, die ein Rezeptorgeflecht bilden. Dieses besitzt nach Schätzungen 6-10 Mio. Tastsinnesrezeptoren. Robotersysteme orientieren sich bei der Entwicklung eines adäquaten Sensorsystems an dem biologischen Tastsinnessystem. Doch da dieses hochgradig redundant

<sup>20</sup>Odometrie ist ein Navigationsverfahren zur Schätzung der Position und Orientierung eines Roboters im Raum. Durch zum Beispiel die Schrittzählung oder Radumdrehungsmessung werden die Daten ermittelt.

<sup>21</sup>Dies können Signallampen oder Signalrufe sein, die einen Gefahrenhinweis geben.

aufgebaut ist und zwischen den Rezeptoren und dem neuronalen System parallele Abläufe stattfinden, merkt Grunwald [2008][S.14] an, dass für autonome Roboter ein definierter dimensionsreicher Bereich des biologischen Tastsinnesystems lediglich möglich ist. Damit sind funktionale Einschränkungen des Roboters im Vergleich zum Menschen anzunehmen.

Ein Beispiel sensorischer Herausforderungen ist der Greifprozess eines Objektes. Der Mensch ist in der Lage, sowohl schwere und robuste als auch leichte und leicht-zerbrechliche Objekte zu greifen und zu heben. Das Fraunhofer Institut IFF [2016] beschäftigt sich mit diesem Forschungsgebiet und erklärt, dass für den Roboter der Greifprozess aufgrund der Objekterkennung und der adäquaten Krafteinwirkung schwierig ist. Zusätzlich würde der Roboter ein Herausrutschen des Objektes aus der Greifhand nicht bemerken. Der Fokus liegt bei seinem Forschungsansatz insbesondere auf dem gefühlvollen Greifen. Bei diesem muss die Kraftverteilung auf die Greiffläche fein abgestimmt sein. Mittels taktilen Sensoren wird an der Roboterhand die Druckverteilung gemessen und eingestellt, sodass ein optimales Einwirken der Kräfte auf das Objekt realisiert wird. Dies sichert ein beschädigungsfreies Greifen sowie die richtige Kraftdosierung, damit das Objekt nicht aus der Greifhand rutscht [IFF, 2016].

Ferner wurden Fortschritte bezüglich des Greifens unterschiedlich geformter Bauteile in der Forschung erlangt. Das Forschungsinstitut Sandia National Lab entwickelte eine modulare Roboterhand mit vier Fingern (vgl. Abb. 3.8), die einer menschlichen Hand technisch nachempfunden worden ist. Das Greifen eines rechteckigen festen Gegenstandes oder eines verformbaren Objektes wie einem Schwamm wird durch die Hand ermöglicht<sup>22</sup> [Sandia, 2015].



ABBILDUNG 3.8: Sandia Hand  
Quelle: Sandia [2012]

Dies sind Forschungsbeispiele, in denen der Schwerpunkt auf anthropomorphe Greifhände gelegt wird, die unförmige Objekte sicher heben und an einem anderen Ort ablegen können. Die

<sup>22</sup>Die Sandia Hand kostet inklusive Finger 10.000 US Dollar.

heutigen Lösungen sind sensorisch soweit ausgelegt, dass diese Anforderungen erzielt werden. Doch wie Grunwald beschreibt, umfasst dies nur ein Teil der menschlichen Fähigkeiten des Greifprozesses. So zum Beispiel ist die Entwicklung noch weit entfernt von dem Erlangen der menschlichen Greifgeschwindigkeit für den Roboter.

### 3.1.3 Lösungen für Navigationssysteme

Für das sichere Fortbewegen mobiler Roboter ist ein Navigationssystem unerlässlich. Da sich der Roboter in einem dynamischen Umfeld befindet, muss er das Wissen darüber haben, wo er sich gerade aufhält, wo das zu manipulierende Objekt ist und wie er gegebenenfalls zu seiner Zielposition gelangt. In einigen Anwendungen steht dem Roboter eine Navigationskarte zur Verfügung. Manchmal ist es aber auch notwendig, dass sich der Roboter seine eigene Karte anlegt. Letzteres wird auch unter dem Oberbegriff SLAM (Simultaneous Location And Mapping, Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung) zusammengefasst. Nachfolgend werden die bekanntesten Navigationsverfahren basierend auf Wahrscheinlichkeitsverfahren oder Systemen mit Signalen vorgestellt.

#### 3.1.3.1 Lokalisierung basierend auf Wahrscheinlichkeitsverfahren

Zu den Wahrscheinlichkeitsverfahren zählen zum einen die Koppelnavigation und die Landmarkennavigation zur Lokalisierung sowie die der SLAM-Algorithmus zur Erstellung einer Karte.

Die *Koppelnavigation* nimmt Bezug zu einem Referenzpunkt im Raum. Bezogen auf diesen Referenzpunkt wird die Bewegung und damit die Positionsänderung auf Basis der Fahrtrichtung, der Geschwindigkeit und der zurückgelegten Zeit des Roboters geschätzt [Nehmzow, 2002, S.103]. Ein solches Navigationssystem ist mit einfachen externen Sensordaten sowie der Odometrie des Roboters leicht zu implementieren, doch wird dieses Verfahren limitiert durch Driftfehler, die vor allem bei längeren zurückgelegten Wegen zu einem unkontrollierbaren Problem führen.

Bei dem Prinzip der *Landmarken* dienen künstliche Orientierungshilfen in der Umgebung, so genannte Merkmale, als Bezugspunkte. Mit Hilfe dieser Punkte kann sich der Roboter in der Umgebung zurechtfinden. Zusätzlich geben die einzelnen Merkmale dem Roboter eine geometrische Information, sodass auf deren Basis die Position des Roboters bestimmt werden kann [Wegener, 2004, S.41]. Die Driftfehler wie beim Kopplungsnavigationssystem sind bei der

Landmarken-Methodik eliminiert. Jedoch hat dieses Verfahren den Nachteil, dass es von einer hinreichenden Menge von identifizierbaren Merkmalen abhängig ist und eine Überlappung der Messungen aus den Merkmalen zu Fehlinformationen führt.

Um diese Unsicherheiten der zwei erläuterten Verfahren einzudämmen, bedient sich diese stochastischer Methoden. Hierzu werden in der Literatur zwei wesentliche Verfahren für die Navigation erläutert: der Kalman-Filter und die Monte-Carlo-Lokalisation [Wegener, 2004, S.40/41]. Grundlage des Kalman-Filters ist die Wahrscheinlichkeitsrechnung, die mittels der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung<sup>23</sup> eine Aussage über die ungefähre Position des Roboters macht. Somit wird eine genauere Schätzung der Roboterlokalisierung vorgenommen. Dieses Verfahren verliert jedoch die Genauigkeit bei komplexen Wahrscheinlichkeitsdichten. In diesen Fällen wird das Verfahren der Monte-Carlo-Lokalisation herangezogen, das mit sogenannten Samples<sup>24</sup> arbeitet, die eine mögliche Roboterposition ausdrücken [Wegener, 2004, S.40/41]. Somit erzielt das Monte-Carlo Verfahren ein feineres Ergebnis der Lokalisierung.

Wenn die Lokalisierung des Roboters bekannt ist, bleibt die Frage offen, in welchem Bereich einer Raumkarte er sich befindet. Doch sind für einige Anwendungen keine definierten Karten vorhanden. Der *SLAM-Algorithmus* verfolgt deshalb zwei Ziele, zum einen soll der Roboter seine eigene Kartierung erstellen und zum anderen seine tatsächliche Position in Bezug zur Karte ermitteln. Schwierig hierbei ist, dass sich beide Aufgaben gegenseitig bedingen. Der Roboter soll sich im Bezug zu einer Karte lokalisieren können, obwohl er die Karte nicht kennt und diese erst selbst anlegt<sup>25</sup> [Norvig, 2012, S.1134].

Die Komplexität der SLAM Navigation unterscheidet sich nach den Anwendungen. Ein Assistenzroboter mit einer mobilen Plattform ist oftmals mit hochfrequentierten Laserscannern ausgestattet, die den Abstand zu Objekten oder Hindernissen messen, sodass der SLAM-Algorithmus diese Odometriedata in einer zweidimensionalen Karte verarbeitet. Deutlich schwieriger gestaltet sich die Kartierung bei einem Manipulator mit mehreren Freiheitsgraden. Zwar ist dieser

<sup>23</sup>An einem speziellen Ort besitzt die Verteilung ein absolutes Maximum. Bewegt sich der Roboter im Raum, gibt es nur noch lokale, kleinere Maxima, die das Maß der Unsicherheit der Lokalisierung darstellen. Zur Schätzung des Ortes des lokalen Maximums und zum Fusionieren der Driftfehler dient der Kalman-Filter. Dieser bildet aus den einzelnen Werten der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung und unter Annahme der Normalverteilung den Mittelwert (lokales Maximum) sowie die Varianz (Breite der Glocke).

<sup>24</sup>Die Monte-Carlo-Lokalisation fügt zum Erwartungswert und der Varianz eine dritte Größe hinzu, die Menge von Samples. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Roboter an einem Sample befindet, wird gewichtet und mit der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung approximiert [Wegener, 2004, S.40/41]

<sup>25</sup>Insgesamt besteht die SLAM-Methode aus drei Prozessschritten zur Erstellung einer Karte. Beim Frontend werden die Rohdaten der Sensoren in geometrische Daten erfasst. Das Backend stellt die geometrischen Daten in Relationen zu allen Objekten, um einen räumlichen Zusammenhang zu generieren und die Bahnführung des Roboters zu erschließen. Mit dem Post-Pressing wird eine dreidimensionale Karte probabilistisch erschlossen [Burgard, 2012, S.272]

an einem Ort fest, doch muss er seine Objekte in der Umgebung in einem dreidimensionalen Raum wahrnehmen, um Kollisionen zu vermeiden. Für die dreidimensionale Raumpräsentation werden RGB-D Sensoren (3D Tiefen- und Farbkameras) benutzt, um sowohl den Abstand zu messen als auch die Objekte zu erkennen und zu klassifizieren (vgl. Kap. 3.1.2.1) [Burgard, 2012, S.270/271].

### 3.1.3.2 Lokalisierung basierend auf Signalen

Die WLAN basierte Lokalisierung ist ein Verfahren, um die Position eines Gerätes im Raum zu ermitteln. Hierzu sind ein bis mehrere Netzwerke notwendig anhand derer sich ein Roboter orientieren kann. Ein Beispiel ist das Produkt Chorones. Dieses ist in der Lage, im Zentimeterbereich die Position eines Gerätes zu bestimmen. Das System berechnet die benötigte Zeit eines Signals, um von einem Gerät (Roboter) zu einem anderen Gerät (Router) zu gelangen. Aus diesem Wert wird mittels eines Algorithmus der Abstand sowie der Winkel ermittelt, auf Basis dessen die aktuelle Position ermittelt wird [Katabi, 2016]. Die Berechnung der Lokalisierung wird umso genauer je mehr Netzwerke sich in seiner Umgebung befinden<sup>26</sup>.

Das Global Positioning System (GPS) ist eine Entwicklung des amerikanischen Verteidigungsministeriums, das basierend auf Radiowellen die Position auf den Meter genau bestimmen kann. Das GPS System umfasst 24 Satelliten, die auf insgesamt sechs Bahnebenen um die Erde verteilt sind<sup>27</sup>. Anwender eines GPS-Gerätes erhalten von den Satelliten ein Signal, in Folge dessen das Gerät seine eigene Position, Zeit oder Geschwindigkeit bestimmen kann. Dabei können GPS-Geräte lediglich Signale empfangen, jedoch nicht versenden. Neben der Positions- und Zeitbestimmung ist ebenfalls die Navigation über das GPS möglich. Mittels GPS kann die zukünftig erwünschte Lage ermittelt und die Route zu dieser ausgelesen werden [NASA, 2014].

Bei der RFID-basierten Navigation eines Roboters sind passive RFID Tags in der agierenden Umgebung eines Roboters auf dem Boden verteilt. Diese tragen jeweils die Information ihrer aktuellen Position in ein Koordinatensystem. Der Roboter besitzt ein RFID Lesegerät, mit dem die Informationen ausgelesen werden können und dieser sich damit im Raum orientieren kann. Die Positionsermittlung sowie die Berechnung des Pfades zu einem nächsten Ort wird über Algorithmen berechnet [Kundu, 2015, S.189].

<sup>26</sup>Weitere bekannte Anbieter dieser Funktion sind OpenWLANMap oder Mozilla Location Service.

<sup>27</sup>Der Abstand der Satelliten zur Erde beträgt 20.2000 km mit einem Neigungswinkel zum Äquator von 55 Grad. Dabei umkreisen die Satelliten die Erde alle 12 Stunden.

### **3.1.4 Software für die Robotersteuerung**

Assistenzroboter können in verschiedenen Umgebungen mit ganz unterschiedlichen Aufgaben zum Einsatz kommen. Die daraus resultierende Vielzahl von Hardwarekomponenten stellt große Herausforderungen an die Software. Demnach müssen unterschiedliche Schnittstellen, Programme oder Programmiersprachen der einzelnen Komponenten vom Betriebssystem des Roboters verstanden werden. Diese Aufgabe wird der Middleware zugeteilt. Um heterogene Komponenten in einem System zu integrieren und gleichzeitig gute Voraussetzungen für eine weiterführende Softwareentwicklung zu schaffen, wurden in den vergangenen Jahren Middleware-Lösungen entworfen. Beispiele hierfür sind Microsoft Develop Network (MSDN) von Microsoft, das RS-Framework vom Fraunhofer Institut oder das Robot Operation System (ROS) der Firma Willow Garage [Hochgeschwender, 2013]. Nach heutigem Forschungsstand ist eine Open Source Anwendung vorhanden, doch ist die Entwicklung einer Middleware für einen universellen Einsatz noch ausstehend [VDI/VDE, 2013b]. Auf die einzelnen Middleware Lösungen soll an dieser Stelle nicht tiefer eingegangen werden. Vielmehr ist ein Einblick in die wesentlichen Funktionen der Middleware, die Interoperabilität und Kontexterstellung, interessant für die Funktionsweise eines Assistenzroboters. Zusätzlich werden hierzu neue zukünftige Entwicklungsansätze aufgezeigt.

#### **3.1.4.1 Middleware und Interoperabilität für kohärente Systeme**

Das Fachgebiet der Wissensrepräsentation beschäftigt sich mit der Frage, wie Wissen von Informationsgebern, wie zum Beispiel Sensoren, so aufbereitet werden kann, dass andere Geräte dieses verstehen. Bei der Kommunikation zwischen einem Sender und Empfänger werden Informationen ausgetauscht, die in einer bestimmten Sprache ausgedrückt werden. Jede Sprache besitzt eigene Symbole, deren Anordnung, die Syntax, schließlich die Bedeutung bzw. den Informationsgehalt wiedergeben. Um nun ein gemeinsames Verständnis zwischen dem Sender und Empfänger sicherzustellen, muss der Inhalt so aufbereitet werden, dass dieser von allen verstanden werden kann. Hierfür ist die Interoperabilität eine wesentliche Voraussetzung. Die Interoperabilität unterteilt sich in die in der Abbildung 3.9 dargestellten drei Ebenen.

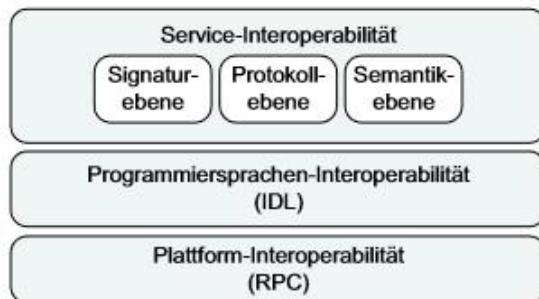


ABBILDUNG 3.9: Ebenen der Interoperabilität

Quelle: [Strang, 2004]

Als Basis fungiert die Middleware des Systems. Die Middleware enthält alle laufenden Kommunikationsprotokolle durch den Remote Procedure Calls (RPC), der einen rechnerübergreifenden Funktionsaufruf ermöglicht. Des Weiteren ist der RPC in der Lage, mittels eines Client auf einem anderen Rechner Methoden durchführen zu lassen, um Ausgabeparameter anderer Geräte abzufragen und auf dem lokalen Rechner abzuspeichern. Zusätzlich wirken in der Middleware Verfahren zur Codierung und De-Codierung einzelner Parameter, damit ein Informationsaustausch der verschiedenen Hardwarekomponenten und deren unterschiedlichen Betriebssysteme ermöglicht werden kann [Strang, 2004]. Um das Problem der unterschiedlichen Programmierungssprachen der einzelnen Hardwarekomponenten zu lösen, wirkt die Interface Definition Language (IDL) in der Funktion eines „Dolmetschers“, sodass unterschiedliche Sprachen wie zum Beispiel Java oder C++ in heterogenen Systemwelten verarbeitet werden können [Strang, 2004]. Dabei können über diese Ebene nicht nur Daten empfangen, sondern auch gesendet werden. Die hierfür notwendige Umwandlung der Datenformate wird vom RPC vorgenommen, sodass ein Wechselspiel beider Ebenen stattfindet.

In der Serviceebene handelt es sich um die Aktion bzw. Interaktion von Diensten, die zum einen genutzt werden, um Informationen zu beschaffen oder um Aktionen ausführen zu lassen. Dabei müssen Dienste interoperabel, d.h. ersetzbar und kompatibel, sein. Die Ebene Service-Interoperabilität unterteilt sich in die Module protocol, signature und semantic level. In der Protokollebene wird die Ordnung der Kommunikationsprotokolle festgelegt. Die Signaturebene ist für eine exakte Schnittstellenbeschreibung verantwortlich [Strang, 2004].

Die Semantikebene greift das Problem auf, dass die Informationen zwischen zwei Diensten nicht immer gleich verstanden werden. Mittels Ontologien wird das Verständnis zwischen zwei

Diensten sichergestellt, indem jeder einzelnen Information eine Bedeutung bzw. Semantik gegeben wird. Ontologien können in der Sprache Web Ontology Language (OWL)<sup>28</sup> modelliert werden, die semantisch durch eine Beschreibungslogik aufbereitet werden. Dabei besitzt jede Semantik eine Syntax (Symbole der Sprache), die im XML-Format vorliegt und mit Hilfe eines Resource Description Framework (RDF) verarbeitet wird. Der Aufbau einer solchen semantischen Abfolge wird übergreifend unter dem Begriff Semantisches Web zusammengefasst. Der VDI/VDE stellte den graphischen Aufbau des semantischen Webs wie folgt dar:

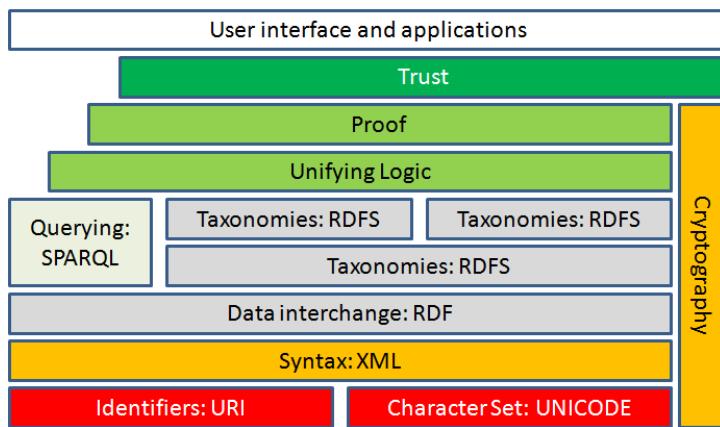


ABBILDUNG 3.10: Semantic Web  
Quelle: In Anlehnung an VDI [2015]

Für die Kommunikationsfähigkeit eines Assistenzroboters ist das Erzeugen von Kontextwissen von großer Bedeutung. Wissen wird dem Roboter nicht direkt mitgeteilt, sondern erschließt sich aus einem Zusammenhang. Hierbei ist wichtig, die einzelnen Eigenschaften des Kontextes zu verstehen. In einer dynamischen, sich ständig verändernden Umgebung ist auch der Kontext dynamisch. Die Kartierung des Navigationssystems oder die Temperatur, der Druckt etc. können von sich ständig ändernden Umgebungsparametern abhängig sein. Des Weiteren ist es interessant, einzelne Informationen und deren Beziehung zueinander zu betrachten. Informationen können sich bedingen, ausschließen oder eine neue Information generieren, weshalb die Beziehungen einzelner Informationen wichtig für die Kontextpräsentation und -interpretation sind [de Causmaecker; Ahmet Soylu; Piet Desmet, 2009]. Zuletzt muss das System die Unvollkommenheit von Daten berücksichtigen können. Es muss davon ausgegangen werden, dass zum Beispiel Sensordaten fehlerbehaftet sein können. Wissentlich über diese Fehlerquelle nimmt die Kontextbildung eine wichtige Bedeutung für fehlertolerantes Verhalten eines Assistenzroboters ein.

<sup>28</sup>Weitere Quelle:  
OWL Web Ontology Language Overview: <http://www.semaweb.org/dokumente/w3/TR/2004/REC-owl-features-20040210-DE.html>

Nachdem die Eigenschaften des Kontextes bekannt sind, bleibt die Frage offen, wie Kontext erzeugt werden kann. Hierbei wird das Prinzip der Kategorisierung einzelner Informationen angewendet. Es gibt verschiedene Ansätze, die allerdings grundlegend das gleiche Prinzip besitzen. Rohdaten werden in einer Ebene vieler unterschiedlicher Kategorisierungen aufgenommen und in der nächsten Ebene soweit zusammengetragen und verarbeitet, dass daraus in Verknüpfung anderer Informationen eine umgewandelte bzw. interpretierte Information entsteht [de Causmaecker; Ahmet Soylu; Piet Desmet, 2009]. Diese Information ist folglich aus dem Kontext entstanden<sup>29</sup>. Ein Beispiel hierfür ist die Angabe einer aktuellen Position. Einzelne Metadaten befinden sich in der ersten Kategorisierung, die anschließend in der nächsten Ebene soweit verknüpft werden, dass die Information einer genauen Ortsbezeichnung daraus abgeleitet werden kann.

Zusammenfassend betrachtet, ist die Interoperabilität die Schlüsselfunktion eines Assistenzroboters, um Informationen einzelner Geräte aufnehmen und verarbeiten zu können. Zugleich ist dies die Basis einer intuitiven Mensch-Roboter-Kommunikation (vgl. Kap. 3.1.5) und für die Realisierung einer digitalen Fertigung (vgl. Kap. 4.3.1.4). Hinsichtlich der Kontextbildung werden Softwarelösungen aufgrund des Bildens von Zusammenhängen immer komplexer. Aus diesem Grund stellen Assistenzroboter bzw. allgemein autonome Roboter eine sehr hohe Herausforderung an die Softwareentwicklung. So zum Beispiel bestehen bereits Ideen des assoziativen Routings als eine Funktion des effektiven und effizienten Generierens von Protokollen in der Semantikebene und unterstützend für das Sensornetzwerk [Elteweissy, 01.12.2011]. Aktuell gibt es eine Vielzahl von einzelnen Softwarelösungen für Roboteranwendungen, die diese Herausforderung individuell lösen. Doch Forschungsinstitute sehen genau in diesem Bereich den Bedarf einer universellen Software-Lösung. Zusätzlich verfolgen Experten den Ansatz eines Organic Computers. Ein Ausblick in die heute diskutierten Themen wird im nachfolgenden Abschnitt gegeben.

### 3.1.4.2 Zukünftige Softwareeigenschaften

Der im April 2016 veröffentlichte Statusreport des Konsortiums VDI, VDE und ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie) wurde verfasst, um die Weiterentwicklung des Referenzarchitekturmodells für die Industrie 4.0 Komponente zu beschreiben. Darin werden hauptsächlich Merkmale, Eigenschaften und Formen einer möglichen Verwaltungsschale für die

<sup>29</sup>Weitere Quelle: Dey, Anind K.; Abowd, Gregory D. (1999) *Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness*

Industrie 4.0 Komponenten thematisiert. Der Fokus liegt auf einem universellen Ansatz für IT-Strukturen und IT-Dienste. Tiefer eingegangen wird in diesem Report auf die Standardisierung von Vokabular bzw. Symbolen (Syntax) für die semantische Interoperabilität. Hintergrund dieses Forschungsansatzes ist die heute teilweise sehr fest standardisierte Systemintegration. Doch Standards zu bilden, ist ein sehr aufwendiger und langjähriger Prozess, vor allem im Hinblick auf die Vernetzung heterogener Geräte [VDI, 2015]. Aus diesem Grund plädieren die Institute für einen agilen Ansatz zur Entwicklung eines kollaborativen Vokabulars [Auer, 2016]. Der VDI verfolgt den Ansatz, Agilität im Hinblick auf die sich dynamisch vielfältig entwickelten Vokabularien zu erzielen. Bereits im vorangegangenen Abschnitt wurde die Aufbereitung der Datenformate von Sendequellen erklärt. Vorstellbar ist, dass das System bei der Zunahme der Komplexität externer Sendequellen belastet oder fehleranfälliger wird. Aus diesem Grund wurde an einer Versionierung des Vokabulars mit dem verteilten Verwaltungsprogramm Git gearbeitet. Mit dem Produkt Git4Voc wird der Software Plattform die Möglichkeit gegeben, sich effektiv und effizient bezüglich der Anpassung von sich verändernden Einflüssen und der Vielfalt des Vokabulars zu entwickeln [VDI, 2015].

Weitere Entwicklungsarbeiten zielen auf Software-Lösungen, die wiederverwertbar und universell anwendbar sind. Hierbei kommt begleitend die Frage auf, wie ein universelles Testsystem für verschiedene Roboter in unterschiedlichen Umgebungen und Anwendungen entwickelt werden kann. Die Open Source Anwendung ROS ist bereits eine genutzte Standardsoftwarelösung. Für eine weitere Entwicklung dieser Software arbeiten weltweit Unternehmen im Rahmen des 2013 gegründeten Konsortiums ROS-Industrial zusammen. In Europa ist das Fraunhofer IPA Stuttgart entscheidend an Forschungsarbeiten beteiligt [ROS Industrial, 2013], so auch für die Entwicklung eines universellen Testsystems. Wie eingangs erläutert, wird die Sicherheit des Gesamtsystems vor allem durch die Software bestimmt. Folglich ist eine ständige Überprüfung der Softwarefunktionalität und Qualität wichtig, um frühzeitig Fehlfunktionen aufzudecken. Aus diesem Grund wurde an einer automatisierten Auswertungs- und Testplattform zur Überprüfung der Software gearbeitet. Daraus entstand die Lösung eines Test-Frameworks, welches Standardtests für die Simulation (simulation-in-the-loop) und Hardwareüberprüfungen (hardware-in-the-loop) durchführt [Thiago De Freitas Oliveira Araujo, 2014].

Des Weiteren ist im Hinblick auf die Vernetzung mehrerer Geräte in einer Produktion zu berücksichtigen, dass die Software nicht nur für das einzelne Gerät, sondern für das Gesamtsystem sicher sein muss. Unter „Security by Design“ wird der Ansatz verstanden, dass bereits mit Beginn

des Entwurfes einer Software die IT-Sicherheit integriert wird, die für den gesamten Lebenszyklus besteht. Dies bedeutet, dass IT-Sicherheit und Datenschutz ein Bestandteil des Softwareentwicklungsprozesses werden müssen. Um diese Entwicklung voranzutreiben wurde in Deutschland im Jahr 2015 in Darmstadt das größte Kompetenzzentrum für IT-Sicherheitsforschung in Europa gegründet, welches finanziell vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit rund 17 Millionen EUR unterstützt wird [BMBF, 2015]. In unterschiedlichen IT-Sicherheits-Forschungszentren werden die folgenden drei offenen Forschungsthemen gegenwärtig betrachtet: Entwicklung eines sicheren Softwaredesignprozess, die sichere Integration verschiedener IT-Systeme und Sicherheitslösungen sowie Analyseverfahren der Sicherheitslücken [TU Darmstadt, 2015, S.4].

Ein weiterer Zukunftsgedanke, der teilweise in der Entwicklung weit vorangeschritten ist, ist der Ansatz Organic Computing. Organic Computing wurde 2005 im Zusammenschluss der Institutionen VDI/ITG (Informationstechnischen Gesellschaft) und der Gesellschaft für Informatik (GI) ausgearbeitet [Seebach, 2011, S.13]. Hintergrund dieses Schwerpunktes war die Entwicklung von Rechnern, die für den Menschen unmerklich allgegenwärtig sind. Computersysteme sind zunehmend ständiger Begleiter des menschlichen Lebens. So entstand der Ansatz, biologisch natürliche Computersysteme zu entwickeln, die sich dem Menschen anpassen. Der Begriff Organic Computer umfasst die fünf wesentlichen self-x Eigenschaften eines Systems: selbst-organisierend, selbst-konfigurierend, selbst-optimierend, selbst-heilend und selbst-schützend [VDI/ITG/GI, 2010]. Damit sich der Mensch während der Interaktion mit dem Computer auf diesen verlassen kann, wurden diese natürlichen Kriterien als Voraussetzung entwickelt. In einem konkreten Anwendungsfall sollen autonome Roboter in der Fertigung im Gesamtsystem beispielsweise Systemausfälle oder -überlastungen erkennen und über die Vernetzung aller Geräte die einzelnen Maschinen bzw. Roboter so steuern können, dass der Engpass bestmöglich aufgefangen wird. Eine derartige Automatisierung des Systems ist selbst-optimierend, selbst-heilend und selbst-konfigurierend [VDI/ITG/GI, 2010]. Für die Softwaregestaltung zur Realisierung dieser Eigenschaften ist, wie zuvor beschrieben, ein dynamisches Software-Systeme unerlässlich, um die Interoperabilität der kohärenten Geräte zu gewährleisten. Darüber hinaus wird in dem Ansatz des Organic Computing das kontext-sensitive „Verhalten“ eines Roboters beschrieben. Der Roboter muss in der Lage sein, über sein vorhandenes Wissen die Belange des Menschen assoziativ zu erkennen und darauf zu reagieren. Über seine Sensoren nimmt er die Umgebung war und erzeugt neues Wissen aus dem Kontext, um somit dem Anwender zum Beispiel über Bedienschnittstellen kontextsensitive Informationen oder

Suchen im Internet vorzuschlagen [VDI/ITG/GI, 2010]. Die Ansätze des Organic Computing sind teilweise aus dem privaten Bereich bekannt, wo beispielsweise das eigene Smartphone Kalendereinträge aus einem E-Mail-Text vorschlagen oder dem Nutzer bei seiner Rückkehr vom Restaurantbesuch automatisch Restaurantbewertungen anbieten kann.

Diese Ansätze der neuen Softwaregestaltung sind vor allem auf eine intuitive Kommunikation mit dem Menschen ausgerichtet. Die Software bzw. der Computer, die zunehmend ubiquitär in der Gesellschaft verbreitet sind, sollen sich dem Menschen unmerklich anpassen und ihm Funktionen zur Verfügung stellen. Im privaten Bereich findet dieser Ansatz bereits eine große Anwendung, Beispiele und Anwendungen aus dem Produktionsbereich sind jedoch aufgrund der Datensicherheit schwierig umzusetzen (vgl. Kap. 4.2.4).

### 3.1.5 Multimodale Kommunikation

Wenn Mensch und Roboter in einem Arbeitsraum interagieren und gemeinsam an einem Prozess oder sogar an einem Werkstück arbeiten, stellt sich die Frage, wie eine Kommunikation beider Prozessteilnehmer realisiert werden kann. Herkömmliche Methoden realisierten die Kommunikationsschnittstelle einfach über die Tastatur- bzw. Mauseingabe. Doch ist basierend auf dem Ansatz des Organic Computing eine natürliche und intuitive Interaktionsform wünschenswert. In den vergangenen Jahren wurden multimodale Kommunikationstechniken bezüglich Sprach-, Gestik- und Mimikerkennung entwickelt. Für die Betrachtung von fertigungstechnischen Abläufen ist die Gestik- und Mimikerkennung weniger von Interesse und soll an dieser Stelle nicht tiefer betrachtet werden<sup>30</sup>.

Aus dem privaten Bereich sind bereits Sprachsteuerungsmöglichkeiten bekannt. Textnachrichten mit einem Smartphone, die Navigationssystembedienung im Auto oder die Bedienkommunikation über Siri mit einem Apple I-Pad sind Beispiele aus dem heutigen gängigen Gebrauch von Spracherkennungssystemen. Nachfolgende Beschreibung der Spracherklärung soll einen Einblick in dessen Funktionsweise geben.

Die Sprachkommunikation erfolgt einfach beschrieben über die Aneinanderfügung von einzelnen Worten. Das einzelne gesprochene Wort ist wiederum ein akustisches Signal. Eine besondere Herausforderung der Spracherkennung ist die eindeutige Aufnahme der gesprochenen Worte.

---

<sup>30</sup>Weitere Quellen:  
Bertsch, Florian A. *Visuelle Gestenerkennung zur Interaktion zwischen Mensch und Roboter*  
Wölfel, Matthias (2014) *3D Gestenerkennung als moderne Mensch-Maschine-Schnittstelle*

Wenn ein Roboter mit einer beliebigen Person in Interaktion treten soll, dann muss sich die Spracherkennung auf Zweideutigkeiten oder eine unsaubere Artikulation einstellen können. Die Methodik zur Lösung dieser Herausforderung ist, wie bereits beim Navigationssystem, die Wahrscheinlichkeitsrechnung. Hierzu unterteilt sich die Spracherkennung in ein Akustikmodell<sup>31</sup>, das die Laute von Wörtern beschreibt, und ein Sprachmodell, das die A-priori-Wahrscheinlichkeit der auftretenden Wortfolge untersucht [Norvig, 2012, S.1055].

Problematisch ist die unterschiedliche Aussprache einiger Wörter, beispielsweise durch nuschen oder Dialekte. Diesem Problem wird im Sprachmodell entgegengewirkt. Unter der Markov-Annahme, dass der aktuelle Zustand eines Wortes immer nur von einer festen Anzahl (n) vorheriger Zustände abhängig ist [Norvig, 2012, S.1055] und das Wort als Zufallsvariable mit unendlich vielen Werten betrachtet wird, wird über die Wahrscheinlichkeitsrechnung die Anzahl an gesprochenen Wörtern geschätzt. Gleichzeitig wird das Sprachmodell unterstützt durch einen definierten Korpus von Texten und Sätzen der natürlichen Sprache<sup>32</sup>. Diesem wird zusätzlich die Häufigkeit einer verwendeten Phrase angegeben, um die Schätzung der ermittelten Wörter und Sätze nochmals zu verstärken [Norvig, 2012, S.1055]. Diese Art der statischen Spracherkennung hat sich nach heutigem Forschungsstand durchgesetzt [Norvig, 2012, S.1055]. Neben der natürlichen Sprachkommunikation bleibt weiterhin die Möglichkeit der direkten Eingabe bestehen wie zum Beispiel auf Basis von Tablets mit Touch-Screen.

### 3.1.6 Programmierung durch Vormachen

Eines der jüngsten Technologien der Roboterentwicklung ist die Programmierung eines Roboters durch Vormachen. Der Roboter soll dabei selbst durch das Vorführen des Menschen dessen Bewegungsabläufe aufnehmen und diese Tätigkeitsabfolge als Programmierungstext erfassen, interpretieren und anschließend selbst ausüben. Am Manipulator des Roboters sind zusätzliche Kraft-Momenten-Sensoren montiert, die den Druck der Zieh-, Drücken- oder Drehbewegung des Menschen aufnehmen [IPA, 2007]. Die Information des Drucks lässt wiederum auf die zurückgelegte Wegstrecke schließen, sodass der Roboter seine Bahnführungen kennt. Programmierung durch Vormachen wird heute bereits erfolgreich bei Schweiß- oder Klebearbeiten angewendet

<sup>31</sup>Das Akustikmodell ermittelt die Frequenz eines Wortes über die Schallwellen. In der Linguistik wurden insgesamt 100 Sprachlaute identifiziert [Norvig, 2012, S.1055], sodass aus den einzelnen Frequenzen der Laute die Wörter erkannt werden können.

<sup>32</sup>Um für den industriellen Einsatz eine noch sichere Spracherkennung zu realisieren, kann ein anwendungsspezifisches Vokabular im Korpus hinterlegt werden.

[IPA, 2007]. Die einzige Schwierigkeit, die sich hierbei darstellt, ist das fehlertolerante Verhalten, wenn etwa das Werkstück an einer leicht veränderten Position liegt. Das Fraunhofer Institut entwickelte hier an der eigenen Programmierungsumgebung *InTeach* weiter, um eine höhere Flexibilität zu erlangen [IPA, 2007]. Im Allgemeinen arbeiten die Entwickler bei diesem Problem an Algorithmen, die die Lernfähigkeit des Roboters unterstützen.

Eine ganz andere Art der interaktiven Roboterprogrammierung ist die Benutzung eines technischen Datenhandschuhs (vgl. Abb. 3.11). Das Forschungszentrum von Siemens in Peking beschäftigt sich mit dieser neuen Technologie, die sich noch in der Entwicklungsphase befindet. Der Handschuh ist so konzipiert, dass er Daten über die Bewegungsausführung sowie den einwirkenden Druck auf einen Gegenstand aufnimmt und direkt dem Roboter überspielt. Dabei messen Magnetsensoren und Trägheitssensoren im Handschuh die Muskelkraft und die Bewegung der Sehnen jedes einzelnen Fingers und überführen diese Daten an die Steuerung des Robotergreifers [Zhuo, 2016]. Entsprechende Algorithmen sorgen dafür, dass die Handschuhbewegung in den Bewegungsablauf des Greifers geschrieben wird. Anschließend kann der Roboter die Abläufe selbst ausüben. Großer Vorteil dieser Technologie ist, dass dem Roboter sehr komplexe feinfühlige Bewegungen angelernt werden können [Zhuo, 2016].



ABBILDUNG 3.11: Entwicklung eines Datenhandschuhs bei Siemens  
Quelle: [Zhuo, 2016]

## 3.2 Rahmenbedingungen für eine sichere Kooperation

Mit der Entwicklung kooperierender Roboter entstand der Bedarf, Rahmenbedingungen wie Normung und Zertifizierung neu zu definieren. Zum einen sind neue Anforderungen an die Betriebssicherheit zu stellen, um den Menschen auch ohne einen Käfig vor dem Roboter zu schützen. Zum anderen wird durch die Industrie 4.0 eine Vernetzung der Produktionsanlagen immer mehr in den Mittelpunkt gestellt. Die Absicherung eines unbefugten Datenzugriffs auf eine Maschine ist daher ein weiterer Aspekt, der neu beleuchtet werden muss. Nachfolgend werden die

wesentlichen Normen für kooperierende Roboter erklärt. Eine Auflistung aller relevanten Normen und Richtlinien ist hierzu im Anhang A.1 zu sehen. Des Weiteren werden Anforderungen an eine sichere Technik sowie die IT-Sicherheit beschrieben.

### 3.2.1 Relevante Normen für kooperierende Roboter

Für die Regelung der Sicherheit von kooperierenden Arbeitssystemen sind die Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) und die zweiteilige EN ISO 10218<sup>33</sup> von großer Relevanz. Diese wurden mit dem Trend von kooperierenden Robotern angepasst und sind heute das Ergebnis einer einheitlich abgestimmten Richtlinie aller EU-Länder, die den freien Warenverkehr im innereuropäischen Wirtschaftsraum von kooperierenden Robotern ermöglicht.

Die *Maschinenrichtlinie (2006/42/EG)* wurde in den einzelnen Ländern in deren nationales Recht überführt. So sind beispielsweise ihre Inhalte in Deutschland im Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktionssicherheitsgesetz) festgeschrieben [VDMA, 2016, S.3]. Mit der EG-Konformitätserklärung erklärt ein Unternehmen oder ein Importeur von kooperierenden Robotern, dass dieser mit seinem Produkt die europäisch abgestimmten Anforderungen der Maschinenrichtlinie einhält, um so die Grundlage für die CE-Kennzeichnung einer vollen Maschine zu erlangen. Eine komplette Roboterapplikation ist eine vollständige Maschine. Der einzelne Industrieroboter oder Assistenzrobote wird als unvollständige Maschine deklariert und benötigt keine CE-Kennzeichnung, sondern lediglich eine Einbauerklärung [VDMA, 2016, S.3]. Die hierfür geltenden sicherheitskritischen Anforderungen an einen Roboter sind in der EN ISO 10218 verfasst und geregelt.

Die *EN ISO 10218* beschreibt ein kooperierendes Arbeitssystem als einen Zustand, in dem der für seine Tätigkeit programmierte Roboter mit einem Menschen in einem fest definierten Arbeitsbereich zusammenarbeitet. Dabei betrachtet sie den Einsatz von kooperierenden Robotern ausschließlich im produzierenden Bereich und schreibt hierfür nachfolgende vier Schutzprinzipien vor:

1. Sicherheitsgerichteter überwachter Stillstand: Dieses Sicherheitsprinzip richtet sich an Assistenzroboteranwendungen, bei denen der Roboter selbstständig arbeitet, ohne dass ein Mensch in den Prozess eingreift. Aus diesem Grund gibt diese Anforderung vor, dass

<sup>33</sup>DIN EN ISO 10218-1:2011 „Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter“  
DIN EN ISO 10218-2:2011 „Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration“

die Bewegung des Roboters sofort stoppen muss, wenn der Mensch den definierten Arbeitsraum betritt. Nach EN 61800-5-2 (Safe Operation Stop) werden alle Antriebssysteme nach dem sofortigen Stopp in einen sicheren Betriebshalt überführt [DGUV, 2015a, S.55]. Die Antriebe gehen wieder in den aktiven Zustand über, wenn der Mensch den Arbeitsraum verlassen hat.

2. Handführung: Während sich das erste Schutzprinzip auf die getrennte Arbeitsform bezieht, richtet sich das zweite Schutzprinzip auf die direkte kooperierende Arbeitsform mit Berührung. Dies ist der Fall, wenn der Roboter durch die Hand in einem Raum geführt oder durch Vormachen umprogrammiert wird. Die Norm schreibt in diesem Fall eine reduzierte Geschwindigkeit des Roboters während der Handführung vor. Zudem muss die Handführungseinrichtung am Roboter dicht zum Endeffektor integriert sein. Roboterhersteller realisieren dieses Schutzprinzip mit Hilfe von Kraft-Momenten-Sensoren. Zusätzlich gilt, dass eine kräftige Berührung einen Not-Halt des Roboters auslösen muss. Des Weiteren ist gefordert, dass ein Zustimmungsschalter und der Not-Halt Schalter nah für den Menschen erreichbar sind [DGUV, 2015a, S.55].
3. Leistungs- und Kraftbegrenzung: In einem kooperierende Arbeitssystem sind Kollisionen bzw. Berührungen zwischen Mensch und Roboter nicht ausgeschlossen. Hierbei legen Grenzwerte fest, welche Kräfte und welche lokalen maximalen Drücke (effektiver Druck) an einem Bereich des Menschen wirken dürfen (vgl. Kap. 3.2.2.4) [DGUV, 2016a]. Grundsätzlich sind spitze oder scharfkantige Konturen am Roboter untersagt, da diese einen höheren Druck auf die Kollisionsfläche erzeugen als runde und weiche Konturen. Für den fehlenden Schutz eines Zaunes gilt es, für kooperierende Arbeitssysteme technische Schutzmechanismen so zu realisieren, dass das Risiko einer Kollision minimiert wird. Gleichwohl kann ein Restrisiko weiterhin bestehen. Hierbei werden aktive Schutzmaßnahmen (Sensoren zur Messung des Drucks, der Geschwindigkeit und Beschleunigung) und passive Schutzmaßnahmen (abfedernde Greifer, Polsterungen und runde Formen des Roboters und der Endeffektoren) unterschieden [DGUV, 2015b]. Als einen Schutzmechanismus für den direkten Kontakt sind in den heutigen Assistenzrobotern häufig taktile Sensoren integriert, die einen Stopp bei einer Berührung einleiten. Doch wie genau die Schutzmaßnahmen für das Umfeld getroffen werden müssen, wird auf Basis einer Risikobeurteilung ermittelt. Diese ist nach der Richtlinie für jede Applikation einzeln erforderlich.

4. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung: Das vierte Schutzprinzip bezieht sich auf die frühzeitige Kollisionserkennung, um einen Kontakt zwischen Mensch und Roboter zu vermeiden. Schutzmechanismen wie druck-sensitive Fußbodenmatten, Laserscanner und 3D-Kameras zur Kollisionserkennung realisieren die Anforderungen dieses Prinzips. Dabei kann eine Objektdetektion zur Verlangsamung oder zum Stopps entsprechend des definierten Sicherheitsabstandes erfolgen. Wichtig ist, dass die Geschwindigkeit mit der das Objekt in den Sicherheitsbereich eintritt, überwacht wird [DGUV, 2015a, S.55].

### **3.2.2 Anforderungen an kooperierende Roboterapplikationen**

Das Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) hat auf Initiative des Fachbereiches Holz und Metall an einer Ausarbeitung von notwendigen Anforderungen für den Schutz und die Sicherheit des Menschen gearbeitet. Das IFA stellte Anforderungen im Bereich Sicherheit der Technik, Ergonomie, Arbeitsorganisation und Arbeitsmedizin sowie betreffend der Biomechanik auf. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

#### **3.2.2.1 Sicherheitstechnische Anforderungen**

Mit der Auflösung des Schutzzaunes wurde ein neuer Schwerpunkt auf die sicherheitstechnischen Anforderungen gelegt. Ein Systemfehler darf nicht zur Gefahr für den Menschen führen. Aus diesem Grund fordert die ISO 13849-1 eine sichere Systemfunktion, sodass beispielsweise bei einem Ausfall von Hardware- oder Softwarekomponenten oder anderen Roboterkomponenten weiterhin eine sichere Überwachung der Kräfte, Geschwindigkeiten oder die Position des Roboters gewährleistet wird [DGUV, 2015a, S.54]. Diese Leistungsfähigkeit der technischen Steuerung wird durch ein Performance Level (PL) und durch eine Sicherheitskategorie beschrieben. Nach der EN ISO 10218 ist für kooperierende Roboter ein Sicherheitsniveau des Performance Level „d“ in der Kategorie 3 vorgeschrieben, wenn nicht durch die Risikobewertung eine niedrigere oder höhere Einstufung gefordert wird. Hierbei bedeutet Kategorie 3, dass eine zweikanalige Steuerungsstruktur gefordert wird [VDMA, 2016, S.5]. So übernimmt bei einem Systemausfall eine andere Steuerungseinheit die Funktion, die nicht baugleich zur ersten Einheit ist. Mit dem Performance Level wird die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde angegeben. Diese darf bei den jeweiligen ermittelten Sicherheitskomponenten nicht größer als  $10^{-6}$  sein [VDMA, 2016, S.5]. Folglich kann eine Systemintegration eines

Assistenzroboters nur erfolgreich ausgeführt werden, wenn die relevanten Sicherheitsfunktionen (Überwachung der Kräfte, Geschwindigkeiten, Drehzahl, Drücke etc.) das Performance Level „d“ erzielen.

### **3.2.2.2 Ergonomische Anforderungen**

Die ergonomischen Anforderungen beziehen sich auf eine benutzerfreundliche Konstruktion und Applikation des Roboters für den Anwender. Allgemeine Prinzipien bilden einen Rahmen, der für einen angenehmen Arbeitsablauf und ein gutes Leistungsverhalten des Menschen in Zusammenarbeit mit dem Roboter sorgt. So sind folgende Kriterien vorgegeben [DGUV, 2011, S.16]:

- Der Roboter darf den Bewegungsraum des Menschen nicht stören und gibt diesem ausreichend Raum für seine Bewegungsfreiheiten.
- Durch Eigenschaften des Roboters wie etwa die Größe, Geschwindigkeit, Beschleunigung und die Distanz zum Menschen, darf der Mensch in seiner Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und in seinem Denken nicht behindert werden.
- Sollte es zu einer Kollision zwischen Roboter und Mensch kommen, so ist sicherzustellen, dass weitere Beanspruchungen ausgeschlossen werden.

### **3.2.2.3 Arbeitsorganisatorische und arbeitsmedizinische Anforderungen**

Die Bereiche arbeitsorganisatorische und arbeitsmedizinische Anforderungen geben Hinweise auf die Gestaltung des Arbeitsplatzes sowie die Vorbereitung des Mitarbeiters auf die Zusammenarbeit mit dem Roboter. Aus organisatorischer Sicht sind am Arbeitsplatz Warnsignale, Kennzeichnungen für kooperierende Arbeitssysteme und eine visuell dargestellte Abgrenzung des fest definierten Arbeitsbereiches anzubringen [DGUV, 2016b]. Die arbeitsmedizinischen Anforderungen sind zum Schutz des Mitarbeiters ausgelegt. So legen sie den Anspruch darauf, dass eine medizinische Untersuchung bezüglich der Belastbarkeit des Mitarbeiters für den kooperierenden Arbeitsplatz durchgeführt wird. Diese stellt sicher, dass bei dem Mitarbeiter keine psychische Belastung durch eine Mensch-Roboter Teamarbeit entsteht. Des Weiteren sind regelmäßige Schulungen und Gefährdungsunterweisungen über die Risiken und notwendigen Sicherheitsmaßnahmen am Arbeitsplatz erforderlich. Eine Überprüfung des Arbeitsplatzes sowie die Eignung des Mitarbeiters für eine kooperierende Arbeitsform mit dem Roboter sind nach einer ungewollten Kollision erneut durchzuführen [DGUV, 2011, S.16].

### 3.2.2.4 Biomechanische Anforderungen

Wesentlich ist ebenfalls die Ermittlung der zulässigen Schmerzschwellen bei Druck- und Krafteinwirkungen auf den Menschen. Die hierfür definierten biomechanischen Anforderungen sind Anfang 2016 mit der ISO/TS 15066 in Kraft getreten. Diese Anforderungen differenzieren eine für den Menschen zumutbare und nicht zumutbare Beanspruchungsschwere im Fall einer Kollision mit dem Roboter. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert, bedingen einige Assistenzarbeitssysteme eine enge Arbeitsweise mit dem Roboter. Dabei ist die Kollision an verschiedenen Stellen des Körpers möglich, wobei eintretende Kräfte zum Beispiel am Kopf gefährlicher sind als am Oberarm. Auf Basis der Risikoanalyse wird das Risiko einer Kollision mit den unterschiedlichen Bereichen ermittelt [DGUV, 2016c]. Das IFA entwickelte in Kooperation mit der Johannes Gutenberg-Universität Mainz ein Kataster zur Beschreibung der maximal zulässigen Kraft- und Druckgrenzwerte [DGUV, 2016]. Unterschieden wird in dieser Bemessung zum einen das Eintreten einer Schmerzschwelle (Druckgefühl wandelt sich um in Schmerzgefühl) und zum anderen das Eintreten einer Verletzungsrisikoschwelle (Bildung einer Schwellung, eines unbedenklichen Hämatoms). Ergebnis dieser Versuche ist schließlich die Festschreibung der Grenzwerte für die Stoßkraft, die Klemm- und Quetschkraft sowie Druck und Flächenpressung, die auf einen Körperbereich einwirken dürfen. Die Abbildung 3.12 zeigt schematisch den Kollisionsprozess an einem Oberarm und die dabei zu berücksichtigen Vorgänge. Mit der ISO/TS 15066 werden seit diesem Jahr die Unternehmen aufgefordert, die biomechanischen Grenzwerte für alle vorstellbaren Kollisionsmöglichkeiten zu ermitteln. Eine Auflistung der Grenzwerte für die einzelnen Körperbereiche ist im Anhang A.2 zu sehen.

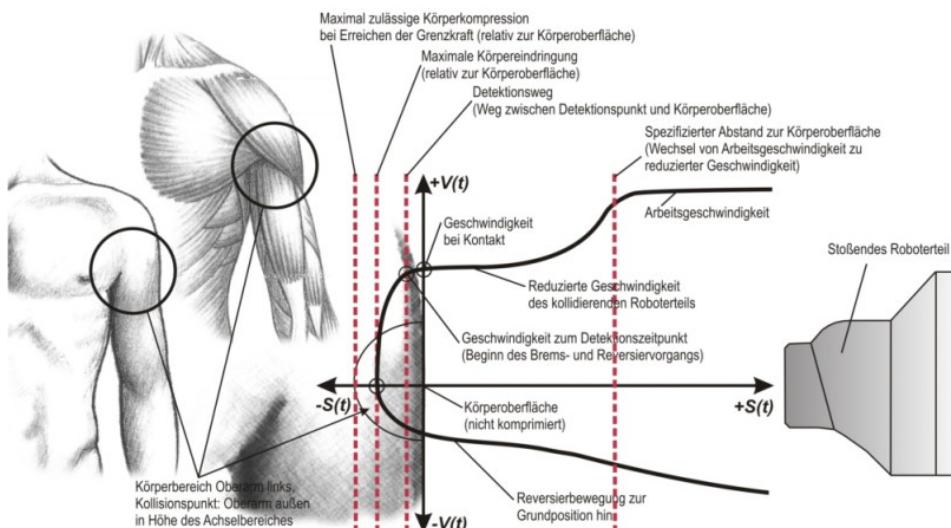


ABBILDUNG 3.12: Darstellung einer Kollisionsfolge zwischen Oberarm und Roboterteil

Quelle: [DGUV, 2016c]

Das Ergebnis der Risikobeurteilung zeigt auf, ob Kollisionsfälle wahrscheinlich sind. Ist dies der Fall, muss die Belastungsschwere für den Menschen bemessen werden. Zur Messung der wirkenden Kräfte und Drücke an einem Arbeitsplatz sind biofidele, sprich menschenähnliche, Messgeräte notwendig. Speziell für kooperierende Arbeitssysteme wurden Messgeräte entwickelt, die biomechanische Eigenschaften (Trägheit, Verformbarkeit, Bewegungsverhalten) der plastisch-elastischen Verformung der Kollisionsfläche am Körper nachbilden. Somit können bei einer entsprechenden Parametrisierung des Roboters Kräfte und lokale Druckmaxima aufgenommen werden. Das von IFA entwickelte Kraft-Druck-Messgerät „KDMG-KOLROBOT“ wurde speziell für kooperierende Grenzwertmessungen konzipiert [Huelke, 2012, S.15]. Im Anhang A.2 ist hierzu der Kollisionsprozess eines Menschen mit einem Roboterteil schematisch dargestellt.

### **3.2.3 IT - Sicherheit**

Mit der Industrie 4.0 gewinnen computergesteuerte Prozesse und vernetzungsfähige Maschinen für eine digitale Produktion an Bedeutung. Die Basis bilden cyber-physikalische Systeme, in denen Informationen von Objekten in einem Netzwerk zur Verfügung gestellt werden. Hierbei entsteht für die Unternehmen jedoch die Herausforderung, diese Daten bezüglich der Informationssicherheit und Betriebssicherheit zu schützen [BMWi, 2016a]. Assistenzroboter können ebenfalls Informationen in einem IT-Netzwerk führen. Beispielweise kann über dieses der Roboter dem Techniker mitteilen, dass der Bohrer am Endeffektor beschädigt ist. Jedoch entsteht mit derartigen vernetzungsfähigen Systemen die Gefahr, dass ein solches Netzwerk angreifbar ist. Im schlimmsten Fall ist der Assistenzroboter manipulierbar und bildet eine Gefahr für die Mitarbeiter in der Umgebung.

Während für eine sichere Technik Normen und Richtlinien für eine klare Definition der Systemanforderungen und Grenzwerte sorgen, gibt es im Bereich Informationssicherheit keinen zertifizierten Standard [BMWi, 2015, S.39]. Daher bleibt auch nach heutigem Wissensstand die Fragen offen, welche Technologien und Sicherheitsverfahren notwendig sind, um die Informationssicherheit von vernetzungsfähigen Objekten zu bewahren (vgl. Kap. 3.1.4.2) und wie eine Zertifizierung oder Definition der Mindeststandards gestellt werden kann (vgl. Kap. 4.2.4). Eine Softwarelösung für eine standardisierte und sichere Middleware von vernetzungsfähigen Komponenten wird derzeit entwickelt (vgl. Kap. 3.1.4.2). Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie stellte zusätzlich heraus, dass aufgrund der leistungsfähigen Computer Verschlüsselungscodes allein nicht ausreichen werden, um das System zu sichern. Vielmehr kann eine

erhöhte IT-Sicherheit durch zusätzliche Sicherheitsmanagementsysteme und die Verwendung sicherer Technologien erreicht werden [BMWi, 2016a].

### 3.3 Anwendungsbeispiele des Einsatzes von Assistenzrobotern in der Industrie

Nachdem die technischen und informationstechnischen Anforderungen und Fähigkeiten eines Assistenzroboters erklärt wurden, werden in diesem Abschnitt ganzheitliche Lösungen von Assistenzrobotern vorgestellt. Zunächst werden einzelne Produktlösungen aus dem Bereich der Forschung und Entwicklung erläutert, die die einzelnen Grundlagenforschungsgebiete in einer Lösung vereinen. Anschließend folgt die Beschreibung entwickelter Produktlösungen von Roboterunternehmen für Industriebranchen. Schließlich werden einzelne Einsatzbeispiele aus der Industrie beschrieben, bei denen Assistenzroboter heute bereits Einzug gewonnen haben. Von einer vollständigen Marktanalyse aller heutigen bestehenden Lösungen wird abgesehen, da dies den Umfang der Arbeit übersteigen würde.

#### 3.3.1 Assistenzlösungen aus dem Bereich Forschung und Entwicklung

Im Bereich der Forschung und Entwicklung gab es in den vergangenen Jahren einzelne Verbundprojekte in Zusammenarbeit von Unternehmen, Universitäten oder Instituten, die einen ganzheitlichen Lösungsansatz in einem definierten Anwendungsbereich verfolgten. Nachfolgend werden drei Projekte vorgestellt, die die Entwicklung von Robotern vorantreiben. Die nachfolgenden Beispiele richten sich nicht direkt auf den produzierenden Bereich aus. Dennoch sind sie aufgrund ihrer Grundlagenforschung interessant für die Assistenzrobotik.

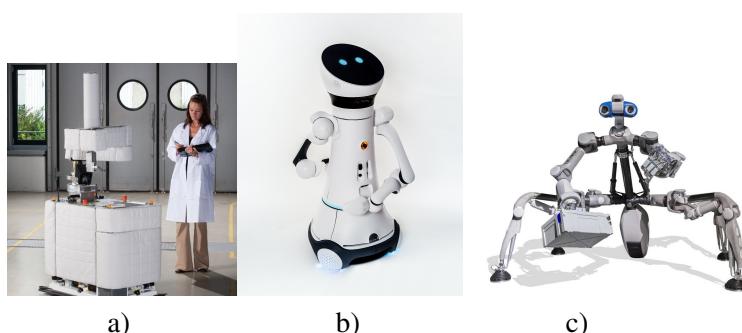


ABBILDUNG 3.13: Ganzheitliche Lösungsansätze aus dem Bereich Forschung und Entwicklung: a) Lisa, b) Care-O-Bot 4, c) Mantis

Quellen:[IFF, 2012] [Bez, 2015] [DFKI, 2015]

### **3.3.1.1 Lisa**

Die ersten Anfänge einer ganzheitlichen Lösung von Assistenzrobotern begannen im Jahr 2007. In Zusammenarbeit der Universität Osnabrück mit einzelnen Unternehmen und dem Fraunhofer Institut erarbeitete das Projekt einen Labor-Assistenzroboter namens Lisa. Dieser kann einfache und sehr häufig ausgeführte Hol-, Greif- und Fügetätigkeiten ausführen, um den Labormitarbeiter zu unterstützen. Wesentliche definierte Anforderungen des Projektes an den Roboter waren die Navigation auf engem Raum, multimodale Kommunikation mit dem Menschen und Arbeiten in einer dynamischen Umgebung [IFF, 2012, S.11].

In seiner Aktionsausführung sind einfache Dienste wie das Holen von Multischalen oder das Bestücken von Proben, denkbar. Angesteuert wird der Roboter über die direkte Sprachkommunikation oder die Eingabe an einem Tablet. Sollte die Aufgabenstellung nicht eindeutig sein, ist der Roboter in der Lage Fragen zu stellen, um seine Aufgabe richtig aufnehmen zu können. Hierbei bewegt sich der Assistenzroboter auf einer mobilen Plattform mit einem omnidirektionalen Antrieb fort. Hinderniserkennung und die allgemeine Umgebungswahrnehmung und Kartierung erfolgt über Laserscanner und Stereokameras. Dabei werden Driftfehler der Sensordaten mittels des Monte-Carlo-Verfahrens vom Navigationssystem berücksichtigt [IFF, 2009, S.33]. Für einen zusätzlichen Sicherheitsschutz, vor allem für den Menschen, wurde in diesem Forschungsprodukt erstmalig die Idee einer druckempfindlichen „Haut“ entwickelt. Lisa ist mit einer gepolsterten Matte umhüllt, die eingebaute Sensoren trägt, sodass ein erstes taktiles Sensorsystem realisiert worden ist. Der Manipulator selbst hält eine Traglast von bis zu 5kg und wird über fünf Gelenkkachsen elektrisch angetrieben. Jedes der Gelenke hat seinen eigenen Antrieb. Die Steuerung und Vernetzung dieser Systeme wird über ein CAN-Bus System mit der Gesamtsteuerung des Assistenzroboters verknüpft. Zusätzlich werden Logik- und Leistungsverbindungen erstellt, die unter anderem den sicherheitstechnischen Not-Stopp der Antriebselektronik verwirklichen [IFF, 2009, S.42/49]. Der Aufbau des Steuerungssystems ist im Anhang A.3 hinterlegt.

### **3.3.1.2 Care-O-Bot 4**

Im Jahr 2015 wurde vom Fraunhofer Institut IPA die vierte Version des Care-O-Bot vorgestellt. Das Forschungsteam präsentierte einen Assistenzroboter in der Rolle eines Gentlemen. Der neue

Care-O-Bot wurde insbesondere in seinem Design und der multimodalen Kommunikation weiterentwickelt, um als Roboter für den Menschen ansprechender zu wirken. Somit war der Fokus der neuen Version insbesondere auf die Steigerung der Akzeptanz zum Menschen gelegt, wobei nicht primär ein menschliches Design verfolgt wurde, sondern vielmehr ästhetisch wirkende Designeigenschaften berücksichtigt worden sind. Schließlich entstand ein Care-O-Bot 4 mit einer runden und weichen Körperkontur, der sich elegant durch den Raum bewegt [IPA, 2015]. Das Projekt wurde über drei Jahre im Zusammenschluss der Forschungsinstitute Fraunhofer IPA, Phoenix Design und Schunk begleitet. Während der Vorgänger Care-O-Bot 3 insbesondere in seiner Agilität verbessert wurde, wurde der Fokus des Care-O-Bot 4 auf die Erweiterung der interaktiven und modularen Funktion gelegt sowie auf eine kostengünstigere Designentwicklung, um eine Lösung für die Serienproduktion zu verfolgen [IPA, 2015].

Die Beweglichkeit des Care-O-Bot wird erzielt durch zwei Kugelgelenke am Hals und im Hüftbereich. Um auch vom Boden Gegenstände heben zu können, reichen zwei Arme bis zum Boden, die über insgesamt drei Freiheitsgrade beweglich sind. Zur eleganten Fortbewegung wurde ein omnidirekionaler Antrieb mit Laserscanner verarbeitet, der eine optimale Bahnführung in alle Richtungen gewährleistet [IPA, 2015]. Darüber hinaus war ein wesentlicher Punkt des Projektes die Entwicklung einer modularen Konstruktionsbauweise, um eine Produktvarianz zu erzielen. Aus diesem Grund basiert der Care-O-Bot auf einem Baukastenprinzip, das verschiedene Konfigurationen über sechs unabhängige Plug and Play Module besitzt. Mit jeweils zwei optionalen Armen, Kugelgelenken am Kopf und Hüfte sowie Sensoren im Halsbereich sind variierbare Konfigurationen möglich [IPA, 2015]. Damit unterstützt die modulare Bauweise einen universelleren Einsatz autonomer und mobiler Assistenzanwendungen, indem der Kunde die Fähigkeiten seines Roboters selbst zusammenstellen und verändern kann.

In Bezug auf die Interaktivität erreicht der Care-O-Bot ein sehr hohes Maß an direkter intuitiver Interaktion mit dem Menschen. Die Forschungsgruppe entwickelte einen selbst kommunizierenden Roboter mit Sprache, Display-Anzeige sowie Gestik. So kann der Care-O-Bot zum Beispiel mit der Schrägstellung des Kopfes signalisieren, dass er etwas nicht verstanden hat. Ebenfalls führt er Kopfschütteln oder Nicken zur Beantwortung von Fragen aus. Zusätzlich wird das Display als Erweiterung der Kommunikation verwendet. Augenzwinkern oder verschiedene Gesichtsausdrücke werden auf dem Display angezeigt. Gleichzeitig ist das Display die Bedienchnittstelle für den Menschen. Andersherum liest der Roboter über 3D Sensoren die Gestik und Mimik des Menschen aus oder nimmt Spracheingaben auf [IPA, 2015]. Damit realisiert die

Forschungsgruppe intuitive und assoziative Kommunikationen mit dem Menschen. Diese Funktionsweisen sind eine Schlüsseleigenschaften für eine künstlich entwickelte Interaktion mit dem Menschen und entscheidend, um die Akzeptanz der Menschen im Umgang mit Assistenzrobotern zu steigern. Mögliche Anwendungen des Care-O-Bot sieht das Forschungsprojekt in den Bereichen Service, Haushalt und Industrie. Dort sind hauptsächlich Hol- und Bringdienste, das Reinigen von Flächen oder Assistenzaufgaben denkbar. Speziell in der Industrie sind Kommissioniertätigkeiten, Entnahmen aus dem Lagerfach und Transporte der wesentliche Nutzen für den Einsatz des Care-O-Bot [IPA, 2015].

### 3.3.1.3 Mantis

In die Zukunft blickt das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) am Standort Bremen mit ihrem Projekt D-Rock. Ein wesentlicher Fokus des Projektes wird auf die Standardisierung des Entwicklungsablaufes der Hard- und Softwarekomponenten gelegt. Der Roboter Mantis soll seine Umgebung wahrnehmen, sich den Veränderungen anpassen und sein Planungsmodell den dynamischen Gegebenheiten entsprechend verändern [DFKI, 2016]. Das Projekt hat das Ziel, einen Assistenzroboter so zu konfigurieren, dass dieser sich in unbekannten Umgebungen bewegen und auf die dort vorzufindenden Gegebenheiten autonom reagieren kann. Bei der Entwicklung von Mantis wird der Einsatz in Katastrophengebieten als Referenzanwendung für die Definition der Anforderung genommen. So soll dieser sich auf unwegsamen Untergrund adaptiv bewegen, Objekte aus dem Weg räumen und diese sogar bergen können [DFKI, 2016].

Mantis kommt in seinem Aussehen einer Spinne nahe. Mit seinen insgesamt sechs Extremitäten kann er sich leicht fortbewegen. Die zwei vorderen Extremitäten dienen als Manipulator für Greiftätigkeiten. Eine sichere Umweltwahrnehmung wird durch eine am Kopf installierte Stereokamera und zusätzlichen Laserscanner realisiert. Zusätzlich wirken am Roboter taktile Sensoren an den zwei Manipulatoren und Drucksensoren an den vier Füßen für die Umgebungswahrnehmung [DFKI, 2015]. Die sechs Extremitäten sind mit jeweils zwei bis drei Freiheitsgraden versehen. Mit diesen Eigenschaften ist es dem Projekt gelungen, einen Roboter zu entwickeln, der sich autonom und mit einem hohen Grad an Beweglichkeit fortbewegt sowie adaptiv bezüglich des Untergrundes wie beispielsweise Geröll, Schnee oder Eis ist. Der Sensorsaufbau des Roboters ist im Anhang A.4 zu sehen.

### 3.3.2 Verfügbare Assistenzlösungen aus der Roboterindustrie

Neben den Forschungsinstituten entwickeln Unternehmen aus der Robotikbranche ebenfalls neue Produkte für ihre serielle Produktion und den Verkauf an die Industrie. Auf der Hannover Messe und Autonomik 2016 stellten Unternehmen wie Kuka, ABB, Rethink Robotics, Universal Robotics und Fanuc ihr Produktportfolio vor. Sie präsentierte kollaborierende Roboter für das Handling von Klein- bis Großteilen, die die Reife einer sicheren Mensch-Maschine-Interaktion besitzen und durch die Vorgaben der Normen für den europäischen Markt zertifiziert sind.

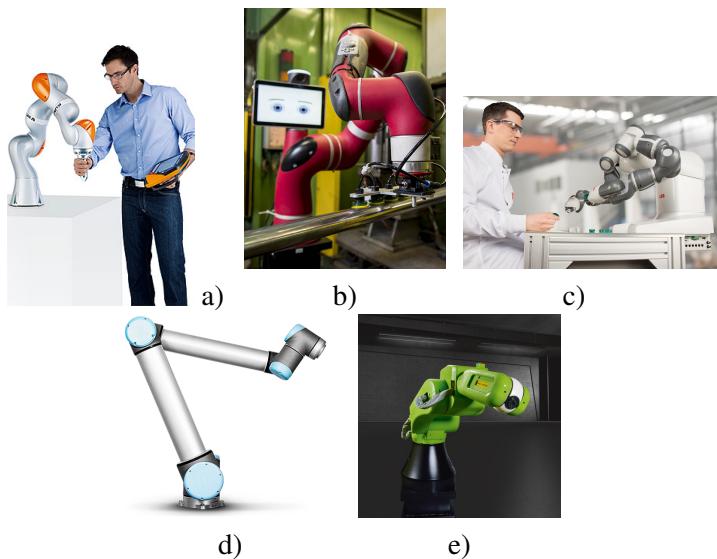


ABBILDUNG 3.14: Auf dem Markt verfügbare Assistenzroboter: a) iiwa Leichtbauroboter, b) Sawyer, c) YuMi, d) UR10 e) CR-35iA

Quellen:[KUKA, 2016] [Rethink Robotics, 2016] [ABB, 2016] [Universal Robotics, 2016a] [Fanuc, 2016]

Ein Vergleich der technischen Daten und Anwendungen der erläuterten Produkte ist im Anhang A.5 zu sehen.

#### 3.3.2.1 iiwa LBR

Iiwa LBR steht für „intelligent industrial work assistant“ Leichtbauroboter (LBR) und wurde speziell für die kooperierende Zusammenarbeit mit dem Menschen entwickelt. KUKA vertreibt mit diesem Produkt einen sensiblen, beweglichen und sicheren Roboter für Montagetätigkeiten von Kleinbauteilen.

Seine Fähigkeiten werden vor allem durch verbaute Gelenkmomentensensoren realisiert, die sowohl die Präzision und Feinfühligkeit steuern als auch Kollisionen wahrnehmen. Die Sensoren

sind in den insgesamt sieben Achsen verbaut. Die sieben Achsen sorgen dafür, dass die Kräfte entsprechend der Anwendung richtig abgestimmt werden können, um im hohen Maße anwendungsspezifisch sensitiv zu arbeiten. Aufgrund dieser präzisen Krafteinwirkung werden exakte und damit beschädigungsfreie Fügepositionen erzielt. Damit gilt der Roboter als zuverlässig in der Ausführung seiner Tätigkeit [KUKA, 2016].

Um nicht nur für einen speziellen Montageprozess einsatzfähig zu sein, sondern für verschiedene Bereiche und Tätigkeiten, ist der iiwa LBR durch die Teach-In Funktion umprogrammierbar und mit unterschiedlichen Werkzeugen ausrüstbar. Je nach Bedarf gibt es den Roboter in zwei unterschiedlichen Leistungsklassen. Der iiwa LBR ist für eine Traglast von 7kg oder auch 14kg mit einem jeweiligen Eigengewicht von 22,3kg und 29,5kg ausgelegt. Die Steuerung des Roboters ist jeweils gleich. Über eine eigens entwickelte Software, Kuka Sunrise.OS, werden die Programme geplant, gespeichert und ausgeführt. Hierfür gibt es zum Roboter ein zusätzliches sogenanntes smartPAD mit einer Bedienoberfläche für den Anwender. Ein Markenkennzeichen des iiwa LBR ist seine schlanke Form und eine Standfläche von nur 136 mm. Damit ist der Roboter in begrenzten Produktionsräumen über seine sieben Achsen agil und beweglich [KUKA, 2016]. Dies bringt KUKA einen wesentlichen Vorteil gegenüber den Konkurrenzprodukten. Bereits integrierte Anwendungen in der Industrie sind Verschraubungsvorgänge für Geschirrspülmaschinen, Be- und Entladung von CNC-Maschinen, Kommissioniertätigkeiten sowie Montagetätigkeiten und Prüfungsvorgänge bei der Getriebemontage [KUKA, 2016].

### 3.3.2.2 Sawyer

Bereits 2012 entwickelte das amerikanische Unternehmen Rethink Robotics ihren Roboter Sawyer, der heute erfolgreich auf dem amerikanischen, europäischen und japanischen Markt vertrieben wird. Das Produkt ist dem iiwa LBR sehr ähnlich. So gibt es zum Beispiel keine Unterschiede bezüglich der Präzision, Sensitivität oder der Anpassung an Positionsveränderungen. Ebenso ist die Bauweise mit sieben Achsen und den weichen runden Konturen gleich, sodass die selbe Agilität erreicht wird.

Rethink Robotics wirbt gegenüber seinen Konurrenten mit dem weltweit besten Sicherheitssystem [Rethink Robotics, 2016]. Der Sawyer verfügt über nachgiebige Arme, gesteuert durch seriell-elastische Aktuatoren. Andere Hersteller regeln dies über die Drosslung der Motoren. Rethink Robotics entwickelte und patentierte Aktuatoren für eine verbesserte Bewegungssteuerung, die zum einen bei Berührung dem Druck nachgibt und zugleich die Kräfte regelt [Rethink

Robotics, 2016]. Der Roboter ist damit in der Lage, sich über eine Oberfläche noch präziser und sicherer heranzutasten, sodass eine optimale Bahnführung erzielt und das Risiko von Beschädigungen minimiert wird. Ein weiterer Unterschied ist die interaktive Benutzerschnittstelle. Für die direkte Kommunikation mit dem Menschen ist am Roboter direkt ein Display montiert. Hierauf lassen sich über die Softwareplattform, Intera3, Programme intuitiv umprogrammieren oder neu erstellen und über das zusätzliche ROS Framework bedienen [Rethink Robotics, 2016]. Rethink Robotics wirbt mit ihrem Produkt in der Elektronikindustrie für automatisierte Herstellungsprozesse von kleinen Komponenten sowie in der Logistik für Kommissionierungs-, Verpackungs- und Transportvorgänge [Rethink Robotics, 2016]. Mit unterschiedlich möglichen Endeffektoren wird die Vielseitigkeit und Flexibilität erreicht.

### **3.3.2.3 YuMi**

ABB brachte mit ihrem YuMi den ersten Assistenzroboter auf den Markt. Besonderer Vorteil des YuMi sind seine zwei Arme, mit denen er Aufgaben parallel sowie Füge- oder Steckaufgaben ohne Zusatzvorrichtung ausführen kann. Das Sicherheitskonzept entwickelte ABB ebenfalls völlig anders als die anderen Unternehmen. Mit einem kompletten Plastikgehäuse und zusätzlichen Polstern an den Achsen werden einwirkende Kräfte bei einer Kollision gedämpft. Darüber hinaus vermeiden groß dimensionierte Polsterungen an den Achsen zusätzlich Quetschungen [ABB, 2016]. Weitere Eigenschaften wie Modularität, Agilität oder Flexibilität sind mit den Konkurrenzprodukten vergleichbar. Der YuMi hebt sich auch hinsichtlich seiner Bauweise wesentlich von seiner Konkurrenz ab. Durch seine zwei Arme wird ein erweitertes Anwendungsspektrum erreicht. Für die Montage von Kleinteilen wie Uhren, Spielzeugen oder Autoteilen sind zwei Greifhände notwendig. Diese bietet der YuMi.

Zusätzlich entwickelt ABB ein SaveMove-Konzept, das eine sichere Arbeitsplatzprüfung durch eine sicherheitsgerichtete Software, eine elektronische Antriebsüberwachung sowie die Erkennung von ungewöhnlichen Abweichungen ermöglicht. Damit können Assistenzroboter für Großkomponenten und mit einer höheren Geschwindigkeit als 250 mm/s in der Produktion eingesetzt werden [KUKA, 2016].

### 3.3.2.4 URx-Roboter

Im Unterschied zu den vorgenannten Unternehmen konzipierte das dänische Unternehmen Universal Robotics für den Markt gleich eine Serie von kooperierenden Anwendungen für unterschiedliche Gewichtsklassen. UR3, UR5, UR10 Roboter können entsprechend ihrer Benennung Traglasten von 3 kg bis 10 kg übernehmen. Damit legt die Firma Universal Robotics ebenfalls den Fokus auf das Handling von Kleinbauteilen und Bauteilen mittlerer Gewichtsklassen. Der URx besitzt ein Sechs-Achsensystem, mit dem er sich wendig in engen Arbeitsumgebungen bewegen kann. In einem Radius von 500 mm bis zu 1300 mm kann die Roboterfamilie sowohl auf dem Tisch, als auch am Boden montiert werden. Häufig wird der UR5 in der Industrie für die Montage kleiner Objekte oder für Klebe-, Schraub- und Lackiervorgänge angewendet. Der UR5 und der UR10 sind prädestiniert für Pick and Place Anwendungen, Qualitätskontrollen sowie das Verpacken und Palettieren von Produktgruppen. Damit zielt das Produkt auf ein breites Branchenfeld wie die Pharmazie, Automobil-, Agrar- und Elektroindustrie [Universal Robotics, 2016a]. Bezuglich der Funktionsweise ist der Assistenzroboter flexibel einsatzfähig durch eine schnelle Umprogrammierung und Umrüstung und entspricht den geforderten Sicherheitsrichtlinien für die sichere Mensch-Maschine-Interaktion. Universal Robotics vermarktet seine Produkte insbesondere mit dem Argument der schnellen Amortisation. Mit einem Startpreis von 26.000 EUR ist der UR3 neben dem Sawyer eine der preiswertesten kollaborierenden Anwendungen [Lindackers, 2015].

### 3.3.2.5 CR-35iA

Das japanische Unternehmen Fanuc startete in den neuen Markt der Assistenzrobotik mit seinem CR-35iA, der eine Traglast von 35kg erreicht. Damit zielt das Unternehmen auf Assistenzroboteranwendungen für die mittlere bis schwere Gewichtsklasse. Dabei hält der Roboter alle sicherheitstechnischen Anforderungen durch zusätzlichen Einklemmschutz und eine Gummiummantelung ein [Fanuc, 2016]. Außerdem ist die maximal zulässige Geschwindigkeit von 250 mm/s mit zusätzlichen Sensoren für die Arbeitsraumüberwachung auf 750 mm/s erweiterbar. Assistenzroboter dieser Größenordnung sind für die Montage von Großteilkomponenten einsatzfähig, allerdings nur im stationären Zustand. Fanuc erzielt damit gegenüber der Konkurrenz ein Alleinstellungsmerkmal. Um das Produktpotential auszubauen, entwickelt das Unternehmen zusätzlich zukünftige Assistenzroboterlösungen für die Kleinteilfertigung [Fanuc, 2016].

### 3.3.3 Integrierte Assistenzroboter in produzierenden Unternehmen

Dieser Abschnitt stellt einzelne Assistenzsystemlösungen in der Industrie vor. Eine Recherche hat gezeigt, dass in den Branchen Luftfahrt, Automobil und Elektrotechnik bereits erfolgreich Anwendungsbeispiele von Unternehmen etabliert worden sind. Nachfolgend sollen die Assistenzlösungen vorgestellt und ihr Nutzen für den Fertigungsbereich erläutert werden.

#### 3.3.3.1 Luftfahrtindustrie

Im Bereich Flugzeugmontage ist der Grad der Automatisierung deutlich geringer als zum Beispiel in der Automobilbranche. Die Produktgröße, eine Taktrate von mehreren Tagen und Störungen entlang der Supply Chain, stellen Innovationsmitarbeiter vor die große Herausforderung Automatisierungsprozesse zu implementieren [IFF, 2015]. In einer Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer Institut IFF und den Unternehmen FACC, KUKA und Airbus DS wurde das Projekt Valerie initiiert, mit dem Ziel einen automatisierten und kooperierenden Assistenzroboter in der Montageproduktion von Flugzeugteilen einzusetzen.



ABBILDUNG 3.15: VALERIE

Quelle: [IFF, 2016]

Der Assistenzroboter wurde für insgesamt drei Funktionen an einer Station entwickelt.

- Das Auftragen von Dichtmasse entlang einer Nut
- Qualitätsprüfung der aufgetragenen Dichtmasse
- Qualitätskontrolle geflochtener CFK-Teile

Dabei gilt es, die technischen Herausforderungen zu sichern. Dazu gehören unter anderem die Realisierung eines multiplen Sicherheitssystems, die sichere Manipulatorbewegung im Bereich

der Flugzeugstruktur, die Implementierung des Roboters am Taktarbeitsplatz und die Realisierung der universellen Tätigkeitsausführung [IFF, 2015]. Sicherheitssysteme wie die Kollisionserkennung durch taktile Sensoren und eine kamerabasierende Arbeitsraumüberwachung auf Basis von 3D Kameras sorgen für eine sichere Arbeit des Roboters an der Seite des Mitarbeiters. Zusätzlich wirken die taktilen Sensoren auch als intuitive Bedienung des Roboters. Zum Beispiel kann der Anwender durch Schiebe-Bewegungen in unterschiedlichen Richtungen den Roboter durch den Raum führen [IFF, 2015].

Für die Funktionsausführung der Qualitätsüberprüfungen der Nut sowie des CFK-Bauteilzustands, wurde ein spezielles Programm entwickelt. Dieses wertet Farbbilder, die vom Assistenzroboter beim Abtasten der Strukturoberfläche aufgenommen werden, aus. Auf Basis des Farbbilds werden unregelmäßige Strukturen wie Faserunregelmäßigkeiten oder sogar Brüche von CFK-Bauteilen und unsaubere Nut-Schließungen des Dichtmittels erkannt [IFF, 2015]. Ein weiteres Programm steuert die präzise Nut-Auftragung durch den Roboter. Ebenfalls wird mit Hilfe einer 3D-Kamera das zu bearbeitende Bauteil lokalisiert, indem das Bild in Form einer Punktewolke aufgenommen und mit abgespeicherten 3D-Konstruktionszeichnungen verglichen wird. So kann sich der Roboter an der Flugzeugstruktur orientieren und die Position des Bauteils ermitteln [IFF, 2015].

### **3.3.3.2 Automobilindustrie**

In Ingolstadt werden bei Audi bereits seit 2013 kooperierende Roboter eingesetzt. Das Unternehmen sieht in der neuen Robotertechnologie vor allem Vorteile im Bereich verbesserter Ergonomie [Feigl, 2015]. Aus diesem Grund sind heutige Assistenzroboteranwendungen in den Bereichen implementiert, in denen der Roboter den Menschen ergonomisch entlasten kann. Im speziellen Fall handelt es sich um das Heben von Kühlmittelausgleichsbehältern. Diese Bewegung wirkt belastend für den Mitarbeiter aufgrund des hohen Wiederholungscharakters, sodass dieser Schritt durch den Roboter abgelöst worden ist. Der Assistenzroboter entnimmt das Material vom Ladungsträger und führt dieses in die ergonomisch günstige Position für den Mitarbeiter [Feigl, 2015].

Das gleiche Prinzip wird auch in der Volkswagen Produktion in Wolfsburg angewendet. Die Endeffektoren des Assistenzroboters besitzen Saugknöpfe, um Material aus einem Behälter zu entnehmen und dem Fertigungsmitarbeiter direkt anzureichen. Allgemein ist der Assistenzroboter in der Produktion oftmals eine Hebe- und Positionierungshilfe für den Montageeinbau, beim

Schweißen oder sonstigen Tätigkeiten am Bauteil. Insbesondere kommen Assistenzroboter für das Handling von schweren und großen Bauteilen in der Automobilindustrie zum Einsatz [IFA, 2015]. In der nachfolgenden Abbildung ist der Einbau des Armaturenbretts, assistiert durch den Roboter, als Beispiel zu sehen.



ABBILDUNG 3.16: Armaturenbrettmontage, unterstützt durch einen Assistenzroboter  
Quelle: [IFA, 2015]

### 3.3.3.3 Elektroindustrie

Betacom ist mit insgesamt 50 Mitarbeitern ein mittelständisches Unternehmen, das Beleuchtungen für Straßen, Kontrollsysteme oder Flutlichter herstellt. Das Unternehmen entschied sich dafür, ihre Produktion auf eine unabhängige und automatisierte Herstellung von Straßenlichtern mit Assistenzrobotern umzustellen. Bei der Produktion von verschiedenen Beleuchtungen setzt das Unternehmen auf eine hohe Qualität ihres Produktes und eine saubere Fertigung, um Verunreinigungen am Bauteil zum Beispiel durch Fingerabdrücke zu vermeiden [Universal Robotics, 2016b]. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, entschloss sich Betacom, seine Montageprozesse mit einem Assistenzroboter abzulösen. In der Produktion arbeitet heute ein UR10, der sowohl Pick and Place als auch Verschraubungstätigkeiten ausübt. In einer Aneinanderreichung von Vorgängen werden die Einzelteile zusammengesteckt, verschraubt und auf ein Band zur Weiterverarbeitung gelegt [Universal Robotics, 2016b]. Der Nutzen, der sich für das Unternehmen generiert, ist die Fertigung eines Produktes mit hoher Präzision, Qualität und mit minimiertem Kontaminierungsrisiko. Die Abbildung 3.17 zeigt diesen eingerichteten automatisierten Arbeitsplatz.



ABBILDUNG 3.17: Automatisierte Herstellung von Straßenlichtern mit UR10

Quelle: [Universal Robotics, 2016b]

### 3.4 Zwischenergebnis zum heutigen Stand der Technik

Die vorangegangenen Abschnitte haben einige Assistenzroboterbeispiele aufgezeigt, die heute schon die Reife für eine sichere Hand-in-Hand Interaktion mit dem Menschen erzielen. Auffällig ist, dass jeder der Bereiche sehr unterschiedliche Schwerpunkte setzt. In der Forschung und Entwicklung werden vor allem autonome mobile Assistenzroboter entwickelt. Diese Anwendungen sind heute in der Industrie oder im Produktpotfolio von Roboterherstellern eher selten zu sehen. Hier überwiegen stationäre Anwendungen direkt am Montageplatz. Insbesondere spezialisieren sich Roboterhersteller auf die Serienproduktion von Assistenzrobotern, die für den Bereich Kleinteilemontage eingesetzt werden können. Roboter, die große Bauteile kollaborierend mit dem Menschen bewegen, wie in der Automobilbranche und Luftfahrt, sind eher spezielle und individuelle Systemlösungen. Diese finden zunehmend Einzug an Montagearbeitsplätzen, an denen eine ergonomisch ungünstige Verfahrensweise gegeben ist. Darüber hinaus werden ebenfalls Vorteile einer präzisen Arbeitsausführung und gleichzeitigen Qualitätsprüfung durch den Roboter in der Industrie genutzt.

Daher werden aus der Rechercheanalyse des heutigen Ist-Zustandes der Anwendungen von Assistenzrobotern zwei Merkmale deutlich:

- Autonome und mobile Assistenzroboter befinden sich in der Entwicklung, sodass eine serielle Reife für die Industrie noch ausstehend ist.
- Stationäre Leichtbauroboter finden aufgrund ihres niedrigen Einkaufspreises, beginnend mit 26.000 EUR, in der Industrie eine breite Anwendung.

Dieser Entwicklungsstand ist nicht überraschend. Stationäre Anwendungen sind hinsichtlich ihrer Funktionsweise einfacher zu realisieren. Insgesamt drei wesentliche Hauptfunktionen sind dafür signifikant: Eine leichte Bauweise, ein Sicherheitssystem durch 3D Kameras, Sensoren und Laserscanner sowie die intuitive Bedienung des Roboters mit leichter Umprogrammierung und die Führung des Manipulators mit der Hand. Verschiedene Roboterunternehmen haben sich auf diese Produkteigenschaften spezialisiert. Dabei sind die Anwendungsbeispiele häufig bezogen auf die simultane oder synchrone Form des Arbeitssystems. Der Leichtbauroboter übernimmt hier hochfrequente und einfache Pick and Place, Verpackungs-, Verschraubungs- oder Klebetätigkeiten. Vor diesem Hintergrund ist jedoch festzustellen, dass bei diesen Anwendungen, wie es in der Elektroindustrie zu sehen ist, eine klassische Automatisierung durch den Roboter herbeigeführt wird. Demzufolge werden menschliche Tätigkeiten ersetzt. Der Roboter macht genau das, was der Programmierer ihm vorgibt. Anders verhält sich dies in der Automobilbranche, in der der Roboter als Assistent für ergonomisch ungünstige Arbeitsabläufe eingesetzt wird. In der Mensch-Roboter-Kooperation steht hier der Mensch im Vordergrund und der Roboter hilft ihm bei der Tätigkeitsausführung. Zusammenfassend betrachtet, ergeben sich für die Anwendung von Assistenzrobotern im produzierenden Bereich die nachfolgenden allgemein klassifizierten Funktionsweisen:

- Ausführen von Fertigungsverfahren (Löten, Schweißen, Verschrauben, Kleben etc.)
- Ausführen von Handlungstätigkeiten (Maschinenbestückung, Anreichen von Teilen)
- Ausführen von logistischen Tätigkeiten (Verpacken und Palettieren, Übernahme von Transportwegen)
- Durchführung von Qualitätsprüfungen (Bauteilüberprüfung)

Beispielanwendungen für intelligente und autonome Roboter sind der Care-O-Bot 4 und Mantis. Zwar haben einzelne Forschungsinstitute autonome und mobile Assistenzroboter entwickelt, doch ist eine erfolgreiche industrielle Anwendung aufgrund von ausstehenden Forschungsthemen nicht gegeben. Zusätzliche Herausforderungen autonomer und mobiler Anwendungen sind ein erweitertes Sensornetzwerk, die Weiterentwicklung eines flüssigen Greifprozesses, das autonome Navigieren in einer dynamischen Umgebung und die sichere Objekt- und Hinderniserkennung. Das Gesamtsystem ist komplexer, sodass die Anforderungen an die Funktionsweise der zentralen Steuerungseinheit und Software hinsichtlich der Systemsicherheit deutlich größer sind. Es muss sichergestellt werden, dass autonome Roboter weder von außen manipulierbar

sind, noch diese unerwünschte Tätigkeiten ausführen und damit das Umfeld gefährden können. Mit dem Ansatz des „Security by Design“ werden Lösungen für eine frühe Berücksichtigung der Systemsicherheit bereits bei der Entwurfsphase entwickelt, mit dem Ziel diese über den gesamten Lebenszyklus sicherzustellen. Des Weiteren werden Forschungstätigkeiten unternommen, um eine standardisierte Softwarelösung zu entwickeln. ROS ist ein Beispiel einer Softwarelösung, die den Anspruch eines universellen Einsatzes und der industriellen Reife erhebt. Darüber hinaus beschäftigen sich Institute und Fachausschüsse mit der Gestaltung eines Referenzarchitekturmodells, um eine geeignete Systemarchitektur jeder einzelnen und für die Gesamtheit aller vernetzten Geräte und einzelnen Komponenten einer digitalen Produktion zu erreichen. So besteht vor allem im Bereich Softwareentwicklung ein hoher Forschungsbedarf für die Realisierung einer vernetzungsfähigen Produktion mit Assistenzrobotern.

Zuletzt ist zu erwähnen, dass die modulare Bauweise an zunehmender Bedeutung für die Vermarktung von Assistenzrobotern gewinnen wird. Kunden erhalten mit dieser die Option ihr Produkt selbst zu konfigurieren bzw. je nach Anwendung die Konfiguration des Roboters zu wechseln. Folglich werden die Aspekte IT-Sicherheit, sichere Technik im Arbeitsumfeld und Modularität in der Zukunft die serielle Anwendung autonomer Assistenzroboter entscheidend prägen.



# **Kapitel 4**

## **SWOT-Analyse**

Auf Basis einer SWOT-Analyse sollen die extern und intern wirkenden Faktoren im Umfeld eines Unternehmens untersucht werden, um Vor- und Nachteile einer möglichen Investition in Assistenzroboter abzuwägen. Untersuchungsgegenstand dieser Methode ist die Betrachtung des Einsatzes von Assistenzrobotern in produzierenden Unternehmen. Aus dem Ergebnis der Analyse werden Strategiebilder für Unternehmen abgeleitet, die eine Grundlage für die Handlungsempfehlung (vgl. Kap. 5) bilden. In diesem Kapitel wird nachfolgend ein theoretischer Einblick in die Grundlagen der SWOT-Analyse gegeben. Anschließend erfolgt deren schrittweise Durchführung.

### **4.1 Erläuterung der SWOT-Analyse**

Mit der SWOT-Analyse werden in einer internen Unternehmensbetrachtung die identifizierten Stärken und Schwächen (Strengths und Weaknesses) sowie die extern relevanten Chancen und Risiken (Opportunities und Threats) im Unternehmensumfeld zusammengetragen. Wrona [2013] beschreibt diese Methode als eine integrative Analyse (vgl. Abb. 4.1), bei der die internen und externen Faktoren zueinander in Beziehung gestellt werden, um aus den einzelnen Kombination Normstrategien für das Unternehmen abzuleiten. So stellt sich beispielsweise die Frage, wie Stärken des Unternehmens eingesetzt werden können, um den Risiken im Umfeld zu

begegnen<sup>34</sup>. Auf diese Weise können Handlungsempfehlungen für ein Unternehmen geknüpft werden.

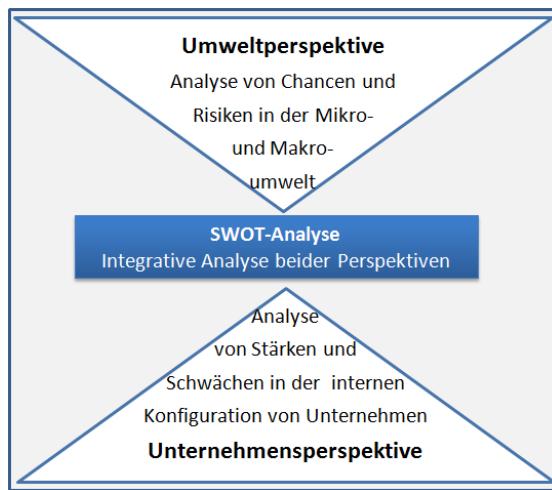


ABBILDUNG 4.1: Interne und externe Betrachtung als integrative SWOT-Analyse

Quelle: In Anlehnung an Wrona [2013][S.378]

Für die SWOT-Analyse ergeben sich daraus die drei folgenden wesentlichen Schritte, die nachfolgend kurz erläutert werden sollen [Wrona, 2013, S.378]:

- Schritt 1: Eine Umweltanalyse betrachtet die Mikro- und Makroumgebung. Hierbei werden die sozio-kulturellen, politisch-rechtlichen, technologischen und ökonomisch wirkenden Merkmale auf das Unternehmen analysiert. Um zukünftig relevante Faktoren zu berücksichtigen, sind wesentliche Trendentwicklungen zu betrachten.<sup>35</sup>
- Schritt 2: In der Unternehmensanalyse werden möglichst objektiv aktuelle und zukünftig relevante Stärken und Schwächen für ein Unternehmen betrachtet.
- Schritt 3: Abschließend werden die Ergebnisse in einer SWOT-Matrix zusammengetragen. Hieraus sind Wechselwirkungen der internen und externen Faktoren zu erkennen und eine allgemeine Handlungsempfehlung für ein Unternehmen abzuleiten.

In Anlehnung an diese Vorgehensweise wird in den nachfolgenden Abschnitten die SWOT-Analyse durchgeführt.

<sup>34</sup>Aus der Kombination der einzeln analysierten Faktoren der SWOT lassen sich aus den vier nachfolgenden Fragestellungen Strategien ableiten:

SO-Strategie: Wie können interne Stärken eingesetzt werden, um Chancen auf dem Markt wahrzunehmen?

ST-Strategie: Wie können interne Stärken eingesetzt werden, um den Risiken auf dem Markt zu begegnen?

WO-Strategie: Wie können interne Schwächen minimiert werden, damit die Chancen des Marktes genutzt werden können?

WT-Strategie: Wie können interne Schwächen abgebaut werden, um sich vor den Risiken des Marktes zu schützen?

<sup>35</sup>Wollny [2014][S.81] weisen zusätzlich darauf hin, dass neben der Trendbetrachtung auch andere Methoden, wie eine Analyse der Wettbewerbsposition, die 5-Kräfte-Analyse nach Porter oder eine Stakeholder-Analyse, möglich sind und ergänzend herangezogen werden können.

## 4.2 Umfeldperspektive

Die nachfolgende Umfeldanalyse wird auf Basis der PEST-Methode durchgeführt. Diese betrachtet die politischen (political), wirtschaftlichen (economical), sozio-kulturellen (socio-cultural) und technologischen (technological) Einflüsse. Dabei werden die Chancen und Risiken der Investition in Assistenzroboter herausgestellt und erläutert.

### 4.2.1 Ökonomische Einflüsse

Die International Federation of Robotics (IFR [2015]), ein Dachverband weltweiter Roboterverbände und Roboterunternehmen, verkündete für die Robotikbranche ansteigende Verkaufszahlen. Speziell im Bereich industrielle Roboter stieg der Umsatz im Jahr 2014 um 29% und verzeichnete damit den höchsten Anstieg innerhalb eines Jahres. Die Nachfrage an industriellen Robotern nahm in den vergangenen Jahren immer mehr zu. Den hierbei größten Bedarf verzeichneten die Automobil- und Elektroindustrie. Der Verkauf von Robotern in den Jahren 2005 und 2008 lag weltweit bei 115.000 Stück. Zwischen den Jahren 2010 und 2014 erhöhte sich der Verkauf jährlich um 17%, sodass die Roboterindustrie bis zum Jahr 2014 weltweit 229.261 Stück verkauft hat [IFR, 2015]. Dieser Anstieg macht den bestehenden Bedarf von Robotern in der Industrie und die Absichten in Automatisierungstechnik zu investieren, deutlich. Wie die nachfolgende Abbildung 4.2 zeigt, ist der Einsatz von industriellen Robotern insbesondere auf den Absatzmärkten Europa, Amerika und allen voran Asien/Australien anzutreffen.

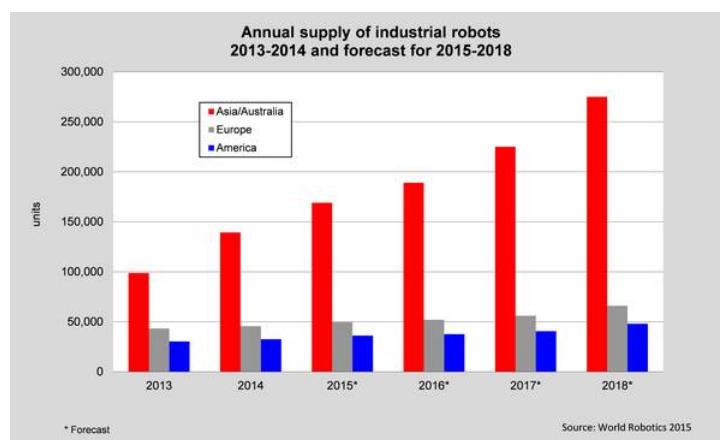


ABBILDUNG 4.2: Absatzzahlen Industrie-Roboter 2013 - 2018  
Quelle: [IFR, 2015]

Das kooperierende Roboterlösungen unter den industriellen Robotern eine wesentliche Bedeutung tragen, verdeutlicht der CEO Manager der KUKA Roboter GmbH, Stefan Lampa, in einem Interview mit dem IFR:

*„Im Zeitalter der Industrie 4.0 spielt die Automobilbranche eine führende Rolle, um mit neuester Robotertechnik die direkte Mensch-Maschine-Kollaboration zu verwirklichen [...] Darauf hinaus steigt die Nachfrage nach Automatisierung in neuen Marktfeldern, in denen diese Lösungen bisher eine geringere Rolle gespielt haben. Ein besonders wichtiger Markt ist hier für uns der Elektroniksektor. Die Entwicklungszeiten dieser Branche beschleunigen sich, die Zahl neuer Produkte steigt und Lebenszyklen verkürzen sich. In dieser Situation ist Flexibilität das A und O.“ [IFR, 2016]*

Dabei waren es nicht die großen Roboterunternehmen wie FANUC, KUKA oder YASKAWA, die den Markt kooperierender Roboter erobern haben, sondern das aus dem Kapitel 3.3.2 bekannte Unternehmen Universal Robotics (vgl. Tab. 4.1). Das Unternehmen trat 2005 als Start-up-Unternehmen in den Markt ein und kann bis heute den Markt für sich behaupten. Ihr Marktanteil beträgt über 60% verglichen mit den Gesamtverkäufen aller Roboterhersteller. Folglich konnten die großen Roboterhersteller bis 2015 den verspäteten Markteintritt der neuen Roboter-technologie nicht aufholen und verzeichneten bis zum Jahr 2015 deutlich niedrigere Verkaufs-zahlen.

	2012	2013	2014	2015	Gesamt
Universal Robotics	550	800	1.400	2.200	4.950
Rethink Rebotic	50	250	280	350	930
ABB	40	70	150	500	760
Fanuc	-	50	80	120	250
Others (KUKA, Nachi...)	100	150	200	500	950
Gesamt	740	1.320	2.110	3.670	7.840
Durchsch. Verkaufspreis in €	23.527	23.841	26.379	28.474	

TABELLE 4.1: Entwicklung der Verkaufszahlen von Assistenzrobotern 2012 - 2015  
Quelle: In Anlehnung an Barclays [2016]

Die Preisentwicklung der Assistenzroboter nahm in den ersten Jahren zu. Dies ist damit zu begründen, dass Unternehmen wie FANUC und KUKA einen drei- bis vierfachen Stückpreis<sup>36</sup> im Vergleich zur URx-Serie aufweisen (vgl. Anhang A.5). Dennoch sieht Barclays [2016] in ihrer Analyse für die zukünftigen zehn Jahre einen positiven Preisentwicklungstrend. Dieser ist in der Tabelle 4.2 zu sehen. Das Unternehmen geht davon aus, dass ab dem Jahr 2020 die Kosten

<sup>36</sup>Verkaufspreise:

KUKA - iiwa: 100.000€

FANUC - CR-35iA: 75.000€

eines Assistenzroboters jährlich um 3-5% sinken werden. Für die Verkaufszahlen prognostiziert Barclays [2016] bis zum Jahr 2025 einen Anwuchs auf 701.000 Assistenzroboter, die in produzierenden Unternehmen zum Einsatz kommen werden.

	2015	2020	2025
Verkaufspreis in €	28.474	21.000	17.500
Globale Verkäufe in Stk.	7840	150.000	701.000

TABELLE 4.2: Preisentwicklung von Assistenzrobotern (2015 - 2025)

Quelle: In Anlehnung an Barclays [2016]

#### 4.2.2 Technologische Einflüsse

Nährboden für eine erfolgreiche Entwicklung von innovativen Ideen sind Technologiezentren. In diesen kommen junge Unternehmen zusammen, um ihre Ideen zu einer erfolgreichen Geschäftsidee zu entwickeln. Das bekannteste Beispiel eines erfolgreichen Technologiegebietes ist das Silicon-Valley. Speziell für die Robotik ist in Tabelle 4.3 eine Auswahl weltweit bestehender Technologiezentren aufgeführt. Aus der Auflistung geht hervor, dass vor allem in den führenden Industrielanden Zentren für die Entwicklung neuer Robotertechnologien bestehen. Diese sind für Unternehmen eine Chance, wenn sie die Möglichkeit besitzen mit ihnen im Zusammenschluss neue Roboterlösungen und Anwendungsmöglichkeiten zu entwickeln und umzusetzen. Hierbei ist anzumerken, dass die Auflistung der Technologiezentren keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Technologiezentrum	Land
Silicon Valley Robotics	USA
Intelligent Systems Research Institute	Japan
Robotic Research Center - Nanyang Technological University	Singapur
ROBOTNOR - Centre for Advanced Robotics	Norwegen
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz	Deutschland
Wageningen University and Research Centre	Niederlande

TABELLE 4.3: Eigene Darstellung: Weltweite Technologiezentren für Robotersysteme

Einen weiteren technologischen Einfluss bilden die Ansiedlung und Gründung von Start-up-Unternehmen im Bereich der Robotertechnik. In der Robotikbranche haben sich in den vergangenen Jahren eine Vielzahl erfolgreicher Start-up-Unternehmen entwickelt. Schubarth [2016], ein Redakteur des Silicon Valley Business Journals, berichtete, dass die zehn erfolgreichsten Start-up-Unternehmen in der Robotertechnikbranche in den letzten fünf Jahren einen Marktwert von 50-180 Mio. USD erzielt haben. Darunter wird auch das aus dem Kapitel 3.3.2 bekannte

Unternehmen Rethink Robotic gezählt, das einen Marktwert von 113,5 Mio. USD hält. Somit ist das Wachstum der Robotikbranche deutlich erkennbar.

Doch um seitens der Industrie die neuen innovativen Produkte der Jungunternehmer oder Technologiezentren zu unterstützen und voranzutreiben, gibt es Wettbewerbe, in denen diese ihre Roboterlösung vorstellen können. Als Beispiel sollen drei verschiedene Wettbewerbstypen nachfolgend vorgestellt werden:

- ESA BIC Start-up Award<sup>37</sup>: Das ESA's Business Incubation Centres (BICs) arbeitet mit Jungunternehmern zusammen, die aus ihrer Idee ein Geschäft generieren wollen, um sich auf dem Markt zu etablieren. Mit dem ESA BIC Start-up Award werden die besten Lösungen durch eine Jury jährlich ermittelt [ESA, 2016]. Teilnahmeberechtigt sind Teilnehmer aus der Europäischen Union, die nicht länger als drei Jahre auf dem Markt bestehen und innovative Ideen aus dem Bereich Medizin, Luftfahrt, Automobilbranche oder Haushalt vorzuweisen haben. Die drei besten Lösungen werden mit einem Geldpreis und einem zusätzlichen Messeauftritt auf der Automatica<sup>38</sup> ausgezeichnet.
- RoboCup<sup>39</sup>: Der RoboCup ist ein Roboter-Fußballwettbewerb, in dem autonom laufende Roboter gegeneinander Fußball spielen. Die Roboter sind Multi-Agentensysteme, die im Zusammenspiel mit ihren weiteren Roboter-Mitspielern gegen eine Mannschaft in einer sich dynamisch verändernden Umgebung antreten [RoboCup, 2016]. Erweitert wurde dieser Wettbewerb um neue Ligen wie etwa dem RoboCup@Home und RoboCup Rescue. Somit richtet sich der Fokus nicht nur auf den Fußball, sondern spricht mit den neuen Aufgabenstellungen ein breiteres Spektrum innovativer Robotiklösungen an.
- Airbus Shopfloor Challenge: Die Airbus Shopfloor Challenge ist ein Beispiel eines Roboterwettbewerbs in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen. Die Herausforderungen der Flugzeugmontage sind nach Angaben der Airbus Group [2016] die vorherrschenden manuellen Verfahrensprozesse wie das Bohren, Prüfen und Verdichten an der Struktur eines Flugzeugs. Um eine Automatisierung dieser Verfahren zu prüfen, gestaltete das Unternehmen einen Wettbewerb mit Entwicklungsteams, die eine Lösung für das automatisierte Bohren durch einen Leichtbauroboter entwickelt haben. Für die Teilnehmer bestand die Aufgabenstellung, ihren Bohrroboter so zu konfigurieren, dass dieser so viele

<sup>37</sup>Business Incubation Centre (BIC) Programm der Europäischen Weltraumorganisation ESA gefördert von ESA und dem Robotik und Mechatronik Zentrum (RMC) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)

<sup>38</sup>Internationale Fachmesse für Automation und Mechatronik in München

<sup>39</sup>Der RoboCup wurde das erste Mal 1997 in Japan ausgetragen. In den darauffolgenden Jahren fanden die Fußballmeisterschaften in wechselnden Ländern der Welt statt.

Löcher wie möglich, an der richtigen Stelle und mit dem richtigen Durchmesser in einer Stunde setzen kann. Insgesamt fünf ausgewählte Teams wurden für den finalen Wettbewerb ausgewählt. Sieger wurde das Team Naist aus Japan mit ihrem konfigurierten KUKA Roboter (vgl. Abb. 4.3). Sie erhielten eine Preisprämie sowie zukünftig die Möglichkeit, ihre Idee in der Produktion von Airbus zu etablieren [Airbus Group, 2016]. Unterstützt wurde dieser Wettbewerb von der International Conference on Robotics and Automation (ICRA) auf dessen Konferenz Ende Mai 2016 der Sieger geehrt worden ist.

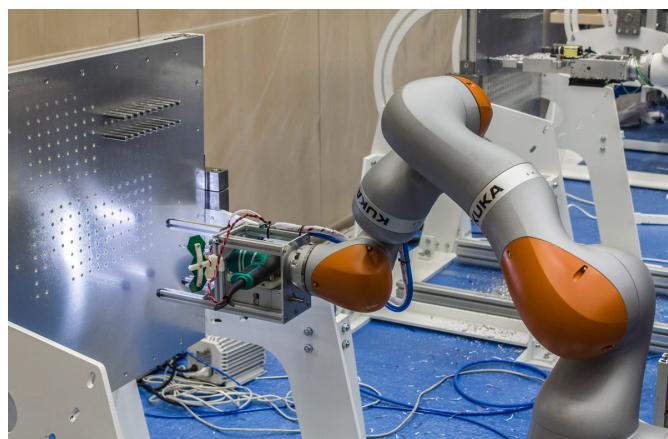


ABBILDUNG 4.3: Konfigurierter Bohrroboter (KUKA) des Team Naist  
Quelle: [Erripis, 2016]

#### 4.2.3 Sozio-kulturelle Einflüsse

Der Begriff sozio-kulturell wird von der Bundesvereinigung Soziokultureller Zentren e.V. [2016] als eine Summe kultureller und sozialer Interessen und Bedürfnisse einer gesellschaftlichen Gruppe verstanden. Unternehmen sind ebenfalls eine Gesellschaft, die sich durch eine eigene Unternehmenskultur und Organisation auszeichnet. Auf Basis der Unternehmenskultur sind essentielle Entscheidungen wie auch die Investition in neue Technologien oder die Innovationsausrichtung zurückzuführen. Die organisatorische Direktive richtet sich an diesen Entscheidungen aus. Im Folgenden sollen die sozio-kulturellen Einflüsse des demographischen Wandels, des Wandels der Arbeitsinhalte und die ethisch, moralische Verantwortung eines Unternehmens näher betrachtet werden.

#### 4.2.3.1 Demographischer Wandel

„Altern ist Zukunft!“ - ist die von Kaudelka [2014] getroffene Aussage ihres gleichnamigen Buches, die damit das Problem der zunehmenden Alterung der Gesellschaft in Europa anspricht<sup>40</sup>. Der Herausforderung des demographischen Wandels müssen sich auch Unternehmen stellen. Sie sind gefragt, Lösungen für eine alternsgerechte Arbeitsumgebung zu entwickeln, um langfristig leistungsfähige und gesund bleibende Mitarbeiter in ihrem Unternehmen zu beschäftigen. Dies umfasst zum einen die Bereitstellung von ergonomisch günstigen und physisch- und kräftesich-nenden Arbeitsbedingungen und zum anderen die Anpassung der Arbeit an den Menschen und nicht umgekehrt [Kaudelka, 2014].

Die Entwicklung von Assistenzrobotern ist eine Möglichkeit, diesem Problem entgegenzuwirken. Im Rahmen der Mensch-Maschine-Kooperation werden die Stärken des Menschen und des Roboters vereint. Der Mensch führt komplexe und hochgradig flexible Fähigkeiten aus. Zugleich wird er durch den Roboter bei ergonomisch ungünstigen Tätigkeiten entlastet. Vor allem sehr einfache und hochfrequentierte Arbeitsabfolgen sind prädestiniert für die Anwendung von Assistenzrobotern. Beispiele dieser kooperierenden Arbeitsformen wurden in Kapitel 3.3.3 vor gestellt. Die Industrie sieht Assistenzroboter aus diesem Grund als eine Chance, um sich den Herausforderungen des demographischen Wandels und des Fachkräftemangels zu stellen [Elkmann, 2014]. Allerdings gibt es unterschiedliche Ansätze in den Branchen der Unternehmen bezüglich der Reduzierung von Arbeitsplätzen durch Assistenzroboter. Das Unternehmen Airbus Group bringt zum Ausdruck, dass ein Abbau von Arbeitsplätzen nicht erzielt werden soll. Volkswagen dagegen macht deutlich, dass bei möglicher Senkung der Produktionskosten ein Personalabbau möglich ist.

*„Robots will not replace human workers. We're looking at automation systems for high-volume repetitive activities where our workers bring no added value. Most processes will still be carried out by people.“ [Alloy, 2016] (Bernard Duprieu - Airbus Manager für Research & Technology)*

*„Es gibt zwei Gründe für mich, die verstärkte Automatisierung der Fabrikarbeit bei Volkswagen voranzutreiben. Den einen diktiert der Verstand: Wir können mithilfe von Robotern Fertigungskosten senken [...] Der andere kommt von Herzen: Wir können die nicht ergonomische Arbeit*

<sup>40</sup>Dieser Aussage liegt ein Bericht des Statistischen Bundesamtes von 2011 zugrunde. Seit 1990 stieg die Anzahl von Menschen über 65 Jahren um 5 Mio. (42%). Mit Blick auf die Zukunft wird diese Zahl bis 2040 nochmal um 6 Mio. ansteigen. Gleichzeitig sank die Geburtenrate im selben Zeitraum um 10 Mio. Neugeborene [Bundesamt, 2011, S.8].

*abschaffen, qualifizierte Arbeit verstärken und Beschäftigung sichern.“ [Doll, 2015] (Werner Neubauer - Chef des Geschäftsbereichs Komponenten)*

#### 4.2.3.2 Wandel der Arbeitsinhalte

Der Ansatz, den Menschen durch innovative Technologien zu unterstützen, zieht arbeitsorganisatorische und arbeitsinhaltliche Veränderungen für den Mitarbeiter nach sich. Für die kooperierende Zusammenarbeit mit einem Roboter sind schließlich neue Qualifikationen notwendig. Es entstehen neue Arbeitsinhalte und damit verbunden eine neue Denkweise und Herangehensweise in der Ausführung der Arbeit für den Mitarbeiter [BMWi, 2015, S.40]. Im Allgemeinen bedeutet dies für das Unternehmen, dass sich die Arbeitsinhalte der direkten sowie auch indirekten Arbeitsbereiche verändern werden. Zusammenfassend stellt Hartmann [2015][S.91] allgemein mit der zunehmenden Mensch-Maschine-Interaktion in der Produktion folgende zukünftige Veränderungen in zwei Arbeitsebenen heraus:

- Operative Arbeitsebene: Mit der Zunahme intelligenter Systeme und automatisierter Abläufe werden Arbeitsbereiche mit einfachen oder niedrigeren Tätigkeiten (Maschinenbestückung, logistische Tätigkeiten) substituiert. Daraus ergeben sich in der Kooperation mit dem Assistenzroboter für den Fertiger höherqualifizierte Tätigkeiten aufgrund der Zunahme der informationstechnischen Systeme und des notwendigen Verständnisses dieser. Zusätzlich kennt der Fertigungsmitarbeiter die Zusammenhänge der produktionstechnischen, logistischen und dispositiven Abläufe im Unternehmen.
- Indirekte Arbeitsebene: Die heutige klassische Funktion der Planung und Steuerung einer Produktion wird mit der Zunahme der Automatisierung und einer intelligent vernetzten Fertigung an Bedeutung verlieren. Eher verändert sich der Fokus der Arbeit von einer direkten Steuerung auf die Überwachung der self-x Eigenschaften (vgl. Kap. 3.1.4.2) des Systems, sodass Wissen über die Informationstechnik und Produktion verschmelzen.

In Betrachtung der sich zukünftig verändernden Arbeitsschwerpunkte des operativen und indirekten Bereiches in der Fertigung kommt Hartmann [2015][S.93] zum Ergebnis, dass sich beide Arbeitsbereiche zukünftig zu einem operativen und dispositiven Arbeitsbereich verschmelzen werden. Hierbei ist es entscheidend, dass die Mitarbeiter neben den funktionalen Tätigkeiten in beiden Ebenen zusätzlich mit den informellen Fähigkeiten angelernt werden, um die Verantwortung der Systemkontrolle übernehmen zu können [Hirsch-Kreinsen, 2014].

#### 4.2.3.3 Ethische Verantwortung

Wenn Assistenzroboter den Wandel in der Produktion dadurch bestimmen, dass Fertigungsverfahren (teil-)automatisiert ablaufen und sie autonom eigenständig Entscheidungen treffen, dann sind die negativen Effekte sowie die moralische Verantwortung für die Mitarbeiter in der Produktion mit zu betrachten. Somit ist die Relevanz der Roboterethik<sup>41</sup> im Kontext der Integrierung von Assistenzrobotern in der Produktion zu beleuchten. Bendel [2016] spricht folgende Fragen im Rahmen der ethischen Verantwortung an:<sup>42</sup>

- Wer trägt die Verantwortung für ein Fehlverhalten des Roboters?
- Wie wird mit personengebundenen Informationen des Mitarbeiters umgegangen?
- Ist der Roboter ein Assistent des Produktionsmitarbeiters oder ein Konkurrent?

Die erste Fragestellung bezieht sich auf die heute noch ungeklärten rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz des Roboters. Die Klärung der Haftung für Schäden an Anlagen, einem Produkt oder Menschen ist offen. Genauer betrachtet wird diese Fragestellung unter den rechtlichen Einflüssen in Kapitel 4.2.4.

In der zweiten Frage wird auf die ethische Verantwortung des Unternehmens gegenüber dem Mitarbeiter Bezug genommen. Um den Menschen in der Mensch-Maschine-Interaktion vor Gefahren zu schützen, sind eine Vielzahl sicherheitstechnischer Anforderungen notwendig (vgl. Kap. 3.2.2). Diese bedingen die Verwendung einer Vielzahl von Sensoren wie zum Beispiel Kameras, um die Umgebung wahrnehmen zu können. Sensoren lösen an einer Stelle die Herausforderung der sicheren Mensch-Maschine-Interaktion, doch werfen diese Systeme gleichzeitig die Fragestellung auf, inwieweit der Mitarbeiter zum „gläsernen Menschen“ wird. Hirsch-Kreinsen [2014] weist auf eine mögliche Kontrollfunktion hin. Somit bilden sich neue offene Fragestellungen bezüglich des Datenschutzes und des urheberrechtlichen Schutzes sensibler Daten. Wie die personengebundenen Daten eines Mitarbeiters geschützt werden können, ist heute im Rahmen des Arbeitsschutzrechtes nicht geklärt [BMWi, 2016a, S.38]. Auf die Aspekte des Datensicherheitsschutzes wird im Kapitel 4.2.4 eingegangen.

<sup>41</sup> In der Definition des Gabler Wirtschaftslexikons wird die Frage aufgenommen, ob „[...] ein (weitgehend autonomer) Roboter ein Subjekt der Moral sein [...] kann.“ [Gabler Wirtschaftslexikon, 2016]. Die Moral eines Roboters umfasst die Pflichten und Rechte eines Roboters sowie die Folgen seines Einsatzes.

<sup>42</sup> Weitere Publikationen zum Thema Roboterethik sind folgende:

R./Nagenborg, M. (Hrsg.): *Ethics and Robotics von Capurro*,

Lin, P./Abney, K./Bekey, G. A. (Hrsg.): *Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics*

Mit der dritten Fragestellung werden die Folgen für die Arbeitsplätze der Menschen angesprochen. Die Zeitschrift *Die Welt* publizierte in ihrem Artikel vom Mai 2015 eine Studie der Bank ING-DiBa. Das Unternehmen nahm eine Studie der beiden amerikanischen Wirtschaftswissenschaftler Carl Frey und Michael Osborne bezüglich der Auswirkung der Automatisierung auf den amerikanischen Arbeitsmarkt zum Anlass, ihre Ergebnisse auf den deutschen Markt zu übertragen (vgl. Abb. 4.4) [Kaiser, 2015]. Untersucht wurden einzelne Arbeitsplätze. Hieraus

### ROBOTER ERSETZEN ARBEITSKRÄFTE



ABBILDUNG 4.4: Analyse der gefährdeten Berufsgruppen durch die zukünftige Automatisierung und Digitalisierung  
Quelle: [Kaiser, 2015]

geht hervor, dass durch die Zunahme der Automatisierung, begünstigt durch Assistenzroboter, über 59% der Arbeitsplätze in Gefahr sein können [ING-Diba, 2015]. Davon sind unter anderem die technischen Berufe in der Produktion deutlich betroffen. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, wird ein Teil dieser Berufe transferiert, während ein anderer Teil substituiert wird.

Ein Trend dieser Entwicklung wird vom Unternehmen Volkswagen AG im Rahmen seiner Zukunftsvisionen bestätigt. In einem Interview der Zeitschrift *Die Welt* mit dem Personalvorstand von Volkswagen, Herrn Horst Neumann, wurden die zukünftigen Visionen des Unternehmens herausgestellt - Automatisierung und Digitalisierung der Produktionsabläufe. Neumann berichtete, dass Volkswagen die Produktionskosten durch eine erweiterte Automatisierung senken will [Doll, 2015]. Dies bedeutet den Einsatz von preiswerten Robotern an Stelle eines Produktionsmitarbeiters. Hierzu gibt das Kapitel 4.3.1 einen Einblick in die wirtschaftlichen Vorteile eines Roboters.

Einen Schritt voraus ist bereits die Elektroindustrie in Asien. Das taiwanische Unternehmen Foxconn produziert für den Lieferanten Apple einen Großteil der I-Phones. Das Unternehmen setzt auf Automatisierung und berichtete der South China Morning Post, dass 30% seiner chinesischen Produktion bis 2020 automatisiert sein wird [South China Morning Post, 2015]. Bereits im Jahr 2016 entließ das Unternehmen 60.000 von zuvor 110.000 Mitarbeitern in der Produktion von Mobiltelefonen im Zuge der Einführung von Automatisierungstechniken durch Roboter [South China Morning Post, 2016].

Diese Beispiele zeigen, dass der Roboter ein Konkurrent des Mitarbeiters ist, wenn sein Arbeitsplatz durch einen Roboter substituiert werden kann. Unternehmen stehen in diesem Zusammenhang im Spannungsfeld ihrer ethischen Verantwortung gegenüber dem Erhalt des Arbeitsplatzes des einzelnen Mitarbeiters und dem wirtschaftlichen Handeln, ihr Unternehmen wettbewerbsfähig zu halten.

#### 4.2.4 Rechtlich-politische Einflüsse

Unternehmen unterliegen rechtlich-politischen Entscheidungen, die in einem Staat getroffen werden. Diese wirken sich direkt auf Unternehmensentscheidungen aus. Dabei können Rechte des Staates für das Unternehmen eine Chance sein, sie können sich aber auch hemmend auf die Verwirklichung der Unternehmensziele auswirken. Aufgrund der Zunahme Cyber-Physischer Systeme, als Grundlage einer Vernetzung einzelner Objekte, sind die Länder der Herausforderung gestellt, mit ihren Gesetzen dem technischen Fortschritt nachzukommen. In diesem Rahmen sind Fragen zum Datenschutz, der Datensicherheit, Informationssicherheit und IT-Sicherheit rechtlich zu klären und abzusichern<sup>43</sup>.

Bereits im Kapitel 3.2.3 wurde herausgestellt, dass Technologien und Sicherheitsverfahren nicht ausreichend entwickelt sind, um die Informationssicherheit von vernetzungsfähigen Objekten sicherzustellen und zugleich die Betriebssicherheit eines Unternehmens zu gewährleisten. Dabei

<sup>43</sup>Diese Begriffe sind wie folgt von einander abzugrenzen [Czernik, 2016]:

Datenschutz: Beim Datenschutz geht es um die Bewahrung der Privatsphäre eines jeden Einzelnen. Datenschutz schützt den Menschen vor dem Missbrauch seiner Daten.

Datensicherheit: Hierbei geht es um den Schutz der einzelnen Daten. Es wird nicht differenziert, ob diese personenbezogen sind oder nicht. Im Fokus steht die Sicherheit der Daten vor Manipulationen oder einer unberechtigten Einsicht in die Daten.

Informationssicherheit: Der Begriff Informationssicherheit wurde mit der Informationstechnik geprägt. Ziel ist es digitale oder analoge Informationen zu schützen.

IT-Sicherheit: Unter IT-Sicherheit wird die fehlerfreie und zuverlässige Funktionsweise eines Systems verstanden. Zu diesen vier Kategorien gelten übergeordnet folgende Schutzziele: Vertraulichkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Authentizität.

stehen IT-Sicherheit und Datensicherheit in einem engen Zusammenhang. Die IT-Sicherheit ist verantwortlich für den Schutz von Daten, etwa durch Verschlüsselungen und Zugriffskontrollen. Es werden Daten erfasst und protokolliert, sodass dies zu einem Problem mit dem Datenschutzrecht führt [DIN/DKE, 2014, S.9]. Folglich ergibt sich der Bedarf für den Datenschutz und die Datensicherheit, Normungen und Standardisierungen für informationsverarbeitende Systeme zu schaffen, um ein Mindestniveau für die prüfbare IT-Sicherheit zu erreichen. Für die europäischen Länder übernahm im Jahr 2013 die europäische Kommission die Verantwortung der Ausarbeitung eines Gesetzesentwurfs. Schließlich ist am 14.04.2016 vom EU-Parlament die neue EU-Datenschutz-Grundverordnung erschienen<sup>44</sup> [Daschug, 2016]. Ausgehend ist eine Erweiterung des am 25.7.2015 in Kraft getretenen IT-Sicherheitsgesetzes, da die Herausforderungen an eine sichere Konzeption der Software, Produkte und Systeme („Security by Design“) rechtlich nicht erfasst worden ist (vgl. Kap. 3.1.4.2) [LLP, 2016, S.12].

Des Weiteren ist das Haftungsrecht für autonome Systeme zu hinterfragen. In dem vom BMWi [2016a] herausgegebenen Positionspapier des Förderprogramms „Autonomik für Industrie 4.0“ wird die Frage aufgegriffen, wer die Verantwortung für eventuelle Schäden an Dingen oder sogar Menschen durch einen selbstlernenden autonomen Roboter trägt. Im Fall eines Schadens kommen autonome Roboter mit den strafrechtlichen und zivilrechtlichen Bestimmungen in Berührung. Nach heutiger Regelung gilt, dass der Verursacher, der die Aktion des Roboters eingeleitet hat, die Haftung trägt. Dies kann der Fertigungsmitarbeiter oder der Hersteller sein. Das Bundesministerium für Industrie spricht sich dafür aus, dass die Haftungsregelungen für autonome Systeme, wie auch der selbstlernende Assistenzroboter, im Haftpflichtgesetz gesondert für die neuen Technologien zu erfassen sind [LLP, 2016, S.14].

Damit ergeben sich für die Unternehmen in den kommenden Jahren bedeutende politisch-rechtliche Einflüsse. Diese sind entscheidend für die Sicherheit und für den Schutz der Mitarbeiter und des Unternehmens, sodass sie als Chance für Unternehmen anzusehen sind. Dennoch bleiben Risiken für Unternehmen weiterhin bestehen. So etwa bilden Vernetzungen mit anderen Unternehmen, wie zum Beispiel für die externe Wartung von Maschinen und Robotern, mögliche Kanäle bzw. Einfalltüren in das Unternehmen. Dies birgt die Gefahr der Cyberkriminalität wie etwa der Zweckentfremdung von Daten oder Industriespionage [Mühlich, 2015].

Neben den rechtlichen Fragen, die durch die einzelnen Länder abzusichern sind, ist die Politik ein Treiber der zukünftigen industriellen Entwicklung. Die einzelnen Industrieländer sind

<sup>44</sup>In den kommenden zwei Jahren haben die EU-Länder Zeit, diese Verordnung in ihre nationale Gesetze zu überführen, sodass das Gesetz ab Mai 2018 in Kraft treten kann.

bestrebt, Innovationstreiber der industriellen Entwicklung zu sein, um die Industrie im Land zu stärken. Der Bundesminister für Wirtschaft und Energie, Sigmar Gabriel, brachte dies in dem Positionsblatt „AUTONOMIK für Industrie 4.0“ des BMWi [2016a] wie folgt zum Ausdruck: „*Die industrielle Produktion gehört zu den Kraftfeldern unserer Wirtschaft. Qualitätsorientierte Produkte mit höchstem technologischen Anspruch und ergonomischem Design sind das Aushängeschild vieler Branchen und ein Garant der internationalen Konkurrenzfähigkeit Deutschlands.*“ [BMWi, 2016a, S.4]

Vor allem die Industriestaaten wie Japan, USA und Deutschland gehen hier beispielhaft voran. Die japanische Regierung etablierte in ihrem Land die Initiative „Robot Revolution“, um ihre Innovationen der kommenden Zukunft auf die Roboterindustrie zu legen und sich damit den zukünftigen Herausforderungen wie Senkung der Energiekosten und dem Fachkräftemangel zu stellen [BMWi, 2016b]. Damit richtet das Land einen besonderen Fokus auf die Marktführung in der Roboterindustrie. In den USA gab der Präsident dem Programm Advanced Manufacturing Partnership (AMP) eine staatliche Unterstützung von 500 Mio. USD bekannt [Press Secretary of the White House, 2011]. Und schließlich fördert die deutsche Regierung, mit den beiden Programmen „AUTONOMIK für Industrie 4.0“ und „Smart Service Welt“ sowie einer daran anknüpfenden finanziellen Unterstützung in Höhe von 100 Mio. EUR, das Vorantreiben von Forschungsprojekten unter der Initiative Industrie 4.0.

Unternehmen profitieren von diesem Bestreben der Politik, in den industriellen Fortschritt und die Automatisierungstechniken zu investieren.

#### 4.2.5 Chancen-Risiken Profil der Umfeldanalyse

Die Analyse der externen Faktoren hat gezeigt, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse aus dem Umfeld bestehen. Diese können sowohl eine Chance als auch ein Risiko für Unternehmen darstellen. Die nachfolgende Tabelle 4.4 stellt zusammenfassend alle externen Faktoren der Umfeldanalyse zusammen, aus denen für Unternehmen im Allgemeinen Chancen und Risiken abgeleitet worden sind. Diese bilden zusammen mit den nachfolgenden Aspekten der Stärken und Schwächen die Grundlage für die Ausarbeitung der Handlungsstrategien im Kapitel 5.

	<b>ökonomische Einflüsse</b>	<b>technologische Einflüsse</b>	<b>sozio-kulturelle Einflüsse</b>	<b>politisch-rechtliche Einflüsse</b>
<b>relevante Umfeldentwicklungen</b>	prognostizierter ansteigender Markt für kooperative Roboter Positive Preisentwicklung	Weltweit bestehende Technologieparks für Robotertechnik Unterstützung Jungunternehmer durch Wettbewerbe und Organisationen Entwicklung erfolgreicher Start-up-Unternehmen	Demographischer Wandel Wandel der Arbeitsinhalte Hinterfragung der ethisch-moralischen Verantwortung	Offene rechtliche Fragestellungen bzgl. Datensicherheit, Haftung und IT-Sicherheit Bestehende Normen und Richtlinien Politik als treibende Kraft der Automatisierung und Digitalisierung
<b>Chancen</b>	Zunahme der Weiterentwicklung kooperativer Assistenzlösungen mit anwachsenden Markt Investition in Assistenzroboter wird rentabler	Technologiezentren für offene Forschungsthemen bestehen Projektarbeit mit Innovationszentren an individuellen Lösungen möglich Nutzung von innovativen Start-up-Unternehmen durch Wettbewerbsbeschreibungen	Alternsgerechte Arbeitsbedingungen schaffen Freisetzung von Mitarbeitern	Nutzung der finanziellen Unterstützung aus der Politik für Forschungsprojekte Standards durch Normen und Richtlinien sind gegeben
<b>Risiken</b>	Überschaubare Herstelleranzahl von Assistenzrobotern		Akzeptanz der Mitarbeiter für die sich verändernden Arbeitsinhalte erreichen Umgestaltung der Unternehmensorganisation Schutz der personenbezogenen Daten und Klärung der Haftungsfragen	Offene Fragestellungen und Standards im Bereich Betriebssicherheit und Cyber-Security: Hacker, Datenklau, Industriespionage

TABELLE 4.4: Eigene Darstellung: Ableitung der Chancen und Risiken aus der Umfeldanalyse

## 4.3 Unternehmensperspektive

Eine Betrachtung der Stärken und Schwächen soll Unternehmen Aufschluss darüber geben, welche internen Faktoren für eine Investitionsentscheidung zugunsten von Assistenzrobotern relevant sind. Als Stärken werden jene Argumente herangezogen, die im Unternehmen zu einer direkten Verbesserung der Produktionsabläufe führen oder indirekt einen positiven Einfluss nehmen. Schwächen sind jene Argumente, die sich als nachteilig oder hinderlich bei der Implementierung von Assistenzrobotern in der Produktion eines Unternehmens zeigen.

### 4.3.1 Stärken

Mit der Betrachtung der Stärken werden nachfolgend die heutigen und zukünftigen Vorteile einer Investition in Assistenzroboter für Unternehmen herausgestellt.

#### 4.3.1.1 Sicherung der Arbeitspakete in Hochlohnländern durch Senkung der Produktionskosten

Aufgrund von hohen Lohnkosten in den europäischen Ländern und vor allem im westlichen Bereich (vgl. Kap. 4.2.3.3), sind einfache Fertigungstätigkeiten wie die Herstellung von Einzelteilen oder kleinen Komponentengruppen in Länder mit einem geringeren Lohnkostensatz transferiert worden. Eine Statistik zeigt auf, dass 24% bis 30% des Fertigungs- und Montageanteils in Unternehmen im Rahmen der Globalisierung ausgelagert werden [Statista, 2010]. Neben der Nähe zu neuen Märkten für neue Vertriebskanäle ist auch eine preiswertere Produktion ein Hauptgrund der Auslagerung. Unternehmen sehen für die neue Art der Automatisierung für sich die Chance, durch eine Zunahme der Automatisierung ihrer Produktion die Produktionsstückkosten zu reduzieren, um so wettbewerbsfähiger gegenüber alternativen Produktionsstandorten zu werden.

Die Kosten eines Assistenzroboters liegen bei maximal 5 EUR pro Stunde. Wie die nachfolgende Tabelle 4.5 zeigt, kosten die in Kapitel 3.3.2 aufgezeigten Assistenzroboter zwischen 26.000 und 100.000 EUR. Die Betriebsdauer wird von den einzelnen Anbietern mit ca. 35.000 Stunden angegeben<sup>45</sup>. Daraus lässt sich der Stundensatz eines Assistenzroboters von 0,75 bis 3,30 EUR pro Stunde errechnen. Selbst unter der Berücksichtigung zusätzlich anfallender Energie- und Wartungskosten ist der Roboter nicht teurer als 5 EUR pro Stunde und damit im Vergleich zu einem deutschen Fertigungsmitarbeiter, der 50 EUR die Stunde kostet, deutlich günstiger<sup>46</sup>.

	iiwa	Sawyer	YuMi	UR3	CR35iA
Einkaufswert (EW) in €	100.000	26.000	40.000	26.000	75.000
Betriebsstunden (BS) in h	30.000	35.000	35.000	35.000	35.000
EW/BS = Produktionskosten in €/h	3,30	0,75	1,14	0,75	2,14

TABELLE 4.5: Eigene Darstellung: Kostendarstellung eines Roboters

Aus dieser Berechnung wird der reine wirtschaftliche Vorteil der Investition in Assistenzroboter deutlich. Unternehmer wie Werner Neubauer (Volkswagen AG) sprechen sich für den Einsatz von Assistenzrobotern unter einem möglichen Abbau von Arbeitsplätzen aus, weil dies die Arbeitstätigkeit im Land hält und verbundene Arbeitsplätze der Randfachbereiche dadurch gesichert werden [Doll, 2015].

<sup>45</sup>Wenn ein Roboter an 250 Arbeitstagen pro Jahr beispielsweise 15 Stunden pro Arbeitstag im Einsatz ist, umfasst dies 3.750 Betriebsstunden pro Jahr. Bei einer geschätzten Betriebsstundenzeit von insgesamt 35.000 h kann der Assistenzroboter über neun Jahre in der Produktion eingesetzt werden.

<sup>46</sup>Im Vergleich zu anderen europäischen Ländern besitzt Deutschland den höchsten Stundenlohn. In Italien liegt dieser bei 30 €/h, in England bei 25,5 €/h. und in Rumänien bei 4,8 €/h [Statista, 2013].

#### **4.3.1.2 Flexibilität / Qualitätssteigerung / Präzision**

Um sich von den herkömmlichen Industrierobotern abzusetzen, entwickelten die Roboterhersteller mit ihren Produktlösungen einen Leichtbauroboter, der genau dort eingesetzt werden kann, wo dem Industrieroboter Grenzen gesetzt sind. Die in Kapitel 3.3 erläuterten Assistenzroboter-Lösungen haben gezeigt, dass sie sich gegenüber dem Industrieroboter dadurch auszeichnen, dass sie ortsflexibel sind und mit verschiedenen Endeffektoren für unterschiedliche Verfahrensweisen zum Einsatz kommen können. Die Flexibilität ist ein entscheidendes Kriterium für Unternehmen, sich der Steigerung der Variantenvielfalt anzupassen oder sogar eine Stückzahlrate von eins zu realisieren [Kroh, 2014]. Hierbei sind Konzepte wie das verwendete Plug and Play Modul des Care-O-Robot 4 für unterschiedliche Konfigurationen wesentlich. Darüber hinaus sind optische Qualitätsprüfungen am Bauteil oder Arbeiten, die eine hohe Präzision der Aktionsausführung fordern, ein weiterer Vorteil für produzierende Unternehmen. Der Roboter Valerie wurde speziell für diese Fähigkeiten entwickelt.

#### **4.3.1.3 Neugestaltung der Produktionslinien**

In einem Bericht des Industriportals MaschinenMarkt wird erläutert, dass mit dem Einsatz von Assistenzrobotern Produktions- oder Montagelinien durch die Erweiterung der Robotertechnik eine neue Gestalt annehmen können [Kroh, 2014]. Daraus abgeleitet sollten Unternehmen ihr Produktionskonzept mit der Erweiterung der Automatisierungsmöglichkeiten durch Assistenzroboter überdenken. Des Weiteren sieht Peter Klüger, Produktmanager im Bereich Automotive bei der Kuka Roboter GmbH, einen Flächen- und daraus gewonnenen Energiressourcenvorteil für Unternehmen [Kroh, 2015]. Mit automatisierten Linienkonzepten in der Fertigung reduziert sich einerseits der Flächenbedarf aufgrund des Wegfalls des Schutzzaunes und andererseits können weitere Unterhaltungskosten der Produktion eingespart werden. Der Assistenzroboter ist hierbei ein Element der zukünftig neu gestalteten Produktionslinie.

#### **4.3.1.4 Automatisierung als Basis der Digitalisierung**

Im Rahmen der industriellen Entwicklung mit den Programmen Industrie 4.0, AMP oder auch Internet of Things steht die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung der eigenen Produkte und Dienstleistungen im Mittelpunkt. Dies bildet zugleich die Basis, sich in den horizontalen und vertikalen Wertschöpfungsketten intern im Unternehmen und extern mit den Partnern wie

Lieferanten, Dienstleister oder den Kunden zu verbinden. Befragte Unternehmen sehen in dieser Entwicklung eine Produktivitätssteigerung von 18% und zugleich eine Umsatzsteigerung von bis zu 3% [PwC, 2014, S.3]. Ein hierbei wesentliches Element beschreibt Herr Hans Wernher van de Venn, Tagungsleiter der VDI-Fachkonferenz zu Assistenzrobotern:

*„Assistenzrobotiklösungen sind in der Produktion eines der Schlüsselemente des Industrie-4.0-Konzeptes. Sie erlauben intelligente, aufgabenadaptive Prozessführungen, neue Formen der Mensch-Roboter-Kooperation und eine effiziente Produktion bis zur Stückzahl eins, wenn sie richtig eingesetzt werden.“* [Bose-Munde, 2016]

Mit neuen technologischen Ideen und Entwicklungen, wie etwa Assistenzlösungen, sehen Unternehmen ihre Gestaltung einer zukünftigen Smart Factory. Diese verfolgt einen integralen Ansatz über die gesamte Wertschöpfungskette. Das Unternehmen ist mit seinen Dienstleistern, Lieferanten und sonstigen Geschäftspartnern soweit vernetzt, dass die Planung und Steuerung der Produktion über die einzelnen Informationssysteme autonom gesteuert werden können. Eine Grundvoraussetzung hierfür ist die Gewinnung von Informationen bzw. Daten, um diese nutzbringend zu verarbeiten [Microsoft Deutschland GmbH, 2016, S.7-9]. Aus diesem Grund sind cyberphysische Systeme in den Produktionsprozessen und Fertigungsanlagen wesentlich, um die aktuellen Daten des Fertigungsstands zu erhalten. Sensoren bilden hierfür eine Schlüsseltechnologie, um prozess- oder objektbezogene Daten zu ermitteln, die in einem Netzwerk bereitgestellt werden. Über Rückkopplung an die Regelkreise (vgl. Kap. 3.1.2.2) können so die Planungs- und Produktionsprozesse organisiert und optimiert werden.

Im Forschungszentrum für künstliche Intelligenz in Kaiserslautern gibt es eine erste Prototypenserie einer cyberphysischen Fertigungsstraße [Scheer, 2013, S.9]. In dieser besitzen sowohl die einzelnen Objekte als auch die Prozesse ihre eigene dezentrale Intelligenz und sind untereinander so vernetzt, dass die Produktionslinien selbst-organisierend ablaufen.

In der Industrie bestehen bereits ebenfalls erste Umsetzungsbeispiele einer Smart Factory. Das Unternehmen Infineon entwickelte an ihrem Fertigungs- und Technologiestandort Dresden eine intelligente Produktion. Das Unternehmen stellt hoch innovative Halbleiter bis in den 200 mm Bereich her. Die Produktion ist heute bezüglich der Transporte, der Anlagenbedienung sowie der Fertigungssteuerung soweit untereinander vernetzt, dass diese durch Informationssysteme gesteuert wird. Als wesentliche Voraussetzungen für die Umsetzung einer vernetzten Produktion werden von Infineon zum einen RFID Chips, die kontinuierlich Informationen zu den aktuellen Prozesszustand melden, und zum anderen standardisierte Prozessabläufe genannt. So werden

Engpässe oder Störungen entlang der Fertigungsabläufe erkannt und durch das System selbst umorganisiert und optimiert [Microsoft Deutschland GmbH, 2016, S.21].

### 4.3.2 Schwächen

Für die Betrachtung einer Investition in Assistenzroboter sollen in diesem Abschnitt die negativen Faktoren für ein Unternehmen genannt werden, die dieses schwächen könnte.

#### 4.3.2.1 Abhängigkeit zum Lieferanten

Investitionen können in einem Unternehmen sowohl eine Chance als auch ein Risiko darstellen. Jung [2014] stellt dabei heraus, dass im Allgemeinen Investitionen notwendig sind, um die Wettbewerbsfähigkeit und eine Steigerung der Leistungen zu sichern. Damit sind diese wesentlich für eine erfolgreiche Unternehmensentwicklung, die jedoch auch kritisch betrachtet werden sollten. Mischwingende Unsicherheit kann sich nachteilig auf das Unternehmen auswirken. Um den Erfolg einer Investition abzuwägen, bietet die Investitionsrechnung eine Entscheidungsgrundlage. Bei dieser werden sowohl die monetären Kriterien als auch die nicht-monetären Kriterien bewertet und für die Investitionsentscheidung beurteilt<sup>47</sup>.

Wesentlich bei der Betrachtung der nicht-monetären Faktoren ist das Erkennen von Unsicherheiten für die geplante Investition. Im Rahmen der Implementierung einer neuen Maschine, wie einer Assistenzroboterapplikation, ist eine Lieferantenbewertung hinsichtlich Lieferantsicherheit und Lieferantenunabhängigkeit durchzuführen. Hierbei wird analysiert, inwieweit ein Risiko einer Insolvenz des Lieferantens besteht und ob sich das Unternehmen durch den Einkauf der Technik von diesem abhängig macht. Letzter Punkt ist wichtig, um sich jederzeit vom Lieferanten lösen zu können, ohne dass daraus eine Gefahr für das eigene Unternehmen entsteht.

Dabei kann eine Lieferantenabhängigkeit zum einen in ihrer Funktion und zum anderen in der damit verbundenen IT-Anbindung entstehen. Hinsichtlich der Funktion entsteht eine Abhängigkeit, wenn die Maschine eine Spezialanfertigung ist. Individuell entwickelte und konstruierte Maschinen bzw. Roboter für die Fertigung eines Unternehmens sind vielleicht rentabler als

<sup>47</sup>Bei der Investitionsrechnung der monetären Kriterien sind zwei Verfahren möglich, das statische und das dynamische Verfahren. Zu der statischen Investitionsrechnung zählen beispielsweise die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung, die Amortisationsrechnung und Rentabilitätsrechnung. Dynamische Verfahren werden auf Basis der Kapitalwertmethode oder interne Zinsfuß-Methode durchgeführt. Um Unsicherheiten abzuwegen, können Verfahren wie beispielsweise die Risikoanalyse, Sensitivitätsanalyse oder die Entscheidungsbaumanalyse herangezogen werden [Jung, 2014].

Standardprodukte. Jedoch bedeutet dies zugleich, dass ein Ausfall dieser Maschine entweder die Produktion zum Stillstand bringt oder diese langsamer verläuft [Bleiber, 2015]. Dieses Risiko gilt es im Bezug auf einen möglichen Auslieferungsrückstand zu bewerten und gegebenenfalls mit Maßnahmen entgegenzuwirken<sup>48</sup>. Eine weitere Abhängigkeit kann entstehen, wenn für die neue Maschine die Software des Lieferanten benötigt wird. Die Gefahren der Datensicherheit und Betriebssicherheit wurden bereits im Kapitel 4.2.4 erläutert. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass sich ein Unternehmen nicht durch ein zusätzliches System des Lieferanten abhängig macht. So etwa, wenn dieses für die Steuerung der Anlage und damit der Produktion unabdingbar ist [Aschoff, 2013].

#### 4.3.2.2 Schwächung der Wettbewerbsintensität

Wo die Smart Factory als Stärke für eine optimierte und teilweise automatisierte Produktionsplanung und -steuerung herausgestellt worden ist, ist sie im Bezug der Wettbewerbsintensität als Schwäche anzusehen. Der Wirtschaftsingenieur Thibault Pucken brachte in der Zeitschrift *VDI-Nachrichten* zum Ausdruck, dass mit der Zunahme der Integration der Lieferanten der Wettbewerb gehemmt wird und in Folge dessen die Einkaufspreise steigen [Schwarz, 2016]. Grundsätzlich stehen Wettbewerbsintensität und die Beschaffungskosten in einem engen Zusammenhang. Je mehr Wettbewerb besteht bzw. vom strategischen Einkauf aufgebaut wird, desto stärker werden die Preise gedrückt. Pucken sieht mit der Zunahme der Integration der Lieferanten die Gefahr, dass die Anlauf- und Investitionskosten bei Neukunden steigen und dadurch die Wettbewerbsintensität sowie die Einkaufspreise negativ beeinflusst werden. Im Fall einer Preissteigerung im Produktlebenszyklus bleiben dem Einkauf lediglich die Möglichkeiten, den Preis beim Kunden zu erhöhen oder durch Rationalisierung eigene Kosten zu senken [Schwarz, 2016]. So kommt Pucken zur Schlussfolgerung, dass durch die Integration alle Geschäftspartner der Wertschöpfungskette der Einfluss auf die Einkaufspreise geschwächt wird.

### 4.4 Normstrategien der SWOT-Analyse

Im Zusammenschluss der abgeleiteten Chancen und Risiken mit den intern analysierten Stärken und Schwächen ergibt sich für die SWOT-Analyse die in der Abbildung 4.6 zusehende Matrix.

<sup>48</sup>Sicherheit wird erreicht durch Lagerbestandsaufbau, zusätzliche Wartungszyklen des Lieferanten oder einen eigenen internen Bereich für die Wartung der Anlagen, um präventive Maßnahmen durchzuführen.

Die abgeleiteten Normstrategien werden im nachfolgenden Kapitel 5 für die Ausarbeitung der Handlungsempfehlung herangezogen.

		<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicherung der Arbeit in Hochlohn-ländern durch Senkung der Produktionskosten</li> <li>- Assistenzroboter als Industrie 4.0 Komponente für eine Smart Factory nutzen</li> <li>- Steigerung der Produktvarianz durch flexiblen Einsatz der Assistenzroboter</li> <li>- Neugestaltung der Produktionslinien für Energie- und Flächeneffizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lieferantenabhängigkeit</li> <li>- Lieferantenunsicherheit</li> <li>- Machtverlust des strategischen Einkaufs über Einkaufspreise</li> </ul>
<b>Chancen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- positive Marktpreisentwicklung</li> <li>- bestehende Technologiezentren und erfolgreiche Start-up-Unternehmen</li> <li>- Schaffung altersgerechte Arbeitsbedingungen</li> <li>- Senkung Produktionskosten &gt;Freisetzen von Mitarbeitern</li> <li>- Politik als Treiber der Industrie 4.0 mit finanziellen Mitteln</li> <li>- bestehende Standards und Normen für eine sichere Technik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Nutzen der heute möglichen Anwendungen von Assistenzrobotern: <ul style="list-style-type: none"> <li>- bei hoch-frequentierten Tätigkeiten</li> <li>- beim Heben schwerer Lasten</li> <li>- bei Qualitätsprüfungen</li> <li>- bei nicht wertschöpfenden Tätigkeiten in der Produktion (logistische Dienste)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2) Zusammenarbeit mit Technologiezentren, um hauseigene Lösungen für spezielle Roboteranwendungen zu entwickeln und funktionale Technologielücken zu schließen</li> <li>3) Nutzen von Start-up-Unternehmen für individuelle Lösungen</li> </ul>
<b>Risiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verlust der Mitarbeiterakzeptanz</li> <li>- Anpassung der Unternehmensorganisation</li> <li>- fehlende Standards für IT-Sicherheit</li> <li>- ungeklärte Haftungsfragen</li> <li>- Schutz personengebundener Daten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4) Frühes Einbeziehen der Mitarbeiter in die Veränderungen der Digitalisierung und Automatisierung</li> <li>5) Training und Um-Qualifikation der Mitarbeiter für MMI Arbeitsplätze und die informationstechnischen Hintergründe</li> <li>6) Integration der notwendigen Informationssysteme für digitale und automatisierte Prozesssteuerung unter Berücksichtigung der Aspekte des Security by Design</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>7) Bestehende Lieferanten wählen, von denen das Unternehmen bereits abhängig ist, besonders hinsichtlich der Softwareauswahl</li> </ul>

TABELLE 4.6: Eigene Darstellung: Normstrategien für den Einsatz von Assistenzrobotern



## **Kapitel 5**

# **Handlungsempfehlung für den Einsatz von Assistenzrobotern in produzierenden Bereichen**

Die Analyse des Ist-Zustands der Technik hat Aufschluss darüber gegeben, dass autonome und intelligente Roboter heute noch in der Entwicklungsphase stehen. Dennoch ist die Technik so weit vorangeschritten, dass kooperierende Arbeitssysteme der Mensch-Maschine-Interaktion möglich sind. In diesem Kapitel wird eine Diskussion der heute möglichen und zukünftigen Funktionsweisen und Einsatzgebiete von Assistenzrobotern geführt sowie der Nutzen für produzierende Unternehmen herausgestellt. Im zweiten Teil werden auf Basis der definierten Normstrategien aus der SWOT Analyse abschließend Handlungsempfehlungen bezüglich einer Investition und Integration von Assistenzrobotern für Unternehmen ausgesprochen.

### **5.1 Diskussion - Funktionsweise und Nutzen**

Heute bereits bestehende Assistenzroboterlösungen wurden in den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 vorgestellt. Die Entwicklung ist so weit voran geschritten, dass die Technik für eine sichere Mensch-Maschine-Interaktion ausgereift ist. Um in einer arbeitsteiligen Umgebung mit dem Menschen in Interaktion zu treten, muss der Roboter in der Lage sein, Gefahren seiner Umgebung frühzeitig zu erkennen und in seiner Aktionsausführung fehlertolerant und präzise zu

agieren. Diese genormten Anforderungen wurden vor allem realisiert durch umfassende Sensorsysteme, die die Manipulatorbewegung und die Arbeitsumgebung überwachen. Noch in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse des Fraunhofer Institut IPA und ISI im Jahr 2011 galt eine sichere Mensch-Roboter-Interaktion als offener Forschungsbedarf. Dieser konnte mit dem Fortschritt einer sicheren Technik sowie definierten Normen und Richtlinien geschlossen werden [Hägele, 2011, S.317].

Dabei lag der Fokus dieser Studie auf den Einsatzmöglichkeiten im Maschinen- und Anlagenbau sowie in der Automobilindustrie, die als signifikante und potenzielle Branchen für den Einsatz von Assistenzrobotern galten. Beide Branchen implementierten in den vergangenen Jahren Assistenzroboteranwendungen (vgl. Kap. 3.3.3.2). Umfassender wurde jedoch die neue Robotertechnologie in der Elektroindustrie eingeführt. Diese profitiert vor allem durch den hohen Automatisierungsgrad von einfachen Verfahrenstätigkeiten, wie zum Beispiel bei der Herstellung von Handys, wesentlich. Die Zukunft potenzieller Anwendungsbranchen sind die Luftfahrt- und Pharma industrie. In diesen sind Handlingtätigkeiten, Fertigungsverfahren, Montagearbeit oder Qualitätsprüfungen vorherrschend, die zugleich signifikant für die Automatisierung und das Assistieren durch einen Roboter sind.

In den unterschiedlichen Branchen ist der Nutzen, in Assistenzroboter zu investieren, verschieden. Assistenzroboter, die heute auf dem Markt verfügbar sind, wurden speziell für einfache und wiederkehrende Tätigkeiten entwickelt. Ihr Einsatz ist vor allem in der Komponentenfertigung von Kleinteilen wie zum Beispiel in der Elektroindustrie vorteilhaft. So ergeben sich für Unternehmen in der Elektroindustrie folgende Vorteile:

- Automatisierung monotoner Arbeitsabläufe (Pick and Place, Bohren, Löten, Kleben)
- Raumgewinn aufgrund des Wegfalls eines Schutzzauns
- Produktivitätssteigerung durch parallele Arbeit des Fertigungsmitarbeiters und Roboters an einem Werkstück
- Minimierung des Kontaminierungsrisikos z.B. bei Platinenbestückung

In den Bereichen der Pharma- und Chemieindustrie sowie Luftfahrt- und Automobilindustrie sind mögliche Anwendungsgebiete unter dem heutigen Stand der Technik überschaubar. In der Pharma- und Chemieindustrie stellt sich die Herausforderung, eine exakte Dosierung für das richtige Mischverhältnis zu erreichen. In diesem Bereich werden Assistenzroboter für die präzise Bemessung und das Mischen von Pharmaprodukten eingesetzt. Damit steigt die Qualität

und Verwertbarkeit produzierter Chargen. In der Luftfahrt- oder Automobilindustrie, in denen Montageprozesse vorherrschend sind, ist der ergonomische Vorteil ein wesentliches Kriterium, in Assistenzroboter zu investieren und damit altersgerechte Arbeitsplätze zu schaffen.

Neben den nicht-monetären Faktoren gab das Kapitel 4.2.1 Aufschluss über zwei wesentliche monetäre Effekte, die Unternehmen dazu veranlassen, Assistenzroboter in der Produktion einzusetzen. Der erste positive Effekt ist die deutliche Senkung der Produktionsstückkosten, wenn manuelle Verfahrensprozesse oder nicht-wertschöpfende Tätigkeiten des Mitarbeiters durch den Roboter automatisiert werden können. Ein zweiter wesentlicher Effekt ist die positiv ausfallende Amortisationsdauer der heute herkömmlichen zu erwerbenden Assistenzroboter. Mit einem Einkaufspreis von 26.000 EUR sind diese für ein Unternehmen nach nur wenigen Monaten gewinnbringend. Verstärkt wird dieser Aspekt durch eine positiv prognostizierte Marktentwicklung von Assistenzrobotern. Demnach wird der Stückkostenpreis eines Roboters in den nächsten zehn Jahren um fast 40% fallen. Damit ist aus Sicht der Wirtschaftlichkeit eine Einführung der Assistenzrobotik in der Produktion erstrebenswert.

Durch die Betrachtung der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten in den beschriebenen Branchen stellt sich heraus, dass gegenwärtig teil-automatisierte Prozesse durch einen stationären Assistenzroboter ausgeführt werden. Damit sind zwar die Anwendungen in der Komponentenfertigung von Kleinteilen und speziell in der Elektroindustrie erfolgreich, doch sind die Einsatzmöglichkeiten im Allgemeinen überschaubar. Vor diesem Hintergrund sind für die Zukunft erweiterte Anwendungsmöglichkeiten für Assistenzroboter zu entwickeln, die einen zusätzlichen Nutzen für Unternehmen generieren. Bezugnehmend auf die einleitende Fragestellung der Arbeit, welche Einsatzgebiete sich zukünftig im Rahmen der neuen Technologien von Assistenzrobotern ergeben, sind zwei wesentliche potenzielle Anwendungsbereiche zu nennen, zum einen die assistierenden Qualitätsprüfungen und zum anderen logistische Dienste für nicht wertschöpfende Tätigkeiten:

- Erweiterung der Qualitätsprüfung: Mit dem Beispiel des Roboters Valerie wurde aufgezeigt, dass der Roboter die vollrichtete Arbeit, hier das Auftragen von Dichtmittel, prüft. Zusätzlich ist vorstellbar, dass die Gesamtprüfung einer montierten Baugruppe hinsichtlich der Qualität der Teile, des Einbaus und der Vollständigkeit der verbauten Teile vom

Roboter als Assistent des Fertigungsmitarbeiters durchgeführt wird. Dies sichert einerseits eine hohe Qualität und andererseits die Aufnahmen und Dokumentation des aktuellen Fertigungsstands in Echtzeit. Darüber hinaus wirken derartige Systeme unterstützend zur Steuerung einer intelligent vernetzten Fertigung.

- Transporttätigkeiten: Um den Fertigungsmitarbeiter von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten zu entlasten, ist die Übernahme von Transportwegen ein weiterer Anwendungsbereich für Assistenzroboter. Alltäglich anfallende Dienste, wie etwa die Nachlieferung von Ersatz- oder Fehlteilen, das Holen von Verbrauchsmaterialien wie Lacke oder Kleber sowie der Teiletransport in der Produktionshalle und zwischen Produktionshallen sind denkbare logistische Assistenzaufgaben. Hierfür ist die Entwicklung autonomer und intelligenter Roboter ein wesentliches Kriterium.

## **5.2 Forschungsbedarf**

Die Erläuterungen der Fähigkeiten eines Assistenzroboters und der Stand der Technik haben aufgezeigt, dass hinsichtlich der notwendigen Funktionsweisen eines autonomen Assistenzroboters, im Vergleich zu den heute entwickelten Fähigkeiten, offene Forschungsfelder bestehen. Um sich in einer ständig ändernden Umgebung selbstständig bewegen und agieren zu können, sind autonome, lernfähige sowie kontext-sensitive und adaptive Fähigkeiten des Roboters notwendig. Im Rahmen der technischen und informationstechnischen Erläuterungen wurden zwei wesentliche Schlüsselkomponenten für diese Fähigkeiten herausgestellt. Diese bestehen zum einen aus der Interoperabilität und der Erzeugung von Kontextwissen und zum anderen im Aufbau einer adäquaten Softwarearchitektur und Software, um dem Roboter Lernfähigkeit und Intelligenz anzueignen. Der hierfür gegenwärtig ausstehende Forschungsbedarf ist folgender:

- Weiterentwicklung einer Software-Architektur für autonom navigierende Roboter im Produktionsbereich: Die Darstellung der unterschiedlichen Softwarestrukturen hat aufgezeigt, dass unterschiedliche Ansätze für autonom agierende Roboter bestehen (vgl. Kap. 3.1.1). Zum einen werden Architekturen entwickelt, die parallele Prozesse ausführen können. Diese finden ihre Anwendung bei autonom fahrenden Fahrzeugen. Zum anderen wird der Ansatz eines kognitiven Architekturmodells verfolgt, das sich am menschlichen Bewegungsfluss orientiert, um feinere Roboterbewegung zu erlangen. Diese Architekturen

befinden sich in der Entwicklung bzw. Versuchserprobung und sind für die Umsetzung im produzierenden Bereich zukünftig auszuarbeiten.

- Entwicklung einer Standardsoftware für autonome Roboter: Um einzelne Softwarelösungen für heterogene Anwendungen zu vermeiden, ist eine Standardsoftware unter Berücksichtigungen der Entwicklung einer sicheren Software notwendig.
- Weiterentwicklung der sensorischen Fähigkeiten: Damit ein autonom agierender Roboter sich in seiner Umgebung adaptiv verhalten kann, ist die Erkennung und Wahrnehmung der nahen Umgebung über Sensoren eine wesentliche Voraussetzung. Der Roboter muss dabei in der Lage sein, Objekte sicher zu identifizieren und sich auf ändernde Lichteinflüsse einstellen können. Unter anderem bedeutend ist auch eine exakte Bilderverarbeitung. Vor dem Hintergrund einer verlässlichen Qualitätsprüfung des Bauteils, müssen Objekte eindeutig und präzise aufgenommen und identifiziert werden können.
- Weiterentwicklung der Modularität: Die Zukunft der Assistenzroboter liegt in dem universellen Gebrauch. Plug and Play Module sind für einen universellen Einsatz von Assistenzrobotern wesentlich, um den Vorteil eines flexiblen Einsatzes des Assistenzroboters zu erzielen. Dabei ist es erforderlich, dass der Tausch des Werkzeugs am Endeffektor oder das An- und Abmontieren von einzelnen Modulen schnell ausgeführt werden kann.
- Umsetzung einer multimodalen Kommunikation: Gegenwärtig beruhen die Kommunikationsmöglichkeiten bei der Mensch-Maschine-Interaktion auf der Eingabe auf einem Display oder der haptischen Steuerung eines Roboters über taktile Sensoren wie beispielsweise bei der Handführung. Für die Zukunft sind interaktive Kommunikationsmöglichkeiten notwendig. Dabei ist eine direkte Sprachsteuerung wesentlich, damit der Mensch bei Fehlverhalten oder sonstigen Störungen schnell und wirksam über direkte Anweisungen in den Prozess eingreifen kann. Hinführend auf eine zunehmende natürliche Interaktion zwischen Mensch und Roboter sind kontext-sensitive Kommunikationsweisen über Sprache, Gestik und Mimik ein weiteres offenes Forschungsgebiet.
- Ausbau zusätzlicher Fähigkeiten: Um die Programmierung des Roboters zunehmend zu vereinfachen und interaktiv zu gestalten, sind zwei Ansätze gegenwärtig in der Entwicklung. Zum einen die Teach-In Funktion, die das Programmieren durch Vormachen ermöglicht und zum anderen der Datenhandschuh, mit dem das Greifen des Roboters exakt aufgenommen werden kann. Beides ermöglicht für die Zukunft eine einfache Umprogrammierung durch den Anwender und unterstützt den flexiblen Einsatz und das schnelle Umgestalten der Roboteranwendung.

Die benannten offenen Forschungsbereiche wurden in der Industrie erkannt und im Rahmen von Projekten aufgenommen. So zum Beispiel wurden mit dem Förderprogramm „AUTONOMIK“ des BMWi [2016a] verschiedene Projekte initialisiert<sup>49</sup>, die in Zusammenschluss mit verschiedenen Partnern aus der Industrie und Forschung umgesetzt werden. Ebenfalls interessant für die Assistenzrobotik sind angrenzende Projekte in anderen Branchen. Zwei gegenwärtig geführte Projekte in der Landwirtschaft und im Bereich Inspektion sollen als Beispiel nachfolgend kurz vorgestellt werden.

In der Landwirtschaft wird mit dem Projekt „marion“ an autonom agierenden Fahrzeugen zur Automatisierung der Arbeitsprozesse entwickelt. Die einzelnen Erntemaschinen sind mit einander vernetzt, um sich gegenseitig den aktuellen Stand des Erntevorgangs mitzuteilen. Dieser wird mittels Sensoren und einem Ortungssystem aufgenommen und von einer Planungssoftware verarbeitet, die unter Berücksichtigung der individuell eingestellten ökonomischen und ökologischen Kriterien die nachfolgenden Arbeitsprozesse plant. Zusätzlich dient ein Simulationssystem zur Prüfung und Optimierung der Planungswerte [BMW, 2013, S.15]. So zielt das Projekt auf die Entwicklung einer automatisierten Erntesteuerung mittels autonom geführten Fahrzeugen.

Für die Wartung von Gasanlagen wird der „RoboGasInspector“ entwickelt, um gefährliche Arbeitsprozesse dem Menschen abzunehmen. Der Roboter hat die Aufgabe, Gaslecks in einer Anlage zu detektieren. Dabei verhält sich der Roboter intelligent und autonom, sodass ein Mitarbeiter nur im Notfall eingreifen muss. Das Projekt verwendet zur Orientierung die SLAM-Methode sowie zusätzlich für den Außenbereich eines Geländes RFID und GPS basierende Navigationssysteme. Die Verbindung zum Mitarbeiter wird über die Vernetzung mit dem Internet sichergestellt. Hierüber können dem Roboter ebenfalls Informationen zusätzlich mitgeteilt werden, wenn diese nicht lokal für ihn aufnehmbar sind [BMW, 2013, S.16].

Zusammenfassend betrachtet, sind die heutigen Anwendungen von Assistenzrobotern erfolgreich, doch um einen breiten Einsatz und einen wirtschaftlichen Vorteil der neuen Technologie zu erzielen, sind erweiterte Entwicklungen bezüglich eines autonom und intelligent agierenden Roboters und die Entwicklung eines Roboter gesteuerten Qualitätsprüfungssystems bedeutend. Damit werden die Aufgaben und Fähigkeiten des Assistenzroboters komplexer. Doch besteht genau in diesen Anwendungen für die Industrie das wirtschaftliche Interesse. Damit sollte in der

---

<sup>49</sup>Hierzu zählen die folgenden Projekte:

ReApp / CoCos Project - Entwicklung von Plug and Play Funktionen

FTF out of the box - Entwicklung von Sprach- und Gestensteuerung

SMARTSITE - Entwicklung von autonomen und intelligent vernetzten Baumaschinen und Anlagen im Straßenbau

Zukunft der Fokus nicht auf dem reinen Automatisieren von Prozessschritten liegen, sondern vor allem auf der Assistenzfunktion des Roboters. Die Zukunft von Assistenzrobotern hängt damit direkt von dem Erfolg der Entwicklung und Forschung der Bereiche künstliche Intelligenz und Softwareentwicklung ab.

### **5.3 Handlungsstrategien**

Die neue Robotertechnologie steht noch in den Anfängen ihrer zukunftsweisenden Entwicklung und des Einsatzes in der Industrie. Für Unternehmen bedeutet dies, sich mit der neuen Technik auseinanderzusetzen und entweder, erste gewinnbringende Einsatzfelder umzusetzen oder sich an der Entwicklung neuer Lösungen von Assistenzroboteranwendungen zu beteiligen. Vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und des Erhalts der Arbeitsplätze im Land durch eine kostengünstigere Fertigung, ist die Einführung neuer Technologien, wie der Assistenzrobotik, für Unternehmen erstrebenswert. Hierfür wurden im Rahmen der SWOT-Analyse folgende allgemeine Normstrategien aufgestellt:

1. Nutzen der heute möglichen Anwendungen von Assistenzrobotern
2. Zusammenarbeit mit Technologiezentren, um hauseigene Lösungen für spezielle Roboteranwendungen zu entwickeln und funktionale Technologielücken zu schließen
3. Nutzen von Start-up-Unternehmen für individuelle Lösungen
4. Frühes Einbeziehen der Mitarbeiter in die Veränderungen der Digitalisierung und Automatisierung
5. Training und Um-Qualifikation der Mitarbeiter für Mensch-Maschine-Interaktion Arbeitsplatze und zum Anlernen der informationstechnischen Hintergründe
6. Vorbereitung und Integration der notwendigen Informationssysteme für digitale und automatisierte Prozesssteuerung unter Berücksichtigung der Aspekte des Security by Design
7. Bestehende Lieferanten wählen, von denen das Unternehmen bereits abhängig ist, besonders hinsichtlich der Softwareauswahl

Die einzelnen Normstrategien werden nachfolgend kurz erläutert:

Im ersten Schritt ist zu prüfen, ob Assistenzroboterlösungen, die auf dem Markt verfügbar sind, in der Produktion eingesetzt werden können. Die Verkaufszahlen von Assistenzrobotern der letzten Jahre zeigen, dass einzelne Unternehmen bereits ihre ersten Erfahrungen mit dem Einsatz und dem Umgang von Assistenzroboterlösungen sammeln konnten. Unternehmen können somit heute schon von den ersten Erfahrungen anderer Unternehmen und der Roboterhersteller profitieren, um eigene potenzielle Anwendungen für sich gewinnbringend zu implementieren.

Dabei nehmen die Unternehmen im Rahmen der industriellen Entwicklung die Position ein, eigene mögliche Anwendungsszenarien einer (teil-)automatisierten Fertigung in ihrem Unternehmen auszuarbeiten. Forschung und Politik regen zu Einsatzmöglichkeiten an, doch vor allem für spezielle Lösungen sind Unternehmen aufgefordert, eigene Szenarien zu definieren. Mit diesen können die Unternehmen im Zusammenschluss mit Roboterherstellern oder Forschungsinstituten ihren Einsatz von Assistenzrobotern in der Produktion entwickeln. Für Unternehmen, die als Vorteil die Nähe zu Technologiezentren besitzen, wird empfohlen, Forschungsprojekte wie zum Beispiel die Integration autonomer Roboter in der Produktion zu nutzen. Bietet sich für Unternehmen diese Chance nicht, ist eine Zusammenarbeit mit Start-up-Unternehmen wie zum Beispiel über die Ausschreibung eines Wertbewerbes ebenfalls eine mögliche Alternative.

Diesem Bestreben bzw. Trend wirken die noch offenen rechtlichen und politischen Fragestellungen entgegen. Sowohl bezüglich der Haftungsfrage als auch für die Entwicklung von Standards und Normen der IT-Sicherheit sind die Unternehmen gegenwärtig in einer abwartenden Position. Erst mit konkreten Ergebnissen zu den offenen Fragestellungen der Datensicherheit, des Datenschutzes und der Informationssicherheit sind Unternehmen gesetzlich, gesellschaftlich und ethisch in der Lage, Assistenzroboterlösungen über die heutigen Möglichkeiten hinaus auszuschöpfen.

Dennoch ist den Unternehmen zu raten, frühzeitig ihre Mitarbeiter auf Veränderungen im Zuge der Digitalisierung und Automatisierung und die sich wandelnden Arbeitsplätzen heranzuführen. Industrielle Veränderungen, wie die Industrie 4.0 es beschreibt, sind in einem Unternehmen nur umsetzbar, wenn das gesamte Unternehmen, die Manager, die Mitarbeiter und wenn vorhanden der Betriebsrat, diesem Wandel aufgeschlossen gegenüberstehen. Hierbei sind Mitarbeiter und Betriebsrat frühzeitig in mögliche Veränderungen mit einzubinden. Der Erfolg der neuen Technologien hängt entscheidend von der Bereitschaft der Mitarbeiter ab, den industriellen Fortschritt mit zu beschreiten sowie von deren Wandelbarkeit, sich auf neue Arbeitsinhalte einzustellen. Um den Mitarbeitern die Angst vor Veränderungen zu nehmen und die Akzeptanz zu

erhalten, sind Aufklärungs- und Qualifikationsmaßnahmen in Form von Mitarbeiterkommunikationen, Vorträgen und Trainings anzudenken.

Doch der wichtigste zu betrachtende Aspekt ist der Schutz vor äußereren Angriffen auf die Informationssysteme eines Unternehmens. Die Einführung von Assistenzrobotersystemen im Hinblick auf eine Vernetzung der Produktionsabläufe ist nur dann möglich, wenn die IT-Sicherheit einen Standard erzielt, der die Unternehmen vor äußereren Angriffen schützt bzw. sie so schnell abwehren kann, dass die Betriebssicherheit und der Schutz des Menschen gewährleistet wird. Heutige theoretisch erfasste Ansätze sind zum einen Softwaremanagementsysteme, die Angriffe von außen zeitnah auslesen und zum anderen der Gedanke, die Softwaresicherheit bereits bei der Entwurfsphase zu integrieren. Für Unternehmen ist in diesem Punkt zu empfehlen, die Diskussionen zur Ausarbeitung und Entwicklung von Sicherheitsansätzen zu verfolgen oder wenn möglich direkt mitzuwirken, um sich frühzeitig mit der Thematik im Unternehmen zu befassen und gegebenenfalls vorbereitende Maßnahmen einzuleiten. Dabei ist ein wesentliches Kriterium für Unternehmen, zusätzliche Schnittstellen durch Robotersoftware zu vermeiden und sich von dieser nicht vom Lieferanten abhängig zu machen. Das Risiko wird minimiert, wenn bereits bestehende Softwarelösungen von bestehenden Dienstleistern genutzt werden.



# **Kapitel 6**

## **Fazit**

Die Entwicklung von Assistenzrobotern und deren Systeme profitiert vom Aufschwung der Industrie 4.0. Forschungsprojekte werden von der Politik initialisiert und gefördert. Wirtschaft und Politik haben aus strategischer Sicht Interesse daran, den neuen industriellen Aufschwung mit zu gestalten und damit die Fertigung in Hochlohnländern zu sichern. Aus diesem Grund wurden Forschungsgebiete wie die Entwicklung neuer Sensorsysteme für die Navigation oder Umfelderkennung des Roboters sowie die Softwareentwicklung zur Systemsteuerung in den letzten Jahren intensiviert, um eine sichere Mensch-Maschine-Interaktion zu ermöglichen. Für die Unternehmen bedeutet dies, dass ihnen in Zusammenarbeit mit den Forschungsinstituten eine Chance gegeben wird, einen globalen Wettbewerbsvorteil zu erlangen und als Trendsetter zu wirken. Dabei ergeben sich für die einzelnen Branchen gegenwärtig die Vorteile einer gesteigerten Präzisionsleistung, der Verbesserung von ergonomisch ungünstigen Arbeitsbedingungen sowie der Einführung automatisierter Techniken bei monotonen Verfahrenstätigkeiten.

Bei einer Implementierung von Assistenzroboterlösungen können die Rahmenbedingungen für die einzelnen Unternehmen verschieden sein. So ist entscheidend, wie schnell Veränderungen in einem Unternehmen umgesetzt werden können. Bei organisatorischen Veränderungen oder eventuell bei einem Abbau von Arbeitsplätzen gibt es je nach Unternehmenskultur und der Aktivität des Betriebsrates bzw. einer Gewerkschaft unterschiedliche unternehmensinterne Einflüsse, die sich auf die Entscheidung einer Investition in Assistenzroboterlösungen auswirken. Wesentlich zu berücksichtigen ist hierbei das früher Einbeziehen aller Beteiligten und die Umqualifizierung der Mitarbeiter.

Mit Blick in die Zukunft werden autonome Roboter einen erweiterten Anwendungsbereich für die Industrie erzielen. Vor allem die assistierende Form steht bei den zukünftigen Roboterlösungen im Mittelpunkt, um die Vorteile der Mensch-Maschine-Interaktion auszuschöpfen. Doch nicht allein die assistierenden Dienste werden zukunftsweisend sein, sondern auch der Einsatz von Assistenzroboterlösungen für die Realisierung einer selbst-organisierenden und selbst-optimierenden Planung und Steuerung der Produktion. Assistenzsysteme werden zunehmend eine entscheidende Rolle bei der Informationsgewinnung zum aktuellen Fertigungsstand einnehmen. Dabei ist das Risiko der internen Betriebssicherheit abzuwägen. Entwicklungen für eine sichere Software werden vorangetrieben, doch ist dieser Aspekt aus heutiger Sicht der wesentliche Grund für ein Zögern der Unternehmen, den technologischen Fortschritt stärker voranzutreiben und umzusetzen. Damit wird sich mit der Klärung der noch offenen politischen, technischen und ethischen Fragen zeigen, ob entsprechend der Prognose der World Robotics, der Anstieg des Einsatzes von Assistenzrobotern in dem Maß eintreten wird.

# Anhang A

## Anhangverzeichnis

### A.1 Auflistung aller relevanten Normen und Richtlinien für die Herstellung und Anwendung kooperierender Roboter

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht aller für den kooperierenden Roboter relevanten Richtlinien und Normen.

Norm	Bezeichnung
Maschinenrichtlinie 2006/42/EG	„EU-Binnenmarktregeln für Maschinen und Anlagen“
DIN EN ISO 10218-1:2011	„Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil1: Roboter“
DIN EN ISO 10218-2:2011	„Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil2: Robotersysteme und Integration“
ISO/TS 15066	„Robots and robotic devices - Collaborative Robots“
DIN EN 61800-5-2	Elektrische,Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl - Teil 5-2: Anforderungen an die Sicherheit - Funktionale Sicherheit, (IEC 22G/264/CD:2013)
EN ISO 12100:2010	„Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungssätze - Risikobeurteilung und Risikominderung“
EN ISO 13849-1:2008	„Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze“

TABELLE A.1: Eigene Darstellung: Relevante Normen und Richtlinien für kooperierende Roboter

## A.2 Grenzwerte der einwirkenden Kraft und des Druckes

Auf Basis verschiedener Versuche wurden die hier aufgelisteten Grenzwerte der einzelnen Körperfälle ermittelt und mit der EN ISO 10218 festgeschrieben: Klemm-/Quetschkraft (KQK), Stoßkraft (STK), Druck/Flächenpressung (DFP).

Körperbereiche	Einzelbereiche	Grenzwerte		
		KQK in N	STK in N	DFP in N/cm <sup>2</sup>
1. Kopf mit Hals	1.1 Schädel/Stirn	130	175	30
	1.2 Gesicht	65	90	20
	1.3 Hals (Seiten)	145	190	50
	1.4 Hals (Kehlkopf)	35	35	10
2. Rumpf	2.1 Rücken/Schulter	210	250	70
	2.2 Brust	140	210	45
	2.3 Bauch	110	160	35
	2.4 Becken	180	250	75
	2.5 Gesäß	210	250	80
3. Obere Extremitäten	3.1 Oberarm/Ellenbogengelenk	150	190	50
	3.2 Unterarm/Handgelenk	160	220	50
	3.3 Hand/Finger	135	180	60
4. Untere Extremitäten	4.1 Oberschenkel/Knie	220	250	80
	4.2 Unterschenkel	140	170	45
	4.3 Füße/Zehen/Gelenke	125	160	45

TABELLE A.2: Auflistung der Grenzwerte für die Kraft- und Druckeinwirkung auf Körperteile  
Quelle: [Huelke, 2012, S.15]

### A.3 Lisa - Steuerungssystem

Das CAN-Bus System verbindet die einzelnen Systeme wie das Sensornetz oder die Antriebe des Manipulators mit der zentralen Steuerungseinheit. Zusätzliche Logikverbindungen steuern das Stoppen der Antriebe in einem Fehlerfall, ohne dass die Funktion der Sensoren beeinträchtigt wird [IFF, 2009, S.49]. So erfolgt die Steuerung der Gelenkachsen über das CAN-Bus System, womit die Greifgeschwindigkeit und -richtung des Roboters geregelt wird.

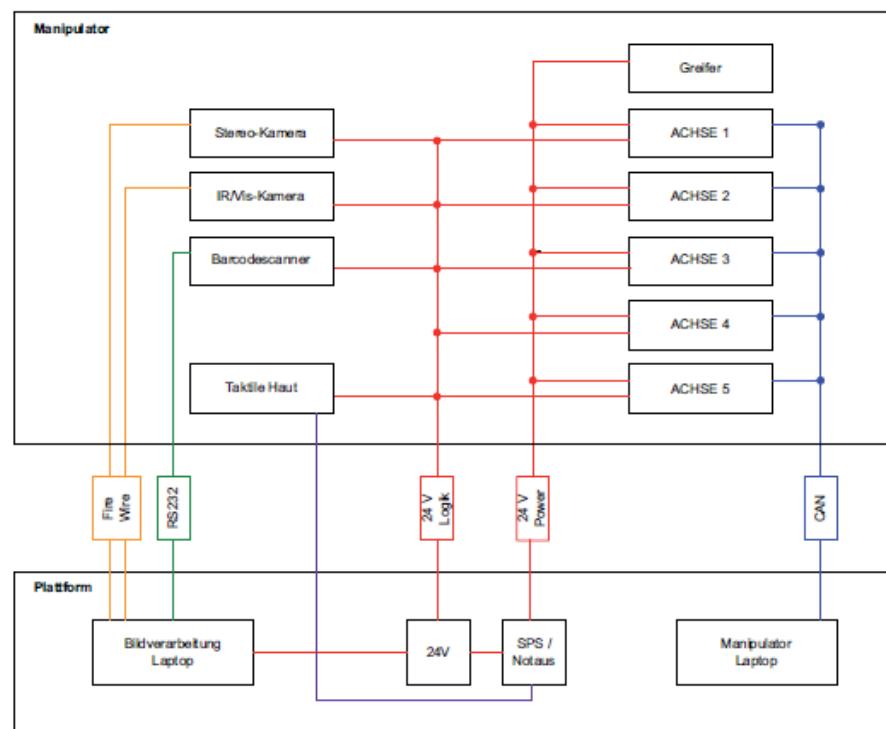


ABBILDUNG A.1: Lisa - Aufbau Steuerungssystem

Quelle: [IFF, 2009, S.80]

## A.4 MANTIS - Sensoraufbau

Mantis ist in seiner Laufposition fast drei Meter hoch und 1,82 Meter breit. Dabei wiegt er 107 kg und ist 3,6 km/h schnell. Die zentrale Steuerungseinheit, separate Mikrocontroller und Recheneinheiten an den Antrieben realisieren das Zusammenwirken des Bewegungsapparates. Die hierfür notwendigen Messdaten werden aus dem im nachfolgenden Bild dargestellten Sensornetz aufgenommen.

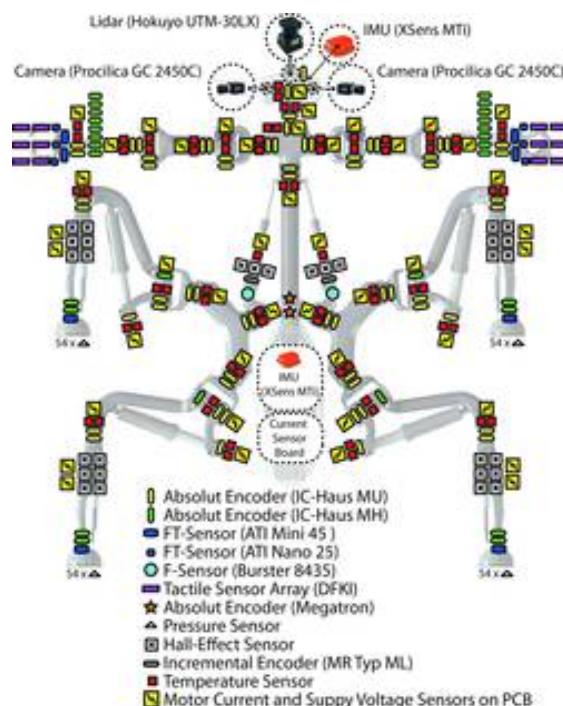


ABBILDUNG A.2: Aufbau Sensornetz

Quelle: [DFKI, 2015]

Das breit aufgestellte Sensornetz umfasst 122 Temperatursensoren, 191 Sensoren für die Strommessung, Taktile Sensornetze, 14 Sechs-Achs-Kraft-Drehmoment-Sensoren, 88 Rotations-Absolutwertgeber sowie Laserscanner und Stereokamera [DFKI, 2016].

## A.5 Technische Daten der Assistenzroboter: iiwa, Sawyer, YuMi, CR-35iA

Im Abschnitt 3.3.2 wurden drei Assistenzroboter auf dem Markt verglichen. In der Tabelle auf der nachfolgenden Seite ist eine Auswahl der wesentlichen vergleichbaren technischen Grunddaten aufgelistet.

	Traglast in kg	Eigen- gewicht in kg	Anzahl Achsen	Anzahl Manipu- lator	Wieder- holgenau- igkeit	Reichweite in mm	Äußere Materialbe- schaaffenheit	Sicherheitskonzept	statich/ mobil	Betriebs- stunden in h	Anwendungsbiete	Preis
iiwa LBR	7-14	22,3	7	1	0,1	820	Aluminium	Druck-Momenten- Sensoren	statisch mobil	30.000	Verschraubungs- vorgänge Maschinenbestückung Kommissionierung Bauteilprüfung Kleinteilmontage	100.000
Sawyer	4	19	7	1	0,1	1260	Plastik	Weitsichtkamera am Kopf Kamera am Handgelenk Sensorensystem an Achsen	statisch	35.000	Kommissionierung Transportvorgänge Kleinteilmontage	26.000
YuMi	2x0,5	38	7	2	0,02	500	Plastik	Druck-Momenten- Sensoren	statisch	30.000	Kommissionierung Bauteilprüfung Kleinteilmontage Maschinenbestückung	40.000
UR3	3	11	6	1	0,1	500	keine Angabe	Druck-Momenten- Sensoren	statisch	35.000	Bauteilprüfung Kleinteilmontage Maschinenbestückung Kommissionierung Klebe- und Schweißvorgänge	16.000
CR-35iA	35	990	6	1	0,08	1813	Gummi	Druck-Momenten- Sensoren	statisch	keine Angabe	Maschinenbestückung Großteilmontage	75.000

TABELLE A.3: Eigene Darstellung: Technische Daten der Assistenzroboter: iiwa, Sawyer, YuMi, UR3

# Literaturverzeichnis

Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: CIM, 2016. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55862/cim-v8.html>. Abruf am 2016-08-09.

VDI/VDE. Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation, 2013a. URL [https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme\\_Cyber-Physical\\_Systems.pdf](https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf). Abruf am 01.05.2016.

Thomas A. Friedrich. Brüssel will Industrie 4.0 Flügel verleihen. *VDI-Nachrichten*, 6867(17): Seiten 7–8, 2016.

BMBF. *Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland*. Trigger Medien GmbH, 2014. URL [https://www.bmbf.de/pub\\_hts/HTS\\_Broschure\\_Web.pdf](https://www.bmbf.de/pub_hts/HTS_Broschure_Web.pdf).

Mario Zillmann. *Smart Factory – Wie die Digitalisierung Fabriken verändert: Transformation von der Werkshalle bis zur Unternehmensleitung*. Lünendonk®-Whitepaper, 2016.

Volkswagen AG. Smart Factory: Audi zeigt die intelligente Produktion, 2015. URL [http://www.volksag.com/content/vwcorp/info\\_center/de/news/2015/05/smart\\_factory.html](http://www.volksag.com/content/vwcorp/info_center/de/news/2015/05/smart_factory.html). Abruf am 04.08.2016.

Hans-Peter Wiendahl. *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Engineering online library. Springer, Berlin [u.a.], 2004.

IFR. Industrial Robots Statistic: World Robotics 2015 Industrial Robots, 2015. URL <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>. Abruf am 10.08.2016.

Ulrich Nehmzow. *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung*. Engineering online library. Springer, Berlin [u.a.], 2002.

Helmut Ing. Frick. Definition "Maschine". *CE-Wissen*, 2008. URL <http://www.ce-wissen.de/?p=5>. Abruf am 05.06.2016.

Roboterwelt. Wann ist ein Roboter ein Roboter?, 2015. URL <http://www.roboterwelt.de/magazin/wann-ist-ein-roboter-ein-roboter/>. Abruf am 07.06.2016.

Verein Deutscher Ingenieure. *VDI Richtlinie - Montage und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, volume VDI 2860. VDI, 1990.

Matthias Hans; Martin Hägele; Rolf Dieter Schraft; Kai Wegener. *Service-Roboter-Visionen*. Hanser, München [u.a.], 2004.

Spektrum. Lexikon der Neurowissenschaften: autonomer Roboter, 2016. URL {<http://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/autonomer-roboter/1159>}. Abruf am 20.08.2016.

Stuart J. Russell; Peter Norvig. *Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz*. Pearson-Studium. Pearson, München [u.a.], 2012. 3., aktualisierte Aufl.

Olivia Klose. Machine Learning (2) - Supervised versus Unsupervised Learning, 2015. URL <http://oliviaklose.com/machine-learning-2-supervised-versus-unsupervised-learning/>. Abruf am 21.08.2016.

Joachim Hertzberg; Kai Lingemann; Andreas Nüchter. *Mobile Roboter: Eine Einführung aus Sicht der Informatik*. EXamen.press. Springer, Berlin, 2009. 1. Aufl.

nTV. Kampf Mensch gegen Maschine, Google-Software besiegt Go-Champion, 2016. URL {<http://www.n-tv.de/wirtschaft/Google-Software-besiegt-Go-Champion-article16873451.html>}. Abruf am 11.06.2016.

Tjorben Bogon. *Agentenbasierte Schwarmintelligenz*. SpringerLink : Bücher. Imprint: Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.

Wolfgang Gerke. *Technische Assistenzsysteme: Vom Industrieroboter zum Roboterassistenten*. De Gruyter Oldenbourg: Studium. De Gruyter [u.a.], Berlin [u.a.], 2015.

Bill N. Schilit; Norman Adams; Roy Want. *Context-aware computing applications*, volume CSL-94-12 of *Technical report. Xerox Corporation. Palo Alto Research Center*. Xerox Corp., Palo Alto Research Center, Palo Alto, Calif., 1994.

Anind K. Dey; Gregory D. Abowd. *Towards a better understanding of context and context-awareness*. Springer-Verlag Berlin, 1999. URL <ftp://ftp.cc.gatech.edu/pub/gvu/tr/1999/99-22.pdf>.

- SAP Mobile Tech. The source of SAP mobility technologies information: Context Awareness, 2013. URL <http://www.sapmobiletech.com/wp-content/uploads/2013/05/context.jpg>. Abruf am 21.08.2016.
- Jens Hedrich; Nicolai Wojke. Adaptivität-Sicherheit-Paradoxon in der Robotik, 2012. URL <http://subs.emis.de/LNI/Proceedings/Proceedings220/1085.pdf>. Abruf am 22.08.2016.
- Rainer Bokranz; Kurt Landau. *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2012. 2., überarb. und erw. Aufl.
- Rodney Allen Brooks. *A robust layered control system for a mobile robot*, volume 864 of *A.I. memo*. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge, Mass., 1985.
- Thomas Schack. *Die kognitive Architektur menschlicher Bewegungen: Innovative Zugänge für Psychologie, Sportwissenschaft und Robotik*. Meyer & Meyer, Aachen [u.a], 2010.
- IPA. Innovative Bildverarbeitung für Serviceroboter: Neue Technologien zur 3D-Umgebungserfassung und Objekterkennung, 2014. URL [http://www.ipa.fraunhofer.de/bildverarbeitung\\_serviceroboter.html](http://www.ipa.fraunhofer.de/bildverarbeitung_serviceroboter.html). Abruf am 23.06.2016.
- IFF. Technologieentwicklungen des Geschäftsfelds Robotersysteme: Taktile Sensorsysteme, 2013. URL <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/robotersysteme/technologien/taktile-sensorsysteme.html>. Abruf am 14.06.2016.
- Giulio Milighetti. Multisensorielle diskret-kontinuierliche Überwachung und Regelung humanoider Roboter. *Karlsruher Schriften zur Anthropomatik*, 6, 2010.
- Marcus Dapper. Kraftsensorlose Manipulator Kraftsteuerung zur Abtastung unbekannter, harter Oberflächen: Univ., Diss.–Bonn, 2003. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik*, 1022, 2004.
- Franz Findeisen, Dietmar; Findeisen. *Ölhydraulik: Handbuch für die hydrostatische Leistungsübertragung in der Fluidtechnik*. Springer-Verlag, Berlin, 1994. 4., völlig neubearbeitete Aufl.

Martin Grunwald. Der Tastsinn im Griff der Technikwissenschaften? Herausforderungen und Grenzen aktueller Haptikforschung, 2008. URL [http://leibniz-institut.de/archiv/grunwald\\_martin\\_09\\_01\\_09.pdf](http://leibniz-institut.de/archiv/grunwald_martin_09_01_09.pdf). Abruf am 27.08.2016.

IFF. Taktile Sensorsysteme zum gefühlvollen Greifen, 2016. URL <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/robotersysteme/taktile-sensorsysteme-greifer.html>. Abruf am 27.08.2016.

Sandia. Sandia Hand, 2015. URL [http://www.sandia.gov/research/robotics/advanced\\_manipulation/Sandia\\_Hand.html](http://www.sandia.gov/research/robotics/advanced_manipulation/Sandia_Hand.html). Abruf am 27.08.2016.

Sandia. Lifelike, cost-effective robotic Sandia Hand can disable IEDs, 2012. URL [https://share.sandia.gov/news/resources/news\\_releases/robotic\\_hand/#](https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/robotic_hand/#). V8GD6Eab798. Abruf am 27.08.2016.

Felix Endres; Jürgen Hess; Nikolas Engelhard; Jürgen Sturm; Wolfram Burgard. Online-6D-SLAM für RGB-D-Sensoren: at - Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik, 2012.

Deepak Vasisht; Swarun Kumar; Dina Katabi. *Decimeter-Level Localization with a Single WiFi Access Point*. 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, Santa Clara, 2016. URL <https://www.usenix.org/system/files/conference/nsdi16/nsdi16-paper-vasisht.pdf>. Abruf am 27.08.2016.

NASA. Positioning, Navigation, and Timing (PNT): Global Positioning System, 2014. URL [http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/policy\\_pnt.html](http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/policy_pnt.html). Abruf am 28.08.2016.

Malay K. Kundu. *Perception and Machine Intelligence: Low Complexity Graph Based Navigation and Path Finding of Mobile Robot Using BFS*. ICPS. ACM, 2015. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2709068>. Abruf am 05.09.2016.

Sebastian Zug; Thomas Poltrack; Felix Penzlin; Christoph Walter; Nico Hochgeschwender. Analyse und Vergleich von Frameworks für die Implementierung von Robotikanwendungen, 2013. URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-50938>. Abruf am 14.06.2016.

VDI/VDE. Industrielle Servicerobotik, 2013b. URL [http://www.autonomik.de/documents/AN\\_Band\\_4\\_Servicerobotik\\_bf\\_130325.pdf](http://www.autonomik.de/documents/AN_Band_4_Servicerobotik_bf_130325.pdf). Abruf am 15.06.2016.

Thomas Strang. *Service-Interoperabilität in Ubiquitous-computing-Umgebungen: Univ., Diss-München, 2003.* Forschungs-Report. VDE-Verlag, Berlin, 2004.

VDI. *Statusreport: Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente: Struktur der Verwaltungsschale.* VDI, 2015. URL [https://www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur\\_dateien/gma\\_dateien/6146\\_PUB\\_GMA\\_ZVEI\\_Statusreport--RAMI\\_4-0\\_Struktur\\_der\\_Verwaltungsschale\\_Internet.pdf](https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/6146_PUB_GMA_ZVEI_Statusreport--RAMI_4-0_Struktur_der_Verwaltungsschale_Internet.pdf). Abruf am 16.06.2016.

Patrick de Causmaecker; Ahmet Soylu; Piet Desmet. Context and Adaptivity in Pervasive Computing Environments: Links with Software Engineering and Ontological Engineering. *Journal of Software*, 4(9):992–1013, 2009. URL <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/243724/2/2344-6182-1-PB.pdf>. Abruf am 16.06.2016.

Ramy Eltarras; Mohamed Eltoweissy. Associative routing for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2011(34):Seiten 2162–2173, 01.12.2011. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366411000326>.

Lavdim Halilaj; Irlán Grangel-Gonz; Gökhan Coskun; Sören Auer. *Git4Voc: Git-based Versioning for Collaborative Vocabulary Development.* 2016. URL <http://arxiv.org/pdf/1601.02433.pdf>. Abruf am 16.06.2016.

ROS Industrial. Our Brief History, 2013. URL <http://rosindustrial.org/briefhistory/>. Abruf am 27.06.2016.

Florian Weisshardt; Jannik Kett; Alexander Bubeck; Alexander Verl Thiago De Freitas Oliveira Araujo. *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings of: Enhancing Software Portability with a Testing and Evaluation Platform.* 2014. URL [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-2985186.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2985186.pdf). Abruf am 27.06.2016.

BMBF. Größtes europäisches Forschungszentrum für IT-Sicherheit gegründet, 2015. URL <https://www.bmbf.de/de/groesstes-europaeisches-forschungszentrum-fuer-it-sicherheit-gegrundet-2023.html>. Abruf am 28.08.2016.

TU Darmstadt. *European Center for Security and Privacy by Design: IT-Sicherheit schon beim Entwurf mitdenken.* 2015. URL [http://www.ec-spride.tu-darmstadt.de/fileadmin/user\\_upload/Group\\_EC\\_Spride/files/EC-SPRIDE\\_DE\\_web.pdf](http://www.ec-spride.tu-darmstadt.de/fileadmin/user_upload/Group_EC_Spride/files/EC-SPRIDE_DE_web.pdf). Abruf am 28.08.2016.

Hella Seebach. *Konstruktion selbst-organisierender Softwaresysteme*. Logos-Verl., Berlin, 2011.

VDI/ITG/GI. Organic Computing: Computer- und Systemarchitektur im Jahr 2010, 2010. URL [https://www.gi.de/fileadmin/redaktion/Presse/VDE-ITG-GI-Positionspapier\\_20Organic\\_20Computing.pdf](https://www.gi.de/fileadmin/redaktion/Presse/VDE-ITG-GI-Positionspapier_20Organic_20Computing.pdf).

IPA. *Programmieren durch Vormachen von Assistenzsystemen: Schweiß- und Klebebahnen intuitiv programmieren*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007. URL [http://www.smerobot.org/08\\_scientific\\_papers/papers/Meyer\\_et-al\\_IT\\_Programming%20by%20Demonstration\\_0704.pdf](http://www.smerobot.org/08_scientific_papers/papers/Meyer_et-al_IT_Programming%20by%20Demonstration_0704.pdf). Abruf am 17.06.2016.

Dr. Yue Zhuo. A Glove that's Worth a Thousand Words, 2016. URL <http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/digitalization-and-software/autonomous-systems-siemens-research-china.html>. Abruf am 06.07.2016.

VDMA. VDMA-Positionspapier: Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Kollaboration, 2016. URL [https://robotik.vdma.org/documents/105999/4217702/VDMA\\_Positionspapier\\_MRK-Sicherheit\\_DE.pdf/ac66460e-4661-4675-885ef8069d0f7abb](https://robotik.vdma.org/documents/105999/4217702/VDMA_Positionspapier_MRK-Sicherheit_DE.pdf/ac66460e-4661-4675-885ef8069d0f7abb). Abruf am 31.07.2016.

DGUV. DGUV Information 209-074: Industrieroboter, 2015a. URL <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/209-074.pdf>. Abruf am 31.07.2016.

DGUV. Kollaborierende Roboter (COBOTS): Sichere Kooperation von Mensch und Roboter, 2016a. URL <http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Kollaborierende-Roboter/index.jsp>. Abruf am 31.07.2016.

DGUV. Kollaborierende Robotersysteme - Planung von Anlagen mit der Funktion Leistungs- und Kraftbegrenzung, 2015b. URL [https://www.bghm.de/fileadmin/user\\_upload/Arbeitsschuetzer/Praxishilfen/Fachbereichs-Informationenblaetter/080\\_FBHM\\_Kollaborierende\\_Robotersysteme.pdf](https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Praxishilfen/Fachbereichs-Informationenblaetter/080_FBHM_Kollaborierende_Robotersysteme.pdf). Abruf am 31.07.2016.

DGUV. BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie: Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern, 2011. URL [http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bg\\_bgia\\_empf\\_u001d.pdf](http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bg_bgia_empf_u001d.pdf). Abruf am 12.08.2016.

DGUV. Systemergonomische Gestaltung, 2016b. URL <http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Kollaborierende-Roboter/Systemergonomische-Gestaltung/index.jsp>. Abruf am 31.07.2016.

DGUV. Medizinisch/Biomechanische Anforderungen, 2016c. URL <http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Kollaborierende-Roboter/Medizinisch-Biomechanische-Anforderungen/index.jsp>. Abruf am 31.07.2016.

DGUV. Schmerzschwellenkataster, 2016. URL <http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Kollaborierende-Roboter/Schmerzschwellenkataster/index.jsp>. Abruf am 14.08.2016.

Hans Jürgen Ottersbach; Dr. Michael Huelke. Kollaborierende Roboter: Konzept und Realisierung eines biofiden Messgeräts zur Begrenzung der Kollisionsbelastung auf Personen bei Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern. *Technische Sicherheit Bd. 2*, pages 14–19, 2012. URL [http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2012\\_125.pdf](http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2012_125.pdf).

BMWi. IT-Sicherheit für Industrie 4.0 braucht Mindeststandards; vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016a. URL <http://www.blog-autonomik40.de/2016/05/02/it-sicherheit-fuer-industrie-4-0-braucht-mindeststandards/>. Abruf am 03.08.2016.

BMWi. AUTONOMIK für Industrie 4.0; vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015. URL [http://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/autonomik-40-broschuere.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](http://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/autonomik-40-broschuere.pdf?__blob=publicationFile&v=8). Abruf am 03.08.2016.

IFF. Autonomes Assistenzsystem für Laborumgebungen, 2012. URL <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/robotersysteme/lisa.html>. Abruf am 18.07.2016.

Rainer Bez. Care-O-bot 4: Images und Videos, 2015. URL <http://www.care-o-bot.de/en/care-o-bot-4/download/images.html>. Abruf am 30.06.2016.

DFKI. MANTIS: Mehrbeiniges Manipulations- und Lokomotionssystem, 2015. URL <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/robotersysteme/mantis.html>. Abruf am 09.07.2016.

IFF. Abschlussbericht des BMBF-Geförderten Verbund- Projekts im Rahmen der Leitinnovation Servicerobotik: Assistenzroboter in Laboren von Life-Science-Unternehmen, 2009. URL [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-1289318.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-1289318.pdf). Abruf am 02.07.2016.

IPA. Robots as multifunctional gentlemen, 2015. URL [http://www.care-o-bot.de/content/dam/careobot/en/documents/pressreleases/2015\\_01\\_15\\_Care-o-bot\\_4\\_en\\_final.pdf](http://www.care-o-bot.de/content/dam/careobot/en/documents/pressreleases/2015_01_15_Care-o-bot_4_en_final.pdf). Abruf am 30.06.2016.

DFKI. HANNOVER MESSE 2016: DFKI demonstriert innovativen Design-Ansatz für autonome Systeme an neuem Laufroboter MANTIS, 2016. URL <https://www.dfgi.de/web/presse/pressemitteilung/2016/hannover-messe-2016-dfki-demonstriert-innovativen-design-ansatz-für-autonome-systeme-an-neuem-laufroboter-mantis>. Abruf am 09.07.2016.

KUKA. KUKA LBR iiwa: Produktübersicht, 2016. URL <http://www.kuka-lbr-iiwa.com/>. Abruf am 30.06.2016.

Rethink Robotics. SAWYER mit INTERA 3, 2016. URL <http://www.rethinkrobotics.com/de/sawyer-intera-3/>. Abruf am 01.07.2016.

ABB. Produktbeschreibung YuMi, 2016. URL <http://new.abb.com/products/robotics/yumi>. Abruf am 03.07.2016.

Universal Robotics. UR10-Roboter, 2016a. URL <http://www.universal-robots.com/de/produkte/ur10-roboter/>. Abruf am 10.07.2016.

Fanuc. Kollaborativer Roboter CR-35iA, 2016. URL <http://www.fanuc.eu/de/de/roboter/roboterfilter-seite/kollaborativer-roboter-cr35ia>. Abruf am 01.08.2016.

Anette Lindackers. Universal Robots: der UR3 ist da!, 2015. URL <http://www.robonews.de/2015/08/universal-robots-ur3/>. Abruf am 10.07.2016.

IFF. Final Press Release for Project VALERI: Factories of the future: Mobile manipulators for aerospace production, 2015. URL <http://www.valeri-project.eu//files/2015/11/2015-10-Final-Press-Release-for-VALERI.pdf>. Abruf am 02.07.2016.

IFF. Test set-up of VALERI, 2016. URL <http://www.valeri-project.eu/results/photos/>. Abruf am 02.07.2016.

Kathrin Feigl. Neue Mensch-Roboter-Kooperation in der Audi-Produktion, 2015.

URL <https://www.audi-mediacenter.com/de/pressemitteilungen/neue-mensch-roboter-kooperation-in-der-audi-produktion-1206>. Abruf am 10.07.2016.

IFA. Kollaborierende Roboter (COBOTS): Sichere Kooperation von Mensch und Roboter, 2015. URL <http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Kollaborierende-Roboter/index.jsp>. Abruf am 10.07.2016.

Universal Robotics. Cases - Betacom: Betacom uses collaborative robots to stay ahead of the competition, 2016b. URL <http://www.universal-robots.com/case-stories/betacom/>. Abruf am 27.07.2016.

Ingolf Bamberger; Thomas Wrona. *Strategische Unternehmensführung: Strategien, Systeme, Methoden, Prozesse*. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Vahlen, München, 2., vollst. überarb. und erw. edition, 2013. URL <http://elibrary.vahlen.de/index.php?dokid=164>.

Herbert Paul; Volrad Wollny. *Instrumente des strategischen Managements: Grundlagen und Anwendung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2014. 2. aktualisierte und erweiterte Aufl. 2014.

IFR. Weltroboterverband (IFR): Industrie-Roboter mit Absatzrekord 2015 – plus 8 Prozent, 2016. URL [http://www.worldrobotics.org/uploads/tx\\_zeifr/2016-04-14\\_PM\\_IFR\\_2015\\_Roboterabsatz\\_deutsch.pdf](http://www.worldrobotics.org/uploads/tx_zeifr/2016-04-14_PM_IFR_2015_Roboterabsatz_deutsch.pdf). Abruf am 10.08.2016.

Barclays. The facts about Co-Bot Robot sales, 2016. URL <https://robotonomics.com/2016/01/11/the-facts-about-co-bot-robot-sales/>. Abruf am 12.08.2016.

Cromwell Schubarth. Here are the 10 best-funded startups in the hot world of robotics, 2016. URL <http://www.bizjournals.com/sanjose/blog/techflash/2016/05/here-are-the-10-best-funded-startups-in-the-hot.html>. Abruf am 11.08.2016.

ESA. ESA Business Incubation Centre, 2016. URL [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Business\\_Incubation/ESA\\_Business\\_Incubation\\_Centres12](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Business_Incubation/ESA_Business_Incubation_Centres12). Abruf am 10.08.2016.

RoboCup. RoboCup Soccer, 2016. URL <http://www.robocup.org/robocup-home/>. Abruf am 10.08.2016.

Airbus Group. Airbus Shopfloor Challange at ICRA 2016, 2016. URL <http://www.airbusgroup.com/int/en/people-careers/Working-for-Airbus-Group/Airbus-Shopfloor-Challenge-2016.html>. Abruf am 10.08.2016.

Ioannis K. Erripis. Photos from the Airbus Shopfloor Challenge, 2016. URL <http://robohub.org/photos-from-the-airbus-shopfloor-challenge-competition/>. Abruf am 10.08.2016.

Bundesvereinigung Soziokultureller Zentren e.V. Begriff Soziokultur, 2016. URL <http://www.soziokultur.de/bsz/node/17>. Abruf am 08.08.2016.

Karin Kaudelka. *Altern ist Zukunft! Leben und Arbeiten in einer alternden Gesellschaft*. Sozialtheorie. Transcript, Bielefeld, 2014.

Statistisches Bundesamt. *Ältere Menschen in Deutschland und der EU*. Im Blickpunkt. Wiesbaden, 2011.

Norbert Elkemann. Mobile Assistenzroboter im industriellen Umfeld, 2014. URL <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/mobile-assistenzroboter-im-industriellen-umfeld-a-446747/>. Abruf am 11.08.2016.

Álvaro Friera; Favila Roces; Hugo Alloy. Factory of the future: New ways of manufacturing, 2016. URL <http://www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/factory-of-the-future.html>. Abruf am 11.08.2016.

Nikolaus Doll. Volkswagen ersetzt die Babyboomer durch Roboter, 2015. URL <http://www.welt.de/wirtschaft/article136984738/Volkswagen-ersetzt-die-Babyboomer-durch-Roboter.html>. Abruf am 11.08.2016.

Alfons Botthof; Ernst Andreas Hartmann. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Springer Vieweg, Berlin, 2015.

Hartmut Hirsch-Kreinsen. *Welche Auswirkungen hat Industrie 4.0 auf die Arbeitswelt?* WISO direkt. Friedrich-Ebert-Stiftung, Abt. Wirtschafts- und Sozialpolitik, Bonn, 2014.

Gabler Wirtschaftslexikon. Roboterethik, 2016. URL {<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/780593390/roboterethik-v4.html>} Abruf am 08.08.2016.

Oliver Bendel. *Die Moral in der Maschine (Telepolis); Beiträge zu Roboter- und Maschinenethik*. Heise Medien, Hannover, 2016.

Tobias Kaiser. Technologiewandel: Maschinen könnten 18 Millionen Arbeitnehmer verdrängen, 2015. URL <http://www.welt.de/wirtschaft/article140401411/Maschinen-koennten-18-Millionen-Arbeitnehmer-verdraengen.html>. Abruf am 08.08.2016.

ING-Diba. Die Roboter kommen: Folgen der Automatisierung für den deutschen Arbeitsmarkt, 2015. URL <https://www.ing-diba.de/pdf/ueber-uns/presse/publikationen/ing-diba-economic-research-die-roboter-kommen.pdf>. Abruf am 08.08.2016.

South China Morning Post. Foxconn's Foxbot army close to hitting the Chinese market, on track to meet 30 per cent automation target, 2015. URL <http://www.scmp.com/tech/innovation/article/1829834/foxconns-foxbot-army-close-hitting-chinese-market-track-meet-30-cent>. Abruf am 08.08.2016.

South China Morning Post. Rise of the robots: 60,000 workers culled from just one factory as China's struggling electronics hub turns to artificial intelligence, 2016. URL <http://www.scmp.com/news/china/economy/article/1949918/rise-robots-60000-workers-culled-just-one-factory-chinas>. Abruf am 08.08.2016.

Agnieszka Czernik. Unterschied zw. IT-Sicherheit, Datensicherheit, Datenschutz & Informationssicherheit, 2016. URL <https://www.datenschutzbeauftragter-info.de/unterschiede-zwischen-datenschutz-datensicherheit-informationssicherheit-oder-it-sicherheit/>. Abruf am 09.08.2016.

DIN/DKE. Deutsche Normungsroadmap: IT-Sicherheit, 2014. URL {<https://www.dke.de/de/std/documents/rm%20it%20sec%20-v2.pdf>} . Abruf am 09.08.2016.

Daschug. EU-Datenschutz-Grundverordnung (EU-DSGVO) verabschiedet!, 2016. URL <https://www.datenschutz-grundverordnung.eu/>. Abruf am 09.08.2016.

Noerr LLP. Industrie 4.0 – Rechtliche Herausforderungen der Digitalisierung, 2016. URL [http://bdi.eu/media/presse/publikationen/information-und-telekommunikation/201511\\_Industrie-40\\_Rechtliche-Herausforderungen-der-Digitalisierung.pdf](http://bdi.eu/media/presse/publikationen/information-und-telekommunikation/201511_Industrie-40_Rechtliche-Herausforderungen-der-Digitalisierung.pdf). Abruf am 09.08.2016.

Regina Mühlich. Datensicherheit - Smart Factory braucht Datenschutzreform, 2015. URL <http://www.handling.de/zur-sache/displayaction-307982.htm>. Abruf am 09.08.2016.

BMWi. Machnig in Tokio: Kooperation mit Japan zum Thema Industrie 4.0 ausbauen, 2016b.

URL <http://www.bmwi.de/DE/Presse/pressemitteilungen,did=765048.html>. Abruf am 11.08.2016.

Press Secretary of the White House. President Obama Launches Advanced Manufacturing Partnership, 2011. URL <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2011/06/24/president-obama-launches-advanced-manufacturing-partnership>. Abruf am 09.08.2016.

Statista. Entwicklung des Outsourcing-Anteils in Unternehmen bis zum Jahr 2012 nach Funktionen, 2010. URL <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/166135/umfrage/entwicklung-des-outsourcing-anteils-in-unternehmen-nach-funktionen/>. Abruf am 11.08.2016.

Statista. Arbeitskosten pro Stunde in der Automobilindustrie ausgewählter Länder Europas in den Jahren 2005 und 2013 (in Euro), 2013. URL <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/318344/umfrage/arbeitskosten-in-der-automobilindustrie-europa/>. Abruf am 08.08.2016.

Rüdiger Kroh. Sensitiv montieren mit mobilem Kuka-Robotern. *Maschinenmarkt* (Hrsg.), 2014. URL <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/sensitiv-montieren-mit-mobilem-kukaroboter-a-461801/>. Abruf am 25.05.2016.

Rüdiger Kroh. Der demografische Wandel verlangt Assistenzroboter, 2015. URL <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/der-demografische-wandel-verlangt-assistenzroboter-a-501081/>. Abruf am 25.05.2016.

Industrie 4.0: Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution, 2014. URL <http://www.strategyand.pwc.com/media/file/Industrie-4-0.pdf>. Abruf am 11.08.2016.

Annedore Bose-Munde. Roboter assistieren den Menschen in der Produktion, 2016. URL <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/roboter-assistieren-den-menschen-in-der-produktion-a-516875/>. Abruf am 11.08.2016.

Microsoft Deutschland GmbH. *Die Kluge Fabrik: Industrie 4.0 Lösungen in Deutschland*. Thiel Gruppe, Ludwigsfelde, 2016.

August-Wilhelm Scheer. *Industrie 4.0 - Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus?* IMC AG, Saarbrücken, 2013. URL [https://www.researchgate.net/profile/August\\_Wilhelm\\_Scheer/publication/277717764\\_Industrie\\_4.0\\_-\\_Wie\\_sehen\\_Produktionsprozesse\\_im\\_Jahr\\_2020\\_aus/links/55ee9e5608ae0af8ee1a1d72.pdf](https://www.researchgate.net/profile/August_Wilhelm_Scheer/publication/277717764_Industrie_4.0_-_Wie_sehen_Produktionsprozesse_im_Jahr_2020_aus/links/55ee9e5608ae0af8ee1a1d72.pdf). Abruf am 11.08.2016.

Hans Jung. *Controlling*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2014. 4. aktualisierte Auflage 2014.

Reinhard Bleiber. Risikomanagement im Unternehmen (1): So erkennen Sie gefährliche Abhängigkeiten, 2015. URL <https://www.lexware.de/artikel/risikomanagement--im-unternehmen-1-so-erkennen-sie-gefaehrliche-abhaengigkeiten/>. Abruf am 12.08.2016.

Martin Aschoff. Die Abhängigkeitsfalle: Strategien und Maßnahmen, um ein zu großes Gebundensein an den eigenen Dienstleister zu vermeiden, 2013. URL <http://heftarchiv.internetwork.de/2013/Ausgabe-19-2013/Die-Abhaengigkeitsfalle>. Abruf am 17.08.2016.

Peter Schwarz. Industrie 4.0 treibt die Einkaufspreise. *VDI-Nachrichten*, 6883(33), 2016. URL <https://www.vdi-nachrichten.com/Management-Karriere/Industrie-40-treibt-Einkaufspreise>. Abruf am 01.09.2016.

Martin Hägele. Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung: EFFIROB; eine Analyse der Fraunhofer-Institute IPA und ISI im Auftrag des BMBF, 2011. URL <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb11/671764543.pdf>. Abruf am 26.05.2016.

VDI/VDE; BMWi. *Industrielle Servicerobotik*, volume 4. Elch Graphics Digital- und Printmedien GmbH und Co KG, Berlin, 2013. URL [http://www.autonomik.de/documents/AN\\_Band\\_4\\_Servicerobotik\\_bf\\_130325.pdf](http://www.autonomik.de/documents/AN_Band_4_Servicerobotik_bf_130325.pdf). Abruf am 26.05.2016.



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende akademische Abschlussarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Textstellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen übernommen habe, wurden von mir als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum:

---

Unterschrift:

---