

Gunther Reinhart / Alejandro Magaña Flores /  
Carola Zwicker

# INDUSTRIE- ROBOTER

PLANUNG · INTEGRATION ·  
TRENDS

Ein Leitfaden für KMU



Ein Fachbuch von

**konstruktions  
praxis**

**elektro  
technik**

**MM**  
MaschinenMarkt

Gunther Reinhart / Alejandro Magaña Flores / Carola Zwicker

Industrieroboter. Planung · Integration · Trends

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart / Dipl.-Ing. Alejandro  
Magaña Flores / Dipl.-Ing. Carola Zwicker

# **Industrieroboter**

**Planung · Integration · Trends**

Ein Leitfaden für die KMU

Vogel Communications Group

**Dipl.-Ing. ALEJANDRO ERICK MAGAÑA FLORES**

Jahrgang 1987

2007–2013 Studium an der Technischen Universität Dresden

2014–2016 KUKA Roboter GmbH

Seit Anfang 2016 Technische Universität München, im Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften zuständig für Industrielle Robotik, Genauigkeitssteigerung von Robotersystemen, Bahnplanung

**Prof. Dr.-Ing. GUNTHER REINHART**

Jahrgang 1956

Studium Maschinenbau, Schwerpunkt Konstruktion & Entwicklung, Promotion am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der TU München

1988–1993 BMW AG, München und Dingolfing

1993–2002 und seit 2007 Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am iwb

2002–2007 Vorstand für Technik und Markt bei der IWKA AG, Karlsruhe

Vorstandsvorsitzender des Bayerischen Clusters für Mechatronic und Automation e.V.

Seit 2009 Leiter der Fraunhofer IWU Projektgruppe für Ressourceneffiziente Mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) in Augsburg

Seit 2016 Geschäftsführender Institutsleiter der Fraunhofer IGCV

**Dipl.-Ing. CAROLA ZWICKER**

Jahrgang 1986

2006–2009 Hochschule Esslingen

2009–2011 Universität Stuttgart

Seit 2011 an der Technische Universität München, im Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften zuständig für Produktionsplanung und -steuerung

**Weitere Informationen:**

[www.vogel-fachbuch.de](http://www.vogel-fachbuch.de)



<http://twitter.com/vogelfachbuch>



[www.facebook.com/vogel-fachbuch](http://www.facebook.com/vogel-fachbuch)



[www.vogel-fachbuch.de/rss/buch.rss\\_](http://www.vogel-fachbuch.de/rss/buch.rss_)

ISBN 978-3-8343-3401-5

1. Auflage, 2018

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Copyright 2018 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

## Vorwort

Müssen Sie Ihre Produktion rationalisieren, um dem steigenden Druck des Marktes gerecht zu werden? Verkürzen sich die Nutzungsdauern Ihrer Produkte? Ist Flexibilität ein wichtiges Thema für Ihre Produktion? Würden Sie gerne Ihre Produktion automatisieren und haben noch keine Erfahrung mit Industrierobotern?

Dieses Handbuch für kleine und mittlere Unternehmen bietet Tipps und Tricks zum Thema Robotereinsatz.

Es werden die wichtigsten Grundlagen der Robotertechnik vermittelt und erläutert, wie bewertet werden kann, ob sich ein Produkt oder Prozess automatisieren lässt. Hierbei werden nicht nur technische Merkmale, sondern auch sicherheitsrelevante Punkte und wirtschaftliche Aspekte betrachtet. Neben der Machbarkeit sind die Höhe und das Risiko einer Investition für KMUs wichtige Grundlagen für eine Entscheidung.

Wie kann der Roboter sinnvoll in die Produktion integriert werden? Was muss bei der Planung beachtet werden? Dieses Buch stellt die einzelnen Planungsschritte detailliert vor. Hierbei wird nicht nur auf Neuplanungen, sondern auch auf Umplanungen eingegangen. Die einzelnen Schritte werden anhand von Beispielen erläutert. Im Internet werden in unserem Onlineservice **InfoClick** passend zu den wichtigsten Schritten Checklisten und Vorlagen für die einzelnen Schritte bereitgestellt.

Wir möchten uns hiermit ganz herzlich bei den Kollegen Fabian Distel, Till Günther, Veit Hammerstingl und Anna Kollenda bedanken, die uns bei der Erstellung des Buches durch ihre wertvollen Kommentare und fachlichen Diskussionen unterstützt haben.

München

Alejandro Erick Magaña Flores  
Carola Zwicker



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Einleitung</b> .....	11
<b>2 Grundlagen der industriellen Robotik</b> .....	15
2.1 Geschichtliche Entwicklung .....	15
2.2 Aufbau und Definition .....	17
2.3 Kinematiken .....	18
2.4 Kenngrößen .....	20
2.5 Einsatzgebiete .....	22
2.5.1 Handhaben .....	22
2.5.2 Schweißen .....	23
2.5.3 Montieren .....	24
2.5.4 Auftragen .....	26
2.5.5 Bearbeiten .....	26
2.6 Roboterperipherie .....	27
2.6.1 Endeffektoren und anwendungsbedingte Peripheriekomponenten .....	27
2.6.2 Messtechnik und Sensoren .....	30
2.6.3 Materialflusssysteme .....	30
2.6.4 Steuerung .....	33
2.6.5 Sicherheitstechnik .....	33
<b>3 Technische Machbarkeit</b> .....	37
3.1 Gründe für und gegen den Einsatz von Industrierobotern .....	37
3.2 Bewertungskriterien für Robotersysteme .....	39
3.3 Rechtliche und normative Rahmenbedingungen .....	41
3.3.1 Sicherheitsanforderungen in einzelnen Lebensphasen des Roboters .....	43
3.3.2 Gesetzliche Regelungen .....	45
3.3.3 Risikoanalyse .....	50
3.4 Automatisierungsgerechte Produktgestaltung .....	51
3.4.1 Handhabbarkeit .....	54
3.4.2 Greifbarkeit .....	57
3.4.3 Positionierbarkeit .....	59
3.4.4 Erkenn- und Sortierbarkeit .....	64
3.4.5 Wirtschaftlichkeit .....	64
3.5 Bewertung der Automatisierbarkeit .....	65
3.6 Vergleich von Robotersystemen .....	75
3.6.1 Bestimmung der Vorgabezeiten .....	77
3.6.2 Primär-Sekundär-Analyse .....	80
3.6.3 Nutzwertanalyse .....	83
<b>4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b> .....	87
4.1 Begriffsdefinitionen .....	87
4.2 Investitions- und Kostenrechnungsverfahren .....	88

4.2.1	Statische und dynamische Amortisationszeit .....	91
4.2.2	Berechnung des Maschinenstundensatzes .....	93
4.2.3	Weitere dynamische Berechnungsverfahren .....	96
4.3	Wirtschaftlicher Automatisierungsgrad und Grenzstückzahl .....	97
4.4	Lebenszykluskostenrechnung .....	98
4.5	Kostenarten bei Robotern .....	101
4.5.1	Anschaffungskosten .....	101
4.5.2	Betriebskosten .....	104
4.5.3	Verwertungskosten .....	106
4.6	Kalkulation mit Unsicherheiten .....	107
4.7	Bewertung der Wirtschaftlichkeit an einem Beispiel .....	111
<b>5</b>	<b>Konzeption und Planung .....</b>	<b>115</b>
5.1	Konzeption .....	116
5.1.1	Lastenheft und Pflichtenheft .....	116
5.1.2	Zielkriterien .....	118
5.2	Ablaufplanung .....	120
5.2.1	Montagevorranggraph .....	120
5.2.2	Bestimmung der Vorgabezeiten am Beispiel .....	122
5.2.3	Bewertung der Automatisierbarkeit am Beispiel .....	122
5.3	Montagesystementwurf .....	123
5.3.1	Greiferauswahl .....	123
5.3.2	Roboterwahl .....	125
5.3.3	Erstellung von Layouts .....	128
5.3.4	Bewertung von Layoutvarianten .....	131
5.3.5	Feinlayout .....	132
5.3.6	Rechnergestützter Entwurf .....	133
<b>6</b>	<b>Integration .....</b>	<b>137</b>
6.1	Komponenten eines Industrierobotersystems .....	137
6.1.1	Robotersteuerung .....	138
6.1.2	Programmierhandgerät .....	138
6.1.3	Endeffektor und externe Peripherie .....	139
6.1.4	Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) .....	139
6.1.5	Integration des Roboters im Produktionsprozess .....	140
6.2	Roboterprogrammierung .....	142
6.2.1	Pose: Position plus Orientierung .....	143
6.2.2	Koordinatensysteme .....	144
6.2.3	Bewegungsarten .....	147
6.2.4	Bewegungssteuerung .....	148
6.2.5	Betriebsarten .....	149
6.3	Programmierverfahren .....	149
6.3.1	Online-Programmierung .....	149
6.3.2	Offline-Programmierung .....	150
6.4	Inbetriebnahme .....	152
6.4.1	Vorgehensmodelle zur modellgetriebenen Softwareentwicklung .....	154
6.4.2	Virtuelle Inbetriebnahme .....	157

<b>7 Trends</b> .....	161
7.1 Kooperierende Industrieroboter .....	161
7.2 Mensch-Roboter-Kooperation .....	162
7.3 Telepräsenzsysteme .....	164
7.4 Mobile Robotik .....	165
7.5 Beispiele neuer Anwendungsgebiete .....	166
7.5.1 Schwerlast-Industrieroboter .....	166
7.5.2 Roboterbasierte Messsysteme .....	167
7.6 Roboterprogrammierung .....	167
7.6.1 Augmented Reality .....	167
7.6.2 Herstellerunabhängige Steuerung und Programmierung von Robotersystemen .....	168
7.7 Forschungsprojekte .....	169
7.7.1 SMERobotics .....	170
7.7.2 ReApp .....	170
7.7.3 KUKoMo .....	170
7.8 Zukunft der Robotik .....	171
<b>Abkürzungen</b> .....	173
<b>Formelzeichen</b> .....	175
<b>Institutsprofil</b> .....	179
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	183
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	189





**SIEMENS**

*Ingenuity for life*



The image shows a SIMATIC IOT2020 device, a grey industrial-grade computer terminal. It has a top panel with several ports and a front panel with a display area. The device is connected to a network via a green Ethernet cable and a black USB cable. The background is a blurred industrial setting with blue lighting and digital data overlays.

# SIMATIC IOT2020

## Ihr Vorsprung in der Bildung

Mit dem IOT2020 bietet Siemens eine Lösung für Open-Source-Anwendungen für Lehrende und Lernende im Bildungssektor an. SIMATIC IOT2020 ermöglicht Auszubildenden und Studierenden praxisnahe Erfahrungen mit Hochsprachenprogrammierung bis hin zu anspruchsvollen Projekten zu sammeln.

**SIEMENS**

Global Industry  
Partner of  
WorldSkills  
International

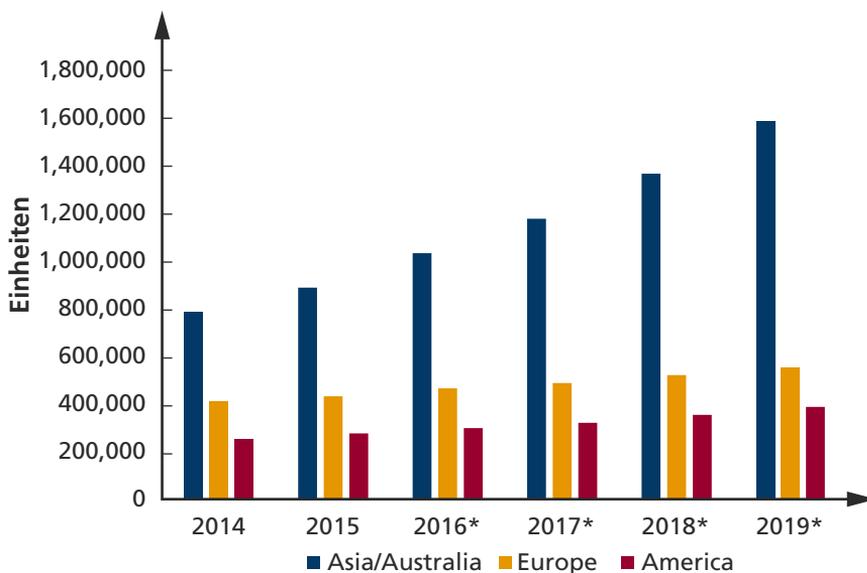


A photograph of a young man with curly hair, wearing a green shirt, sitting at a desk and looking thoughtfully at a computer monitor. He has his hand on his chin, holding a blue pen.

[siemens.de/sce/iot2020](https://www.siemens.de/sce/iot2020)

# 1 Einleitung

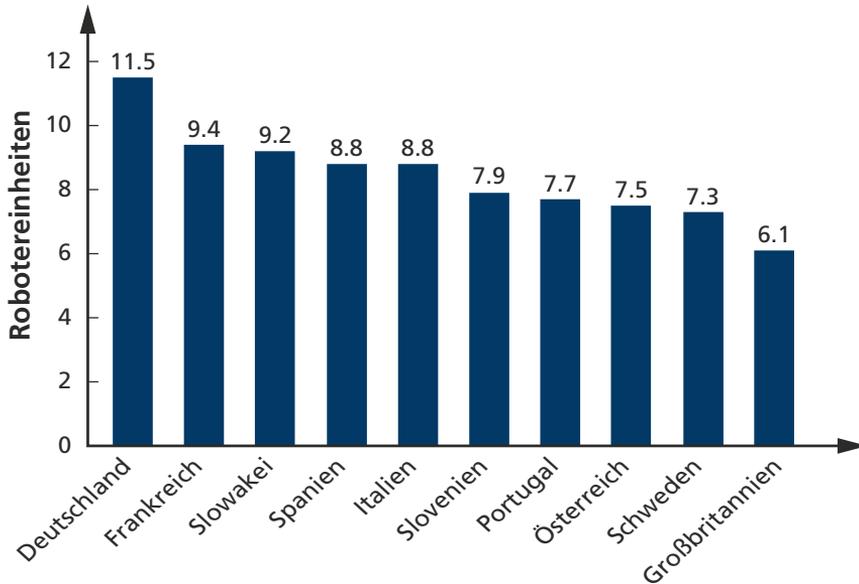
Aktuelle Trends der Produktionstechnik wie verkürzte Produktlebenszyklen, kundenindividuelle Produkte, volatile Marktentwicklung und der steigende Rationalisierungsdruck führen zu einem wachsenden Bedarf an flexiblen und wandlungsfähigen Produktionsanlagen. Die notwendige Anpassungsfähigkeit erfordert ein großes Rekonfigurationsvermögen der Anlagen. Die Entwicklung anpassungsfähiger Anlagen zählt zu den größten Herausforderungen der zukünftigen Produktion. Industrieroboter haben sich aufgrund ihrer Flexibilität als eine Schlüsseltechnologie in verschiedensten Bereichen entlang der Produktionskette bewiesen. So werden Industrieroboter zum Beispiel für verschiedene Fertigungs-, Montage- und Logistikprozesse eingesetzt. Die aktuelle Entwicklung in der Produktion belegt, dass Industrieroboter immer mehr etablierte Technologien in vielen dieser Prozesse ersetzen können. Ein wesentlicher Grund hierfür besteht nicht nur in der inhärenten Flexibilität dieser Systeme, sondern in ihrer höheren Wirtschaftlichkeit. Nicht umsonst haben neben großen Unternehmen, z. B. Automobilherstellern, auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) angefangen, Industrieroboter in ihre Produktionsprozesse einzubeziehen. Dieser allgemeine Trend spiegelt sich auch in einer aktuellen Prognose des International Federation of Robotics (IFR) zum Robotereinsatz (Bild 1.1) wider, die einen weltweiten Produktionszuwachs von über 60 Prozent (bezogen auf das Jahr 2016) bis zum Jahr 2019 vorhersagt [1.1].



**Bild 1.1** Weltweit eingesetzte Roboter (Prognose 2016 bis 2019) [1.1]

Im Zuge der schnellen Weiterentwicklung von Robotersystemen im letzten Jahrzehnt konnte auch die Automatisierbarkeit von vielen Fertigungsprozessen gesteigert werden. Besonders in der Automobilindustrie finden Robotersysteme aufgrund ihrer Schnelligkeit und Genauigkeit häufig Verwendung. Industrieroboter werden bei diversen Fertigungsprozessen entlang der Produktionskette eingesetzt, angefangen im Presswerk bei der Handhabung von Blechteilen über den Karosseriebau in Form von Schweißrobotern und der Montage zur Unterstützung von Verschraubungsaufgaben sowie der Lackiererei bis hin zur Qualitätssicherung durch roboterbasierte

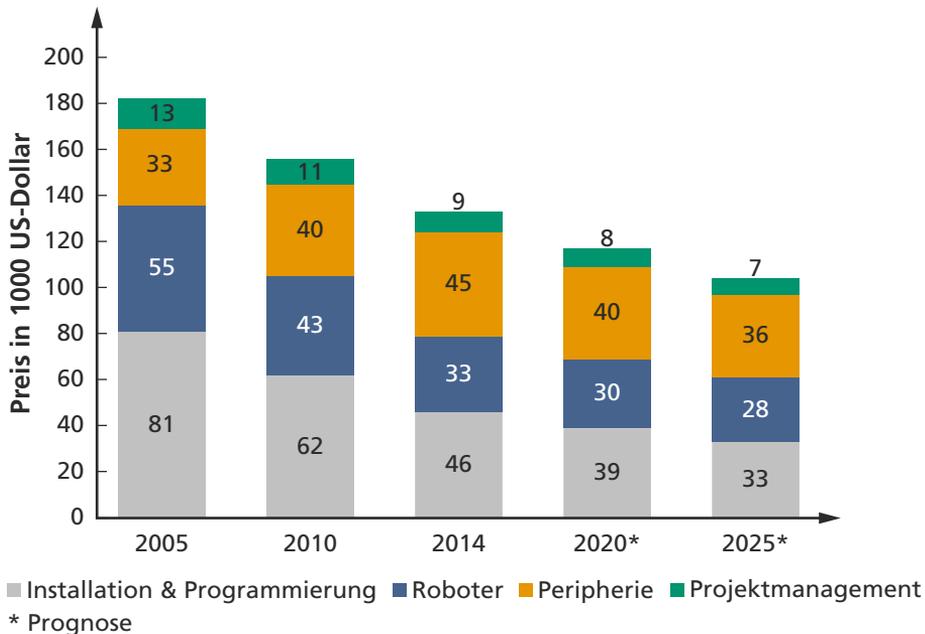
Karosserievermessung. Diese Tendenz spiegelt sich auch in den Statistiken der Automobilindustrie wider: In Deutschland wurde im Jahr 2015 in der Produktion etwa zehn Roboter pro 100 Mitarbeiter eingesetzt. Genaue Zahlen für Deutschland und weitere europäische Länder können aus Bild 1.2 entnommen werden.



**Bild 1.2** Einsatz von Robotern pro 100 Mitarbeiter in der automobilen Industrie [1.2]

Ihr breitgefächerter und häufiger Einsatz hat Robotersysteme zu einer gereiften Technologie entwickeln lassen. Jedoch werden sie heute i.d.R. in der Großserie zur Ausführung repetitiver Aufgaben eingesetzt. Industrieroboter haben aber aufgrund ihrer Flexibilität mehr zu bieten: Besonders bei der Fertigung von kundenindividuellen Produkten kann von dieser Eigenschaft der Industrieroboter profitiert werden, um auf Änderungen der Fertigungsaufgabe zu reagieren. Diese Marktnische sprechen besonders KMUs an, die sich häufig auf die Fertigung von Produkten mit kleinen Losgrößen bis hin zur Losgröße Eins spezialisieren. Auch bei sich ändernden Produktionsmengen weisen von Robotersystemen ausgeführte Produktionsprozesse eine große Skalierbarkeit auf, beispielsweise können Vorarbeiten zur Integration des ersten Robotersystems auf neue Robotersysteme mit überschaubarem Aufwand übertragen werden. Dies sehen viele Anwender als einen der großen Vorteile von Robotersystemen an.

Ein weiterer Vorteil von Robotersystemen liegt in den relativ geringeren Anschaffungskosten – verglichen zu anderen Fertigungssystemen. Die Senkung der Herstellungskosten für elektronische Komponenten führte in den letzten Jahren dazu, dass zum einen Robotersysteme kostengünstiger geworden sind, und zum anderen, dass diese mit zahlreichen Sensoren ausgestattet werden. Die Preisentwicklung von Robotersystemen wird in Bild 1.3 dargestellt [1.3]. Ebenso können alte Robotersysteme aufgerüstet werden, um so langfristig ihren Einsatz zu gewährleisten, ohne Investitionen in neue Robotersysteme zu tätigen. Zusätzlich hat die Senkung der Elektronikpreise dazu geführt, dass Robotersysteme mit neu entwickelten Fähigkeiten entstanden sind, wie z. B. optische Systeme zur Objekterkennung oder Vermessung von Bauteilen. [1.4]. Die daraus entstandenen Chancen haben bereits zahlreiche KMUs genutzt, um neue Fertigungsverfahren und Applikationen mittels Robotersystemen zu erproben.



**Bild 1.3** Preisentwicklung von Robotersystemen [1.3]

## Motivation des Buches

Heutzutage stellen sich KMUs immer häufiger die Frage, ob sie ein Robotersystem in ihrer Produktion einsetzen sollten. In vielen Fällen wurden bereits Produktionsprozesse identifiziert, die potenziell durch einen Industrieroboter automatisiert werden könnten. Einen Roboter in die Produktion einzubinden ist jedoch eine komplexe Aufgabe und setzt nicht nur Kenntnisse über den Produktionsprozess und den Roboter voraus, sondern auch über alle Schritte, die für die Auslegung, Planung und Integration eines Robotersystems notwendig sind. Dieses Buch soll dem Leser die Grundlagen zum Verständnis eines Industrierobotersystems sowie einen Überblick über die Schritte von der Konzeption bis zur Integration vermitteln.

## Buchaufbau

Industrieroboter gelten als komplexe mechatronische Systeme, die Kenntnisse aus einem breiten interdisziplinären Bereich erfordern. In Kapitel 2 werden der Aufbau, die Klassifizierung sowie die Komponenten eines Industrieroboters aufgeführt. Oft verwendete, mit Robotik assoziierte Begriffe werden hierin näher erläutert. Darüber hinaus wird auf die unterschiedlichen Anwendungen und Peripheriegeräte eingegangen.

In Kapitel 3 werden sicherheitsrelevante Themen im Umgang mit dem Roboter diskutiert. Des Weiteren werden die Schritte zur Ausführung einer technischen Machbarkeitsanalyse für Fertigungsprozesse mittels Industrieroboter dargelegt. Hierdurch ist der Leser in der Lage, eine Analyse in seinem konkreten Fall durchzuführen.

Vor der Entscheidung, einen Roboter einzusetzen, stellt sich für viele Anwender die Frage: Ist der Industrieroboter in meinem Fall überhaupt rentabel? Dieser Aspekt wird in Kapitel 4

beleuchtet. Die eingeführten Methoden sollen den Leser befähigen, eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchzuführen, um die Rentabilität eines Industrieroboters zu evaluieren.

Die Planungsschritte für die Automatisierung eines Fertigungsprozesse durch einen Industrieroboter werden in Kapitel 5 erklärt. Zusätzlich werden hier Methoden zur Roboterkomponenten- und Layoutauswahl erörtert.

Nach der Definition eines Layouts werden in Kapitel 6 die technischen Aspekte der Integration des Roboters bezüglich seiner Programmierung und Inbetriebnahme näher beleuchtet. Zum besseren Verständnis werden die Schritte anhand von Beispielen aus der Praxis illustriert.

Das Buch schließt mit Kapitel 7 über die aktuellen Trends der Robotik im industriellen Umfeld.

## 2 Grundlagen der industriellen Robotik

Der Industrieroboter (IR) ist aus der heutigen Produktion kaum noch wegzudenken. Die Eigenschaften der IR, deren Peripheriegeräte und Anwendungsbereiche sind vielfältig. Eine Klassifizierung der Robotertypen hilft bei der Auswahl eines geeigneten Roboters für eine Anwendung. Diese erfolgt hauptsächlich anhand des mechanischen Aufbaus des Roboters (Kinematik). Eine alternative Art der Klassifizierung ist die Einteilung der Roboter in Traglastklassen. Neben dem IR gibt es eine Vielzahl an Peripheriegeräten, die für die jeweilige Anwendung wichtig sind. Auch die benötigte Steuerungsarchitektur wird von der Art der Anwendung beeinflusst.

In den folgenden Abschnitten wird nach einer Übersicht über die Geschichte und das Wachstum der IR auf den mechanischen Aufbau des Roboters, dessen Eigenschaften, die unterschiedlichen Einsatzgebiete sowie die wichtigsten Peripheriegeräte eingegangen. Besondere Aufmerksamkeit gilt darüber hinaus der Definition der unterschiedlichen Begrifflichkeiten, die im Zusammenhang mit Robotersystemen verwendet werden.

### 2.1 Geschichtliche Entwicklung

#### DEFINITION

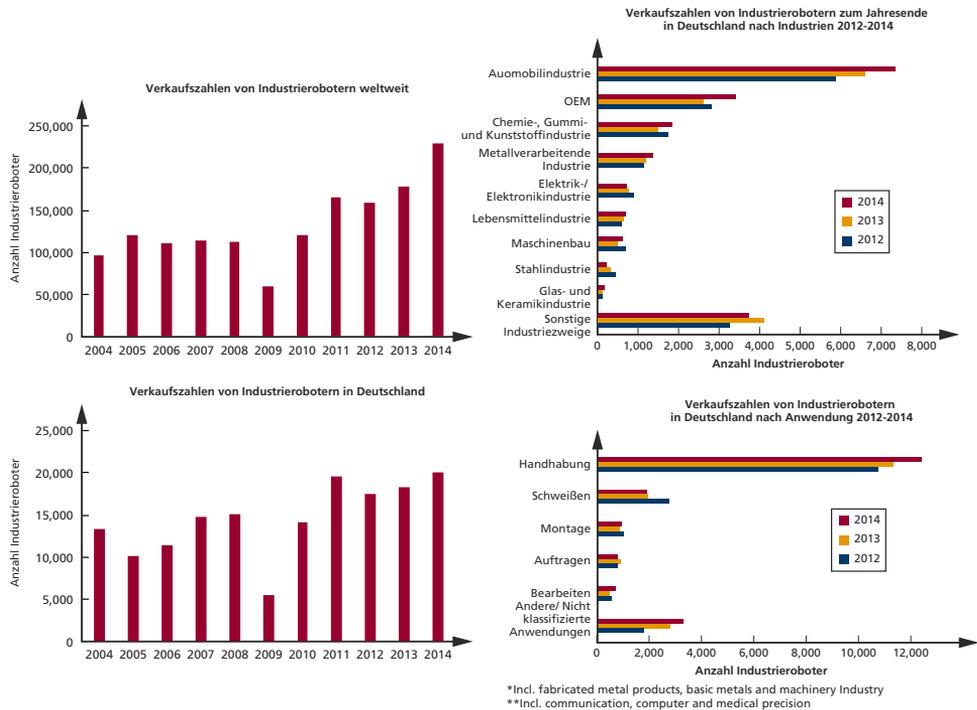
Der Begriff Roboter kommt aus der tschechischen, slowakischen und polnischen Sprache. Das Wort «Robota» bedeutet so viel wie «arbeiten» und ist abgeleitet von «Sklave» oder «Diener». Verwendet wurde der Begriff das erste Mal im Drama «Rossum's Universal-Robots» des tschechischen Schriftstellers KAREL ČAPEK im Jahr 1922. Das Drama handelt von einer Firma, die menschenähnliche Maschinen – Roboter – fertigt, um die Arbeit zu erleichtern. Diese «Roboter» versklaven im späteren Verlauf die Menschheit. [2.4]



1954 patentierte GEORGE DEVOL den ersten programmierbaren Roboter. Zusammen mit JOSEPH ENGELBERGER gründete er die erste Firma zur Herstellung von Robotern namens Unimation Inc. Der erste Unimate-Roboter wurde 1961 an General Motors verkauft, wo er zur Bedienung von Druckgussmaschinen verwendet wurde. In den 1970er-Jahren wurden neue Roboterkonzepte hinsichtlich Steuerung und Kinematik entwickelt, unter anderem der erste mikroprozessorgesteuerte, elektrisch angetriebene Roboter. Die ersten Roboter wurden hauptsächlich zur Materialhandhabung und zum Schweißen eingesetzt. Nach und nach kamen weitere Anwendungsgebiete hinzu. Die steigende Komplexität der Prozesse erforderte dabei stetige Weiterentwicklungen im Bereich der Steuerung und Programmierung, aber auch im mechanischen Aufbau der Roboter. [2.4]

Seit den späten 1980er-Jahren werden Daten zum Bestand und zu Verkaufszahlen von Robotern erhoben. Die «International Federation of Robotics» sammelt und veröffentlicht diese Daten jährlich. In der Statistik wird zwischen den Bereichen industrielle Robotik und Servicerobotik unterschieden. Im Rahmen dieses Kapitels soll vor allem auf die Entwicklung im ersten Bereich eingegangen werden; die Servicerobotik wird in diesem Buch nicht beleuchtet.

Bild 2.1 zeigt die Entwicklung der weltweit verkauften Roboter von 1995 bis 2014. Es ist zu erkennen, dass – bis auf kleinere Schwankungen, z. B. in der Wirtschaftskrise 2009 – die Zahl der Verkäufe jährlich steigt. Besonders auffallend ist dieser Trend in den letzten fünf Jahren. 2014 wurden weltweit fast doppelt so viele Roboter verkauft wie noch in 2010. Grund hierfür ist der anhaltende Trend zur Automatisierung und die fortschreitende technische Verbesserung der Roboter. [2.9]



**Bild 2.1** Verkaufszahlen von IR von 1995 bis 2014 weltweit (links oben), Verkaufszahlen von IR von 2002 bis 2014 in Deutschland (links unten), Verkaufszahlen von IR nach Industrien in Deutschland von 2012 bis 2014 (rechts oben), Verkaufszahlen von IR nach Industrien weltweit von 2012 bis 2014 (rechts unten) [2.9]

Deutschland ist nach China, Japan, den Vereinigten Staaten und Korea der fünftgrößte Robotermarkt weltweit. 2014 stiegen die Verkaufszahlen in Deutschland um ca. 10% auf 20 100 Roboter. Dies ist vor allem der Automobilindustrie zuzuschreiben. Hier wurden nicht nur neue Fertigungskapazitäten geschaffen, sondern auch ältere Anlagen modernisiert und automatisiert. Der Bereich der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge sticht 2014 besonders hervor. Ein weiterer wichtiger Bereich für das Wachstum ist die Elektronikindustrie. Weltweit wurden in 2014 ca. 48 400 Roboter in diesen Industriezweig verkauft, ca. 34% mehr als 2013. Zusammen umfassen sie ca. 64% der verkauften Roboter in 2014. [2.9]

Generell wird die Zahl der Roboter in den nächsten Jahren noch weiter steigen. Gründe hierfür sind gemäß der International Federation of Robotics:

- die Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik für die **Mensch-Roboter-Kooperation** (MRK),
- die fortschreitende Vereinfachung der Bedienung von Robotersystemen,
- die aufgrund der Globalisierung notwendige Modernisierung der Produktionsstätten,
- wachsende Märkte, sowohl für neue Produkte als auch für den Roboter an sich, und
- die anhaltende Verkürzung der Produktlebenszyklen und der somit steigende Bedarf an Flexibilität [2.9].

Aufgrund der fortdauernden technologischen Weiterentwicklung im Bereich der Industrierobotertechnik werden sich auch neue Anwendungsbereiche eröffnen. Aktuell werden ca. 74%

aller IR für die Tätigkeiten Handhaben (u.a. Kommissionierung und Maschinenbestückung) und Schweißen eingesetzt. In der Montage werden aktuell ca. 11% aller IR verwendet. Der letztgenannte Bereich wird in Zukunft weiter wachsen. [2.9] Weitere Trends im Bereich der Robotik werden in Kapitel 7 vorgestellt.

## 2.2 Aufbau und Definition

Im Folgenden soll der IR genauer beschrieben werden. Darüber hinaus wird auf die unterschiedlichen Klassifizierungen von IR eingegangen. Schließlich werden die Kenngrößen, die bei der Wahl des richtigen Industrieroboters eine Rolle spielen, vorgestellt.

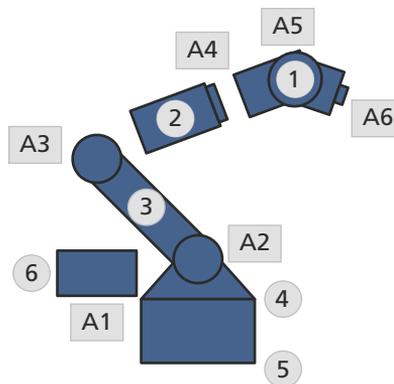
### DEFINITION

Ein Industrieroboter ist gemäß DIN EN ISO 10 218-1 ein «automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann». [2.2]



Jeder Roboter hat eine gewisse Anzahl an Freiheitsgraden. Diese geben an, wie viele voneinander unabhängige, angetriebene Bewegungen ein Werkstück oder Werkzeug, das am Roboter angebracht ist, gegenüber einem festen Koordinatensystem ausführen kann. [2.12]

1. Hand
  2. Arm
  3. Schwinge
  4. Karussell
  5. Grundgestell
  6. Gewichtsausgleich
  7. Elemente der Kraftübertragung (nicht abgebildet)
- A1-A6 Roboterachsen



**Bild 2.2** Aufbau eines IR

Bild 2.2 zeigt einen Sechssachs-Knickarmroboter und seine Bestandteile. Die Achsen, die hauptsächlich zur Positionierung des Roboterflansches dienen, d.h. zur Bewegung im Raum, werden als Hauptachsen bezeichnet (2, 3, 4). Die Achsen, die überwiegend zur Orientierung des Roboterflansches verwendet werden, d.h. zur Drehung im Raum, heißen Nebenachsen oder Handgelenksachsen (1). Das Ende des Roboterarms wird als Roboterflansch oder **Tool-Center-Point (TCP)** bezeichnet. An diesem Punkt wird das Werkzeug oder das Werkstück angebracht.

Neben dem Roboterarm an sich gehören zum gesamten Robotersystem noch weitere Komponenten, die teils anwendungsspezifisch sind. Wichtige Bestandteile in jedem System

sind die Steuerung sowie die Sicherheitstechnik. Beim Handhaben werden hauptsächlich Greifer und Zuführeinrichtungen als Peripheriegeräte benötigt. Beim Schweißen kommen neben der Schweißzange unter Umständen auch noch Reinigungsgeräte, Spannmechanismen und Transformatoren zum Einsatz. Auf die genauen Bestandteile eines Robotersystems und deren Eigenschaften wird in den Kapiteln 2.4 und 2.6 eingegangen.

Industrieroboter lassen sich einerseits nach ihrer Anwendung klassifizieren. So gibt es spezielle Roboter für die Montage, das Schweißen, das Palettieren und andere Aufgabenstellungen. Andererseits werden Roboter anhand ihrer Kinematik und den daraus resultierenden Kenngrößen klassifiziert. Da diese Daten für die Auswahl des Roboters ausschlaggebend sind, wird diese Art der Klassifizierung am häufigsten verwendet.

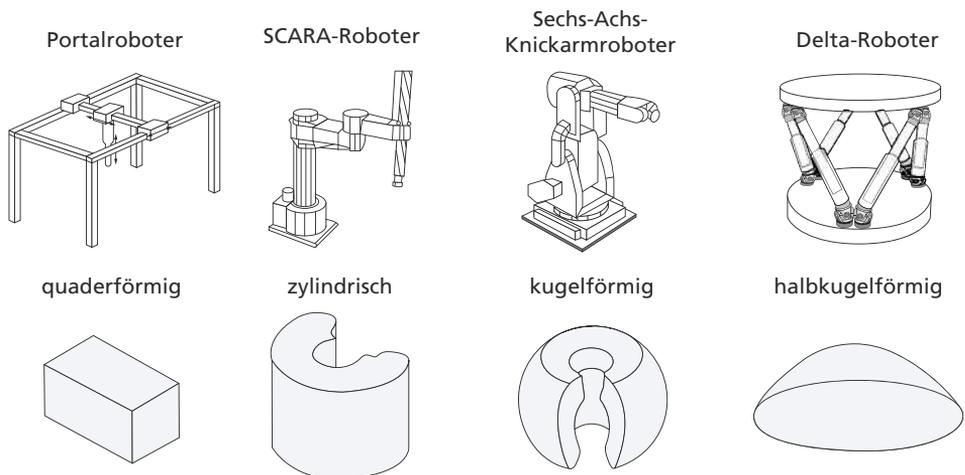
## 2.3 Kinematiken

Die Kinematik bestimmt den Arbeitsraum des Roboters. Dieser kann z. B. quaderförmig, zylindrisch oder (hohl-)kugelförmig sein. Die Hauptarten sind Portal-, SCARA-, Knickarm- sowie Parallelroboter (Bild 2.3). Die einzelnen Roboter-Kinematiken werden im Folgenden näher erläutert. Die Klassifizierung nach Kenngrößen wird im darauffolgenden Abschnitt näher erläutert.

Roboterkinematiken lassen sich anhand der Bewegungsform sowie der Anordnung und Anzahl der Achsen klassifizieren. Aus diesen drei Kriterien ergibt sich die Form des Arbeitsraumes.

Portalroboter bestehen aus drei translatorischen Achsen. Jede Achse ist für eine Koordinatenrichtung verantwortlich. Der Portalroboter kann als Linienportalroboter, bestehend aus drei aneinandergereihten Achsen, oder als Flächenportalroboter, wie in Bild 2.3 links dargestellt, ausgeführt werden. Der Flächenportalroboter hat den Vorteil, dass er etwas höhere Belastungen aufnehmen kann als der Linienportalroboter, da die Last auf mehreren, parallelen Achsen aufgeteilt wird. Dadurch wird er häufig zum Palettieren, Bestücken und Kommissionieren schwerer Bauteile, aber auch zur Montage größerer Baugruppen verwendet. [2.6]

Da der Roboter für jede Koordinatenrichtung eine definierte Achse besitzt, sind sowohl seine Kinematik als auch seine Steuerung und Bedienung relativ einfach. Eine Koordinatentransformation, d.h. eine Umrechnung der Achsstellungen in Raumkoordinaten, (siehe Kapitel 6) ist hier



**Bild 2.3** Roboterkinematiken und deren Arbeitsraum [2.8]

im Vergleich zu anderen Roboterarten nicht nötig. Für Portalroboter gilt, dass der Arbeitsraum quaderförmig ist und nicht über die Roboterabmessungen hinausgeht. Für die großen Arbeitsräume, die diese Roboter häufig abdecken, ist eine große Stellfläche nötig. Die hohen bewegten Massen der Achsen und Bauteile führen dazu, dass diese Roboter eine vergleichsweise niedrige Arbeitsgeschwindigkeit aufweisen.

Der SCARA-Roboter (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) besteht aus zwei parallelen Drehgelenken. An diese schließt eine translatorische Achse an. Durch diese drei Achsen wird ein zylinderförmiger Arbeitsraum beschrieben. Diese Art der Roboterkinematik wird vor allem zum Fügen, Einpressen, Bestücken und für Pick&Place-Anwendungen eingesetzt.

Die Masse des Roboters wirkt sich durch den Aufbau nicht belastend auf die Antriebe aus. Somit können kleinere Antriebe verwendet werden. Darüber hinaus sind relativ hohe Geschwindigkeiten möglich und das System verfügt über eine hohe Steifigkeit in vertikaler Richtung. Die Verwendung beschränkt sich jedoch auf geringe bewegte Massen und vier Freiheitsgrade. In horizontaler Richtung ist diese Robotervariante sehr nachgiebig. [2.6]

Der Knickarmroboter besteht im Gegensatz zum Portalroboter ausschließlich aus rotatorischen Achsen. Der heute am weitesten verbreitete Knickarmroboter hat sechs rotatorische Achsen (Sechssachs-Knickarmroboter). Der Arbeitsraum, der von diesem Roboter aufgespannt wird, ist hohlkugelförmig. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig: Vom Schweißen über das Palettieren und das Montieren werden diese Roboter in vielen Anwendungen eingesetzt.

Diese Roboterart besitzt ein geringes Störvolumen, d.h. der Raum, der vom Roboter an sich eingenommen wird. Die benötigte Stellfläche ist im Vergleich zum vorhandenen Arbeitsraum sehr gering. Der Sechssachs-Knickarmroboter ist aufgrund seiner Eigenschaften und Bewegungsfreiheit universell einsetzbar und kann durch seinen Aufbau Hindernisse gut umfahren. Aufgrund der Aneinanderreihung der sechs Achsen sind die Antriebe durch die Masse der Roboterkomponenten hohen Belastungen ausgesetzt. Diese machen in manchen Fällen einen zusätzlichen Massenausgleich erforderlich. Des Weiteren wird hierdurch die Positioniergenauigkeit negativ beeinflusst, weshalb der Leichtbau bei Knickarmrobotern von großer Bedeutung ist. Da die einzelnen Achsen nicht direkt mit den Raumachsen übereinstimmen, ist eine aufwendige Koordinatentransformation (siehe Kapitel 6) erforderlich. [2.6]

Der Sechssachs-Knickarmroboter wird auch als Universalroboter bezeichnet. Für manche Aufgaben sind kleine Anpassungen notwendig, um für diese besser geeignet, aber dennoch für eine spätere Anwendung universell zu sein. So kann z. B. beim Palettier-Roboter eine Zwangskopplung, d.h. eine feste Verbindung, zwischen Achse 2 und 3 sowie zwischen Achse 3 und 5 als Versteifung eingesetzt werden. Diese erhöht auch die Genauigkeit und die Traglast des Roboters.

Als Letztes wird der Delta-Roboter vorgestellt. Die Eigenart dieses Robotertyps ist, dass alle, in der Regel drei bis sechs, Antriebe aus einer Richtung und parallel zueinander wirken. Deshalb spricht man auch von einer Parallelkinematik. Der Flansch für den Endeffektor sollte leicht ausgeführt sein, damit nur eine geringe Masse bewegt werden muss. Hierdurch sind hohe Beschleunigungen möglich. Verwendung finden diese Roboter für Füge- und Trennaufgaben in der Kleinteilmontage sowie in Pick&Place-Anwendungen.

Durch die Anbringung aller Antriebe auf einem Gestell ist der Roboter sehr steif. Die bewegten Massen sind sehr gering und es kommen viele Gleichteile zum Einsatz. Diese Roboterart arbeitet sehr genau, jedoch in einem sehr kleinen Arbeitsraum. Die Stellfläche im Vergleich zum Arbeitsraum ist sehr groß und es kann zu Kollisionen von Bauteilen mit den Roboterkomponenten kommen. Darüber hinaus gibt es zusätzliche Singularitäten im Arbeitsraum. Eine Singularität entsteht z. B. dann, wenn zwei Rotationsachsen in einer Linie verlaufen und dadurch beide Achsen zum Erreichen einer Position gleichmäßig bewegt werden können. [2.6]

## 2.4 Kenngrößen

Die Kenngrößen dienen nicht nur der Klassifizierung, sondern helfen auch bei der anforderungsgerechten Auswahl des Roboters. Die Leistungsmerkmale eines Roboters lassen sich in die folgenden vier Kategorien einteilen:

### Geometrische Kenngrößen

Zu den geometrischen Kenngrößen zählt z. B. der Arbeitsraum. Eine Kennzahl, die, neben weiteren, in Datenblättern angegeben wird, ist die Reichweite. Je nach Roboterkinematik und angebaute Werkzeug verändern sich die Reichweite und damit der Arbeitsraum des Roboters. Zudem ist der Arbeitsraum abhängig vom Anwendungsfall eingeschränkt: Beim Palettieren werden beispielsweise keine Verkippungen der zu handhabenden Gegenstände vollzogen.

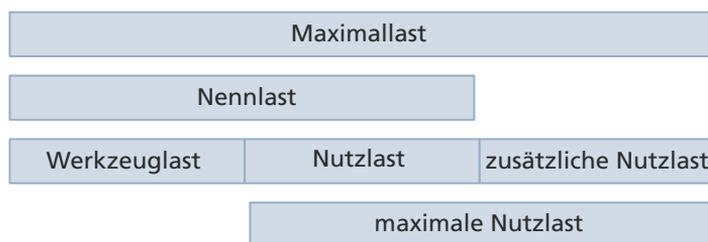
### Belastungskenngrößen

Die Belastungskenngrößen geben an, welche Last an einem Roboter angebracht werden kann. Unterschieden wird hier zwischen Nennlast, Nutzlast und Zusatzlast. Bild 2.4 zeigt den Zusammenhang der einzelnen Belastungskenngrößen. Die Nennlast gibt die maximal zulässige uneingeschränkt bewegbare Last an, die ein Roboter handhaben kann. Diese variiert mit dem Hebelarm und dem Abstand zum Roboterflansch, weshalb die Roboterhersteller ein Lastdiagramm angeben. Roboter werden anhand der maximalen Last in Klein-, Mittel- und Schwerlastroboter eingeteilt. Nennmoment und Nenn-Massenträgheitsmoment zählen auch zu dieser Kenngrößengruppe.



#### MERKSATZ

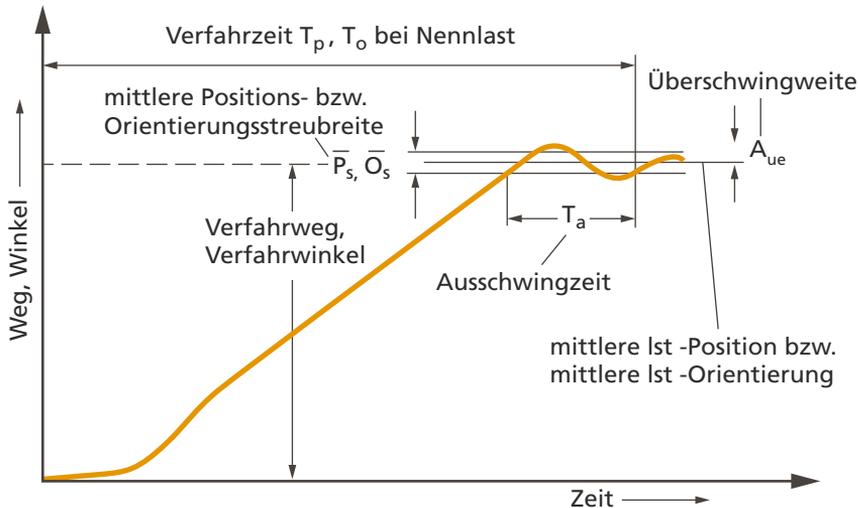
Bei der Auswahl eines Roboters anhand seiner Belastungskenngrößen dürfen nicht nur das Produkt und die Werkzeugmasse berücksichtigt werden. Zusätzlich sollte betrachtet werden, welchen Abstand der Schwerpunkt der gesamten Last zum TCP hat.



**Bild 2.4** Belastungskenngrößen eines IR (in Anlehnung an [2.13])

### Kinematische Kenngrößen

Zu den kinematischen Kenngrößen zählen einerseits Geschwindigkeits- und Beschleunigungskenngrößen und andererseits Zeitgrößen. Wichtig sind hier vor allem die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Endeffektors sowie die zulässigen Geschwindigkeiten der einzelnen Achsen. Für die Planung sind die Verfahzeit und die gesamte Zykluszeit von großer Bedeutung. Für die Stabilität des Prozesses sind die Überschwingweite und Ausschwingzeit zu berücksichtigen (Bild 2.5).



**Bild 2.5** Kinematische Kenngrößen eines Roboters [2.13]

### Genauigkeitsgrößen

Hinsichtlich Genauigkeit wird bei einem Roboter zwischen Pose- und Wiederholgenauigkeit unterschieden. Die Posegenauigkeit (Präzision) gibt an, wie genau ein Roboter einen vorgegebenen Punkt erreicht. Die Wiederholgenauigkeit gibt hingegen an, wie genau ein Roboter ein und denselben Punkt von der gleichen Startpose und mit denselben kinematischen Kenngrößen erreicht. [2.7] Bild 2.6 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

### MERKSATZ

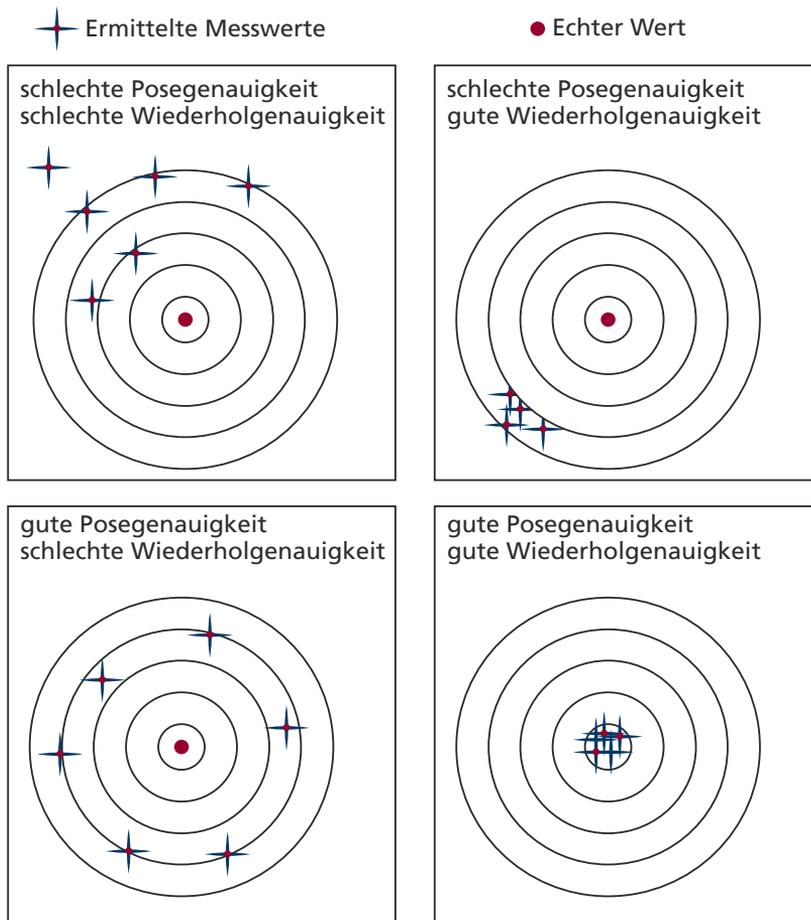
Die Position einer punktförmigen Masse wird durch seine kartesische Lage im dreidimensionalen Raum mit X-, Y- und Z-Achsenabschnitt angegeben. Besitzt der Massenpunkt ein zweites kartesisches Koordinatensystem, so ist der Winkelversatz der Koordinatenachsen als Orientierung dieses Koordinatenkreuzes definiert. Die Kombination von Position und Orientierung eines Objektes im dreidimensionalen Raum wird nach der Norm DIN EN ISO 8373 als Pose verstanden. [2.3]



Neben den oben genannten Kenngrößen werden bei der Auswahl eines Roboters folgende weitere Kriterien berücksichtigt:

- Stellfläche,
- Steifigkeit (Federkonstante, Eigenfrequenz),
- statischer Massenausgleich,
- modulare Bauweise,
- Betriebssicherheit und Wartungsfreundlichkeit,
- Bedienungs- und Steuerungskomfort. [2.10]

### Posegenauigkeit und Wiederholgenauigkeit



**Bild 2.6** Genauigkeitskenngrößen eines Roboters

## 2.5 Einsatzgebiete

Je nach Anwendung variieren auch die Anforderungen an den Roboter. Gemäß der International Federation of Robotics werden Roboter hauptsächlich bei Handhabungs-, Schweiß-, Montage-, Auftrags- (z. B. Lackieren und Kleben) und Bearbeitungsaufgaben eingesetzt. Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe anderer spezieller Einsatzgebiete, z. B. den Betrieb des Roboters im Reinraum. [2.9] Im Folgenden soll auf die fünf häufigsten Bereiche eingegangen werden. Dabei wird auch ein Vergleich der wichtigsten Kenngrößen vollzogen. Eine Übersicht über diese zeigt Bild 2.7.

### 2.5.1 Handhaben

Der Roboter wird in der Handhabung größtenteils dazu verwendet, ein Produkt in eine Verpackung oder auf eine Palette zu bewegen. Es kommt aber auch vor, dass der Roboter ein Produkt

Einsatzfall	Achszahl	Geschwindigkeit	Genauigkeit	Steuerungsart	Handhabungsgewicht
Punktschweißen	5	1 m/s	± 1 mm	Punkt	>20 kg
Bahnschweißen	5...7	0,002 m/s	± 0,5 mm	Bahn	> 5 kg
Bahnschleifen	5...7	0,1 m/s	± 1 mm	Bahn	>20 kg
Entgraten	5...7	0,04 m/s	± 0,2 mm	Bahn	>20 kg
Beschichten	6...7	0,3 m/s	± 1 mm	Bahn/Vielpunkt	> 5 kg
Lackieren	4...7	1,2 m/s	± 5 mm	Bahn/Vielpunkt	> 5 kg
Kleinmontage	2...6	1 m/s	± 0,025 mm	Bahn/Punkt	> 5 kg
Mikromontage	4...6	1 m/s	± 0,001 mm	Punkt	> 1 kg
Handhabung bei Schmiedemaschinen	2...6	1,5 m/s	± 1 mm	Punkt	>20 kg
Handhabung bei Werkzeugmaschinen	2...6	1,5 m/s	± 0,2 mm	Bahn/Punkt	>20 kg

**Bild 2.7** Anwendungsspezifische Kenngrößen von IR [2.11]

von einem Förderband auf ein anderes Förderband umsetzt. Zur Handhabung zählt auch die Bestückung von Maschinen. Hier steuert der Roboter den Materialfluss an einer Maschine, indem er diese mit Rohlingen bestückt und die fertig bearbeiteten Teile entnimmt. Auch das Handhaben von Teilen bei Prüfaufgaben zählt zu diesem Anwendungsbereich. Merkmal der Handhabung ist dabei immer, dass der Roboter nur assistiert und nicht den Primärprozess ausführt. [2.9]

Der Roboter ist mit einem Greifer ausgestattet. Mit dessen Hilfe kann er ein Bauteil aus einer definierten Lage aufnehmen und an einem anderen Ort wieder in einer definierten Lage ablegen. Die Anforderungen an den Roboter variieren hauptsächlich mit der Masse und der Größe des zu handhabenden Produktes. Darüber hinaus spielen Bewegungsfreiheit und Bewegungsbahn sowie die erforderliche Taktzeit eine große Rolle. So werden beispielsweise beim Beladen von Maschinen hauptsächlich Sechssachs-Knickarmroboter eingesetzt, da diese eine große Bewegungsfreiheit aufweisen, um in die Maschine hinein zu greifen. Bei der Palettierung werden, wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, teilweise auch modifizierte Sechssachs-Knickarmroboter eingesetzt, bei denen diese zwischen Achse 2 und 3 zusätzlich verstärkt werden, um höhere Lasten handhaben zu können. Bei der Handhabung von Lebensmitteln, wie z. B. Keksen, werden Parallel- oder SCARA-Roboter eingesetzt, da eine hohe Geschwindigkeit gefordert und die rein kartesische Bewegung, d.h. ohne Umorientierung des Produktes, für das Umsetzen des Produktes ausreichend sind.

Je nach Handhabungsaufgabe ist die Genauigkeit des Roboters mehr oder weniger wichtig. Bei Handhabungsaufgaben ist ein Positionieren des Roboters an unterschiedlichen Punkten im Raum, eine sogenannte Punktsteuerung, ausreichend. Bei der Bestückung von Maschinen kann es jedoch vorkommen, dass sich die Roboter auf einer vorgegebenen Bahn (bahngesteuert) bewegen. Die Geschwindigkeit ist beim Handhaben generell hoch – verglichen mit anderen Anwendungen.

## 2.5.2 Schweißen

Roboter können unterschiedliche Schweißaufgaben durchführen. Unterschieden wird einerseits zwischen Punkt- und Bahnschweißen und andererseits zwischen den unterschiedlichen Schweißverfahren (Laser-, Ultraschall-, Widerstandsschweißen u.a.).

Beim Schweißen werden schwere Peripheriegeräte und Schweißzangen bzw. Schweißwerkzeuge verwendet, weshalb große Roboter eingesetzt werden. Hieraus ergibt sich, dass der benötigte Raum für eine Schweißzelle groß ist. Dies wird zusätzlich dadurch beeinflusst, dass die Werkzeuge, die am Roboter befestigt sind, sehr ausladend sind. Schweißzellen werden mit einem blickdichten Sicherheitszaun, einer sogenannten Blendschutzeinrichtung, umgeben, da das Licht, das beim Schweißen entsteht, für die Augen auf Dauer gesundheitsschädlich sein kann. [2.5]

Das Punktschweißen nimmt aus historischen Gründen noch einen höheren Stellenwert ein als das Bahnschweißen. Die ersten Roboter in der Automobilindustrie wurden für das Punktschweißen der Karosserien eingesetzt. Hierfür wurden große Schweißstraßen aufgebaut, die den Menschen von der anstrengenden Arbeit entlastet haben. Aufgrund der steigenden Fähigkeiten der Robotersysteme werden diese in Zukunft auch vermehrt für Bahnschweißverfahren eingesetzt. Neue Laserschweißsysteme werden dabei nicht nur für Schweißbahnen verwendet, sondern können mit Hilfe der einstellbaren Schweißparameter auch zum Schneiden von diversen Materialien eingesetzt werden.

Beim Punktschweißen wird gegenüber dem Bahnschweißen eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit gefordert. Dafür ist die Genauigkeitsanforderung beim Bahnschweißen höher. Beim Bahnschweißen ist die zu handhabende Masse deutlich kleiner als beim Punktschweißen, da die Schweißzange beim Widerstands-Punktschweißen eine sehr hohe Masse aufweist. [2.10; 2.14]

### 2.5.3 Montieren

Das Montieren stellt einen der komplexesten Anwendungsfälle in der Automatisierung dar. Der Roboter muss nicht nur diffizile Bewegungen ausführen, um eine Vielzahl an unterschiedlichen Teilen zusammenzuführen, sondern diese Bauteile auch mit unterschiedlichen Werkzeugen aufnehmen und wieder ablegen können. Bei der Montage werden zur Prozesssteuerung zahlreiche Sensoren eingesetzt, um die Feinfühligkeit eines Menschen nachzubilden. Darüber hinaus müssen die Einzelteile, die zur Montage notwendig sind, entsprechend angeliefert und bereitgestellt werden. Die Montage ist ein Hauptanwendungsgebiet der direkten MRK. Hier nimmt die Entlastung und Unterstützung des Menschen eine große Bedeutung ein und durch die komplexeren Fähigkeitsprofile kann eine besonders synergetische Zusammenarbeit erreicht werden. Je nach Montageaufgabe kommen unterschiedliche Roboterarten zum Einsatz.

Generell wird eine hohe Genauigkeit bei Montagerobotern gefordert, da hier viele kleine Gegenstände zum Einsatz kommen. Je kleiner das Bauteil, desto genauer sollte der Roboter sein. Auch die Geschwindigkeit bei der Montage ist nicht zu vernachlässigen. Vor allem in diesem Einsatzgebiet kann die Automatisierung sehr stark durch die Produktgestaltung beeinflusst werden. Mehr zum Thema automatisierungsgerechte Produktgestaltung folgt in Abschnitt 3.4.

Ein Beispiel für eine Montagezelle für Energiespeichersysteme wurde im Rahmen des Projektes EEBatt aufgebaut. Dieses Buch greift in den nachfolgenden Abschnitten auf die Untersuchungen des iwB im Rahmen dieses Forschungsprojektes zurück. Das Projekt wird im Folgenden kurz beschrieben.

Im interdisziplinären Forschungsprojekt EEBatt (Dezentrale stationäre Batteriespeicher zur Nutzung erneuerbarer Energien und Unterstützung der Netzstabilität) wurden dezentrale stationäre Energiespeicher erforscht. Diese dienen einerseits der effizienten Nutzung erneuerbarer Energien und andererseits der Netzstabilisierung. Das Projekt wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie gefördert. Das iwB hat

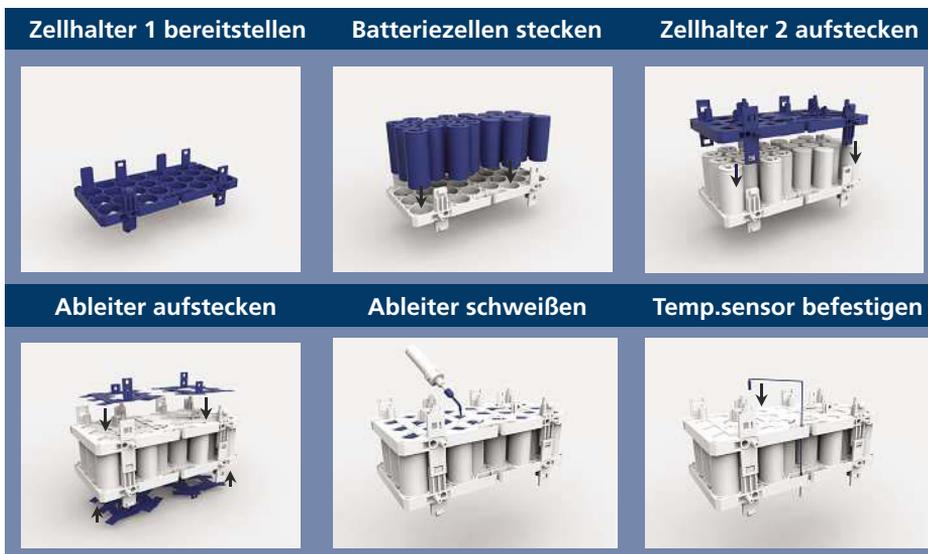
sich im Rahmen des Projektes zum einen mit der Zellchemie befasst, zum anderen wurde die Montage der Batteriemodule untersucht. Der erforschte Energiespeicher besteht aus sieben Speicherschränken, sogenannte Racks, die je 13 Batteriemodule umfassen. In jedem Modul sind acht sogenannte Zellblöcke verbaut, deren Montageschritte in Bild 2.8 dargestellt sind. Die Konstruktion im Rahmen des Projektes wurde von der Firma VARTA Storage GmbH durchgeführt.

Für die Zellblöcke, die kleinste Einheit des entwickelten Energiespeichers, wurde eine skalierbare Montagezelle am iwb aufgebaut. Diese enthält aufgrund der Vielzahl an komplexen Montagevorgängen auch einen MRK-Arbeitsplatz. Die entwickelte Montagezelle ist in Bild 2.9 dargestellt. In dieser wurde versucht, so viele Schritte wie möglich zu automatisieren. Im Projekt wurde aber auch untersucht, wie sich unterschiedliche Stückzahlen auf das Montagesystem auswirken können. Ergebnisse dieser Studie und deren Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit sind in Abschnitt 4.7 dargelegt.

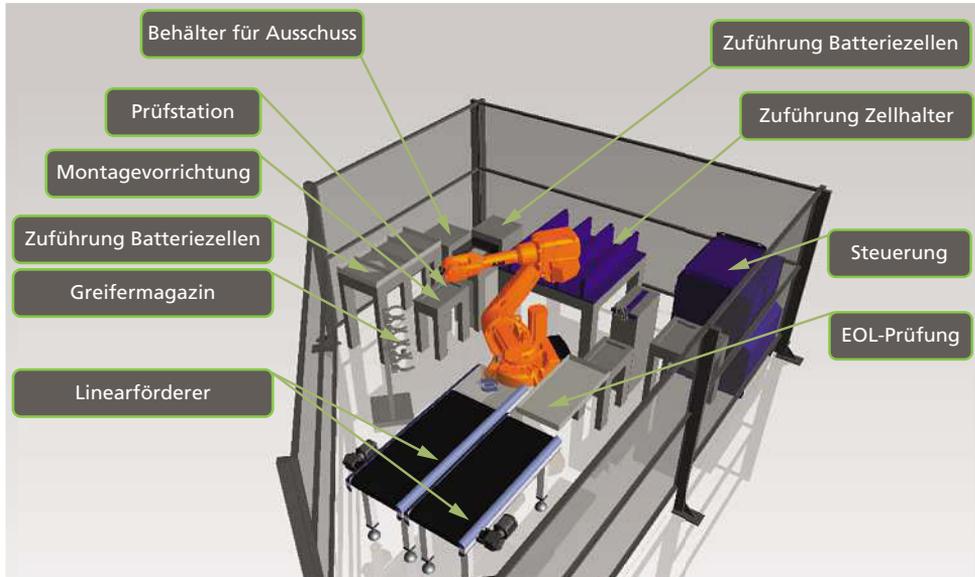
Während der Entwicklung des Zellblocks wurde bereits bei der Produktgestaltung auf eine Automatisierungsgerechte Bauweise (siehe Abschnitt 3.4) geachtet. Aufbauend auf der Produktspezifikation wurde das Handhabungssystem in allen Teilschritten der Montage ausgewählt und ausgelegt. Das genaue Vorgehen hierzu wird in Kapitel 5 erläutert.

Der Zellblock besteht aus 24 Zellen, die durch je zwei identische Zellhalter aufgenommen werden. Je zwölf Zellen werden über je zwei Ableiter (auch Zellverbinder genannt) miteinander verbunden. Schließlich werden am Zellblock noch ein Temperatursensor und ein Kabel zur Spannungsmessung angebracht.

Für die einzelnen Bauteile ist je eine Zuführeinrichtung vorgesehen. Hierzu werden Rollenförderer eingesetzt. Die Zellen werden dabei in einem Magazin bereitgestellt. Neben der Montagevorrichtung ist eine Prüfeinrichtung vorgesehen, die eine Wareneingangskontrolle der verbauten Zellen durchführt. Zusätzlich zu der vom Roboter bedienten Montagevorrichtung ist ein Bereich vorgesehen, an dem ein Werker Arbeiten durchführen kann, die mit dem Roboter nicht ohne Weiteres möglich sind, wie z. B. das Verlegen von Kabeln. Dieses ist aufgrund der Formlabilität der Kabel nur unter erschwerten Bedingungen möglich (vgl. Abschnitt 3.4).



**Bild 2.8** Montageschritte des Zellblocks aus dem Projekt EEBatt



**Bild 2.9** Montagezelle für Zellblöcke am iwv

### 2.5.4 Auftragen

Unter Auftragen wird sowohl das Kleben als auch das Lackieren verstanden. Der Roboter muss hierfür sehr beweglich sein, weshalb oft Sechssachs-Knickarmroboter zum Einsatz kommen. Diese fahren bahngesteuert von einem Punkt zum nächsten, um kontrolliert Lack bzw. Kleber aufzutragen. Beim Lackieren wird der Roboter mit einem «Schutzanzug» ausgerüstet, um die mechanischen Komponenten ausreichend vor feinem Farbstaub zu schützen. Beim Lackieren darf kein Schmutz und Staub von anderen Maschinen auf die Oberfläche des Bauteils geraten. Deshalb werden die Roboter beim Lackieren in einer separaten, für den Menschen nur zur Bestückung und Instandhaltung zugänglichen Halle eingesetzt. Ein zusätzlicher Schutzzaun ist nicht erforderlich. Die Genauigkeit des Roboters ist beim Lackieren eine zu vernachlässigende Größe. Die Geschwindigkeit der Roboter sollte sehr hoch sein, da sie aufgrund der Größe der Bauteile lange Strecken zurücklegen müssen. Die Prozesszeit wird somit maßgeblich von der Geschwindigkeit des Roboters beeinflusst. Beim Lackieren werden aufgrund der großen erforderlichen Reichweite große Roboter eingesetzt, obwohl das Handhabungsgewicht gering ist.

Beim Kleben werden hingegen hohe Anforderungen an die Genauigkeit gestellt. Die Geschwindigkeit ist bei Kleberobotern geringer als beim Lackieren. Die Reichweite der Kleberoboter hängt maßgeblich von der Größe der Klebefläche und den Bauteilen ab.

### 2.5.5 Bearbeiten

Unter Bearbeiten wird zum Beispiel das Fräsen mit Hilfe des Roboters verstanden. Der Roboter muss für diesen Anwendungsfall extrem steif sein, damit Abdrängungen des Roboters durch Prozesskräfte ausgeschlossen werden können. Zudem ist die Masse der Werkzeugspindel nicht zu vernachlässigen. Der Vorteil eines Fräsroboters ist die hohe Bewegungsfreiheit bei geringer Aufstellfläche. Hier konkurriert der Roboter mit 5-Achs-Bearbeitungszentren. Ein großer Nachteil des IR ist die geringe Steifigkeit und daraus resultierende Genauigkeit. Die bearbeitenden Verfahren

sind aufgrund der Genauigkeitsanforderungen noch nicht weit verbreitet. Weitere Trends hinsichtlich der Anwendungsgebiete finden sich in Abschnitt 7.5.

## 2.6 Roboterperipherie

Für die Umsetzung der geforderten Aufgaben in den einzelnen Anwendungsbereichen ist neben dem Roboter als mechanische Komponente noch eine Vielzahl an Peripheriegeräten nötig (vgl. Bild 2.9). Dazu zählen anwendungsabhängige Ausrüstungen, Greifer, Mess- und Prüfeinrichtungen, Sensoren, Transport- und Speichereinrichtungen, Werkstück-Spann- und -Zuführvorrichtungen, diverse interne und übergeordnete Steuerungen und Sicherheitstechnik. Wie in vielen Bereichen gilt auch in der Robotertechnik das Eisbergmodell: Der Roboter ist nur die Spitze, der nicht offensichtliche Rumpf des Eisbergs. Dieser umfasst alle Peripheriekomponenten und sollte deshalb bei einer ökonomischen Betrachtung nicht aus den Augen verloren werden. Sensorik und andere Komponenten zur automatischen Steuerung der Roboterzelle gewinnen immer mehr an Bedeutung, um durch eine bedienerlose, vollautomatische Anlage an Autonomie zu gewinnen und somit Mitarbeiter und Kosten sparen zu können. [2.6]

### 2.6.1 Endeffektoren und anwendungsbedingte Peripheriekomponenten

Ein grundlegender Bestandteil eines IR ist der Endeffektor, der nach DIN EN ISO 8373 definiert wird als «Vorrichtung, die speziell zum Anbringen an die mechanische Schnittstelle konzipiert ist, mit der der Roboter seine Aufgabe erfüllt». [2.3]

Greifer und Werkzeuge, die am Ende der kinematischen Kette, d.h. der Aneinanderreihung der Achsen und Antriebe, angebracht sind, werden generell nicht der Peripherie zugeordnet. Da es sich bei diesen Komponenten aber um eigene Systeme und nicht nur um einfache Werkzeuge handelt, werden sie in diesem Fall auch der Peripherie zugeordnet. [2.6]

Der häufigste Anwendungsfall in der Robotertechnik ist die Handhabung. [2.9] Hier ist der Endeffektor ein Greifer. Auch für die Montage werden neben möglichen Montagewerkzeugen, wie z. B. Schraubautomaten, Greifer verwendet. Aufgrund der Wichtigkeit werden Greifer als Erstes vorgestellt. Anschließend wird auf die Endeffektoren der anderen Anwendungen eingegangen.

Die Aufgaben eines Greifers können in Haupt- und Nebenfunktionen untergliedert werden. Die Hauptfunktion jedes Greifers ist das Sichern eines Objektes. Hierunter fallen die Teilfunktionen Aufnehmen, Spannen, Lagesichern und Ablegen. Die Nebenfunktionen umfassen das Speichern, Bewegen und Menge verändern sowie weitere Koppel-, Schutz-, Steuer- und Arbeitsfunktionen. [2.6]

Gemäß seiner Funktionen lassen sich folgende Bestandteile eines Greifers ableiten:

- Adaptersystem,
- Antriebssystem,
- Bewegungssystem,
- Wirksystem,
- Sensorsystem.

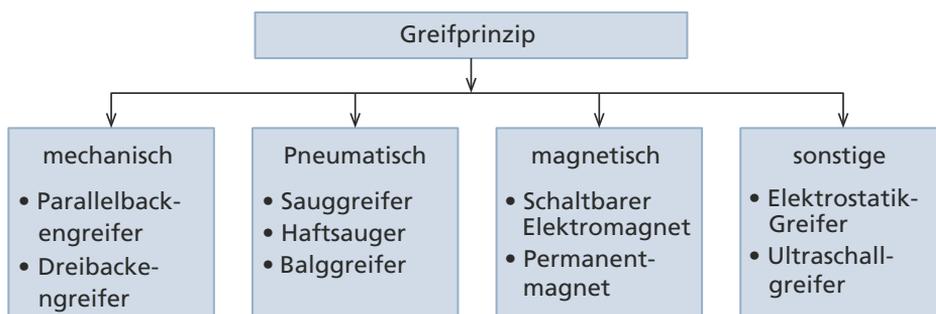
Zwischen den einzelnen Bestandteilen herrschen Wechselwirkungen sowohl innerhalb des Systems als auch nach außen. Das Adaptersystem ist die Verbindung zwischen Roboterflansch und

Greifer(-system). Diese Verbindung nach außen kann entweder starr ausgeführt werden oder durch ein Werkzeugwechselsystem. Hiervon ist nicht nur die rein mechanische Verbindung betroffen, sondern auch die pneumatische und elektrische Verknüpfung zur Umwelt und in manchen Anwendungen auch die Kopplung von Prozessmedien.

Der Antrieb des Greifsystems kann entweder elektromagnetisch, elektromotorisch, hydraulisch oder pneumatisch ausgeführt sein. Die Auswahl erfolgt hier auf Basis der notwendigen Greifkraft, des erforderlichen Greifhubs sowie der Baugröße. Teilweise werden zur Erhöhung der Kräfte Getriebe erforderlich.

Zum Bewegungssystem zählen alle Übertragungs- und Führungselemente, die der rotatorischen oder translatorischen Bewegung des Wirksystems dienen.

Das Wirksystem umfasst die Elemente, die in direktem Kontakt mit dem zu handhabenden Objekt stehen. Diese werden als Greiferbacken oder Greiffinger bezeichnet. Bei den Greifern wird anhand der Fingerzahl, der Berührstellen am Werkstück oder der Art der Wirkung unterschieden. Die Einteilung anhand des Wirksystems ist in Bild 2.10 dargestellt. Darüber hinaus können Greifer auch in kraft-, form- und stoffschlüssigen Griff unterteilt werden.



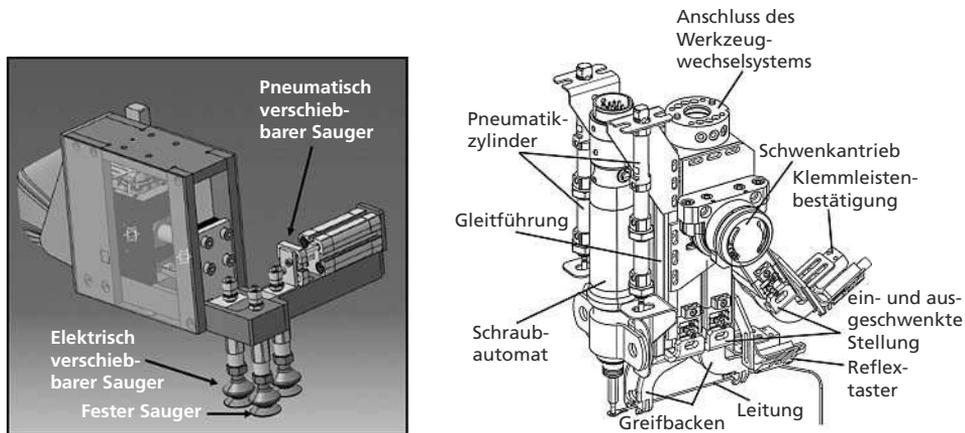
**Bild 2.10** Einteilung der Greifer anhand des Wirkprinzips (in Anlehnung an [2.6])

Am häufigsten werden sogenannte Parallelbackengreifer, Dreibackengreifer und Sauggreifer eingesetzt. Parallelbackengreifer und Dreibackengreifer zählen zu den mechanischen Greifern. Der Parallelbackengreifer besitzt, wie der Name schon sagt, sich parallel gegenüberliegende Greifbacken, häufig zwei Stück. Der Dreibackengreifer ist ähnlich einem Spannfutter von Werkzeugmaschinen aufgebaut. Er besitzt drei Greifbacken, die ein gleichseitiges Dreieck aufspannen. Sauggreifer zählen zu den pneumatisch Greifern. Hier wird ein sogenannter Sauger auf dem handzuhabenden Objekt aufgesetzt und über ein Vakuum gehalten. Die Unterscheidung erfolgt hier anhand des Prinzips zur Vakuumerzeugung in Vakuum-, Luftstrom- und Haftsauger.

Der letzte Bestandteil eines Greifers ist das Sensorsystem. Dieses dient einerseits der Überwachung des Greifprozesses, andererseits dem Schutz des Greifobjektes und der übrigen Peripherie.

In vielen Anwendungen kommt nicht ein einziger Greifer zum Einsatz, sondern eine Kombination aus mehreren Greifern. Diese können zur Steigerung der Flexibilität auch zueinander verschiebbar ausgeführt werden. Ein Beispiel für einen universell einsetzbaren Sauggreifer ist z. B. der Zellgreifer im Projekt EEBatt. Der in Bild 2.11 links dargestellte Greifer besteht aus drei Saugern. Einer davon ist fest mit dem Greifersystem verbunden, einer mit einer kleinen Lineareinheit und einer mit einem pneumatischen Zylinder verschiebbar angebracht. Ein weiterer in EEBatt entwickelter Greifer besteht aus zwei Parallelbackengreifern, von denen einer durch eine Schwenkeinheit weggedreht werden kann. Dieser in Bild 2.11 rechts dargestellte Greifer dient der

Kabelhandhabung und hat Greiffinger, die wie ineinandergreifende Gabeln zusammenwirken. Durch unterschiedliche Schließwege kann das Kabel entweder gespannt oder frei durch die Greiffinger gezogen werden.



**Bild 2.11** Flexibler Zellgreifer (links), Kabelgreifer (rechts)

Der Greifer dient lediglich der Werkstückhandhabung, was einen Hilfsprozess darstellt. Wird jedoch ein Werkzeug mit dem Roboterflansch verbunden, so führt der Roboter einen wertschöpfenden Prozess aus. Die Werkzeuge werden an die Verwendung mit dem Roboter angepasst. Im Folgenden werden einige dieser anwendungsspezifischen Werkzeuge kurz vorgestellt. Zusätzlich werden die für Anwendungen spezifischen Peripheriekomponenten aufgeführt.

Der zweithäufigste Prozess, für den Roboter eingesetzt werden, ist das Schweißen. [2.9] Für das Metallschutzgasschweißen wird ein gas- oder wassergekühlter Schweißbrenner an den Roboterarm angebracht. Dieser wird von extern entweder mit Schutzgas oder Draht versorgt. Zusätzlich werden eine Schweißstromquelle, ein Schlauchpaket, das die Traglast des Roboters beeinflussen kann, eine Brenner-Reinigungseinheit und ein Drahtvorschubsystem benötigt [2.5].

Beim Punktschweißen kann als Endeffektor eine wassergekühlte Schweißzange eingesetzt werden. Für die Erzeugung des Schweißstroms sind Schweißtransformatoren erforderlich. Diese können direkt in der Zange integriert sein oder neben dem Roboter aufgestellt werden. Darüber hinaus finden Kühlsysteme, Versorgungssysteme für die diversen Medien sowie Geräte zum Nachbearbeiten und Wechseln der Elektroden und Elektrodenkappen Verwendung.

Der Endeffektor des Laserstrahlschweißens besteht aus der Schweißoptik, die den Laserstrahl auf dem Werkstück fokussiert. Von der neben dem Roboter aufgestellten Laserstrahlquelle wird der Strahl über Spiegelumlenksysteme oder Lichtwellenleiter zur Optik geführt. Bei diesem Verfahren ist die Sicherheitstechnik von besonderer Bedeutung, da die Laserstrahlung für den Menschen gefährlich sein kann. [2.14]

Der Roboter zum Löten ist mit einem LötKolben ausgerüstet. Dieser wird über einen Löt-drahtvorschub mit Draht versorgt. Ähnlich dem Metallschutzgasschweißen ist auch hier eine Lötspitzenreinigung erforderlich. Zur Überwachung des Prozesses werden Temperatursensoren verwendet. [2.14]