

Andreas Pott
Thomas Dietz

Industrielle Robotersysteme

Entscheiderwissen für die Planung
und Umsetzung wirtschaftlicher
Roboterlösungen



Industrielle Robotersysteme

Lizenz zum Wissen.

Sichern Sie sich umfassendes Technikwissen mit Sofortzugriff auf tausende Fachbücher und Fachzeitschriften aus den Bereichen: Automobiltechnik, Maschinenbau, Energie + Umwelt, E-Technik, Informatik + IT und Bauwesen.




Exklusiv für Leser von Springer-Fachbüchern: Testen Sie Springer für Professionals 30 Tage unverbindlich. Nutzen Sie dazu im Bestellverlauf Ihren persönlichen Aktionscode **C0005406** auf www.springerprofessional.de/buchaktion/



**Jetzt
30 Tage
testen!**

Springer für Professionals.

Digitale Fachbibliothek. Themen-Scout. Knowledge-Manager.

-  Zugriff auf tausende von Fachbüchern und Fachzeitschriften
-  Selektion, Komprimierung und Verknüpfung relevanter Themen durch Fachredaktionen
-  Tools zur persönlichen Wissensorganisation und Vernetzung

www.entschieden-intelligenter.de

Springer für Professionals

 Springer

Andreas Pott · Thomas Dietz

Industrielle Robotersysteme

Entscheiderwissen für die Planung
und Umsetzung wirtschaftlicher
Roboterlösungen

Andreas Pott
Universität Stuttgart ISW
Stuttgart, Deutschland

Thomas Dietz
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-658-25344-8 ISBN 978-3-658-25345-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25345-5>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Die Robotik ist auf dem Vormarsch – sowohl im industriellen Bereich als auch zunehmend in gewerblichen und häuslichen Umgebungen durch Serviceroboter. Das anhaltend starke und sich beschleunigende Marktwachstum in den vergangenen Jahren zeigt, dass die Robotik eine Zukunftsindustrie für die industrielle Produktion und den Konsumentenmarkt ist.

Deutsche Unternehmen sind aufgrund ihrer technisch führenden Stellung und des weltweit einmaligen Ökosystems aus Automatisierungstechnik-Anwendern, Ausrüstern und Forschungseinrichtungen in einer prädestinierten Ausgangslage, dieses Marktpotenzial für sich zu erschließen. Dabei hat die Robotik bereits in den vergangenen Jahrzehnten neue High-Tech-Arbeitsplätze in Deutschland geschaffen. Durch die verbesserte Wirtschaftlichkeit und Kosteneinsparungen hat Robotik zudem die Fertigung und damit Arbeitsplätze in Deutschland erhalten können. Für den Arbeitsmarkt in Deutschland bietet die Robotik also enorme Chancen. Dies trifft in besonderem Maße zu, da zukünftige Robotersysteme durch Technologien wie die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) eng mit dem Menschen zusammenarbeiten werden, diesen von ergonomisch belastenden Tätigkeiten entbinden und es so gleichzeitig ermöglichen, das hervorragende Ausbildungs- und Erfahrungsniveau von Fachkräften in Deutschland zu nutzen. Weiterhin ist die Robotik eine Schlüsseltechnologie, um dem demografischen Wandel in Deutschland zu begegnen. Fast alle führenden produzierenden Unternehmen widmen sich mittlerweile diesem Trend und investieren in innovative Roboterlösungen, um Erfahrungen aufzubauen und sich einen Anteil am wachsenden Robotikmarkt zu sichern.

Robotersysteme umzusetzen erfordert aufgrund der zahlreichen involvierten Disziplinen und der Verbindung von Software mit der physischen Welt breite Erfahrungen und Kompetenzen. Viele Firmen treten auf Basis bestehender Kompetenzen in der Automatisierung in den Robotikmarkt ein. Die enge Verbindung von mechanischen Komponenten, Antriebstechnik, Steuerungstechnik, Software, produktionstechnischen und produktionsorganisatorischen Aspekten erfordert dabei eine systemische Vorgehensweise und Kompetenzen, die in der Summe für viele Firmen neu sind. Dies gilt insbesondere für Anwendungen in der Industrierobotik, denn industrielle Roboteranlagen sind fast immer anwendungsspezifische Automatisierungslösungen.

Den Stand der Technik in allen Disziplinen der Robotik zu erweitern und insbesondere Ergebnisse in die industrielle Praxis zu überführen waren seit jeher die Forschungsschwerpunkte in der Robotik am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Dabei entwickelt das Fraunhofer IPA als hersteller- und branchenneutraler Partner neue Roboterapplikationen und neue Technologien und hat einen breiten Überblick über die Anforderungen, um Robotik in verschiedenen Einsatzszenarien zu nutzen. Hierbei zeigt sich die entscheidende Bedeutung eines interdisziplinären Ansatzes und der Kombination der klassischen Robotertechnologien mit einem tiefen Verständnis der Zielbranche und den dort üblichen Prozessen und Abläufen. Solche Projekte finden in einem hochgradig mehrdimensionalen Projektumfeld statt. Diese Aspekte zu managen erfordert Einblick in die involvierten Disziplinen und Entscheidungskompetenz. Die Grundlagen genau dieser Entscheidungskompetenz möchte das vorliegende Werk vermitteln.

Dieses Buch basiert auf der seit vielen Jahren am Fraunhofer IPA durchgeführten Seminarveranstaltung „Entscheidungskompetenz Robotersysteme: Wirtschaftliche Roboterlösungen erfolgreich planen und umsetzen“. Diese zweimal jährlich stattfindende Veranstaltung haben in den vergangenen Jahren zahlreiche Entscheider und Führungskräfte von produzierenden Unternehmen, Systemausrüstern und Komponentenlieferanten genutzt, um in die Robotik einzusteigen. Der Erfolg der Veranstaltung zeigt, dass gerade bezüglich der Vermittlung von planerischen Grundlagen und Anwendungserfahrungen bei der Realisierung industrieller Roboteranlagen ein erheblicher Bedarf besteht. Während bereits zahlreiche Fachbücher die wissenschaftlich-technischen Grundlagen der Robotik vermitteln, sind die praxisbezogenen und für Entscheider relevanten Aspekte der Robotik bisher kaum durch Fachliteratur abgedeckt worden. Das vorliegende Buch schließt diese Lücke und zielt darauf ab, die Inhalte der Veranstaltung einem größeren Publikum zugänglich zu machen. Ich hoffe, dass Ihnen dieses Buch beim Einstieg oder der Vertiefung in die industrielle Robotik hilfreich ist.

Stuttgart
Januar 2019

Martin Hägele
Leiter des Bereichs „Intelligente Automatisierung und
Reinheitstechnik“ und der Abteilung „Roboter- und
Assistenzsysteme“ am Fraunhofer IPA

Danksagung

Wir bedanken uns bei den Mitarbeitern der Abteilung Roboter- und Assistenzsysteme des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, die bei der Erstellung und Pflege der Unterlagen der Veranstaltung „Entscheidungskompetenz Robotersysteme“ sowie bei deren Durchführung über all die Jahre mitgewirkt haben. Besonderer Dank gilt dabei Dr.-Ing. Manuel Drust, Dipl.-Ing. Martin Hägele, Dr.-Ing. Christian Meyer, Dipl.-Ing. Hendrik Mütterich, Dr.-Ing. Susanne Oberer-Treitz, Dr.-Ing. Matthias Palzkill, Dipl.-Inf. Felix Spenrath, Dipl.-Ing. Kay Wöltje und Dr.-Ing. Johannes Wößner. Dipl.-Ing. Martin Hägele danken wir für das Schaffen einer offenen, kreativitätsfördernden und wachstumsorientierten Arbeitsatmosphäre, die dieses Buch und die ihm zu Grunde liegenden Überlegungen ermöglichte, und für die Erstellung des Geleitworts. Bei der Aufbereitung des ersten Manuskripts waren uns die Herren Simon Tobias und Dipl.-Ing. Ragnar Lodwig eine große Hilfe.

Wir danken Luzia Schuhmacher für die sorgfältige Durchsicht und Überarbeitung des Manuskripts. Dankbar sind wir zudem dem Verlagsteam von Springer Vieweg für seine Unterstützung und Professionalität.

Dank gilt insbesondere auch unseren Familien für die Unterstützung und das Verständnis für all die Stunden, die in dieses Buch geflossen sind.

Stuttgart
Januar 2019

Thomas Dietz
Andreas Pott

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in Robotersysteme	1
1.1	Automatisierung in der Produktion	1
1.1.1	Definition Industrieroboter	2
1.1.2	Investitionskosten	5
1.1.3	Robotersysteme	7
1.2	Anwendungsbereich	8
1.2.1	Industrieroboter weltweit	8
1.2.2	Potenziale und Hemmnisse	10
1.3	Beispielapplikationen und Überblick	14
	Literatur	15
2	Typen und Einsatzbereiche von Industrierobotern	17
2.1	Bauformen	17
2.1.1	Verteilung der Industrieroboter	20
2.1.2	Typische Aufgaben	22
2.2	Steuerung von Industrierobotern	24
2.2.1	Sicherheitsfunktionen	24
2.2.2	Technologiepakete	25
2.2.3	Kinematische Transformation	25
2.3	Eigenschaften von Industrierobotern	25
2.3.1	Beweglichkeit und Freiheitsgrade	26
2.3.2	Arbeitsraum	26
2.3.3	Zugänglichkeit und Kollisionsvermeidung	28
2.3.4	Genauigkeit	28
2.3.5	Singularitäten	30
2.3.6	Stetigkeit und Schwingungen	30
2.3.7	Bewegungsdynamik	31
2.3.8	Traglast	33
	Literatur	33

3	Standardroboterwerkzeuge und Endeffektoren	35
3.1	Funktionen und Funktionsaufteilung	37
3.2	Greifer	38
3.2.1	Greifprinzipien und Wirkstellen	39
3.2.2	Klemmgreifer	40
3.2.3	Sauggreifer	41
3.2.4	Weitere Greifprinzipien	42
3.2.5	Einflussfaktoren auf die Greiftechnik	43
3.2.6	Bereitstellung und Ablage	44
3.2.7	Taktzeit und Durchsatz	45
3.3	Werkzeuge, Mess- und Prüfsysteme	45
3.3.1	Standardwerkzeuge	46
3.3.2	Zubehör	48
3.3.3	Peripherie	49
	Literatur	49
4	Steuerungstechnik	51
4.1	Grundelemente der Robotersteuerung	51
4.2	Aufbau der Robotersteuerung	52
4.3	Roboterprogramme	54
4.3.1	Bewegungsarten und Programmiersprachen	54
4.3.2	Technologiepakete	56
4.3.3	Kompatibilität von Roboterprogrammen	56
4.4	Steuerungsintegration für Roboterzellen	57
4.4.1	Überblick	57
4.4.2	Sensorintegration	58
4.4.3	Monitoring und Fernwartung	59
4.4.4	Zellsteuerung	59
4.4.5	Fördertechnik	61
4.4.6	Leitsystem	62
	Literatur	63
5	Programmierung und Zellsimulation	65
5.1	Grundlagen der Roboterprogrammierung	65
5.1.1	Onlineprogrammierung	67
5.1.2	Offlineprogrammierung	70
5.1.3	Anhaltspunkte zur Auswahl des Programmierverfahrens	73
5.2	Sensoreinsatz zur Verringerung der Programmieraufwände	73
6	Projektlebenszyklus von Roboteranlagen	79
6.1	Projektarten	80
6.2	Projektlebenszyklus von Roboteranlagen	80

6.3	Projektanbahnung und Projektinitialisierung	82
6.3.1	Vertragsgestaltung	82
6.3.2	Voruntersuchungen zur Erhöhung der Planungssicherheit	83
6.4	Entwicklung von Roboteranlagen	83
6.4.1	Detailkonzeption	83
6.4.2	Inbetriebnahmegerechte Konzeption	84
6.5	Integration, Inbetriebnahme und Vorabnahme	84
6.5.1	Aufbau der Anlage beim Systemintegrator	84
6.5.2	Vorabnahme	86
6.6	Installation beim Endnutzer und Endabnahme	87
6.6.1	Vorbereitung der Installation	87
6.6.2	Aufbau der Anlage beim Endnutzer	87
6.6.3	Endabnahme der Roboteranlage	89
6.6.4	Begleitende Tätigkeiten	90
6.7	Betrieb von Roboteranlagen	90
6.7.1	Störungen im Betrieb	90
6.7.2	Wartung und Reparatur	91
6.7.3	Verantwortung für den Betrieb der Roboteranlage	92
7	Konzeption und Planung	93
7.1	Potenzialanalyse	94
7.2	Konzeption	96
7.2.1	Aufgabenstellung	97
7.2.2	Funktionsprinzipien	97
7.2.3	Gliederung gestaltbarer Module	99
7.2.4	Gestaltung maßgeblicher Module	101
7.3	Machbarkeitsuntersuchung	101
	Literatur	103
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung industrieller Roboteranlagen	105
8.1	Grundüberlegungen zur Wirtschaftlichkeit	105
8.1.1	Verteilung der Kosten für Robotersysteme	106
8.1.2	Unsicherheiten und verteiltes Wissen	106
8.1.3	Lebenszyklus von Roboteranlagen	107
8.2	Projektinitialisierung	108
8.3	Entwicklung und Integration von Roboteranlagen	109
8.3.1	Tätigkeiten und Auswirkungen bei der Entwicklung	109
8.3.2	Komponentenbeschaffung, Integration und Vorabnahme	109
8.4	Installation beim Endnutzer und Produktionshochlauf	110
8.5	Nutzung der Roboteranlage im Produktionsbetrieb	111
8.5.1	Bewertung von Kosten und Nutzen	111
8.5.2	Annahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	113

8.6	Rekonfiguration von Roboteranlagen	114
8.7	Entsorgung von Roboteranlagen	115
	Literatur	115
9	Sicherheit und Arbeitsschutz für Roboteranlagen	117
9.1	Grundlegende Aspekte der funktionalen Sicherheit	117
9.2	Sicherheitsaspekte bei der Anlagenentwicklung	119
9.2.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	119
9.2.2	Normative Rahmenbedingungen	120
9.2.3	Vorgehen bei der Risikobeurteilung	121
9.2.4	Konformitätserklärung und notwendige Dokumentation	129
9.2.5	Beispielbetrachtung	129
9.3	Sicherheitsaspekte beim Anlagenbetrieb	131
9.3.1	Gefährdungsbeurteilung	132
9.3.2	Prüfung von Roboteranlagen	133
9.3.3	Allgemeines Vorgehen zur Gewährleistung der Sicherheit	133
	Literatur	134
10	Zusammenfassung und Ausblick	135
10.1	Zusammenfassung	135
10.2	Aktuelle Entwicklungen	138
	Literatur	143
	Stichwortverzeichnis	145

Zusammenfassung

Industrieroboter sind ein bewährtes und weitverbreitetes Produktionsmittel, das erhebliche Potenziale zur Rationalisierung und Qualitätssteigerung in der Produktion bietet. Damit tragen sie dazu bei, auf die Anforderungen einer Produktion in Hochlohnländern (Brecher Hrsg., *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Springer, Berlin, 2011) wie z. B. Deutschland zu reagieren und die entsprechende Wertschöpfung zu erhalten. Die Automobilbranche ist gegenwärtig der größte Abnehmer und Anwender von Industrierobotern. Zunehmend werden Roboter aufgrund des technischen Fortschritts und Preisverfalls auch in anderen Branchen eingesetzt. Die größten Märkte für Roboter sind China, Korea, Japan, die Vereinigten Staaten von Amerika und Deutschland. Der Einsatz von Robotern erfordert immer die Integration des Roboters mit weiteren Komponenten wie z. B. Endeffektoren, Hilfsmitteln zum Materialtransport, Sicherheitseinrichtungen und Vorrichtungen. Hierbei entstehen wesentliche Kosten. Der Einsatz von Industrierobotern wird durch neue technische Entwicklungen und der daraus resultierenden steigenden Leistungsfähigkeit und aufgrund des wachsenden Fachkräftemangels für viele Applikationen immer Erfolg versprechender.

1.1 Automatisierung in der Produktion

Seit der Vorstellung des ersten Industrieroboters in den 1960er-Jahren haben sich Industrieroboter zu einem wesentlichen Treiber der industriellen Produktion entwickelt [2]. Industrieroboter sind dem menschlichen Arm nachempfunden und als Universalmaschinen ausgeführt. Mit ihrer Hilfe lassen sich eine große Anzahl von repetitiven Fertigungsprozessen [3] automatisch und ohne den Einsatz von menschlichen Werkern ausführen. Bei der Mehrzahl der Anwendungen stehen für den Einsatz von Industrierobotern zwei maßgebliche Ziele im Zentrum: erstens die wirtschaftliche Rationalisierung durch Automatisierung der

Produktionsprozesse und zweitens das Erreichen einer konstanten, hohen Qualität der Produkte, die nicht von einer schwankenden Leistungsfähigkeit der Werker beeinflusst wird. Diese roboterbasierte Automatisierung der Produktion ist besonders eindrucksvoll in der nahezu vollständig mit Industrierobotern umgesetzten Produktion von Rohbaukarosserien im Automobilbau. Der Automobilrohbau setzt dabei den Maßstab bezüglich der Automatisierung der Produktion für andere Industriezweige.

Im Jahr 2016 waren weltweit ca. 1,83 Mio. Industrieroboter im Einsatz [4]. Nach Schätzungen der International Federation for Robotics (IFR) werden in den folgenden drei Jahren weitere 1,2 Mio. neue Roboter produziert, ausgeliefert und in Fabriken installiert. Dies entspricht derzeit einer Wachstumsrate von ca. 14 % pro Jahr. Neben der bereits genannten Automobilbranche, die mit ihrer Zuliefererindustrie der derzeit größte Abnehmer von Industrierobotern ist, kommen Roboter auch in der Elektro- und Metallindustrie sowie der Chemie- und Lebensmittelindustrie zum Einsatz. Traditionell werden Industrieroboter als wesentliches Produktionsmittel in Hochlohnländern gesehen, da das Rationalisierungspotenzial aufgrund der hohen Kosten für Arbeit dort besonders groß ist. Roboter sind auch bei geringeren Lohnkosten ein effektives Mittel für die Rationalisierung. Daher ist China zum größten Absatzmarkt von Robotern geworden. Unter den fünf größten Abnehmern von Industrierobotern folgen in absteigender Reihenfolge: Südkorea, Japan, die Vereinigten Staaten von Amerika und Deutschland.

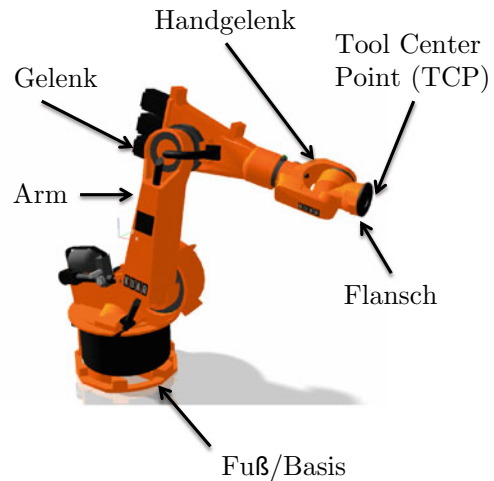
1.1.1 Definition Industrieroboter

Ein Industrieroboter ist nach der ISO 8373 [5] ein programmierbarer Manipulator mit mindestens drei Freiheitsgraden für die industrielle Anwendung (Abb. 1.1). Der typische Industrieroboter ist der Vertikalknickarmroboter, der etwa zwei Drittel des Roboterbestands ausmacht und vor allem durch den weiten Einsatz im Bereich des automobilen Rohbaus bekannt ist.

Der Aufbau des Roboters (Abb. 1.1) wird sprachlich mit dem menschlichen Arm assoziiert. Dies zeigt sich sowohl im kinematischen Aufbau als auch in den Bezeichnungen der Baugruppen. Ein Roboter stützt sich auf einen *Fuß* bzw. eine *Basis*, mit der er am Boden, an der Decke, an der Wand oder an Stahlbaugestellen festgeschraubt ist. Bei Industrierobotern kommen überwiegend *Drehgelenke* mit jeweils einem Freiheitsgrad zum Einsatz, die die aufeinanderfolgenden Segmente beweglich miteinander verbinden. Die kinematische Kette eines Roboters wird als *Arm* bezeichnet, wobei bei einem Knickarmroboter die drei kompakten Gelenke am Ende des Arms *Handgelenk* genannt werden. An das Handgelenk wird über einen *Flansch* der sogenannte *Endeffektor* angeschraubt, der den eigentlichen Fertigungsprozess des Roboters ausführt.

Der Roboter dient als Manipulator zur Ausführung einer in einem *Roboterprogramm* definierten Bewegung. Die so definierte Bewegung bezieht sich auf einen speziellen Punkt, den man als *Werkzeugmittelpunkt* oder *Tool Center Point* (TCP) bezeichnet. Die Abkürzung

Abb. 1.1 Terminologie für die wesentlichen Bauteile eines Roboterarms



TCP ist in der Robotik überaus verbreitet und wird daher auch im Folgenden durchgehend verwendet. Da die meisten Roboter sowohl translatorische Bewegungen als auch Rotationen mit ihrem Endeffektor ausführen können, muss die Beschreibung der Bewegung sowohl Position als auch Orientierung beinhalten. In der Robotik versteht man daher unter dem TCP im Allgemeinen die Position und Orientierung des *Koordinatensystems* am Roboterflansch, obwohl die Abkürzung TCP nur von einem Punkt spricht. Die Kombination von Position und Orientierung wird auch als *Pose* des Roboters bezeichnet.

Der besondere Nutzen von Robotern ergibt sich daraus, dass die Bewegung des Roboters durch ein *Roboterprogramm* frei definiert werden kann. Damit lassen sich auf einem Roboter praktisch beliebig viele verschiedene Bewegungen ausführen. Im Gegensatz zu vielen anderen Produktionsmitteln, bei denen die Bewegung bzw. der Prozess durch ihre Konstruktion fest vorgegeben ist, lassen sich Roboter durch eine kleine Änderung der Software an eine Vielzahl verschiedener Aufgaben anpassen. Dies kann in Form von starren Programmwechseln erfolgen, bei denen der Roboter zwischen festen Programmen für Bauteil A und Bauteil B umschaltet. Diese Form des Rüstens erfolgt bei einem Roboter auf Knopfdruck bzw. auf Anforderung des Leitsystems und macht den Roboter zu einem wesentlichen Befähiger in einer variantenreichen und flexiblen Produktion. Durch den Einsatz von Sensoren lassen sich Roboter heute sogar ad hoc programmieren, d. h. der Roboter kann innerhalb seines Arbeitszyklus anhand von Sensoren sein Verhalten an jedes Bauteil anpassen. Dies ist nützlich, z. B. um Toleranzen zu kompensieren und Fertigungsprozesse für jedes Bauteil einer Serie zu adaptieren. Diese Form des Eingriffs in bereits laufende Prozesse zusammen mit der großen Spanne der möglichen Veränderungen ist der Grund, warum Roboter heute als maßgeblicher Bestandteil der digitalisierten Produktion gesehen werden.

Neben dem weitverbreiteten Vertikalknickarmroboter gibt es eine Reihe verschiedener Ausführungen (Tab. 1.1). Horizontalknickarmroboter, Vertikalknickarmroboter und Portalroboter bilden die vorherrschenden Bauformen. Roboter können auch aus Gelenkmodulen

Tab. 1.1 Automatisierungskomponente Industrieroboter

Kriterium	Industrieroboter		Vertikal Knickarm	Module	Kleinroboter	
	Horizontaler Knickarm	Portalroboter			Leichtbau Roboter	Sicherer Roboter
Traglast	<10	<500	<10	5 ^a	7	4
DOF	4-5	3-6	5-6	2-7	7	6
Wiederholgenauigkeit [mm]	0,01	0,3	0,02	0,1	0,05	0,05
Sensorführung	+	+	+	o	+	o
Typische Reichweite [m]	<1	Var.	>3	1,2	0,8	Ca.1
Kosten [T€]	25	50	30	5/DOF	80	50
Ausführungsbeispiel	Adept Cobra	Reis RL	ABB IRB140	Schunk ERB 0	Kuka iwaia	Kuka KR5Si

^a bei 6 DOF

applikationsspezifisch aufgebaut werden. Dabei lässt sich die Baugröße und Anzahl der Freiheitsgrade an die jeweilige Aufgabe anpassen.

Leichtbauroboter wie z. B. von Kuka, Universal Robot und ABB haben häufig einen zusätzlichen Freiheitsgrad und verfügen teilweise über eine integrierte Kraftregelung. Diese erlaubt zum einen, den Roboter durch Handführen zu bewegen und zu programmieren, zum anderen können die vom Roboter ausgeübten Prozesskräfte genau eingestellt werden, um etwa bei Fügeaufgaben eine definierte Kraft aufzubringen.

Sogenannte *sichere Roboter* sind notwendig, wenn bei dem Aufbau der Roboterzelle auf eine trennende Schutteinrichtung wie einen Schutzzaun verzichtet werden soll. Um dies zu erreichen, gibt es Sonderausführungen, die z. B. mittels steuerungstechnischer Verfahren die vom Roboter ausgehende Gefahr vermindern oder die durch eine gepolsterte Oberfläche die Folgen einer Kollision zwischen Mensch und Roboter reduzieren. Solche Schaumstoffschichten können zusätzlich mit Sensoren ausgestattet sein, um den Roboter im Fall des Kontakts mit einem Menschen stillzusetzen. Die Gewährleistung der Personensicherheit ist bei Robotern relevant und wird in Kap. 9 behandelt.

Die Kosten von Robotern sind ein wesentlicher Einflussfaktor für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Als grober Anhaltswert kann von Kosten von 20.000 € bis 60.000 € für einen konventionellen Industrieroboter ausgegangen werden. Sonderausführungen wie manche Leichtbauroboter können bei Preisen von 80.000 € bis 100.000 € liegen. Eher einfache Roboter wurden jüngst in einem Kostenbereich von 10.000 € bis 25.000 € angekündigt. Diese Zahlen basieren auf dem Listenpreis der Roboter. Preisnachlässe sind üblich und orientieren sich an der Auslastung der Hersteller sowie an den Abnahmemengen.

Es ist zu beachten, dass Roboter aufgrund ihrer definitionsgemäßen Universalität im rechtlichen Sinne unvollständige Maschinen sind. Für den Einsatz muss der Roboter mit Peripheriekomponenten, Werkzeugen, Vorrichtungen, Fördertechnik und anderen Robotern zu einer Maschine, dem sogenannten *Robotersystem*, einer *Roboteranlage* bzw. der Roboterzelle (Abb. 1.2 zeigt ein Beispiel), integriert werden. Wie im Rahmen dieses Buches näher ausgeführt wird, entstehen bei dieser Integration maßgebliche Aufwände.

1.1.2 Investitionskosten

Da die meisten Roboter zur Rationalisierung der Produktionskosten eingesetzt werden, spielt die Relation zwischen den Kosten der Automatisierung mit Robotern und den Kosten für manuelle Arbeit eine Rolle. Ein Überblick über die Entwicklung von Lohnkosten und Roboterpreisen ist in Abb. 1.3 dargestellt. In der Abbildung sind die Preise auf das Niveau von 1990 normiert. Im dargestellten Zeitraum haben sich die Kosten für manuelle Arbeit um ca. 40 % erhöht. Gleichzeitig sind die Kosten für Industrieroboter um 40–50 % gefallen. Zusätzlich zu dieser inflationsbereinigten Kostenreduktion sind neuere Industrieroboter in Bezug auf ihre Leistungsdaten wesentlich verbessert worden. Zu der erheblichen Leistungssteigerung der verwendeten Computer kommen auch Verbesserungen der Genauigkeit,