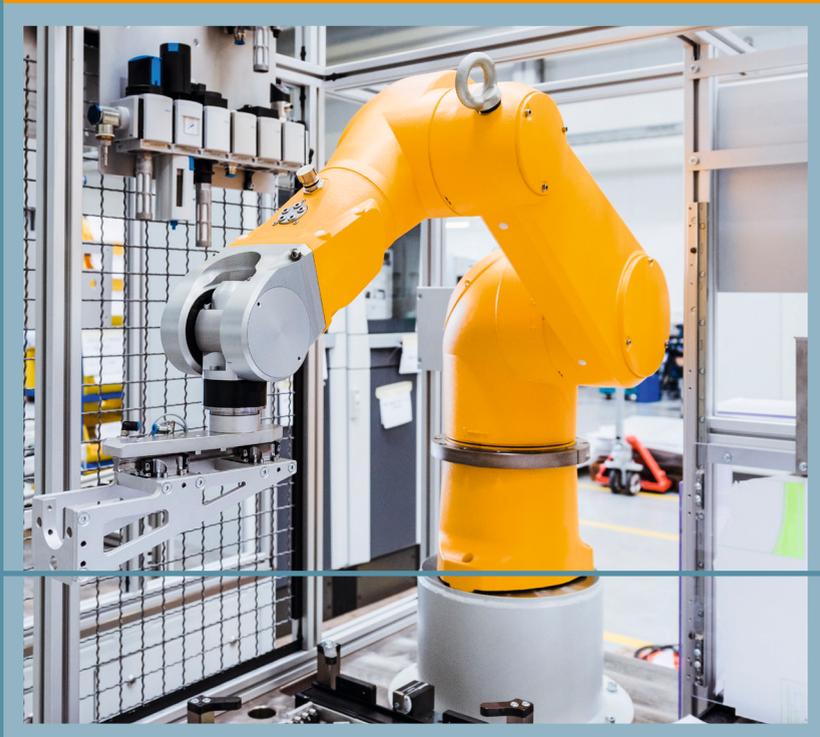


Georg Stark



Robotik mit **MATLAB**



2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-5mbj9-26unk

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Unser **Computerbuch-Newsletter** informiert Sie monatlich über neue Bücher und Termine. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter:

www.hanser-fachbuch.de/newsletter



Lehrbücher zur Informatik

Begründet von

PROF. DR. MICHAEL LUTZ UND PROF. DR. CHRISTIAN MÄRTIN

weitergeführt von

PROF. DR. CHRISTIAN MÄRTIN

Hochschule Augsburg Fachbereich Informatik

Zu dieser Buchreihe

Die Werke dieser Reihe bieten einen gezielten Einstieg in grundlegende oder besonders gefragte Themenbereiche der Informatik und benachbarter Disziplinen. Alle Autoren verfügen über langjährige Erfahrung in Lehre und Forschung zu den jeweils behandelten Themengebieten und gewährleisten Praxisnähe und Aktualität.

Die Bände der Reihe können vorlesungsbegleitend oder zum Selbststudium eingesetzt werden. Sie lassen sich teilweise modular kombinieren. Wegen ihrer Kompaktheit sind sie gut geeignet, bestehende Lehrveranstaltungen zu ergänzen und zu aktualisieren.

Die meisten Werke stellen Ergänzungsmaterialien wie Lernprogramme, Software-Werkzeuge, Online-Kapitel, Beispielaufgaben mit Lösungen und weitere aktuelle Inhalte zur Verfügung.

Lieferbare Titel in dieser Reihe

- Rainer Oechsle, Parallele und verteilte Anwendungen in Java
- Wolfgang Riggert/Ralf Lübben, Rechnernetze
- Georg Stark, Robotik mit MATLAB
- Rolf Socher, Theoretische Grundlagen der Informatik

Georg Stark

Robotik mit MATLAB

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dipl.-Ing. Georg Stark, Hochschule Augsburg



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © gettyimages.de/Westend61

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47195-5

E-Book-ISBN 978-3-446-47362-1

Vorwort

Ein besonderer Ansatz!

Den Anstoß für dieses Lehrbuch gaben eigene Erfahrungen bei der Entwicklung einer Robotersteuerung. Mit einer technikorientierten Programmiersprache und umfangreicher Funktionsbibliothek, wie die technische Software MATLAB sie bereitstellt, verläuft der Entwicklungsprozess wesentlich schneller und problemloser als mit allgemeinen Programmiersprachen. Die formalen Modelle können sehr direkt in Software umgesetzt werden. Dies führt zu übersichtlichem und leicht wartbarem Programmcode.

Ein weiterer, wichtiger Ansatz besteht darin, alle benötigten Wissensgebiete für die Entwicklung von Robotersoftware, aufeinander abgestimmt, mit einem einzigen Buch abzudecken. Hierzu gehören die mathematischen Grundlagen, die Programmiersprache, die Verfahren der Robotik und die Roboteranwendung. Aber dieser Ansatz bedeutet auch, dass die behandelten Wissensgebiete in ihrem Umfang beschränkt und auf die zu lösenden Probleme ausgerichtet sein müssen.

Für wen?

Das Buch ist konzipiert für Studierende in den ersten Semestern der Ingenieurwissenschaften und technikorientierten Informatik an Universitäten und Hochschulen. Es kann als Leitfaden für einführende Lehrveranstaltungen zum Thema „Softwareentwicklung für mechanische Systeme, Robotik“ eingesetzt werden. Sowohl für Studierende als auch für Berufstätige ist es zum Selbststudium und zur Weiterbildung geeignet.

Mit welchem Ziel?

Inhaltlich besteht das Ziel darin, die Grundlagen der Robotik mit dem Schwerpunkt Software zu vermitteln. Dabei stehen moderne Methoden wie modellbasierte und komponentenorientierte Softwareentwicklung im Vordergrund. Methodisch wird angestrebt, vertieftes Lernen durch eine enge Verzahnung von Wissensvermittlung und unmittelbarer Umsetzung in Software zu erreichen. Durch diese Verknüpfung wird der Lernende zu einer intensiven Auseinandersetzung mit den In-

halten herausgefordert. Darüber hinaus wird angestrebt, das Wissen auch auf verwandte Problembereiche außerhalb der Robotik zu transferieren, um so eine umfassende Sicht zu gewinnen.

Mit welchem Inhalt und Aufbau?

Als Einstieg dient ein kurzer historischer Rückblick und die zentralen Begriffe *Roboter* und *Robotik* werden definiert. Ausgehend von den Anforderungen werden zunächst die Industrieroboter dargestellt, bevor auf die anderen Roboterarten eingegangen wird. Abschließend werden die gemeinsamen Grundprinzipien von Robotern aufgezeigt (Kapitel 1).

Der Ausgangspunkt für die Programmierung sind formale, mathematische Modelle. Als Voraussetzung für deren Realisierung werden die Grundlagen der Robotermathematik behandelt (Kapitel 2). Die technische Software MATLAB wird ausführlich erklärt. Sie umfasst die Bedienungsumgebung, die Funktionsbibliothek und die darin eingebettete Programmiersprache. Darauf aufbauend zeigt das Buch, wie die benötigte Robotermathematik durch MATLAB-Funktionen realisiert wird. Das Ergebnis ist die ROBOMATS-Funktionsbibliothek, die als Grundlage für die Realisierung der Robotersoftware verwendet wird (Kapitel 3).

Die beiden zentralen Kapitel 4 und 5 behandeln die Verfahren zur Modellierung der kinematischen Struktur und zum Entwurf von Bahnsteuerungen. Schrittweise werden die Softwareteile für einen kompletten Robotersimulator mit Grafikausgabe entwickelt. Die Realisierung von größeren Softwarepaketen erfordert zusätzliche Softwaretechniken, die in einem eigenen Kapitel behandelt werden (Kapitel 6). Im Mittelpunkt steht dabei die komponentenorientierte Programmierung, basierend auf der weitverbreiteten COM-Schnittstelle. Sie ermöglicht die Aufteilung der Gesamtsoftware auf mehrere Komponenten, die auch mit unterschiedlichen Sprachen programmiert sein können. Auf diese Weise können die einzelnen Softwareteile flexibel zu einem Robotersimulator mit Grafikausgabe integriert werden.

Entscheidend für jede Steuerungssoftware ist, dass sie für die beabsichtigten Anwendungen tauglich ist. Aus diesem Grunde wird die nun entwickelte Software für zwei typische Anwendungen getestet (Kapitel 7). Beim Palettieren wird das Ausführungsprogramm automatisch vom Palettiermuster abgeleitet. Die Bearbeitung eines Langlochs benötigt exakte Bahnen, die auch die Ausführung von Halbkreisen erfordern. Zum Abschluss wird aufgezeigt, wie mithilfe der MATLAB-Entwicklungsumgebung Fehler analysiert und Programme optimiert werden können (Kapitel 8).

Welche didaktische Unterstützung gibt es dabei?

Am Anfang eines jeden Kapitels wird die Zielsetzung formuliert und ein kurzer Abriss gegeben, der die wesentlichen Leitgedanken herausstellt. Am Ende erfolgt eine Zusammenfassung und Auflistung der wichtigsten Begriffe und Methoden. Die Ausführungen werden ergänzt durch die Kommentierungen *Wichtig* und *Hinweis*.

Am Ende der Kapitel 2 bis 8 finden Sie Aufgaben. Sie sollen zur Vertiefung des Gelernten dienen und anregen, das Wissen auf andere Themengebiete zu transferieren. Lösungen für die Aufgaben und Zusatzinformationen werden über das Internet bereitgestellt.

Wie soll das Buch benutzt werden?

Kapitel 1 vermittelt Hintergrundwissen und stellt wichtige Begriffe vor, die im weiteren Verlauf verwendet werden. Die Beherrschung der Inhalte von Kapitel 2 und 3 ist Voraussetzung für die Folgenden. Dies sollte durch gewissenhafte Bearbeitung der Aufgaben sichergestellt werden. Die Kapitel 4 und 5 behandeln die wesentlichen Grundlagen für die Entwicklung von Robotersoftware. Die dargelegten mathematischen Verfahren werden unmittelbar in Programme umgesetzt. Die gezeigten Listings haben beispielhaften Charakter. Dem Lernenden wird ausdrücklich empfohlen, zunächst eine eigene Implementierung zu versuchen und diese dann mit der vorgestellten zu vergleichen. Die Konzepte für das Programmieren im Großen in Kapitel 6 sollen erst nach sicherer Beherrschung des vorausgehenden Stoffes bearbeitet werden. Dieses Kapitel kann auch übersprungen werden. Die beiden Beispiele in Kapitel 7 können nur Anregung sein, sich mit weiteren Roboteranwendungen zu befassen. Mit den Methoden von Kapitel 8 soll im Nachhinein die bereits entwickelte Software analysiert und gegebenenfalls optimiert werden.

Zu guter Letzt!

Mein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. Erika Hotho und Frau Mirja Werner, M.A., die mich als Lektorinnen begleitet haben, und Frau Dipl.-Ing. Franziska Kaufmann, die mir beim Layout zur Seite stand. Mein Kollege Prof. Dr. Christian Martin hat mich in vielen Gesprächen ermutigt, dieses Buch zu schreiben. Ich danke Frau Prof. Dr. Anja Schanzenberger und Herrn Prof. Dr. Michael Lutz von der Hochschule Augsburg, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn von der Universität Karlsruhe für viele wertvolle Hinweise. Besonders danke ich meiner langjährigen Mitarbeiterin Frau Dipl.-Inf. Gertraud Matzke für die geduldige und gewissenhafte Durchsicht des Manuskripts. Eine große Hilfe waren meine wunderbaren Kinder Christina, Katja und Andreas, die mir viele nützliche Korrekturhinweise aus der Sicht von Studenten und Berufsanfängern gegeben haben. Den Firmen und Forschungsinstituten danke ich für die Unterstützung und das Überlassen von Bildmaterial.

Die vorgestellten Programmbeispiele wurden mit verschiedenen Versionen von MATLAB 7 getestet. Programmcode, Zusatzinformationen und die Lösungen der Aufgaben finden Sie auf meiner Homepage:

www.hs-augsburg.de/homes/stark/Buch_Robotik_mit_Matlab

Möge dieses Lehrbuch dazu beitragen, eine engere Verzahnung der Informatik mit den Ingenieurwissenschaften zu fördern und das Programmieren als einen Weg zu einem vertieften Verständnis von Lehrinhalten zu praktizieren.

Friedberg, im Juli 2009

Georg Stark

■ Vorwort zur 2. Auflage

Die Ausgabe einer 2. Auflage legt es nahe, die Inhalte an die in der Zwischenzeit erfolgten Fortschritte anzupassen. Im Bereich der Robotik können die Fortschritte mit den beiden Schlüsselwörtern *kollaborativ* und *kognitiv* beschrieben werden.

Kollaborative Roboter (Abkürzung *Cobot*) werden verstärkt als Assistenten des Menschen eingesetzt. Solche Anwendungen gibt es zunehmend im Bereich der Industrie, z. B. in der Montage, und in der Medizin, z. B. als Chirurgieroboter. Aber auch im Bereich der Servicerobotik, beispielsweise in der Pflege, gibt es viele neue Anwendungen für Cobots.

Die kognitive Robotik beschäftigt sich mit dem intelligenten Verhalten von Robotern auf einer hohen Ebene. Dieses beruht auf Wissen, Erinnern, Verstehen, Lernen, Planen und sogar Kreativität. Kognitive Roboter sind zunächst eine Weiterentwicklung der humanoiden Roboter. Aber auch alle anderen Roboterarten können mit kognitiven Fähigkeiten ausgestattet werden.

Die vergangenen Jahre waren auch durch Veränderungen auf dem Markt der Roboterhersteller gekennzeichnet. Viele kleinere Roboterhersteller sind verschwunden oder wurden von größeren übernommen. Andererseits gibt es vor allem in den Bereichen der kollaborativen und kognitiven Robotik neue, sehr innovative und erfolgreiche Hersteller.

Der zweite Schwerpunkt meines Buches, die Anwendung von technisch-wissenschaftlicher Standardsoftware, insbesondere MATLAB mit der aktuellen Version R2021b, ist ebenfalls durch große Fortschritte geprägt. Eine neue Bedienoberfläche berücksichtigt, dass wesentlich umfangreichere Bedienfunktionen zur Verfügung stehen. Daneben gibt es neue, leistungsfähige Verfahren, um Programmcode besser zu dokumentieren, und um MATLAB-Programme als eigenständige Anwendungen für nahezu alle Rechnerplattformen und das Internet bereitzustellen. Die Funktionalität von MATLAB wird durch zusätzliche Toolboxen wesentlich erweitert. Diese beziehen sich sowohl auf neue, verbesserte mathematische und grafische Verfahren, aber auch auf neue Anwendungsbereiche wie Robotik, Kommunikationssysteme, Bioinformatik oder Finanzwirtschaft. Auch die Möglichkeiten zur Fehleranalyse und Programmoptimierung werden weiterentwickelt. Für Neueinsteiger ist besonders wertvoll, dass für MATLAB nun auch eine Online-Version zur Verfügung steht, die mit einem Standard-Browser benutzt werden kann. Die Installation auf einem lokalen Rechner entfällt somit.

Lösungen zu den Aufgaben, Vorgehensweise bei der Lösungserstellung, Zusatzsoftware, ergänzende und weiterführende Literatur sind auf plus.hanser-fachbuch.de und www.hs-augsburg.de/homes/stark/Buch_Robotik_mit_Matlab abrufbar.

Danken möchte ich wieder den Firmen und Instituten, die mich mit Bildern, Zusatzinformationen und Ratschlägen versorgt haben. Meine Tochter Christina Stark und Herr Dietmar Steidl von KUKA Deutschland haben mir daneben auch noch interessante Einblicke in Struktur und Funktion einer modernen Robotersteuerung ermöglicht. Herr Oliver Jählig von Mathworks Deutschland hat mir viele wichtige Hinweise bezüglich der neu hinzugekommenen Funktionen von MATLAB gegeben. Mein besonderer Dank geht ganz besonders auch an Frau Silakova und Frau Kubiak vom Carl Hanser Verlag, die immer mit viel Geduld und Engagement an meiner Seite standen.

Dieses Buch möchte ich meinen wunderbaren Enkeln Gabriel, Karla, Juliane und Jaron widmen. Sie sind für mich eine unschätzbare Quelle an Lebensfreude, Inspiration und Zuversicht. Mögen sie in eine Welt hineinwachsen, die diese fantastischen Möglichkeiten der Technik und der Informatik verantwortlich nutzt, zum Wohle der gesamten Menschheit und ihrer Lebensgrundlagen.

Friedberg, im Februar 2022

Georg Stark

Inhalt

Vorwort	V
1 Einführung in die Robotik	1
1.1 Historie	1
1.2 Definition und Klassifikation	5
1.2.1 Roboter	5
1.2.2 Robotik als Wissenschaft	7
1.3 Industrieroboter	8
1.3.1 Mechanischer Aufbau	9
1.3.2 Komponenten eines Robotersystems	17
1.3.3 Steuerung und Systemsoftware	19
1.3.4 Anwendungsprogrammierung und Bedienung	21
1.4 Andere Roboterklassen	24
1.4.1 Serviceroboter und mobile Roboter	24
1.4.2 Mikroroboter	26
1.4.3 Humanoide und kognitive Roboter	27
1.5 Datenfluss in einem Robotersystem	29
1.6 Zusammenfassung	31
2 Grundlagen der Robotermathematik	33
2.1 Formale Modelle	33
2.2 Punkt, Gerade, Ebene	35
2.2.1 Punkt und Koordinaten	35
2.2.2 Vektoren	36
2.2.3 Gerade in Ebene und Raum	37
2.2.4 Schnittpunkt zweier Geraden	39
2.2.5 Ebene im Raum	40
2.2.6 Schnittgerade zweier Ebenen	40

2.3	Trigonometrische Funktionen	41
2.3.1	Gradmaß, Bogenmaß, Einheitskreis	41
2.3.2	Inverse trigonometrische Funktionen	42
2.3.3	Winkel in einem allgemeinen Dreieck, Kosinussatz	43
2.4	Lineare Algebra	43
2.4.1	Vektoren und Matrizen	43
2.4.2	Lineare Gleichungssysteme	47
2.4.3	Lineare Abbildung	51
2.4.4	Darstellung der Orientierung durch Eulerwinkel	58
2.5	Polynome	63
2.6	Differentielle Zusammenhänge	64
2.6.1	Ableitung von Funktionen	64
2.6.2	Berechnung der Jacobimatrix	65
2.7	Zusammenfassung	67
2.8	Aufgaben	68
3	Programmieren mit MATLAB	73
3.1	Erste Schritte	73
3.1.1	Was ist MATLAB?	73
3.1.2	Bedienoberfläche	75
3.1.3	Variablen in MATLAB	78
3.1.4	Arithmetische Operationen	84
3.1.5	Behandlung von Zeichenketten	87
3.1.6	Programmstrukturen	90
3.1.7	Ein-/Ausgabe und Dateioperationen	97
3.1.8	Grafik	99
3.2	Unterstützung der Robotermathematik	101
3.2.1	Schnitt, Abstand von Ebene und Gerade	101
3.2.2	Winkelberechnung	105
3.2.3	Koordinatentransformationen	106
3.2.4	Inverse Eulertransformation	108
3.2.5	Synthese von Polynomen	109
3.2.6	Berechnung der Jacobimatrix	111
3.2.7	Funktionsbibliothek ROBOMATS	112
3.3	MATLAB als technische Programmiersprache	115
3.3.1	Besondere Eigenschaften	115
3.3.2	Softwareentwurf	117
3.4	Zusammenfassung	121
3.5	Aufgaben	122

4	Modellierung der kinematischen Struktur	127
4.1	Einführung	127
4.1.1	Freiheitsgrad und kinematische Kette	127
4.1.2	Geeignetes Robotermodell	129
4.2	Kinematikmodell nach Denavit-Hartenberg	130
4.2.1	Konzept	130
4.2.2	Kinematische Strukturen in der Praxis	133
4.3	Programm zur Berechnung der DH-Parameter	138
4.3.1	Softwareentwicklung	138
4.3.2	Implementierung und Test	140
4.4	Transformationen zwischen Roboter- und Weltkoordinaten	144
4.4.1	Vorüberlegungen	144
4.4.2	Vorwärtstransformation	146
4.4.3	Rücktransformation	148
4.5	Zusammenfassung	164
4.6	Aufgaben	165
5	Entwurf von Bahnsteuerungen	169
5.1	Prinzipien	169
5.1.1	Einbindung der Bahnsteuerung in den Datenfluss	169
5.1.2	Verfahrenarten	171
5.2	Bahnplanung	173
5.2.1	Trajektorie	173
5.2.2	Geschwindigkeitsprofil	180
5.2.3	Synchronisation und Anpassung an den Interpolationstakt	185
5.3	Interpolation	186
5.3.1	Echtzeitanforderungen	186
5.3.2	Interpolationsvektor und Geschwindigkeitsprofil	187
5.3.3	Trajektorie	188
5.4	Programmierung	190
5.4.1	Umsetzung des Bewegungsmodells	190
5.4.2	Modellzustand und Modellparameter	193
5.4.3	Globale Modellfunktionen	194
5.4.4	Hilfsfunktionen	203
5.5	Test und Visualisierung	205
5.5.1	Testanwendung	205
5.5.2	Visualisierung und Auswertung	207

5.6	Zusammenfassung	209
5.7	Aufgaben	211
6	Programmieren im Großen	215
6.1	Geeignete Softwarekonzepte	216
6.1.1	Allgemeine Anforderungen	216
6.1.2	Unterstützung durch MATLAB	217
6.2	Komponentenorientierte Programmierung in MATLAB	220
6.2.1	Konzept	220
6.2.2	Programmierung	224
6.3	Integration der Serverkomponente Echtzeitinterpolator	230
6.3.1	Systemarchitektur	230
6.3.2	Funktionsumfang des Echtzeitinterpolators	232
6.3.3	Exportierte Methoden und Ereignisse	234
6.3.4	Programmierung der Client-Schnittstelle	235
6.3.5	Programmierung der Server-Schnittstelle und Registrierung	237
6.4	Realisierung eines Robotersimulators mit Grafikmodell	239
6.4.1	Beschreibung des Grafikmodells	239
6.4.2	Initialisierung und Ausführung der Gesamtsoftware ...	240
6.5	Zusammenfassung	241
6.6	Aufgaben	243
7	Anwendungen	245
7.1	Grundsätze	245
7.2	Beispiele	247
7.2.1	Palettieren	248
7.2.2	Bearbeiten Langloch	253
7.3	Zusammenfassung	258
7.4	Aufgaben	259
8	Fehlerbehandlung und Optimierung	261
8.1	Fehler im Programmcode	261
8.1.1	Syntax- und Laufzeitfehler	261
8.1.2	Debugger	262
8.2	Behandlung externer Fehler	266
8.2.1	Ausgabe von Meldungen	267

8.2.2	Überprüfung fehlerhafter Daten	267
8.2.3	Try-Catch-Konstrukt	268
8.3	Programmoptimierung	269
8.3.1	Rechenzeit	270
8.3.2	Programmstruktur und Quellcode	273
8.4	Beispiel – Verbesserung der Bahnsteuerung	277
8.4.1	Codeanalyse	277
8.4.2	Fehlerüberwachung	278
8.4.3	Optimierung der Rechenzeit	279
8.5	Zusammenfassung	279
8.6	Aufgaben	281
9	Literaturverzeichnis	283
	Index	285

Ergänzendes Material auf plus.hanser-fachbuch.de:

- Lösungen zu den Aufgaben
- Vorgehensweise bei der Lösungserstellung
- Zusatzsoftware
- ergänzende und weiterführende Literatur

1

Einführung in die Robotik

Zielsetzung

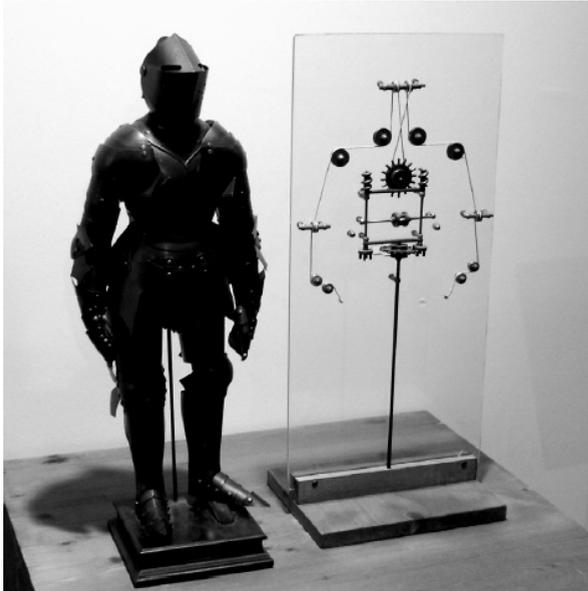
Sie können nur dann erfolgreich Software für Roboter entwickeln, wenn Sie ein Grundwissen auf diesem Fachgebiet haben. Ein Blick auf die Historie und ihre auslösenden Impulse hilft, auch die aktuelle Robotertechnik besser zu verstehen. Die Schlüsselbegriffe *Roboter* und *Robotik* werden in diesem Kapitel erklärt.

Die *Industrieroboter* als wichtigste Klasse werden ausgehend von den Anforderungen und den wesentlichen Systemparametern *Arbeitsraum*, *Traglast*, *Genauigkeit* und *Geschwindigkeit* dargestellt. Die weiteren Roboterklassen *Serviceroboter*, *Mikroroboter* und *humanoide, kognitive Roboter* werden nur kurz gestreift, da die bereits ausgereifte Technik der Industrieroboter auch deren technologische Basis bildet.

Zum Abschluss werden die gemeinsamen Grundprinzipien der verschiedenen Roboterklassen aufgezeigt, die im integrierten Material-, Energie- und Datenfluss eines Robotersystems zum Ausdruck kommen.

■ 1.1 Historie

Roboter werden zuerst in der Literatur erwähnt, in Karel Capeks satirischem Stück „Rossum’s Universal Robots“ von 1922. Seitdem werden sie mit intelligenten, selbstständig agierenden Automaten gleichgesetzt. Sie sind so zu einem Synonym für hoch entwickelte Technik geworden. Mit dieser Idee verbunden sind Hoffnungen auf mehr Wohlstand, Komfort und humane Arbeitsplätze, aber auch Ängste vor Arbeitsplatzabbau, Armut und Fremdbestimmung.

**Bild 1.1**

Nachbau einer roboterähnlichen Maschine von Leonardo da Vinci (Foto: Erik Möller)

Die heutige Robotertechnik ist das Ergebnis eines langen Entwicklungsprozesses. Erste Entwürfe von roboterähnlichen Maschinen stammen aus dem 16. Jahrhundert von dem Universalgenie Leonardo da Vinci. Ein Nachbau ist in Bild 1.1 dargestellt. Um 1700 werden musikspielende Puppen und damit die ersten Vorläufer von Robotern gebaut. Die historische Entwicklung der Robotertechnik ist in Tabelle 1.1 wiedergegeben. Aufgeteilt nach Dekaden werden zunächst die Fortschritte der Rechnertechnik als wichtigster Motor der Robotertechnik beschrieben. Es folgen die wesentlichen Entwicklungsschritte bei den Robotern selbst. Dabei wird zwischen Industrierobotern und den anderen Roboterklassen unterschieden. Erstere werden bereits ab Mitte der 1970er-Jahre in größeren Stückzahlen eingesetzt, sind aber mit einer konservativeren Technik ausgestattet. Letztere repräsentieren zwar den jeweils neuesten Stand der Technik, sind dadurch aber aufwendiger und noch nicht so ausgereift.

Tabelle 1.1 Geschichtliche Entwicklung der Robotertechnik

Um 1700	Technik der mechanischen Uhren Entwicklung von musikspielenden Puppen
1950 – 60	Die Elektronik, basierend auf Elektronenröhren, später Transistoren, wird eingeführt. Die Rechnertechnik wird kommerziell eingesetzt. Basierend auf der Technik der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen entwickeln George Devol und Joe Engelberger den ersten programmierbaren Roboter.

1960 – 70	<p>Informatik und künstliche Intelligenz als wichtige Teilwissenschaft werden eingeführt.</p> <p>Robotikinstitute werden gegründet und die Robotikforschung kommt in Schwung.</p> <p>Der erste kommerzielle Roboter wird an eine Automobilfabrik ausgeliefert.</p>
1970 – 80	<p>Der Mikroprozessor wird erfunden und in Steuerungen eingesetzt.</p> <p>Ab der zweiten Hälfte des Jahrzehnts werden Roboter in der Automobilindustrie in größerem Umfang für Schweißen und Handhabung verwendet.</p> <p>Der erste anthropomorphe Roboter mit zwei Beinen wird entwickelt.</p>
1980 – 90	<p>Die Leistungsfähigkeit der Mikrocomputertechnik steigt rasant.</p> <p>Die Schnelligkeit und Genauigkeit von Robotersystemen werden verbessert. Die Anzahl der eingesetzten Systeme nimmt stark zu.</p> <p>Roboter werden mit Sensoren und Kameras ausgestattet, z. B. zur Nahtverfolgung beim Schweißen.</p>
1990 – 00	<p>Steuerungen werden auf die PC-Technik¹ umgestellt. Die Vernetzung, auch über das Internet, nimmt zu.</p> <p>Viele neue Anwendungsbereiche für Industrieroboter außerhalb der Automobilindustrie werden erschlossen.</p> <p>Serviceroboter und mobile Roboter werden entwickelt und in ersten Anwendungen eingesetzt. Großen Anklang findet der <i>Robocup</i>, eine weltweite Bewegung, mobile und intelligente Roboter für kooperative Ballspiele werden entwickelt.</p>
2000 – 09	<p>Die zunehmende Leistungsfähigkeit der Rechner erlaubt die Realisierung von intelligenten Systemen.</p> <p>Medizinroboter werden zur Praxisreife gebracht, roboterähnliche Bewegungsstrukturen als künstliche Glieder und künstliche Sinnesorgane entwickelt.</p> <p>Kooperative und humanoide Roboter werden entwickelt.</p> <p>Mikro- und Makroroboter werden entwickelt.</p>
2010 – 19	<p>Aufgrund der steigenden Integrationsdichte der Rechnerbausteine werden kompakte Rechnersysteme mit einer früher nicht vorstellbaren Leistungsfähigkeit ermöglicht. Auch die Techniken und Technologien der künstlichen Intelligenz, z. B. neuronale Netze und wissensbasierte, lernende Systeme, werden weiterentwickelt.</p> <p>Autonome Roboter, ausgestattet mit Multisensoren und Multikinematiken, kombiniert mit unterschiedlichen mobilen Systemen, kommen auf den Markt. Kollaborative Roboter (Cobot) und autonome Systeme kommen in steigendem Umfang zur Anwendung. Autonome Roboter werden als Schwarm eingesetzt.</p> <p>Roboter finden als Assistenten, Chirurgieroboter und Mikroroboter zur Untersuchung von Körperhöhlen ihren festen Platz in der Medizin. Der Einsatz von Cobots in der Industrie und in neuen Anwendungsgebieten, z. B. in der Pflege, nimmt zu. Roboter mit immer umfangreicheren kognitiven Fähigkeiten werden entwickelt.</p>

¹⁾ Die in Personal Computern verwendete Technik stellt inzwischen einen weltweiten Standard dar.

Die geschichtliche Entwicklung zeigt, dass die entscheidenden Impulse für die Weiterentwicklung der Roboter durch die Rechner-technik erfolgten. So war z. B. im Jahr 1983 eine Robotersteuerung mit zwei Mikroprozessoren mit 15 MHz Taktfrequenz und einem Speicher mit 256 KB ausgestattet. Heutige Steuerungen arbeiten mit mehreren Prozessoren mit Taktfrequenzen von über 5 GHz und Speichern mit weit mehr als 10 GB.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Vernetzung. Sie begann zwar bereits in den 80er-Jahren. Mit der Anwendung der für Personal Computer entwickelten Standards für Hardware und Software in der Steuerungstechnik wurden jedoch die Möglichkeiten zur Vernetzung wesentlich verbessert. Heute kann fast jede Industriesteuerung für Wartungs- und Diagnosezwecke über das Internet erreicht werden.

Eine wichtige Rolle spielte auch die Weiterentwicklung der elektrischen Antriebe durch den Einzug der Halbleitertechnik. Nur durch die Verwendung von Leistungstransistoren ist es möglich, bürstenlose und damit wartungsarme Motoren einzusetzen. Bezüglich der Werkstoffe war der Übergang von geschweißtem Stahl auf Aluminiumguss ein wichtiger Schritt. Dieser kann kostengünstiger gefertigt werden und ist bei gleicher Steifigkeit wesentlich leichter. Inzwischen werden auch vermehrt Kunststoffe eingesetzt.

Sensoren und Kamerasysteme finden bei den Industrierobotern nur zögerlich Eingang, etwa ab Mitte der 1980er-Jahre. Dies liegt daran, dass durch Sensoren die Komplexität und damit auch die Anfälligkeit wesentlich steigen. In vielen Fällen kann durch hohe Fertigungsgenauigkeit der Vorprodukte und durch genaue Positionierung der Einsatz von Sensoren umgangen werden. Da Serviceroboter und mobile Roboter in wesentlich unstrukturierteren Umgebungen eingesetzt werden, sind für sie Sensoren unerlässlich. Jedoch sind die Genauigkeitsanforderungen auch kleiner als in der Industrie.

Die ersten bedeutenden Anwendungsgebiete für die Industrieroboter sind Schweißen und Handhaben in der Automobilindustrie gewesen. Sehr bald hatten auch Roboter und roboterähnliche Bestückungsautomaten in der Elektronikindustrie ihren festen Platz. Hinzu kamen Anwendungen in anderen Industrien wie der Metall-, Glas-, Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie. Bisher wurden weltweit mehr als 3 Mio. Industrieroboter installiert.

Serviceroboter werden in rasant steigendem Umfang für Dienstleistungen eingesetzt. Seit einigen Jahren gibt es einen Trend, in der Produktion Roboter auch in direkter Kooperation mit Personen zu verwenden. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an ein abgesichertes, adaptives, intelligentes Verhalten. Als höchste Form gelten humanoide Roboter mit Armen und Beinen und zunehmend kognitiven Fähigkeiten, die als Assistenten des Menschen wirken.

In eine völlig andere Richtung geht die Entwicklung von einfachen, aber kostengünstigen Robotern für den privaten Gebrauch. Verwendet werden sie vorwiegend für einfache Dienste wie Staubsaugen, Rasenmähen oder für Hobby und Unterhaltung, zunehmend auch für Servicedienstleistungen.

■ 1.2 Definition und Klassifikation

1.2.1 Roboter

Am Anfang der Entwicklung standen die Industrieroboter. Eine allgemein anerkannte Definition, festgelegt durch den VDI², lautet:

Definition – Industrieroboter

Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.

Eine weitere Definition wurde von der *International Organization for Standardization*³ (ISO 8373) festgelegt. Diese wird auch von der internationalen Robotervereinigung *International Federation of Robotics*⁴ (IFR) benutzt.

Oft wird der Begriff Roboter aber viel weiter gefasst. So werden zum Teil ganz allgemein Systeme, die über Sensoren Informationen aufnehmen, diese weiterverarbeiten und daraus Aktionen ableiten, ebenfalls als Roboter bezeichnet. Nach dieser Definition lassen sich dann auch autonome Fahrzeuge mit unterschiedlichen Bewegungsvorrichtungen und mit Sensoren ausgerüstete Bau-, Baumfäll- und Erntemaschinen einordnen.

In Tabelle 1.2 wird der Versuch einer Klassifikation unternommen.

²⁾ Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie 2860, Montage- und Handhabungstechnik

³⁾ <https://committee.iso.org/home/tc299>

⁴⁾ <https://ifr.org/industrial-robots>

Tabelle 1.2 Klassifikation von Robotern

Roboterart	Merkmale und Anwendungsbereiche
Industrieroboter <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gelenkarm⁵ ▪ Portal ▪ SCARA ▪ Cobot ▪ paralleler Roboter 	<p>Diese Roboter sind für den industriellen Einsatz entwickelt. Sie zeichnen sich durch Robustheit, Schnelligkeit, Genauigkeit und hohe Traglast aus. Unterteilt werden sie nach Art und Anordnung der Bewegungsachsen. Der neue Begriff <i>Cobot</i> bezeichnet Roboter, die auch in direktem Kontakt zu Personen betrieben werden können.</p> <p>Industrieroboter handhaben sowohl Werkstücke als auch Werkzeuge und führen dabei auch Fertigungsprozesse aus. Typische Fertigungsprozesse sind Schweißen, Kleben, Schneiden, Lackieren, Handhaben, Montieren.</p>
Serviceroboter <ul style="list-style-type: none"> ▪ professioneller Einsatz ▪ privater Einsatz 	<p>Serviceroboter erbringen Dienstleistungen für den Menschen. Sie müssen sich autonom auch in unstrukturierter Umgebung bewegen können. Deshalb sind Sie mit Sensoren zur Erfassung der Umwelt und mit Navigationseinrichtungen ausgestattet. Weitere wichtige Merkmale sind eine leicht und sicher zu handhabende Bedienoberfläche, sowie ein für den Menschen jederzeit ungefährliches Verhalten.</p> <p>Serviceroboter werden in zwei Klassen unterteilt. Solche für den professionellen Einsatz genügen hohen Ansprüchen. Die wichtigsten Anwendungsbereiche sind Logistik, Reinigung, gefährliche Umgebung, Hotel und Landwirtschaft.</p> <p>Immer häufiger werden auch kostengünstige Serviceroboter für den privaten Bereich angeboten, z. B. für Rasenmähen, Staubsaugen oder Transport im Haushalt.</p>
Mobile Roboter	<p>Mobile, autonome Roboter haben viele Gemeinsamkeiten mit den Servicerobotern.</p> <p>Typische Einsatzgebiete sind Logistik, Produktion, Labore und Hotels. Daneben werden sie auch in gefährlichen Umgebungen, unter Wasser oder extraterrestrisch auf fremden Himmelskörpern eingesetzt.</p>
Mikro-, Nanoroboter	<p>Mikroroboter haben nur eine Größe von wenigen Millimetern und können sich autonom in kleinen Strukturen bewegen und dort Aktionen durchführen, z. B. im Inneren des Körpers. Eine andere Entwicklungsrichtung zielt darauf ab, viele Mikroroboter als <i>Schwarm</i> agieren zu lassen, z. B. zur Erkundung.</p> <p>Unter Nanorobotern versteht man autonome Maschinen und Strukturen im Kleinstformat, bis hinunter zur Größe von Molekülen.</p>

⁵⁾ Ein synonyme Begriff ist *Knickarmroboter*.

Roboterart	Merkmale und Anwendungsbereiche
Humanoider, kognitiver Roboter	<p>Humanoide Roboter haben menschenähnliches Aussehen mit Armen und Beinen. Sie sollen vergleichbare kognitive, sensorische und motorische Fähigkeiten haben, um mit Menschen direkt kommunizieren und interagieren zu können. Dies ist jedoch noch weitgehend Gegenstand der Forschung. Kognitive Roboter stellen eine intelligente Weiterentwicklung der bisherigen humanoiden Roboter dar.</p> <p>Langfristig wird angestrebt, humanoide Roboter als multifunktionale Arbeitsmaschine und Assistent des Menschen einzusetzen.</p>

1.2.2 Robotik als Wissenschaft

Der Begriff *Robotik* ist nicht so allgemeingültig definiert wie *Roboter*. Er beschreibt das Bestreben, eine Wissenschaft der Roboter zu definieren. Der Versuch einer Definition lautet:

Definition – Robotik

Die Robotik ist ein interdisziplinäres Wissensgebiet, das sich umfassend mit der Realisierung und Anwendung von Robotersystemen beschäftigt. Der Mensch mit seinen manuell-motorischen, sensorischen und kognitiven Fähigkeiten soll immer stärker unterstützt und ersetzt werden. Starken Einfluss auf die Robotik haben Maschinenbau, Werkstoffkunde, Elektrotechnik, Mathematik, Informatik und für zukünftige, hoch entwickelte Systeme auch die Kognitionswissenschaften, die Psychologie und die Biologie.

Die *Robotik* als Wissenschaft kann auch in Anlehnung an die *Informatik* definiert und strukturiert werden, da es viele Parallelen gibt. Befasst sich die Informatik nur mit der digitalen Welt in Rechnern, so stellt die Robotik deren Erweiterung hin zur realen, physisch erfahrbaren Welt dar. Über die *Sensorik* werden Phänomene und Zustände der realen Welt erfasst und digitalisiert. Ähnlich der *Kognition* beim Menschen werden die aufgenommenen Informationen mit der internen, digitalen Modellwelt abgeglichen und weiterverarbeitet. Die Folge sind Entscheidungen und Aktionen, die über die *Aktorik* auf die reale Welt zurückwirken und dort Zustände verändern.

Deshalb macht es auch Sinn, die Robotik ähnlich der Informatik zu strukturieren:

- Theoretische Robotik

beschäftigt sich mit der Abstraktion, Modellbildung und grundlegenden Fragestellungen, die sich mit der sensorischen Erfassung und Verarbeitung von Information, sowie deren Umsetzung in Aktionen befassen.

- **Praktische Robotik**
entwickelt Methoden, um umfangreiche Programmsysteme (Software) für die Realisierung von Robotern erstellen zu können.
- **Technische Robotik**
befasst sich mit der technischen Realisierung von Robotern.
- **Angewandte Robotik**
untersucht den Einsatz von Robotersystemen in den verschiedenen Anwendungsgebieten.



Hinweis – Praktische Robotik

Im vorliegenden Lehrbuch liegt das Hauptgewicht auf der Praktischen Robotik. Die Theoretische Robotik liefert die dafür benötigten formalen mathematischen Modelle. Auf die Themen der Technischen Robotik wird direkt im Anschluss eingegangen, bei der Erörterung der Anforderungen an Roboter und der daraus folgenden Roboterarten. Das große Gebiet der Angewandten Robotik wird in einem eigenen Kapitel (Kapitel 7) anhand zweier Beispiele ansatzweise behandelt.

■ 1.3 Industrieroboter

Die längste praktische Erfahrung besteht mit Industrierobotern, die zunächst hauptsächlich in der Automobilindustrie eingesetzt worden sind. Inzwischen gibt es viele neue Anwendungsbereiche in anderen Industrien, aber auch außerhalb, z. B. in Laboren, in der Medizin, auf dem Bau und in der Landwirtschaft. Ihre Technik ist inzwischen ausgereift und stellt so einen guten Ausgangspunkt für andere Roboterarten dar. Der Blick auf die Roboter erfolgt aus Sicht der Anwendung, d. h. ihre besonderen Anforderungen bestimmen hauptsächlich die zu realisierenden technischen Merkmale. Zunächst werden in diesem Abschnitt die verschiedenen Ausprägungen des mechanischen Aufbaus vorgestellt. Es wird betrachtet, welche weiteren Komponenten zu einem vollständigen Robotersystem gehören. Anschließend wird die Steuerung mit ihren Funktionen dargelegt. Ihre *Systemsoftware* ist ausschlaggebend für die Intelligenz und Mächtigkeit der Roboteroperationen. Abschließend wird auf die Themen Bedienung und *Anwendungssoftware* eingegangen.

1.3.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau beschreibt, aus welchen mechanischen Komponenten und mit welcher Struktur ein Roboter aufgebaut ist. Dies betrifft hauptsächlich die Art und die Anordnung der Bewegungsachsen. Dies wird als *Roboterkinematik* bezeichnet. Die wesentlichen mechanischen Eigenschaften eines Roboters sind dadurch bereits festgelegt.

Anforderungen und Kriterien

Industrieroboter führen entweder Transportaufgaben aus oder sie bearbeiten und analysieren Werkstücke und Maschinen. Daraus folgen die beiden prinzipiellen Bewegungsarten. Sie unterscheiden sich bezüglich Geschwindigkeit und Genauigkeit der Bewegungsbahn.

1. Transport

Beim Transport müssen große Entfernungen überbrückt werden, oft auch mit großen Traglasten. Beispiele dafür sind das Beladen von Paletten oder der Transport von Karosserieteilen in der Automobilfertigung. Angestrebt wird eine hohe Geschwindigkeit bei gleichzeitig geringem Verschleiß der Mechanik. Das exakte Einhalten eines vorgegebenen Bahnverlaufs wird in der Regel nicht gefordert, jedoch eine hohe Genauigkeit der Position am Ende der Bewegungsbahn.

2. Bearbeitung

Bei einem Bearbeitungsprozess muss ein Werkzeug mit hoher Bahngenauigkeit und gleichbleibender Geschwindigkeit bezüglich eines Werkstücks bewegt werden. Die Genauigkeitsanforderungen haben Vorrang gegenüber einer hohen Geschwindigkeit. Typische Beispiele sind das Schweißen von Nähten oder das Schneiden von Blechen.

Die dritte denkbare Bewegungsvariante – bahngenau und schnell – kommt nur selten vor, z. B. beim Laserstrahlschneiden. Dabei spielen dann die Massen von Roboter und Traglast und ihre räumliche Verteilung eine große Rolle.

Eine weitere wichtige Eigenschaft, bedingt durch die Mechanik, ist der Arbeitsraum des Roboters. Dieser Begriff bezieht sich nicht nur auf die Raumkoordinaten, die angefahren werden können, sondern auch auf die Orientierung, die räumliche Ausrichtung des Werkzeugs oder Greifers. Die Anforderungen an den verfügbaren Arbeitsraum sind eine Folge von Größe und Form des zu bearbeitenden Werkstücks. Dazu zählen nicht nur die äußeren Abmessungen, sondern auch die Form der Innenräume, beispielsweise bei einer Autokarosserie. Zusammengefasst sind die folgenden Parameter für die Gestaltung der Mechanik, einschließlich Antriebssystem, ausschlaggebend:

- Arbeitsraum,
- Traglast,
- Genauigkeit,
- Geschwindigkeit/Beschleunigung.

Ein Blick in die Prospekte der Roboterhersteller zeigt, welche Lösungswege gegangen worden sind. Die Parameter Genauigkeit und Arbeitsraum werden hauptsächlich durch Art, Anzahl und Anordnung der Bewegungsachsen bestimmt. Beim Begriff Genauigkeiten müssen drei Arten unterschieden werden:

- Wiederholgenauigkeit

Die Wiederholgenauigkeit beschreibt, wie genau ein Punkt im Raum bei Wiederholungen angefahren wird. Sie wird beeinträchtigt durch nicht-deterministische, wahrscheinlichkeitsbehaftete Prozesse, z. B. hervorgerufen durch Reibung und Getriebeispiel. Die Wiederholgenauigkeit ist vor allem ein Qualitätsmerkmal der Mechanik.

- absolute Genauigkeit

Die absolute Genauigkeit definiert, wie genau der durch ein Bewegungsprogramm numerisch vorgegebene Zielpunkt in Wirklichkeit erreicht wird. Eine hohe absolute Genauigkeit wird verfehlt, wenn das mathematische Steuerungsmodell nicht alle wesentlichen mechanischen Effekte berücksichtigt. Ein Beispiel dafür ist die Getriebeelastizität. Sie führt dazu, dass ein Roboterarm bei hoher Traglast etwas absinkt.

- Bahngenauigkeit

Die beiden ersten Arten von Genauigkeit beziehen sich auf den ruhenden Roboter. Die Bahngenauigkeit beschreibt, wie genau die durch das Anwendungsprogramm vorgegebene Bahnkurve ausgeführt wird. Dazu braucht es leistungsstarke Antriebe, um die dynamischen Kräfte, hervorgerufen durch Beschleunigung, zu kompensieren. Weiter sind hoch entwickelte Regelungsverfahren erforderlich, um während der Bewegung die Abweichung zwischen Soll- und Istwert klein zu halten. Schließlich müssen die Sollwerte für die Achsen durch einen kleinen Interpolationstakt in möglichst kurzen Zeitabständen vorgegeben werden.



Hinweis – Regelung

Die Regelung ist ein wichtiger Teil der Signalverarbeitung in Maschinen. In Bild 1.2 ist ein einfacher, einschleifiger Regelkreis dargestellt, der das Prinzip aufzeigt. Ein Istwert x wird kontinuierlich mit einem Sollwert w verglichen. Die resultierende Abweichung x_w ist die Eingangsgröße für den Regler, der das dynamische Regelungsmodell enthält. Der Ausgang ist die Stellgröße y , welche die Regelstrecke beeinflusst, z.B. einen elektrischen Motor mit Getriebe und angeflanschter Mechanik.

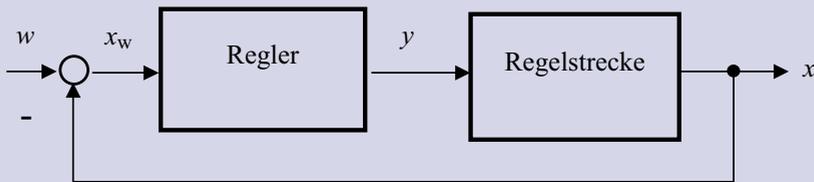


Bild 1.2 Einschleifiger Regelkreis

In der Praxis werden zwei Arten von Bewegungsachsen eingesetzt:

1. Drehachse

Die Lager und Getriebe von Drehachsen können hochgenau gefertigt werden. Diese Achsen haben deshalb eine hohe Wiederholgenauigkeit.

2. Schubachse

Schubachsen verfahren linear und können für einen großen Arbeitsraum, weit über 10 m hinaus, gefertigt werden. Die Wiederholgenauigkeit ist schlechter als bei einer Drehachse. Jedoch ergibt sich bei geradlinigen Bahnen ein Vorteil bezüglich der Bahngenauigkeit.



Hinweis – Begriffe Achse/Gelenk

Die Begriffe *Achse* und *Gelenk* werden synonym verwendet.

Die zulässige Traglast und Geschwindigkeit hängen von den auftretenden und beherrschbaren Kräften und Drehmomenten ab. Für hohe Ansprüche braucht es massearme und dennoch feste Konstruktionen, leistungsstarke Antriebe und hoch entwickelte Regelungs- und Steuerungsverfahren.

Drei Hauptklassen von Robotern haben sich herausgeschält. Das entscheidende Kriterium ist die Ausgestaltung der *Grundachsen*. Die Achsen der Roboterhand, die *Nebenachsen*, spielen bei dieser Betrachtung keine große Rolle. Auf ihre Realisierung mit den beiden Varianten *Zentralhand* und *Winkelhand* wird am Ende dieses Unterkapitels eingegangen.

1. Gelenkarmroboter

Der Gelenkarmroboter (Bild 1.3, Bild 1.4) ist ausschließlich mit Drehachsen ausgestattet. Dadurch ist er schnell und genau.

2. Portalroboter

Der Portalroboter (Bild 1.5) hat nur lineare Schubachsen, die rechtwinklig zu einander angeordnet sind. Dies ermöglicht einen besonders großen Arbeitsraum und hohe Traglasten.

3. SCARA-Roboter

Der SCARA-Roboter⁶ (Bild 1.6) besitzt zwei Dreh- und eine Schubachse. Er ist schnell, genau und eignet sich besonders gut für die Montage.

Als weitere Roboterklasse haben sogenannte *parallele Roboter* eine gewisse Bedeutung erlangt. Die Bewegungsachsen sind parallel angeordnet (Bild 1.8). Da aufgrund der besonderen Konstruktion die zu bewegenden Massen gering sind, ist die Beschleunigung besonders hoch und deshalb die Ausführungszeit niedrig. Der wichtigste Vertreter ist der *Delta-Roboter*.

Gelenkarmroboter

Der Gelenkarmroboter ist der Universalroboter schlechthin und hat die mit Abstand größte Verbreitung. Dieser Robotertyp weist nur Drehgelenke auf. Der Arm ist mit einem Schulter- und Ellbogengelenk ausgestattet und wird deshalb auch als *Knickarm* bezeichnet. In der häufigsten Ausprägung verfährt der Arm in einer vertikalen Ebene. Montiert ist er auf einer weiteren Drehachse, die ihn parallel zur Grundebene bewegt. Sein Arbeitsraum ist näherungsweise kugelförmig. Um ihn zu vergrößern, kann der Roboter auf einer Schiene oder an einem großen Portalroboter montiert werden. Bild 1.3 zeigt einen sehr großen Roboter mit mehr als 1000 kg Traglast, der somit eine ganze Autokarosse handhaben kann. In Bild 1.4 ist ein kleinerer Gelenkarmroboter mit 8 kg Traglast dargestellt, der auf den Einsatz in Schweißzellen ausgerichtet ist.

Da nur Drehachsen vorhanden sind, ist die Wiederholgenauigkeit dieses Robotertyps sehr hoch, typischerweise bis 0.1 mm. Es fällt auf, dass die Motoren für die Handachsen am Ellbogengelenk und damit nahe an der Mittelachse des Roboters angebracht sind. Dadurch ergeben sich ein niedriges Trägheitsmoment⁷, hohe Beschleunigungen und kurze Verfahrszeiten. Bei größeren Robotern braucht es einen *Gewichtsausgleich*. Durch Federn oder hydraulische Systeme wird das Eigengewicht des Arms kompensiert. Damit werden die durch die Antriebe aufzubringenden Drehmomente und dadurch die benötigte Leistung reduziert.

⁶) Abkürzung für Selective Compliance Assembly Robot Arm

⁷) Das Trägheitsmoment beschreibt die Wirkung einer Masse bei einer Drehbewegung.