

Wolfgang Weber
Heiko Koch

Industrieroboter

Methoden der Steuerung und Regelung



5., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Weber/Koch
Industrieroboter



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Wolfgang Weber
Heiko Koch

Industrieroboter

Methoden der Steuerung und Regelung

5., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Weber, Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt/Hochschule Darmstadt

Dr.-Ing. Heiko Koch, Hochschule Darmstadt

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt 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 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, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor 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 also 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 benützt 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, 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

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

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

Titelmotiv: © gettyimages.de/Prapass Pulsub

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46869-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46870-2

Inhalt

Vorwort zur 1. Auflage	IX
Vorwort zur 5. Auflage	XIII
1 Komponenten eines Industrieroboters	1
1.1 Definition und Einsatzgebiete von Industrierobotern	1
1.2 Mechanischer Aufbau	3
1.3 Steuerung und Programmierung	7
1.4 Struktur und Aufgaben der Regelung	9
1.5 Neuere Einsatzfelder und Konzepte der Industrierobotik	13
2 Beschreibung einer Roboterstellung	17
2.1 Grundlagen der Lagebeschreibung	17
2.1.1 Koordinatensysteme	17
2.1.2 Freie Vektoren	17
2.1.3 Operationen mit Vektoren	19
2.1.4 Ortsvektoren	21
2.1.5 Anordnung von Elementen in Vektoren und Matrizen	22
2.1.6 Rotationsmatrizen	22
2.1.7 Homogene Matrizen (Frames)	25
2.1.8 Beschreibung der Orientierung durch Euler-Winkel	27
2.1.9 Roll-Pitch-Yaw-Winkel	31
2.1.10 Beschreibung der Orientierung durch Drehvektor und Drehwinkel	32
2.1.11 Freiheitsgrad des Robotereffektors	35
2.1.12 Differenzieren von Vektoren in bewegten Koordinatensystemen	36
2.2 Die Denavit-Hartenberg-Konvention für Industrieroboter	38
2.2.1 Der Industrieroboter mit offener kinematischer Kette	38
2.2.2 Koordinatensysteme und kinematische Parameter nach der Denavit-Hartenberg-Konvention	39
2.2.3 Rotationsmatrizen und homogene Matrizen auf Basis der Denavit-Hartenberg-Parameter	45
2.3 Übungsaufgaben	47

3	Transformationen zwischen Roboter- und Weltkoordinaten ...	49
3.1	Die Vorwärtstransformation	50
3.2	Die Rückwärtstransformation	51
3.2.1	Mehrdeutigkeiten und Singularitäten	51
3.2.2	Lösungsvoraussetzungen und Lösungsansätze	52
3.2.3	Rückwärtstransformation an einem Zweigelenkroboter	52
3.2.4	Rückwärtstransformation an einem SCARA-Roboter	54
3.2.5	Geometrische Rückwärtstransformation für den R6-Knickarmroboter	56
3.3	Kinematische Transformationen mit der Jacobi-Matrix	62
3.3.1	Die Jacobi-Matrix in der Robotik	62
3.3.2	Rückwärtstransformation auf Basis der inversen Jacobi-Matrix	66
3.3.3	Rückwärtstransformation mit der transponierten Jacobi-Matrix	67
3.4	Übungsaufgaben	68
4	Bewegungsart und Interpolation	69
4.1	Übersicht zu den Steuerungsarten	69
4.2	PTP-Bahn und Interpolationsarten	71
4.2.1	Prinzipieller Ablauf der PTP-Steuerung	71
4.2.2	Rampenprofil zur Interpolation	73
4.2.3	Sinoidenprofil zur Interpolation	75
4.2.4	Anpassung an die Interpolationsschrittweite	77
4.2.5	Synchrone PTP	79
4.2.6	Vollsynchrone PTP	80
4.2.7	Beispiel für eine PTP-Bahn	81
4.3	Bahnsteuerung (CP-Steuerung)	83
4.3.1	Prinzipieller Ablauf der Bahnsteuerung	83
4.3.2	Linearinterpolation	84
4.3.3	Zirkularinterpolation	87
4.3.4	Beispiel für eine CP-Bahn	93
4.4	Durchfahren von Zwischenstellungen ohne Stillstand der Achsen	94
4.4.1	PTP-Überschleifen	94
4.4.2	CP-Überschleifen	96
4.4.3	Spline-Interpolation für PTP-Bahn	97
4.4.4	Spline-Interpolation in kartesischen Koordinaten	100
4.5	Übungsaufgaben	104
5	Roboterprogrammierung	107
5.1	Online-Roboterprogrammierung	108
5.1.1	Teach-In-Programmierung	108
5.1.2	Play-Back-Programmierung	110
5.1.3	Master-Slave-Programmierung	111
5.2	Offline-Programmierung	112
5.2.1	Textuelle Programmierung in einer problemorientierten Programmiersprache	113

5.2.2	Grafisch interaktive/CAD-basierte Programmierung	113
5.2.3	Aufgabenorientierte Programmierung	114
5.3	Roboterprogrammiersprachen	116
5.3.1	Sprachelemente von Roboterprogrammiersprachen	117
5.3.2	Programmbeispiel	119
5.4	Programmierunterstützung durch grafische Simulation	122
5.5	Vergleich der verschiedenen Programmierarten	124
5.6	Übungsaufgaben	125
6	Modell der Dynamik	127
6.1	Modell der Dynamik einer Gelenkachse	127
6.1.1	Modell der Mechanik eines Gelenks/Armteils	127
6.1.2	Modell des Antriebsmotors und der Servoelektronik	129
6.1.3	Modell des ideal angenommenen Antriebsstrangs eines Gelenks	131
6.1.4	Gesamtmodell einer Einzelachse bei ideal angenommenem Antriebsstrang	132
6.2	Modell der Mechanik eines Roboterarms mit dem rekursiven Newton-Euler-Verfahren	133
6.2.1	Kinematische Berechnungen	134
6.2.2	Rekursive Berechnung der Gelenkkräfte bzw. -drehmomente	138
6.2.3	Anfangswerte für die rekursiven Berechnungen	140
6.2.4	Geeignete Darstellung der Vektoren und Zusammenfassung	141
6.2.5	Einfache Beispiele zum Newton-Euler-Verfahren	143
6.2.6	Explizite Berechnung einzelner Komponenten der Bewegungsgleichung	147
6.3	Gesamtmodell der Regelstrecke	152
6.3.1	Modell der Antriebsmotoren und Servoelektronik aller Gelenke	152
6.3.2	Zusammenfassung der Modellgleichungen	154
6.4	Übungsaufgaben	155
7	Regelung	159
7.1	Aufgaben und prinzipielle Strukturen	159
7.2	Dezentrale Gelenkregelung in Kaskadenstruktur	163
7.2.1	Übersicht und Regelstrecke	163
7.2.2	Geschwindigkeitsregelung mit PI-Regler	165
7.2.3	ReDuS-Geschwindigkeitsregler	168
7.2.4	Entwurf des Lagereglers	171
7.2.5	Beispiel für eine dezentrale Lageregelung	177
7.2.6	Hinweise zur Realisierung	181
7.3	Adaptive Einzelgelenkregelungen	182
7.4	Modellbasierte Regelungskonzepte	185
7.4.1	Zentrale Vorsteuerung	186
7.4.2	Entkopplung und Linearisierung	188
7.4.3	Modellbasierte Regelung mit PID-Strukturen	191
7.4.4	Robuste Regelung durch vorgegebenes Verzögerungsverhalten	193

7.4.5	Modellbasierte Lageregelung mit Kaskadenstruktur	196
7.4.6	Hinweise zur Realisierung modellbasierter Gelenkregelungen ..	197
7.4.7	Modellbasierte Lageregelung in kartesischen Koordinaten	198
7.4.8	Beispiel für eine modellbasierte Regelung	200
7.5	Nichtanalytische Regelungsverfahren	202
7.5.1	Fuzzy-Regelungen	202
7.5.2	Neuronale Lernverfahren in der Gelenkregelung	204
7.6	Strukturen von Kraftregelungen	207
7.7	Bildgestützte Regelung	209
7.7.1	Strukturen von Visual Servoing	210
7.7.2	Bildverarbeitung	213
7.7.3	Kameramodell	214
7.7.4	Gelenkbewegungen aus Bildinformationen	216
7.7.5	Visual Servoing mit modellbasierter Gelenkregelung	219
7.8	Externe hybride Regelungskonzepte	220
7.9	Übungsaufgaben	221
Anhang		225
A	Einige Definitionen und Rechenregeln für Matrizen	225
B	Aufstellen der Jacobi-Matrix	229
B1	Beschreibung der Bewegung des Effektors in Abhängigkeit von den relativen Geschwindigkeiten der Armeile	229
B2	Berechnung durch Anwendung der kinematischen Gleichungen des Newton-Euler Verfahrens	231
C	Modellbildung und Simulation der statischen Reibung	233
C1	Statische Reibung bei einem Einzelgelenk	233
C2	Statische Reibung beim Roboterarm	235
D	ManDy: Programmier-, Simulations- und Visualisierungswerkzeug ...	237
E	Weitere Simulationswerkzeuge	240
E1	PTP- und CP-Interpolation für einen planaren Zweigenkroboter	240
E2	Spline-Interpolation	241
E3	Newton-Euler-Verfahren für Zweigenkroboter	241
E4	Simulation einer Eingelenkregelung	243
Hinweise zur Internetseite		244
Literatur		245
Formelzeichen		253
Index		257

Vorwort zur 1. Auflage

Die Robotik als interdisziplinäres Gebiet

Roboter werden mit intelligenten Maschinen in Verbindung gebracht, die komplexe Arbeiten ähnlich dem Menschen zielgerichtet ausführen können. Die dabei angenommenen Möglichkeiten machen die Anziehungskraft und Faszination der Robotik aus. Der „Roboter“ ist deshalb auch ein gesellschaftliches und kulturelles Objekt geworden. Neben der Diskussion um die Gentechnik dient die Robotertechnik als Bezugspunkt, um Möglichkeiten und Gefahren von aktuellen und zukünftigen technischen Entwicklungen zu diskutieren. In den eher nüchternen technischen Wissenschaften ist der Roboter ein beliebtes Testobjekt, um fortgeschrittene Verfahren der Steuerung, Regelung, Sensorik, künstlicher Intelligenz etc. anzuwenden.

Dieses Buch konzentriert sich auf die Industrierobotertechnik, die innerhalb der Robotik die größte ökonomische Bedeutung zu verzeichnen hat und Ausgangspunkt für neue Anwendungen z. B. in der Medizintechnik und im Servicebereich ist. Aber auch ein Industrierobotersystem selbst ist ein technisches Produkt, das nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit vieler Fachdisziplinen entstehen kann. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit können Mechanik, Maschinenbau, Elektrotechnik, Antriebstechnik, Informationsverarbeitung und Informatik, Mathematik, Regelungstechnik, Sensortechnik, Expertensysteme und künstliche Intelligenz genannt werden. Weiterhin ist zu bedenken, dass ein Industrieroboter beim Einsatz im industriellen Umfeld nur ein Teilsystem eines komplexen Fertigungsumfeldes ist und entsprechend mit anderen Industrierobotern und Automatisierungsrichtungen zusammenarbeiten und mit Leitsystemen kommunizieren muss. Aus diesem Grunde wird die Robotertechnik auch von der Fertigungsplanung, Arbeitswissenschaft und betriebswirtschaftlichen Aspekten beeinflusst. Nicht zuletzt steht der Industrieroboter als markantes Rationalisierungsinstrument der Automatisierungstechnik im Zusammenhang mit einer sozialverträglichen Technikgestaltung in der Diskussion.

Schwerpunkt und Interessentenkreis des Buches

Wer sich in die Robotertechnik einarbeiten will, steht somit vor einem sehr umfangreichen und interdisziplinären Gebiet. In der Industrierobotertechnik werden vielseitig einsetzbare, leistungsfähige Komponenten der technischen Fachdisziplinen genutzt, um eine kostengünstige, hochflexible Maschine „Roboter“ zu entwickeln. Schwerpunkt des Buches sind deshalb diejenigen Methoden der Kinematik, Dynamik und Regelung, die es auf der Basis dieser Komponenten ermöglichen, eine funktionsfähige Steuerung zu entwickeln und effektiv einzusetzen. Bei diesem mechatronischen Ansatz stehen Lagebeschreibung, Bewegungssteuerung, Programmierung, Beschreibung der Dynamik und Bewegungsregelung im Vordergrund. Kenntnisse der Bewegungsbeschreibung und Programmierung sind auch Voraussetzung, um sich in spezielle Teilbereiche der Robotik wie Sensorik,

Bildverarbeitung, fortgeschrittene Methoden der Programmierung, kooperative Roboter, Kollisionsvermeidung, künstliche Intelligenz und autonomes Verhalten einzuarbeiten.

Ausgehend von diesem Ansatz richtet sich das Buch an einen breiten Leserkreis. Studenten technischer Fachrichtungen und der Informatik an Universitäten und Fachhochschulen, die sich im Rahmen des Hauptstudiums mit der Robotertechnik beschäftigen, bietet das Buch einen Grundkurs in die Bewegungsbeschreibung, Programmierung und Regelung von Industrierobotern.

Für die wachsende Zahl von Ingenieuren, die sich mit der Anwendung von Industrierobotern beschäftigen, werden die benötigten Grundkenntnisse in der Bewegungsbeschreibung vermittelt, um einen Industrieroboter oder andere Mehrachsgeräte geeignet zu programmieren und damit effektiv einzusetzen. Die Leistungsfähigkeit der Steuerungshardware nimmt bei sinkenden Kosten zu. Dies eröffnet die Möglichkeit, auch außerhalb von Forschungslabors fortgeschrittene Regelungsalgorithmen zu entwickeln, zu erproben und einzusetzen. Den Ingenieuren in der Praxis, die diese Aufgaben angehen, bietet das Buch einen effizienten Zugang und Anregungen zur Modellbildung und zum Regelungsentwurf.

Erfahrungsgemäß bilden die mathematischen Methoden der Steuerung und Regelung die größten Hemmschwellen, wenn man sich als Ingenieurstudent/in mit der Robotertechnik befasst oder sich als Ingenieur/in in der Praxis neuen Methoden der Steuerung und Regelung zuwendet. Das Buch führt deshalb schrittweise mit einfachen, anwendungsnahen Beispielen in die unbedingt notwendige Mathematik der Steuerung und Regelung ein, damit die mathematischen Methoden schon bei der Einführung unmittelbar mit der Anwendung im Zusammenhang stehen. Die Methoden zur Steuerung und Regelung werden im Gegensatz zu anderen Lehrbüchern zuerst an einem Eingelenkarm und „Robotern“ mit zwei Gelenken eingeführt, bevor sie auf handelsübliche Industrieroboter angewandt werden. Die angebotenen Aufgaben können zumeist mit Matlab gelöst werden. Die beiliegende CD enthält Lösungsbeispiele und Programme und das in Matlab geschriebene Entwicklungs- und Visualisierungswerkzeug RoCSy. Mit einer menügesteuerten einfachen Programmiersprache ist es in RoCSy möglich, Bewegungen des Industrieroboters RV6 von Reis vorzugeben und im dreidimensionalen Raum mit einem Vollkörpermodell zu visualisieren. Auch die Simulation und grafische Darstellung des Regelungsverhaltens bei Einsatz konventioneller und fortgeschrittener Regelungsmethoden ist in RoCSy enthalten.

Zum Inhalt

Kapitel 1 gibt einen Überblick über einige wesentliche Teilgebiete der Robotik. Der folgende Inhalt des Buches kann in zwei Teile aufgeteilt werden. Der erste Teil des Buches (Kapitel 2 bis Kapitel 5) beschäftigt sich mit der kinematischen Beschreibung und der Programmierung, der zweite Teil (Kapitel 6 und Kapitel 7) behandelt die Dynamik und Regelung.

In Kapitel 2 wird nach Einführung der unbedingt nötigen Grundkenntnisse über Vektoren und Matrizen der Nutzen von Rotationsmatrizen, homogenen Matrizen (Frames) und der Denavit-Hartenberg-Konvention bei der Lagebeschreibung von Industrierobotern aus einfachen Anwendungsbeispielen abgeleitet. Dabei wird der Zugang zur Denavit-Hartenberg-Konvention für Industrieroboter durch eine neue, ausführliche Formulierung erleichtert. Die in der Robotik wichtigen Transformationen zwischen Gelenkkoordinaten und kartesi-

schen Koordinaten werden in Kapitel 3 behandelt und exemplarisch an einem Zweigelenkroboter und am Knickarmroboter RV6 durchgeführt. Die wesentlichen Bewegungs- und Interpolationsarten erläutert Kapitel 4 ausführlich, während Kapitel 5 die Roboterprogrammierung zum Inhalt hat, die dazu dient, diese Bewegungsabläufe geeignet vorzugeben. Zur Übung und Visualisierung kann vom Leser die einfache Offline-Programmiersprache von RoCSy verwendet werden.

Im zweiten Teil des Buches wird in Kapitel 6 das Newton-Euler-Verfahren als für den Ingenieur zugänglichste und effizienteste Methode zur Beschreibung der Roboterdynamik behandelt. Dabei wird das Newton-Euler-Verfahren nicht wie gewöhnlich als anzuwendender Algorithmus gebracht, sondern auch für Ingenieure ohne fundierte Mechanikausbildung verständlich hergeleitet und an Beispielen erläutert. Elektrische Antriebssysteme mit antriebsnaher Servoelektronik und das Getriebe werden so weit beschrieben, wie es für die Gewinnung eines geeigneten Regelungsmodells notwendig ist und schließlich mit der Roboterarmdynamik in einfacher Weise zu einer Vektordifferentialgleichung zusammengefasst, die als Grundlage für den Regelungsentwurf (Kapitel 7) dient. Zuerst wird in Kapitel 7 die konventionelle Kaskadenregelung behandelt, die die gegenseitige Beeinflussung durch Stellung und Bewegung der Achsen nicht explizit in den Regelungsentwurf einbezieht. Vorteile und Grenzen solcher Einzelgelenkregelungen werden diskutiert. Eine leistungsfähige fortgeschrittene Regelung muss diese Verkopplungen bei der Ansteuerung der Antriebe berücksichtigen. Als erste Möglichkeit zur Verbesserung der Regelungsgüte wird das Prinzip adaptiver Gelenkregelungen betrachtet und ein spezielles Verfahren näher erläutert. Anschließend werden solche modellbasierten Regelungen behandelt, die das nichtlineare Modell der Dynamik direkt in die Regelungsalgorithmen einbeziehen und somit zu einer Entkopplung beitragen. Aus den vielfältigen Verfahren aus dieser Klasse von Regelungsverfahren werden diejenigen behandelt, die einen einfachen transparenten Entwurf ermöglichen. In diesem Zusammenhang wird zum ersten Mal in einem Lehrbuch eine modellbasierte Regelung vorgestellt, die mit der in der Praxis üblichen Kaskadenstruktur arbeitet. Anschließend werden Vorgehensweise und prinzipielle Strukturen der Fuzzy-Technik und neuronalen Netze erläutert und einige Anwendungen in der Roboterregelung skizziert. Zum Abschluss wird ein Überblick über Strukturen von Kraftregelungen gegeben.

Der Anhang enthält einige Definitionen und Rechenregeln für Matrizen sowie Hinweise zum Gebrauch der Simulationssoftware RoCSy und weiteren Matlab-Programmen zu Bahnberechnungen und Simulation. Voraussetzung zur Nutzung der Matlab-Programme auf der CD ist eine Studentenversion oder Vollversion von MATLAB 5. Die lauffähigen Programme in MATLAB 6 können auf Anfrage vom Autor erhalten werden.

Voraussetzungen und Möglichkeiten der Nutzung des Buches

Zum Verständnis der ersten fünf Kapitel werden nur geringe mathematische Kenntnisse aus Trigonometrie, Geometrie, Analysis, Differential- und Integralrechnung vorausgesetzt. Das Arbeiten mit Vektoren und Matrizen wird, soweit benötigt, schrittweise eingeführt oder ist kurzgefasst im Anhang zu finden. Ein Leser, der sich ausschließlich in die Bewegungsbeschreibung und Programmierung einarbeiten will, muss sich nicht mit den umfangreichen Kapiteln 6 und 7 beschäftigen. Zur Erarbeitung von Hintergrundwissen zu den Bewegungsbefehlen der Roboterprogrammierung genügen aus Kapitel 3 die Prinzipien der kinematischen Transformationen.

Kapitel 6 führt in die Kinematik und Dynamik eines Industrieroboterarms als Mehrkörpersystem ein, wobei das Antriebssystem in das mathematische Modell einbezogen wird. Auf der Basis dieser Beschreibung werden in Kapitel 7 verschiedene Regelungsverfahren behandelt. Zum Studium dieser beiden Kapitel sollten grundlegende Kenntnisse der Kinematik und Dynamik und der Regelungstechnik vorhanden sein, wie sie in den ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen an den Hochschulen gelehrt werden.

Danksagung

Ein solches Buch kann nur aus der intensiven Beschäftigung und kritischen Auseinandersetzung mit dem Thema entstehen. In diesem Sinne haben Kolleginnen und Kollegen aus dem beruflichen Umfeld und Studierende zur Entstehung des Buches beigetragen. So möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Günter Trautmann, Herrn Jens Meyer und den Studierenden und Diplomanden bedanken, die mitgeholfen haben, die Simulationsumgebung RoCSy zu entwickeln. Meinem Kollegen Herrn Prof. Dr. Friedrich Münter danke ich herzlich für die sorgfältige Durchsicht von Teilen des Manuskripts, Frau Dipl.-Ing. Erika Hotho vom Hanser Verlag für die gute Zusammenarbeit und die aufgebrachte Geduld. Voraussetzung ist auch die Förderung der Lehre und von Projekten im Bereich der Robotertechnik an der Fachhochschule Darmstadt durch die Hochschulleitung und die beteiligten Fachbereiche. Herzlich danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Stefan Anton von der Fa. EASY-ROB™ für die Überlassung und Hilfe bei der Integration seiner Visualisierungssoftware in die Entwicklungsumgebung RoCSy. Die Firmen Reis Robotics GmbH, KUKA Roboter GmbH, Hirata Robotics GmbH, Bosch GmbH und imt Peter Nagler GmbH haben mir freundlicherweise werkseigenes Bildmaterial zur Verfügung gestellt. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Meine Familie hat durch ihr entgegengebrachtes Verständnis für die zusätzliche Arbeit wesentlich zum Gelingen des Buches beigetragen.

Darmstadt, März 2002

Wolfgang Weber

Vorwort zur 5. Auflage

Die 5., aktualisierte und erweiterte Auflage hält an dem Ziel fest, ein handliches und leicht verständliches Werk für Studierende und Praktiker bereitzustellen, das sowohl Grundlagen als auch spezielle Gebiete der Steuerung und Regelung behandelt.

Die Auflage zeichnet sich im Besonderen dadurch aus, dass Dr.-Ing. Heiko Koch als Co-Autor hinzugewonnen wurde. Neben verschiedenen Aktualisierungen und Ergänzungen hat er eine Einführung in die immer umfangreicher in der Praxis eingesetzte bildgestützte Regelung beigesteuert.

In Kapitel 2 wurde die Orientierungsbeschreibung durch Roll-Pitch-Yaw-Winkel (Roll-Nick-Gier-Winkel) aufgenommen. Die Rückwärtstransformation für einen SCARA-Roboter mit verschiedenen Methoden wurde in Kapitel 3 ergänzt. Zusätzlich zu den kubischen Splines werden in Kapitel 4 nun auch die quintischen Splines (Splines 5. Ordnung) behandelt. In Kapitel 5 wurde ein weiteres Beispiel zur Programmierung von Industrierobotern in der Sprache RAPID formuliert. In Kapitel 6 wurde explizit die Beziehung zwischen Denavit-Hartenberg-Parametern und kinematischen Angaben beim rekursiven Newton-Euler-Verfahren aufgeführt. Wie eingangs erwähnt, enthält Kapitel 7 neben einigen Ergänzungen zur Gelenkregelung nun einen Abschnitt zur bildgestützten Regelung. Die Website zum Buch wird laufend aktualisiert.

Wir danken allen Firmen und Einrichtungen, die uns aktuelles Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben. Ebenso danken wir den Studierenden und Fachkolleg*innen, die Fehler gemeldet und konstruktive Vorschläge für die neue Auflage gemacht haben. Zu guter Letzt danken wir Frau Julia Stepp vom Carl Hanser Verlag für die angenehme und motivierende Zusammenarbeit bei der Vorbereitung der 5. Auflage.

Darmstadt, Oktober 2021

Wolfgang Weber, Heiko Koch

1

Komponenten eines Industrieroboters

■ 1.1 Definition und Einsatzgebiete von Industrierobotern

Der Begriff **Roboter** hat seinen Ursprung im tschechischen Wort „robota“ (arbeiten) und wurde zuerst 1921 im Bühnenstück „Rossums Universal Robot“ des tschechischen Schriftstellers Karl Capek verwendet, wobei die Roboter alle schweren Arbeiten verrichten, mit der Zeit jedoch zu rebellieren beginnen. Auch heute wird der Begriff Roboter immer wieder mit Anthropoiden, menschenähnlichen Maschinen, in Verbindung gebracht, denen neben der Fähigkeit Werkzeuge zu führen und mechanische Arbeit zu verrichten auch Charaktereigenschaften und vom Willen gesteuertes Handeln unterstellt werden.

Der Begriff „intelligenter Roboter“ wird verwendet, wenn der Roboter als wissensbasierter Agent aufgefasst wird, der mehr oder weniger „intelligent“ mit seiner Umgebung interagiert (/1.15/). In diesem Zusammenhang befassen sich auch Sozial- und Kulturwissenschaftler mit den Auswirkungen der Robotik, meist im Zusammenhang mit der Künstlichen Intelligenz, auf die gesellschaftliche Entwicklung (s. z. B. /1.2/, /1.7/).

Auch in technisch orientierten Kreisen wird zum Teil der Begriff Roboter weit gefasst. So werden z. B. Systeme, die etwas wahrnehmen, diese Information verarbeiten und dann entsprechend handeln, als Roboter bezeichnet. Unter solche weit gefassten Definitionen lassen sich autonome Fahrzeuge, mit Sensorik ausgerüstete Baumaschinen etc., aber auch einfachere Systeme einordnen.

In diesem Buch soll der Industrieroboter im Mittelpunkt stehen. Der Industrieroboter kann als Handhabungsgerät aufgefasst werden. Die **Handhabungstechnik** befasst sich mit technischen Einrichtungen, die Bewegungen in mehreren Bewegungsachsen im Raum ähnlich den Bewegungen des Menschen ausführen. Einteilung und Definition von **Handhabungsgeräten** weichen mehr oder weniger voneinander ab. In der VDI-Richtlinie 2860 wird Handhaben als „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern“ verstanden.

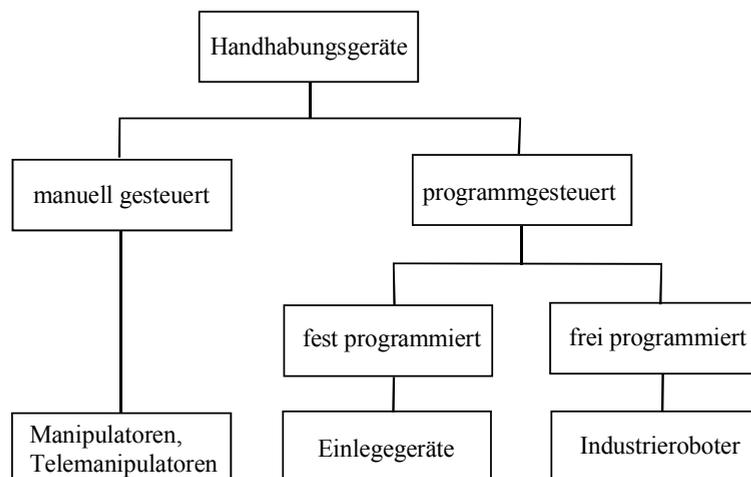


Bild 1.1 Einteilung von Handhabungsgeräten

Obwohl mit dem Industrieroboter vielfältige Bearbeitungsaufgaben wie Schweißen und Lackieren ausgeführt werden, wird er meist als spezielles Handhabungsgerät betrachtet. Bild 1.1 zeigt eine mögliche Einteilung. **Einlegegeräte** werden zum Zuführen und Entnehmen von Werkstücken eingesetzt. Sie haben wenige Achsen und erhalten Weginformationen über Endschalter. Mit diesen Geräten ist es nicht möglich, definierte Bahnen im Raum zu programmieren. Manipulatorsysteme dienen der Fernhantierung, sie haben die Entwicklung von Industrierobotern entscheidend beeinflusst. **Manipulatoren** werden durch menschliche Intelligenz gesteuert. Ein Operateur trifft Entscheidungen und gibt Bewegungen vor. Manuelle Geschicklichkeit, kognitive Fähigkeiten, komplexe Sensorik und Erfahrung des Menschen werden genutzt und vom technischen System unterstützt. Der Einsatz liegt hauptsächlich bei schwierigen, unerwarteten Hantierungsaufgaben in schwer zugänglichen, gesundheitsgefährdenden Umgebungen. Zur Steuerung des Arbeitsarms des Telemanipulatorsystems werden ähnlich aufgebaute Bedienarme, Joy-Sticks oder Ähnliches genutzt. **Telemanipulatoren** sind ferngesteuerte Manipulatoren, wobei der Bediener über ein Kamerasystem Informationen über die Arbeitsumgebung erhält. Oft sind jedoch auch Telemanipulatoren programmierbar oder die Telemanipulatortechnik wird zur Programmierung von Industrierobotern verwendet. Die VDI-Richtlinie 2860 definiert den **Industrieroboter** auf folgende Weise:

Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar (d. h. ohne mechanischen Eingriff vorzugeben bzw. änderbar) und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabe- oder andere Fertigungsaufgaben ausführen.

Etwas allgemeiner ist die Definition nach DIN EN ISO 8373. In Japan wird von der Japan Industrial Robot Association (JIRA) der Begriff Industrieroboter viel weiter gefasst (/1.8/). Bei einem Zahlenvergleich bez. des Einsatzes von Industrierobotern in verschiedenen Ländern ist deshalb Vorsicht geboten.

Der wesentliche Unterschied zu den anderen Handhabungsgeräten liegt in den Eigenschaften „frei programmierbar“ und „universell einsetzbar“. Der Industrieroboter hat aus ökonomischen Gründen dort sein Haupteinsatzgebiet, wo kürzere Produktzyklen, kleinere Serien und damit eine kostengünstige flexible Umrüstung gefordert sind. Wichtige Anwendungsgebiete sind Be- und Entladen, Schweißen, Entgraten, Lackieren, Montage, Vermessen. Aus der Industrieroboter- und Manipulatorstechnik entstanden auch verwandte Bereiche wie Roboter im Bauwesen, Anwendungen in der Medizintechnik, Serviceroboter für Dienstleistungen u. Ä.

Die Servicerobotertechnik stellt eine Verbindung zwischen der Manipulatorstechnik und der Industrierobotertechnik her. Ein Serviceroboter erbringt Dienstleistungen für den Menschen, er reagiert dabei direkt auf Anweisungen des Menschen wie ein Manipulator, führt aber auch Teilaufgaben automatisch und programmgeführt durch.

■ 1.2 Mechanischer Aufbau

Ein Industrieroboter hat die Aufgabe einen Effektor geeignet im Raum zu führen. Der **Effektor** kann ein Greifer, eine Messspitze, ein Bearbeitungswerkzeug etc. sein. Der Effektor ist dasjenige Teil des Roboterarms, welches mit der Umgebung in Kontakt tritt, um Werkstücke aufzunehmen, zu bearbeiten und vieles mehr. Ein charakteristischer Punkt des Effektors, z. B. die Werkzeugspitze, wird **Tool Center Point (TCP)** genannt. Der Roboter besteht aus mehreren Armteilen und Gelenken. Die Anordnung der Armteile und Gelenke bestimmt die kinematische Struktur. Man unterscheidet zwei Hauptklassen: Die serielle Kinematik und die Parallelkinematik.

Ein serieller Roboter besteht aus einer Aneinanderreihung von Armteilen, die durch **Gelenke (Achsen)** verbunden sind. Der **Effektor** kann als letztes Armteil aufgefasst werden. Die Bewegungsmöglichkeiten des Effektors sind im Wesentlichen durch die mechanische Konstruktion des Roboters bestimmt, d. h. durch die Größenverhältnisse der Armteile, den Typ und die Anordnung der Gelenke. Man spricht auch etwas ungenau von der **Roboterkinematik**. In Bild 1.2a ist ein Industrieroboter der Firma Stäubli Tec-Systems mit sechs rotatorischen Gelenken (Drehgelenken) abgebildet. Dieser häufig verwendete Typ wird als vertikaler **Knickarmroboter** bezeichnet und kann vielseitig eingesetzt werden.

Man unterteilt die Achsen eines Industrieroboters in Haupt- und Nebenachsen. Die **Hauptachsen** beeinflussen wesentlich die Position des TCP im Raum, während die **Nebenachsen** nur kleine Positionsänderungen hervorrufen aber hauptsächlich die Ausrichtung des Effektors, die Orientierung, bestimmen.



a) Knickarmroboter TX2-60

b) Stäubli SCARA TS2-60

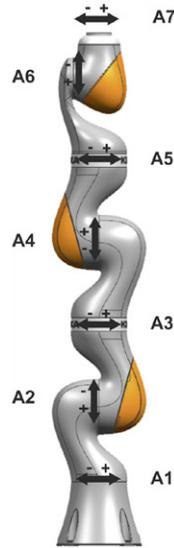
Bild 1.2 a) Knickarmroboter TX2-60 (Werkbild Stäubli), b) SCARA-Roboter TS2-60 von Stäubli (Werkbild Stäubli)

Ein Körper, der sich im Raum frei bewegen kann, hat den Freiheitsgrad 6. Nach der VDI-Richtlinie 2861 ist der **Freiheitsgrad f** die Anzahl der möglichen unabhängigen Bewegungen (Verschiebungen, Drehungen) eines starren Körpers gegenüber einem Bezugssystem. f entspricht der Anzahl der Angaben, die die Lage eines Körpers im Raum vollständig beschreibt. Die Lage des Effektors (Position und Orientierung), auch **Pose** in der Roboterliteratur genannt, kann durch drei Positionsangaben und drei Drehwinkel bezogen auf ein Bezugskoordinatensystem beschrieben werden (s. auch Abschnitt 2.1).

Der **Getriebefreiheitsgrad F** gibt an, wie viele unabhängig voneinander angetriebene Achsen zu einer eindeutigen Bewegung des Roboterarms führen. Durch eine geeignete Anordnung der Gelenke kann mit sechs Gelenkachsen ($F = 6$) dem Effektor der maximale Freiheitsgrad $f = 6$ verliehen werden. Dies ist bei den Knickarmrobotern mit sechs Achsen realisiert. In Sonderfällen werden Roboter mit mehr als sechs Achsen ($F > 6$) eingesetzt, sogenannte **redundante Kinematiken**, um die Feinbewegungen zu verbessern, was jedoch zu höheren Kosten verbunden mit einem größeren Steuerungsaufwand führt. Auch Zweiarmeroboter werden für spezielle Aufgaben eingesetzt. Bild 1.3a zeigt eine Lösung der Fa. YASKAWA Europe GmbH mit insgesamt 15 Gelenken. Ein solches Zweiarmsystem eignet sich für eine flexible und platzsparende Montage, wobei zusätzlich Haltevorrichtungen eingespart werden können. Während die typischen Industrieroboter ein Verhältnis der Lastmasse zur Eigenmasse von 1 : 10 aufweisen, sind Leichtbauroboter auf dem Markt, die ein Verhältnis der Lastmasse zur Eigenmasse von ca. 1 : 2 aufweisen. Bild 1.3b zeigt den Leichtbauroboter iiwa von KUKA, der sieben Drehgelenke hat. Die Vorarbeiten zu diesem Roboter wurden vom Institut für Mechatronik und Roboter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) geleistet. Die notwendige Steifigkeit wird durch fortgeschrittene Regelungsalgorithmen erreicht, die auch auf zusätzliche Sensorwerte, z. B. die Gelenkbeschleunigung, zugreifen können.



a) SDA200



b) Leichtbauroboter iwa

Bild 1.3 a) Zweiarmroboter SDA20F (Werkbild YASKAWA), b) Leichtbauroboter iwa (Werkbild KUKA Roboter GmbH)

Roboter mit weniger als sechs Achsen führen zu einem Freiheitsgrad von $f < 6$. Ein wichtiger Vertreter dieser Klasse ist der **SCARA-Roboter**, auch **Schwenkarmroboter** genannt. SCARA ist die Abkürzung für „Selective Compliance Assembly Robot Arm“. Bild 1.2b zeigt den SCARA TS60 der Fa. Stäubli. Dieser Typ eines seriellen Roboters eignet sich für Arbeiten, die in einer Ebene stattfinden, z.B. Bohren, Lötunkte auf einer Platine setzen, bestimmte Montage- und Handhabungsvorgänge. Die ersten zwei rotatorischen Gelenke dienen zur Positionierung in einer Ebene, die dritte Achse ist eine Translationsachse, die zur Höhenverstellung dient, z.B. Senken und Anheben beim Bohrvorgang, und die vierte Achse ist wieder eine Drehachse (s. auch Bild 2.19b). Im Arbeitsbereich kann eine beliebige Position des TCP angefahren werden, aber die Werkzeugspitze zeigt stets auf die Bearbeitungsebene. Die Orientierung des Effektors kann nur durch Drehung um die Längsachse verändert werden, der Freiheitsgrad des Effektors ist $f = F = 4$.

Weitere wichtige geometrische Kenngrößen beziehen sich auf den von bewegten Teilen des Roboters erreichbaren Raum. Nach DIN 2861, Blatt 1, wird unter **Arbeitsraum** derjenige Raumbereich verstanden, der vom Mittelpunkt der Schnittstelle zwischen den Nebenachsen und dem Effektor mit der Gesamtheit aller Achsbewegungen erreicht werden kann. In Bild 1.4 sind die Arbeitsräume eines Vertikalknickarmroboters und eines SCARA-Roboters skizziert. Die vollständigen Kennzeichnungen der Raumaufteilung sind in DIN 2861, Blatt 1, zu finden. Oft wird unter Arbeitsraum auch der Raumbereich verstanden, der mit dem TCP erreicht werden kann („**reachable workspace**“, /1.12/). Derjenige Raumbereich, bei dem zusätzlich zur Positionierung des TCP auch die Orientierung des Effektors frei gewählt werden kann, ist dann ein Teilraum des Arbeitsraums („**dexterous workspace**“, /1.12/).

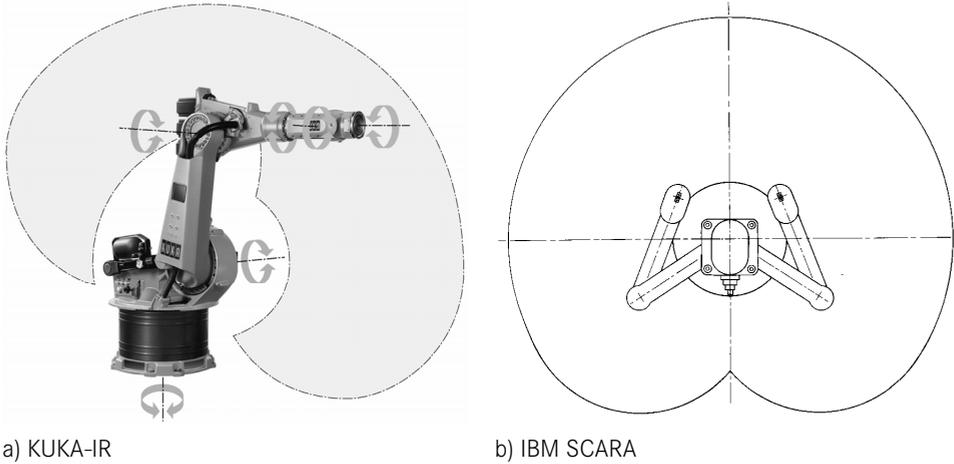


Bild 1.4 a) Arbeitsraum eines KUKA Knickarmroboters (Werkbild KUKA Roboter GmbH),
b) Arbeitsraum eines IBM SCARA-Roboters (Werkbild IBM)

Die folgenden Abschnitte und Kapitel beziehen sich auf serielle kinematische Strukturen, die die größte Bedeutung haben. In Spezialgebieten werden auch **Parallelroboter** eingesetzt. Bei diesen Parallelkinematiken wirken mehrere Schub- oder Drehgelenke direkt auf den Effektor. Bild 1.5a zeigt den Hexapod PI-HexAntenna von Physik Instrumente (PI) mit 6 Schubgelenken. Bild 1.5b stellt einen sogenannten Delta-Roboter autonox 24 von MAJATronic GmbH mit vier rotatorischen Gelenken dar. Parallelroboter können den Effektor auf kleinstem Raum sehr schnell positionieren und orientieren, sie sind relativ steif und die bewegten Massen sind gering. Allerdings ist der Arbeitsraum relativ klein. Einsatzgebiete sind im Besonderen schnelle Handhabungsaufgaben, die oft mit einer Bildverarbeitung zur Lageerkennung der zu hantierenden Teile verknüpft ist. Es gibt Ansätze den Arbeitsraum durch Zusatzachsen oder durch mehrere Arme zu erweitern (z. B. Adept Quattro s650).

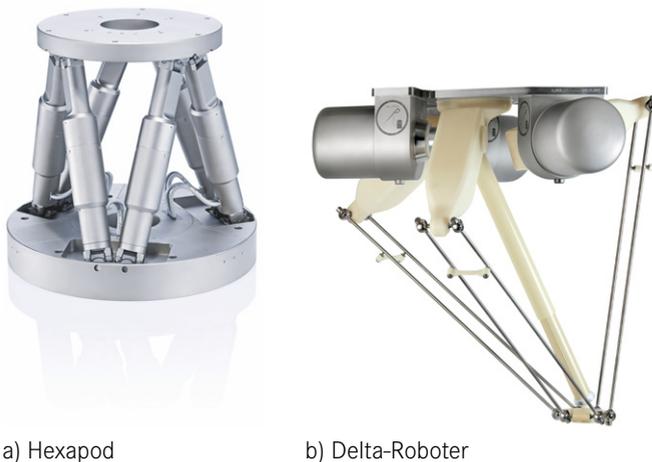


Bild 1.5 a) Hexapod
PI-HexAntenna (Werkbild
Physik Instrumente (PI)),
b) Delta-Roboter autonox 24
(Werkbild autonox GmbH)

■ 1.3 Steuerung und Programmierung

Robotermechanik, Robotersteuerung und Programmiersystem werden oft als Einheit verstanden und vom Hersteller geliefert. Bild 1.6 zeigt als Beispiel eine Übersicht über die Geräteausrüstung und die Schnittstellen für die PC-basierte Robotersteuerung KR C4 von KUKA Roboter GmbH. Bedienung, Anzeige, Dateiverwaltung, Abarbeitung des Roboterprogramms und die Bahnplanung werden auf dem PC (4) unter dem Betriebssystem Windows durchgeführt, ergänzt durch die Echtzeiterweiterung VxWorks. Neben der Programmierung mit dem Handprogrammiergerät (14) ist natürlich auch eine Offline-Programmierung in der Programmiersprache KRL (KUKA Robot Language) möglich. Weitere wichtige Komponenten sind das CSP (Control System Panel, 3), das als Anzeigeelement für den Betriebszustand dient und die CCU (Cabinet Control Unit, 9). Die CCU ist die zentrale Stromverteilungseinheit und Kommunikationsschnittstelle für alle Komponenten der Robotersteuerung. In 5, 6, 7 sind das Antriebsnetzteil und die Antriebsregler untergebracht. Das SIB/SIB-Extended (Safety Interface Board, 10) stellt sichere diskrete Ein- und Ausgänge zur Verfügung. Weitere Komponenten sind Netzfilter (1), Hauptschalter (2), Bremsenfilter (8), Akkus (12) und ein Anschlussfeld (13), das im Wesentlichen Anschlüsse für Motorleitungen und Datenleitungen von und zum Manipulator bereitstellt. Hier ist auch die Schnittstelle zum RDC (Resolver Digital Converter), der die Signale der Resolver zur Messung der Motorpositionsdaten aufbereitet und über den internen KUKA Controller Bus (KCP) den Antriebsreglern zuführt. Über eine entsprechende Konfiguration des KEB (KUKA Extension Bus) kann die Robotersteuerung über einen Bus (PROFIBUS, EtherCAT, DeviceNet) oder einer seriellen Schnittstelle mit anderen Steuerungen, z. B. mit einer SPS, kommunizieren.

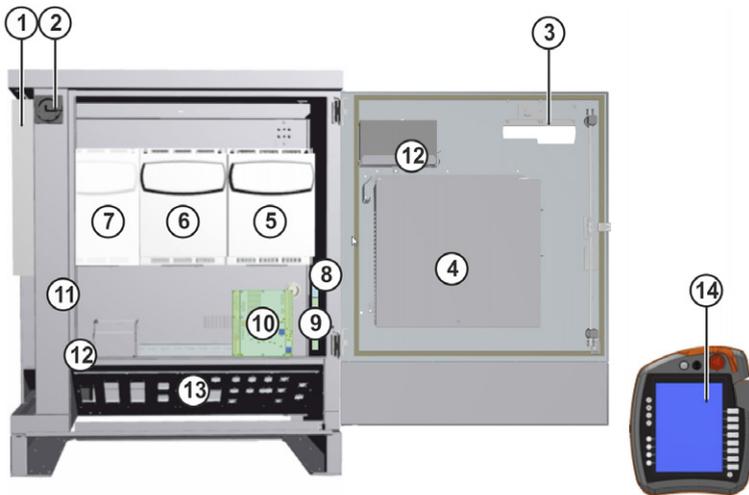


Bild 1.6 Gesamtübersicht über die Steuerung KR C4 (Werkbild KUKA Roboter GmbH)

Steuerung und Programmiersystem haben unterschiedliche Aufgaben (s. schematische Einteilung in Bild 1.7). Das **Programmiersystem** stellt dem Anwender Funktionen und Befehle bereit, um Bewegungsprogramme aufzustellen, zu korrigieren und zu testen.

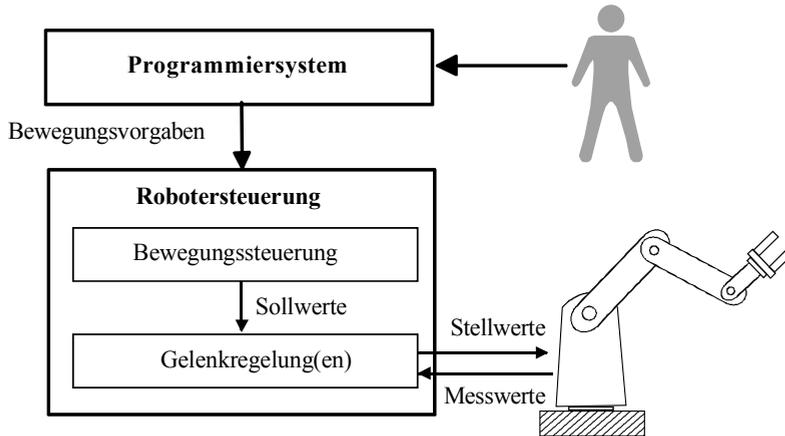


Bild 1.7 Hauptkomponenten Programmiersystem und Steuerung

Zusätzlich kann festgelegt werden, wie die Bewegungsabläufe in Abhängigkeit peripherer Ereignisse abgearbeitet werden sollen. Ergänzend stehen Softwarehilfsmittel zum Ein- und Auslesen, zum Archivieren und Dokumentieren von Programmen, zur Visualisierung der Roboterbewegung etc. zur Verfügung (s. Kapitel 5). Das Programmiersystem ist ein wesentlicher Teil der Schnittstelle zwischen dem Anwender und dem Industrieroboter (**HMI – Human Machine Interface**). Es ermöglicht dem Anwender erst, die in der Steuerung enthaltenen Algorithmen zur Interpolation zu nutzen. Wie bei anderen hochentwickelten Maschinen sind die Eigenschaften des HMI ein wichtiges Entscheidungskriterium für den Einsatz von Industrierobotern, da eine der Anwendung entsprechende, einfache, flexible Programmierung und damit Nutzung des Industrierobotersystems aus Kostengründen wesentlich ist. In neueren Entwicklungen wird eine Steuerungssoftware für mehrere Roboterarme bereitgestellt (z. B. Steuerung IRC5 von ABB). Dies fördert die koordinierte Zusammenarbeit mehrerer Roboter an einer Aufgabe (**kooperierende Roboter**).

Die Robotersteuerung umfasst die notwendige Hardware und Systemsoftware, um die Antriebsmotoren so anzusteuern, dass die durch die Programme vorgegebenen Bewegungs- und Bearbeitungsvorgänge ausgeführt werden. Hauptkomponente der Robotersteuerung ist die **Bewegungssteuerung**, die aus der programmierten Bewegung Sollverläufe für die Gelenkbewegungen berechnet. Es müssen geeignete zeitliche Zwischenwerte zwischen den programmierten Zielstellungen des Roboters berechnet werden (**Interpolation**, s. Kapitel 4). Bewegungen, die im kartesischen Raum definiert sind, müssen auf entsprechende Gelenkbewegungen transformiert werden (**inverse Kinematik**, s. Kapitel 3).

Die **Gelenkregelung** hat die Aufgabe, auf der Basis dieser Sollbewegungen und der Messwerte der Gelenkgrößen die Servomotoren über die Antriebskarten so anzusteuern, dass sich trotz Störgrößen wie wechselnde Lasten und Kopplungen zwischen den Gelenkbewegungen eine hinreichend genaue Bewegung einstellt. In Bild 1.8 ist ein Wirkschema mit den wesentlichen Softwarekomponenten einer Robotersteuerung skizziert. Zu den erwähnten Aufgaben kommen noch die Echtzeitsteuerung, Schnittstellen zur Verarbeitung von Signalen der Peripherie etc.

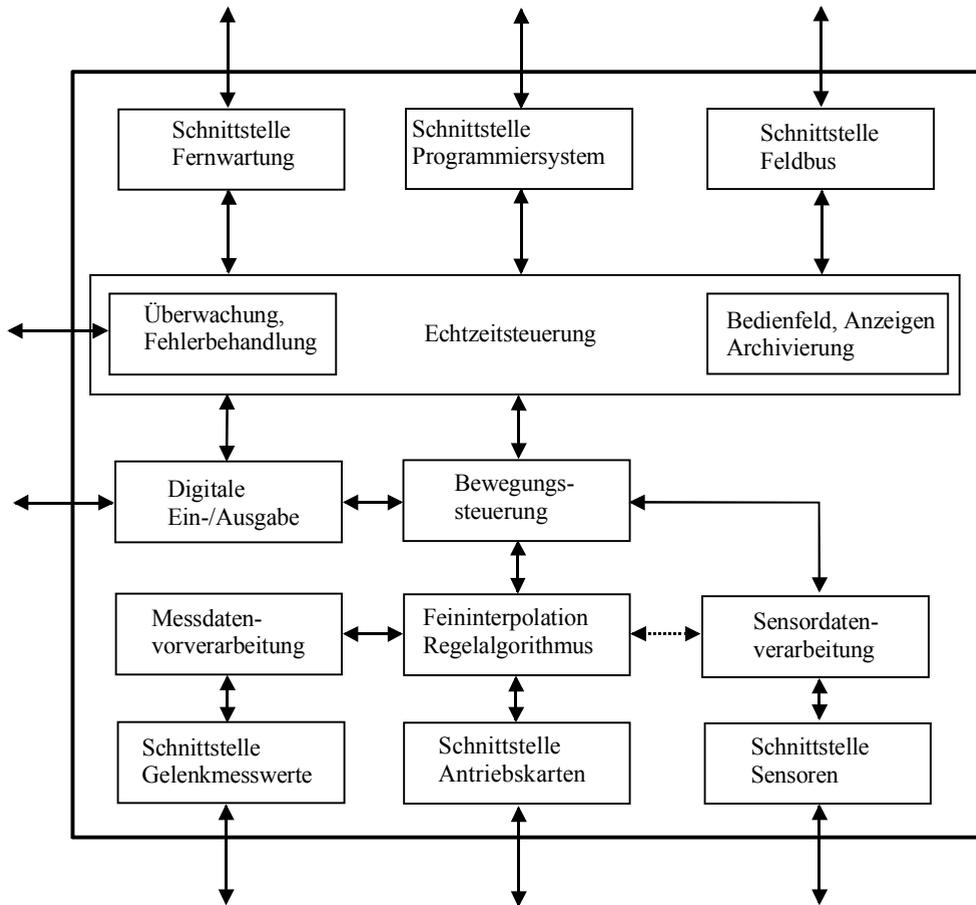


Bild 1.8 Wirkschema der wesentlichen Softwarekomponenten einer Robotersteuerung

Immer mehr Firmen, die nicht zu den Roboterherstellern gehören, entwerfen und konstruieren neue oder modifizierte Roboter für spezielle Anwendungen. Zur Unterstützung bei der Softwareentwicklung können die Open-Source-Bibliotheken von ROS (Robot Operating System) verwendet werden (/1.18/).

■ 1.4 Struktur und Aufgaben der Regelung

Bei der Regelung von Industrierobotern kann man prinzipiell Lageregelungen und Kraftregelungen unterscheiden. Eine **Kraftregelung** soll dafür sorgen, dass definierte Kräfte/Drehmomente auf die Arbeitsumgebung ausgeübt werden. Bei der **Lageregelung** besteht die Aufgabe, unabhängig von den Bearbeitungskräften/Momenten eine gewünschte Roboterbewegung zur Durchführung einer Arbeitsaufgabe zu garantieren. Da eine komplexe Arbeitsaufgabe allein mit einer Kraftregelung nicht zu bewerkstelligen ist, treten Mischformen zwischen Lage- und Kraftregelungen auf (**hybride Regelungen**), bei denen zwi-

schen Lage- und Kraftregelung aufgabenspezifisch umgeschaltet wird. Während in der industriellen Praxis aus verschiedenen Gründen noch relativ wenige Kraftregelungen eingesetzt werden, muss in jeder Robotersteuerung eine Lageregelung vorhanden sein.

Die funktionelle Einbettung der Regelung in die Robotersteuerung ist aus Bild 1.9 ersichtlich. Durch die Bewegungssteuerung wird abhängig von den Anweisungen des Programmierers eine Sollbewegung erstellt und damit der gewünschte Bewegungszustand zu jedem Zeitpunkt des Arbeitsvorganges definiert. Abhängig von diesen Sollgrößen und entsprechenden Messgrößen werden von einem geeigneten Regelalgorithmus Stellwerte berechnet. Mit diesen Stellwerten wird das Antriebssystem so angesteuert, dass sich das gewünschte Verhalten so gut wie möglich einstellt. Zur Ausführung von Arbeiten tritt dabei der Effektor des Industrieroboters mit der Arbeitsumgebung in Kontakt, beispielsweise zum Greifen von Objekten, Bearbeiten von Werkstücken etc. Aus der Sicht einer Bewegungsregelung sind die dadurch auftretenden Kräfte und Drehmomente Störgrößen.

Zur Regelung der Gelenkbewegung eines Roboters müssen Messwerte über die Gelenkwinkel, Schublängen bzw. die Gelenkgeschwindigkeiten vorliegen. Während die technischen Einrichtungen zur Erfassung dieser Größen von einigen Autoren als **interne Sensoren** aufgefasst werden (/1.13/, /1.25/), sind sie in /1.14/ als **Messaufnehmer** bezeichnet.

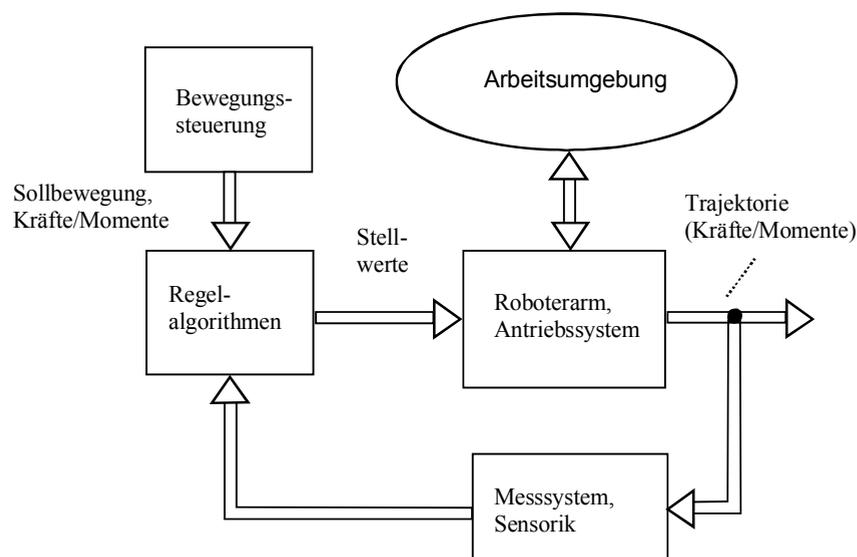


Bild 1.9 Grobstruktur der Regelung

Nach der Definition in /1.14/ liefert das Messsystem Informationen über die Bewegung der Achsen, während ein Sensor Aussagen über die Umgebungssituation liefert (z. B. Werkstück xy in den Toleranzgrenzen auf dem Förderband) und den weiteren Ablauf des Arbeitsvorganges beeinflusst. Auf der Basis von Sensorinformationen kann die Steuerung auf Ereignisse und Zustände reagieren, die nicht vom Programmierer im Detail vorausgesehen werden können. Diese Teilautonomie ist auch Voraussetzung für eine Entwicklung von der roboterorientierten Programmierung in Bewegungsbefehlen hin zur aufgabenori-

entierten Programmierung (/1.15/, /1.25/). Bei der Sensorentwicklung sind in der Robotertechnik vor allem die sensorischen Fähigkeiten des Menschen beim Fühlen und Sehen ein Vorbild. Taktile Sensoren, Kraft-/Momentensensoren, Abstandssensoren und videooptische Sensoren mit anschließender Bildverarbeitung finden mehr und mehr Einsatz in der industriellen Praxis. Da die Sensoren Prozesszustände an die Steuerung rückmelden, kann die Verarbeitung dieser Informationen als **externer Regelkreis** aufgefasst werden, der angepasste Bewegungssollwerte in Arbeitskoordinaten (kartesische Koordinaten) generiert und nach einer Koordinatentransformation (**inverse Kinematik**) der **internen Regelung (Gelenkregelung)** Bewegungssollwerte zur Verfügung stellt (Bild 1.10). Einige Sensoren wie Kraft-/Momentensensoren können auch direkt den Gelenkregelkreis beeinflussen.

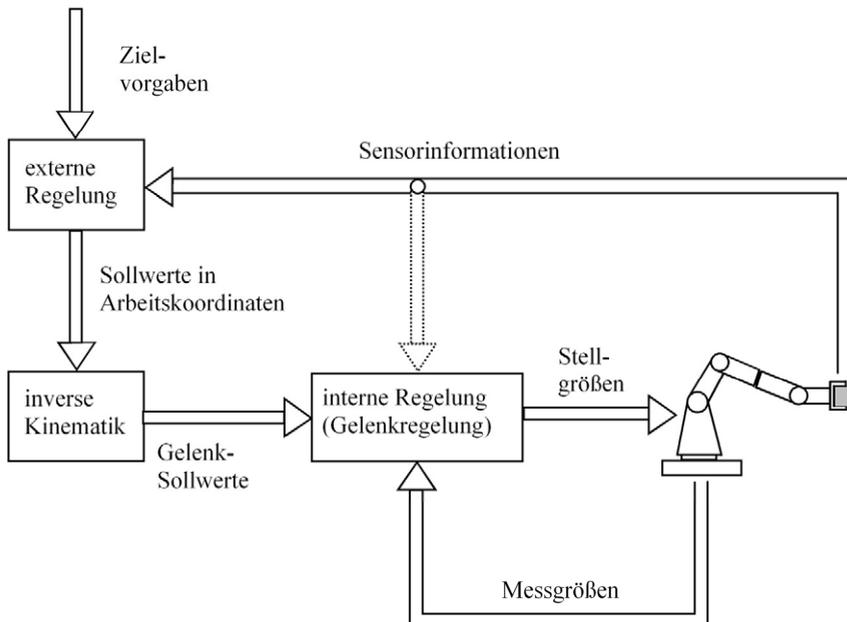


Bild 1.10 Interne und externe Roboterregelung

In Kapitel 7 wird die Gelenkregelung ausführlich behandelt. Eine charakteristische Eigenschaft der Gelenkregelung von Industrieroboterarmen sind die nichtlinearen Verkopplungen. Ausgangsgrößen der Gelenkregelung sind die Bewegungen der Gelenkachsen, sie beeinflussen sich gegenseitig. Veranlasst die Regelung, ein Drehmoment bzw. eine Schubkraft auf eine Gelenkachse zu ändern, hat das nicht nur Auswirkungen auf diese Gelenkachse, sondern i.Allg. auf alle anderen Gelenkbewegungen. Daher ist die Regelstrecke Roboterarm ein verkoppeltes **Mehrgrößensystem**. Die Beziehungen sind zudem nicht-linear, da trigonometrische Funktionen und Quadrate von zeitabhängigen Größen zur Beschreibung verwendet werden müssen.

Anhand des Roboters mit drei Gelenken in Bild 1.11 sollen einige auftretende Verkopplungen verdeutlicht werden:

- Der Verlauf des Gelenkwinkels $\theta_1(t)$, der sich bei einem gegebenen Drehmoment $\tau_1(t)$ einstellt, hängt vom Verlauf der Gelenkwinkel θ_2 und θ_3 ab, da das wirkende Massenträgheitsmoment bei einer Beschleunigung von Gelenk 1 von diesen Winkeln abhängt. Ist der Arm nach oben ausgestreckt (vertikale Stellung), ist das Massenträgheitsmoment minimal. In horizontaler Stellung der Armteile 2 und 3 wirkt ein maximales Massenträgheitsmoment.
- Die Gravitation bewirkt im Gelenk 2 ein Drehmoment, das von der Stellung der Gelenke 2 und 3 abhängt. Es gilt: In vertikaler Stellung hat die Gravitation keine Wirkung, in horizontaler Stellung jedoch maximale Wirkung.
- Bewegt sich Gelenk 1, so wirken Zentripetalmomente in den Gelenken 2 und 3, die von der Winkelgeschwindigkeit des Gelenks 1 und den aktuellen Winkeln θ_2, θ_3 abhängen.

Die regelungstechnische Behandlung der Verkopplungen und die Forderung aus der Praxis, dass die Bewegungen des Roboterarms möglichst schnell mit großer Bahngenauigkeit zu erfolgen haben, sind die prägenden Herausforderungen für die Gelenkregelung. Zudem geht die weitere Entwicklung in Richtung „Leichtbauroboter“ (s. auch Bild 1.3b), d. h. das Verhältnis von bewegten Eigenmassen des Roboterarms zu aufgenommenen Lastmassen wird kleiner, was von der Regelung eine große Robustheit gegenüber veränderlichen Lastmassen bzw. adaptive Eigenschaften erfordert. Da der Einsatz von Kraft-/Momentensensorik immer wirtschaftlicher wird, werden neue Einsatzgebiete z. B. in der Montage erschlossen, bei der die Kraftregelung eine zunehmende Rolle spielen wird.

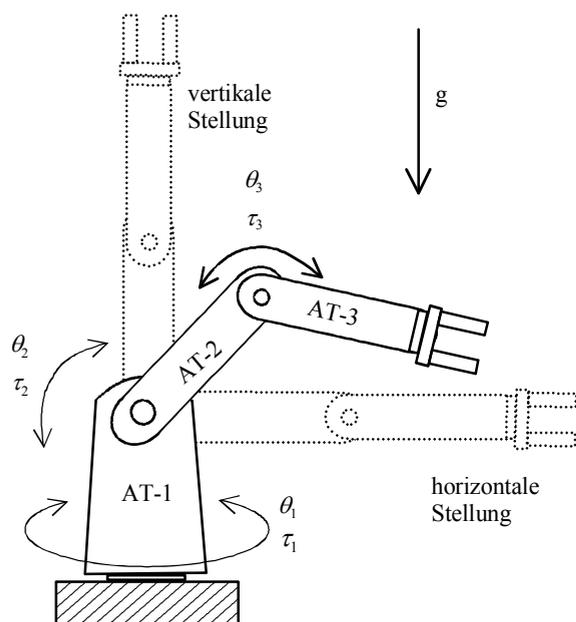


Bild 1.11 Kopplungen an einem Roboterarm mit drei Gelenken