CARL HANSER VERLAG

Wolfgang Weber

Industrieroboter

Methoden der Steuerung und Regelung

3-446-21604-9

www.hanser.de

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.

Auch in technisch orientierten Kreisen wird zum Teil der Begriff **Roboter** weit gefasst. So werden z.B. "alle Systeme, die etwas wahrnehmen, diese Information verarbeiten und dann entsprechend handeln" als Roboter bezeichnet (zitiert nach /1.2/). Unter solche weitgefassten 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.

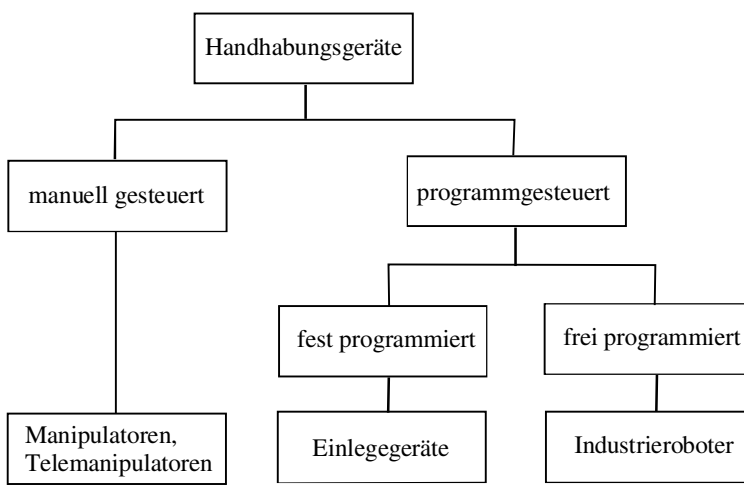


Bild 1.1 Einteilung von Handhabungsgeräten

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.*

Nahezu identisch ist die Definition nach der europäischen Norm EN775. In Japan wird von der Japan Industrial Robot Association (JIRA) der Begriff Industrieroboter viel weiter gefasst (s. z.B. /1.4/). 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 Manipulatortechnik entstanden auch verwandte Bereiche wie Roboter im Bauwesen, Anwendungen in der Medizintechnik, Serviceroboter für Dienstleistungen u.Ä.

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 Roboterarmes, 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 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 der Industrieroboter RV6 der Firma Reis Robotics mit sechs rotatorischen Gelenken (Drehgelenken) abgebildet. Dieser häufig verwendete Typ wird als vertikaler **Knickarmroboter** bezeichnet und kann vielseitig eingesetzt werden.

a) Reis-RV6

b) SCARA SR6/8

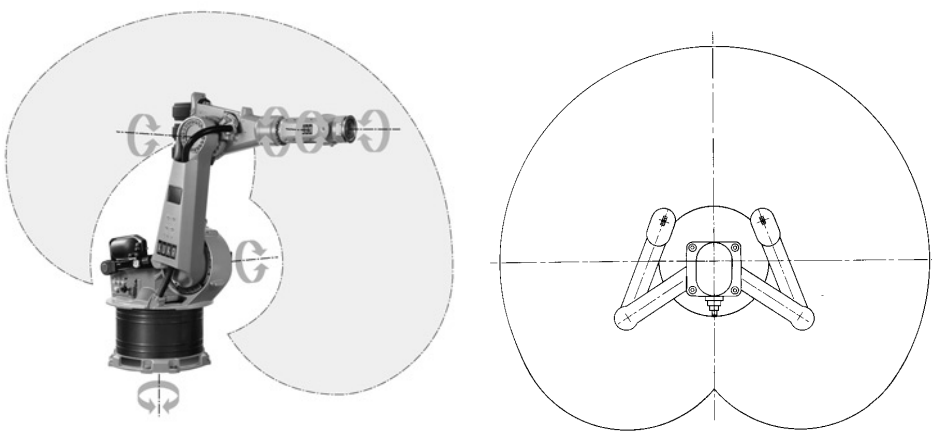
Bild 1.2 a) Industrieroboter RV6 (Werkbild Reis Robotics), b) SCARA-Roboter SR6/8 von Bosch (Werkbild Bosch)

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.

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 (siehe auch Abschn. 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, so genannte **redundante Kinematiken**. um die Feinbewegungen zu verbessern, was jedoch zu höheren Kosten verbunden mit einem größeren Steuerungsaufwand führt.

Roboter mit weniger als sechs Achsen führen zu einem Freiheitsgrad von $f < 6$. Ein wichtiger Vertreter dieser Klasse ist der **SCARA-Roboter**. SCARA ist die Abkürzung für "Selective Compliance Assembly Robot Arm". Bild 1.2b zeigt den SCARA SR6/8 der Fa. Bosch. Dieser Typ eignet sich für Arbeiten, die in einer Ebene stattfinden, z.B. Bohren, Lötpunkte 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 2.17b). 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 $f = F = 4$.



a) KUKA-IR b) IBM SCARA

Bild 1.3 a) Arbeitsraum eines KUKA Knickarmroboters (Werkbild KUKA), b) Arbeitsraum eines IBM SCARA-Roboters (Werkbild IBM)

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 1.3 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**"/1.5/). 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**"/1.5/).

1.3 Steuerung und Programmierung

Robotermechanik, Robotersteuerung und Programmiersystem werden oft als Einheit verstanden und vom Hersteller geliefert. Bild 1.4 zeigt als Beispiel die Geräteausrüstung und die Schnittstellen für die PC-basierte Robotersteuerung KRC1 von KUKA. Bedienung, Anzeige, Dateiverwaltung, Abarbeitung des Roboterprogramms und die Bahnplanung werden auf dem PC unter dem Betriebssystem Windows 95 durchgeführt, ergänzt durch die Echtzeiterweiterung VxWorks. Neben der Programmerstellung mit dem Handprogrammiergerät ist eine Off-line-Programmierung in der Programmiersprache von KUKA möglich. Vielfältige Schnittstellen zu Bildschirm, Mouse, Tastatur etc. stehen bereit. Über Ethernet und andere Schnittstellen kann die Robotersteuerung mit übergeordneten Steuerungen kommunizieren. Eine Multifunktionskarte (MFC) enthält die digitale Servoelektronik (DSE), auf der die Messwerte eingelesen werden, die Regelung durchgeführt und Stromsollwerte an die Leistungskarten ausgegeben werden. Schnittstellen für verschiedene Feldbusse zum Anschluss von Sensoren und zur Realisierung der digitalen Ein-/Ausgabe stehen ebenfalls bereit.

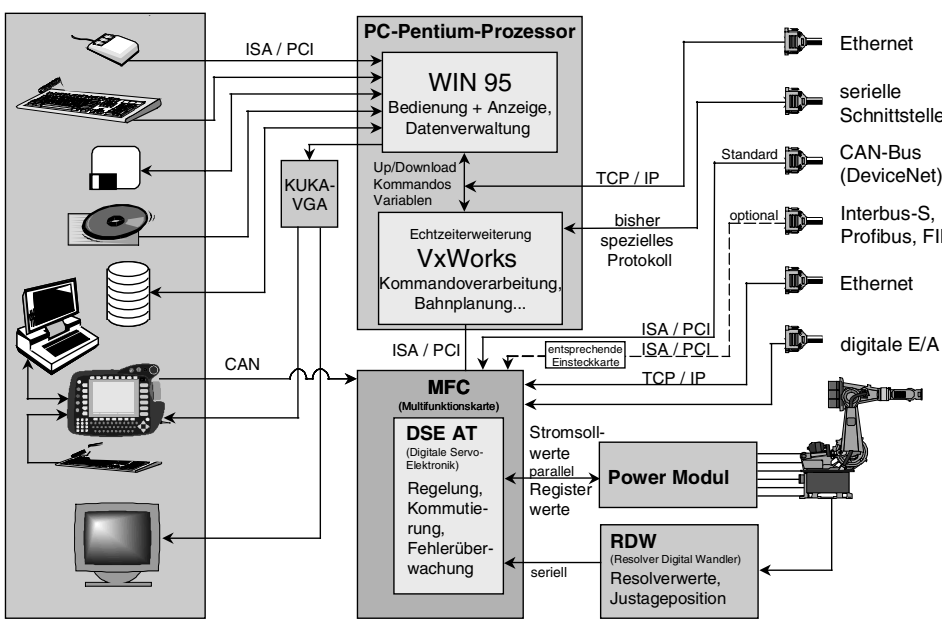


Bild 1.4 Gesamtübersicht über die Steuerung KRC1 (Werkbild KUKA)

Steuerung und Programmiersystem haben unterschiedliche Aufgaben (s. schematische Einteilung in Bild 1.5). Das **Programmiersystem** stellt dem Anwender Funktionen und Befehle bereit, um Bewegungsprogramme aufzustellen, zu korrigieren und zu testen.

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. Kap. 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. Ein modernes Programmiersystem wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Die Robotersteuerung umfasst die notwendige Hardware und Systemsoftware, um die Antriebsmotoren so anzusteuern, dass die durch die Programme vorgegebenen Bewegungs- und Bearbeitungsvorgänge ausgeführt werden. Hauptkomponenten der Robotersteuerung sind 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. Kap. 4). Bewegungen, die im kartesischen Raum definiert sind, müssen auf entsprechende Gelenkbewegungen transformiert werden (**inverse Kinematik**, s. Kap. 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 1.6 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.

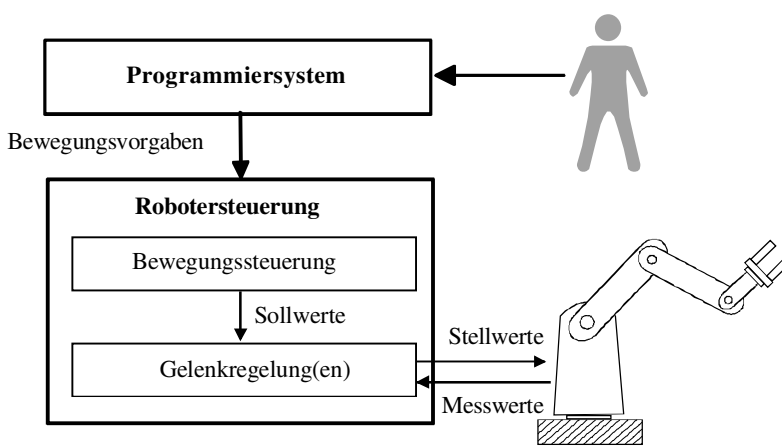


Bild 1.5 Hauptkomponenten Programmiersystem und Steuerung

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

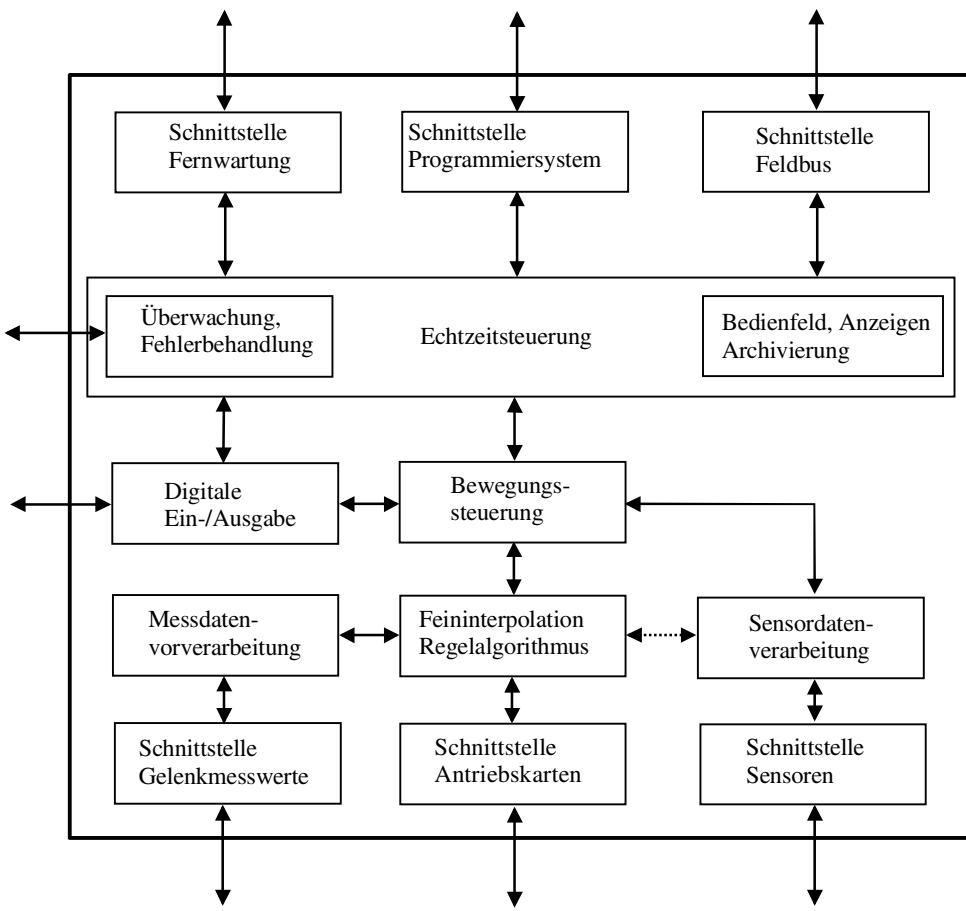


Bild 1.6 Wirkschema der wesentlichen Softwarekomponenten einer Robotersteuerung

Die funktionelle Einbettung der Regelung in die Robotersteuerung ist aus Bild 1.7 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.

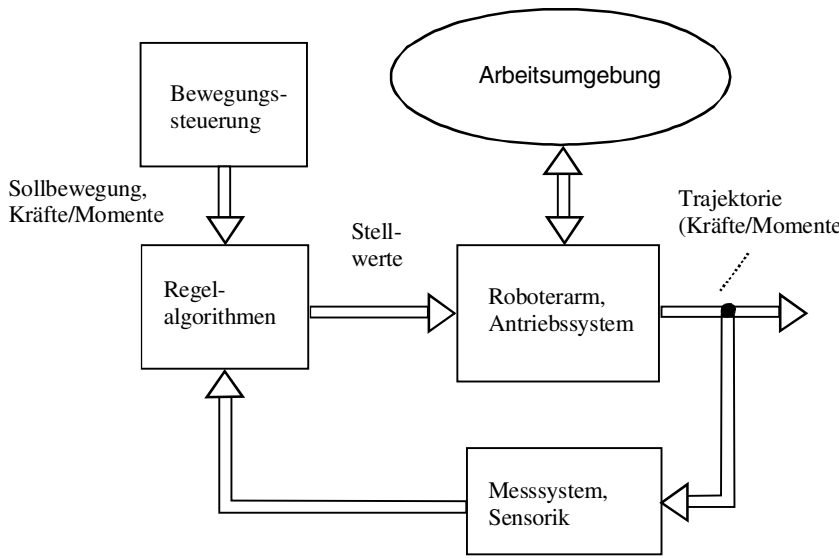


Bild 1.7 Grobstruktur der Regelung

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 (/1.6/, /1.12/), sind sie in /1.14/ als **Messaufnehmer** bezeichnet. Nach der Definition in /1.14/ liefert ein Messaufnehmer ein Signal, während ein Sensor über eine Aussage (z.B. Werkstück xy in den Toleranzgrenzen auf dem Förderband) 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 aufgabenorientierten Programmierung /1.12/. 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 video-optische Sensoren mit anschließender Bildverarbeitung finden mehr und mehr Einsatz in der industriellen Praxis. Da die Sensoren Prozesszustände an die Steuerung rück-

melden, 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 1.8). Einige Sensoren wie Kraft-/Momentensensoren können auch direkt den Gelenkregelkreis beeinflussen.

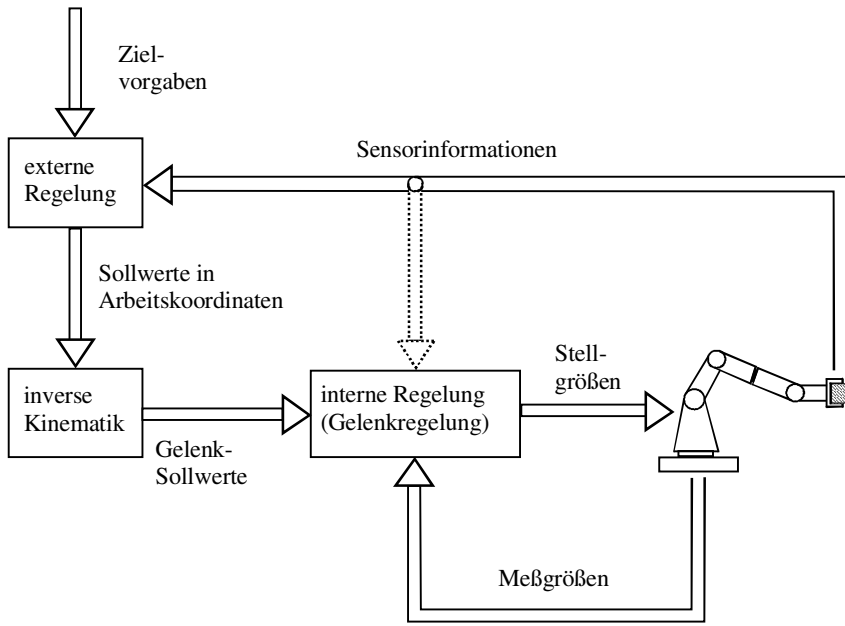


Bild 1.8 Interne und externe Roboterregelung

In Kapitel 5 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 nichtlinear, da trigonometrische Funktionen und Quadrate von zeitabhängigen Größen zur Beschreibung verwendet werden müssen. Anhand des Roboters mit drei Gelenken in Bild 1.9 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 Massenträg-

heitsmoment 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.

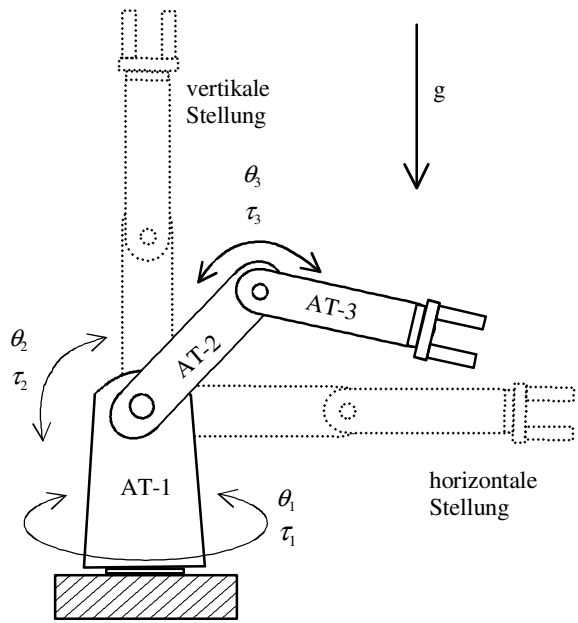


Bild 1.9 Kopplungen an einem Roboterarm mit drei Gelenken

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**", 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.