

2.1 Vorwort

In den folgenden Kapiteln werden Grundlagen und Begrifflichkeiten aus der Robotik erläutert. Ziel ist es hier den Leser mit allgemeinen Hintergrundwissen zum Thema Robotik zu stärken und am Ende das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten konzeptionell zu verstehen. Einen Roboter in eine technische Applikation einzubinden erfordert Wissen über Hardware, Funktionsweise und Vorteile bestimmter Modelle. Beispielsweise besitzen die meisten Robotersysteme zwischen drei und sieben bewegliche Achsen. Aber was steckt eigentlich in einer Roboterachse? Und wie viele davon werden benötigt? Was ist der Vorteil einer siebenachsigen Kinematik gegenüber einer sechsachsigen? Was ist überhaupt eine Kinematik? Programmiersprachen, Software und auch Hardware variieren teils stark hinsichtlich der Applikation und der verwendeten Systeme. Ob es sich aber um ein System wie den Dobot Magician oder den Universal UR5 handelt, die Grundlagen der klassischen Robotik sind gesetzt.

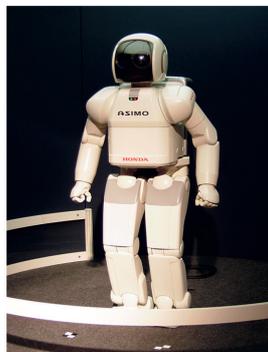
Informationen auf einem zugänglichen, wenig mathematischen Niveau werden hier an den Leser herangetragen, um einen Überblick in das Standard-Vokabular der Robotik zu bekommen. Dies erfolgt ohne Anspruch an Vollständigkeit. Für ein tiefgehendes Verständnis sei auf die etablierte und hier teils aufgefasste Fachliteratur verwiesen. Dazu ist am Ende jedes Abschnitts die verwendete Literatur erfasst.

2.2 Roboter: Aufbau und Definitionen

Roboter sind komplexe mechatronische Systeme. Der Begriff Mechatronik setzt sich zusammen aus Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik. Die Robotik ist folglich ein interdisziplinäres Anwendungs- und Forschungsfeld. Ein Roboter interagiert mit seinem Umfeld mithilfe von Aktoren, Sensoren und einem oder mehreren Prozessrechnern. Häufig werden Elektromotoren genutzt um die Mechanik des Systems in Bewegung zu versetzen, während Kameras, Positions- und Kraftsensoren die Zustände des Roboters und der Umwelt erfasst. Auf Basis dieser Informationen wird auf dem Prozessrechner entschieden, wie die Motoren anzusteuern sind, um ein gewünschtes Verhalten zu erzielen.

Prinzipiell lassen sich Roboter unterschiedlich kategorisieren. Eine mögliche Unterscheidung unterteilt die Systeme in

- Industrieroboter,
- Serviceroboter sowie
- Entertainment - & Edutainmentroboter.



Humanoider Roboter: Asimo



Sozialer Service-Roboter Pepper

Serielle Kinematik: Roboter von Kuka und Cloos



Parallelkinematik: Labor-Prüfstand am Institut für Mechatronische Systeme



Abbildung 1: Bilder verschiedener Robotersysteme [#Q1]

Während Industrieroboter seit den späten 1980er in Produktionshallen in Fertigung- und Montage genutzt werden, haben Serviceroboter sich bisher in weniger Domänen durchsetzen können. Populäre Beispiele für Service-Roboter sind die häufig in Privathaushalten genutzten Staubsaugerroboter und autonome Rasenmäher. Die Systeme sind hohen Anforderungen an der Autonomie und Sicherheit in weitestgehend unbekanntem sowie unstrukturierten Umgebungen ausgesetzt. Der Erfolg der genannten Beispiele lässt sich demnach sicherlich auch auf die relativ strukturierten Eigenschaften eines Wohnzimmers zurückführen. Dementgegen stellt bspw. der Einsatz von Rettungsrobotern in einem Lawinengebiet (wenig Kontraste, schwierige Lichtverhältnisse, keine klaren Begrenzungen, unebener Boden) eine enorme Herausforderung für Forscher und Entwickler dar. Der Dobot Magician, als didaktische, unterhaltende Plattform ist ein gutes Beispiel für einen Edutainmentroboter. Einige Beispiele für Roboter aus dem Service-, Industrie- sowie Forschungsbereich sind in Abbildung 1 zu finden.

Schwerpunkt dieses Kompendiums sind (seriell-kinematische) Industrieroboter und Cobots (kollaborative Roboter). Cobots unterscheiden sich von klassischen Industrierobotern im Wesentlichen durch eine stark reduzierte Masse und entsprechende Sicherheitsanforderungen. Während der klassische Industrieroboter hinter Sicherheitszäunen Fertigungsprozesse durchführt, steht der Cobot im direkten Kontakt mit dem Menschen.

Der prinzipielle Aufbau beider Roboterarten ähnelt sich aber stark. Deswegen werden diese Systeme in den folgenden Abschnitten definiert und ein Grundverständnis über ihren Aufbau vermittelt. Dabei steht kein Produkt im Vordergrund, sondern vielmehr die gemeinsame Grundlage aller seriell-kinematischen Roboter.

Definition Industrieroboter nach VDI-Richtlinie 2860: „Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen bzw. menschlichen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“ Ähnliche Definitionen lassen sich in der DIN EN ISO 8373 wiederfinden.

Die am häufigsten verwendeten Industrieroboter bestehen aus einer serielle Anordnung der Robotergelenke und -glieder. Dies wird als serielle Kinematik bezeichnet. Die hohe Anwendungsvielfalt der seriellen Kinematik liegt vor allem am guten Verhältnis aus Bau- zu Arbeitsraum des Roboters. Damit gemeint ist der benötigte Raum oder die Hallenfläche, die der Aufbau des Systems insgesamt benötigt im Vergleich zu dem Raum in dem der Roboter Aufgaben bearbeiten kann.

Ein Nachteil der seriellen Struktur ist die Fehlerfortpflanzung bei Positionierungengenauigkeiten. Eine ungenaue Positionierung im ersten Gelenk wirkt sich beispielsweise auf alle folgende Glieder und Gelenke aus. Dies führt zu einer reduzierten Genauigkeit an der Spitze des Roboters (Endeffektor).

Dahingegen besitzen parallelkinematische Roboter mehrere serielle Strukturen die an einer Endeffektor-Plattform gekoppelt sind. Dadurch können diese Systeme höhere Lasten tragen, schneller Beschleunigen erzielen und sind genauer. Typische Anwendungsfälle sind hier zeitkritische „Pick-and-Place“-Aufgaben und Bearbeitungsprozesse mit erhöhten Prozesskräften (Fräsen, Bohren). Dafür sind parallelkinematische Roboter sperriger und besitzen demnach ein schlechteres Verhältnis aus Arbeitsraum zu Bauraum.

2.2.1 Aufbau eines seriell-kinematischen Roboters

Ein serieller Roboter besteht aus einer Kette von Gliedern und Gelenken. Jedes Glied ist über ein Robotergelenk mit dem nächsten Glied verbunden. Im Gelenk ist ein elektrischer Motor inkl. Getriebe und Sensorik verbaut. Dieser Aufbau ist schematisch für ein Glied und ein Gelenk in Abbildung 4 gezeigt. Die folgenden Abschnitte behandeln die Funktionsweise der Teilkomponenten dieses Aufbaus.

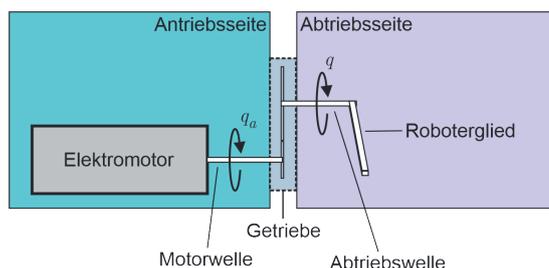


Abbildung 2: Aufbau eines seriell-kinematischen Roboters

2.2.2 Elektromotoren

Um die Robotergelenke bewegen zu können, werden meist Elektromotoren als Antriebe gewählt. Dabei gibt es verschiedene Ausführungen mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen.

Schrittmotoren (engl. *stepper motor*): Bei diesen Motoren kann ohne Sensorik eine schrittweise, diskrete Positionsänderung vorgegeben werden, da die Steuerungssignale an feste Positionen des Rotors gekoppelt sind. Sie werden meist für kleine und einfache Roboter genutzt, da es bei zu großen externen Lasten zum Schrittverlust kommt. Der Motor wird dabei auf eine bestimmte Position gesteuert, aber durch die hohe Last, die das interne Magnetfeld des Motors überwindet, erreicht der Motor eine andere, unbekannte Position. Dies kann nur durch zusätzliche Sensorik erkannt werden und stellt den wesentlichen Nachteil dieses Motors da.

Permanent-Magnet Gleichstrommotor: Die rotierende Bewegung eines Permanent-Magnet Gleichstrommotors beruht auf der Wechselwirkung von magnetischen Feldern. Er besteht wie in Abbildung 2 skizziert aus einem feststehenden Außenteil, dem sogenannten Stator und einem rotierenden Innenteil, dem Rotor. In dieser skizzierten Ausführung ist der Stator ein Permanentmagnet mit Nord- und Südpol und erzeugt ein statisches Magnetfeld. Der Rotor hingegen ist ein Eisenkern mit elektrischen Spulen, die mit Schleifringkontakten auf der Welle verbunden sind. Fließt über die Kontakte durch die Spulen ein elektrischer Strom, entsteht im Eisenkern ein Magnetfeld. Dadurch dreht sich der gesamte Rotor solange, bis das Magnetfeld im Eisenkern sich vollständig am Stator orientiert hat (Nordpol zu Südpol, Südpol zu Nordpol). Bei diesem Vorgang werden über die Schleifkontakte auf der Welle (Kommutator und Kommutatorbürsten) die Spulen im Rotor umgepolt, sodass der Strom in die entgegengesetzte Richtung fließt. Dadurch setzt der Rotor seine Bewegung kontinuierlich fort.

Bürstenlose Gleichstrommotoren (engl. *BLDC, brushless DC motors*) sind die am häufigsten eingesetzten Motoren in der Robotik. Beim Brushless Motor werden Bürsten und Kommutator ersetzt. Sie haben dementsprechend eine deutlich erhöhte Lebensdauer, da die Bürsten und der Kommutator beim Permanent-Magnet DC Motor durch ständiges Schleifen abnutzen. Allerdings benötigen BLDCs eine komplexe Steuerelektronik auf die an dieser Stelle nicht umfassend eingegangen wird.

BLDCs werden meist in Form von Servomotoren in der Robotik eingesetzt. Aufgrund ihres Aufbaus lassen sich Motorposition und Drehmoment gut regeln. Im Gegensatz zu Schrittmotoren liefern sie ein relativ konstantes Drehmoment und weisen ebenfalls nicht den Nachteil des Schrittverlustes auf.

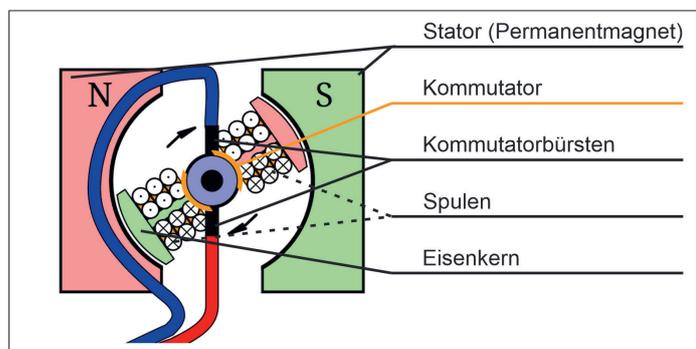


Abbildung 3: Magnetfeldpolung des Rotors in einem Gleichstrommotor mit Permanentmagnetstator (bearbeitet) [#Q2]

2.2.3 Getriebe im Roboter

Die Motorwelle des Elektromotors ist direkt an ein Getriebe gekoppelt. An der Abtriebsseite des Getriebes stellt sich eine verringerte Drehzahl und ein erhöhtes Drehmoment ein. Gängige Getriebeübersetzungen in der Robotik liegen bei 1:100, um die hohen Umdrehungszahlen des Elektromotors zu reduzieren und das Drehmoment an Abtriebswelle deutlich zu erhöhen. Die Übersetzung i des Elektromotors ist definiert als das Verhältnis aus der Drehzahl am Antrieb und der Drehzahl am Abtrieb

$$i = \frac{n_{\text{Antrieb}}}{n_{\text{Abtrieb}}}$$

Harmonic Drive Getriebe: Eine weitverbreitete Getriebeart in der Robotik ist das in Abbildung 4 dargestellte Harmonic Drive Getriebe. Diese Getriebeart ist eine Schlüsseltechnologie für die kompakte Bauweise von Robotergelenken und Reduktion der Masse in Cobots.

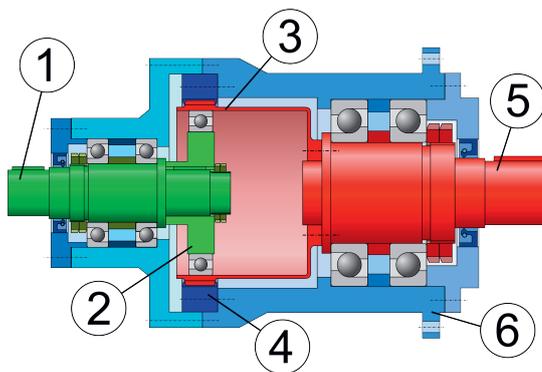


Abbildung 4: Harmonic-Drive Getriebe, Schnitt-/ Seitenansicht [#Q3]

Über den angesteuerten Elektromotor ergibt sich die Eingangsdrehzahl und das Eingangsdrehmoment. Dieses Moment wird auf die elliptische Scheibe (2) übertragen, welche die dünnwandige Stahlbüchse (3) während der Rotation deformiert. Bei der Rotation der elliptischen Scheibe greift die Außenverzahnung der Stahlbüchse somit in die Innenverzahnung des Außenrings (4). Der Außenring ist fixiert, sodass bei einer Umdrehung der Antriebsscheibe (2) die Stahlbüchse (und somit auch der Abtrieb (5)) nur eine kleine Teildrehung durchführt. Das heißt, der Abtrieb dreht sich wesentlich langsamer und entgegengesetzt zum Antrieb. Das Harmonic Drive ist bekannt für die große Übersetzung von 30:1 bis 320:1.

2.2.4 Typische Sensorik für Industrieroboter

Sensoren wandeln eine physikalische Größe (wie zum Beispiel Temperatur, Druck, Feuchtigkeit etc.) in ein elektrisches Signal um, das anschließend messtechnisch weiterverarbeitet wird. Sie sind notwendig, damit im Prozessrechner der Zustand des Roboters, zum Beispiel seine Konfiguration im Raum, korrekt erfasst werden kann. Zu den essenziellen Sensoren in einem seriellen Roboter gehören **Positionssensoren** um die Lage der einzelnen Roboterelenke zu messen, sowie **Kraft-Momenten-Sensoren** um Kontakte mit der Umgebung korrekt zu erfassen. Auch Kameras und Mikrofone sind essenzieller Bestandteil von Robotersystemen, um sich in ihrer Umgebung korrekt zu orientieren und Gegenstände sowie Personen zu erkennen.

2.2.4.1 Lagesensoren

Lagesensoren erfassen durch ein optisches oder magnetisches Prinzip den Rotationswinkel/die Position des Elektromotors. Bei Lagesensoren wird zwischen differentiellen (Inkrementalgeber) und absoluten Sensoren (Resolver) unterschieden. Differentielle Sensoren messen eine schrittweise Änderung der Position. Wird allerdings die Lage benötigt muss zu Beginn der Roboter in eine Referenzposition fahren, um die initiale absolute Position vor Betrieb zu kennen. Absolute Sensoren erfassen zu jedem Zeitpunkt eine eindeutige Position und benötigen deshalb kein Referenzieren bei der Inbetriebnahme des Systems.

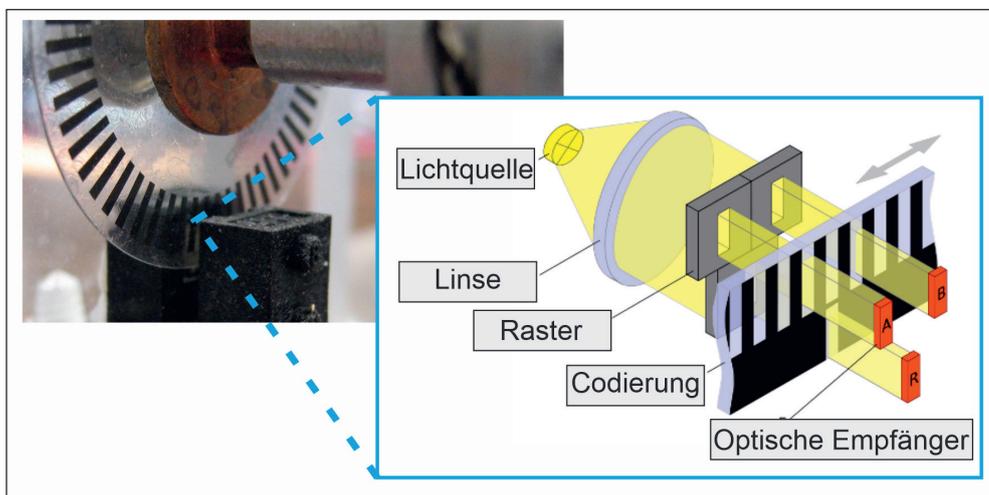


Abbildung 5: Photoelektrische Abtastung (Demonstrationsmodell) [#Q4]

Den inkrementellen Drehgeber (Encoder) gibt es mit magnetischer und **optischer Abtastung**. Bei der optischen Abtastung des inkrementellen Sensors ist eine Codescheibe (Strichcode), wie in Abbildung 5 drehbar gelagert. Eine LED beleuchtet die Codescheibe, welche strichförmige Löcher aufweist. Ein dahinter gelagerter Empfänger (optoelektronisches Element) wandelt das empfangene Licht in ein elektrisches Signal um. Bei einer Drehung der Scheibe entsteht ein periodisches, binäres hell-dunkles Signal. Aus diesem kann die Drehrichtung als auch die Geschwindigkeit bestimmt werden.

Bei der **magnetischen Abtastung** ist jede Winkelposition durch einen Feldvektor fest definiert. Der Encoder besitzt einen rotierenden Permanentmagneten der das benötigte magnetische Feld aufbaut. Die Feldvektoren werden von einem Sensorelement in inkrementelle Signale transformiert.

Die **Messung einer absoluten Position** erfolgt durch das Einbetten einer eindeutigen Codierung auf der Drehscheibe zwischen Lichtquelle und Optoelektronik. Jede Position der Drehscheibe erzeugt so ein einzigartiges binäres Wort (bspw. 0100 für 4 Sensorsignale: dunkel, hell, dunkel, dunkel). Die Auflösung ist dann bestimmt durch die Wortlänge, also die Anzahl der Bits. Eine 4-Bit-Auflösung ermöglicht das Erfassen von $2^4=16$ unterschiedlichen Positionen über eine ganze Rotation.

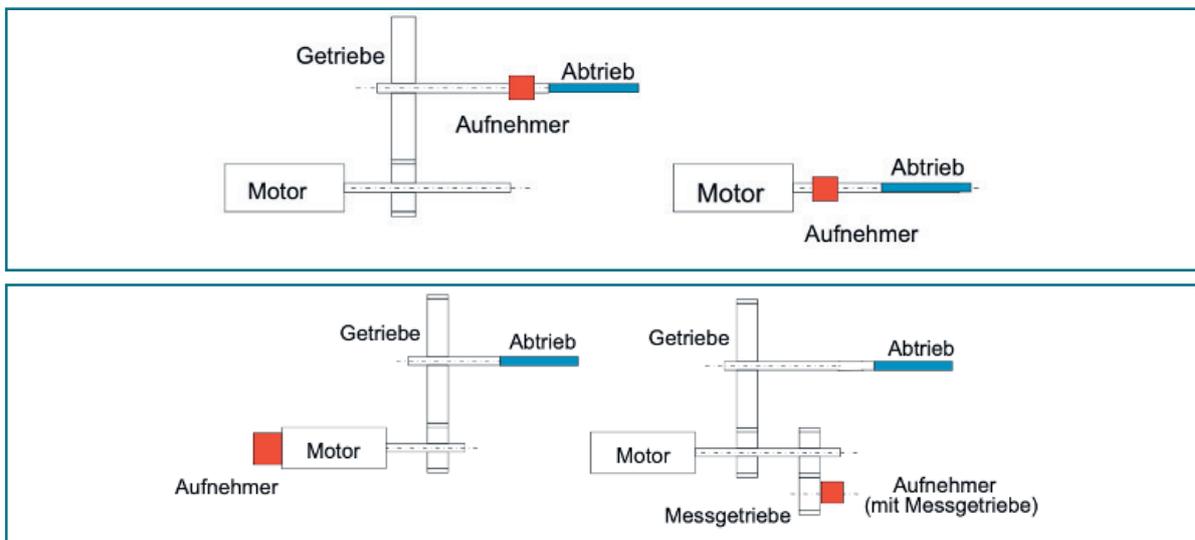


Abbildung 6: Verschiedene Konfigurationen für Lagesensoren

Auch in der Montage des Sensors gibt es einige Unterschiede die in Abbildung 6 dargestellt sind. Bei der direkten Messung wird der Lagesensor des Roboters an der Abtriebsseite des Getriebes angebracht. Durch die kleinen Bewegungen an der Abtriebsseite des Antriebsstranges werden teurere und hochauflösende Messeinheiten benötigt. Deutlich günstiger sind dagegen indirekte Messungen an der Motorseite des Antriebsstranges oder über ein weiteres Getriebe, dass mit der Motorwelle verbunden ist. Hier können günstigere Sensoren verbaut werden, da die Drehzahl sehr viel höher als abtriebseitig ist, aber das Getriebespiel wird so nicht erfasst. Dadurch leidet bei einer Regelung im Gelenkraum die Präzision am End-Effektor.

2.2.4.2 Kraft-Momenten-Sensoren

Neben Lagesensoren sind häufig auch Kraft-Momenten Sensoren (KMS) verbaut. Dies ist vor allem bei Aufgaben mit menschlichem Kontakt notwendig, da über das Erfassen und Lokalisieren von Kräften am Roboter das System eine sichere Reaktionsstrategie ausführen kann. Als primitive Reaktion wäre beispielsweise ein Stop des Systems über die Bremsen denkbar.

KMS messen mechanische Kräfte und Momente indirekt über die Deformation eines flexiblen Körpers, der mit Dehnungsmessstreifen (DMS) versehen ist. DMS sind flache, elektrische Leiterstreifen, die mit einem speziellen Kleber auf deformierbaren Trägerelementen befestigt werden. Bereits bei kleinsten Verformungen werden die Leiter im DMS gestaucht oder gestreckt, wodurch sich der elektrische Widerstand des DMS merklich ändert. Diese Widerstandsänderung wird messelektronisch erfasst und ausgewertet, um auf Kräfte bzw. Momente zurück zu schließen. Eine exemplarische Umsetzung ist in Abbildung 6 gezeigt.

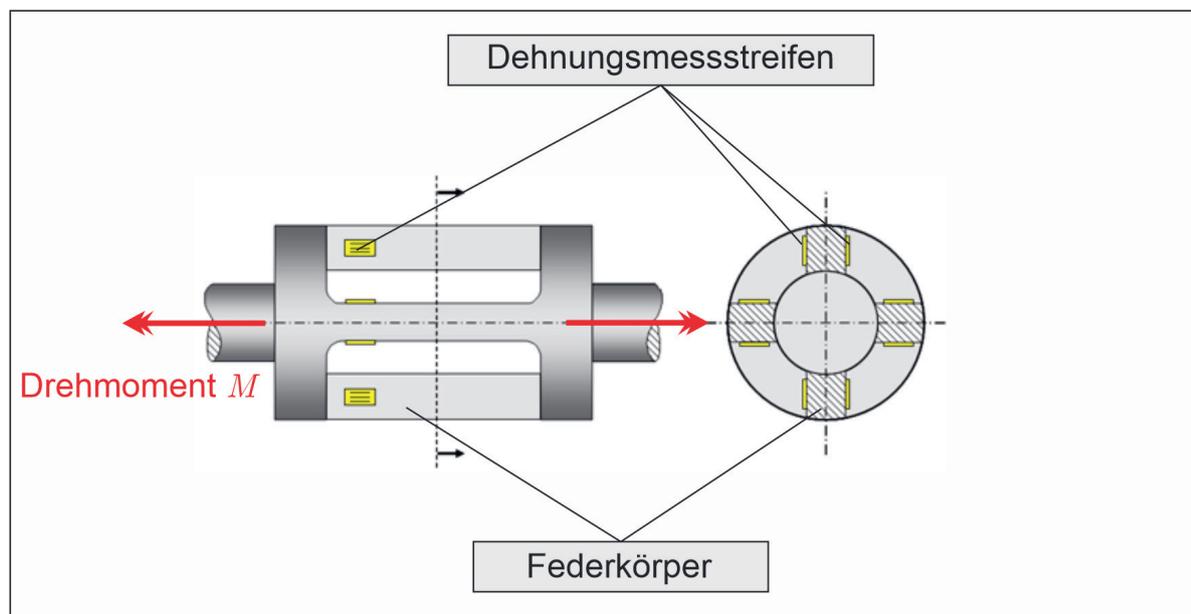


Abbildung 7: Drehmomentenaufnehmer [#Q5]

Um die Sensitivität in den Gelenken des Roboters gegenüber Kräfteinwirkungen zu erhöhen, können Drehmomenten-Sensoren am Abtrieb des Getriebes befestigt werden. Teilweise werden Kraft-Momenten-Sensoren auch nahe des End-Effektors montiert, um besonders feinfühlig bei Handhabungs-Arbeiten zu sein.

Eine Alternative zu relativ teuren Kraft-Momenten-Sensoren ist die deutlich günstigere Motorstrom-Messung. Dabei wird die mechanische Kraft nicht direkt gemessen, sondern lediglich über eine Kennlinie aus dem fließenden Motorstrom bestimmt. Eine Voraussetzung ist, dass dieser Zusammenhang zwischen Motorstrom und Drehmoment bekannt ist, bzw. dass eine Kennlinie des Motors vorliegt. Nachteil dieser Methode liegt dabei darin, dass externe Kräfte aufgrund des Messrauschens und der Getriebereibung nicht erkannt werden. Der Roboter erreicht im dem Sinne nicht die gleiche „Feinfühligkeit“.

2.2.5 Prozessrechner und Steuerung

Alle Daten werden in der Robotersteuerung verarbeitet. Ein zentraler Hauptrechner im Schaltschrank übernimmt die steuernde Funktion. Für sicherheitsrelevante Tätigkeiten ist ein zweiter Rechner in der Steuereinheit verbaut. Er hat die Aufgabe, dass zum Beispiel bei einem Nothalt alle Bremsen des Roboters bis zu einem gewissen Zeitpunkt nach der Betätigung greifen und den Roboter zum Stillstand bringen. Eine weitere Funktion des Sicherheitsrechners ist auch die Steuerung von Sicherheitskomponenten, welche an die Sicherheitsschnittstelle angeschlossen werden können.

2.2.6 End-Effektoren und Anwendungsgebiete

Je nach Anwendungsgebiet können an dem Arm eines Roboters unterschiedliche Werkzeuge angebracht werden. Bei Pick-and-Place-Aufgaben werden Greifsysteme eingesetzt, welche den Roboter in die Lage versetzt Objekte im Raum zu bewegen. Verschiedene Ausführungen sind je nach Anwendung denkbar und beispielhaft in Abbildung 8 dargestellt. Für empfindlichen Bauteilen kann ein pneumatischer Sauggreifer zum Einsatz kommen, der das Bauteil durch Unterdruck am Greifer fixiert. Bei ferromagnetischen Materialien wie Stahlblechen sind magnetische Greifer sinnvoll. Objekte ohne glatte Oberflächen lassen sich am besten mit Drei-Finger-Greifern oder speziell konstruierten Greifer-Systemen manipulieren. Im Rapid-Prototyping kommt hierbei der 3D-Drucker oft zum Einsatz, um Konzepte für neuartige Greifmechanismen zu testen.

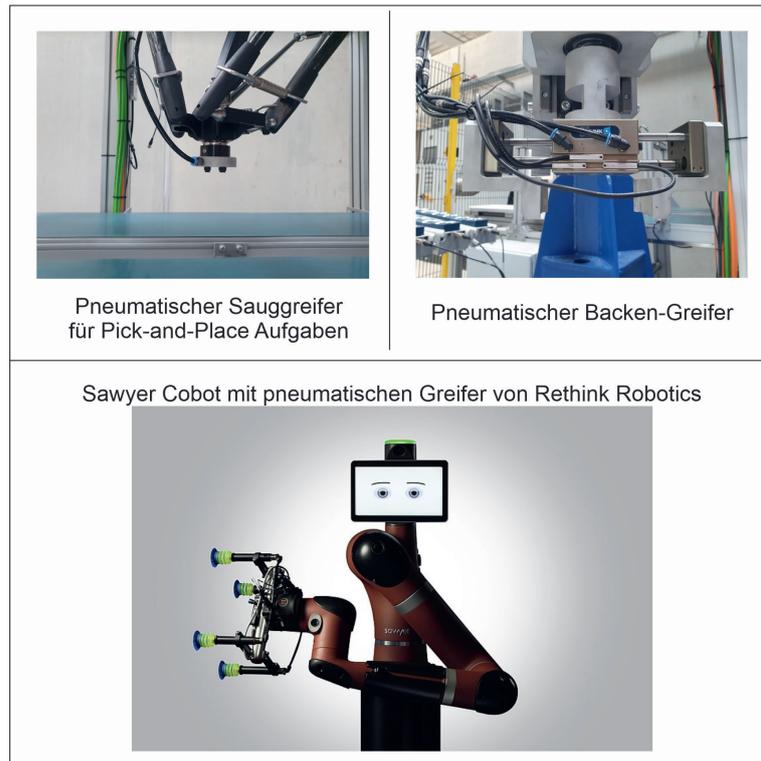


Abbildung 8: Verschiedene Greifer-Systeme [#Q6]

Neben Pick-and-Place oder Montage-Aufgaben mit Greifern, können Roboter noch eine Vielfalt von anderen Tätigkeiten ausführen. Dazu gehören typischerweise

- Schweißen,
- Bohren,
- Verschrauben,
- Messen,
- und Kleben.

Lerninhalte

- Serielle Kinematik in der Robotik
- Aufbau eines Robotergliedes
- Aktoren (Elektromotoren & Getriebe)
- Sensoren (Lage- und Kraftmessung)
- Robotersteuerung (Hardware)
- End-Effektor und Werkzeugarten zur Ausführung einer Tätigkeit

Fragen

- Zeichnen Sie eine serielle Kinematik mit drei Roboterachsen auf.
- Der in der ersten Roboterachse verwendete Elektromotor hat eine Umdrehungszahl von 1000 Umdrehungen pro Minute. Das Harmonic Drive Getriebe eine Übersetzung von 225. Mit welcher Geschwindigkeit (in Umdrehungen pro Minute) dreht sich der Roboterarm?
- Erklären Sie in eigenen Worten die Funktionsweise eines optischen Encoders.

2.3 Freiheitsgrade

Dieses Kapitel bildet die Grundlage für die folgenden Kapitel „Arbeitsraum“ und „Kinematik“. Es wird der Begriff von Freiheitsgraden im Kontext von räumlichen Körpern und kinematischen Ketten erläutert.

2.3.1 Räumliche Freiheitsgrade

Die Anzahl der Freiheitsgrade eines Körpers im Raum bezeichnet die Anzahl der Variablen, die notwendig sind, um die Lage (Position und Orientierung) des Körpers gegenüber einem Bezugssystem beschreiben zu können.

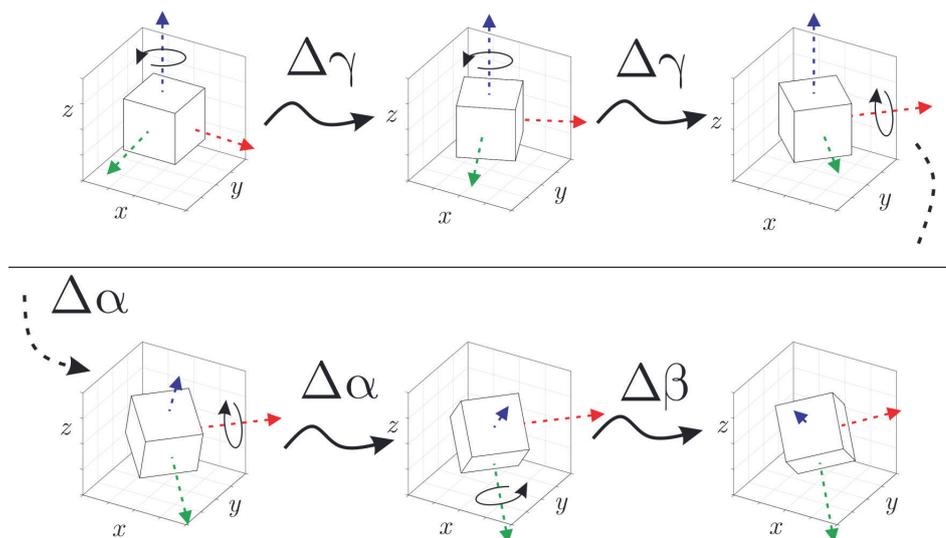


Abbildung 9: Würfel mit mehreren Rotationen

Die Position eines Körpers ist durch drei Komponenten aus unabhängigen Freiheitsgraden festgelegt. Die Position des Würfels in Abbildung 9 ist bspw. durch eine x-, y- und z-Komponente beschrieben und in allen sechs Abbildungen gleich. Um seine Ausrichtung im Raum festzulegen, benötigen wir weitere drei Werte. Daher hat der Würfel insgesamt sechs Freiheitsgrade im Raum. Diese sechs Freiheitsgrade setzen sich aus drei translatorischen (x, y, z) und drei rotatorischen (α, β, γ) Freiheitsgraden zusammen. In der Abbildung wird der Würfel stets um seine eigenen Achsen gedreht, und nicht um die x-, y- und z-Achse des Bezugssystems.

Es gibt also auch unterschiedliche Möglichkeiten die Rotationen eines Körpers zu beschreiben (Drehung um körperfeste Achsen oder raumfeste Achsen). In einigen Bedienungsfeldern von Robotersystemen kann das vom Anwender vorgegeben werden, da je nach Anwendungsfall die eine oder andere Beschreibung von Vorteil ist. Befindet sich der Endeffektor meines Roboters schon sehr nahe seiner Ziel-Lage und nur kleine Korrekturen der Ausrichtung sind gewünscht, ist es intuitiver um die Achsen des Greifers zu drehen, als um die räumlichen Achsen. Plane ich hingegen eine Aufgabe programmatisch ist es einfach die Orientierungen des Endeffektors bezüglich des raumfesten Koordinatensystems vorzugeben.

2.3.2 Freiheitsgrade kinematischer Ketten bei Robotern

Ein Industrieroboter weist in den meisten Fällen sechs Freiheitsgrade auf. Jeder Freiheitsgrad wird durch eine Roboterachse festgelegt. „[Roboter-]Achsen sind geführte, unabhängig voneinander angetriebene Glieder. Entsprechend der Führung unterscheidet man rotatorische Achsen (Drehachsen) und translatorische Achsen [(auch Linearachsen)]“. Eine Roboterachse hat nach dieser Definition dann genau einen (rotatorischen) Freiheitsgrad.

Die Anzahl der unabhängigen Freiheitsgrade am Endeffektor des Roboters wird durch die Summe der Freiheitsgrade aller Roboterachsen in der seriell-verketteten Struktur bestimmt. Ein Roboter mit drei unabhängigen rotatorischen Achsen kann also nur drei Freiheitsgrade am Endeffektor unabhängig voneinander bewegen.

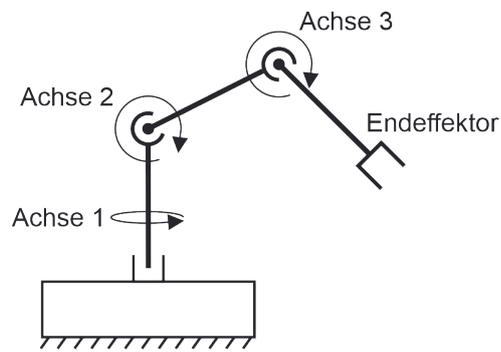


Abbildung 10: Schaubild 3-Achs-Kinematik

Beispiel: Der skizzierte Roboter in Abbildung 10 kann seinen Endeffektor also in drei räumlichen Freiheitsgeraden unabhängig positionieren. Beispielsweise kann die Position im Raum vorgegeben werden, sodass eine eindeutige Konfiguration der Robotergelenke dazu existiert. Voraussetzung dafür ist, dass sich die Position im Arbeitsraum des Roboters befindet.

Lerninhalte

- Definition von räumlichen Freiheitsgraden
- Definition von Freiheitsgraden einer kinematischen Kette

Fragen

- Welche sechs Freiheitsgrade gibt es im Raum?
- Wie berechnet man die Anzahl der Freiheitsgrade eines Roboters?

2.4 Arbeitsraum

Der Arbeitsraum eines Roboters bezieht sich auf den physischen und/oder virtuellen Bereich, in dem der Roboter sich bewegen und seine Aufgaben ausführen kann. Er wird durch die kinematische Struktur des Roboters und den Bewegungsbereich seiner Gelenke und des Endeffektors definiert. Der Arbeitsraum kann durch seine Abmessungen, Form und Zugänglichkeit charakterisiert werden und ist ein wichtiger Aspekt bei der Gestaltung und dem Betrieb eines Robotersystems. Unter Umständen kann auch die Anwendung den Arbeitsraum des Roboters eingrenzen, wenn der Roboter beispielsweise nahe einer Wand steht.

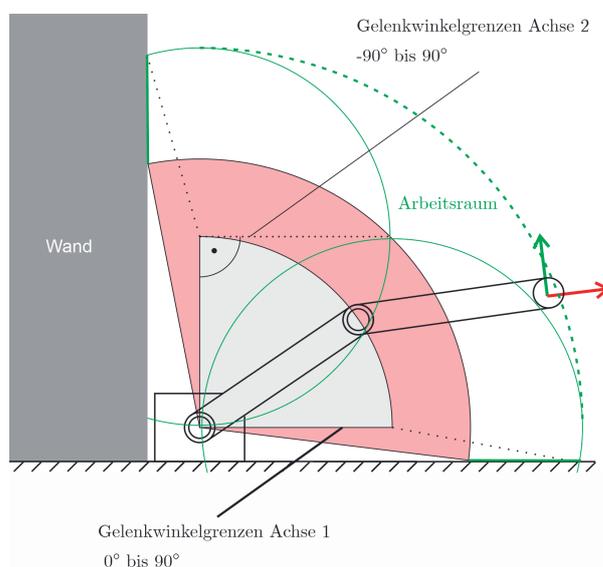


Abbildung 11: Arbeitsraum eines Roboters

Als Lage des Endeffektors ist dessen Position und Orientierung im Raum zu verstehen. Für viele Anwendungen (zum Beispiel beim Bohren) ist die Orientierung des Endeffektors mit vorzugeben. Allerdings ist die Rotation um die Längsachse des Bohrers nicht entscheidend beim Bohrvorgang und kann somit frei gewählt werden.

Neben konstruktionsbedingten Einschränkungen des Arbeitsraumes gibt es noch die sogenannten singulären Gelenkstellungen (auch Konfigurationen) (siehe Abschnitt „Singularitäten“), in denen der Roboter nicht agieren kann.

In Abbildung 11 ist ein planarer Roboter mit zwei Achsen skizziert. Der Roboter steht auf dem Boden neben einer Wand. Achse 1 kann von 0° bis 90° verfahren werden (grauer Bereich). Achse 2 kann von -90° bis 90° verfahren werden. Dies schränkt den Arbeitsraum durch den minimalen Abstand des Endeffektors zur Basis des Roboters wie skizziert (angedeutete -90° Position für zweite Achse) weiter ein (rötlicher Bereich). Die maximale Reichweite des Roboters ist durch die gestrichelte grüne Linie dargestellt. Diese ist nicht durchgängig bis zur Wand und zum Boden, da vorher die Achslimitierung der ersten Achse erreicht wird. Dazu sind die zwei grünen durchgezogenen Kreise eingezeichnet. Der eingeschlossene grüne Bereich ist der resultierende Arbeitsraum. Für räumliche Systeme mit vielen Freiheitsgraden ist eine vergleichbare Skizze nur rechnergestützt möglich.

Lerninhalte

- Erklärung des Begriffes Arbeitsraum
- Verständnis für die Begriffe Position und Orientierung

Fragen

- Erklären Sie in Ihren eigenen Worten den Arbeitsraum eines Roboters.
- Mit welchen 6 Parametern kann ein Objekt im Raum beschrieben werden?

2.5 Kinematik

2.5

In der Kinematik, bezogen auf die Robotik, geht es um geometrische Zusammenhänge zwischen Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von starren oder flexiblen Körpern. Im speziellen Fall der seriellen Kinematik geht es um verketteten Strukturen (Gelenken und Gliedern) und dem Zusammenhang der Gelenkwinkel und der Endeffektor-Lage. Hierbei spielen Kräfte und Momente keine Rolle. Die differenzielle Kinematik schließt für die gleichen Zusammenhänge dann Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ein.

2.5.1 Direkte Kinematik

In der Robotik beschreibt das direkte kinematische Problem (DKP) die Position und Orientierung des Endeffektors in Bezug auf die Roboterbasis, die von einer gegebenen Gelenkwinkelkonfiguration eingenommen wird. In seriellen Anordnungen von Robotergelenken kann die DKP durch eine Matrizenmultiplikation der Denavit-Hartenberg-Matrizen berechnet werden. Diese Berechnung kann analytisch und in Echtzeit auf Maschinensteuerungen erfolgen. Da diese Berechnungen komplex sind, wird auf eine detaillierte Erklärung an dieser Stelle verzichtet.

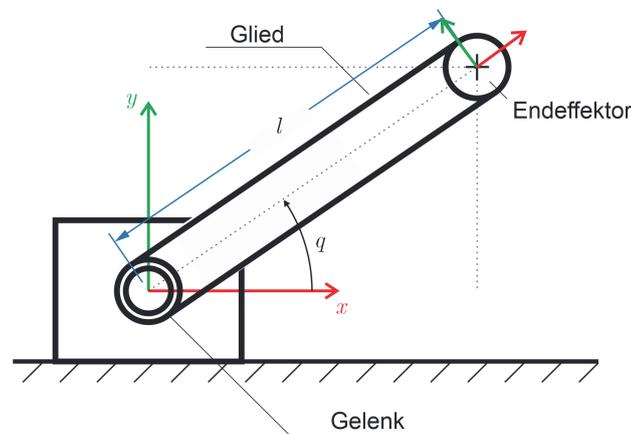


Abbildung 12: Vereinfachte Darstellung eines Robotergelenks

Beispiel: Ein zweidimensionales Beispiel, dargestellt in Abbildung 12 wird verwendet, um die Berechnung anschaulich zu erklären. Durch Anwendung des Sinus oder Cosinus und einer Umstellung zur unbekanntem Variable kann aus dem Rotationswinkel des Gelenks die Endeffektor-Koordinate berechnet werden. Die Länge des Robotergliedes l und die Winkelstellung des Robotergelenkes q müssen bekannt sein, um die Endeffektor-Koordinaten (X-, Y-Koordinate) zu berechnen. Mithilfe trigonometrischer Funktionen kann die Endeffektor-Position bestimmt werden. Zunächst sei hier der Zusammenhang über den Sinus gegeben als

$$\sin(q) = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}} = \frac{Y - \text{Koordinate des Endeffektors}}{\text{Länge des Robotergliedes}} = \frac{y}{l}$$

Daraus folgt für die Y-Koordinate des Endeffektors

$$\Rightarrow y = l \cdot \sin(q).$$

Analog folgt über den Cosinus der Wert für die X-Koordinate

$$x = l \cdot \cos(q).$$

Die Orientierung in diesem einfachen Fall entspricht dem Winkel q . Damit ergibt sich die vollständige Kinematik als

$$\mathbf{x}_{EE} = \mathbf{f}(q) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l \cdot \cos(q) \\ l \cdot \sin(q) \\ q \end{pmatrix}$$

Dieses zweidimensionale Beispiel soll die Berechnung des direkten kinematischen Problems veranschaulichen. In der Realität sind die kinematischen Zusammenhänge wesentlich komplexer und erfordern die Verwendung von Rotationsmatrizen und Vektoren sowie die Berücksichtigung von mehreren Gelenken und deren Winkelstellungen. Gut zu erkennen ist in diesem Beispiel auch der Arbeitsraum des Roboters. Dieser liegt auf einem Kreis mit dem Radius l . Dabei ist das Bezugssystem am Endeffektor immer um den Winkel $\alpha=q$ gedreht.

2.5.2 Inverse Kinematik

Das inverse kinematische Problem (auch IKP genannt) ist die Frage nach der Gelenkkonfiguration zu einer vorgegebenen Lage des Endeffektors. Gebraucht wird diese bspw. wenn eine Bahn des Endeffektors in der Anwendung in räumlichen Koordinaten geplant wird. Dies ist in der Realität meistens deutlich intuitiver für den Nutzer. Für die Steuerung der Gelenke muss allerdings die für eine vorgegebene Lage notwendige Gelenkwinkel-Konfiguration bestimmt werden.

Diese Berechnung ist deutlich schwieriger als das DKP und ein Grund dafür, warum sich bestimmte kinematische Anordnungen immer wieder bei verschiedenen Robotermodellen wiederholen. Denn für diese Anordnungen lässt sich das IKP besonders gut lösen.

Die inverse Kinematik berechnet die Gelenkstellungen eines Roboters, wenn die Position des Endeffektors bekannt oder vorgegeben ist. Es gibt jedoch eine Ausnahme, die sogenannten singulären Stellungen, bei denen die Berechnung der Gelenkstellungen nicht möglich ist. Es gibt keinen allgemeinen Formalismus zur Bestimmung einer Lösung für die inverse Kinematik. Die Lösung muss stattdessen spezifisch für die Geometrie des Roboters gefunden werden, was die Aufstellung der inversen Kinematik komplizierter machen kann.

Bei dem vorangegangenen, einfachen Beispiel mit einer Achse wird zunächst klar, dass nicht für jede beliebige Lage (x, y, α) ein Winkel q existiert. Die vorgegebene Lage muss im Arbeitsraum des Roboters liegen, sonst existiert keine Lösung.

Lerninhalte

- Definition des Begriffes Kinematik
- Unterschied zwischen offener und geschlossener kinematischer Kette
- Verständnis der Unterschiede zwischen direkter und inverser Kinematik

Fragen

- Welche Zusammenhänge beschreibt die Kinematik?
- Der in Abbildung 12 skizzierte Roboter hat die Länge $l = 500 \text{ mm}$ und die Achsposition $q = 32,76^\circ$. Berechnen Sie die x- und y-Position des Endeffektors bezogen auf das eingezeichnete Koordinatensystem mit der direkten Kinematik.
- Welche Unterschiede gibt es zwischen dem DKP und dem IKP?

2.6 Redundanzen

Wir betrachten hier zwei verschiedene Redundanzen. Die funktionale und die kinematische Redundanz. Die funktionale Redundanz hat einen sicherheitstechnischen Hintergrund, während es sich bei der kinematischen Redundanz um strukturelle Eigenschaften von Roboterkinematiken handelt.

2.6.1 Funktionale Redundanzen

Redundanz bedeutet, dass in einem technischen System eine zusätzliche oder vergleichbare Ressource vorhanden ist, die gleiche oder ähnliche Funktionen wie bereits vorhandene Ressourcen erfüllt. Das Ziel besteht darin, die Ausfall-, Funktions- und Betriebssicherheit zu erhöhen. Wenn beispielsweise ein Sensor ausfällt, kann ein zusätzlich eingebauter Sensor die Betriebssicherheit des Systems aufrechterhalten und einen Ausfall vermeiden. Dieses Konzept wird auch als funktionale Redundanz bezeichnet, da es darauf abzielt, sicherheitstechnische Systeme mehrfach parallel auszulegen, damit im Falle eines Ausfalls einer Komponente die anderen den Dienst weiterhin gewährleisten können. Zusätzlich versucht man, die redundanten Systeme räumlich voneinander zu trennen, um das Risiko einer gemeinsamen Störung zu minimieren. Eine zusätzliche Ressource kann auch von unterschiedlichen Herstellern stammen, um das Risiko eines systematischen Fehlers während der Konstruktion oder Produktion des Bauteils zu vermeiden. Dieses Konzept wird auch als diversitäre Redundanz bezeichnet.

2.6.2 Kinematische Redundanzen

In der Robotik bezieht sich kinematische Redundanz auf die Eigenschaft, dass ein Roboterarm oder -manipulator mehr Freiheitsgrade besitzt als für eine bestimmte Aufgabe erforderlich sind. Mit anderen Worten, der Roboter hat die Fähigkeit, die gleiche Aufgabe auf verschiedene Weise auszuführen, indem er zusätzliche Gelenke oder Achsen nutzt, die nicht unbedingt benötigt werden.

Dies ermöglicht es dem Roboter, eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit zu erreichen, jedoch erfordert es auch eine komplexe Steuerung und Planung, um die Bewegungen des Roboters zu koordinieren und optimieren. In diesem Zusammenhang ist die kinematische Redundanz ein wichtiges Thema in der Forschung, da sie dazu beitragen kann, die Leistungsfähigkeit und Effizienz von Robotersystemen zu verbessern.

Ein Beispiel für Redundanz kann am menschlichen Arm veranschaulicht werden. Wenn man die Hand flach auf den Tisch legt und die Schulter starr hält (das Kugelgelenk darf sich bewegen), kann man den Ellenbogen bewegen. Der Grund dafür sind die insgesamt sieben Gelenke in Schulter, Ellenbogen und Handgelenk. Dadurch entsteht ein zusätzlicher (redundanter) Freiheitsgrad bei der Lagevorgabe der Hand im dreidimensionalen Raum, welcher es ermöglicht, eine Nullraumbewegung durchzuführen. Obwohl sich die kinematische Struktur des Arms bewegt, bleiben die Positionen der Hand (Endeffektor) und des Oberkörpers (Roboterbasis) unverändert.

Bei einer höheren Anzahl an Gelenken fallen Mehrkosten an, da die Harmonic Drive Getriebe und Antriebseinheiten einen hohen Anteil der Materialkosten tragen.

Lerninhalte

- Definition der Redundanz
- Erklärung von Redundanz in Bezug auf die Robotik

Fragen

- Welche Redundanz liegt bei einem Roboter mit 7-Achsen vor?

2.7 Singularitäten

Singularitäten treten in besonderen Stellungen der Roboterachsen auf und führen zu einer Reduktion des Arbeitsraumes des Roboters. Vor allem in der Nähe von singulären Konfigurationen kommt es zu hohen Gelenkgeschwindigkeiten und der Roboter kann in bestimmte Raumrichtungen seine Sensitivität gegenüber Kräfteinwirkungen verlieren (Verletzungsrisiko). Dies stellt insbesondere bei kooperierenden Anwendungen, in denen der Mensch ohne Schutzzaun direkt mit dem Roboter zusammenarbeitet, ein hohes Sicherheitsrisiko dar.

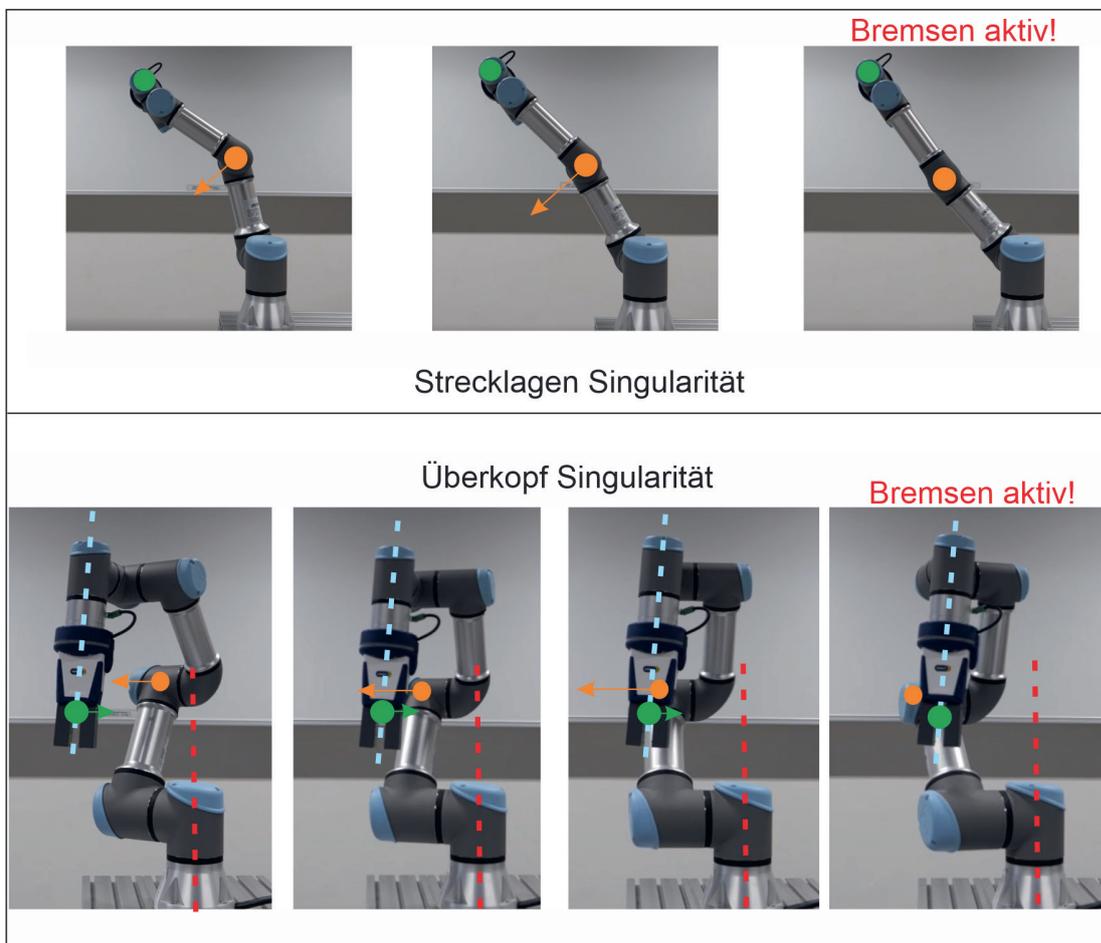


Abbildung 13: Singularitäten bei einem Universal Robots UR3

Beispiel: In Abbildung 13 sind zwei Beispiele für singuläre Konfiguration verdeutlicht. Die Strecklagen-Singularität tritt am Rande des Arbeitsbereiches des Roboters auf, da dort die Achsen zwei und drei den gleichen Winkel aufweisen. Durch die völlige Streckung des Armes wird die Bewegungsmöglichkeit eingeschränkt. Somit ist es nicht möglich in einer lokalen Umgebung, den Endeffektor in radiale Richtung zu bewegen. Ein Freiheitsgrad geht verloren. Eine Kraft, die jetzt in Längsrichtung des Roboters auf den Endeffektor wirkt, während der Roboter in der Strecklage verweilt, kann nicht über die Motorströme und auch nicht über Drehmomenten-Sensoren detektiert werden. Folglich kann der Roboter auch nicht nachgiebig und sicher reagieren. Gut zu erkennen ist hier die schnelle Bewegung der orange markierten Achse bei relativ geringer Bewegung des in grün markierten Endeffektors.

Darunter dargestellt ist die Überkopf-Singularität, bei der die zwei eingezeichneten (gestrichelten) Achsen sich nähern. Bevor sie jedoch übereinanderliegen, löst das System einen Stop aus und zieht die Bremsen an. Kurz vorher kann wieder beobachtet werden, wie sich das orange markierte Gelenk deutlich schneller als der Endeffektor bewegt.

Im Arbeitsraum des Roboters gibt es auch weniger intuitive singuläre Konfigurationen. Diese singulären Stellungen können mathematisch berechnet und softwareseitig erkannt werden. Die Systeme haben unterschiedliche Strategien auf eine solche Konfiguration zu reagieren. Häufig blockieren als Sicherheitsmaßnahme die Bremsen in den Gelenken und der Roboter muss erst wieder freigeschaltet werden.

Der Ursprung ist ein mathematisches Problem. Der Zusammenhang zwischen einer Änderung des Endeffektors und einer Änderung der Gelenkwinkel kann als linearisiertes Gleichungssystem dargestellt werden, welches im Falle einer Singularität nicht lösbar ist. Das bedeutet anschaulich, dass es einen oder mehrere Endeffektor-Freiheitsgrade gibt, die sich durch das Ändern der Gelenkwinkel (in dieser Konfiguration!) nicht mehr beeinflussen lassen. Auf eine vollständige Beschreibung des mathematischen Problems wird an dieser Stelle verzichtet.

Die Robotersteuerung kann somit in der singulären Stellung kein eindeutiges Ergebnis berechnen. Deshalb wird in der Regel nie eine exakte Singularität erreicht. Nur eine Annäherung an diesen Bereich ist möglich. Durch den eingeschränkten Freiheitsgrad in der Nähe einer Singularität kann man auch feststellen, dass die Rotationsgeschwindigkeiten der einzelnen Achsen sichtbar und hörbar ansteigt. Theoretisch würden die Geschwindigkeiten ins Unendliche steigen. Jedoch ist das technisch nicht möglich da die Singularität nie exakt erreicht wird und die Steuerung zuvor abschaltet.

Lerninhalte

- Singularitäten in der Robotik
- Sicherheitsrelevante Aspekte und Folgen einer. singulärer Konfigurationen

Fragen

- Wie erkennt man, dass sich der Roboter in einer singulären Stellung befindet?
- Wie reagieren Systeme auf singuläre Konfigurationen?

2.8 Dynamik

Die Dynamik ist das Teilgebiet der Mechanik, dass sich mit der Wirkung von Kräften erfasst. In der Mechanik wird unter Dynamik die Beschreibung der Bewegung von Körpern in Abhängigkeit von den einwirkenden Kräften verstanden. In diesem Kapitel werden im Vergleich zur Kinematik am Roboter wirkende Kräfte berücksichtigt.

2.8.1 Simulation mithilfe der direkten Dynamik

Um komplexe Systeme analysieren zu können, benötigen Ingenieure, Anlagenplaner und Wissenschaftler digitale Simulationsumgebungen, die die Gegebenheiten korrekt abbilden. Dazu gehört das physikalische Verhalten eines Roboters. Die direkte Dynamik, beschreibt die Gelenkbeschleunigungen \ddot{q} , welche aus Antriebskräften τ mit den aktuellen Gelenkwinkeln q und Gelenkgeschwindigkeiten \dot{q} sowie den externen Kräften F am Endeffektor resultieren. Der Zusammenhang wird beschrieben durch eine Funktion f

$$\ddot{q}(t) = f(q(t), \dot{q}(t), \tau(t), F(t)).$$

Anwendung finden derartige Modelle primär in der Robotersimulation. Die direkte Dynamik wird seltener in der Praxis benötigt. Simulationsumgebungen wie MuJoCo (Multiple Joint Contact), Matlab Robotics Toolbox oder Software von Roboterherstellern wie Universal ermöglichen unter anderem die Untersuchung von Roboteranwendungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit, Auslegung der Roboter, Produktionszeit und ggf. Aufbau der Peripherie.

2.8.2 Inverse Dynamik zur Berechnung von notwendigen Motorströmen

Im Gegensatz dazu beschreibt die inverse Dynamik, die erforderlichen generalisierten Kräfte und Momente τ für eine gegebene Gelenkbewegung q , \dot{q} , \ddot{q} sowie externen Kräften am Endeffektor F . Das bedeutet praktisch, dass dem Roboter ein gewünschtes dynamisches Verhalten vorgegeben wird (zum Beispiel aus einer Bahnplanung) und die Robotersteuerung daraus die Momente der Motoren errechnet, um diese Bewegung korrekt auszuführen. In der Praxis ist dies häufig der Fall, wenn ein System gesteuert wird. Bei jedem Punkt den man dem Roboter über das Bediengerät vorgibt wird in der Regel auch nach der gewünschten Geschwindigkeit und Beschleunigung gefragt. Der funktionale Zusammenhang lautet demnach

$$\tau(t) = g(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t), F(t))$$

2.8.3 Bahnplanung

Gibt der Anwender dem Roboter mehrere Point-to-Point Bewegungen vor, die aus mehreren einzelnen Endeffektor-Lagen bestehen, muss eine Verbindung einzelner Punkte berechnet werden. Dieser Vorgang kann durch eine Interpolation gelöst werden. Dazu gibt es eine Vielzahl an Ansätzen die alle einen zeitlichen Verlauf der Gelenkwinkel, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen liefern. Solche Ansätze sind Teil der Bahnplanung. Im Gegensatz zu einer Wegplanung wird hier explizit die Zeit mit einbezogen. Mithilfe der inversen Dynamik können aus den entstandenen Bahnen die zeitlichen Verläufe für die generalisierten Kräfte und Momente berechnet und an die Steuerung übergeben werden. Dies wird im nächsten Kapitel aufgegriffen.

Neben der Point-to-Point Bewegung gibt es noch die Continuous-Path-Bewegung die von einer Start- zu einer Endlage über Zwischenlagen interpoliert und den Interpolator, der im Regeltakt der Steuerung Sollwerte für die Bahn an die Motoren liefert.

Trajektorien- und Bahnplanung beschreiben den selben Vorgang.

Lerninhalte

- Was versteht man unter Dynamik?
- Direkte Dynamik
- Inverse Dynamik
- Was ist eine Bahnplanung?

Frage

- Erklären Sie den Unterschied zwischen Kinematik und Dynamik in der Physik.

2.9 Steuerung und Regelung

Ziel dieses abschließenden Abschnitts ist es zu verstehen wie alle bisher vorgestellten Komponenten zusammenwirken, um Aufgaben in der realen Welt zu bearbeiten. Dabei wird anhand eines Beispiels auf den Unterschied zwischen Steuern und Regeln eingegangen.

Der Prozessrechner innerhalb der Steuereinheit eines Roboters ist für die Verarbeitung aller Informationen im System zuständig. Die grafische Benutzeroberfläche (engl. Graphical user interface (GUI)) eines Cobots wie dem Universal Robot, Franka Emikas oder auch Dobot erlaubt dem Nutzer mit den im Roboter laufenden Programmen zu kommunizieren. Im Hintergrund laufen beispielsweise Zustandsautomaten, Sicherheitsfunktionen und Regler, die das Verhalten des Roboters bestimmen.

2.9.1 Bedienung eines Roboters

Ein Bediener nutzt die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Schnittstellen, welche meist in Form einer GUI vorliegen. Hier können je nach Funktionsumfang des Systems bspw. Positionen angelernt (geteached), Soll-Positionen in Raumkoordinaten oder Gelenkwinkeln eingegeben oder blockbasiert Programme geschrieben werden (für genaue Beschreibungen sind in diesem Kompendium eigene Abschnitte vorhanden). Oft erlauben die Systeme auch bis zu einem gewissen Grad die textbasierte Programmierung mit vordefinierten Kommunikationsschnittstellen.

Die Befehle werden über die Nutzerschnittstelle (user interface) an den Prozessrechner übermittelt. Hier sind häufig Zustandsautomaten hinterlegt. Dies sind Programme, die sich in einem bestimmten Zustand befinden (z. B. „warte auf Nutzereingabe“) und durch Ereignisse (z. B. „Nutzerbefehl erkannt“) in einen anderen Zustand (z. B. „werte Nutzereingabe aus“) überführt werden. Aus diesen Zuständen können weitere Programme gestartet werden, die hintereinander oder gleichzeitig ausgeführt werden.

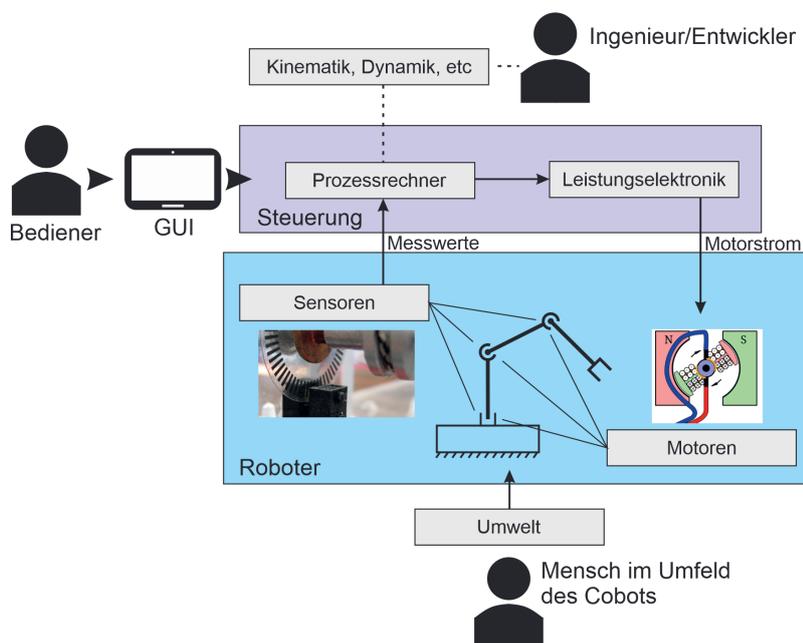


Abbildung 14: Zusammenhang vorheriger Kapitel

2.9.2 Steuerung eines Roboters

Wir folgen beispielhaft einer Nutzereingabe „Beweg den Endeffektor zu Position x“. Auf dem Prozessrechner muss nun berechnet werden, wie der Roboter aus seiner aktuellen zur vorgegebenen Position kommt. Mithilfe der inversen Kinematik (siehe Kapitel Kinematik) werden die notwendigen Gelenkwinkel zum Erreichen von Position x berechnet. Anschließend plant der Roboter eine Bahn von den aktuellen Gelenkwinkeln zu den gewünschten (Stichwort: Bahnplanung). Hier gibt es eine Vielzahl von mathematischen Ansätzen zur Interpolation dieser beiden Gelenkwinkel. Ergebnis ist hier ein Bewegungsprofil mit zeitlichen Verläufen der Winkelpositionen, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen.

Setzt man diese zeitlichen Verläufe in die inverse Dynamik ein, erhält man für jeden Zeitpunkt ein Antriebsmoment, das über den Zusammenhang des Getriebes und des Elektromotors in einen Motorstrom umgerechnet wird. Dieser Motorstrom wird jetzt durch die Leistungselektronik gestellt und der Roboter startet seine Bewegung zur Position x .

Was hier beschrieben wird, ist eine klassische modellbasierte Steuerung. Ob der Roboter sein Ziel tatsächlich erreicht, wird mit dieser Bewegungsstrategie nicht überprüft. Es wird voll darauf vertraut, dass die Modelle genau zu dem Roboter passen und dass es nicht zur Kollision kommt. Ein solcher Ansatz ist nicht für die Mensch-Roboter-Kollaboration geeignet. Hierzu muss der Roboter taktil sein, um korrekt reagieren zu können.

2.9.3 Regelung eines Roboters

Bei der Regelung wird in Gegensatz zur Steuerung auf Sensoren und Messtechnik zurückgegriffen, um den aktuellen Zustand des Roboters und der Umgebung korrekt zu erfassen. Anschaulich kann man diesen Unterschied gut mit einem Zettel und einem Stift demonstrieren.

Die Norm **DIN IEC 60050-351** definiert die Regelung wie folgt: „Die Regelung bzw. das Regeln ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“

Kleines Experiment zur Veranschaulichung von Steuerung und Regelung: Man platziert ein Blattpapier auf dem Tisch und setzt zwei Kreuze mit einem Bleistift. Mit dem Stift in der Hand wird die Spitze auf eins der beiden Kreuze gesetzt. Das Ziel ist jetzt eine Bahn vom ersten Kreuz (der Ist-Position) zum zweiten Kreuz (der Soll-Position) zu ziehen und genau auf dem zweiten Kreuz zu stoppen. Dieser Vorgang wird einmal mit offenen und einmal mit geschlossenen Augen durchgeführt. Um dabei äußere Einflüsse zu simulieren kann eine zweite Person das Blatt bei dem Vorgang leicht bewegen.

Das Ergebnis ist offensichtlich. Wenn wir den Ist-Zustand unseres Armes und des Stifts sehen können, dann wissen wir wohin wir korrigieren müssen. Sind die Augen geschlossen muss sich vollständig auf unsere Einschätzung verlassen werden und bei Störungen liegt diese komplett daneben. Die Augen sind in diesem Beispiel Sensoren, unser Arm der Roboter, der Stift unser End-Effektor, das Papier der Arbeitsraum, und die andere Person eine Störgröße. Die Bahnplanung führen wir im Kopf automatisch durch. Zu jedem Zeitpunkt korrigieren wir unsere Eingabe (Muskelkraft) auf Basis eines Messsignals (Stiftposition über Augen). Diesen Prozess könnte man vereinfacht als Regelung bezeichnen.

Regelungsstrategien von Robotern sind komplex. Beim vorangegangenen Beispiel aus der Steuerung würde der Motorstrom zusätzlich durch eine Auswertung des Fehlers zwischen gemessenen Ist-Gelenkwinkel (aus den Inkrementalgebern) und Soll-Gelenkwinkel (aus der Bahnplanung) beeinflusst werden. Bei der Handführung eines Cobots werden durch das Drücken der entsprechenden Schalter spezielle Regelstrategien aktiviert, die das Eigengewicht des Roboters kompensieren (zero-gravity Modus) und auf externe Kräfte durch den Menschen reagieren in dem sich der Roboter aktiv wegbewegt.

Lerninhalte

- Zusammenhang vorangegangener Kapitel
- Erklärung des Begriffes Regelung
- Erklärung des Begriffes Steuerung
- Unterschiede zwischen Steuerung und Regelung

Frage

- Was sind der Unterschied zwischen einer Steuerung und einer Regelung?
- Erklären Sie in Ihren eigenen Worten den Begriff Regelung.

2.10 Programmierung

Für die Programmierung von Robotersystemen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die sich je nach Anwendungsgebiet, Hersteller und Vorgehensweise unterscheiden. Für kollaborative Systeme sind dies grundsätzlich die **Offline-Programmierung**, **Online-Programmierung** und **Handführung**.

Bei der **Online-Programmierung** wird der Roboter in einer vom Hersteller bereitgestellten Sprache programmiert. Die Eingabe findet dabei beispielsweise über ein Tablet statt, welches über eine Datenleitung mit dem System verbunden sein kann. Ein Vorteil dieser Methode ist die schnelle Anpassung von Programmteilen, da potentiell Fehler sehr schnell erkannt werden können. Ein offensichtlicher Nachteil besteht dabei aber in der Bindung an das System, wodurch die Flexibilität in der Programmierung eingeschränkt wird.

Bei der **Offline-Programmierung** wird ein Programm auf einem beliebigen Computer erstellt und anschließend auf den Roboter übertragen. Je nach System kann die Programmierung dabei zum Beispiel in einer vom Hersteller bereitgestellten Simulationsumgebung erfolgen. Darin lassen sich meistens erzeugte Programme an einer Simulation des Roboters testen. Dafür werden häufig **blockbasierte Programmiersprachen** verwendet, welche sich aufgrund ihrer geringen Komplexität insbesondere für jüngere Menschen gut eignen. Dabei werden auf einer grafischen Oberfläche kleine Bausteine oder Blöcke, die jeweils einen eigenen Befehl darstellen, hin- und hergeschoben. Diese Befehle können je nach Anwendungsfall beliebige Funktionen abbilden, wie zum Beispiel die Ausführung einer kleinen Bewegung. Die Abfolge, in der die Blöcke angeordnet werden bestimmt die Reihenfolge, in der die Befehle umgesetzt werden. Manche Bausteine beinhalten außerdem Variablen oder Parameter, über die sich beispielsweise die Geschwindigkeit oder Beschleunigung einstellen lassen.

Eine Alternative zu den blockbasierten Sprachen stellen **textbasierte Sprachen** dar. Im Robotikbereich sind sowohl C/C++ als auch Python weit verbreitet, die auf der einen Seite zwar komplexer, auf der anderen Seite dafür aber deutlich umfangreicher als blockbasierte Sprachen sind. Dadurch ergeben sich mehr Möglichkeiten und die Funktionalitäten der Sprachen wie Schleifen oder „If-Anweisungen“ können frei genutzt werden. Je nach Robotersystem wäre dies bei der Verwendung der entsprechenden blockbasierten Sprachen nicht oder nur teilweise umsetzbar.

Ein Vorteil der Offline-Programmierung im Gegensatz zur Online-Programmierung ist die dadurch vorhandene Flexibilität, da Programme ohne dauerhafte Anbindung an das Robotersystem erstellt und bearbeitet werden können. Allerdings sind im Anschluss an die Übertragung auf das System häufig kleine Anpassungen bei der Position oder der Orientierung notwendig, da die Simulationsumgebung keine vollständige Abbildung der Realität ermöglicht und somit Abweichungen in der Programmierung fast nicht vermieden werden können.

Eine dritte Möglichkeit zur Programmierung besteht in der **Handführung**. Diese beschränkt sich im Wesentlichen auf die Nutzung von leichten, kollaborativen Robotersystemen. Bei der Handführung kann durch das Drücken einer entsprechenden Taste am Roboter manuell eine Bewegung vom Nutzer durchgeführt werden, die im Nachhinein vom Robotersystem selbstständig wiederholt werden kann. Dadurch ist eine Nachbildung von Bewegungen oder einer ganzen Abfolge von Bewegungen möglich. Diese Vorgehensweise ist sehr einfach und anschaulich, wodurch eine schnelle Programmierung und Ausführung eines Programmes erreicht werden kann. Zusätzlich können Fehler verhindert werden, bevor diese überhaupt auftreten. Ein Problem dabei besteht allerdings in den stark eingeschränkten Möglichkeiten, die nur durch eine Online- oder Offlineprogrammierung realisierbar sind.

2.11 Quellen

Albu-Schäffer, A., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimböck, T., & Hirzinger, G. (2007). The DLR Light-weight Robot – Design and Control Concepts for Robots in Human Environments. *Industrial Robot: An International Journal*, 34, 376–385.

Craig, J. J. (2004). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. New, Jersey, USA: Prentice Hall.
Gevatter, H.-J., & Grünhaupt, U. (Hrsg.). (2006). *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/3-540-34823-9

Heimann, B., Gerth, W., & Popp, K. (2006). *Mechatronik: Komponenten – Methoden – Beispiele*. München, Deutschland: Carl Hanser Verlag.

Hesse, S., & Schnell, G. (2011). *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion – Ausführung – Anwendung*. Wiesbaden, Deutschland: Vieweg+Teubner Verlag.

Hirzinger, G., Sporer, N., Albu-Schaffer, A., Hdmle, M., Krenn, R., Pascucci, A., & Schedl, M. (2002). DLR's Torque-Controlled Light Weight Robot III – are we Reaching the Technological Limits now? *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, (S. 1710–1716). Washington.

Khalil, W., & Dombre, E. (2002). *Modeling, Identification & Control of Robots*. New, York, USA: Routledge.
Pfeiffer, F., & Reithmeier, E. (1987). *Roboterdynamik*. Stuttgart, Deutschland: Teubner Verlag.

Schrüfer, E. (2007). *Elektrische Messtechnik*. München, Deutschland: Carl Hanser Verlag.

Sciavicco, L., & Siciliano, B. (2000). *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Berlin, Deutschland: Springer.

Siciliano, B., & Khatib, O. (Hrsg.). (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-30301-5

Bildquellen

[#Q1] Abbildung des Honda Roboters: Zoohouse, The Honda ASIMO humanoid robot. 2010. Zugegriffen: 01.05.2023. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HONDA_ASIMO.jpg [CC-BY-SA-3.0], Abbildung des Roboters Pepper: Tokumeigakarinoashima, Service-Roboter Pepper. 2014. Zugegriffen: 01.05.2023. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SoftBank_pepper.JPG [CC0 1.0]

[#Q2] Standbild aus: MichaelFrey, Animation einer Gleichstrommaschine. 2015. Zugegriffen: 01.05.2023. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animation_einer_Gleichstrommaschine.gif [CC-BY-SA-3.0]

[#Q3] Jahobr & Kaboldy, Schnitt durch ein Harmonic-Drive-Getriebe. 2018. Zugegriffen: 01.05.2023. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harmonic_drive_cross_Legend.svg [CC-BY-3.0]

[#Q4] Kombination und Beschriftung zweier Bilder: (1) Tycho, Inkrementalgeber mit Gabellichtschranke. 2008. Zugegriffen: 01.05.2023. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inkrementalgeber_mit_gabellichtschranke.JPG [CC-BY-SA-3.0], (2) MatthiasDD, Schema eines Glasmaßstabes. 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linear_Scale_Scheme.svg [CC-BY-SA-3.0]

[#Q5] Um Drehmomentenpfeile und Beschriftung ergänzt: M. Laible, Käfigläufer als Federkörper (Prinzip). 2007. Zugegriffen: 01.05.2023. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Torque_Cage.gif#/media/File:Torque_Cage.gif [CC BY-SA 2.5]

[#Q6] Foto Sawyer Roboter: M. Laible, Sawyer Collaborative Robot with a ClickSmart gripper from Ret-hink Robotics. 2018. Zugegriffen: 01.05.2023. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ClickSmart_6.jpg#/media/File:ClickSmart_6.jpg [CC BY 4.0]