

Sparen Sie 10% bei der nächsten Bestellung!

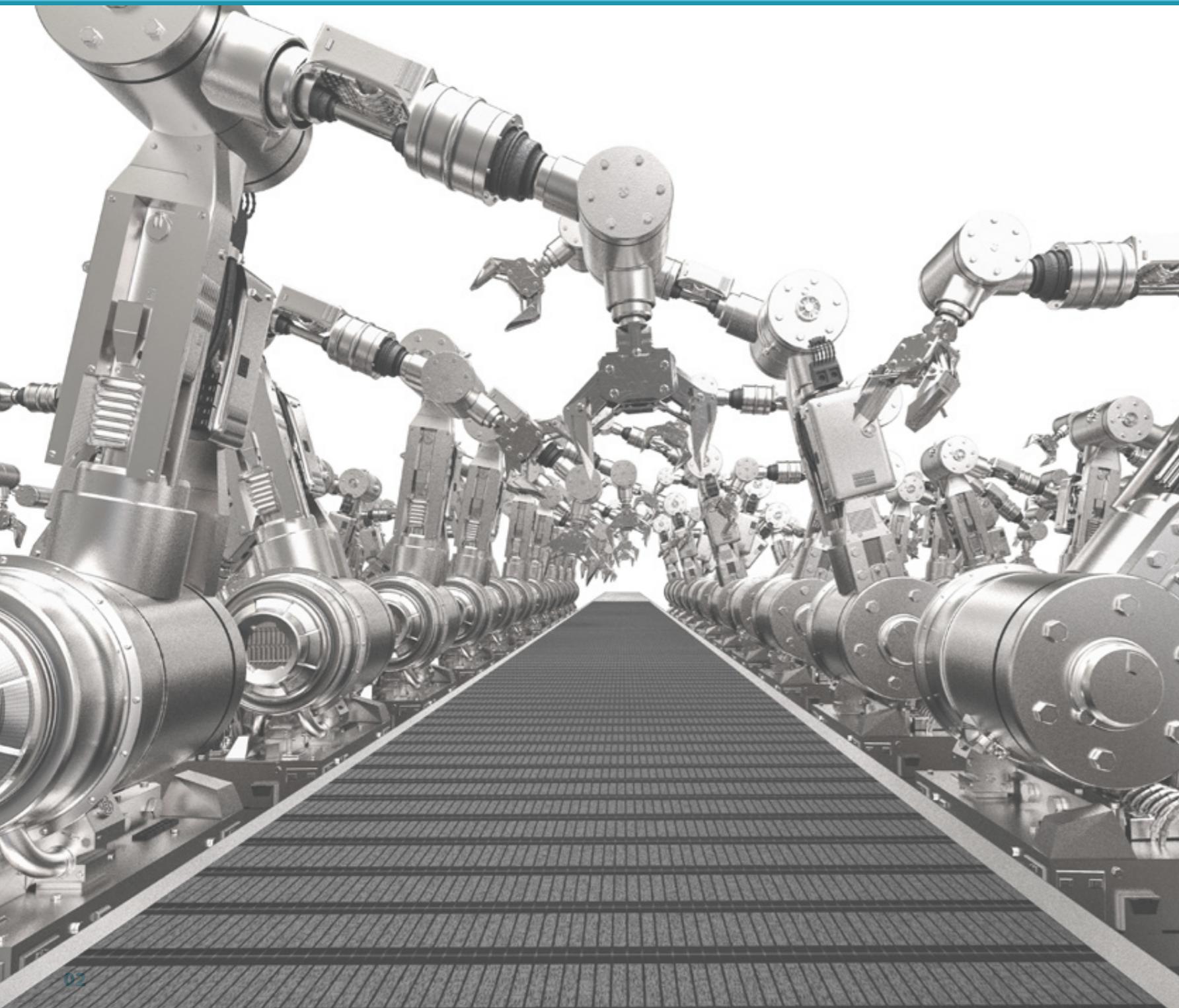
Geben Sie den Gutschein-**Code tuTf1T3xer** im Warenkorb ein.

LEITFÄDEN ROBOTIK UND AUTOMATISIERUNG



DISTRELEC

Es gelten unsere AGB



VORWORT ZUM THEMA ROBOTIK

Die Entwicklungssprünge in der Welt der Robotik verlaufen rasant, und die bahnbrechenden Innovationen in der Automation werden in den kommenden Jahren eher noch zunehmen. Roboter werden zum Alltag, und in der Welt der Fertigung sind Industrieroboter längst entscheidende Faktoren für mehr Effizienz und den Inbegriff einer modernen Fabrik.

Bei Distrelec sind wir stolz darauf, Unternehmen, Laboren, wissenschaftlichen Einrichtungen und Hobby-Tüftlern die Komponenten zu liefern, mit denen sie die nächste große Innovation im Bereich der Automatisierung entwickeln können.

Wir legen außerdem Wert darauf, Fachinformationen bereitzustellen und bei den aktuellen Entwicklungen auf dem neuesten Stand zu bleiben. Darum haben wir diesen Robotik-Leitfaden als Referenz für alle entwickelt, die im Bereich Robotik arbeiten oder sich dafür interessieren.

Steve Herd

Leiter Produktmanagement



Inhaltsverzeichnis

06	DIE GESCHICHTE DER ROBOTIK	50	RECHENOPERATIONEN IN DER ROBOTIK
10	ROBOTERTYPEN UND ANWENDUNGSBEREICHE	56	SOFTWARE FÜR DIE ROBOTIK
14	INDUSTRIEROBOTER	60	AI IN DER ROBOTIK
22	JENSEITS DER FERTIGUNG – ROBOTER UND DIE LIEFERKETTE	68	EFFEKTOREN
26	AUFBAU UND ERHALT DER VERNETZUNG	72	DIE ZUKUNFT VON FERTIGUNG UND MRO
34	SEHEN, HÖREN, BERÜHREN, BEWEGEN	78	WIE GESTALTET SICH DIE ZUKUNFT DER ROBOTIK?
42	LEISTUNG UND BEWEGUNGSSTEUERUNG VON ROBOTERN		



Die Geschichte der Robotik

Das Thema Robotik wurde bereits in der antiken Mythologie behandelt, als der eherne Riese Talos im alten Griechenland von Zeus an Europa vergeben wurde und die ersten zahnradgetriebenen Mechanismen entstanden. Seither hat sich vieles verändert. Die Erfindungen vor dem 18. Jahrhundert und die Fortschritte in der Automation brachten Geräte und Musikinstrumente hervor, die mit Wasser, Wind und Dampf angetrieben wurden. Im 18. Jahrhundert wurden Spielzeuge und andere Neuheiten entwickelt, die sich dank verschiedener Gewichte und Zahnräder eigenständig bewegten.

Im darauffolgenden Jahrhundert entstanden die ersten Erfindungen, die dem Menschen durch Automation die Arbeit erleichterten. Beispielhaft sind der programmierbare Webstuhl von Joseph-Marie Jacquard oder die Dampfmaschine von Zadoc Dederick in Form eines karrenziehenden Mannes zu nennen.

1913 baute Henry Ford die erste Fertigungsstraße mit Förderband, und 1920 prägte Karel Čapek erstmals die Bezeichnung „Roboter“. 1928 wurde in London der erste humanoide Roboter vorgestellt, der Hände und Kopf bewegen konnte, und 1929 hatte Makoto Nishimura einen Roboter mit Gesichtsausdrücken entwickelt. Nur wenige Jahre später gab es Roboter, die gehen konnten, und es sammelten sich immer mehr Erfindungen zur Beschleunigung menschlicher Arbeiten. 1942 entwickelte das Unternehmen DeVilbiss einen Lackierroboter, der erheblich schneller arbeitete als es einem Menschen möglich wäre. 1950 führte Alan Turing Tests durch, um zu prüfen, ob Maschinen eigenständig denken könnten.

Der weltweit erste Roboterarm wurde 1963 entwickelt, kurz danach traten auch mehrgelenkige Arme und computergesteuerte Roboterarme in Erscheinung. 1970 gab es bereits Roboter, die ihre Umgebung wahrnehmen und darauf reagieren konnten. Zur selben Zeit wurde in Japan der erste Android vorgestellt, der laufen, greifen, Gegenstände transportieren und wahrnehmen sowie mit seiner Umwelt kommunizieren konnte.

Die 1970er Jahre brachten umfassende Fortschritte im Bereich der Bewegungs- und Laufroboter hervor. KUKA baute den ersten Industrieroboter mit sechs elektromechanischen Achsen, und 1973 wurde der anthropomorphe Roboter WABOT-1 entwickelt. Damit war der erste Humanoidroboter in Lebensgröße geschaffen, der volle Kontrolle über seine Gliedmaßen, sein Sehvermögen und seine Kommunikation hatte.

In den 1980er Jahren entstanden Roboter mit mehr Beinen und Freiheitsgraden. Honda begann mit der Erforschung und Entwicklung humanoider Roboter. 1989 entwickelte MIT einen

sechsbeinigen Roboter, der mit vier Mikroprozessoren, 22 Sensoren und 12 Servomotoren gesteuert wurde.

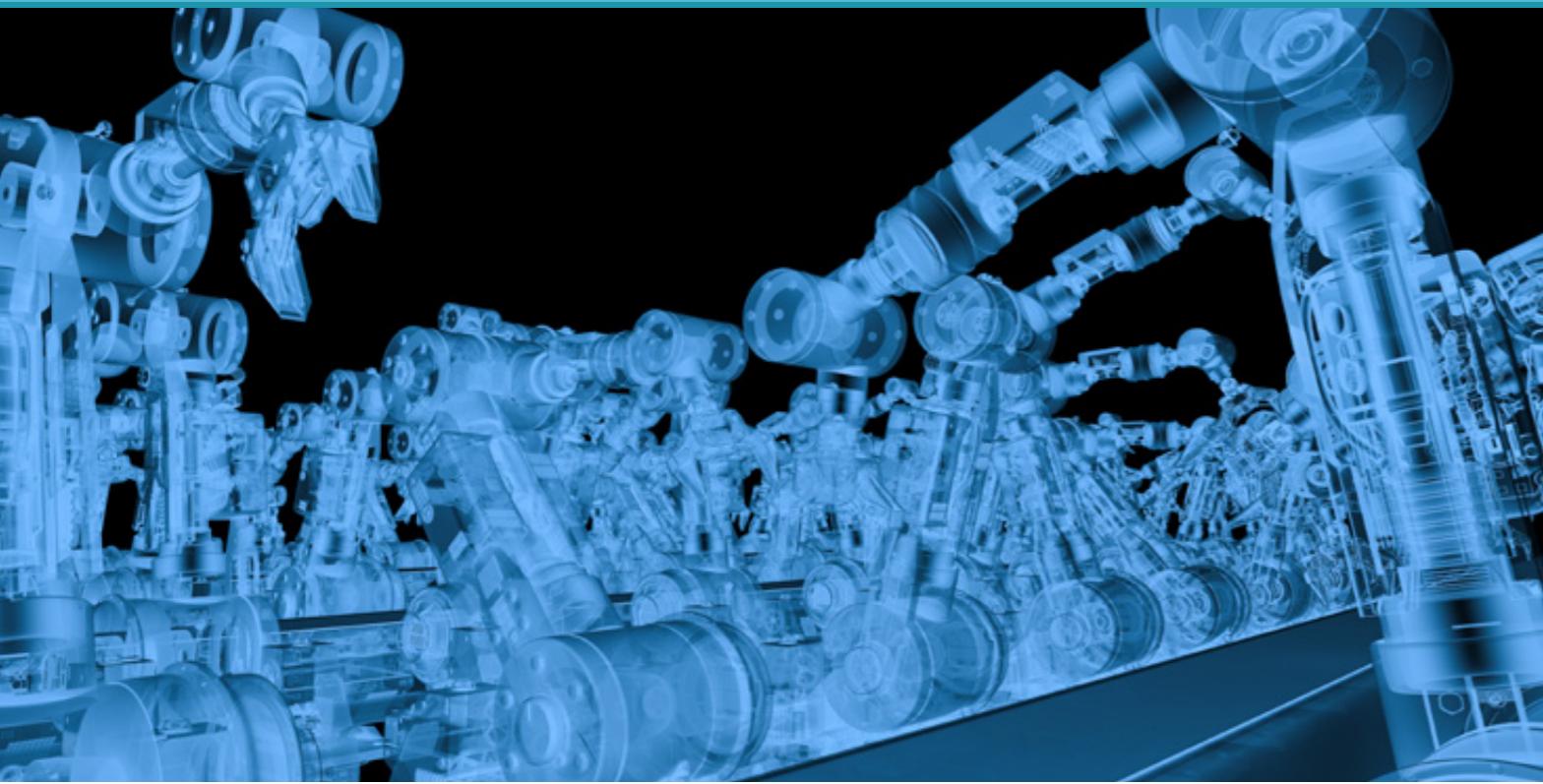
In den 1990er Jahren kam Schwung in die Robotik: vom Meeresforscher RoboTuna bis hin zu Neuentwicklungen in der Medizintechnik wie CyberKnife, einem Roboter für die Tumorbehandlung in der Radiochirurgie. Selbst der Weltraum war vor Robotern nicht mehr sicher. NASA schoss den Pathfinder zum Mars, der den roten Planeten erkundete und ganz neue Erkenntnisse an die Erde zurückfunkte.

Das 21. Jahrhundert hat bislang eine Vielzahl neuer, erstaunlicher Innovationen in Robotik und Automation hervorgebracht. 2000 waren nach UN-Schätzungen weltweit über 742.000 Industrieroboter im Einsatz. 2006 stellte die Cornell University den vierbeinigen Starfish-Roboter vor, der sich bei Beschädigungen selbstständig auf die neue Situation einstellen und beispielsweise auch mit einem Bein weniger gehen konnte. 2011 wurde Robonaut 2 im Zuge der Space-Shuttle-Mission STS-133 eingeführt und war damit der erste humanoide Roboter im Weltall. Im Jahr darauf landete der Mars-Rover Curiosity und sendete detaillierte Analyseergebnisse zum Aufbau des roten Planeten.

In der jüngeren Vergangenheit wurde mit Ekso das weltweit erste Exoskelett vorgestellt, mit dem Gelähmte wieder laufen können. 2015 entwickelte die TU Nanyang den Roboter Nadine, die menschenähnlichste Maschine in der Geschichte der Robotik. Und 2017 erhielt die erste Roboterfrau die saudi-arabische Staatsbürgerschaft. Übrigens hört sie auf den Namen Sophia.

Der Blick zurück zeigt eine lange Entwicklungsgeschichte. Erstaunlich, wie früh der Mensch schon eigenständig arbeitende Maschinen entworfen hat. Wer kann schon einschätzen, wohin die Reise geht? Autonome Fahrzeuge dürften bald Wirklichkeit werden, und in zahlreichen Krankenhäusern kommen bereits jetzt superakkurate Roboterwerkzeuge zum Einsatz. Mit Spannung werden wir die Entwicklung in den nächsten Jahren verfolgen.

Altes Griechenland		Zeus schenkt Europa den ehernen Riesen Talos. Orgeln und Uhren werden per Wasserkraft angetrieben.	1977		Der erste Star Wars-Film kommt in die Kinos und zeigt eine von Robotern bevölkerte Galaxie.
10 - 70 v. Chr.		Heron von Alexandria schreibt ein Buch namens <i>Automata</i> und erfindet eine windgetriebene Orgel, animierte Statuen und den ersten Dampfmotor.	1981		Shigeo Hirose entwickelt den ersten Vierfüßlerroboter.
1495		Leonardo da Vinci entwickelt den ersten humanoiden Roboter.	1990		Die iRobot Corporation wird gegründet.
1645		Mit der Pascaline wird die erste Rechenmaschine erfunden.	1996		Honda stellt seinen ersten humanoiden Roboter P2 vor.
1913		Henry Ford baut die erste Fertigungsstraße mit Förderband.	1997		Der Pathfinder der NASA landet auf dem Mars.
1941-42		Isaac Asimov schreibt die Robotergesetze.	1999		Sony stellt den Roboterhund AIBO vor.
1942		Das Unternehmen DeVilbiss entwickelt einen Lackierroboter.	2000		Honda stellt seinen hochmodernen Humanoiden ASIMO vor, der laufen, gehen, kommunizieren und mit seiner Umwelt interagieren kann.
1950		Alan Turing schlägt den Turing-Test als Kriterium vor, ob eine Maschine dem Menschen vergleichbar denkfähig ist.	2001		Nach dem Einsturz des World Trade Center werden die Trümmer von PackBot-Robotern durchsucht.
1963		Erster Roboterarm	2002		iRobot stellt mit Roomba den ersten Staubsaugerroboter für Privathaushalte vor.
1969		Der Mensch landet auf dem Mond.	2004		Die Mars-Rover Spirit und Opportunity landen auf dem Mars.
1970		In Japan wird WABOT-1 entwickelt, der laufen, greifen, Gegenstände transportieren und erkennen sowie mit seiner Umwelt kommunizieren kann (erster androider Roboter).	2004		Epsom stellt den bis dato kleinsten Roboter der Welt vor.
1970		KUKA baut den ersten Industrieroboter mit sechs elektromechanischen Achsen.	2012		Der Mars-Rover Curiosity landet auf dem roten Planeten.
			2013		iRobot stellt seinen ersten Medizinroboter vor.
			2017		Die Roboterfrau Sophia erhält die saudi-arabische Staatsbürgerschaft.



Robotertypen und Anwendungsbereiche

Dieses Kapitel befasst sich mit Robotern in der Fertigung, bei denen es sich meist um gelenkige Arme für spezielle Arbeitsvorgänge handelt. Sie arbeiten automatisiert, sind programmierbar und bewegen sich auf mindestens zwei Achsen. Eingesetzt werden sie zum Schweißen, im Materialtransport, beim Lackieren, zum Verpacken und an Montagestraßen.

Die gängigsten Industrieroboter sind gelenkig und als kartesische, zylindrische, Polar-, SCARA- oder Parallelkinematik-Roboter ausgeführt. Jede Ausführung erfüllt innerhalb der Industrie ganz eigene Einsatzzwecke.

INDUSTRIE

Die Teilnehmer an der Robotikplattform sind miteinander vernetzt, aber auch mit dem Steuersystem, der Sensorik und anderen Robotersystemen verbunden.

Gelenkarmroboter: arbeitet mit rotatorischen Gelenken (mindestens zwei, aber auch mehr als 10 Gelenke möglich)

Kartesischer Roboter: wird auch als Portalroboter bezeichnet. Hat drei translatorische Gelenke und meist ein Handgelenk, das Drehbewegungen ermöglicht

Zylindrischer Roboter: hat an der Basis mindestens ein rotatorisches Gelenk sowie ein präsmatisches Gelenk zur Verbindung der Glieder. Bewegt sich in einem zylindrischen Arbeitsraum

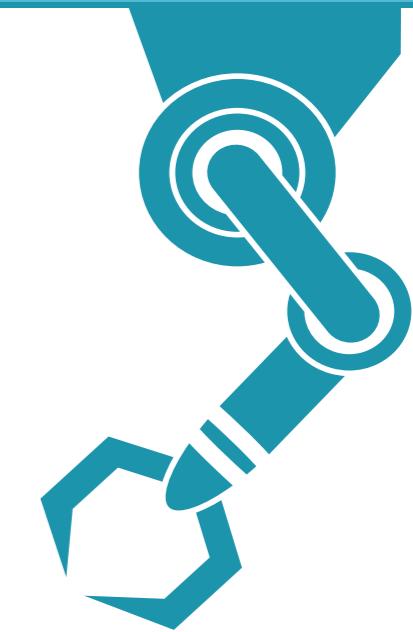
Polarroboter: wird auch als sphärischer Roboter bezeichnet. Der Arm ist über ein Torsionsgelenk sowie einer Kombination aus zwei rotatorischen Gelenken und einem translatorischen Gelenk mit der Basis verbunden und bewegt sich in einem sphärischen Arbeitsraum.

SCARA-Roboter: kommt meist an Montagestraßen zum Einsatz. Hat für den überwiegend zylindrischen Bewegungsbereich zwei parallele Gelenke, sodass die Nachgiebigkeit auf einer Ebene stattfindet

Parallelkinematik-Roboter: spinnenähnliche Maschine mit Parallelogrammen, die an der Basis angelenkt sind. Kann präzise Bewegungen ausführen und wird oft in Lebensmittelindustrie, Medizintechnik und Elektronik eingesetzt

HAUSHALT UND DIENSTLEISTUNGSSEKTOR

Haushaltsroboter gibt es in verschiedensten Formen und Größen. Sie wurden in erster Linie entwickelt, um dem Menschen häusliche Pflichten abzunehmen. Es gibt Roboter für die Teppich- oder Bodenreinigung, die eher rund geformt und flach gebaut sind, aber auch komplexere Roboter für die Rohr- und Dachrinnenreinigung, deren sphärischer Körper mit rotierenden Bürsten und Wischern besetzt ist.



Andere Roboter können Hemden bügeln oder treten als selbstreinigendes Katzenlo in Erscheinung, können als Küchenroboter Nahrung zubereiten oder als Sicherheitsroboter bei Einbrüchen den Hausbesitzer alarmieren.

Für den Außenbereich gibt es Gartenroboter, die ähnlich wie Saugroboter im Innenbereich arbeiten, nur stattdessen den Rasen mähen. Roboter können aber auch den Swimmingpool säubern, indem sie Schmutz aufnehmen und die Kacheln reinigen. Magnetische, autonome Fensterreinigungsroboter benutzen ihre Mikrofaser-Kissen mit einer Reinigungslösung und widmen sich sanft der Fensterpflege.

Als Serviceroboter werden jene Maschinen bezeichnet, die hilfebedürftige Menschen unterstützen und mit ihnen kommunizieren. Beispielsweise leisten sie Senioren in längeren Phasen des Alleinseins Gesellschaft und erinnern sie an die Einnahme von Medikamenten. Sie helfen ihnen beim Aufstehen und Spazierengehen und übernehmen viele weitere hilfreiche Funktionen.

Private Telepräsenzroboter können sich an entfernten Orten bewegen und ermöglichen die zwischenmenschliche Kommunikation über Lautsprecher, Kameras und Mikrofone. Sie sind besonders nützlich für Pflegekräfte, die nach ihren Patienten schauen wollen.

MEDIZIN

Medizinroboter werden in der Medizintechnik eingesetzt und treten als Operationsroboter, Rehabilitationsroboter, Bioroboter, Telepräsenzroboter, Pharmaroboter und Desinfektionsroboter auf.

Da Roboter genauer und präziser arbeiten als die menschliche Hand, kommen Operationsroboter weltweit immer häufiger im OP zum Einsatz. Roboter sind in allen Bereichen der Chirurgie zu finden und helfen selbst in der Neurochirurgie und Augenheilkunde. Das Radiochirurgiesystem CyberKnife behandelt Tumore im menschlichen Körper mithilfe von computergesteuerten Robotern unter Bildwandlerkontrolle.

Rehabilitationsroboter unterstützen Menschen mit gelähmten Gliedmaßen oder Körperteilen. Sie können passiv oder aktiv ausgeführt sein, sodass die Bewegungen entweder vom Menschen selbst oder vom Roboter initiiert werden. Bei einem Roboter ist sichergestellt, dass jede Bewegung immer exakt gleich ausgeführt wird. Das sorgt für einen hohen Einheitlichkeitsgrad.

Die Biorobotik befasst sich mit Robotern, die biologische Organismen emulieren oder simulieren. Dabei wird leblose Materie zum Leben erweckt. Sie steht noch am Anfang ihres Entwicklungspotenzials und wird beizeiten auch als synthetische Biologie oder Bionanotechnik bezeichnet.

Mit einem Telepräsenzroboter (auch Teleoperationsroboter genannt) können Pflegekräfte bei Terminproblemen auch von außerhalb ihre Patienten betreuen, diagnostizieren und informieren. Die Fernsteuerung erfolgt durch den Menschen, in diesem Fall durch einen Arzt in seiner Praxis. Der Roboter kann sich im Privathaushalt des Patienten bewegen und dessen Lebensverhältnisse einschätzen. Gleichzeitig kann der Arzt über Mikrofone, Lautsprecher und Kameras mit dem Patienten sprechen und ihn visuell untersuchen.

Mit Pharmarobotern können Medikamente gehandhabt und höchst genau ausgegeben werden. Sie werden bereits heute in einigen Krankenhäusern eingesetzt und können nicht nur 24-Stunden-Schichten bestreiten, sondern auch für die sichere Ausgabe von Medikamenten programmiert werden. Dadurch kommt es zu weniger Kreuzkontamination und einer schnelleren Arzneiausgabe.

Desinfektionsroboter sind in der Medizintechnik relativ neu. Sie desinfizieren ganze Räume in wenigen Minuten mit UV-Licht. Ein Vorteil dieser Roboter: Der Mensch muss sich nicht in Bereiche mit erhöhter Infektionsgefahr begeben. Der Roboter kann seine Reinigung ungefährdet durchführen und verhindert daher das Risiko der Verbreitung ansteckender Krankheiten und Bakterien.

MILITÄR UND RAUMFAHRT

Zahlreiche Kräfte weltweit setzen in der Praxis Roboter ein, die sie unter anderem bei Transporten, Such- und Rettungsdiensten, Angriff und Verteidigung unterstützen. Roboter werden vom Militär seit dem zweiten Weltkrieg genutzt, als die Sowjets erstmals mit ferngesteuerten Panzern manövrierten. Heute werden autonome Fahrzeuge entwickelt, die unwegsames Gelände durchqueren können, und Waffensysteme, die selbsttätig Projektilen laden und abfeuern. Gemäß der Genfer Konvention dürfen militärische Waffen nicht vollständig autonom sein, sondern müssen auf die Bedienung durch den Menschen angewiesen sein.

Drohnen, autonome Kampfjets und Bomber werden immer weiter entwickelt, um den Menschen bei militärischen Gefechten aus der Gefahrenzone zu bringen. Robotische Flugzeuge könnten darauf programmiert werden, schneller in die Luft zu steigen und Bewegungen auszuführen, die mit einem Menschen an Bord nicht möglich wären.

Mit Entschärfungsrobotern wie dem Dragon Runner des britischen Militärs kann der Bediener aus sicherer Distanz den Sprengsatz untersuchen. Diese Roboter sind ferngesteuert, äußerst wendig und können verdächtige Gegenstände freilegen, aufnehmen und bewegen. Der Dragon Runner ist in der Lage, kleine Ladungen zum Entschärfen des Sprengsatzes zu platzieren, und kann obendrein Kabel durchtrennen. Er sendet ein Echtzeit-Videosignal an den Bediener, sodass Menschen von Gebäuden oder unsicherem Gelände fernbleiben können.

Im Weltraum werden Roboter für Erkundungszwecke und zusätzliche Arme der internationalen Raumstation ISS eingesetzt. Der Rover Curiosity landete 2012 auf dem Mars und dient dort seither als mobiles Labor. Er befährt die Oberfläche des Planeten und sammelt dabei Bodenproben zur Analyse. Die Ergebnisse sendet er anschließend an die Erde. Er kann Hindernisse überfahren und legt täglich rund 200 Meter zurück. Sein Antrieb wird von einem Radioisotopengenerator gespeist.

Außen an der ISS wurden Roboterarme montiert, die Satelliten in Betrieb setzen, erfassen und reparieren, Astronauten positionieren, Geräte warten und Lasten bewegen.

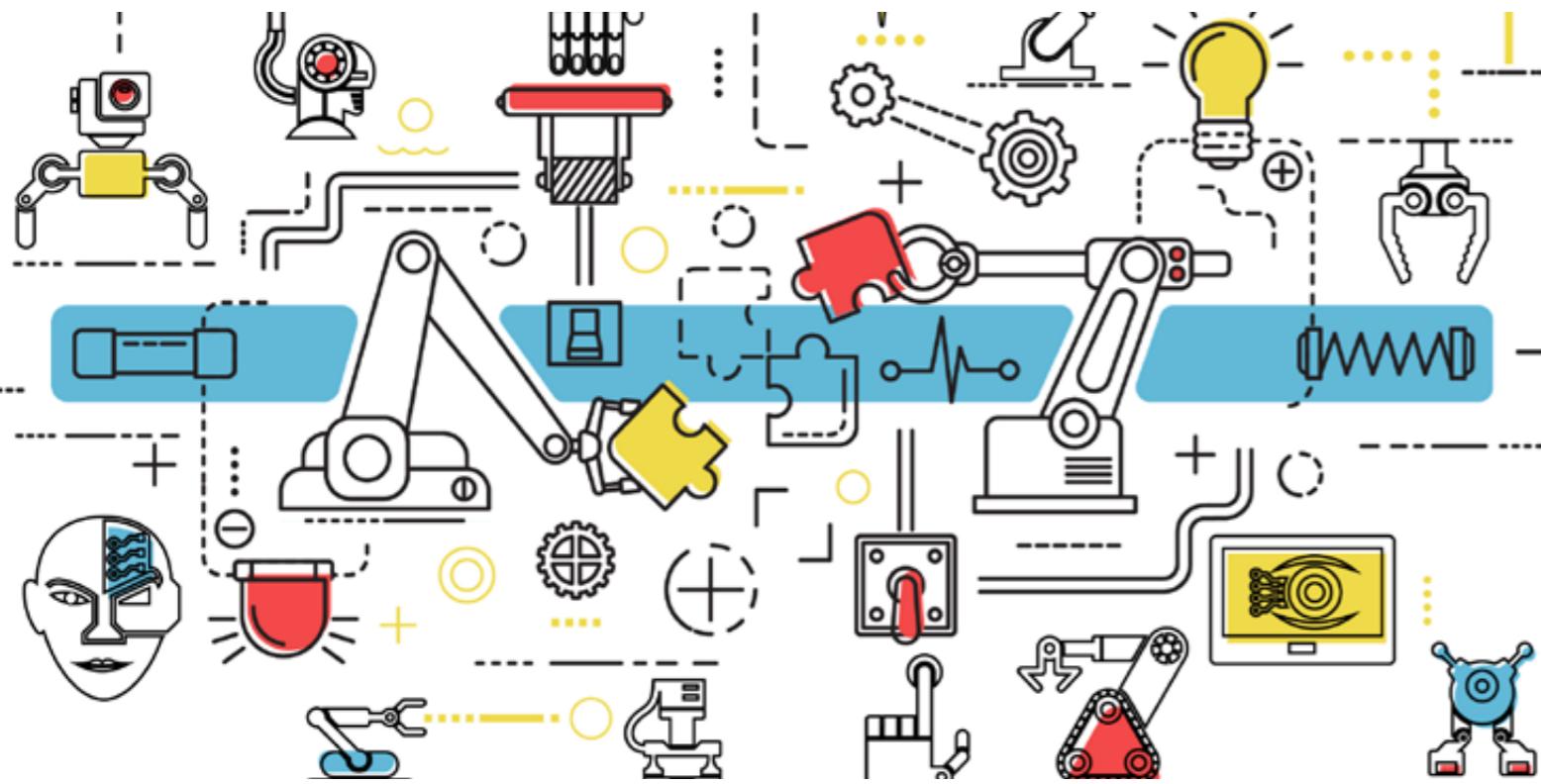
Einer der ISS-Roboter trägt den Namen Dextre: ein Allround-Roboter für Aufgaben im Außenbereich der Raumstation, der unter anderem die Routinearbeiten der Astronauten bei deren riskanten Weltraumspaziergängen übernimmt. Dextre hat zwei Arme mit jeweils über drei Metern Länge, sieben Gelenken und Greifern, die sich wie die Werkzeuge eines Taschenmessers einsetzen lassen. Mehrere Sensoren verleihen den Greifern einen menschenähnlichen Berührungssinn. Darüber hinaus haben die Greifer mehrere Werkzeuge, eine Kamera, Leuchten und einen Strom-Daten-Anschluss, über den der Roboter elektronische Geräte betreibt und Experimente durchführt.

UNTERHALTUNG, HOBBY UND WETTBEWERB

Diese Kategorie beinhaltet Spielzeug und Selbstbau-Roboter zum Spaß oder für Wettbewerbe. Die Auswahl ist riesig und reicht vom Robo-Dog für Kinder bis hin zu Robotern, die sich in Gladiator-Arenen gegenseitig bekämpfen. Humanoide Roboter wie der QRIO von Sony oder der Robosapien von WowWee können gehen, erkennen Sprache und können eingeschränkt mit dem Menschen interagieren.



Der Leichtbau-Entschärfungsroboter Dragon Runner ist einfach zu transportieren und eignet sich für unterschiedlichste Geländearten (Crown, Copyright 2012).



Industrieroboter

Dieses Kapitel befasst sich näher mit Industrierobotern und beleuchtet dabei die weltweiten Markttreiber, die verschiedenen Roboterarten, die typischen Einsatzbereiche, die Grundlagen der Programmierung und die jeweiligen Sicherheitsaspekte.

MARKTTRENDS

Industrieroboter bedeuten in der gesamten Fertigungsbranche einen Wettbewerbsvorteil, da die Unternehmen besser auf schnellere Konjunkturzyklen, vielfältigere Kundenbedürfnisse, allgemeinen Konkurrenzdruck und Emissionsvorschriften reagieren können. Da Industrieroboter immer günstiger in der Anschaffung werden, sinkt der Investitionsbedarf, was ihre Akzeptanz in allen Industriesektoren fördert.

Schätzungen lassen vermuten, dass die Anzahl der Ende 2016 weltweit eingesetzten Industrieroboter von 1.828.000 Einheiten bis 2020 auf 3.053.000 steigen wird, wobei der größte Teil dieses Wachstums in asiatischen Fabriken stattfinden dürfte. Das gilt insbesondere für China, wo sich die Zahl schätzungsweise auf rund 950.000 Einheiten beläuft.

Gemeinsam zeichneten China, die Republik Korea, Japan, die USA und Deutschland im Jahr 2016 für 74 Prozent der

Industrieroboterproduktion verantwortlich. Abb. 1 zeigt die wachsende Versorgung mit Industrierobotern nach Branche von 2014 bis 2016.

Stichwort Zusammenarbeit: Die roboterübergreifende und Mensch-Roboter-Kollaboration gewinnt zusehends an Bedeutung. Dies ist zurückzuführen auf immer mehr Kleinserienproduktionen mit hohem Komponentenmix, die mehr Variabilität und mehr menschlichen Eingriff erfordern.

Durch die kollaborative Automation können Mensch und Roboter ihre jeweiligen Stärken ausspielen: Während der Mensch mit Wissen und Improvisation glänzt, überzeugt der Roboter mit hoher Arbeitsgeschwindigkeit und exakter Reproduktion. Die Baureihe IRB 14000 von ABB ist ein Paradebeispiel für die neue Generation kollaborativer Roboter. Sie wurde 2015 ursprünglich für die Kleinteilmontage entwickelt. Wie wichtig diese Form der Zusammenarbeit ist, zeigt die kürzlich ins Leben gerufene Partnerschaft zwischen ABB und Kawasaki, die gemeinsam die nächste Generation der Koboter entwickeln wollen.

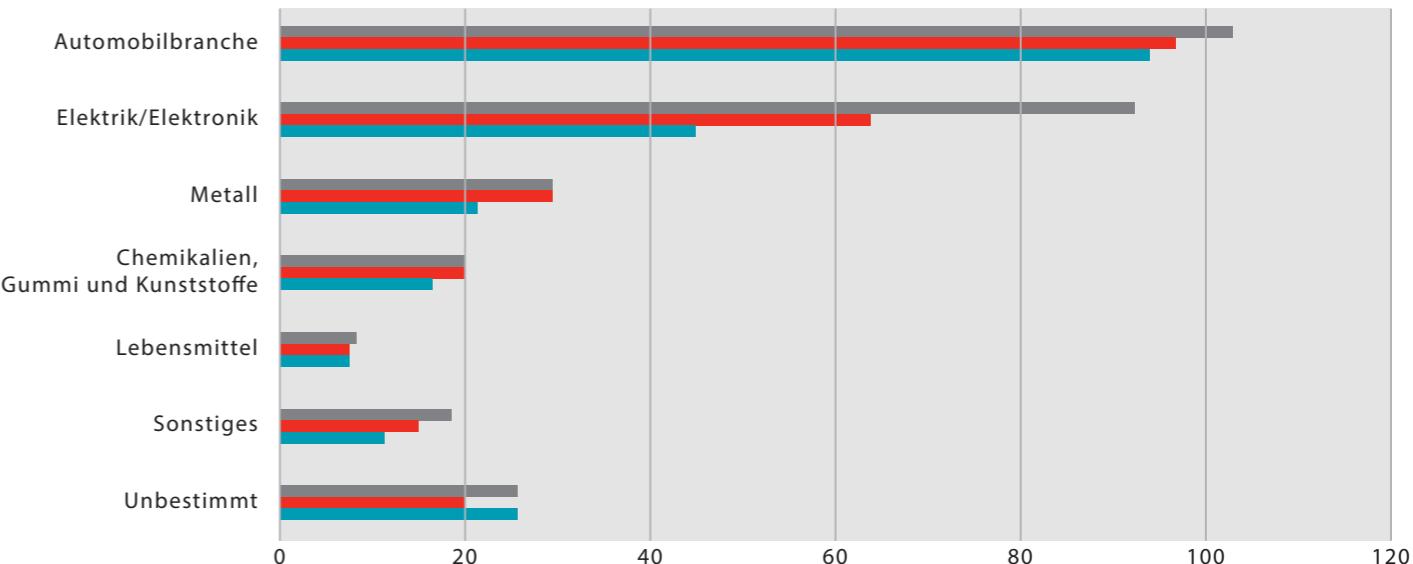


Abbildung 1: Insgesamt ist der Einsatz von Industrierobotern jährlich gewachsen
(Quelle: IRF-Bericht 2017).

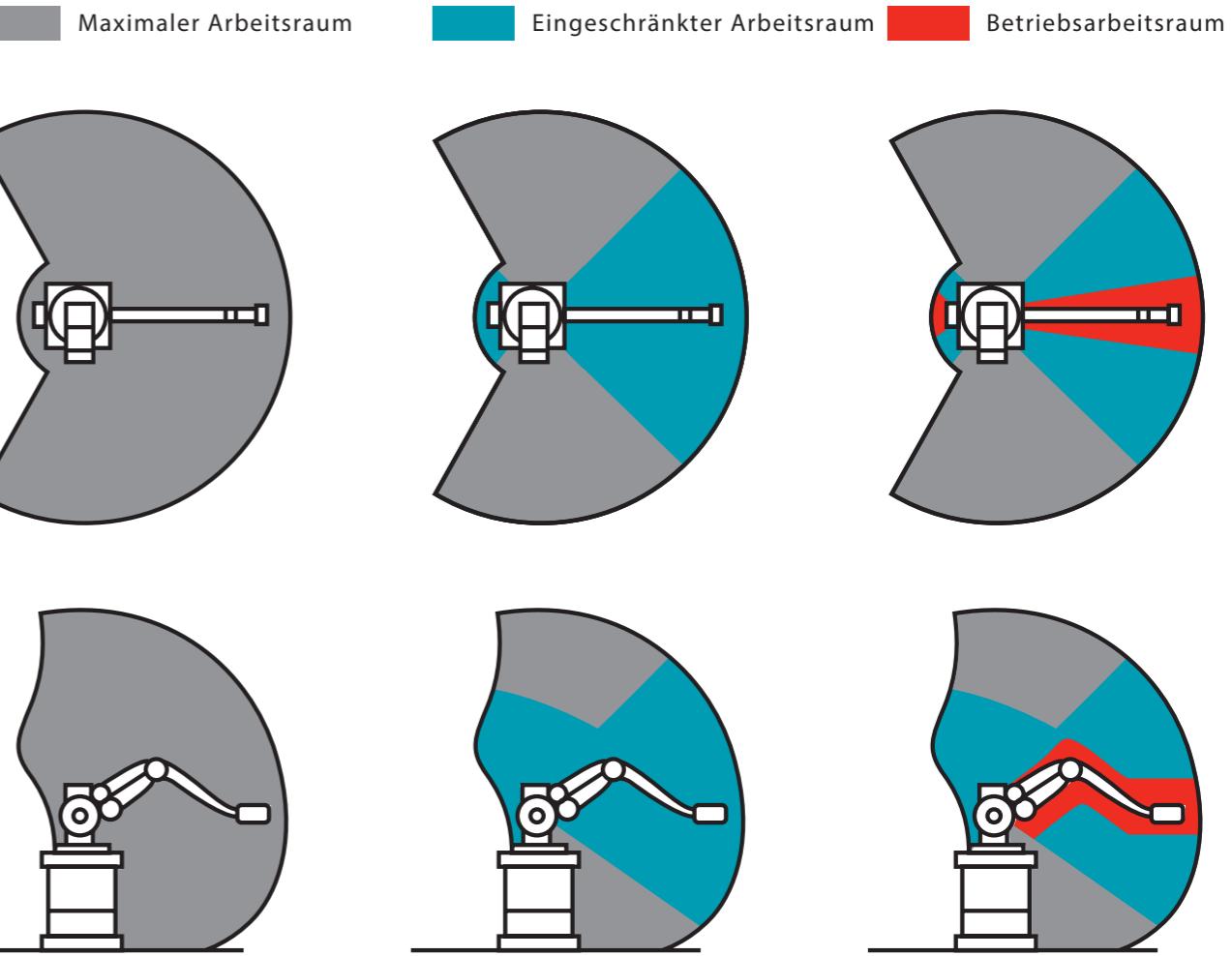
AUSFÜHRUNGEN DES INDUSTRIEROBOTERS

Die meisten Industrieroboter sind stationär ausgeführt, sodass sich der Roboterarm über der stationären Basis bewegt. Wie Tabelle 1 zeigt, gibt es hauptsächlich sechs Arten stationärer Roboter. Am häufigsten kommen Gelenkarm-, SCARA-, Parallelkinematik- und Portalroboter zum Einsatz.

Typ	Description- Erklärung	Einsatzbereich:
Kartesischer Roboter/ Portalroboter	Arbeitet auf der X-, Y- und Z-Achse mit linearen Führungsschienen	Bestückung, Dichtmittelauftrag, Lichtbogenschweißen
Zylindrischer Roboter/ Zylinderkoordinatenroboter	Kombiniert ein rotatorisches Gelenk mit einem prismatischen Gelenk. Führt Bewegungen in einem zylindrischen Arbeitsraum aus	Montagearbeiten, Punktschweißen, Steuerung von Werkzeugmaschinen
sphärisch	Kombiniert zwei rotatorische mit einem translatorischen Gelenk, sodass ein sphärischer Arbeitsraum entsteht	Punktschweißen, Gussarbeiten, Gas- und Lichtbogenschweißen
SCARA-Roboter/ horizontaler Knickarmroboter	Der nachgiebige Arm ist zylindrisch aufgebaut und besteht aus zwei parallelen Gelenken, sodass die Nachgiebigkeit auf einer Ebene stattfindet.	Bestückung, Dichtmittelauftrag, Montagearbeiten, Steuerung von Werkzeugmaschinen
Gelenkarmroboter/ vertikaler Knickarmroboter	Die Glieder sind durch Rotationsgelenke miteinander verbunden. Jedes Gelenk stellt eine eigene Achse dar, sodass ein zusätzlicher Freiheitsgrad entsteht. Gelenkarmroboter haben vier oder sechs Achsen.	Montagearbeiten, Gussarbeiten, Gas- und Lichtbogenschweißen, Lackierarbeiten
Parallelkinematik-Roboter	Besteht aus Parallelogrammen, die an einer gemeinsamen Basis angelenkt sind. Die Parallelogramme bewegen ein Handwerkzeug innerhalb eines kuppelförmigen Arbeitsraums.	Präzise Bestückungsarbeiten

Tabelle 1: Die wichtigsten Industrieroboter

Wie Tabelle 2 zeigt, werden Roboter auch nach verschiedenen Betriebsparametern gruppiert.



Der Arbeitsraum ist bei jeder robotischen Anwendung zu beachten.

Parameter	Description- Erklärung
Anzahl der Achsen/ Freiheitsgrade	Zwei Achsen werden benötigt, um einen beliebigen Punkt auf einer Ebene zu erreichen. Drei Achsen werden benötigt, um einen beliebigen Punkt im Raum zu erreichen. Drei weitere Achsen (Gieren, Neigen und Rollen) werden benötigt, um die Ausrichtung der Roboterhand am Ende des Arms zu steuern.
Arbeitsraum	Erreichbarer Bewegungsraum des Roboters
Kinematik	Anordnung der Glieder und Gelenke, die über die Bewegungsmöglichkeiten des Roboters entscheiden. Beispiele: Gelenkarmroboter, kartesischer Roboter, Parallelkinematik-Roboter oder SCARA-Roboter
Traglast	Gibt an, welches Gewicht der Roboter heben kann
Geschwindigkeit	Gibt an, wie schnell der Roboter die Hand positionieren kann (Winkel- bzw. Lineargeschwindigkeit der einzelnen Achsen oder zusammengesetzte Geschwindigkeit)
Beschleunigung	Gibt an, wie schnell eine Achse beschleunigt. Aufgrund dieses einschränkenden Faktors erreicht der Roboter bei kurzen Bewegungen oder komplexen Bahnen mit häufigen Richtungswechseln möglicherweise nicht die angegebene Höchstgeschwindigkeit.
Genauigkeit	Als Genauigkeitsmaß dient die absolute Position des Roboters im Vergleich zur angewiesenen Position. Die Genauigkeit lässt sich mit externer Sensorik verbessern, z. B. mit Optiksystemen oder Infrarottechnik. Sie ist abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit, der Position innerhalb des Arbeitsraums und der Traglast (Nachgiebigkeit).
Reproduzierbarkeit	Wenn der Roboter bei jedem Anfahren der in der Steuerung programmierten Position sein Ziel bis auf 0,1 mm genau erreicht, spricht man von 0,1 mm Wiederholgenauigkeit.
Bewegungssteue- rung	Bei Bestückungsarbeiten und ähnlich einfachen Anwendungen muss der Roboter wiederholt verschiedene programmierte Positionen anfahren. Beim Schweißen, bei der Oberflächenendbearbeitung und bei anderen komplexen Vorgängen hingegen muss die Bewegung durchgehend gesteuert werden, damit die gewünschte Bahn im Raum mit kontrollierter Ausrichtung und Geschwindigkeit verfolgt wird.
Kraftquelle	Elektrik (E-Motoren), Hydraulik (Stellglieder) usw.
Antrieb	Bei einigen Robotern sind die Gelenke über Zahnräder mit Elektromotoren verbunden, bei anderen wirkt der Motor direkt auf das Gelenk (Direktantrieb). Kleinere Roboterarme arbeiten oft mit hochdrehenden, drehmomentschwachen Gleichstrommotoren, die ein großes Übersetzungsverhältnis erfordern. Der Nachteil liegt hier im Flankenspiel.
Nachgiebigkeit	Winkel oder Strecke, die eine Roboterachse unter einer Kraft zurücklegt. Wenn der Roboter eine Position anfährt und dabei seine maximale Traglast ausreizt, ist seine Endposition etwas niedriger, als es ohne Last der Fall wäre.

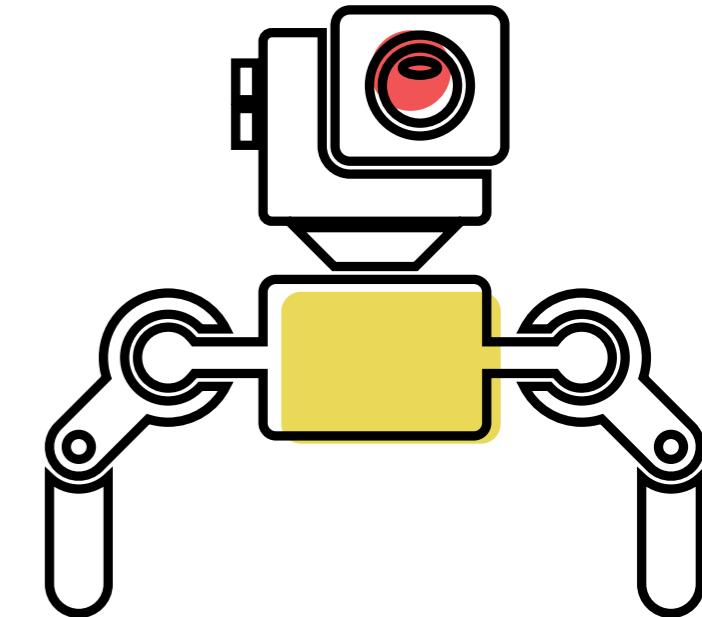
Tabelle 2: Betriebsparameter von Industrierobotern

BEISPIELHAFTE EINSATZBEREICHE

Im Folgenden betrachten wir zwei beispielhafte Industrieroboter, die herstellerseitig auf die speziellen Anforderungen des angestrebten Einsatzbereichs ausgelegt wurden.

ABB-Baureihe IRB 5500

Die Baureihe IRB 5500 von ABB ist ein Gelenkarmroboter mit sechs Achsen, der für Lackierarbeiten im Automobilbau entwickelt wurde.

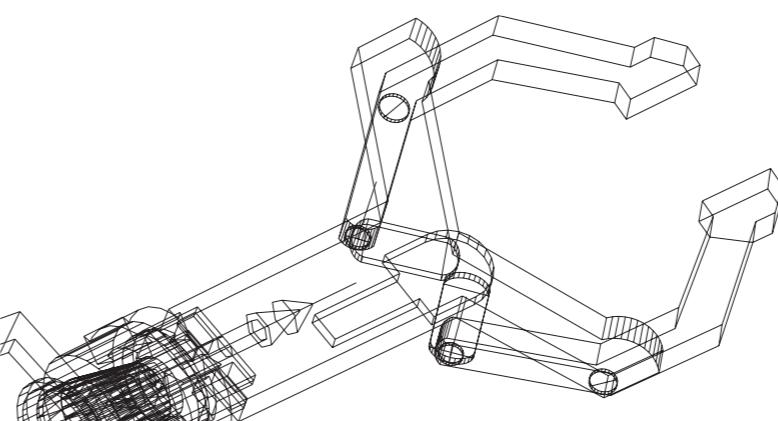


Der IRB 5500 hat drei Eigenschaften, die ihn für seinen Einsatzbereich geeignet machen:

- Ein großer Arbeitsraum, sodass zum Lackieren horizontaler Flächen (z. B. Motorhauben) nicht zwei Roboter benötigt werden und somit die Nahtbildung in der Mitte entfällt. Bei nur einem Roboter kann in diesem Bereich auf eine Qualitätskontrolle verzichtet werden.
- Hohe Beschleunigung: Beim Schweißen, Lackieren und anderen komplexen Anwendungen muss die Bewegung der gewünschten Bahn im Raum mit kontrollierter Ausrichtung und Geschwindigkeit folgen. Wenn der Roboter bei der Rückwärtsbewegung zu stark verlangsamt, sammelt sich an der betroffenen Stelle am Fahrzeug überschüssiger Lack.
- Eine hohe Traglast, die eine engere Einbindung der Prozessgeräte in die Arbeitsfläche ermöglicht und damit Verschwendungen reduziert

Omron-Baureihe Quattro 800

Hierbei handelt es sich um einen Parallelkinematik-Roboter für Hochgeschwindigkeitsarbeiten in Fertigung, Verpackung, Materialtransport und Montage. Da sich alle Stellglieder in der Basis befinden, können die Arme aus einem leichten Verbundwerkstoff hergestellt werden. Die beweglichen Teile weisen somit eine geringe Massenträgheit auf und können sehr schnell beschleunigt werden. Alle Arme sind mit dem Endeffektor verbunden, weshalb der Roboter relativ steif ist, dafür aber einen kleinen Arbeitsraum hat.



Die folgenden Eigenschaften des Quattro eignen sich gut für seine Einsatzzwecke:

- Geschwindigkeit 10 m/s (IRB 5500: 1 m/s)
- Wiederholgenauigkeit 0,1 mm (IRB 5500: 0,15 mm)
- Arbeitsraum: arbeitet in einem zylindrischen Bereich von 1300 mm und eignet sich damit auch für Lebensmittel-Produktionslinien

PROGRAMMIERUNG VON INDUSTRIEROBOTERN

Bei der Programmierung eines Roboters wird ein physischer oder geometrischer Bezug zwischen dem Roboter und dem Zielobjekt hergestellt. Dazu muss der Roboter manuell gesteuert werden, um die Koordinatenpunkte innerhalb des Arbeitsraums physisch anzulernen.

Es gibt drei gängige Programmier- oder auch Teach-Methoden:

Lead-Through-Programmierung

Der Roboter wird mithilfe eines Programmierhandgeräts (PHG) manuell in die gewünschte Position gefahren. Dabei kann mit geringer Geschwindigkeit gearbeitet werden, um die Position genau zu erreichen oder neue bzw. veränderte Routinen zu testen. Als Sicherheitsvorkehrung hat die Anlage meist einen großen Nothalt-Taster.

Walk-Through-Programmierung

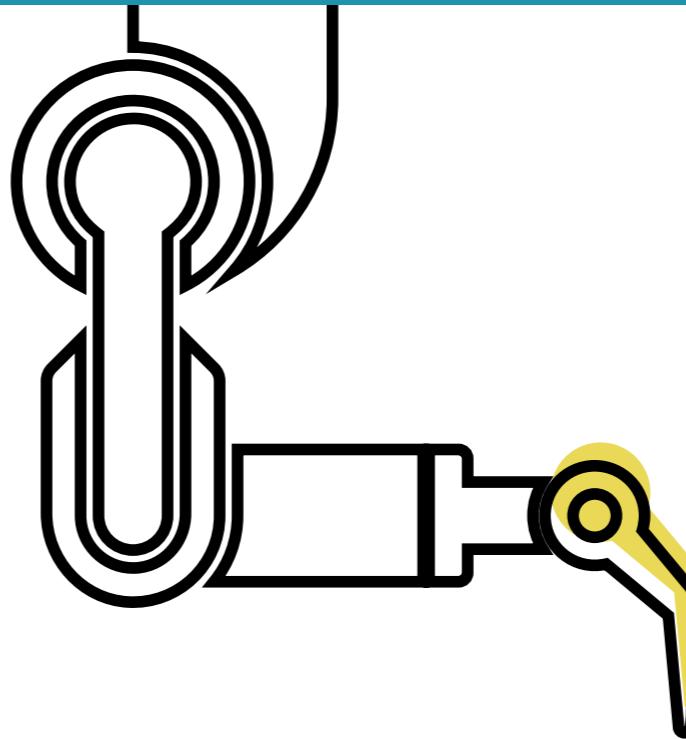
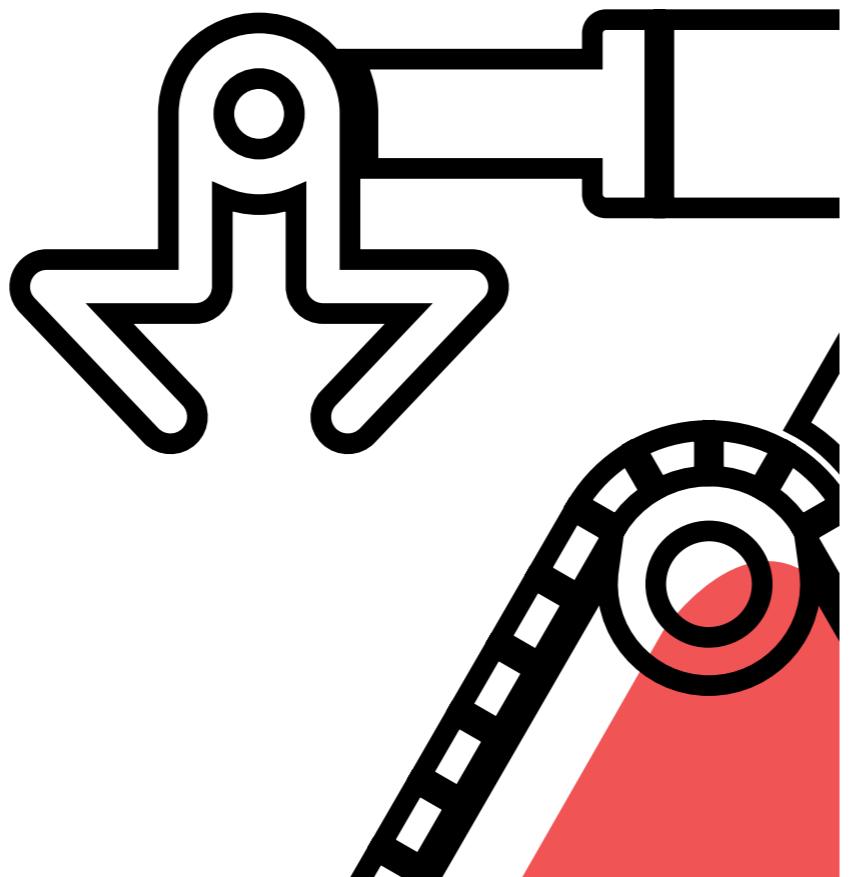
Während sich der Roboter im sicheren Modus befindet, führt der Bediener ihn mit der Hand an die gewünschte Position oder entlang der gewünschten Bahn. Die Steuersoftware speichert die Positionen in der Steuerung. Später kann das Programm den Roboter an die Positionen fahren oder die Bahn verfolgen. Diese Programmiermethode wird oft beim Lackieren und ähnlichen Aufgaben angewendet.

Offline-Programmierung

Der Roboter und andere Maschinen oder Instrumente im Arbeitsraum werden grafisch kartiert, sodass sich der Roboter am Bildschirm bewegen und der Prozess sich simulieren lässt. Auf diese Weise erstellen Simulatoren die Programme für den Roboter, ohne dass der Roboterarm physisch in Betrieb genommen werden muss. Das spart Zeit beim Anwendungsdesign. Außerdem können vor dem Einschalten des Systems verschiedene Was-Wäre-Wenn-Szenarien erprobt werden, was sich förderlich auf die Betriebssicherheit auswirkt.

Oft werden die verschiedenen Methoden kombiniert. Programme, die per Lead-Through oder Walk-Through erstellt wurden, können mithilfe von Offline-Simulatoren geprüft und optimiert werden. An der Bedientafel können Programme umgeschaltet, Änderungen in einem Programm vorgenommen und integrierte Peripheriegeräte bedient werden. Oft werden der Roboter und seine Peripherie durch einen Computer überwacht. Der Computer kann auch als zusätzlicher Speicher verwendet werden und bietet Zugriff auf zahlreiche komplexe Bahnen und Routinen.

Das SRP-Programmierwerkzeug von ABB für die Baureihe IRB 5500 ermöglicht die Lead-Through-Programmierung mithilfe einer simulierten Lackerpistole, während die Simulations- und Offline-Programmiersoftware RobotStudio für die Offline-Prüfung und -Optimierung zur Verfügung steht.



SICHERHEITSASPEKTE UND -SYSTEME

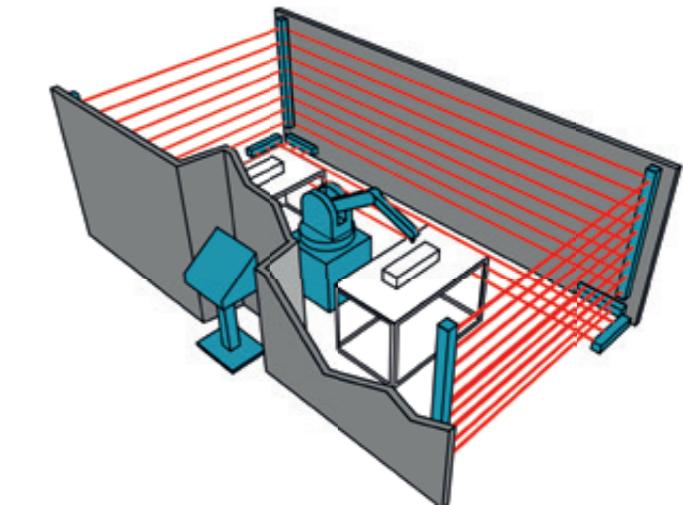
Beim Betrieb robotischer Produktionssysteme sind verschiedene Sicherheitsaspekte zu beachten. Der Mensch sollte unbedingt vom Arbeitsraum des Roboters ferngehalten werden, da der Endeffektor plötzliche Bewegungen mit hoher Geschwindigkeit ausführt, wobei große Kräfte entstehen. Physische Absperrungen und Verriegelungssysteme sind notwendig, damit der Bediener und anderes Personal im Betrieb keinen Zugang zum Arbeitsraum haben.

Das Programmieren eines Roboters birgt potenzielle Gefahren, da der Bediener physisch mit dem Roboter in Kontakt kommt. Aus diesem Grund gibt es entsprechende Sicherheitssysteme wie Nothalt-Taster oder einen Teach-Modus, in dem die Robotergeschwindigkeit begrenzt ist. Auch Sensoren, die überhöhte Kräfte verhindern oder den Roboter rechtzeitig vor plötzlichen Hindernissen anhalten, können in den Roboter integriert werden.

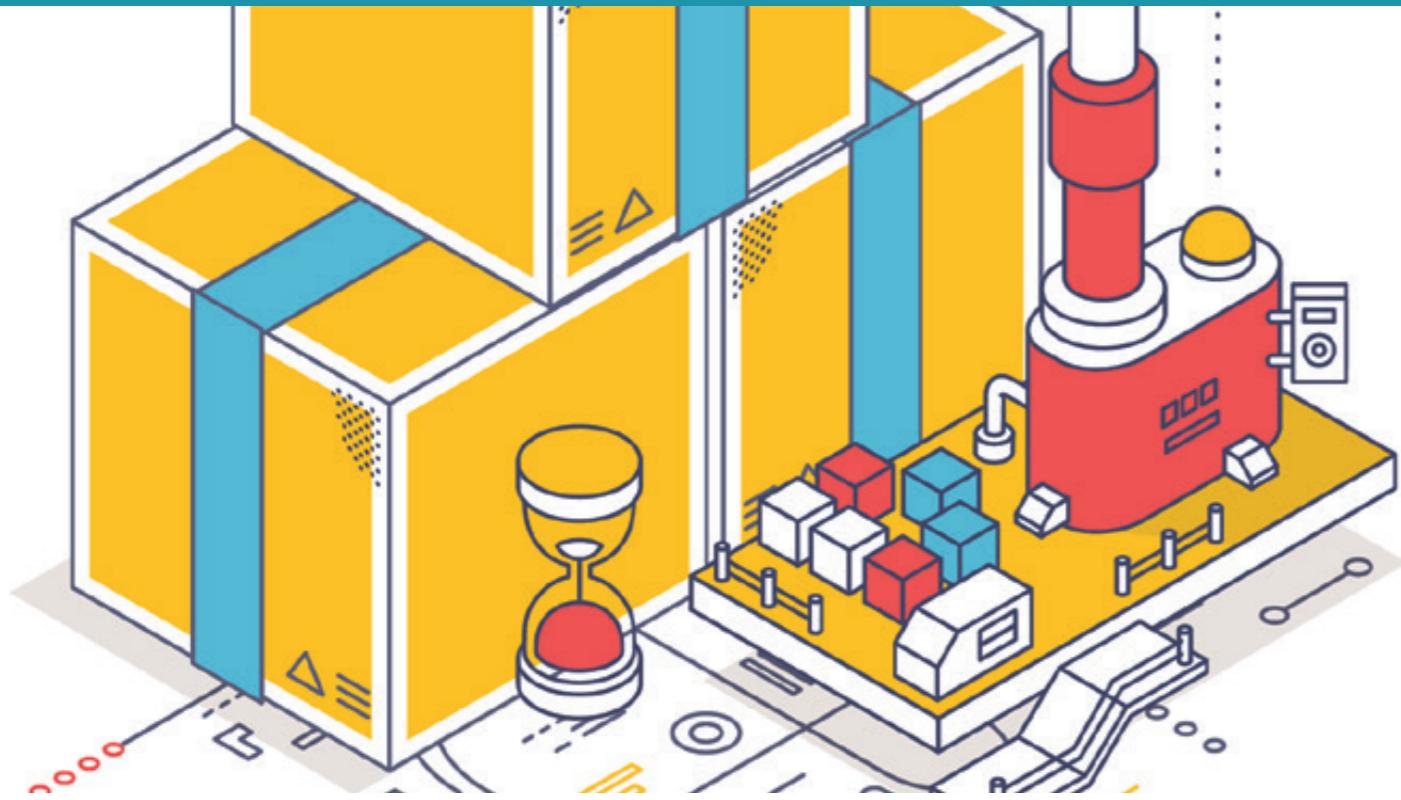
Außerdem sollte sich die Auswahl des Roboters nach den Eigenschaften seiner Betriebsumgebung richten. Beispielsweise ist beim Einsatz von Elektromotoren darauf zu achten, dass sich brennbare Stoffe oder Gase durch statische Aufladung und Funkenbildung entzünden können.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wurden die verschiedenen Ausführungen des Industrieroboters aufgeführt und die Anpassung dieser Roboter und ihrer Eigenschaften an bestimmte Anwendungsbereiche erläutert. Auch die Programmierung von Robotern und die entsprechenden Sicherheitsaspekte wurden beschrieben. Dabei wurden zwei Roboter für sehr unterschiedliche Einsatzbereiche als Beispiel angeführt.



Neben Nothalt-Tastern wird der menschliche Bediener auch von Lichtvorhängen geschützt, da sie das versehentliche Eindringen in den Arbeitsraum verhindern.



Jenseits der Fertigung – Roboter und die Lieferkette

Roboter für eine schnellere, sicherere und produktivere Logistik

In der Fertigung gehören Roboter heutzutage zum Alltag, in der Logistik kommen sie hingegen relativ selten zum Einsatz. Ein entscheidender Grund für die zögerliche Akzeptanz ist die wirtschaftliche Tragfähigkeit einer Technik, die sich mit hochkomplexen Aufgaben konfrontiert sieht. Zu nennen wären beispielsweise der Umgang mit verschiedenen Teilen in nahezu unendlich vielen Kombinationen, die Sicherheitsaspekte bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter im selben Raum sowie die hohen Kosten für Hardware und Rechenleistung.

Mittlerweile jedoch ändert sich die Lage, denn in Warenlagern und Sortierzentrten sind immer mehr hochmoderne Roboter zu finden, die selbst bei der Endkundenbelieferung helfen. Das Unternehmen DHL engagiert sich aktiv für den Einsatz von moderner Robotik und kann anhand der aktuellen Entwicklungen gut einschätzen, wie Roboter innerhalb der Lieferkette für mehr Geschwindigkeit, Sicherheit und Produktivität sorgen können.



Die moderne Robotik ist ein komplexes, facettenreiches Feld.

ROBOTIK IN DER LOGISTIK – DIE ZEIT IST REIF

Der Hauptgrund für die geringe Zahl an Logistikrobotern liegt darin, dass Roboter bis vor kurzem sehr einfache Maschinen waren – sie haben immer wieder dieselben Bewegungen ausgeführt und konnten dabei nur mit Genauigkeit und Präzision punkten. Für viele einfache Fertigungsschritte wie Schweißen oder Materialtransport werden auch keine weiteren Fähigkeiten benötigt. In der Logistik jedoch muss der Roboter vielseitiger und kompetenter sein.

Die Verfügbarkeit von Arbeitskräften ist in der Logistik ein großes Problem. Für den wachsenden eCommerce und die Verpackung von Palettenware in Einzelpakete an den Verbraucher werden mehr Arbeiter gebraucht. Dadurch steigen Kosten und Aufwand pro verkauften Artikel. In der westlichen Welt wird die Suche nach Arbeitskräften durch die schrumpfende Bevölkerung und das entsprechend geringe Arbeitskräfteangebot erschwert.

Angesichts dieser Problematiken ist die Robotik für die Zukunft der Logistik nicht mehr nur ein nettes Accessoire, sondern mittlerweile eine Notwendigkeit.

BASISTECHNOLOGIEN

Für den effektiven Einsatz in der Logistik muss ein Roboter gleichsam mit Augen, Händen, Füßen und einem Gehirn ausgestattet sein: Augen zum Erkennen von Gegenständen, Hände zum Aufnehmen, Füße für den Transport und das Gehirn für die Koordination all dieser Aufgaben.

Als Augen benötigt der Roboter mehr als nur Bildsensoren oder Kameras, und die Daten müssen von einer ausgefeilten Bildverarbeitungssoftware interpretiert werden. Beim Aufnehmen am Lagerplatz muss der Roboter in der Lage sein, unter vielen Teilen auch verdeckte Einzelteile herauszusuchen. Anschließend muss er zum Aufnehmen des Teils die Bewegung von Arm und Hand koordinieren.

Diese Herausforderung löst Universal Robotics mit einem Microsoft Kinect-Sensor, der mit seiner Neocortex-Software das menschliche Gehirn nachahmt. Dabei wird ein Roboter für das Aufnehmen eines bestimmten Teils trainiert und sein Wissen anschließend auf weitere Roboter übertragen.

Schunk beispielsweise ist ein Entwickler und Anbieter von Robotergreifern. Das aktuelle Produkt ist von der Natur inspiriert und simuliert die Funktion der menschlichen Hand mit fünf Fingern, zwanzig Gelenken und neun Motoren. Mit nur 1,3 kg Gewicht kann diese Roboterhand ähnlich wie der Mensch im „Power-Grip-Modus“ schwere Werkzeuge heben oder im „Precision-Grip-Modus“ empfindliche Elektronikteile handhaben. Eine Robotik, die sich an der menschlichen Hand orientiert, ist möglicherweise der Schlüssel zur Flexibilität, die ein Roboter in der Logistik benötigt.

Damit sich ein Logistikroboter im Lager, im Sortierzentrums oder gar innerhalb einer Ortschaft bewegen kann, werden fortschrittliche Technologien wie omnidirektionale fahrende Räder benötigt, mit denen sich der Roboter ohne Drehung in alle Richtungen bewegen kann.

Das dabei unverzichtbare Robotergehirn bräuchte eine beispiellos hohe Rechenleistung, um das menschliche Gehirn zu replizieren. Da der Roboter aber auf eine begrenzte Aufgabenstellung spezialisiert ist, kann die Rechenleistung reduziert werden. In der Technik zeichnet sich der Trend

zum Cloud-Processing ab, sodass der Roboter seine Bilder beispielsweise an Google senden, den Gegenstand mithilfe der leistungsstarken Google-Computer identifizieren und die nötigen Informationen zur Aufnahmestrategie abrufen könnte.

ANWENDUNGSFÄLLE FÜR ZUKUNFTSNAHE LOGISTIKROBOTER

Der Container ist in vielen Fabriken ein beliebtes Mittel für den Güterversand auf dem Seeweg. Um Transportkosten zu sparen, werden die Container oft bis zur Decke mit Waren bepackt – und zwar ohne Paletten. Bereits 2003 entwickelte DHL einen Paketroboter, der den Containerinhalt mithilfe eines Lasers scannt und die Waren dann in der optimalen Reihenfolge auf ein Förderband entlädt.

Es gibt aber auch mobile Kommissionierungsroboter, die sich zum Festregal begeben, um die Ware aufzunehmen. Im Beispiel von Fetch Robotics kann der primäre Fetch-Roboter seinen Torso ausfahren und erreicht Artikel auf höher liegenden Regalen, die er an einen zweiten Freight-Roboter mit einem Behälter für den Artikel übergibt. Die Fetch-Roboter arbeiten in nur einem Gang, während die Freight-Roboter agiler sind und sich im gesamten Lager zu den einzelnen Waren begeben können.

Verpackungs-Koboter wie Baxter von Rethink Robotics arbeiten direkt neben dem Menschen und können Kartons auspacken,

Etiketten aufbringen und die Kartons wieder verpacken. Dank federbelasteter Gelenke und Berührungssensoren kann Baxter bedenkenlos in der Nähe von Menschen eingesetzt werden und lässt sich trainieren, indem sein Arm von Hand durch eine einfache Aufgabe geführt wird.

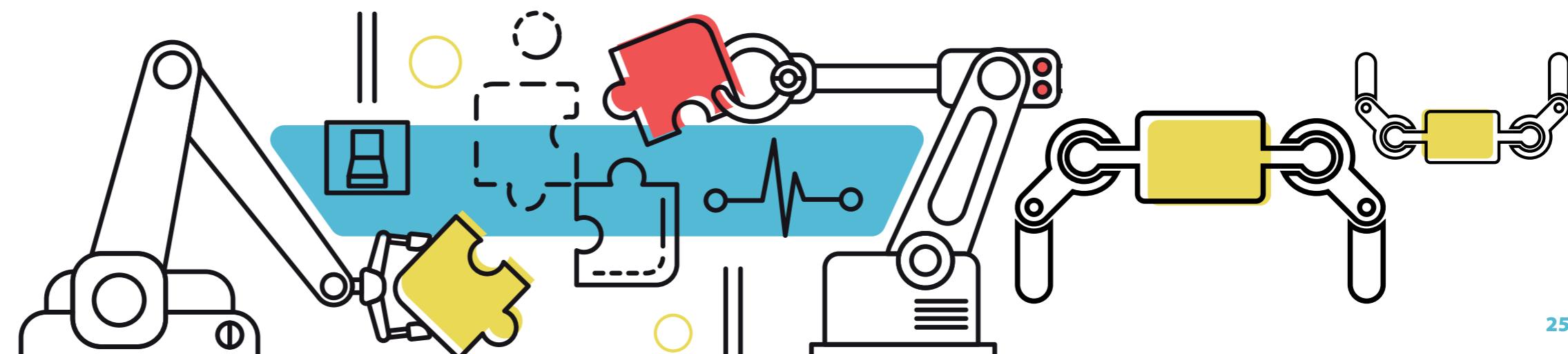
Robo-Pick von SSI Schaefer hat ein automatisiertes Behältersystem, mit dem die Waren zu einem stationären Roboter befördert werden. Dieser erkennt den benötigten Artikel, nimmt ihn auf und legt ihn auf ein Förderband. Diese Anlage kann angeblich bis zu 2400 Artikel pro Stunde kommissionieren und eignet sich am besten für Kleinteile wie DVDs oder Medikamente. In der Hightech-Ausführung wird der aufgenommene Artikel im endgültigen Versandkarton abgelegt.

Die größte Herausforderung für die Logistik ist die Bewegung des Roboters außerhalb des Lagers zur Auslieferung der Waren an Privathaushalte und Unternehmen.

Ein frühes Beispiel ist Starship Technologies, dessen autonomer Roboter zwei Einkaufstaschen tragen kann und zu einem genauen Zeitpunkt am Zielort eintrifft. Der Empfänger kann den Fortschritt über eine mobile App verfolgen und damit auch den Roboter entsichern, um die Waren zu entnehmen.



Ein Roboter von DHL belädt Versandkisten optimal mit Paketen
(Quelle: DHL Express © 2018).





Aufbau und Erhalt der Vernetzung

Jedes komplexe Roboter- und Automationssystem benötigt zahlreiche zuverlässige Strom-, Daten- und Signalanschlüsse zwischen verschiedenen Komponenten und Subsystemen.

VERNETZUNG

Bei tausenden Verbindungen mittels Kabel und Funk muss die Übertragung zu 100 Prozent zuverlässig sein, wenn eine langjährige Nutzungsdauer und ein hoher Wirkungsgrad die von Robotersystemen erwarteten Kostenvorteile bewirken sollen.

Die zu vernetzenden Subsysteme sind in großer Zahl vorhanden und haben viele verschiedene Eigenschaften. Beispielhaft zu nennen sind die internen und externen Niedrig-Energie-Sensoren der Robotikplattform, die

Signale im Millivoltbereich senden, sowie hochkomplexe Roboterhände (Effektoren), die Gegenstände wahrnehmen und manipulieren können und auf Echtzeitdaten und Video-Streams von elektromagnetischen Störquellen angewiesen sind. Zusätzlich übertragen die Anschlüsse hohe Ströme als gepulste Last an Elektromotoren, Servomotoren und andere elektromechanische Geräte.

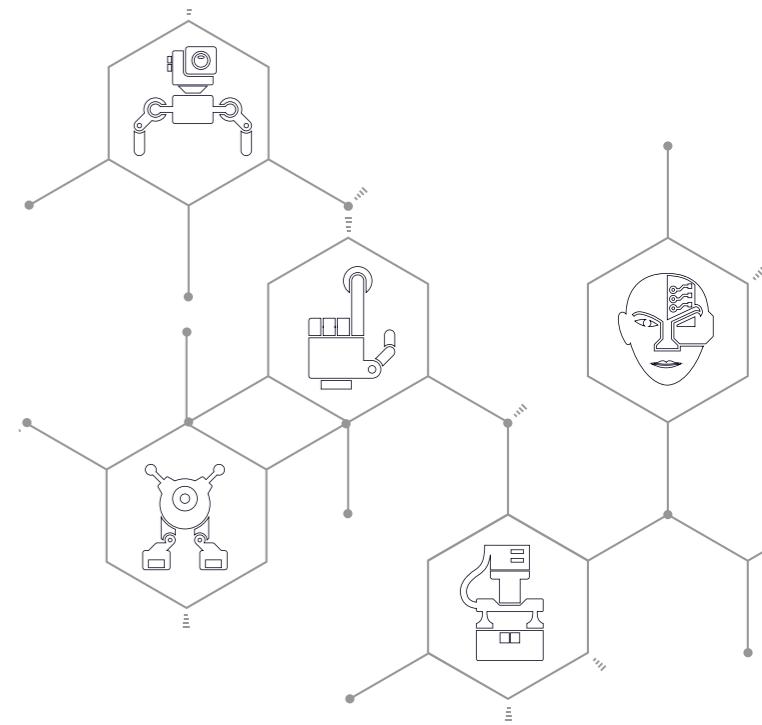
Strom-, Daten- und Signalleitungen liegen oft nah beieinander, weshalb die Anschlüsse eine hohe Packungsdichte benötigen. Da die Leitungen häufig im selben Bereich verlaufen oder sich gar einen Steckverbinder teilen, besteht die Gefahr elektrischer Interferenzen zwischen den einzelnen Systemen.

Auch die Betriebsumgebung beeinflusst die Wahl der Verbindungslösung, da sich Teile der Robotikplattform auf verschiedenen Achsen bewegen und dabei ganz eigene Stoß- und Vibrationslasten erzeugen. Des Weiteren sind zu beachten: Temperaturextreme, Wasser, Staubaufkommen, korrosive Atmosphäre, Chemikalienbelastung und die Nähe zu Schweißbereichen und ähnlichen gefährlichen Prozessen.

DIE WAHL DER VERBINDUNGSLÖSUNG

Als Leitungskupplungen stehen Rundsteckverbinder, Rechteck-Steckverbinder, Datensteckverbinder und Klemmenblöcke zur Verfügung. Angesichts der räumlichen Enge und der vielen Anschlüsse empfiehlt sich die Verwendung modularer Steckverbinder, die sich mit Strom-, Daten- und Signalkontakten teilweise konfektionieren lassen. Hersteller wie Harting mit der Produktreihe HanModular® bieten Steckermodule, Hauben und Gehäuse für individuelle Steckerkonfektionen an. Dadurch verringern sich die Gesamtzahl der benötigten Leitungskupplungen und der Umfang der Lösung, ohne dass ein komplett anwendungsspezifisches Steckerdesign benötigt wird.

In der Robotik kommt es immer wieder zu Situationen, in denen sich bewegliche Teile des Systems relativ zu statischen Teilen bewegen. Dabei werden Stecker und Kabel verwunden, weshalb eine Zugentlastung für den Stecker in Erwägung gezogen und sowohl die Auswahl des Kabels als auch deren Verlegung im System berücksichtigt werden sollten.

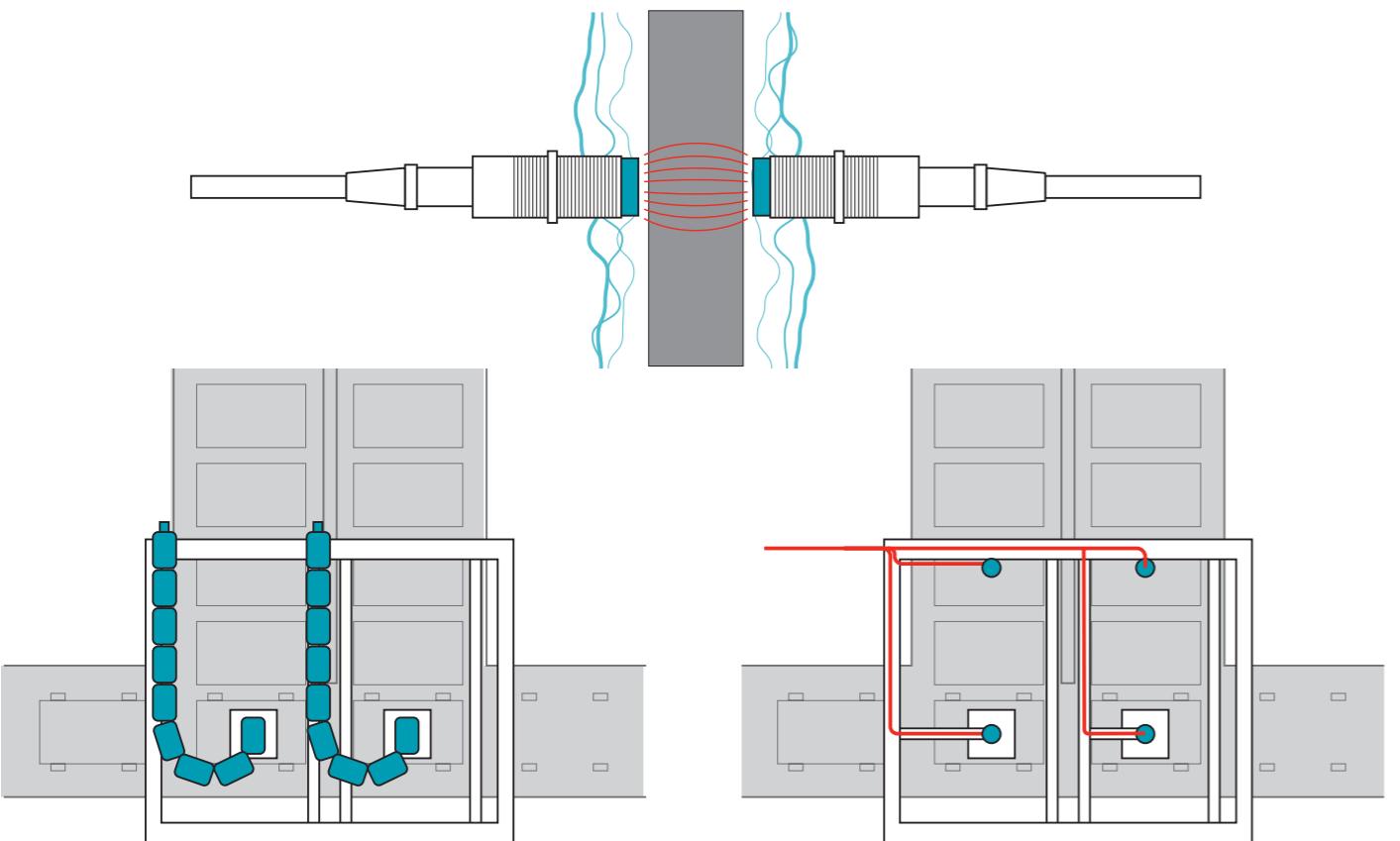


Bei Robotern mit drehbaren Teilen sollte mit Schleifringen gearbeitet werden, um die Zuverlässigkeit der Verbindung gewährleisten zu können. Diese elektromechanischen Teile sind die Lösung für die zuverlässige Verbindung drehbarer Teile: Strom oder Daten werden über eine Bürste aus Metall oder Grafit übertragen, die während der Drehung mit einem Metallring in Kontakt bleibt. Der elektrische Widerstand ist höher als bei statischen Steckverbindern, aber die beweglichen Teile können mit der Zeit verschleißen und oxidieren.

Eine weitere Lösung für die Kontakt herstellung zu beweglichen Teilen sind die kontaktlosen Leitungskupplungen Ariso von TE Connectivity, bei denen Strom und Daten ohne physische Verbindung über eine induktive Magnetkupplung übertragen werden, wenn nötig auch durch Wasser oder Öl.

Bei Steckverbindern unterscheidet man u. a. zwischen verriegelbaren und nicht verriegelbaren Ausführungen. Verriegelungen finden sich bei Rundsteckern meist in Form eines Gewindes und bei rechteckigen Steckern als Sicherungsbügel.

Nicht verriegelbare Datensteckverbinder wie USB-Stecker eignen sich gut für die Übertragung von Hochgeschwindigkeitsdaten, lösen sich aber leicht aus der Buchse und sind für rauе Umgebungen ungeeignet. Es können robustere Ausführungen (z. B. von Bulgin) verwendet werden, die sich verriegeln lassen und Schutz vor Flüssigkeits- und Staubeintrag bieten.



Kabel und Steckverbinder verschleißt mit der Zeit, während kontaktlose Leitungskupplungen dieses Problem nicht haben.

Die Form der Steckerkontakte ist für die langfristige Zuverlässigkeit entscheidend, denn in problematischen Umgebungen liegt dort die häufigste Störungsursache. Bei vielen Steckverbindern sind die Kontakte als Stecker-Buchse-Paar ausgeführt. Hier hängt die langfristige Zuverlässigkeit von Werkstoff, Beschichtung und Schmierung der Kontakte ab. Für Umgebungen mit hohem Schmutzaufkommen werden gegabelte Kontakte für redundante Strompfade empfohlen.

NETZWERKFÄHIGKEIT

Ursprünglich arbeiteten Roboter zur Verbindung zwischen Steuerungen und externen Komponenten mit proprietären Netzwerkstandards. Um Kosten zu sparen und Realisierungszeiten zu verkürzen, sollten stattdessen PCs mit handelsüblicher Ethernet-Hardware verwendet werden.

Viele denken bei der Bezeichnung „Ethernet“ an das Kabel, das den PC mit dem Local Area Network (LAN) und dem Internet verbindet. Das ist allerdings nur der physische Teil, der das Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) und ähnliche Kommunikationsprotokolle überträgt. Dieser Aufbau mag für den Endverbraucher geeignet sein, aber bei der Steuerung komplexer Prozesse muss das Netzwerk drei Voraussetzungen erfüllen: deterministische Echtzeitsteuerung, systemweite Zeitsynchronisation und exakte Terminierung.

Die Arbeitsgruppe IEEE 802.1 der IEEE Standards Association hat Normentwürfe vorgelegt, mit denen das zeitsensible Netzwerken (TSN, Time-Sensitive Networking) auch mit normalen Ethernetnetzwerken möglich ist. Der neue Projektentwurf IEEE 802.1Q zielt auf ein Echtzeit-Networking für Audio- und Videoanwendungen sowie eine Echtzeitsteuerung für industrielle Netzwerke ab.

NETZWERKPROTOKOLLE

Es gibt mehrere industrielle Netzwerkprotokolle, mit denen sich die Übertragung von Datenpaketen innerhalb der TCP/IP-Architektur organisieren lässt.

Ethernet/IP ist Teil der CIP-Familie (Common Industrial Protocol), zu der auch ControlNet und DeviceNet gehören. Als Anwendungsschicht arbeitet sie mit traditionellen

Ethernetprotokollen wie TCP/IP und ist kompatibel mit Ethernet-Standardhardware, weshalb sie sich problemlos und vermutlich zukunftssicher integrieren lässt. In diesem System werden Datenpakete so organisiert, dass mithilfe von Ethernet-Standardhardware eine Echtzeitleistung erreicht wird, was sich positiv auf Realisierungszeiten und Kosten auswirkt. Es wird von mehreren Anbietern unterstützt, ist auf dem nordamerikanischen Markt weit verbreitet und kommt oft bei Rockwell Collins-Steuersystemen zum Einsatz.

Noch ein marktführender Standard ist EtherCAT, das 2003 vom deutschen Automationsunternehmen Beckhoff entwickelt wurde. Es verkürzt die Zykluszeiten, verringert den Jitter und senkt die Hardwarekosten. Das Protokoll findet breite Akzeptanz in den Fertigungsindustrien für Halbleiter, Displays und Solarkollektoren (z. B. Applied Materials, Lam Research oder Brooks Automation) und hat sich damit eine umfangreiche Anwenderbasis mit hohem Marktanteil erarbeitet.

EtherCAT arbeitet nach dem Prinzip „Processing on the fly“, d. h. die Nachrichten werden noch vor dem Verarbeiten weitergeleitet. Das ist erheblich schneller und effizienter, und es wird behauptet, dass sich auf diese Weise die deterministischste Reaktion aller verfügbaren Ethernet-Standards erreichen lässt.

EtherCAT kombiniert eine offene Softwarelösung mit handelsüblichen Ethernet-Mastersteuerungen und anwendungsspezifischen EtherCAT-Slavesteuerungen (ESCs). Die ESCs enthalten proprietäre, anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs), feldprogrammierbare Gate-Arrays (FPGA) sowie weitere mit lizenziertem Software programmierte Mikrocontroller. Die EtherCAT-Hardware wird von zahlreichen Herstellern angeboten, die umfangreich in Konzeption und Entwicklung investiert haben. Dementsprechend ist sie kostspieliger als Ethernet-Standardkomponenten.

DRAHTLOSESVERBINDUNGEN

In vielen Anwendungsbereichen sind die Robotiksysteme mobil ausgeführt, beispielsweise in Form autonomer Fahrzeuge oder Palettentransportsysteme in Logistikumgebungen.

Bei vielen Systemen ist es wünschenswert, dass physische Verbindungen zum System nur für die Stromversorgung hergestellt werden und der Datenverkehr der Systemsteuerung drahtlos erfolgt, auch wenn die Robotikplattform statisch ist. Das verringert den Verkabelungsaufwand und schafft mehr Flexibilität bei der Umstellung des Fabriklayouts.

Drahtlosprotokolle für Robotik und industrielle Automation befinden sich noch am Anfang, sind für den lückenlosen Aufbau eines Netzwerks aus Robotik, Sensorik und Messtechnik jedoch unverzichtbar. Bei der Auswahl eines Drahtlosprotokolls für industrielle Anwendungen werden dessen Reichweite, Frequenz und Datenrate entscheidend sein.

Viele gängige Kommunikationstechnologien sind in allen Sektoren der Industrie etabliert. Bluetooth wird beispielsweise oft

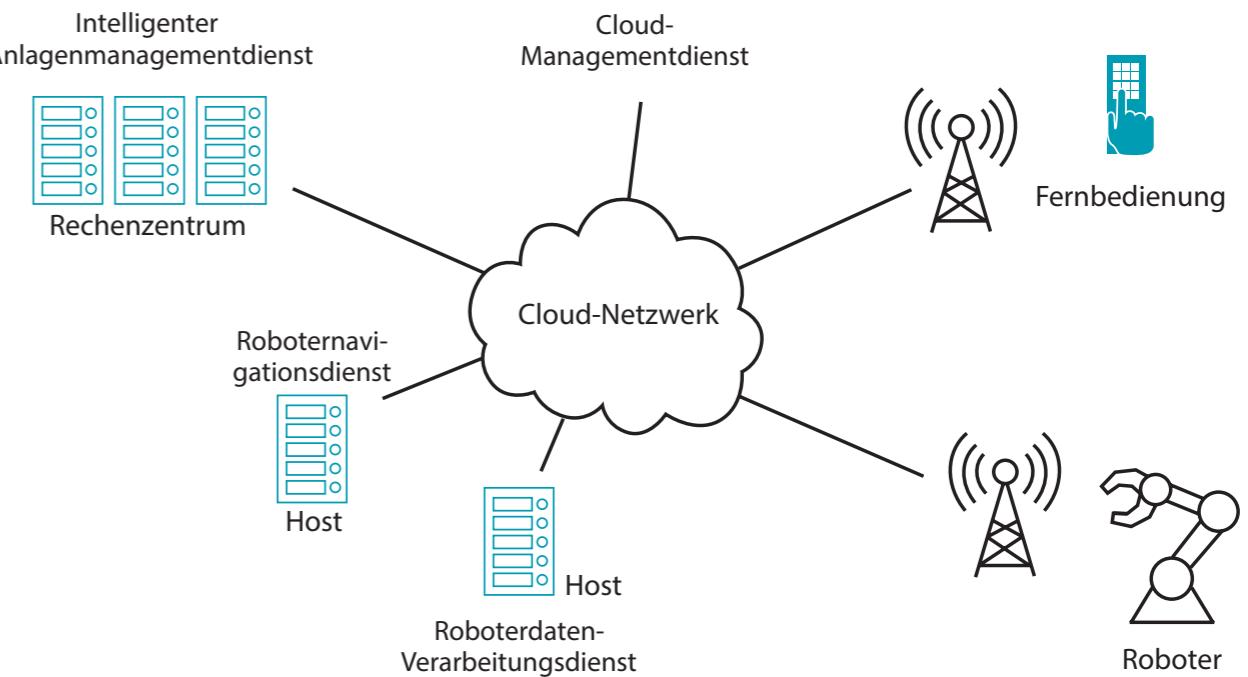
als Ersatz für verdrahtete Punkt-zu-Punkt-Verbindungen genutzt, und bei Echtzeitanwendungen lassen sich WiFi-Protokolle schnell für die industrielle Nutzung einrichten, da sie eine geringe Latenz aufweisen und ohne externen Netzbetreiber auskommen. WiFi bietet allerdings eingeschränkte Möglichkeiten, da es sehr wenige Kanäle hat, die sich gegenseitig stören können, und empfindlich auf die für industrielle Umgebungen typischen elektromagnetischen und Funkstörungen reagiert. 4G LTE ermöglicht die Kommunikation über kilometerweite Strecken, hat eine hohe Bandbreite und eine akzeptable Latenz. Allerdings wird hierfür ein Netzwerkbetreiber benötigt, der von jedem angeschlossenen Terminal eine eigene SIM fordert. Diese SIM-Pflicht wird in Zukunft entfallen. Ein gutes Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung sind Landmaschinen, die auf großen Betrieben 4G mit GPS-Systemen kombinieren und dank Rund-um-die-Uhr-Betrieb ihre Maschinenauslastung erheblich verbessern.

Andere Protokolle wie WirelessHART, ZigBee oder ISA100.11a, die sich für Nicht-Echtzeit-Anwendungen eignen (z. B. große drahtlose Sensornetze/WSNs), berufen sich auf die Techniknorm IEEE 802.15.4.

Protokoll	Datenrate	Max. Reichweite	Frequenz
4G LTE	50 Mbps	Viele Kilometer	2...8 GHz
5G	Ca. 1 Gbit/s (noch nicht bestätigt)	Viele Kilometer	Noch nicht bestätigt
Bluetooth	1 Mbps	150 Laufmeter	2,4 GHz
IEEE 802.15.4	250 KB/s	75 Laufmeter	868/915/2450 MHz
WiFi	1 Gbps	50 Laufmeter	2,4/5 GHz
WirelessHART	250 KB/s	225 Laufmeter	2,4 GHz
ZigBee	250 KB/s	75 Laufmeter	2,4 GHz

Tabelle 1: Vergleich von Drahtlosprotokollen

CLOUD-ROBOTIK UND 5G



Dank 5G-Technologie mit Gigabit-Konnektivität könnte auf andere Drahtlosnetzwerke dann verzichtet werden.

Keines der hier besprochenen Drahtlosnetzwerke ist so schnell, dass die Robotik ihr volles Potenzial ausschöpfen könnte.

Beim Einsatz mobiler, autonomer Roboter, die komplexe Echtzeitprozesse leiten und Sofortentscheidungen treffen, würde die reine Verarbeitungsleistung mehr Hardware beanspruchen und Strom verbrauchen, als ein Industrieroboter jemals wirtschaftlich und physisch zu tragen in der Lage wäre.

Damit die Robotik die nächste Stufe zünden kann, muss die Verarbeitung in der Cloud stattfinden und von 5G-Netzen unterstützt werden. Aber diese Netze gibt es noch nicht. Zum

Massenrollout dürfte es frühestens 2020 kommen, und noch steht nicht fest, welche Leistung man tatsächlich erwarten darf. Bei möglichen Datenraten bis 1 Gbit/s ist der Roboter über die Cloud und einen Cloud-Management-Dienst mit anderen Diensten für Fernsteuerung, Datenverarbeitung, Navigation, Gebäudemanagement usw. verbunden. Zusätzlich zu den hohen Datengeschwindigkeiten ist die sehr niedrige Latenz ein großer Vorteil und verschafft dem System die Eignung für Echtzeitanwendungen.

SICHERHEIT

Angesichts der wachsenden Zahl an vernetzten Systemen und offenen Standards in der Industrie steigt auch die Gefahr von vorsätzlichen und ungewollten Sicherheitslücken. Die Netzwerke müssen verschlüsselt werden, die Geräte benötigen Authentifizierungen, kritische Bereiche und Infrastrukturen brauchen Sicherheitskontrollen.

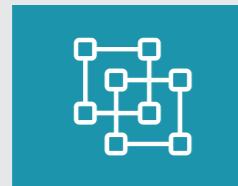
Im März 2017 wurde berichtet, dass Sicherheitsforscher erfolgreich einen 100-kg-Roboterarm von ABB hacken konnten, indem sie einen USB-Stick mit einem bösartigen Code einsetzen.

SCHLÜSSELFAKTOREN



01

Wie viele Strom-, Daten- und Signalanschlüsse werden für jedes Subsystem benötigt? Was muss in puncto Elektrik, elektromagnetische Interferenzabschirmung, Platzbedarf, Gewicht und Umgebung beachtet werden?



02

Bei der Wahl der Verbindungslösung ist zu beachten, wie die Steckerkontakte ausgeführt sind, ob der Steckverbinder verriegelbar sein muss, ob ein Schutz gegen Wasser- oder Staubeintrag erforderlich ist und ob sich mit einem modularen Steckverbinder, der Strom-, Daten- und Signalkontakte in sich vereint, Platz sparen lässt.



03

Zum Steuern komplexer Prozesse muss die Netzwerklösung eine Echtzeitsteuerung, Zeitsynchronisation und eine exakte Terminierung unterstützen. Dabei kommen Ethernet/IP und EtherCAT als gängige Protokolle in die engere Auswahl.



04

Kombiniert man industrielle Netzwerkprotokolle mit einer TCP/IP-Architektur und handelsüblicher Ethernethardware, so ergibt sich eine kosteneffektive Lösung für Robotik und industrielle Steuerungen.



05

Für Robotikanwendungen kommen verschiedene Drahtlosprotokolle in Frage, deren Wahl abhängig ist von der jeweiligen Datenrate, Reichweite, Frequenz und Umgebung.



06

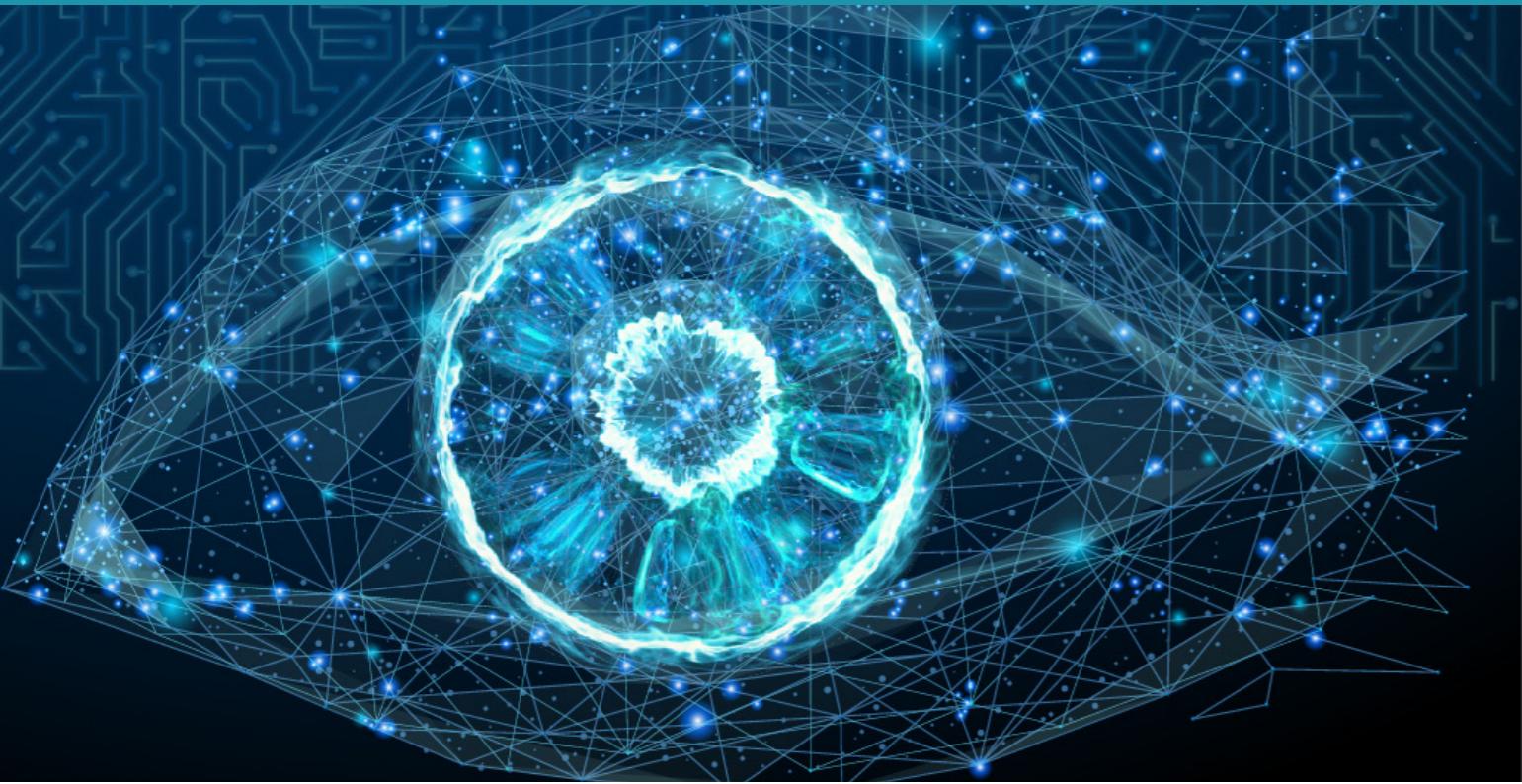
Mit den 5G-Netzwerken der neuen Generation, die ab 2020 verfügbar sind, wird die Cloud-Robotik dank hoher Datengeschwindigkeiten und geringer Latenzen zur Realität. Die künftigen mobilen, autonomen Roboterplattformen werden sich die Echtzeitverarbeitung Cloud-basierter Server zunutze machen.



07

Industrielle Netzwerke und Systeme sind durch Sicherheitslücken bedroht, weshalb die Verschlüsselung von Hardware, Netzwerken und umgebender Infrastruktur bei der Systemauslegung unverzichtbar ist.





Sehen, Hören, Berühren, Bewegen

Wahrnehmung der realen Umgebung

Die heutigen Roboter werden nicht nur in ihren Bewegungen, sondern auch in ihrer Wahrnehmung der Wirklichkeit dem Menschen immer ähnlicher. Die rasche Entwicklung in der Sensorik für Roboteranwendungen fördert diese Tendenz, und die Fähigkeit der Roboter, Entscheidungen auf der Grundlage von Sensorsignalen zu treffen, wird sich massiv auf Industrie und Gesellschaft auswirken.

Damit der Roboter sich ein vollständiges Bild von seiner Betriebsumgebung machen kann, benötigt er eine Vielzahl von Sensoren. Welche Schlüsseltechnologien sind es also, die den Roboter zum Sehen, Hören, Spüren und Bewegen ermächtigen? Wie ist der Stand der Entwicklung?

DIE ENTWICKLUNG DER SENSORIK

Der erste mobile Roboter, der Informationen über seine Umgebung sammeln konnte, wurde 1970 vom Stanford Research Institute (heute SRI International) in Kalifornien gebaut. Er hieß Shakey und hatte mehrere Sensoreingänge für TV-Kameras, Laserentfernungsmesser und Aufprallsensoren, die er für die Navigation benötigte.

1972 entwickelte die Waseda University in Japan mit WABOT-1 den weltweit ersten Humanoidroboter in Lebensgröße, der

dank Tastsensoren an den Händen Gegenstände ergreifen und transportieren konnte. Sein Optiksystem konnte Entfernungen messen, während das Navigieren zum Gegenstand über externe Rezeptoren (künstliche Augen und Ohren) erfolgte.

Nur zwei Jahre später entwarf David Silver den Silver Arm, der mit seinen der menschlichen Hand nachempfundenen Greifern feine Bewegungen ausführen konnte und entsprechende Rückmeldungen von seinen Tast- und Drucksensoren empfing.

Seit diesen ersten Sensorversuchen bei Robotern hat es bemerkenswerte Fortschritte gegeben. Die berühmteste Kreation war zweifellos ASIMO, der 2000 aus dem Humanoidprojekt von Honda entstand. ASIMO konnte mit Menschen kommunizieren und erkannte Gesichter, Umgebungen, Stimmen und Körperhaltungen.

Die kontinuierliche Erforschung der Sensorfähigkeiten hat bei Industrierobotern zu einer größeren Akzeptanz von Sensoren geführt. Und wie bei allen Technologien, die den Sprung aus dem Forschungslabor in die kommerzielle Herstellung schaffen, sinken mit steigender Akzeptanz die Kosten. Dank der Verbreitung von Industrierobotern werden die Produktionszahlen weiter steigen und die Kosten dementsprechend fallen, sodass die aktuelle Sensorik für alle verfügbar wird und nicht nur für internationale Erstausrüster von Robotern.

BILD UND TON

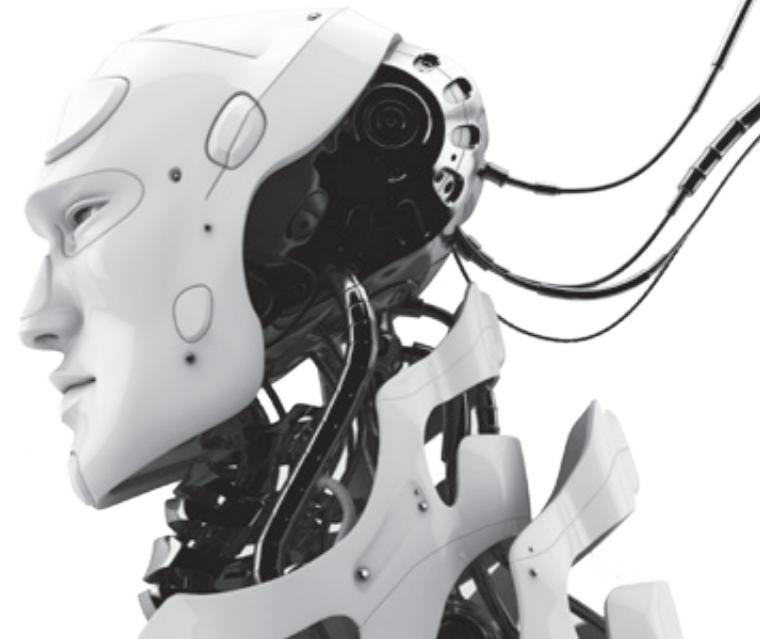
Die Bilderkennung bildet die Grundlage der Roboterintelligenz und lässt sich mithilfe herkömmlicher Kameras, Sonar- und Lasertechnik, aber auch mit aktueller RFID-Technik realisieren.

Auch LIDAR-Systeme (Light Detection and Ranging) bieten sich für die optische Roboterführung an. Bei diesem Verfahren wird ein Lichtsignal von den benachbarten Oberflächen reflektiert, und aus diesen Daten erstellt der Roboter eine 3D-Karte seiner Umgebung. LIDAR arbeitet im Prinzip wie ein Radar, erreicht durch den Verzicht auf Funkwellen und seine Aussendung von Lichtstrahlen jedoch eine höhere Auflösung.

Optische Hardware bietet zahlreiche Vorteile, was sich nicht zuletzt in der Entwicklung störungssamer CMOS-Hochgeschwindigkeitsbildsensoren und neuer 2D- und 3D-Bildverarbeitungssysteme zeigt.

Ein 2D-Bildverarbeitungssystem arbeitet hauptsächlich mit einer Videokamera, die Bewegungen erkennt oder Teile auf einem Förderband lokalisiert, sodass der Roboter seine Position koordinieren kann. 3D-Bildverarbeitungssysteme haben meist entweder Laserscanner oder zwei Kameras mit verschiedenen Blickwinkeln. Damit kann der Roboter Teile in einem Behälter erkennen, in 3D nachbilden, analysieren und über die optimale Handhabungsmethode entscheiden.

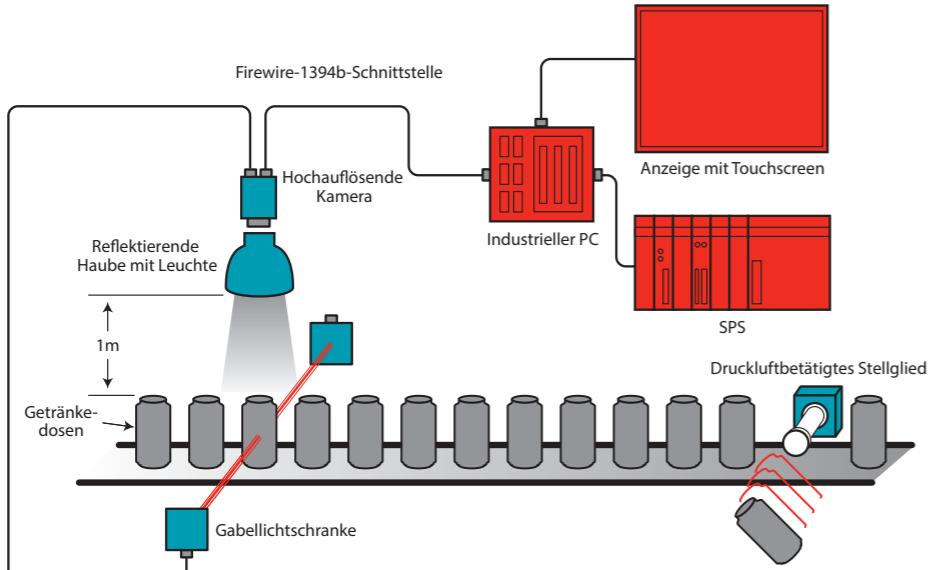
Als Ergänzung zu den optischen Sensoren können Audiosensoren eingesetzt werden, die mithilfe mehrerer Mikrofone die Richtung und Intensität von Stimmen oder akustische Kommandos erkennen. Die Empfindlichkeit wird mit einem Potentiometer eingestellt. Mikrofone gibt es seit langer Zeit, aber in Zukunft könnten Audiosensoren sogar in der Lage sein, den Gefühlszustand des Menschen an seiner Stimme zu erkennen. Dafür braucht es aber elektronische Analog-Digital-Wandler (ADC) und digitale Signalverarbeitungssysteme (DSP) mit einem leistungsstarken Mikroprozessor und einer hochentwickelten Software.



BERÜHRUNGEN

Ein Fühler, der die Berührung zwischen einem Gegenstand und einem Sensor quantifiziert, wird als Tastsensor bezeichnet. Solche Geräte finden sich oft in Alltagsgegenständen, beispielsweise als Lampensockel mit berührungssteuerter Dimmfunktion. Der Reiz-Reaktion-Pfad in der Elektronik von Tastsensoren ist den menschlichen Prozessen nachempfunden, die an der Haut, während der Reizübertragung über das Nervensystem und im Gehirn stattfinden.

Tastsensoren können resistiv (Widerstandsmessung zwischen elektrisch resistiven Schichten am Berührungsrand zur Ermittlung der Tastposition), oberflächenkapazitiv, projiziert-kapazitiv, schallwellengesteuert oder infrarotgesteuert ausgeführt sein. Eine aktuelle Neuerung in diesem Bereich ist der Adaptivfilter. Im Kontext der Roboterlogik kann der Roboter mit diesem Filter die aus seinen internen Bewegungen resultierenden Sensorsignale prognostizieren und dabei etwaige Signalfehler herausfiltern. Dadurch verbessert sich die Berührungserkennung, und die Zahl der Fehlinterpretationen sinkt.



Kameras sind in der Lage, Teile und deren Ausrichtung auf einem Förderband zu erkennen.

KRAFT-MOMENTEN-SENSOREN

So wie die Bildverarbeitung dem Roboter sein Sehvermögen gibt, verleihen ihm Kraft-Momenten-Sensoren eine Art Gefühl, sodass der Anwender erfährt, mit welcher Kraft der Roboter seinen Endeffektor einsetzt. Das erweist sich bei Montagearbeiten als hilfreich: Wenn ein Bauteil beispielsweise falsch montiert ist, kann der Roboter anhand des Sensorsignals seine Bewegungen anpassen und das Bauteil in die richtige Position bringen.

Kraft-Momenten-Sensoren erkennen verschiedene Kräfte und Drehmomente auf bis zu drei geometrischen Achsen (X, Y, Z). Sie sitzen typisch am Flansch oder Handgelenk des Roboters, wo sich der Kraftaufwand gut messen lässt. Zu den Auswahlkriterien für Kraft-Momenten-Sensoren gehören die Anzahl der gemessenen Achsen, die physischen Abmessungen, der Kraftbereich und die Datenübertragungsgeschwindigkeit.

Kraft-Momenten-Sensoren sind wichtig für Kooperations- und Sicherheitsfunktionen, da die Fähigkeit zur Kraftbegrenzung für in Menschennähe eingesetzte Robotersystemen entscheidend ist.

NÄHERUNGS-/KOLLISIONSDETEKTOREN

Näherungssensoren erkennen nahe Gegenstände (Zielobjekte) ohne physische Berührung und sitzen am Endeffektor sowie an anderen beweglichen Teilen des Roboters. Der Sensor wird bei einem vorgegebenen Abstand zum Zielobjekt aus dem Ruhezustand geweckt.

Getreu dem Motto „keine Berührung ist besser als eine leichte Berührung“ sind kollaborative Roboter die bevorzugte Zielgruppe für Näherungssensoren, da letztere für den Menschen eine sichere Arbeitsumgebung schaffen.

Die Eigenschaften des Zielobjekts bestimmen die des Sensors: Ein kapazitiver oder fotoelektrischer Sensor eignet sich beispielsweise für Zielobjekte aus Kunststoff, während induktive Näherungssensoren stets ein metallisches Zielobjekt benötigen.

Der maximale Abstand, bei dem der Näherungssensor das Zielobjekt noch detektiert, wird als Nennreichweite bezeichnet und ist in einigen Fällen einstellbar.

Näherungssensoren zeichnen sich durch ihre hohe Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer aus, da sie keine beweglichen Teile und keinen Kontakt zum Zielobjekt haben. Zu den vielen Ausführungen zählen kapazitive, induktive, magnetische, optische, fotoresistive, Wirbelstrom-, Radar-, Sonar-, Ultraschall- und Glasfasersensoren.

Infrarotsensoren senden beispielsweise einen Lichtstrahl aus, der von einem Reflektor zurückgeworfen und von einem Empfänger erfasst wird. Ultraschallsensoren hingegen erzeugen hochfrequente Schallwellen, deren Echo auf die Schallpfadunterbrechung durch ein Zielobjekt schließen lässt.

Ultraschallsensoren haben der Infrarottechnik gegenüber den Vorteil der größeren Reichweite und müssen nicht kalibriert werden. Ultraschall funktioniert bei allen Lichtverhältnissen und eignet sich dank seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Kollisionsvermeidung bei Robotern. Darüber hinaus reagiert der Sensor relativ unempfindlich auf Erschütterungen.

POSITION

Positionssensoren werden zum Erkennen und Steuern der Armposition benötigt. Die drei gängigsten Ausführungen sind Winkelgeber, Potentiometergeber und Koordinatenwandler (Resolver).

Winkelgeber wandeln Winkel- oder lineare Verschiebungen in digitale Signale um und sind als Lineargeber, Drehgeber, Inkrementalgeber oder Absolutwertgeber ausgeführt.

Inkrementalgeber haben eine Glasscheibe mit Teilstrichen, auf einer Seite gesäumt von einem Lichtsender und auf der anderen von einem Lichtempfänger. Wenn sich die Glasscheibe dreht, wird der Lichtstrahl durch die Teilstriche wiederholt unterbrochen. Die Frequenz der entstehenden Impulsfolge verhält sich proportional zur Drehzahl der Glasscheibe. Absolutwertgeber werden meist eingesetzt, um die absolute Position eines Teils zu bestimmen. Sie sind ähnlich aufgebaut wie ein Inkrementalgeber, wobei die Teilstriche jedoch eine Binärzahl ausgeben, die sich relativ zum Achswinkel verhält.

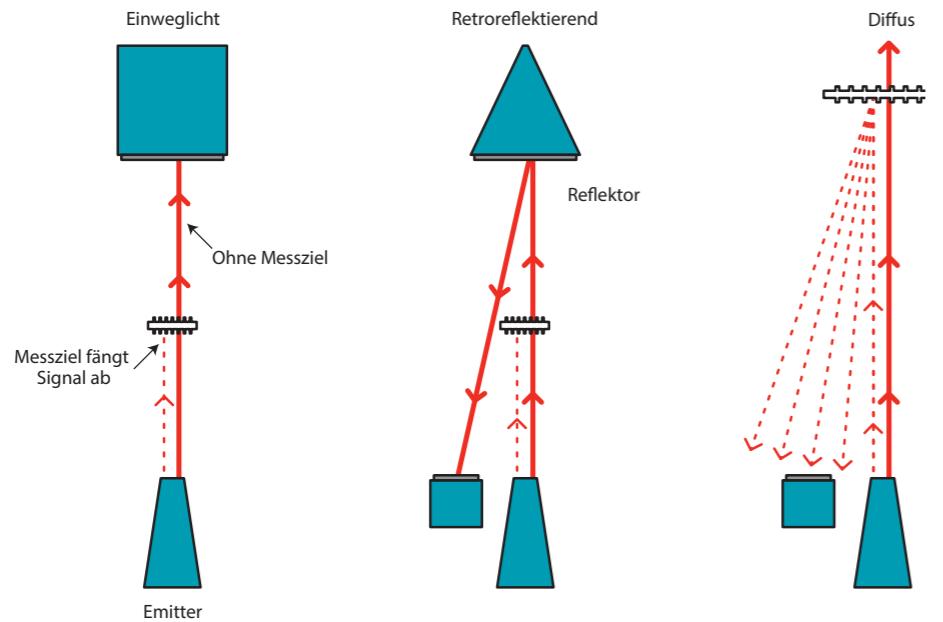
Auch mit einem Potentiometergeber lassen sich Positionen ermitteln. Es handelt sich im Grunde um Spannungsteiler, deren Ausgangsspannung sich proportional zur Position eines umlaufenden, an einem Widerstandselement anliegenden Schleifers verhält. Der Schleifer teilt die Spannung des Widerstandselements und ermittelt die Position durch Messen der Spannung.

Wie ein Potentiometergeber arbeitet auch ein Koordinatenwandler analog. In diesem Fall wird der Grad der Drehung mithilfe elektrischer Rotationstransformatoren berechnet. Dafür wird ein Wechselspannungssignal benötigt. Das Ausgangssignal des Koordinatenwandlers verhält sich proportional zum Winkel des drehenden Teils gegenüber dem festen Teil.

WEITERE ENTWICKLUNGEN

Die raschen Fortschritte in der Robotersensorik haben zu einer Vielzahl hochmoderner, beizeiten gar radikaler Industrielösungen zugunsten der Sicherheit geführt und fördern die effektivere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine.

Heutige Sensoren wie Kameras oder Tiefenmelder reagieren oft empfindlich auf wechselnde Lichtverhältnisse und können die Position einer Person im dreidimensionalen Raum nur grob ermitteln. Dank neuerer Sicherheitssysteme kann der Mensch näher an leistungsstarken Robotern arbeiten, die bei zu großer Annäherung vollständig abschalten. Die Systeme der kommenden Generation verfolgen menschliche Bewegungen viel genauer (z. B. mit optimierten Radarsystemen), sodass leistungsstarke Roboter mit dem Menschen gefahrlos im selben Raum arbeiten können. Diese Technik erhöht auch die Effizienz, da der Mensch das vom Roboter bearbeitete Teil ohne Verletzungsgefahr an sich nehmen kann.



Sensoren empfangen das Signal entweder direkt oder in reflektierter Form mit Unterbrechungen; das Zielobjekt wirft ein diffuses Signal zurück.

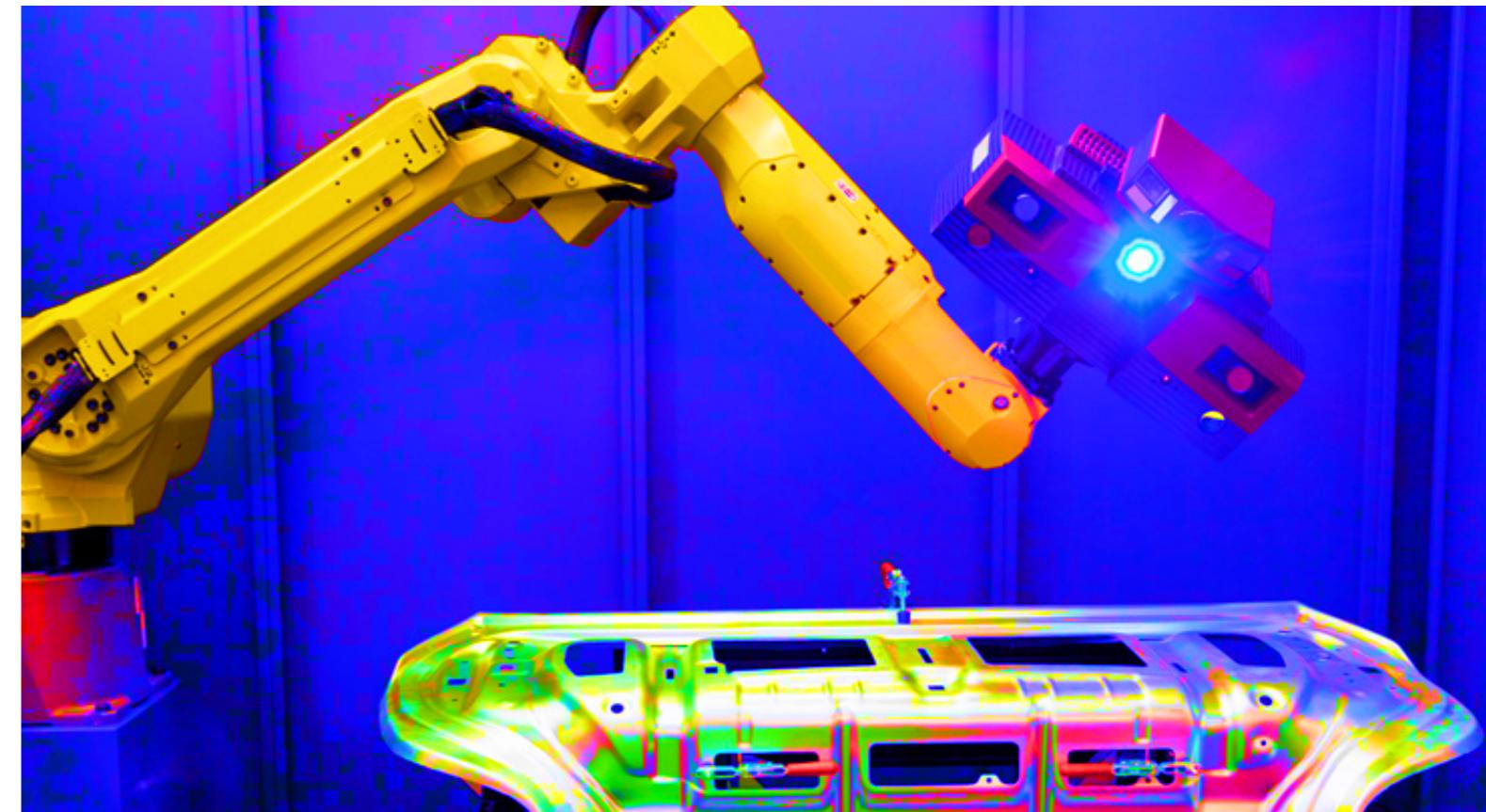
SENSORIKBEDARF BEI ROBOTERN

Der vermehrte Einsatz von Robotern in Automobilbau, Lebensmittel- und Getränkeindustrie, erneuerbaren Energien, Logistik, Medizintechnik, Telekommunikation und anderen Sektoren ist ein wesentlicher Faktor, der die Akzeptanz der Sensorik bei Industrierobotern in den kommenden Jahren vorantreiben dürfte.

Die Forschungsergebnisse von Analysten wie Technavio lassen vermuten, dass der weltweite Markt für Sensorik bei Industrierobotern bis 2021 jährlich um etwa 8 Prozent wachsen wird. Ein wichtiger Treiber dafür ist die Miniaturisierung von Sensoren, die nämlich den Kostenaufwand reduziert. Je stärker die Kosten für die Sensorik sinken, desto mehr Industrieroboter können direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten.

Laut dem Marktforschungsinstitut IDTechEx werden bis 2027 allein die Bildverarbeitungssysteme einen weltweiten Marktanteil im Wert von 5,7 Milliarden Dollar beanspruchen und Kraftsensoren über 6,9 Millionen Dollar erreichen.

Die Studie von Technavio zeigt, dass der Materialtransport den Sensorikmarkt für Industrieroboter im prognostizierten Zeitraum insbesondere in Automobilbau, Lebensmittel- und Getränkeindustrie, Verpackungstechnik und Pharma industrie und ähnlichen Sektoren dominieren wird. Darüber hinaus wird die zunehmende Dynamik der Industrie 4.0 zu einer entscheidenden Größe und in den kommenden Jahren das Marktwachstum anregen.





SCHLÜSSELFÄKTOREN



04

Die Akzeptanz von Tastsensorik ist in den vergangenen zehn Jahren stark angestiegen, was sich immer mehr Industrieroboter zunutze machen. Tastsensoren können resistiv, oberflächenkapazitiv, projiziert-kapazitiv, schallwellengesteuert sowie infrarotgesteuert ausgeführt sein.



01

Die Sensorik richtet sich nach dem angestrebten Leistungsvermögen. Wenn nötig, können mit modernen Sensoren sämtliche menschlichen Sinne repliziert werden, von denen in den meisten industriellen Anwendungsfällen aber nicht alle benötigt werden.



02

Bildverarbeitungssysteme: Wird die Kamera der Anwendung gerecht? Wenn ja, wird eine 2D- oder 3D-Bildverarbeitung benötigt, oder sollten weitere Möglichkeiten wie LIDAR, Sonar, Radar und RFID in Betracht gezogen werden?



03

Wie viele Audiosensoren werden voraussichtlich benötigt, und wie sollten sie im Idealfall angeordnet sein?



07

Auch Näherungssensoren kommen in der Robotik zum Einsatz, insbesondere wegen der schnell wachsenden Zahl an Kollaborativrobotern. Als Auswahlkriterien spielen der Werkstoff des Zielobjekts, die Nennreichweite und die Lichtverhältnisse eine Rolle.



05

Bei der Wahl der Kraft-Moment-Sensoren zur Erfassung unterschiedlicher Kräfte und Drehmomente am Handgelenk oder Werkzeug des Roboters sind die Anzahl der gemessenen Achsen, der Kraftbereich, die Datenübertragungsgeschwindigkeit und die physischen Abmessungen zu berücksichtigen.



Leistung und Bewegungssteuerung von Robotern

Kraftquellen, Steuerung und Betätigung moderner Roboter

Die Umsetzung von Bewegungen in der modernen Robotik ist abhängig von Antrieben, Steuerungen und Betätigungsseinrichtungen. Daher sollte bei der Systemauslegung möglichst früh über die optimale Kombination aus Kraftquelle, Stellgliedern, Motoren und Getrieben entschieden werden.

Maßgebliche Faktoren für diese Wahl sind die Ausführung und der Einsatzzweck des Roboters. Industrielle Roboter sind als kartesischer, SCARA-, zylindrischer, Parallelkinematik-, Polar-, Portal-

oder Gelenkarmroboter ausgeführt. Sie werden unter anderem für Montage, Schweißarbeiten, Maschinenbeschickung, Verpackung, Lackierarbeiten, Bestückung, Kontrolle und Prüfung eingesetzt.

Bei der wichtigen Wahl der Energiequelle sind Zuverlässigkeit, Größe, Gewicht und Nutzungsdauer entscheidend. Um die Bewegungsqualität zu optimieren, müssen die Erstausrüster auch die am besten geeignete Kombination aus Motoren und Stellgliedern sowie deren optimale Steuerung wählen.

BATTERIEN

Batterien sind die am häufigsten gewählte Stromquelle. Welche Batterie die beste ist, hängt von Kriterien wie Sicherheit, Nutzungsdauer, Gewicht und Kosten ab.

Bei Industrierobotern werden sowohl nicht wiederaufladbare Batterien als auch Akkumulatoren eingesetzt. Nicht wiederaufladbare Batterien haben natürlich den Nachteil, dass sie ersetzt werden müssen, sind aufgrund ihrer typisch höheren Volumenleistungsdichte aber gut für bestimmte Anwendungen mit geringer Stromaufnahme geeignet. Trotzdem sind Akkumulatoren oft vorzuziehen.

Traditionell setzen Robotersysteme auf Nickel-Cadmium-Akkus (NiCd) und Bleiakkumulatoren, aber auch Gel-Akkumulatoren, die bis zu 40 Wh/kg liefern können, sind in der Robotik zu finden. Weitere Akkumulatortypen sind Nickel-Metallhydrid-Akkus (NiMH), Silber-Zink-Akkus und Lithium-Ionen-Akkus.

Mittlerweile hat sich unter den Roboterentwicklern die Lithiumtechnik durchgesetzt. Ihre Leistung, Nutzungsdauer und Skalierbarkeit (Lithium-Batteriebänke können für die meisten Automationsanwendungen skaliert werden) machen den Lithium-Ionen-Akku für den Einsatz bei Industrierobotern sehr attraktiv. Einer der großen Vorteile eines Lithium-Ionen-Akkus ist sein geringes Gewicht. Darüber hinaus verhält sich Lithium als Element höchst reaktionsfreudig, es hat also eine hohe Energiespeicherkapazität und kann pro Kilogramm Batteriemasse typisch rund 150 Wattstunden speichern. Damit gewinnt es den Vergleich mit einem NiMH-Batteriepaket, das nur 60 bis 100 Wattstunden speichert.

In diesem Zusammenhang sollten auch Schweißroboter erwähnt werden, die im Automobilbau und ähnlichen Sektoren häufig zum Einsatz kommen. Die Stromquelle für das Schweißgerät kann gleichzeitig auch die Elektronik und Bewegungssteuerung des Roboters versorgen. Für solche Anwendungen haben sich Stromquellen mit Wechselrichter als sinnvoll erwiesen. Viele moderne Wechselrichter passen die Eingangsleistung automatisch an und halten die Ausgangsleistung konstant. Durch integrierte Überlastschutze ist gewährleistet, dass die Arbeitsqualität durch den gleichzeitigen Betrieb anderer Hochstromgeräte nicht beeinträchtigt wird.

Natürlich spielen auch die Abmessungen der Batterie eine Rolle: Die Form gibt vor, welche Batterietypen bei der Planung in Betracht gezogen werden. Welche Bedeutung das Gewicht hat, ist oft abhängig davon, ob der Roboter mobil oder stationär eingesetzt werden soll.

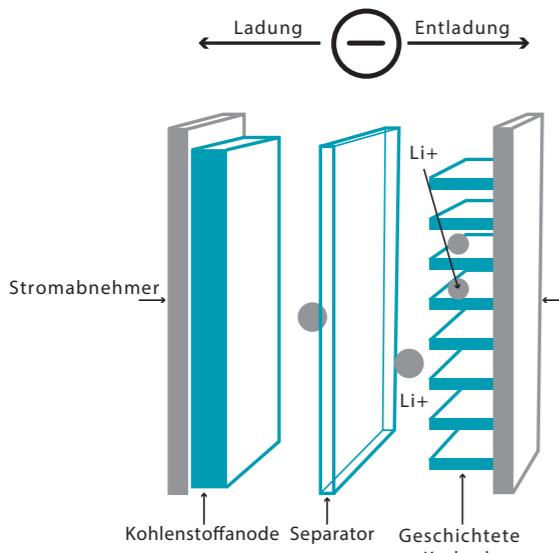
Da die Betriebsdauer des Roboters vor dem Wiederaufladen einen Wettbewerbsvorteil darstellen kann, gelten Haltbarkeit und Speicherkapazität als Schlüsselindikatoren für die Nutzungsdauer der Batterie.



PHOTOVOLTAIKZELLEN (PV)

Die Solartechnik hat sich in vielen Industriesektoren als Energielieferant durchsetzen können, wird sich in der Industrierobotik jedoch noch beweisen müssen. Einige BEAM-Roboter (Biologie, Elektronik, Ästhetik und Mechanik) wie automatisierte Rasenmäher oder Staubsauger machen sich PV-Technik zunutze. Im Normalfall besteht das PV-System aus einer Solarzelle, die über eine entsprechende Schaltung einen Kondensator mit einer festgelegten Spannung lädt, sodass die Motoren angetrieben werden können.

Auf Industrieroboter ist diese Technologie kommerziell noch nicht ausgeweitet worden. Dieser mangelnde Fortschritt hat mehrere Gründe, ist aber in erster Linie auf die eher geringe Leistungsdichte (Wp/m^2) von Solarzellen zurückzuführen, die für die meisten modernen Industrieroboter nicht ausreicht.

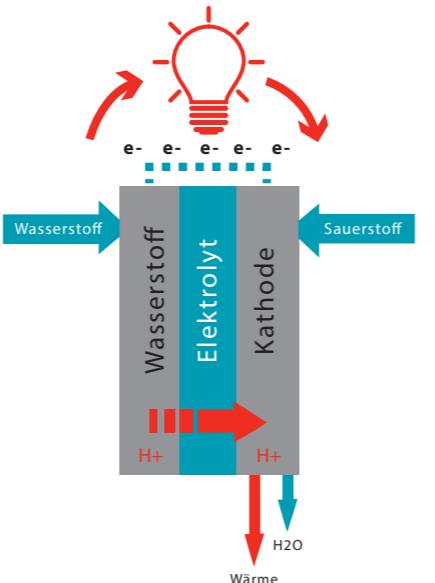


Heute sind Lithium-Ionen-Akkus die erste Wahl, aber die Fortschritte in der Brennstoffzellentechnik könnten bald eine andere Richtung vorgeben.

BRENNSTOFFZELLEN

Wahrscheinlicher ist es da, dass konventionelle Batterien bei Industrierobotern in Zukunft durch Brennstoffzellen ersetzt werden, die zur Energieerzeugung Wasserstoff, Methanol oder einfachen Alkohol mit Sauerstoff kombiniert. Derzeit sind die Kosten noch zu hoch, aber das könnte sich bald ändern, da sich Brennstoffzellen auf den Verbrauchermärkten verbreiten.

Brennstoffzellen erzeugen Energie aus einer Kohlenwasserstoffquelle und erreichen dabei einen Wirkungsgrad von bis zu 75 Prozent. Der typische Aufbau besteht aus zwei Elektroden, die durch einen leitfähigen Elektrolyt voneinander getrennt sind. Der Strom wird nach einem ähnlichen Prinzip wie bei der Kraftstoffverbrennung erzeugt, da die Protonen die semipermeable Membran durchdringen können, während die Elektronen über die elektrische Schaltung von der Anode zur Kathode strömen müssen. Durch die Nutzung der Abwärme lässt sich der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle sogar noch steigern.



STELLGLIEDER

Nachdem die richtige Stromquelle gefunden wurde, gilt das Augenmerk den benötigten Stellgliedern und Motoren für die Umsetzung der translatorischen und rotatorischen Bewegungen.

SCHRITTMOTOREN

Schrittmotoren kommen meist dann zum Einsatz, wenn die Kosten ausschlaggebend sind, wie etwa bei normalen Bestückungsrobotern. Die wesentlichen Vorteile liegen in der hochpräzisen Positionsteuerung, weshalb Schrittmotoren oft für 3D-Drucker oder CNC-Fräsen verwendet werden. Ein Schrittmotor ist nämlich auf hohe Haltemomente ausgelegt, sodass er die jeweils nächste Position schrittweise anfahren kann. Ihre Vorteile spielen sie in Anwendungen aus, bei denen Drehwinkel, Drehzahl, Position und Gleichlauf präzise gesteuert werden müssen. Da ein Schrittmotor auch bei niedrigen Drehzahlen sein maximales Drehmoment erreicht, eignet er sich sehr gut für Präzisionsanwendungen mit geringem Drehzahlbedarf.

Während Schrittmotoren bei älteren Robotern weit verbreitet waren, haben sie zwischenzeitlich an Beliebtheit eingebüßt. Das liegt unter anderem an ihrem Wirkungsgrad, dem notwendigen Einsatz von Winkelgebern oder Positionsschaltern zur Festlegung von Referenzpositionen und dem Risiko von Schrittauslassungen bei Überlastung. Genau so wahrscheinlich jedoch ist das Aufkommen fortschrittlicher bürstenloser Wechselstrom-Servomotoren.

SERVOMOTOREN

Viele ältere Roboter arbeiten mit Gleichstrom-Servomotoren, da sie bei akzeptabler Drehzahl und Positionssteuerung eine gute Ausgangsleistung erreichen. Bei den meisten neuen Industrierobotern hingegen kommen bürstenlose Wechselstrom-Servomotoren zum Einsatz. Dafür sprechen die höhere Ausgangsleistung und ein praktisch geräuschfreier Betrieb, aber auch der Verzicht auf Bürsten verleiht den drehmomentstarken Maschinen ein hohes Maß an Zuverlässigkeit, sodass jegliche Wartung entfällt.

Darüber hinaus haben Servos den bauartbedingten Vorteil, dass sie eine hohe Winkelgenauigkeit erreichen und vor dem nächsten Signal nur so weit drehen, wie angefordert wurde.

Der Unterschied zwischen digitalen und analogen Servos liegt im Signal, dessen Verarbeitung zwischen Empfänger und Servo und der servoseitigen Umsetzung der Daten zum Antrieben des Motors. Analoge Servos steuern die Motordrehzahl, indem sie Ein-Aus-Spannungssignale an den Motor senden, während digitale Servos einen kleinen Mikroprozessor haben, der die Signale des Empfängers auswertet und in hochfrequente Spannungsimpulse zum Motor umwandelt.

Anders als analoge Servos, die 50 Impulse pro Sekunde aussenden, arbeiten digitale Servos mit über 300 Impulsen pro Sekunde – ein klarer Vorteil. Diese Impulse sind zwar kürzer, aber durch die Vielzahl an Impulsen beschleunigt der Motor schneller und hält ein konstantes Drehmoment. Bei digitalen Servos kann die Versorgungsspannung für den Motor angepasst werden, um Leistung und Präzision zu optimieren.



WIRKUNGSGRAD, GRÖSSE, PRÄZISION, ZUVERLÄSSIGKEIT, DREHZAHL UND DREHMOMENT

Die Wahl des optimalen Motors zählt zu den wichtigsten Aspekten eines Robotikprojekts und richtet sich nach Drehmoment, Drehzahl, Präzision, Spannung, Kosten und Formfaktor.

Bei Robotern wird das Motordrehmoment normalerweise auf ein Rad oder ein Stellglied übertragen, das seinerseits eine rotatorische oder translatorische Bewegung ausführt. Um das benötigte Drehmoment zu ermitteln zu können, muss der Ingenieur die angestrebte maximale Traglast sowie die Haft-, Gleit- und Rollreibung des Systems kennen.



Bei Robotern auf Rädern muss die Raddrehzahl spezifiziert werden. Je höher die Geschwindigkeit, desto mehr leidet meist die Genauigkeit. Der Servomotor ist deshalb die am weitesten verbreitete Wahl, weil er die für einen Roboterarm nötige Genauigkeit mit seiner integrierten Positionsregelung erreicht und die Positionen dank seiner langen Übersetzung sehr präzise anfahren kann.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Betriebsspannung. Bevor festgelegt wird, welche Batteriekästen zum Einsatz kommen, sollte zunächst die Nennspannung bei laufendem Motor ermittelt werden. Meist gilt: je höher die Spannung, desto höher die Motordrehzahl. Anhand der Spannungskonstante auf dem Datenblatt zum Motor lässt sich die Drehzahl pro Volt berechnen.

HYDRAULISCHE UND PNEUMATISCHE ALTERNATIVEN

Hydraulische Lösungen waren bei früheren Robotern sehr verbreitet, da sie steifer, besser steuerbar und leistungsstärker waren als die damaligen Elektroantriebe. Außerdem lässt sich mit Hydraulik ein großes Übersetzungsverhältnis realisieren.

Der entscheidende Nachteil hydraulischer Anlagen ist die vergleichsweise langsame Arbeitsgeschwindigkeit, und auch die hohen Drücke riefen immer wieder Leckstellen hervor.

Zum Thema Druckluft: Viele einfache Bestückungssysteme arbeiten mit pneumatischer Unterstützung. Druckluftanlagen sind zwar kostengünstig, lassen sich aber schlecht steuern. Weil Luft komprimierbar ist, entsteht eine Totzeitdynamik, die das Steuern zusätzlich erschwert.

Bei einigen Industrierobotern wird der Endeffektor mit Druckluft betrieben, denn Druckluftzylinder können hohe Kräfte übertragen und eignen sich gut für größere Greifer. Es ist zwar unüblich, aber einige Roboter bewegen ihren Körper mithilfe von Druckluftzylindern, die aus einer mitgeführten Druckluftflasche gespeist werden. Der Grund für die verhaltene Akzeptanz der Druckluft ist die Tatsache, dass sich mit ihr nur relative kleine, einfache reziproke Bewegungen ausführen lassen.

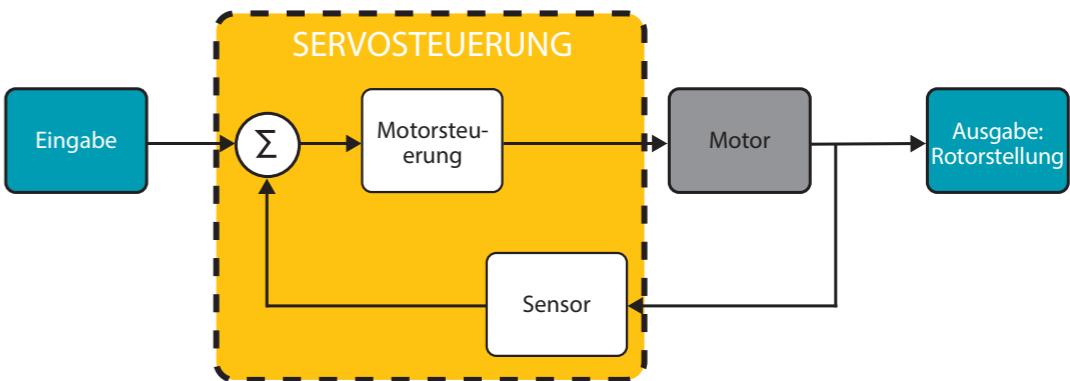
DIE RICHTIGE MOTORSTEUERUNG

Die Entscheidung zwischen einem Servomotor und einem Schrittmotor ist immer ein Kompromiss zwischen Komplexität und Steuerungssicherheit. Ein Schrittmotor ist einfacher aufgebaut, da er im Gegensatz zum Servomotor keinen Winkelgeber benötigt. Dadurch ist der Schrittmotor einfacher zu steuern – aber nur, wenn der Roboter geringe Leistungsanforderungen stellt. Wer den Schrittmotor an seine Grenzen bringt will, findet schnell heraus, dass er sich mit wachsendem Leistungsabruf immer schlechter steuern lässt.

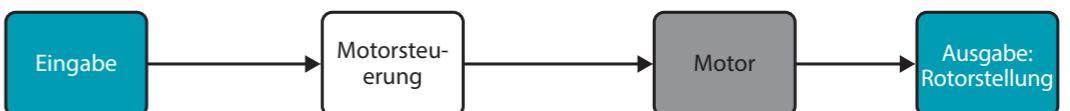
Ein Vorteil des Schrittmotors ist seine Eignung für offene Regelkreise. Bei einem offenen Regelkreis ist keine Positionsrückführung vonnöten, sodass auf kostspielige Winkelgeber und Koordinatenwandler verzichtet werden kann. Die Position wird nur durch Zählen der eingegebenen Schrittempulse ermittelt.

Servomotoren kommen in geschlossenen Regelkreisen zum Einsatz. Deren digitale Steuerung sendet Geschwindigkeitsbefehle an einen Treiberverstärker, der wiederum den Servomotor versorgt. Eine Rückführungseinrichtung in Form eines Winkelgebers oder Koordinatenwandlers meldet Position und Drehzahl des Servomotors. Um noch mehr ins Detail zu gehen: Die Einrichtung wird von einem Rückführsignal gesteuert, das sich aus dem Vergleich zwischen Ausgangssignal und Referenzeingangssignal ergibt.

SERVOMOTOR



SCHRITTMOTOR



Servomotoren arbeiten bei der Positionierung mit einem geschlossenen Regelkreis, während Schrittmotoren in einem bestimmten Drehwinkel positioniert werden.

Dank des geschlossenen Regelkreises kann der Servomotor ein konkretes Bewegungsprofil ausführen, mit dem die Steuerung programmiert wird. Servomotoren werden über Pulsweitenmodulation (PWM) gesteuert, wobei sich der Drehwinkel aus der Dauer des angelegten Impulses errechnet.

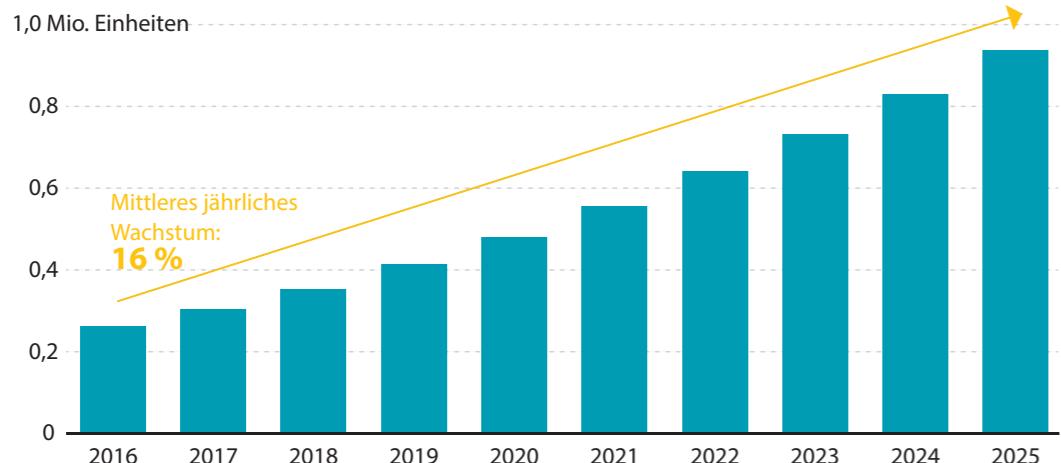
MOTOREN UND STELLGLIEDER AM MARKT

Die weltweite Verkaufszahl für Industrieroboter betrug im Jahr 2017 rund 14 Milliarden Dollar, was einem Plus von 13 Prozent gegenüber 2016 entspricht. Bis 2025 dürfte diese Zahl auf knapp 34 Milliarden Dollar steigen und sich damit in weniger

als 10 Jahren fast verdreifachen. Alle diese Roboter brauchen Motoren, Stellglieder und Batterien.

Dementsprechend dürfte der globale Markt für Motoren und Stellglieder für Industrieroboter laut Branchenanalyst Technavio zwischen 2017 und 2021 um jährlich 6,46 Prozent wachsen.

Der weltweite Versand von Industrierobotern könnte sich bis 2025 verdreifachen.



Bei 16 Prozent Jahreswachstum könnte sich die Zahl verkaufter Industrieroboter bis 2025 verdreifachen (Quelle: ABI Research).

SCHLÜSSELFAKTOREN



Kraftquellen

- In den meisten Fällen dienen Batterien als Kraftquelle. Akkus eignen sich genauso wie nicht aufladbare Batterien, wobei erstere weiter verbreitet sind.
- Akkus treten als NiCd-, NiMH- oder Lithium-Ionen-Batterien auf. Lithium-Batterien haben die höchste Leistungsdichte.
- Wichtige Entscheidungskriterien sind Sicherheit, Nutzungsdauer, Größe, Gewicht und Kosten.
- Zu den alternativen Kraftquellen zählen PV-Anlagen, Brennstoffzellen, thermoelektrische Generatoren, Superkondensatoren und Schwungspeicher. Große Roboter mit mehreren Tonnen Gewicht benötigen einen dieselbetriebenen Generator oder eine Drehstromquelle.



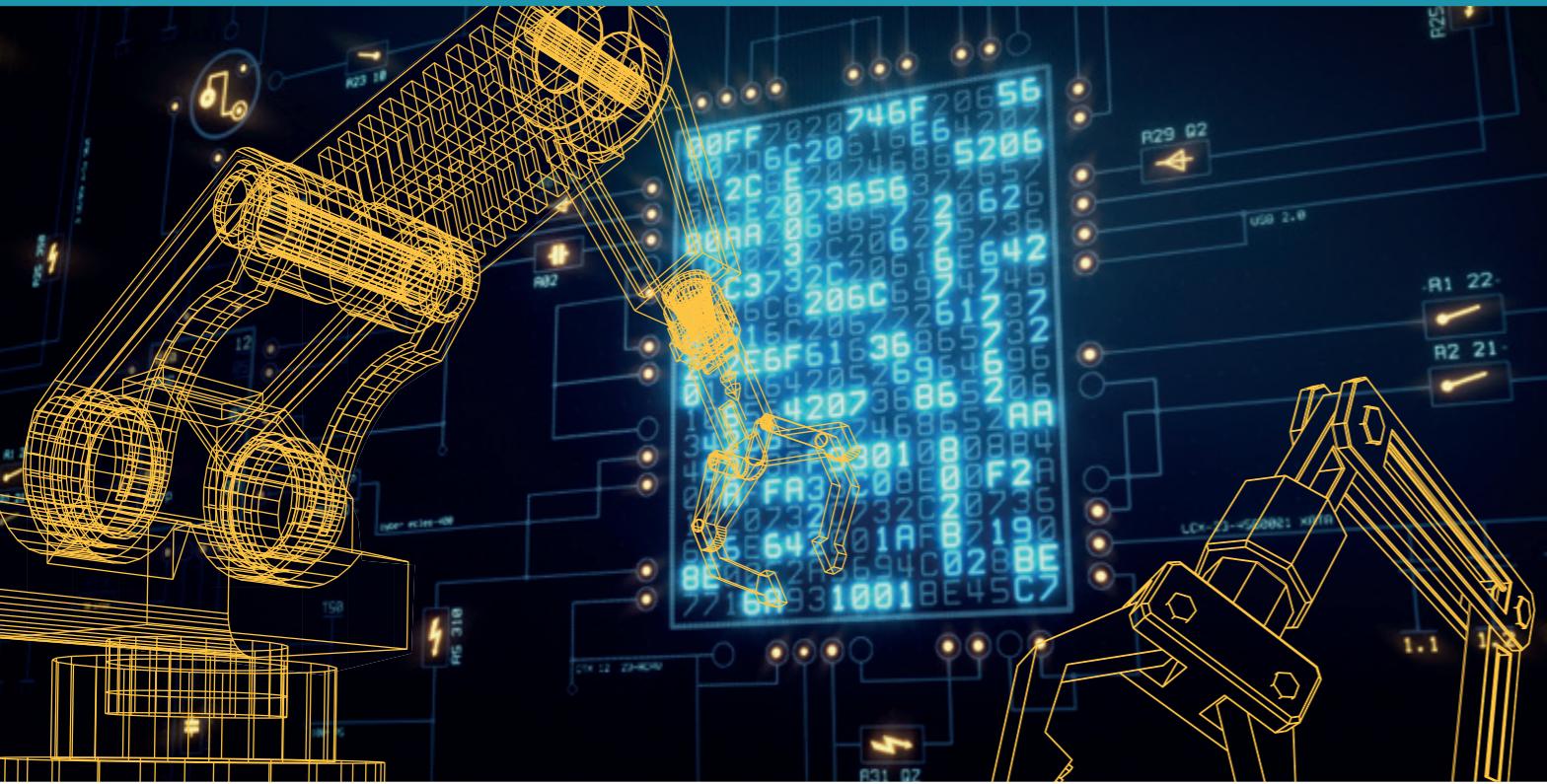
Stellglieder

- Auch wenn bürstenlose Wechselstrom-Servomotoren aufgrund ihrer Winkelgenauigkeit, hohen Leistung, Zuverlässigkeit und Geräuscharmut bei neuen Industrierobotern meist bevorzugt werden, kann alternativ mit Schrittmotoren gearbeitet werden.
- Schrittmotoren überzeugen durch ihre genaue Positionsteuerung und das hohe Haltdrehmoment.



Regelung

- Da Schrittmotoren ohne Winkelgeber auskommen, sind sie einfacher zu steuern, haben aber ein begrenztes Leistungspotenzial.
- Wird der Schrittmotor an seine Grenze geführt, so ist die Vorhersehbarkeit der Steuerungsgleichung nicht mehr hundertprozentig gegeben.
- Servomotoren werden wegen ihrer integrierten Positionsrückführung bei Industrierobotern bevorzugt. Wenn die Zielposition oder Zieldrehzahl nicht erreicht wird, meldet der Geber dies zur Korrektur an die Servoschleife.



Rechenoperationen in der Robotik

Roboterarchitekturen und -entwicklungen decken mittlerweile zahlreiche Funktionen und Fähigkeiten ab. Das wirkt sich maßgeblich auf die Verarbeitungsleistung und deren technische Voraussetzungen aus. Im kontrollierten Bereich des Sicherheitskäfigs benötigt der Produktionsroboter relativ wenige Schutzvorkehrungen und kann einfache Steuerstrategien realisieren.

Der Entwickler muss nur dafür sorgen, dass der Roboter beim Öffnen des Käfigs oder bei falsch ausgerichteten Teilen anhält. Selbst dann lassen sich viele Sicherheitsfunktionen mit einfachen mechanischen Verriegelungen umsetzen und kommen ohne komplexe Bildverarbeitungssensoren und Softwareprogramme aus. Die wichtigste Aufgabe der Datenverarbeitung ist die effiziente, präzise Bewegungssteuerung.

Dazu werden in erster Linie Mikrocontroller oder digitale Signalprozessoren benötigt, die für die Bestromung der Motoren und Stellglieder sorgen.

Konventionelle Produktionsroboter sind eher unflexibel. Jedes Programm muss einzeln programmiert, simuliert und umfangreich getestet werden, bevor der Roboter an die

Arbeit geht. In der Fertigung muss der Roboter flexibler sein, damit er innerhalb kurzer Zeit für neue Aufgaben vorbereitet werden kann. Darüber hinaus muss er seinen Sicherheitskäfig verlassen können, um sich innerhalb des Fertigungsbereichs zu bewegen. All das verlangt nach mehr Verarbeitungsleistung, damit der Roboter ohne versehentliche Zusammenstöße mit Gegenständen oder Personen navigieren kann.

Der Roboter muss die Sensordaten also in Echtzeit verarbeiten und intelligente Sofortentscheidungen treffen, um sich auf wechselnde Bedingungen einzustellen. Je weiter sich der Roboter vom Sicherheitskäfig entfernt, und je mehr er mit dem Menschen interagiert, desto mehr Prozessorleistung ist gefordert, weil er sich zusehends außerhalb der relativ gut kontrollierten Umgebung des Produktionsbereichs bewegt. Wartungsroboter und Lieferdrohnen müssen intelligent auf komplexe Situationen reagieren können.

Für solch fortgeschrittene Szenarien wird eine raffinierte Software benötigt, was sich mit dem angesprochenen Datendurchsatz deckt. Bei der Bereitstellung der notwendigen Prozessorleistung hat der Entwickler eine große Auswahl an Anbietern und Architekturen.

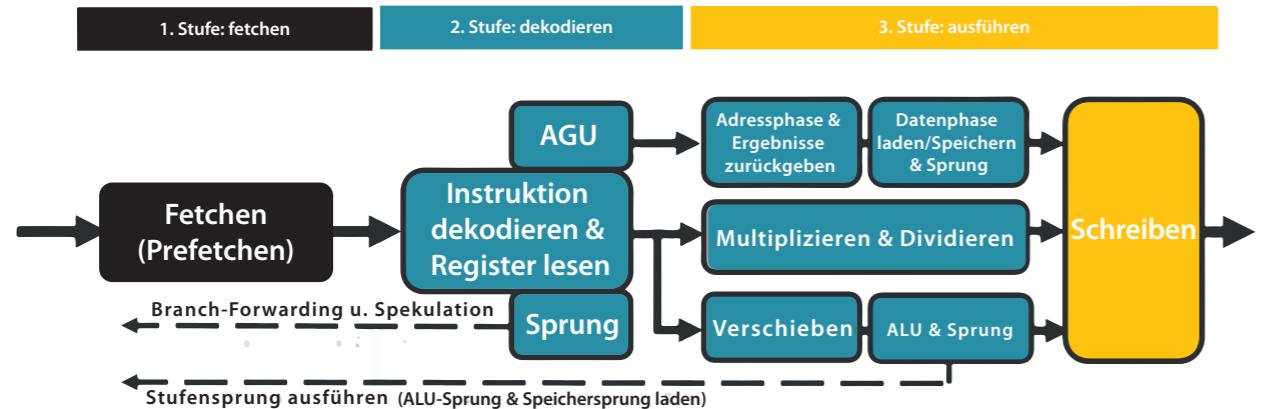
Der Mikrocontroller (MCU) ist seit vielen Jahren das am meisten verbreitete Computersystem für Roboter. Den Kern des Mikrocontrollers bildet ein Mikroprozessor. Anfangs waren Mikroprozessor-Cores für einfache arithmetische und logische Steuerungen optimiert, aber seit ihrer Einführung vor knapp 50 Jahren haben sich Rechenleistung und Verarbeitungsgeschwindigkeit erheblich verbessert. Heute werden Mikroprozessor-Cores, die nativ mit 32-Bit-Datenwörtern arbeiten und mit Eigenschaften wie Pipelining oder Harvard-Architektur glänzen, zu einem Preis angeboten, der ihre Verwendung selbst in einfachen Systemen rechtfertigt.

Bei einem typischen 32-Bit-Mikroprozessor-Core wie dem ARM Cortex-M3 gibt es eine Befehls-Pipeline, die die Ausführung von Befehlen in verschiedene Phasen aufteilt. In der M3-Pipeline wird der Befehl zunächst aus einem lokalen Cache geholt (Fetch). Falls sich der Befehl nicht im Cache befindet, muss er aus dem Hauptspeicher geladen werden. Sobald er in der Pipeline ist, werden die Befehlsbytes entschlüsselt, um auswerten zu können, welche Funktionseinheiten zur Ausführung des Befehls bestimmt werden müssen. Schließlich wird der Befehl ausgeführt.

Durch das Pipelining lässt sich beispielsweise die Latenz des Speichers ausgleichen. So können mehrere Befehle überlappt und die Taktrate beschleunigt werden, da pro Zyklus weniger logische Schritte nötig sind. Schnellere Prozessorkerne brauchen längere Pipelines, die aus zehn oder mehr Stufen bestehen. Der Nachteil einer langen Pipeline ist die hohe Sprunglatenz. Wenn ein Sprung ausgeführt wird, dauert es eine Weile, bis die Pipeline mit den für den neuen Sprung benötigten Befehlen gefüllt ist.

Da der Prozessorkern Interrupts unterstützt, kann er die Ausführung des Hauptprogramms vorübergehend aussetzen und andere Aufgaben bearbeiten. Die Interruptverarbeitung ist eine Schlüsselkomponente bei allen Anwendungen, die Echtzeitreaktionen auf Ereignisse erfordern. Ohne sie müsste der Programmcode Loops enthalten, die kontinuierlich Information zu externen Ereignissen abrufen, was unnötig viel Rechenleistung in Anspruch nehmen würde.

Bei den meisten Prozessorkernen können Interrupts von relativ unwichtigen Peripheriegeräten dank eines Prioritätsschemas ignoriert werden, während sich der Prozessor mit den kritischen Routinen befasst (z. B. den Übergang der Steuerung von einer Aufgabe zur nächsten oder die Eingangssignale eines kritischen Interrupts). Das führt zu einer äußerst flexiblen Architektur, die mit vielen verschiedenen Echtzeitanwendungen zureckkommt.



Die Prozessoren der ARM Cortex-M-Familie bilden das Rückgrat vieler Mikrocontroller.

Eine wichtige, spezialisierte Mikroprozessorvariante für Roboterentwickler ist der digitale Signalprozessor (DSP).

Dieser Prozessorkern beinhaltet zusätzliche Befehle und Ausführungshardware, die für signalverarbeitende Algorithmen wie Filter und schnelle Fourier-Transformationen optimiert sind. Solche Befehle beinhalten schnelle FMA-Operationen (Fused-Multiply-Add), wie sie in praktisch allen DSP-Algorithmen vorkommen. Da der DSP-Code auf Matrizen, Vektoren und ähnlichen Datenstrukturen basiert, lässt sich die Arbeit relativ leicht parallelisieren. Diese Tatsache hat zur Implementierung von SIMD-Ausführungseinheiten (Single Instruction Multiple Data) geführt, die identische Vorgänge – z. B. Multiply-Adds – auf mehreren Elementen eines Arrays gleichzeitig ausführen. Das Ergebnis ist eine erheblich höhere Geschwindigkeit bei vergleichsweise geringer Komplexität oder Kostensteigerung.

Ein MCU enthält mehrere integrierte Peripheriegeräte, die um den Prozessorkern herum angeordnet sind. Bei einem MCU für die Industrie oder Robotik handelt es sich dabei typisch um Speicher-Arrays oder erweiterte Timer-Trigger-Einheiten, die den Mikroprozessor von der Pulsweitenmodulation (PWM) entlasten.

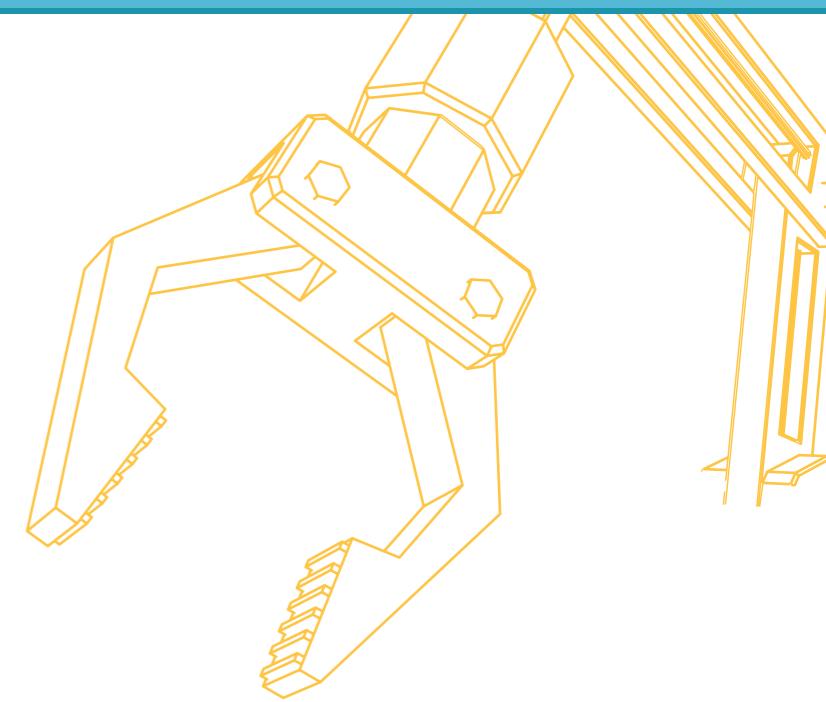
Die PWM zählt zu den wichtigsten Elementen nahezu aller Motorsteuerungsstrategien und ist in der Robotik daher sehr häufig anzutreffen. Andere Ein-Chip-Systeme (SoC) verleihen dem MCU weitere Funktionen. Beispielhaft sind hier drahtlose Transceiver, dedizierte Beschleuniger für Verschlüsselungs- und Authentifizierungslogik sowie Grafikbeschleuniger zu nennen.

Die Verwendung intelligenter Peripheriegeräte veranschaulicht außerdem ein wichtiges Konstruktionsprinzip in der Robotik: die Nutzung von Beschleunigern für dezentrale Steuerung und Hardware. Ein Mikroprozessor ermöglicht die PWM-Steuerung, stellt oft aber keine gute Ressourcenverteilung dar. Das Problem liegt darin, dass die Software die Spannung immer wieder zwischen den Transistoren in der Halbbrücke umschalten muss, welche die Stromversorgung eines Motors nach vorprogrammierten Intervallen steuert. Interrupte von einer Echtzeituhr oder einem Zähler können Handler auslösen, um den Bestromungszustand umzuschalten, und dann den Timer für den nächsten Zyklus konfigurieren. Trotz der sehr einfachen Abfolge von Vorgängen entsteht jedoch eine hohe Interruptfrequenz.

Eine PWM-Steuerung kombiniert Timer und Schaltlogik, weshalb der Mikroprozessor-Core nicht bei jedem Schaltvorgang unterbrochen werden muss. Die Software muss die Timer nur regelmäßig aktualisieren, um das benötigte PWM-Tastverhältnis einzustellen. Dank der vergleichsweise geringen zusätzlichen Logik, die unabhängig vom Prozessor über lange Zeit zur

Verfügung steht, wird die Softwareeffizienz erheblich verbessert. Die Architektur hat eine Gemeinsamkeit mit anderen Hardware-Entlastungsmechanismen, die für die Robotik zusehends an Bedeutung gewinnen werden. Die Hardware-Peripherie befasst sich mit häufigen Ereignissen in Echtzeit, während die Software die Strategie für die Peripherie festlegt.

Bei der Hardware-Peripherie sind die Entwickler an die von den Halbleiteranbietern bereitgestellten Funktionen gebunden, auch wenn sie durch die Einbindung von Ablaufsteuerungen auf der Basis von Zustandsautomaten an Flexibilität gewinnen. Ablaufsteuerungen können beispielsweise Werte aus einem AD-Wandler lesen, Datenwerte per Speicherdirektzugriff (DMA, Direct Memory Access) an den Hauptspeicher übertragen und Timer einstellen bzw. reloaden, ohne dass der CPU-Core dafür bemüht wird. Dennoch bleiben die Möglichkeiten begrenzt.



Mit einem feldprogrammierbaren Gate-Array (FPGA) können anwendungsspezifische Hardware-Peripheriegeräte erzeugt werden, die sich für spezielle Robotersteuerungs- und Maschinenlernfunktionen optimieren lassen.

Den Kern der meisten FPGA-Architekturen bildet eine programmierbare Lookup-Tabelle, die für die Umsetzung jeder als Wahrheitstabelle darstellbaren Logikfunktion konfiguriert werden kann. Die Lookup-Tabellen werden über programmierbare Schalter im Interconnect-Fabric zu komplexen kombinatorischen Logikschaltungen verdrahtet. Jede Lookup-Tabelle wird typisch von mindestens einem Register und einer zusätzlichen Unterstützungslogik (z. B. Carry-Chain-Eingänge und Ausgänge) begleitet, um die effiziente Implementierung arithmetischer Addierer zu ermöglichen. Gemeinsam ergeben diese Funktionen einen Logikbaustein, der innerhalb des FPGA mehrfach repliziert wird.

Ein Nachteil im Vergleich zu einer vollständig anwendungsspezifischen Logik ist der erheblich geringere

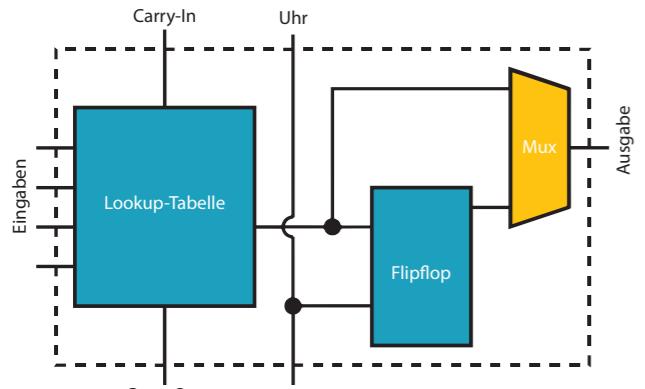
Wirkungsgrad des Siliziums. Die Unterbringung einer Logikschaltung auf einem FPGA-Fabric beansprucht 10 bis 20 Mal mehr Siliziumfläche als bei einer anwendungsspezifischen Implementierung mit Standardzelle.

Allerdings unterstützen die meisten FPGAs eine Umprogrammierung des Logik-Arrays selbst bei Systemen in Betrieb. Dadurch sind Ressourcen gemeinsam nutzbar, indem Beschleuniger nur bei Bedarf dynamisch in den Fabric geladen werden. Dieses Verfahren sorgt auch für mehr Flexibilität im finalen Konstrukt, welches neue Hardware und Zusatzfunktionen unterstützen kann.

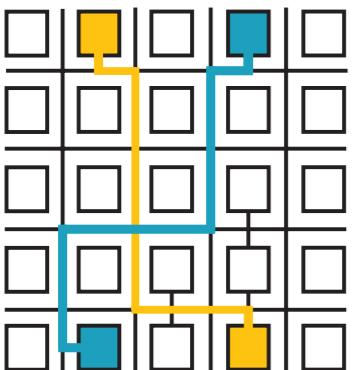
Seit ihrer Einführung in den 1980er Jahren sind FPGAs um weitere Funktionen ergänzt worden, die zu einer Verbesserung der Gesamtdichte führen. Mit Speicherblöcken lassen sich Puffer und Caches nah an der programmierbaren Logik erzeugen.

Diese wurden in jüngerer Vergangenheit mithilfe von DSP-Engines kombiniert. In vielen Fällen werden die DSP-Engines als Bausteine aus 8- oder 16-Bit-Einheiten implementiert, sodass sie in Kombination präzisere Datentypen unterstützen können.

Dank der DSP-Einheiten eignen sich FPGAs sehr gut für die Verarbeitung der Eingangssignale von den Sensoren, die große Datenmengen produzieren (z. B. Kameras, Radarsysteme und andere Bildverarbeitungssensoren). Eine typische Anwendung ist die Kombination aus DSP-Einheiten und Logikbeschleunigern zur Verarbeitung von Algorithmen (z. B. Image Warping,



Die Lookup-Tabelle (LUT) verleiht einem FPGA die Flexibilität.



FPGA-Lookup-Tabellen sind über eine Routingmatrix miteinander verknüpft, damit die angestrebte Funktionalität erreicht wird.

Lichtkompensation), die einheitlichere Eingangssignale für Maschinenlernprozesse und ähnliche Funktionen liefern. Diese Funktionen können von anwendungsspezifischen, im programmierbaren Fabric implementierten Mikroprozessor-Cores koordiniert werden, die als Mikrosequenzer für die verschiedenen Verarbeitungsprimitive dienen.

Eine weitere Möglichkeit besteht insbesondere für bildverarbeitende Aufgaben in der Verwendung von Grafikprozessoren (GPU) oder Vision Processing Units (VPU). Diese enthalten hochgradig parallelisierte DSP-Engines, die für die Bildverarbeitung optimiert sind. Bei Robotern, die ein sehr hohes Maß an Umgebungserkennung erfordern, können diese Einheiten mit mehreren CPUs kombiniert werden – etwa auf demselben Chip als heterogenes Multi-Core-SoC.

Das Multiprocessing lässt sich auch zur Verbesserung der allgemeinen Zuverlässigkeit und Sicherheit nutzen. Ein Problem bei allen computerbasierten Auslegungen ist die Abhängigkeit von Speichertechnologien, die empfindlich auf ionisierende Strahlung reagieren. Wenn ionisierende Strahlung auf das Silizium eines integrierten Schaltkreises trifft, erzeugt es im Halbleiter freie Ladungsträger, die den logischen Zustand eines Transistors umkehren. In Schaltnetztransistoren ist diese Wirkung meist nur vorübergehend und nur selten zu beobachten. Speicher und Register reagieren jedoch empfindlicher auf die Veränderung, weil sie ihre Inhalte recyceln, um den Verlust gespeicherter Daten zu verhindern. Mit ECC-Codes (Error Checking and Correction, Fehlerkorrekturverfahren) lässt sich das Problem beheben. Die Wahrscheinlichkeit einer einmaligen Störung steigt parallel zur Speicherdichte und wird dadurch zum wachsenden Problem, da die integrierten Schaltkreise weiterhin nach dem mooreschen Gesetz skalieren. Außerdem ist nicht gesagt, dass ECC alle Fehler findet. Das kann dazu führen, dass das Programm mit falschen Daten arbeitet und es letztlich zu einem Ausfall der Steuerung kommt. Bei Robotern, die mit der Öffentlichkeit interagieren, darf das keinesfalls passieren.

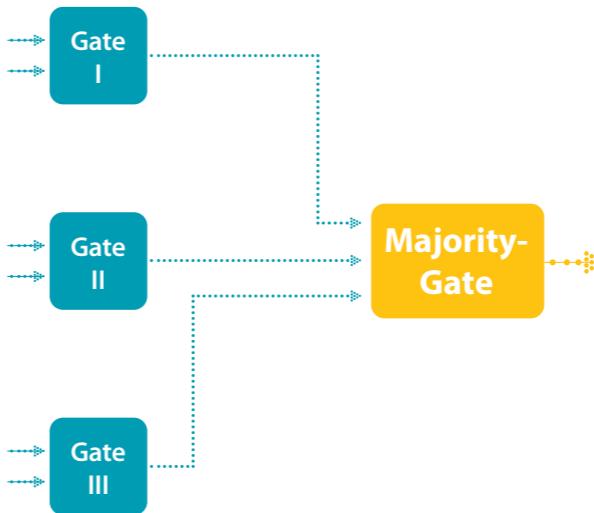
Redundanzen und ähnliche Verfahren behandeln das Problem, indem einzelne Prozessoren die gegenseitigen Funktionen überprüfen. Die Prozessoren können vom Typ her identisch sein und mit demselben Code arbeiten. Eine Prüflogik vergleicht die Ausgangssignale und ermittelt entweder per Abstimmung, welcher Vorgang zulässig ist, oder fordert die Wiederholung der Vorgänge, bis die Prozessoren übereinstimmen.

Drei Prozessoren mit Mehrheitsabstimmung sind teurer, dafür aber weniger störend, weil die Wiederholung von Vorgängen unerwünschte Verzögerungen verursachen kann. Modularer Redundanz kann auch auf Gate-Ebene implementiert werden.

Die Prozessoren in einer redundanten Anordnung müssen nicht typgleich sein. Bei einigen Architekturen dient ein weniger leistungsfähiger Prozessor als Prüf-Engine. Statt dieselbe Software zu verwenden, führt er nur Konsistenzprüfungen durch und erzwingt bei einer nicht bestandenen Prüfung die erneute Ausführung, oder in extremen Fällen gar einen kompletten Reset.

Um das Risiko systematischer Auslegungsfehler in der Gleichung möglichst gering zu halten, können duplizierte Prozessoren entwickelt und unterschiedlich implementiert werden. Dieses Verfahren kommt bei einigen Multicore-SoCs zum Einsatz, die für Sicherheitssysteme im Automobilbau entwickelt wurden.

Dementsprechend erstreckt sich das Angebot an Architekturen für Roboterentwickler heute vom einfachen Aufbau bis hin zu hochflexiblen Maschinen, die intelligent auf Probleme und Störungen reagieren und den reibungslosen Systemablauf gewährleisten.



Anwendungen mit hohen Ansprüchen an Sicherheit oder Zuverlässigkeit sortieren fehlerhafte Elemente mithilfe von Redundanzen aus.

SCHLÜSSELFAKTOREN

- | | |
|--------|--|
|
01 | <p>Mikroprozessoren sind höchst flexibel, erreichen aber geringere Leistungen als dedizierte Hardware.</p> |
|
02 | <p>Dedizierte Hardware bringt Einschränkungen mit sich, auch wenn integrierte MCUs heute dank Mikrosequenzen ohne Eingriff des Prozessors die Koordination übernehmen.</p> |
|
03 | <p>Die Leistung lässt sich durch Aufteilen der Aufgaben auf Mikroprozessoren und Hardware optimieren.</p> |
|
04 | <p>Wenn Hardwareleistung und -flexibilität gefragt sind, stellt das FPGA eine gute Möglichkeit dar.</p> |



Software für die Robotik

Selbst bei einfachsten Robotern werden mehrere Software-Steuerungsebenen benötigt. Die für das Management von Sensorik und Aktorik zuständigen Mikrocontroller (MCUs) und Ein-Chip-Systeme (SoC) machen sich meist ein Echtzeitbetriebssystem (RTOS) oder einen Kernel zunutze.

Ein RTOS hat den Vorteil, dass es Multitasking unterstützt. Es stellt eine relativ einfache Möglichkeit dar, zahlreiche Aktivitäten auf einem einzigen Mikroprozessor so zu planen, dass die Ressourcen maximal genutzt werden und das System auf externe Ereignisse reagieren kann. Beispielsweise muss die Tätigkeit beim Öffnen des Sicherheitskäfigs so ausgesetzt werden, dass die Gefährdung für Roboter und Personal möglichst gering ausfällt. Ein einfaches Abschalten des Stroms käme einer potenziellen Gefährdung

gleich. Ein RTOS kann alle notwendigen Aktionen auslösen, damit der Roboter stillgesetzt wird, dabei aber keine schweren Gegenstände fallen lässt oder Schäden in der Umgebung anrichtet. Dazu kann beispielsweise auf einen Aktivitätsträger in der Software umgeschaltet werden, der die Schaltungen in der Leistungselektronik anweist, die Motoren in vorab definierten Positionen anzuhalten.

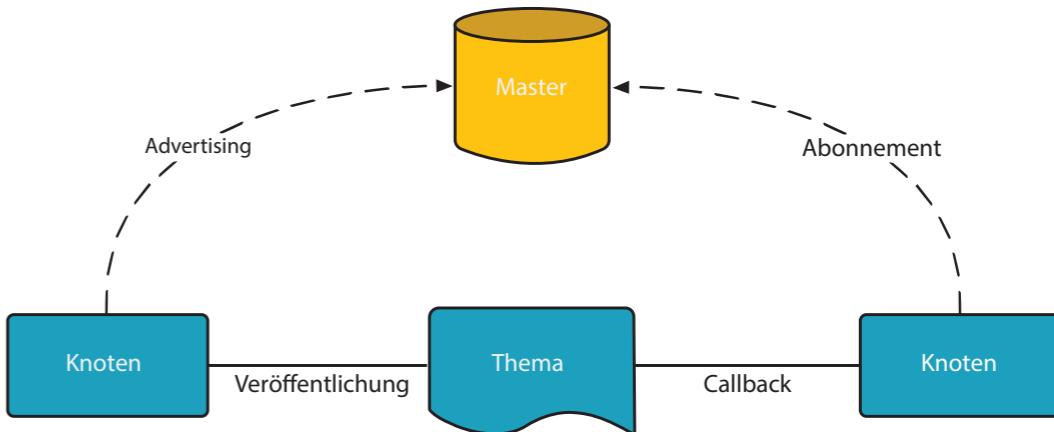
In Kombination mit einer entsprechend entwickelten Anwendungssoftware kann ein RTOS harte Sicherheitsgarantien für die Reaktionsdauer bei kritischen Ereignissen gewährleisten, die sich normalerweise durch einen externen Interrupt des Mikroprozessors ankündigen. Dieses Verfahren wird meist von einem Interrupt-Handler geregelt, der einen Maßnahmen einleitenden Aktivitätsträger in der Software initiiert. Durch prioritätsbasierte, präemptive Planung garantiert das RTOS die kürzestmögliche Latenz für diese Art der Reaktion auf die wichtigsten Probleme.

Bei Robotern mit mehreren Mikroprozessoren und Hardware-Beschleunigern (von denen es immer mehr gibt) muss jeder einzelne Stellgliedknoten von einem Aufsichtssystem überwacht werden, das sich um Aufgabenplanung und übergeordnetes Verhalten kümmert. Diese Rolle wird meist vom Roboterbetriebssystem (ROS) oder ähnlicher Middleware auf einem Hochleistungs-Mikroprozessor übernommen.

Heutige ROS sind nicht als eigenes Betriebssystem konzipiert, sondern werden auf einem übergeordneten Betriebssystem (z. B. Linux) ausgeführt. Das ROS fordert vom zugrunde liegenden Betriebssystem kein RTOS-Verhalten, da es längerfristige Aufgaben ausführt, die keine Reaktionszeiten im Mikrosekundenbereich benötigen. Es wird allerdings an ROS-2.0-Systemen gearbeitet, die auf RTOS-Plattformen ausgeführt werden und daher schneller reagieren können.

Die Middleware für das ROS leistet verschiedene Dienste, beispielsweise eine Hardwareabstraktion von hardwarenahen Geräten oder die Unterstützung des prozessübergreifenden Nachrichtenaustausches zugunsten von Multiprozessor-Architekturen und einer Managementfunktion für Softwarepakete. Die Prozesse werden meist mithilfe von Grafiken mit Knotenverknüpfungen dargestellt, an denen zu erkennen ist, wo die Verarbeitung stattfindet und wie die Prozesse untereinander kommunizieren. Bei den ROS-Implementierungen handelt es sich oft um Open-Source-Pakete, die mithilfe von Linux-Plattformen das Management der Abhängigkeiten zwischen den Open-Source-Projekten erleichtern. Der Vorteil besteht darin, dass die ROS-Software leicht zugänglich ist.

Im ROS handelt es sich bei den Knoten um Prozesse oder Softwaremodule, die mindestens eine projektbezogene Aufgabe bearbeiten. Beispielsweise verarbeiten eine Kamera und ein Bildverarbeitungsknoten die visuellen Daten von einem oder mehreren Bildsensoren. Damit die Knoten über eine Netzwerkinfrastruktur (eine Architektur, die heute im Automobilbau verbreitet ist) miteinander verbunden werden können, unterstützt das ROS Protokolle wie TCP/IP und UDP für die Nachrichtenübertragung. Die verschiedenen Knoten und Verbindungen können mit dem XML-Datenformat URDF (Universal Robot Description Format) beschrieben werden.

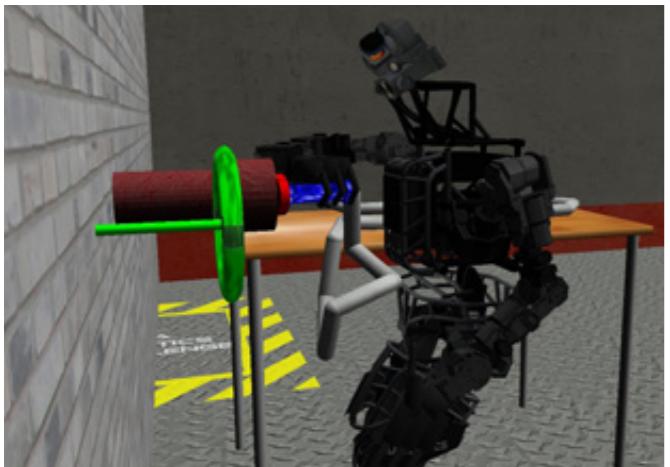


Der Publish-Subscribe-Mechanismus des Roboter-Betriebssystems (ROS) informiert die Knoten fortwährend über Befehle und Sensordaten.

Für den effizienten Austausch von Sensordaten und Befehlen hat das ROS einen Publish&Subscribe-Mechanismus (Veröffentlichen und Abonnieren), in dem sich die Knoten registrieren und anschließend über bestimmte Themen informiert werden. Alle abonnierten Knoten erhalten Aktualisierungen zu den einzelnen Themen. Der ROS-Master verfolgt alle Dienste und Themen. Er übernimmt die Registrierung der Knoten und betreibt einen Parameter-Server, auf dem die Knoten gemeinsame Konfigurationsdaten speichern und abrufen können.

Der große Vorteil einer ROS-Middleware ist die Wiederverwendung und gemeinsame Nutzung von Code. Durch das Code-Sharing können alle Nutzer auf eine gemeinsame Softwarebasis zurückgreifen, was das Testen erleichtert und die Zuverlässigkeit der Software insgesamt verbessert. ROS ist nicht auf physische Roboter beschränkt, sondern unterstützt auch simulierte Roboter.

Eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung eines Roboters ist die Möglichkeit, sein Verhalten in der virtuellen Umgebung zu simulieren, bevor die Umsetzung in Hardware erfolgt. Mit dem Simulator können Robotikprogramme offline geschrieben und auf Fehler geprüft werden. Die Software wird also in einer risikofreien Umgebung entwickelt, sodass der Roboter und seine Umgebung nicht beschädigt werden, falls das vorgeschlagene Programm



*Simulierte Darstellung eines Atlas-Roboters, der einen Schlauch mit einem Rohr verbindet
(Die Darstellung visueller Informationen aus dem US-Verteidigungsministerium impliziert oder bedeutet nicht dessen Befürwortung.)*

schwerwiegende Fehler enthält. Die endgültige Version des Programms wird später an einem echten Roboter getestet.

Aber die Simulation birgt noch weitere Vorteile: Die Entwickler können phasenweise entwickeln. Sie beginnen mit einfachen Modellen ohne viel Detail, was sich besonders bei komplexen Projekten anbietet. Derartige Simulationen können schon früh im Prozess eingesetzt werden, um die grundsätzliche Durchführbarkeit des Systems zu ermitteln. Die für die Robotik entwickelten Simulationsumgebungen sind mit zahlreichen Programmiersprachen kompatibel und erleichtern die Entwicklungsarbeit. Zusätzlich verkürzen Simulationen oft die Entwicklungsdauer, da Fehler in der Anwendungslogik korrigiert werden können, bevor sie in der Hardware umgesetzt werden und dann nur schwer zu beheben sind.

Bei der Robotersimulation gibt es verschiedene Verfahren. Bislang konzentrierte sich die Arbeit auf die Kinematik der Roboterbewegungen, um die Umsetzbarkeit und Zweckmäßigkeit der Bahnen und Trajektorien zu prüfen.

Bei dieser Simulationsvariante zeigt ein virtueller Roboter in einem 3D-Raum, wie sich die Gelenke in der Realität wahrscheinlich verhalten werden. Durch Simulation lässt sich auch ermitteln, ob der Roboter schwere oder sperrige Gegenstände heben und handhaben kann, ohne an Standsicherheit einzubüßen.

Einige Kinematiksimulatoren arbeiten mit vereinfachten Berechnungen und konzentrieren sich auf die programmgesteuerte Drehung und Bewegung von Gegenständen, um Kollisionen mit Sicherheitskäfig oder Arbeitszelle zu vermeiden. Andere wiederum setzen auf komplexere Physiksimulationen, um Belastungen und andere Aspekte zu simulieren, die sich auf die Praxisleistung des Roboters auswirken können.

Wenn ein Roboter die kontrollierte, durch Sicherheitskäfige geschützte Umgebung verlässt und dort eingesetzt wird, wo sich Menschen und andere Roboter frei bewegen, müssen die Entwickler

die entsprechenden Interaktionen berücksichtigen. In der mobilen Robotik können die Entwickler im Verhaltensimulator auf einem hohen Abstraktionsniveau virtuelle Welten mit weiteren Objekten erschaffen. Eine einfache Verhaltenssimulation berücksichtigt nur die Bewegungen eines Roboters zwischen feststehenden Objekten. Komplexere Simulationen beinhalten mehrere mobile Agenten oder Avatare. Diese verhaltensbasierten Simulatoren unterstützen die Entwicklung von Anwendungen, in denen der Roboter mit komplexen Umgebungen konfrontiert wird. Sie lernen aus Kollisionen und anderen Interaktionen, um besser mit Hindernissen umgehen zu können. Physikalische Simulationen werden benötigt, um zu prüfen, ob die Kinematik des Roboters akkurat dargestellt wird.

Simulationsumgebungen wie das Open-Source-Paket Gazebo können realistische Sensordaten generieren, die mit unterschiedlichen Störpegeln besetzt werden. Mit Gazebo lässt sich die Simulation auf die konkreten Anforderungen der Anwendung abstimmen, beispielsweise durch den Einsatz verschiedener Physik-Engines. Für die Simulation überfüllter Umgebungen wird oft ein Maximalkoordinatensolver wie ODE oder Bullet eingesetzt. Featherstone-basierte Solver wie DART oder Simbody finden eher Anwendung bei Gelenksystemen wie humanoiden Robotern oder komplexen Fertigungsrobotern. Alle Physik-Engines sind über dieselbe Programmierschnittstelle (API) zugänglich.

Die Simulationstechnik hat aber auch ihre Grenzen. Eine Anwendung kann immer nur die jeweils programmierten Eigenschaften und Ereignisse simulieren. Es werden keine internen und externen Faktoren dargestellt oder simuliert, was bei der Hardware-Umsetzung des Konzeptes zu Problemen führen kann. Oft ist es auch schwierig, ausreichend repräsentative Szenarien zu entwerfen, was insbesondere für die Auswertung komplexer Situationen und Verhaltensweisen gilt. Erfahrungen bei der Umsetzung simulierter Konzepte in die physische Umgebung können auf zukünftige Projekte übertragen werden, sodass sich die Fehlerquote mit der Zeit verringert.

Daher zählt die Simulation auch weiterhin zu den wichtigsten Hilfsmitteln bei der Entwicklung von Robotern.

SCHLÜSSELFAKTOREN



01

Die meisten verbreiteten Roboter-Betriebssysteme (ROS) werden nicht auf einem Echtzeitbetriebssystem (RTOS) ausgeführt, wohl aber jene Komponenten, die Daten an das ROS senden.



02

Die Entwickler können sich bei ROS, Simulationen und RTOS zwischen Open-Source-Paketen und kommerziellen Angeboten entscheiden.



03

Simulationsumgebungen erfüllen verschiedenste Anforderungen vom einfachen Bewegungsprofil über physikalisch unterstützte Kinematik bis hin zu Verhaltensweisen in komplexen Szenarien.



AI in der Robotik

Ein großes Problem bei der Entwicklung von Robotern liegt darin, der Maschine die Eigenschaften ihrer Umgebung zu erklären. Der Roboter muss Hindernisse und Gefahren erkennen und zusätzlich auch deren Eigenheiten verstehen, damit er auf jede Situation angemessen reagieren kann.

Ein kollaborativer Roboter (Koboter) interagiert innerhalb eines gemeinsamen Arbeitsbereichs mit dem Menschen und muss beispielsweise zwischen dem aufzunehmenden Objekt und dem Menschen in seiner Nähe unterscheiden können.

Zwar lassen sich regelbasierte Modelle zur Führung der Bewegungen eines autonomen Systems erstellen. Die

Schwierigkeit liegt aber darin, diese Systeme ausreichend robust und effektiv für die komplexen Situationen zu gestalten, wenn sie beispielsweise bei Kobotern in Fabriken oder Warenlagern bzw. bei Auslieferungsrobotern eingesetzt werden. Maschinelles Lernen ist eine Alternative auf dem Weg zu einer Lösung. Das haben zahlreiche Anwendungen bewiesen – ob mit Drohnen, die eine Route im Wald verfolgen, oder selbstfahrenden

Fahrzeugen, die ausreichend zuverlässig sind, um versuchsweise in der Stadt zu fahren.

Die wichtigste Anwendung für das maschinelle Lernen in der Robotertechnik die ist die Wahrnehmung: Der Roboter muss in der Lage sein, angemessen auf die Eingangssignale von Kameras und Sensoren zu reagieren, mit denen die 3D-Landschaft in seiner Umgebung abgebildet wird. Mit sensorischer künstlicher Intelligenz kann der Roboter Objekte in seiner Umgebung erkennen. Auf dieser Grundlage kann er per Mustervergleich die entsprechenden Verhaltensweisen aus seinen bisherigen Erfahrungen erlernen. Außerdem kann er sich neue Situationen bei Bedarf durch Verstärkungslernen zu eigen machen.

Die künstliche Intelligenz, kurz: AI, wird in unserem Alltag immer präsenter. Alexa von Amazon, OK Google und viele andere Webdienste arbeiten mit komplexen Algorithmen, die auf Servern in der Cloud ausgeführt werden. Die Roboterentwickler werden sich ähnlichen Strategien zuwenden, sobald die Hardware es zulässt und ein Teil der Datenverarbeitung an die Cloud ausgelagert werden kann.

Das maschinelle Lernen ist seit den Anfängen vor über 50 Jahren um zahlreiche Ansätze erweitert worden. Grundsätzlich haben alle Verfahren des maschinellen Lernens gemein, dass sie Daten erfassen, damit das Modell trainieren und das abgeleitete Modell für Prognosen über neue Daten verwenden. Das Training des Modells gestaltet sich als Lernprozess, in dem das Modell in jedem Schritt unbekannten Daten ausgesetzt wird, aus denen es Prognosen erstellen soll. Das Feedback aus diesen Prognosen ist ein Fehlerterm, mit dessen Hilfe das Modell im Laufe des Trainings verbessert wird.

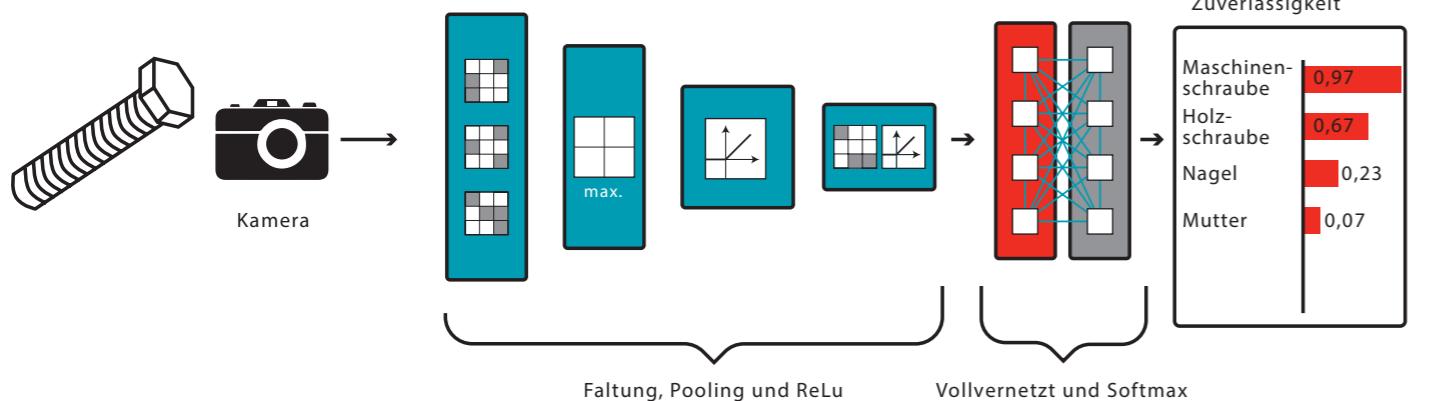
Nach der Anpassung des Modells an neue Daten verschlechtert sich häufig die Leistung in früheren Mustern. Daher benötigt das Training im Verlauf mehrere Iterationen, um einheitliche Leistungen zu gewährleisten. Das Training wird meist dann beendet, wenn die Prognosen des Modells den Punkt erreichen, an dem sich der Fehler nicht mehr verbessert – das kann an einem lokalen oder im Idealfall globalen Minimum der Fall sein. Dementsprechend ist das maschinelle Lernen stark verwandt mit Optimierungsverfahren wie der linearen Regression, bei der eine Gerade durch eine Punktwolke gelegt wird.

Für das maschinelle Lernen gibt es viele Algorithmen. Unbedingt sollte zwischen überwachtem und unüberwachten Lernen unterschieden werden. Bei letzterem wird das Modell mit nicht klassifizierten Daten gefüttert und soll die Elemente in Gruppen einteilen. Ein dabei häufig verwendetes Algorithmus ist die k-Means-Clusteranalyse. Dieser Algorithmus arbeitet iterativ und weist jeden Datenpunkt einem bestimmten Cluster zu. Dazu ermittelt er – oft durch zufällige Vorauswahl – die Zentren der einzelnen Cluster und optimiert das Modell dann anhand der Abstände der Datenpunkte zueinander, bis sich die wahrscheinlichste Cluster-Struktur ergibt.

In der Robotik wurde mit k-Means und ähnlichen unüberwachten Clusterstrategien die automatisierte Kartierung unbekannter Räume durch Roboterverbunde ermöglicht. Derzeit ist bei wahrnehmungsbasierten Aufgaben aber das überwachte maschinelle Lernen die unter Forschungs- und Produktionsrobotern am meisten verbreitete Variante.

Bis vor kurzem gehörte die Support Vector Machine (SVM) zu den erfolgreichsten Bilderkennungsverfahren. Sie funktioniert ähnlich wie das Clustering, arbeitet aber mit klassifizierten Daten. Eine Support Vector Machine unterteilt eine Menge von Objekten so in Klassen, dass um die Klassengrenzen herum ein möglichst breiter Bereich frei von Objekten bleibt. SVMs wurden Ende der 1990er Jahre und zu Beginn der 2000er Jahre schon in der Forschung für autonome Fahrzeuge und ähnliche Anwendungen genutzt, sind aber überwiegend durch das Deep Learning ersetzt worden.

Deep Learning bezeichnet ein Optimierungsverfahren für künstliche neuronale Netze (ANN), das in den 1980er und 1990er Jahren in der Öffentlichkeit viel diskutiert wurde und selbst auf Theorien fußt, die vor über fünfzig Jahren entwickelt wurden und von der Biologie tierischer Gehirne inspiriert waren. Bei einem normalen ANN sind künstliche Neuronen in verschiedenen Schichten (Eingabeschicht, Ausgabeschicht, Zwischenschicht) angeordnet. Jedes Neuron in der Zwischenschicht nimmt die Daten aller Neuronen in der Eingabeschicht auf, berechnet eine gewichtete Summe, wendet eine Aktivierungsfunktion an (hyperbolischer Tangens oder Logistikfunktion) und sendet das Ergebnis schließlich an die Ausgabeschicht.

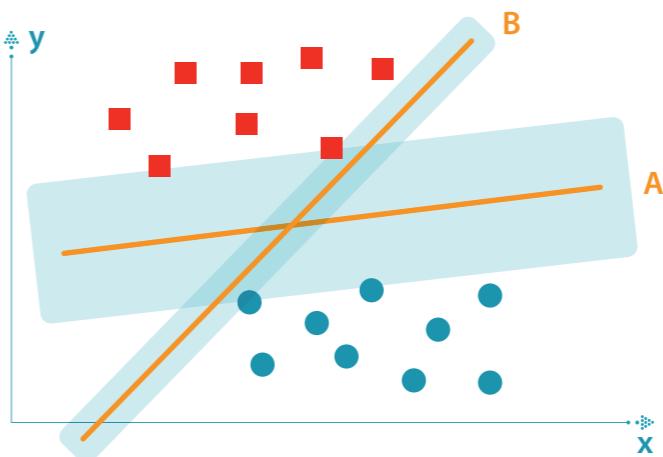


Eine Deep-Learning-Plattform erhöht die statistische Wahrscheinlichkeit, dass das von der Kamera erfasste Objekt auch das Zielobjekt ist; in diesem Fall handelt es sich um eine Maschinenschraube.

Meist wird das Netz per Backpropagation trainiert, wobei Informationen von der Ausgabe zu Eingabe zurückgeführt werden, um den Prozess zu optimieren und Fehler zu reduzieren. Bei der Backpropagation wird der Gradient eines jeden Neurons berechnet und die Gewichte werden in Richtung des steilsten Abfalls der Fehleroberfläche angepasst, sodass sich der Fehler in den einzelnen Trainingsabschnitten reduziert. Diese ANN-Strategie erwies sich schnell als vielversprechend. Da für die Backpropagation aber enorme Rechenressourcen benötigt werden und das Verfahren mit der SVM nicht mithalten konnte, geriet ANN nahezu in Vergessenheit. Die Situation änderte sich mit der Neubelebung tiefer Netzwerke (ANNs mit mehreren Zwischenschichten), die in den 1960er Jahren erstmals beschrieben wurden, aufgrund der äußerst problematischen Optimierung der Netzwerkgewichtungen aber nicht von Erfolg gekrönt waren.

Der Schlüssel war die Entwicklung eines effizienteren Ansatzes für Training und Backpropagation durch Geoffrey Hinton und Ruslan Salakhutdinov, die Mitte der 2000er Jahre an der Universität Toronto tätig waren. Dieser Entwicklung kam der enorme Anstieg der Rechenleistung im Vergleich zum Beginn der 1990er Jahre zugute, der anfangs mit Multi-Core-CPUs und später mit GPUs erreicht wurde. Eine höhere Modellleistung stellte

sich mit der Optimierung der vollvernetzten Architektur ein, die in den zwanzig Jahren davor probiert worden war. Bei einem Versuch wurden Faltungsschichten zwischen den vollvernetzten Schichten eingestreut.



Zwei mögliche Partitionen für einen Datensatz, die aus einem SVM-Training (Support Vector Machine) hervorgehen könnten.

Bei der Faltung handelt es sich um eine Matrixoperation, die eine Feature-Map auf eine Datenkonstellation angewendet wird; bei der Bilderkennung sind damit z. B. Pixel gemeint.

Die Feature-Map ist wie ein Filter zu betrachten. Derartige Faltungen werden häufig in der Bildverarbeitung verwendet, um Bilder zu verwischen oder scharfe Ränder zu finden. Sie können auch Daten in einer räumlichen Domäne für die Darstellung in der zeitlichen Domäne umwandeln, sodass das Gesamtbild durch überlagerte Wellen entsteht. Daher lassen sich Pixelkonstellationen mit Faltungen in Eigenschaften gebilde umwandeln, die unabhängig von den nachfolgenden Schichten bearbeitet werden können.

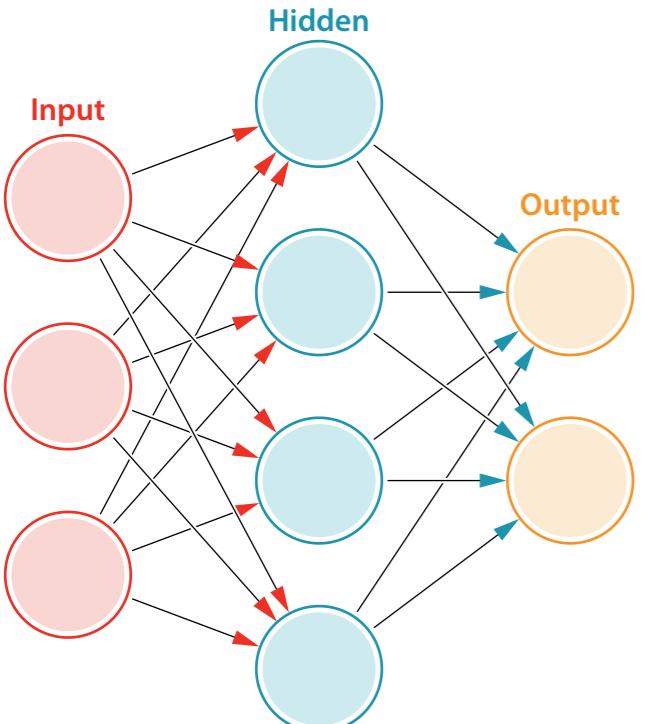
Im Gegensatz zur konventionellen Anwendung von Faltungen bei der Bildverarbeitung werden die Feature-Maps im Zuge des ANN-Trainings erlernt. Auf diese Weise kann sich das Modell auf Unterschiede im Training einstellen, die eine Unterscheidung zwischen den Beispielen erleichtern. Beispielsweise eignen sich Feature-Maps, die auf die Erkennung von Formunterschieden abgestimmt sind, am besten für die allgemeine Bilderkennung. Für die Farberkennung optimierte Feature-Maps hingegen werden bevorzugt dort eingesetzt, wo die zu trennenden Objekte eine ähnliche Form haben und sich nur durch ihre oberflächlichen Eigenschaften unterscheiden.

Ein großer Vorteil der Faltungsschicht ist die geringe nötige Rechenleistung. In einem ANN ist sie einfacher umzusetzen, da sie pro Neuron weit weniger Verbindungen benötigt als vollvernetzte Schichten und sich problemlos auf GPUs und anderen parallel verarbeitenden Architekturen mit SIMD-Arithmetikeinheiten (Single Instruction Multiple Data) abbilden lässt. Eine weitere Eigenschaft von Faltungsschichten ist die Ähnlichkeit zur Organisation der Neuronen in der Sehrinde des organischen Gehirns, die sich von den höher vernetzten Kognitionsregionen unterscheidet.

Beim Deep Learning sind oft mehrere Faltungsschichten in Reihe angeordnet. Jede Schicht sucht das Bild nach immer abstrakteren Inhalten ab. Bei einem Convolutional Neural Network (CNN, zu Deutsch etwa „faltendes neuronales Netzwerk“) wird eine Anordnung von Faltungsschichten oft von einer Pooling-Schicht gefolgt. Diese Pooling-Schichten vereinen die Ausgaben mehrerer Neuronen – ähnlich wie bei einer Mehrprobennahme – zu einer Ausgabe, die mehreren Eingängen in der Folgeschicht zugeführt werden kann. Durch diesen Pooling-Vorgang werden Informationen konzentriert und dem am besten geeigneten nachfolgenden Neuronenverbund zugewiesen. Der Vorteil liegt in der verbesserten Erkennung von Bildern, in denen sich die entscheidenden Merkmale bewegen. Beispielsweise kann sich die Position eines menschlichen Gesichtes im Blickfeld des herannahenden Roboters verändern. Dank der Pooling-Schichten werden Eigenschaften, die durch die einem Gesicht zugehörige Form und Farbe aktiviert werden, immer jenen Neuronen zugeführt, die das Signal detaillierter analysieren können. Ein Training mit Bildern von versetzten und gedrehten Gesichtern unterstützt den Aufbau der Verbindungen zwischen den optimal geeigneten Neuronen.

Beim Pooling gibt es verschiedene Varianten. Eine Max-Pooling-Schicht übernimmt beispielsweise den Maximalwert der Eingaben und leitet ihn weiter. Diese Strukturen wurden vom höchst einflussreichen AlexNet angewendet, das beim ImageNet-Wettbewerb LSCVRC-2010 vorgestellt wurde. AlexNet umfasste fünf Faltungsschichten, drei vollvernetzte Schichten und drei Max-Pooling-Stufen.

Eine weitere Verbesserung der Trainingsleistung brachte die Einführung des Stochastic Gradient Descent (SGD) für die Gradientenberechnung bei der Backpropagation. Der Grund dafür war in erster Linie die rechnerische Effizienz, da die Gradienten anhand einer kleinen Auswahl der Trainingsdaten ermittelt werden. Der Random-Walk-Effekt des SGD-Verfahrens trägt jedoch dazu bei, dass sich die Optimierung schneller und häufiger auf ein brauchbares globales Minimum hin bewegt, als es mit den bisherigen Verfahren der Fall war.



Das neuronale Netz besteht prinzipiell aus mehreren Eingängen, einer Zwischenschicht und mehreren Ausgabeknoten.

Kurz nach der erstmaligen Verwendung von Deep-Learning-Architekturen demonstrierten Forscher an der Schweizer IDSIA, dass die Maschinen den Menschen bei Erkennungsaufgaben bereits übertrafen. Bei einem Experiment war das CNN in der Lage, schwer beschädigte Verkehrsschilder zu identifizieren, da es visuelle Eigenschaften erkannte, die das menschliche Auge normalerweise übersehen würde. Die Fähigkeit zur Erkennung nicht offensichtlicher Eigenschaften kann bei den derzeitigen ANN-Strategien jedoch auch hinderlich sein.

Bei einer ungünstigen Auswahl der Trainingsmaterialien kann sich das Netzwerk Elemente antrainieren, die in der Praxis zu Fehlern führen.

In jüngeren Jahren hat die Forschung herausgefunden, dass das Netzwerk bereits dann eine falsche Klassifizierung vornimmt, wenn nur ein einziges Pixel im Bild verändert wird. Eine Analyse der von einem CNN gewählten Gewichte brachte hervor, dass das Netzwerk bei dem Versuch, Katzen zu klassifizieren, die in einigen Trainingsbildern sichtbaren Katzen toiletten bei der Identifizierung einzubeziehen gelernt hatte. Manchmal führen Netzwerke eine erfolgreiche Klassifizierung auch für Bilder an, die nur aus Rauschen bestehen.

Die Architektur des CNN sollte auf die Anwendung abgestimmt sein. Eine universell einsetzbare Architektur gibt es nicht. Anzahl und Anordnung der Faltungs-, Pooling- und vollvernetzten Schichten wirken sich maßgeblich auf die Leistung aus. Feature-Map und Kernelgrößen für die einzelnen Faltungsschichten stellen einen Kompromiss zwischen Leistung, Speicherauslastung und Compute-Ressourcen dar.

Die klassische Feedforward-Architektur des einfachen CNN ist bei weitem nicht die einzige Möglichkeit, insbesondere da sich das Deep Learning von Klassifizierungs- zu Steuerungsaufgaben wandelt. Feedback ist bei der Spracherkennung und ähnlichen Anwendungen zu einem elementaren Bestandteil geworden. Rekurrente neuronale Netze arbeiten mit Feedbackschleifen. Speichernetze nutzen statt Neuronen andere Elemente zum Halten von temporären Daten, mit deren Hilfe Kontextinformationen für Anwendungen gespeichert werden,

die einer gewissen Planung bedürfen. Als Beispiel wären hier Systeme zur Steuerung von Roboterverhaltensweisen und -bewegungen zu nennen. Eine weitere Möglichkeit ist eine konfrontative Architektur, die auf zwei verknüpften Netzwerken beruht. Deren Konkurrenzverhältnis verhindert, dass eines der Netzwerke grundlegende Fehler macht. Angesichts der fortschreitenden Entwicklung in der Technik sind weitere neuartige Architekturen zu erwarten.

Das überwachte Lernen unterscheidet sich von der organischen Erfahrung insofern, als dass Training und Ausführung in verschiedenen Phasen stattfinden: Das Netzwerk lernt normalerweise nicht, während es ausgeführt wird. Damit das System aber neuen Herausforderungen gewachsen ist, sollten auch Trainingssituationen mit aufgezeichneten Daten durchgeführt werden, insbesondere wenn sie vom System als fehlerverursachende oder leistungsmindernde Situationen gekennzeichnet werden.

Zur Steuerung der Kernfunktionen des Roboters wird oft auf Verstärkungslernen zurückgegriffen. Dabei wird der Roboter beim Training für gutes Verhalten belohnt und für ungünstige Entscheidungen bestraft. Im Gegensatz zur einfachen Bildklassifizierung ist die Vorausplanung hier als wichtige Prozesskomponente zu betrachten. Dazu müssen die Belohnungen mittels Diskontierungstechniken auf die Entscheidungen im jeweiligen Zustand abgestimmt werden. Dazu müssen die Belohnungen mittels Diskontierungstechniken auf die Entscheidungen im jeweiligen Zustand abgestimmt werden. Ein Diskontierungsfaktor von 0,5 hat nach drei Zustandsänderungen beispielsweise nur noch ein Achtel seines Wertes. So verfolgt das maschinell lernende Netzwerk kurzfristige Belohnungen. Ein höherer Diskontierungsfaktor bringt das Netzwerk dazu, auf längerfristige Ergebnisse abzuzielen.

Für Roboterentwickler hat der Ort des Trainings besondere Bedeutung. Die Trennung von Training und dem während der Ausführung nötigen Inferencing bietet Gelegenheit, den rechenintensivsten Teil des Problems an externe Server auszulagern.

Das Inferencing kann in Echtzeit mit weniger Hardware erfolgen, während die Server die Trainings-Updates schubweise über Nacht durchführen. Die Cloud-Umgebung bietet Zugriff auf Standardtools wie Caffe oder TensorFlow, mit denen sich verschiedene CNN-Strategien entwickeln, erstellen und testen lassen.

Mit einer für das Inferencing optimierten Hardwareplattform können die Entwickler einige Eigenschaften der CNN-Architektur zur Steigerung der Verarbeitungseffizienz nutzen. Die beim Training genutzten Berechnungen für die Backpropagation sind auf eine präzise Gleitkommaarithmetik angewiesen. Dadurch sind Fehler nahezu ausgeschlossen. Normalisierung und Regularisierung tragen dazu bei, die Größe individueller Gewichte pro neuronaler Eingabe zu reduzieren. Das ist notwendig, damit nicht einige wenige Knoten starke Gewichte entwickeln, die sich nachteilig auf die Gesamtleistung auswirken.

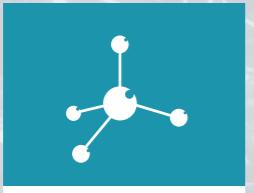
Bei der Normalisierung werden einige Gewichte zunächst sehr stark und bei der Optimierung dann bis auf null reduziert. In der Laufzeitanwendung kann auf diese Berechnungen gänzlich verzichtet werden. Bei vielen interneuronalen Verbindungen mit geringer Signifikanz toleriert die Berechnung der gewichteten Summe aufgrund der wenig präzisen Festkommaarithmetik größere Fehler. Oftmals reicht eine Festkommaarithmetik mit 8 Bit aus. Bei einigen Verbindungen haben selbst 4 Bit Auflösung zu keinem erheblichen Anstieg der Fehlerquote geführt. Das spricht für Hardwareplattformen, die sich eher durch Flexibilität statt numerische Präzision auszeichnen. Die weniger präzisen arithmetischen Vorgänge werden parallel von mehreren Mikroprozessoren mit SIMD-Ausführungseinheiten gehandhabt. Mit feldprogrammierbaren Gate-Arrays (FPGA) lässt sich die arithmetische Präzision anpassen. Die gerade entstehenden CGRA (Coarse-Grained Reconfigurable Arrays) sind für Deep-Learning-Verfahren optimiert und werden als Zwischenlösung zwischen Mikroprozessor und FPGA dienen. Sie verbessern die Leistung und begünstigen die Umsetzung von AI-Robotern bzw. AI-Kobotern.

SCHLÜSSELFAKTOREN



01

Durch maschinelles Lernen entstehen Sensorik- und Steuersysteme für Roboter, die mehr Möglichkeiten bieten als traditionelle bahn- oder regelbasierte Steuerstrategien.



02

Es wird ein passender Algorithmus für das maschinelle Lernen benötigt. Deep Learning ist nicht immer die richtige Lösung.



03

Training und Inferencing laufen getrennt ab, sodass die rechenintensiveren Vorgänge an die Cloud ausgelagert werden können.



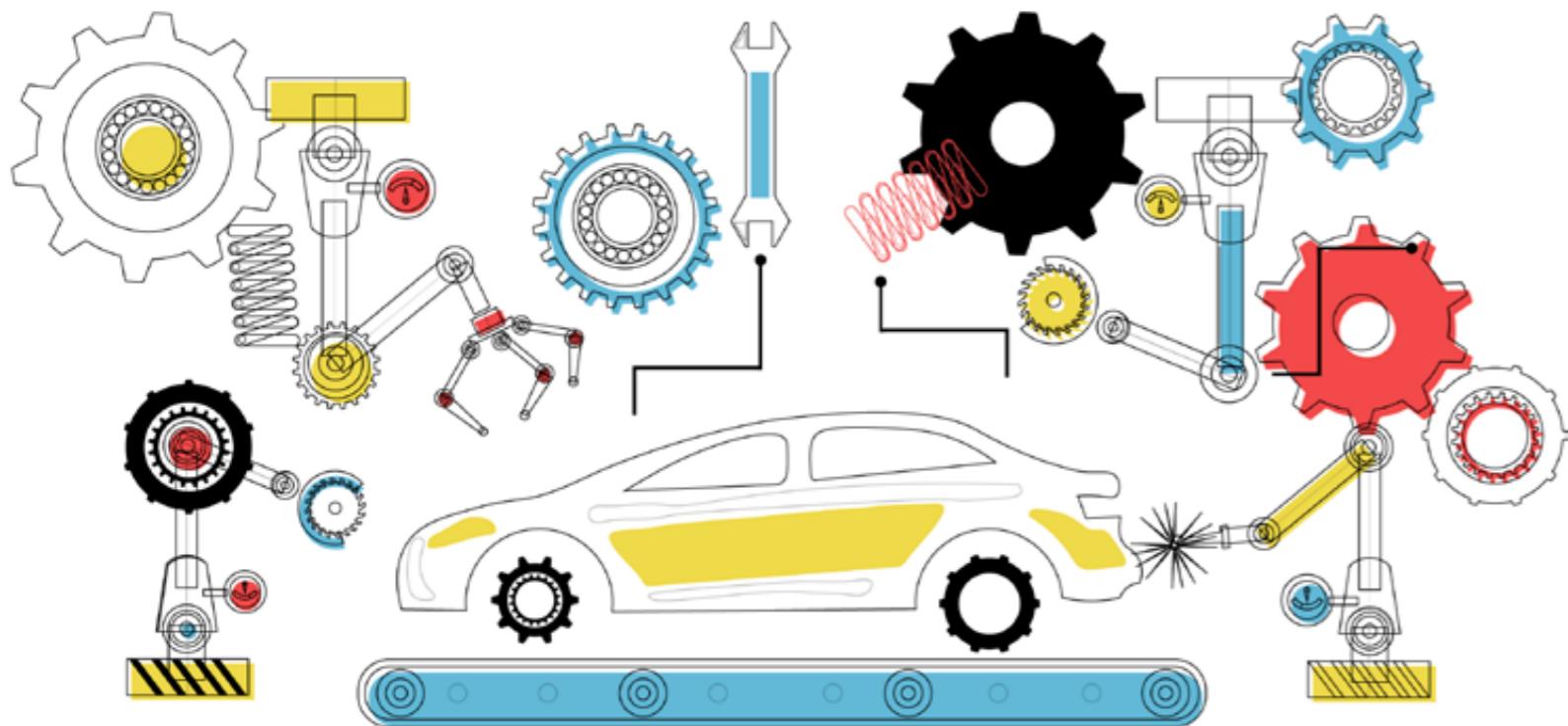
04

CNNs gibt es in verschiedenen Formen. Die Architektur des CNN ist stark abhängig vom zu lernenden und zu verarbeitenden Datentyp.



05

Die Trainingsdaten müssen hochwertig sein. Andernfalls kann es in der Praxis zu Fehlern kommen.



Effektoren

Bei einem Roboter ist der Effektor das wichtigste Mittel zur Interaktion mit seiner Umgebung. Der Effektor wird vom Roboter gesteuert und kann als Radpaar, Fingersatz, Werkzeug oder andere physische Konstruktion ausgeführt sein, mit dem der Roboter innerhalb seines Arbeitsraums agiert.

Der Effektor ist ein wichtiger, höchst anwendungsspezifischer Teil des Roboters und richtet sich nach dessen Einsatzzweck.

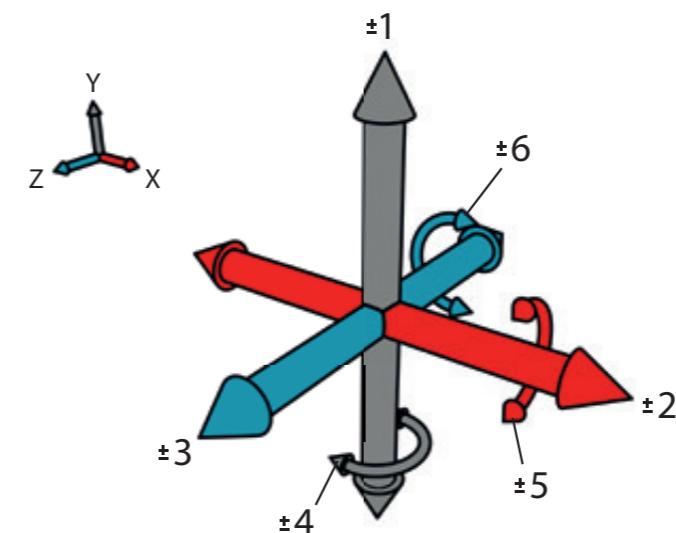
In der Industrierobotik handelt es sich beim Endeffektor meist um einen Greifer oder ein Werkzeug. Im Folgenden sind die gängigen Effektoren mit ihren Anwendungsbereichen und Bauarten beschrieben.

GRUNDLEGENDE KONZEPTE

Damit das Stellglied in seiner Umgebung eine physische Bewegung ausführen kann, muss der Effektor (elektrische) Energie in Bewegungen umsetzen. Einfache Stellglieder bewegen sich nur in einem Freiheitsgrad, d. h. translatorisch oder rotatorisch.

Die Systemanforderungen an den Effektor und die nötigen Freiheitsgrade ergeben sich aus der Aufgabe des Roboters. Je größer der Freiheitsgrad des Effektors, desto mehr Sensoren werden benötigt, und desto komplexer wird die Programmierung.

Die Freiheitsgrade eines Roboters können als Systembeschränkung betrachtet werden. Die Anzahl der Freiheitsgrade des gesamten Systems setzt sich zusammen aus den Freiheitsgraden des Roboters und den (zusätzlichen) Freiheitsgraden des Effektors. Dennoch bieten die meisten Effektoren nur einen einzigen zusätzlichen Freiheitsgrad.



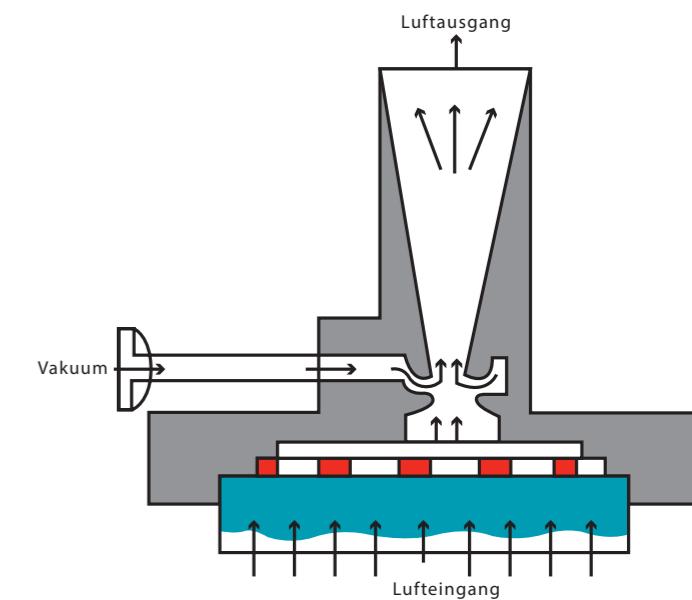
Die Freiheitsgrade geben vor, wie flexibel sich der Effektor für seine Aufgabe einsetzen lässt.

GREIFER

Am häufigsten kommen Greifer als Effektoren zum Einsatz und dienen zum Aufnehmen, Halten und Ablegen von Gegenständen. Greifer haben eine oder mehrere Kontaktstellen, was sich auf die Berührung zwischen Greifer und Objekt bezieht. Darüber hinaus lassen sich Greifer in vier Kategorien einordnen:

- **Mechanik:** Objekt wird kraft- oder formschlüssig festgehalten
- **Oberflächenverhakung:** Objekt wird mit Nadeln oder anderen eindringenden Vorrichtungen gehalten (oft bei Textil- und CFK-Werkstoffen)
- **Anziehung:** Objekt wird mit Unterdruck, Magnetkraft oder Elektroadhäsion gehalten
- **Stoffschluss:** Objekt wird durch direkten Kontakt mit Klebstoff oder durch Oberflächenspannung gehalten

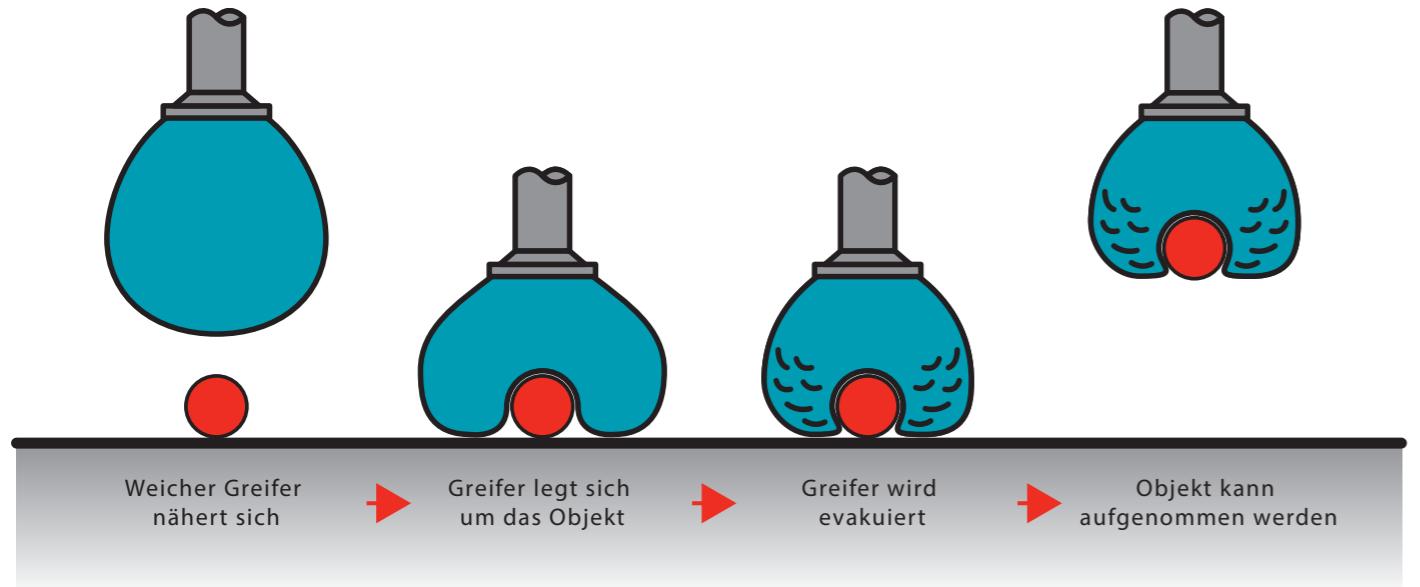
Mechanische Greifer machen sich beim Aufnehmen und Halten des Objekts das Prinzip des Kraft- oder Formschlusses zunutze. Kraftschlüssige Greifer haben meist mehrere Finger, während formschlüssige Greifer auch mit einem Finger zureckkommen.



Saugnäpfe eignen sich für Objekte mit ebener Oberfläche (z. B. aus Glas).

Die Betätigung mechanischer Greifer kann über vier verschiedene Mechanismen erfolgen, für die jeweils nur ein Stellglied benötigt wird:

- Gestänge:** Die Seitwärtsbewegung zum Schließen des Greifers wird über ein gelenkiges Gestänge übertragen.
- Zahnstange:** Die Seitwärtsbewegung wird in zwei gegenüberliegende Drehbewegungen übertragen, die den Greifer zusammenführen.
- Kurvenscheibe:** Zwischen den beiden feststehenden Greifern wird ein konischer Körper verschoben, sodass sich der Greifer dreht.
- Spindel:** Eine Drehbewegung wird in eine Seitwärtsbewegung umgewandelt.



Wie oben beschrieben, werden mechanische Greifer meist von einem Elektromotor oder Servo betätigt. Auch eine pneumatische oder hydraulische Betätigung ist möglich, wobei die Betätigung über einen Zylinder erfolgt, dessen translatorische Bewegung über ein Gestänge in die benötigte Endbewegung umgewandelt wird.

Saug- und Vakuumgreifer haben typisch nur eine Kontakt ebene und berühren das Objekt demnach nur an einem Punkt bzw. einer Fläche. Mechanisch sind sie einfach aufgebaut, müssen aber an ihren Einsatzbereich angepasst werden.

Saugnäpfe heben Objekte mit einfachen, meist ebenen Flächen an. Beim Aufnehmen des Objekts wird die Luft aus dem Saugnapf abgesaugt. Sobald das Objekt abgelegt werden soll, öffnen die entsprechenden Luftventile, um den Napf wieder zu belüften.

Einfache Anziehungsgreifer haben nur eine Kontaktfläche, benötigen aber keinen konstanten Unterdruck. Dafür können sie nur leichte Teile heben, und die Greiffähigkeit lässt nach einer Weile nach.

Zu den universell einsetzbaren Varianten gehört der Balggreifer. Er ist quasi eine Mischung aus mechanischem und Anziehungsgreifer. Er besteht aus einer kugelförmigen Blase, die mit einem Granulat gefüllt ist und auf das Objekt gedrückt wird. Dabei verformt sich der Greifer, legt sich um das Objekt und wird dann evakuiert. Der jetzt feste Greiferkopf erzeugt einen nahezu perfekten Formschluss, sodass das Objekt aufgenommen werden kann.

TOOLS

Sehr häufig werden Schweißbrenner als Endeffektor eingesetzt. Damals waren Schweißroboter als universelle Industrieroboter mit hoher Traglast und einem Schweißbrenner als Endeffektor ausgeführt. Aber mit der steigenden Nachfrage nach Schweißrobotern haben die Hersteller spezialisierte Robotersysteme entwickelt, die kleiner und kostengünstiger ausfallen.

Des Weiteren sind Schrauber, Bohrmodule, Nietpistolen und viele andere Werkzeuge als Endeffektor im Einsatz.

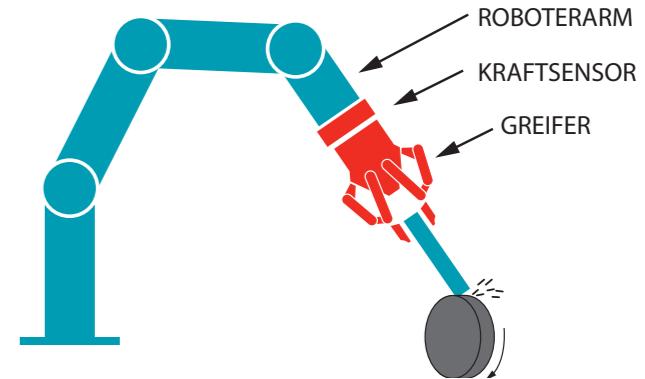
Für Produktionsbereiche, in denen maximale Flexibilität gefragt ist, kann ein Multifunktions-Endeffektor (MFE) verbaut werden. Ein MFE vereint zahlreiche Werkzeuge in einer Einheit, ist dabei aber groß, schwer und weniger robust.

Ein Roboterkopf besteht, wenn die Aufgabe es zulässt, nur aus wenigen Sensoren. Dank seiner Wiederholgenauigkeit und Präzision eignet sich der Roboterkopf ideal für Qualitätsprüfungen. Beispielsweise kann ein Kamerakopf mit Lasersensoren die Abmessungen und die Oberflächenbeschaffenheit eines Produkts prüfen, oder 3D-Scanner können das Objekt in voller Größe ausmessen und digitalisieren.

SENSOREN

Sensoren sind für die Robotik unverzichtbar. Zusätzlich zu den integrierten Sensoren im Roboter hat der Effektor oft eine eigene Sensorik, die es dem Roboter ermöglicht, seine Aufgaben sicher und präzise auszuführen. Meist werden hier Kraft-Momenten-Sensoren verbaut. Wie der Name besagt, misst der Sensor sowohl die Kräfte als auch die Drehmomente auf allen drei Achsen und eignet sich daher

für alle sechs Freiheitsgrade. Der Kraft-Momenten-Sensor sitzt typisch zwischen dem Endeffektor und dem Handgelenk des Roboters und misst genau die auf das Objekt wirkende Kraft.



Dank Kraft-Momenten-Sensoren können Roboter viele Aufgaben wie Entgraten oder Schleifen ausführen, die zuvor nur dem Menschen möglich waren.

ZUSAMMENFASSUNG

Greifsysteme sind als Endeffektoren am weitesten verbreitet. Da die Anforderungen an den Greifer von Form und Eigenschaften des aufzunehmenden Objekts abhängig sind, werden Greifsysteme oft stark anwendungsspezifisch zusammengestellt. Bei den anderen Endeffektoren handelt es sich um Spezial- oder Universalwerkzeuge zum Bohren, Schweißen, Schrauben, Schleifen usw. Da sich Roboter generell jedoch zusehends in Produktionsprozessen durchsetzen und kostengünstiger werden, entwickeln immer mehr Roboterhersteller anwendungsspezifische Systeme, die billiger und leichter sind als Universalroboter mit speziellem Endeffektor.



Die Zukunft von Fertigung und MRO

Die Prozesse in der Fertigung haben sich in den letzten 100 Jahren von Grund auf verändert. Bilder von ungeschulten Arbeitern, die in den 1920er Jahren bei Osram in Berlin reihenweise die Sockel für die Glühlampen zusammenlötzten, gehören endgültig der Vergangenheit an.

Selbst die damals produzierten Glühlampen wurden in die Geschichtsbücher verwiesen und zwischenzeitlich durch elektronisch gesteuerte LED-Beleuchtungssysteme ersetzt – eine komplexe integrierte Lösung, die mehrere Verarbeitungsschritte, eine vollkommen andere Lieferkette und zahlreiche komplexe interne und externe Fertigungsmaschinen erfordert. Die Funktion des technischen Betriebsleiters und seines Wartungsteams

hat sich maßgeblich verändert, was auch für die Anzahl der Berührungspunkte mit anderen Teams und Gruppen innerhalb des Unternehmens gilt. Gleichzeitig sehen sich die Unternehmen durch wirtschaftliche Faktoren und Globalisierung gezwungen, sich, statt auszulagern, mit dem heiklen Thema Investitionen im Inland zu befassen. Einige Länder nehmen diese Problematik ernst. Beispielsweise ist man in Deutschland so weit gegangen,

die Kampagne „Industrie 4.0“ ins Leben zu rufen, deren Initiativen dafür einstehen, dass der Industriestandort dank Digitalisierung mit den Niedriglohnländern mithalten kann.

Den Kern eines jeden Fertigungsbetriebs bildet der MRO-Plan (Maintenance, Repair, Operation) für die so genannten indirekten Bedarfe. Dieser Plan gewährleistet einen optimalen Fertigungsdurchsatz, indem er den genauen Ablauf der vorbeugenden Wartung ohne dadurch bedingten Produktionsausfall vorgibt. Ein vorbeugender Wartungsplan erhält nicht nur die Produktivität des Betriebes, sondern kann auch dafür sorgen, dass Roboter bis zu 20 Jahre lang

produktiv arbeiten und sich volumfänglich auszahlen. Der japanische Spezialist für Fabrikautomation FANUC empfiehlt alle 3.850 Stunden (ca. 160 Tage) oder nach spätestens 12 Monaten eine geplante vorbeugende Wartung. KUKA, der deutsche Roboterhersteller in chinesischem Besitz, gibt 10.000 Stunden vor (ca. 416 Tage). Das Wartungsprogramm umfasst verschiedene Arbeiten von der Sicherung des Steuerungsspeichers und der Sichtprüfung von Bauteilen, Seilzügen und Kabeln über die Prüfung der Wiederholgenauigkeit bis hin zum Abschmieren der Gelenke (siehe unten).

Backup des Steuerungsspeichers

Sichtprüfung der Roboterbewegungen einschließlich Seilzüge und Kabel

Prüfung der Bremse

Prüfung der Wiederholgenauigkeit

Akustische Prüfung auf Vibrationen und Geräusche im Betrieb

Abschmieren der Gelenke, Ölwechsel (ggf. mechanische Prüfung)

Sichtprüfung des Programmierhandgeräts und der Steuerkabel

Sichtprüfung von Steckverbindern, Kühlgebläsen, PC-Netzteil und Schutzausrüstung

Prüfung/Austausch der Batterien für Backup-RAM und USV

Planung des Besuchs vom Serviceteam des Lieferanten

Checkliste mit wichtigen Wartungsarbeiten an Robotersystemen

Darüber hinaus muss das Bedienpersonal ordnungsgemäß zusammengestellt und ausgebildet werden, damit es außerhalb des Wartungsplans nicht zu unerwarteten Defekten oder Stillständen kommt.

Werkzeug und Lastgewichte müssen richtig eingegeben werden, damit das Robotersystem die Betriebsbeschränkungen einschätzen kann. Auch wenn einige Systeme in der Lage sind, das Gewicht eigenständig zu ermitteln, sollten Werkzeug und Last stets mit einer geeigneten Waage gewogen werden, um die Werte anschließend manuell einzugeben. Durch die sachgemäße Konfiguration des Tastverhältnisses muss sichergestellt sein, dass bei jeder Bewegung die verfügbare Zeit voll genutzt wird. Das System sollte sich nicht möglichst schnell zwischen den einzelnen Sollwerten bewegen. Dadurch werden Leistungselektronik, Motor und Getriebe nicht überbeansprucht, was zu unnötigem zusätzlichen Verschleiß führen würde.

Das Bedienpersonal und das Wartungsteam sollten darauf achten, dass der Roboter ggf. mit der vom Hersteller dafür vorgesehenen Einrichtung angehalten wird (meist in Form eines Schalters), statt den Nothalt zu betätigen oder die Sicherheitsverriegelungen auszulösen. Der Nothalt aktiviert die Bremsanlage, sodass frühzeitiger Verschleiß entsteht, der mit der Zeit typisch einen Verlust der Wiederholgenauigkeit nach sich zieht.

Durch das Einplanen unvorhersehbarer Probleme ist gewährleistet, dass Stillstände oder Betriebsunterbrechungen innerhalb kürzester Zeit behoben werden können. Dazu empfiehlt es sich auch, hochwertige Ersatzteile zu beschaffen und vorrätig zu lagern. Viele Anbieter können Bestellungen vorausplanen oder gar kommissionierte Waren anbieten, womit sich das Risiko verringert, die Kosten sinken und die Ausfallzeiten bei Störungen möglichst kurz bleiben. Bei den heutigen vernetzten Lieferketten ist es daher ratsam, die Lagerung von Ersatzteilen und Materialien sorgfältig zu überdenken.

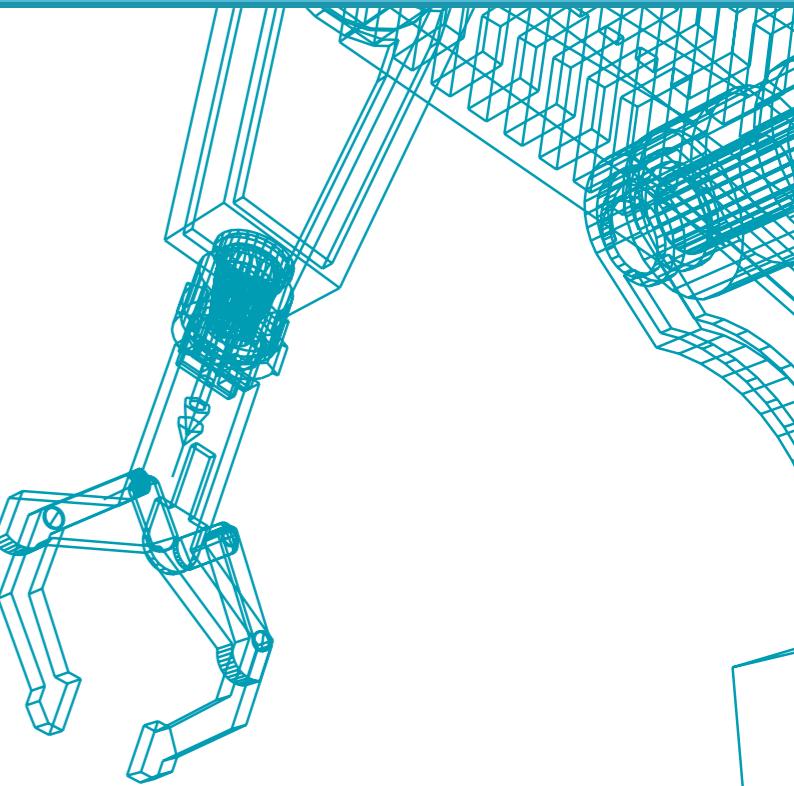
Bei der Betrachtung von Risiken innerhalb der Lieferkette sollte auch bedacht werden, dass selbst stabil wirkende Länder (z. B. Großbritannien vor dem Brexit) oder Unternehmen, deren Größe einen Bankrott unrealistisch erscheinen lässt (Hanjin), nicht mehr als risikofrei einzustufen sind. Wenn überhaupt, dann hat sich gezeigt, dass Veränderungen außerhalb der eigenen Kontrolle jederzeit und überall eintreten können. Außerdem sollten jene Unternehmen einer Risikobeurteilung unterzogen werden, die in Ländern mit extremen Witterungsverhältnissen oder Erdbebengefahr produzieren. Wenn die Einsparungen durch schlanke Fertigungsverfahren so weit erschöpft sind, dass sie durch die Umsetzungskosten aufgehoben werden, wird der Fertigungsmix eindeutig um ein höheres Maß an Automation und dementsprechend mehr Ausrüstung erweitert.

Daher wird immer häufiger auf die robotergestützte Maschinenbeschickung zurückgegriffen, bei der ein Roboter das Einlegen und Herausnehmen bearbeiteter Teile an bis zu fünf Maschinen übernimmt. Solche Roboter können auch Sichtprüfungen durchführen, Strichcodes prüfen und Produkte etikettieren. Ein weiterer Mehrwert gegenüber dem Menschen entsteht durch die Wiederholgenauigkeit, da Roboter das Werkstück jedes Mal exakt gleich ablegen. Dadurch steigt die Qualität der hergestellten Teile, während der Nachbearbeitungsaufwand sinkt. Selbst Aufgaben, bei denen der Mensch bislang als unverzichtbar galt, können heute von Robotern übernommen werden: Dank Kraftrückmeldung (Force-Feedback) sind Schweißen, Schleifen, Entgraten und Polieren für einen Roboter heute kein Problem mehr. Ein Roboter ist heute immer öfter in der Lage, verschiedene Aufgaben auszuführen, statt auf einen Einsatzzweck beschränkt zu sein. Prozessoptimierung und Kostensenkungen durch Automation sollen aber nicht immer auf Kosten der Arbeitsplatzsituation gehen. Der Fahrzeughersteller BMW betreibt in seinen 31 Werken rund 20.000 Roboter und 250.000 Steuersysteme, die Anzahl der Mitarbeiter ist dabei aber gleich geblieben. Untersuchungen der Boston Consulting Group haben ergeben, dass eine Investition in Automationslösungen in existierenden Fertigungsstätten neben dem Erhalt von Know-how und geistigem Eigentum sowie der Kontrolle über die Lieferkette auch dieselben Kosteneinsparungen wie die Alternative bewirken kann: Auslagern.

Daher gilt, ob gut oder schlecht: Der Anstieg des Automationsumfangs und die Lancierung digitaler Technik sind Veränderungen, die wir akzeptieren müssen. Tätigkeiten unter dem Banner der Industrie 4.0 und des industriellen Internets der Dinge werden für die nächste Optimierungswelle der Produktionsstandorte immer wichtiger und gewähren frühe Einblicke in den Zustand der Fertigungsanlagen. Warum klingen diese Begriffe noch so vage? Angesichts der vielschichtigen Bedürfnisse innerhalb der Branchen gibt es selten eine Standardlösung. Stattdessen ist eine Kombination aus existierenden Technologien, neuen Lösungen und einem gewissen Individualisierungsgrad gefragt. Mit den Erkenntnissen aus diesen Technologien können die Betriebsleiter und ihre Angestellten bei Bedarf zusätzliche Wartungsarbeiten so planen, dass die Auswirkungen auf den Produktionsablauf geringer ausfallen. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen, entsprechenden Verzögerungen und Zusatzkosten.

Gespräche über Industrie 4.0 und das Internet der Dinge führen unweigerlich zum Thema Cloud-Dienste, Webanwendungen und externe Serverdienste.

Und ehe man sich's versieht, geht es um Datensicherheit, IT-Integration und den Schutz geistigen Eigentums. In der Realität haben die Vorteile einer tieferen Digitalisierung mehr Gewicht als die Risiken, aber nur wenn ausreichend Support und Beratung gegeben sind. Zum einen konzentrieren sich die meisten IT-Abteilungen auf Einsatzzeiten, die Bereitstellung von Netzwerkspeichern, Netzverfügbarkeit und Anwendersupport. Die Welt der Automation mit ihren strengen Echtzeitanforderungen und (aufgrund der vielen vernetzten Maschinen und Sensoren) enormen Datenmengen wird bei vielen Unternehmen höchstwahrscheinlich eine Umstrukturierung der IT-Arbeit erfordern. Fachübergreifende Arbeit ist daher unerlässlich, damit die Anforderungen der Fertigungsumgebung und gleichzeitig



die Einschränkungen der IT-Infrastruktur verstanden werden. Zum anderen müssen die IT-Sicherheitsexperten zurate gezogen werden, denn Sicherheit ist ein fester Bestandteil eines jeden Systems und muss bereits bei der Entwicklung berücksichtigt statt später nachgerüstet werden. Mit dieser Hilfestellung können Risiken auf jeder Systemebene angemessen beurteilt und die Implementierung entsprechend entwickelt werden. Außerdem verfügen externe Cloud-Dienstanbieter oft über Umstellungsstrategien und können ihre Kunden zu Servicelevels, Datenspeicherorten und Sicherheitsthemen beraten. Da immer mehr Unternehmen solche Upgrades durchführen, werden die Anbieter neben ihrer Rolle als Lieferant auch zum Berater und Partner. Die Entscheidungsträger und Geschäftsführer, die diese Veränderungen vorantreiben, brauchen viel Courage, ein gesundes Grundvertrauen und gute Führungsqualitäten, um Personal, Lieferanten, Partner und Berater an einen Tisch zu bringen und gemeinsam hinter das Endziel zu stellen.

Wer mehr Geld zur Verfügung hat, kann sich am Beispiel des Chicagoer Demo-Produktionsstandorts Trumpf im US-Bundesstaat Illinois inspirieren lassen, wie ein Unternehmen von Grund auf in die Industrie 4.0 geführt wird.

Nach einer Investition von etwa 26 Millionen Euro bietet der Standort Einblicke in die Zukunft der Blechbearbeitung auf 5500 m² Produktionsfläche. In erster Linie soll er den Kunden darüber informieren, wie eine maschinell vollvernetzte Fabrik implementiert werden kann, dient nebenher aber auch als Schulungsbasis für Smart-Factory-Einsteiger. Die Leitzentrale mit Blick auf den Produktionsbereich rundet den futuristischen Eindruck ab: große Displays mit Echtzeit-Leistungsindikatoren

und ein durchsichtiges, touchfähiges OLED-Display mit einer Grafik, die an Science-Fiction-Raumschiffe erinnert.

Indes unterliegt die 300 m² große Anlage, in der Osram seine Xenarc-Scheinwerfer produziert, seit einiger Zeit einem fortwährenden kontrollierten Digitalisierungsprozess. Nach mehreren erfolgreichen Jahren der kontinuierlichen Verbesserung (CIP, Continual Improvement Process) war irgendwann der Punkt erreicht, an dem die Einkünfte zu sinken begannen. Dieser Umstand führte zu einer Kooperation mit dem Unternehmen Bosch Software Innovations, das eine nutzergetriebene Plattform aufgebaut hatte, mit deren Hilfe die Nutzer die benötigten Programme entwickeln konnten, ohne selber Programmierer zu sein. Durch die Zusammenführung der Daten von SAP und 80 Produktionsmaschinen können die Mitarbeiter – ob Maschinenführer oder Wartungstechniker – Wartungsarbeiten planen, Werkstoffe und Verbrauchsmaterialien bestellen oder Störungen beheben. Wie diese Aufgaben gehandhabt werden, ist durch Regeln festgelegt, die

vom Team selbst programmiert werden können. Das ermöglicht eine tägliche Optimierung der Arbeitsumgebung nach den Vorstellungen der Anwender. Die vernetzte Produktionsmaschinerie besteht zudem aus älteren Geräten und anwendungsspezifischen Neumaschinen, was zeigt, dass ein schleichender Übergang zur Smart Factory genauso umsetzbar ist wie ein kompletter Neubeginn.

Das letzte interessante Feld wird in den kommenden Jahren die künstliche Intelligenz (AI) sein. Manche mögen es für einen Hype halten, aber in der Realität eignet sich diese Technologie sehr gut für die Herausforderungen in Fertigungsumgebungen. Die große Stärke von AI liegt im Identifizieren von Mustern. Mithilfe verschiedener Sensoren an Maschinen und Robotern erkennen AI-gestützte Systeme bei entsprechendem Training, wie eine einwandfreie neu installierte oder gewartete Maschine arbeitet. Mit fortschreitendem Verschleiß können selbst geringfügige Veränderungen in Temperatur, Vibration, Energieverbrauch oder Geräuschentwicklung als Hinweis auf Defekte an Getrieben, Schmierung, Motor oder Dichtungen gewertet werden. Ein AI-System dürfte solche verborgenen Störungen sogar eher erkennen als ein Mensch beim Abarbeiten von Prüftabellen und Daten, da es inmitten großer Datenmengen, die schwer miteinander in Bezug zu setzen sind (z. B. Vibrationen und Temperatur) winzige Unterschiede im Verhaltensmuster erkennt. Ein entscheidendes Problem ist das Thema Echtzeitanalyse, da die zunehmende Zahl an Sensoren immer mehr Daten produziert und eine Echtzeitmeldung von Störungsmustern nicht auf die Reaktion des Cloud-Dienstes warten kann. Aus diesem Grund dürfte der Name „Fog Computing“ in Zukunft häufiger fallen. Es geht darum, dass Cloud-Dienste mit ihrer enormen Rechenleistung um lokale Server und eingebettete Computer ergänzt werden, sodass lokale AI-fähige Systeme beispielsweise schneller reagieren können, während sich das mit unbegrenzter Speicherkapazität gesegnete Cloud-Computing auf die langfristigen Trends der gesammelten Daten und das Speichern historischer Daten reduziert.

Nachdem jahrelang Unsicherheit herrschte, was Industrie 4.0 und das Internet der Dinge wirklich bedeuten, hat eine Handvoll Unternehmen den Mut bewiesen, auf die eng digitalisierte,



Die Smart Factory von Trumpf in Chicago zeigt, was mit Industrie 4.0 möglich ist (Quelle: Trumpf © 2018).



automatisierte Fertigung umzusteigen. IT-Sicherheitsexperten und Anbieter von Produktionsmaschinen und Cloud-Diensten bemühen sich, in funktionsübergreifenden Teams zu demonstrieren, dass dieses Verfahren nicht nur gut funktioniert, sondern auch Mehrwert schafft. Viele Akteure in der Industrie glauben, dass sich die MRO-Strategien dadurch verändern, sodass vereinzelte Tätigkeiten und Funktionen wegfallen und durch neue ersetzt werden. Wer die Einführung erfolgreich gestalten und die erwarteten Ergebnisse erzielen will, braucht fachübergreifende Kompetenzen. Aller Wahrscheinlichkeit nach wird sich in diesem Zug auch AI durchsetzen, weshalb die Strategien und Architekturen der Industrie 4.0 zu überdenken sind. Aber mit etwas Mut und jahrelanger Erfahrung im eigenen Fachbereich dürften die Anwender bei solchen Veränderungen an Arbeitsweise und Interaktion mit ihren Maschinen das Auslagern verhindern, die Qualität der Produkte erhalten und den eigenen Ruf bewahren können.



Wie gestaltet sich die Zukunft der Robotik?

Laut dem 2017er Bericht der International Robotic Foundation dürfte der globale Robotikmarkt von 2017 bis 2022 jährlich um 15 Prozent wachsen.

Während der Fertigungssektor für die Roboterhersteller derzeit den größten Abnehmer darstellt, wird zukünftiges Wachstum durch Serviceroboter entstehen, und zwar zum Teil wegen neu gegründeten Unternehmen, die aktuell rund 29 Prozent aller Robotikunternehmen ausmachen.

ISO 8373 definiert einen Serviceroboter als Roboter, der für Menschen oder Maschinen hilfreiche Aufgaben übernimmt und keine industrielle Automationsanwendung darstellt. Laut ISO 8373 muss ein Serviceroboter einen Autonomiegrad bzw. die Fähigkeit besitzen, die vorgesehenen Aufgaben nach dem aktuellen Stand mittels Sensorik ohne menschlichen Eingriff auszuführen. Die Zunahme an Servicerobotern ist auf die Entstehung des kollaborativen Roboters „Koboter“ genannt, zurückzuführen, dessen Entwicklung wiederum durch Innovationen in Sensorik und AI ermöglicht wurde. Im Bereich Deep Learning sind in jüngerer Zeit große Fortschritte gemacht worden. Bei diesem AI-Zweig werden künstliche neuronale Netze aufgebaut, die das Sortieren und Verarbeiten von Informationen in organischen (lebenden) Gehirnen nachahmen. Deep Learning gilt als Innovationstreiber an der Spitze der AI-Technologie und ist bereits in zahlreichen Anwendungen wie Sprach- und Bilderkennung vertreten.

Das Gesundheitswesen und die Prozessfertigung sind wachstumsstarke Sektoren der Robotik. Die Aufwendungen für Roboter in der Medizintechnik dürften sich bis 2019 verdoppeln. Besonders in der medizinischen Diagnostik macht AI rasche Fortschritte:

- **Chatbots:** AI-Chatbots mit Spracherkennung werden von Unternehmen eingesetzt, um Muster bei Patientensymptomen zu erkennen und potenzielle Diagnosen auszusprechen.
- **Onkologie:** Forscher trainieren Algorithmen per Deep Learning in der Erkennung von Tumorgewebe. Die Zuverlässigkeit entspricht der eines ausgebildeten Arztes.
- **Pathologie:** Die Pathologie befasst sich mit der Diagnose von Krankheiten durch Laboranalysen von Körpergewebe und Körperflüssigkeiten wie Blut und Urin. Maschinelles Sehen und andere maschinelle Lernverfahren können all

jene Aufgaben optimieren, die sonst nur von Pathologen mit dem Mikroskop ausgeführt werden.

- **Seltene Erkrankungen:** Zur Diagnose seltener Erkrankungen kombinieren Klinikärzte eine Gesichtserkennungssoftware mit maschinellen Lernverfahren. Die Fotos von Patienten werden per Gesichtsanalyse und Deep Learning ausgewertet, um Phänotypen zu erkennen, die mit seltenen genetischen Krankheiten korrelieren.

Serviceroboter haben auch in Landwirtschaft, Chirurgie, Logistik sowie bei Unterwassereinsätzen, Wartungsdiensten, Ordnungs- und Rettungsdiensten und in ähnlichen Bereichen ihre Spuren hinterlassen.

Dieses Kapitel befasst sich mit den künftigen Entwicklungen in der Robotertechnik und den neu erschlossenen Anwendungsbereichen. Auch wird auf die Auswirkungen dieser Innovationen auf unsere Wirtschaft, unsere gesellschaftlichen Werte und unseren Alltag eingegangen.



INNOVATIONEN IN DER TECHNIK

In der jüngeren Vergangenheit sind Rekordsummen in die weltweite Entwicklung von Robotern geflossen. Die Bank of America Merrill Lynch schätzt, dass sich der Betrag in den 12 Monaten bis April 2017 von 5 Milliarden auf 8 Milliarden Dollar erhöht hat. Abbildung 1 zeigt die Tendenz bei Patentanmeldungen nach Hauptabsatzmarkt

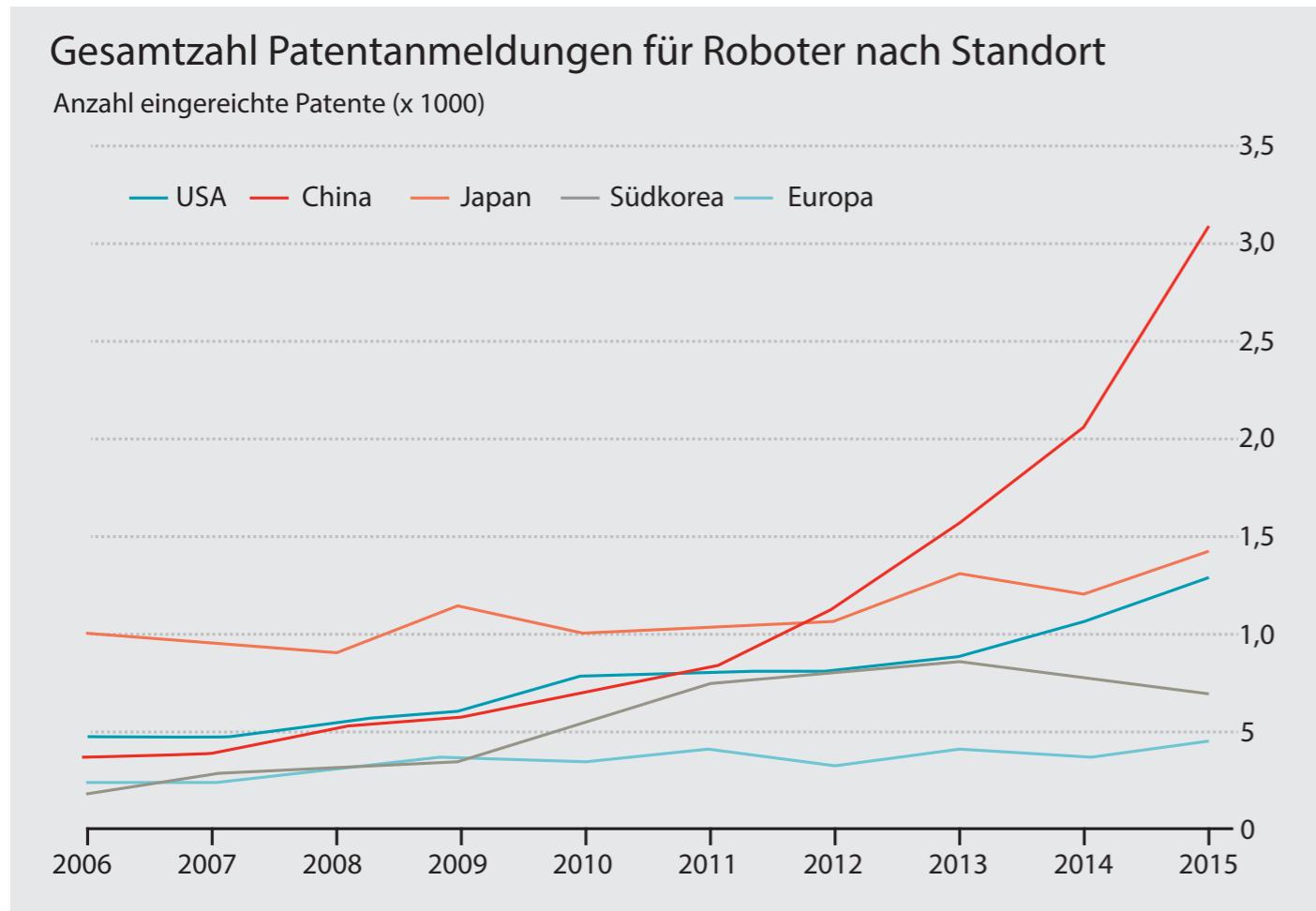


Abbildung 1: Die Zahl der Patentanmeldungen für Roboteranwendungen steigt, in letzter Zeit vornehmlich in China (Quelle: FT).

stellvertretend für den Forschungs- und Entwicklungsaufwand in den Regionen. Europa hinkt derzeit zwar etwas hinterher, bemüht sich aber, den Anschluss zu halten. In das Joint Venture SPARC dürften bald 2,8 Milliarden Euro investiert werden, und viele Mitgliedstaaten haben bereits eigene nationale Programme angekündigt.

In Großbritannien beispielsweise hat die Regierung mehrere Initiativen avisiert, mit denen das landesweite Potenzial am globalen Robotikmarkt voll ausgeschöpft werden soll. Im November 2016 versprach Premierministerin Theresa May, das Budget für Forschung und Entwicklung in Robotik und AI um jährlich 2 Milliarden Pfund pro Jahr zu erhöhen, da die beiden Bereiche für die Industrie-4.0-Strategie der Regierung als essenziell betrachtet werden. Im Zuge dieser Gesamtinitiative werden 45 Millionen Pfund für die Einrichtung vier neuer Forschungszentren an den Universitäten Manchester, Birmingham und Surrey sowie an der Heriot-Watt-Universität in Edinburgh aufgewendet. Diese Institute sollen die Entwicklung der Robotertechnik übernehmen, um in gefährlichen, rauen Umgebungen, wie sie in Raumfahrt, Untertagebau, Atomenergie und Offshore-Windkraftwerken anzutreffen sind, für besseren Arbeitsschutz zu sorgen. Weitere 52 Millionen Pfund stammen von internationalen und Handelspartnern; etwa beteiligt sich die UK Space Agency an der Finanzierung des Zentrums an der Universität Surrey.



In Deutschland gehört die Industrie 4.0 zu den zehn Zukunftsprojekten, die in der neuen High-Tech-Strategie der Regierung beschrieben sind und bereits mit rund 200 Millionen Euro gefördert wurden. Die Finanzierung unterstützt eine breite Basis akademischer Forscher, deren Projekte die meisten Innovationsbereiche der Robotik abdecken. Mehr als ein Dutzend wissenschaftliche Einrichtungen sind mittlerweile an verschiedenen Forschungsarbeiten für die Robotik beteiligt, darunter auch das Institut für Robotik und Mechatronik, einem Zweig des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Das Institut entwickelt verschiedene Robotertypen für den Einsatz in Bereichen, die für den Menschen nicht erreichbar oder gefährlich sind, sowie zur Unterstützung des Menschen im täglichen Privat- und Alltagsleben. Eine weitere deutsche Forschungseinrichtung, die in der Robotik als führend gilt, ist das Robotics Innovation Center (RIC) des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI), das sich schwerpunktmäßig mit Technik für anspruchsvolle und gefährliche Umgebungen wie Raumfahrt- und Unterwassereinsätze, aber auch mit Sicherheit, Mobilität und kognitiver Robotik befasst.

PROJEKTE, EINSATZBEREICHE UND BASISTECHNOLOGIEN

Immer mehr neu gegründete und etablierte Unternehmen arbeiten an Servicerobotern, die in zahlreichen Branchen zur Anwendung kommen. Die Medineering GmbH, ein Startup mit Sitz in München, hat ein kollaboratives Roboterkonzept entwickelt, das speziell auf die Anforderungen der Chirurgie abzielt. Heutzutage benötigen Chirurgen oft die Hilfe eines ausgebildeten Assistenten, der bei chirurgischen Eingriffen die Instrumente positioniert und hält. Die Lösung von Medineering besteht aus einem leicht zu führenden Positionierarm mit einer mechatronischen Schnittstelle, die verschiedene Operationsroboter aufnehmen kann. Der erste von Medineering angebotene Roboter ist ein Endoskopführungsroboter, der bei endo- und transnasalen Eingriffen das Endoskop hält.

Mit seinen sieben Gelenken lässt sich der Positionierarm mithilfe der Bedientasten genau nach Bedarf positionieren. Die angefahrenen Position kann dann gespeichert werden. Am Ende des Arms sitzt der Endoskopführungsroboter, der vom

Chirurgen während des Eingriffs über ein Fußpedal bedient wird. Der Roboter kann feine, sachte Bewegungen ausführen, sodass das Instrument erschütterungsfrei positioniert wird und kein empfindliches Gewebe berührt.

Da Chirurg oder Assistent das Endoskop also nicht mehr halten müssen, lassen sich die medizinischen Ressourcen effizienter nutzen. Der Eingriff wird verkürzt, medizinisches Hilfspersonal hat Zeit für andere Aufgaben, und es werden Kosten gespart. Der Positionierarm von Medineering ist eine offene Lösung, die von geprüften Partnern für den Anbau weiterer Operationsroboter weiterentwickelt und so für den Einsatz in anderen Bereichen der Chirurgie nutzbar gemacht werden kann.

Stichwort Gefahrenbereiche: Der Roboterprototyp von Forth Engineering Ltd. wurde für die Aufbereitung radioaktiver Abfälle am Nuklearstandort Sellafield in der englischen Grafschaft Cumbria entwickelt. Forth arbeitet an einer Roboterspinne und will die Erkenntnisse der weltweit führenden Forschungsarbeit zur Entsorgung nuklearer Abfälle an der Universität Manchester in die Entwicklung einfließen lassen. Bei der „Spinne“ handelt es sich um einen sechsbeinigen Roboter in der Größe eines

Mit dem Positionierarm und dem Endoskoproboter der Medineering GmbH kann der Chirurg ohne Assistenz arbeiten, sodass medizinisches Personal mehr Zeit für andere Aufgaben hat
(Source: Medineering GmbH © 2018).



Couchtisches, der mit zahlreichen Kameras und Sensoren zur Wahrnehmung seiner Umgebung ausgestattet ist. Die Zange am vorderen Ende der Spinne ergreift und zerkleinert kontaminiertes Material. Mit den Magneten an ihren Füßen kann der Roboter außerdem Wände empor laufen. Eine AI-Software macht es möglich, dass mehrere Roboter autonom im Verbund arbeiten und durch gegenseitige Kommunikation eigenständig Entscheidungen beim Ausführen von Aufgaben treffen können.

Die Industrie 4.0 gilt als nächste Phase der industriellen Revolution und wird durch die so genannte Smart Factory repräsentiert, in der cyber-physische Systeme die Fabrikprozesse überwachen und dezentralisierte Entscheidungen treffen.

Durch die roboterübergreifende und Mensch-Maschine-Kollaboration können Menschen und Roboter ihre jeweiligen Stärken ausspielen: Während der Mensch mit Wissen und Improvisation glänzt, überzeugt der Roboter mit hoher Arbeitsgeschwindigkeit und exakter Reproduktion.

Der Roboterprototyp ARMAR-6 des Einzelhändlers Ocado ist ein gutes Beispiel für einen kollaborativen Roboter, der auch als Koboter bezeichnet wird. ARMAR-6 wurde mit der Hilfe von vier europäischen Universitäten entwickelt. Er hat einen menschlich anmutenden Torso, Arme mit acht Freiheitsgraden, greiffähige Hände und einen Kopf mit integrierten Kameras. ARMAR-6 soll Technikern in der Fabrik bei der Behebung mechanischer Defekte helfen. Mit seinen drei Kameras erkennt er nicht nur Menschen, sondern auch Objekte. Dank Spracherkennung versteht er Befehle, und mit seinen Händen kann er Objekte aufnehmen und ergreifen. Am Ende soll der Roboter in der Lage sein zu entscheiden, welche Absichten der Techniker verfolgt, und sich zum richtigen Zeitpunkt unterstützend einzubringen.

ETHISCHE UND MORALISCHE FRAGEN

Die Fortschritte in AI und Robotik haben zwei alte Befürchtungen wieder aufleben lassen: dass Maschinen eine Massenarbeitslosigkeit auslösen könnten und dass sich Roboter ähnlich wie im Film „Terminator“ selbstständig machen und sich von ihrem Einsatzzweck entfernen.

Zu diesem viel debattierten Thema haben unter anderem auch der kürzlich verstorbene Stephen Hawking und der Technologieunternehmer Elon Musk ihre Bedenken geäußert. Wer es optimistischer betrachten will: In der Geschichte der Menschheit hat die Technik insgesamt mehr Arbeitsplätze geschaffen, als sie vernichtet hat. Dies geht mit einer gewissen Spaltung der Gesellschaft einher, da sich beispielsweise während der industriellen Revolution ein Großteil der Arbeitsplätze in die Stadtgebiete verlagerte.

Die Wahrheit liegt wohl in der goldenen Mitte. AI wird keine Massenarbeitslosigkeit verursachen, sicherlich aber zu einer Veränderung der Arbeitsmärkte führen, sodass die Arbeiter schneller als bisher neue Fertigkeiten erlernen müssen. Diese Ansicht wird von einer kürzlich durchgeföhrten Studie der deutschen Volkswirtschaft untermauert, laut der Angestellte bei Arbeiten mit robotischer Unterstützung eher ihren Arbeitsplatz behalten und von der Erweiterung ihrer Fähigkeiten profitieren. Gleichzeitig verringert sich dadurch die Anzahl der Neueinstellungen, und die Tätigkeitsfelder verlagern sich von der Fertigung hin zu anderen Sektoren.

Laut einem aktuellen Bericht von Citi, der in Zusammenarbeit mit der Universität Oxford erstellt wurde, könnte eine verstärkte Automatisierung zu mehr Ungleichheit führen, da traditionelle Handwerksberufe stärker von AI betroffen sind als Büro-Jobs und ähnliche Anstellungen. Dabei wird die wichtige Rolle der Unternehmen und Regierungen deutlich, die den Arbeitern das Erlernen neuer Fähigkeiten und gegebenenfalls den Wechsel des

Arbeitsplatzes erleichtern müssen. Citi beschreibt die Investition in Bildung und Ausbildung als größten Einzelfaktor, der die negativen Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes von Automation und AI mildern könnte.

Wie alle Werkzeuge lässt sich auch AI für gute, aber auch für böse Zwecke nutzen. Während Deep Learning erfolgreich in der Verbrechensbekämpfung eingesetzt werden kann, bietet es autokratischen Regierungen andererseits die Möglichkeit, seine Bürger auszuspionieren. Weitere ethische Bedenken gibt es bei selbstfahrenden Fahrzeugen, insbesondere zum Verhalten in Notfällen: Soll das Fahrzeug Verletzungen der Insassen in Kauf nehmen, um einem plötzlich auftauchenden Kind auszuweichen?

Genau solche Fragen führten 2012 zum Start des zweijährigen 2,3-Millionen-Dollar-Projekts „RoboLaw“, das größtenteils von der Europäischen Union finanziert wurde. Experten aus Recht, Ingenieurwesen, Philosophie, Regulierung und Medizin entwarfen gemeinsam einen Leitfaden zur Regulierung der Robotik.

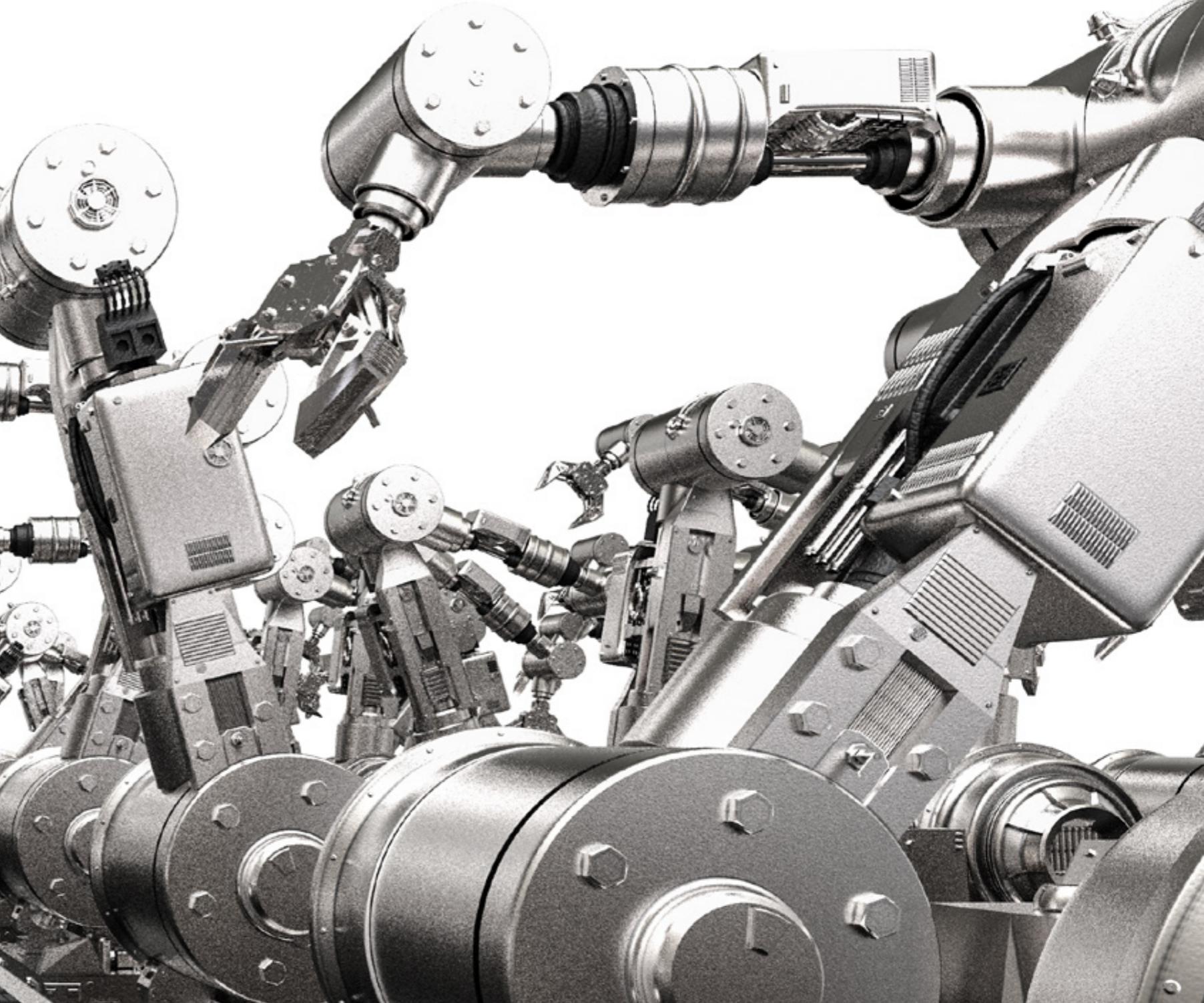


ARMAR-6 arbeitet in der Nähe von Menschen und unterstützt sie bei Wartungsarbeiten (© 2018 Alle Rechte vorbehalten, Ocado).

ZUSAMMENFASSUNG

Die raschen Fortschritte bei der künstlichen Intelligenz und der damit einhergehende Investitionsschub sorgen dafür, dass sich für Roboter immer mehr Anwendungsbereiche eröffnen. Serviceroboter dürfen in unserem Alltag zusehends eine Rolle spielen, was nicht zuletzt ihrer Flexibilität und erweiterten Entscheidungsfähigkeit zu verdanken ist.

Zwar sind sich Analytiker und Berichterstatter nicht immer einig, wie sich diese Entwicklungen auf unsere Gesellschaft auswirken werden. Dennoch herrscht der allgemeine Konsens, dass die Regierungen bewusst und aktiv eingreifen müssen, um die dadurch bedingte Spaltung der Arbeitsmärkte zu kontrollieren und zu regeln.



Danksagungen:

FÜR DIE MITHILFE AN „LEITFADEN ROBOTIK
UND AUTOMATISIERUNG“ DANKEN WIR
DIESEN MENSCHEN UND ORGANISATIONEN:

Matthias Heutger, Deutsche Post DHL Group

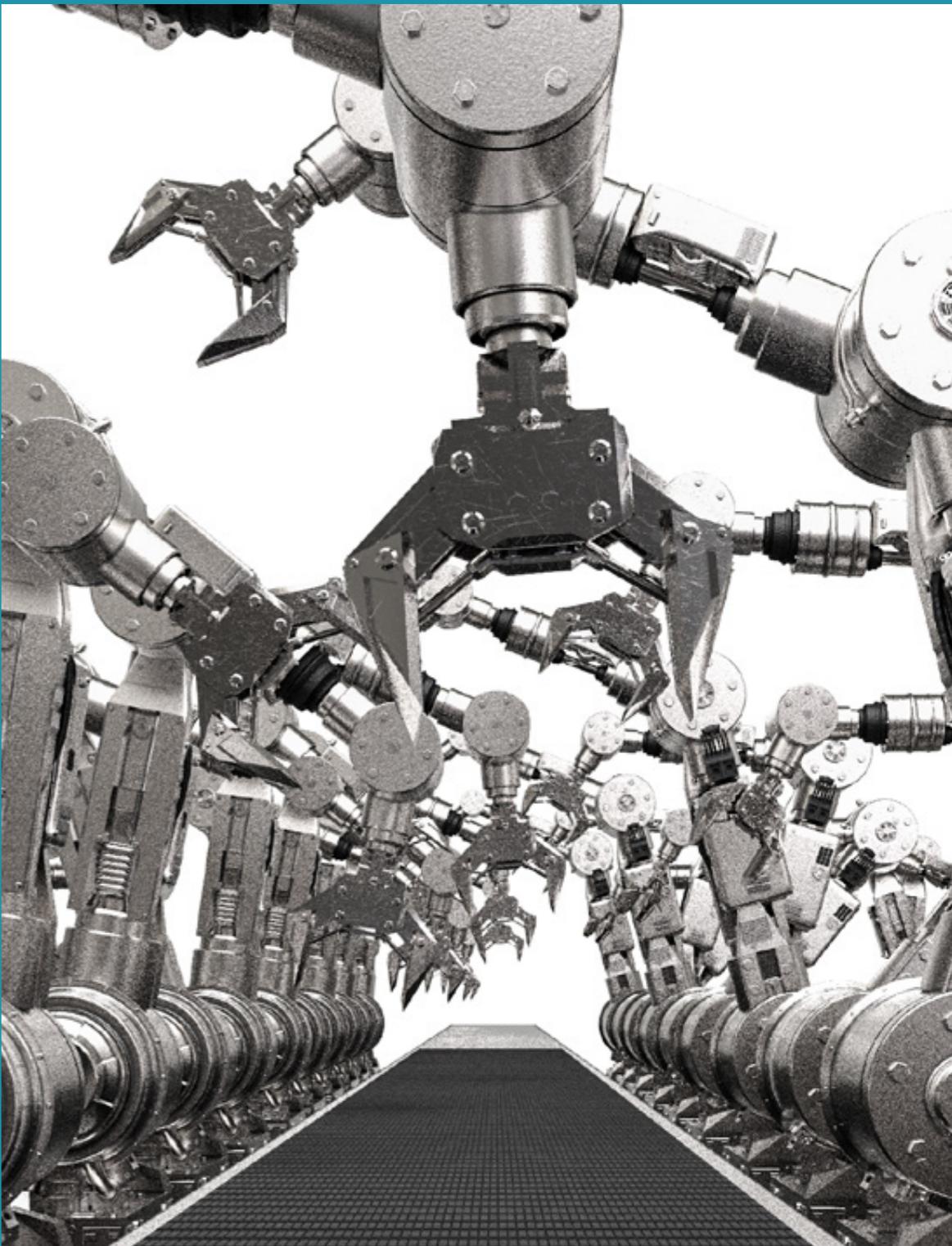
Team Media Relations, Trumpf GmbH

**Team Technology PR & Communications,
Ocado Technology**

Marketing-Team, Medineering GmbH

Publitek

Marketing-Team, Distrelec





www.distrelec.de