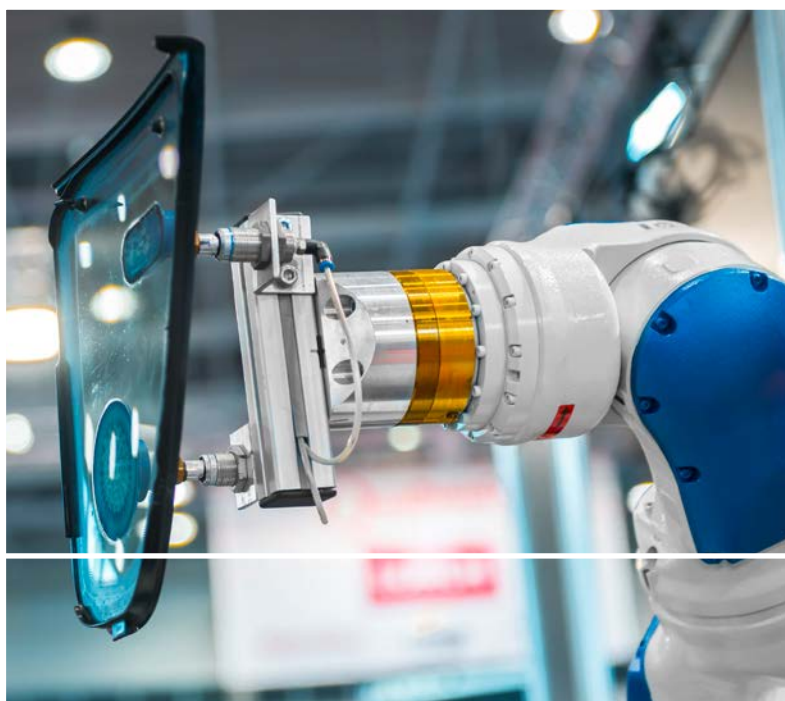


Stefan Hesse  
Viktorio Malisa

Taschenbuch  
**Robotik · Montage ·  
Automatisierung**



3., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

### **Disclaimer zur Barrierefreiheit**

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Hesse / Malisa  
**Taschenbuch Robotik – Montage – Automatisierung**



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

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

*[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)*

### **Über die Autoren:**

Dr.-Ing. habil., Dipl.-Ing. Stefan Hesse (†), Büro für Handhabetechnik, Mitglied im Verein zur Förderung der Automation und Robotik F-AR Wien, freier Mitarbeiter der Zeitschrift HANDLING

FH-Prof. Dipl.-Ing. Viktorio Malisa, Mitglied im Verein zur Förderung der Automation und Robotik F-AR, Wien, Mitglied der Mechatronik Plattform Österreichs, Mitglied der Austrian Standards, Komitee 028, Robotik

### **Autoren und Mitarbeiter der ersten Auflage:**

Dr.-Phys. Ana Almansa

Dipl.-Ing. (FH) Roland Ambrosch, MSc.

Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Birgit Graf

Dipl.-Ing. (FH) Christof Hieger

Titanilla Komenda, MSc.

Dipl.-Ing. Erwin Wagner

Stefan Hesse  
Viktorio Malisa

# **Taschenbuch Robotik – Montage – Automatisierung**

3., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Redaktionsschluss: Mai 2025



Print-ISBN: 978-3-446-48344-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-48445-0

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München  
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | [info@hanser.de](mailto:info@hanser.de)

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © Sved Oliver/AdobeStock

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: Elanders Waiblingen GmbH, Waiblingen

Printed in Germany

---

# Inhalt

---

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Maschinennaher Materialfluss im Industriebetrieb</b> .....	<b>1</b>
1.1 Geschichtlicher Rückblick .....	1
1.2 Zeitleiste Industrieroboter .....	6
1.3 Zeitleiste mobile Roboter .....	10
1.4 Zeitleiste menschenähnliche Roboter (Humanoide) .....	13
1.5 Zeitleiste der Automatisierung .....	17
1.6 Kontrollfragen .....	23
<b>2 Robotik – Technik für den Menschen</b> .....	<b>25</b>
2.1 Systematische Einordnung .....	26
2.2 Industrieroboter .....	29
2.2.1 Einführung und allgemeine Grundlagen .....	29
2.2.2 Begriffe und Definitionen .....	35
2.2.3 Leistungsmerkmale .....	41
2.2.4 Kinematische Grundbauarten und Arbeitsräume .....	47
2.2.5 Computergestützte Programmierung von Industrierobotern ....	60
2.2.6 Zentrale SPS-Steuerung der Peripherie und Roboter .....	63
2.3 Aktorik bei Industrierobotern .....	65
2.3.1 Pneumatische Aktoren .....	66
2.3.2 Hydraulische Aktoren .....	70
2.3.3 Elektrische Aktoren .....	71
2.3.4 Getriebe .....	87

2.4	Sensorik .....	93
2.4.1	Bedeutung von Sensoren .....	93
2.4.2	Positionssensoren .....	94
2.4.3	Kraftmessung .....	103
2.4.4	Trägheitssensorik .....	107
2.5	Endeffektoren .....	111
2.5.1	Aufgabe und Definition .....	111
2.5.2	Greifprinzip .....	117
2.5.3	Kraftübertragung bei mechanischen Greifern .....	120
2.5.4	Synchronisation der Greiferfinger .....	122
2.5.5	Greifbackenführung .....	124
2.5.6	Greifertypen .....	125
2.5.7	Greifgerechte Werkstückgestaltung .....	127
2.5.8	Greifkraft .....	128
2.5.9	Vakuumgreifer .....	132
2.5.10	Flexible Greiftechnik .....	141
2.5.11	Wechseleinrichtungen .....	145
2.5.12	Roboterwerkzeuge .....	147
2.6	Sicherheitstechnische Anforderungen .....	150
2.6.1	Allgemeine Grundlagen .....	150
2.6.2	Sicherheitsforderungen .....	151
2.6.3	Mensch-Roboter-Kollaboration .....	155
2.6.4	Normative Regelungen .....	159
2.6.5	EN ISO 13849-1 Sicherheit von Maschinen .....	161
2.6.6	Sicherheitsausführungen .....	165
2.7	Steuerung von Industrierobotern .....	165
2.7.1	Bewegungssystem und Architektur .....	166
2.7.2	Bewegungsarten .....	171
2.7.3	Koordinatensysteme und Bezugspunkte .....	173
2.7.4	Analyse und Steuerung von Roboterbewegungen .....	177
2.7.5	Interpolation .....	196
2.7.6	Sensorführung .....	201
2.7.7	Betriebsarten .....	203
2.7.8	Einfluss von Temperaturschwankungen .....	204



2.8	Regelung von Roboterachsen .....	206
2.8.1	Positionsregelung .....	207
2.8.2	Digitale Regler .....	209
2.8.3	Lastadaptive Regelung .....	210
2.8.4	Regelung bei mobilen Robotern .....	211
2.8.5	Spezielle Regelungsansätze in der Robotik .....	212
2.8.6	Künstliche Intelligenz und Robotik .....	225
2.9	Programmierung von Industrierobotern .....	228
2.9.1	Programmiermethoden .....	229
2.9.2	Programmiersprachen .....	230
2.9.3	Fehlerbehebung .....	239
2.9.4	Programmierbeispiele .....	243
2.9.5	Projektabwicklung Robotersysteme .....	248
2.10	Simulationstechnik .....	249
2.10.1	Einbettung in die Digitale Fabrik .....	249
2.10.2	Simulationstechnik und -werkzeuge .....	251
2.10.3	Ablauf von Simulationsstudien .....	255
2.10.4	Methoden der Variantenbewertung .....	256
2.10.5	Entwerfen von Roboterzellen .....	257
2.10.6	Modellierung von Zellenkomponenten .....	259
2.10.7	Simulationsbeispiele und ihre Bewertung .....	261
2.10.8	Virtuelle Inbetriebnahme – Planung und Umsetzung .....	268
2.10.9	Digitale Repräsentationen von physischen Objekten .....	271
2.10.10	Ergänzende Produktionsdaten für den Digitalen Zwilling .....	272
2.10.11	Digitaler Zwilling testet Software-Updates .....	273
2.11	Anwendungsbeispiele .....	274
2.11.1	Roboter als Bearbeitungsmaschine .....	274
2.11.2	Industrieroboterperipherie .....	276
2.11.3	Ausgewählte Roboteranlagen .....	282
2.12	Kontrollfragen .....	288
<b>3</b>	<b>Mensch-Maschine-Interaktion .....</b>	<b>291</b>
3.1	Manuell geführte Manipulatoren .....	291
3.1.1	Aufgaben und Lastenhandhabungsverordnung .....	292
3.1.2	Funktionen und Baugruppen .....	292

3.1.3	Antriebe .....	300
3.1.4	Gelenkbremmung .....	303
3.1.5	Standicherheit von Säulengeräten .....	304
3.1.6	Greifer und Lastaufnahmemittel .....	305
3.2	Teleoperatoren .....	307
3.2.1	Definition und Arten .....	307
3.2.2	Möglichkeiten und Probleme der Fernhandhabung .....	309
3.2.3	Master-Slave-Manipulatoren .....	312
3.3	Assistenzroboter .....	315
3.3.1	Definition und Prinzip des Assistenzroboters .....	315
3.3.2	Anlagenkonzepte .....	316
3.3.3	Führung des Roboterarmes .....	317
3.4	Serviceroboter .....	322
3.4.1	Grundlagen .....	323
3.4.2	Aktuelle Einsatzfelder .....	324
3.4.3	Schlüsseltechnologien .....	332
3.4.4	Serviceroboter für Ware Zustellung .....	344
3.5	Fahrerlose Flurförderzeuge .....	348
3.5.1	Fahrerlose Transportsysteme .....	348
3.5.2	Spurführungssysteme .....	349
3.5.3	Sicherheit .....	353
3.6	Autonome mobile Roboter .....	355
3.6.1	Einteilung .....	356
3.6.2	Prinzipieller Aufbau .....	359
3.6.3	Kinematik .....	373
3.6.4	Odometrie .....	374
3.6.5	Lokalisation .....	374
3.6.6	Navigation .....	377
3.6.7	Mensch-AMR-Kollaboration .....	379
3.6.8	Entwicklungsbeispiel .....	380
3.7	Humanoide Roboter .....	383
3.7.1	Definition und Grundkonzepte .....	383
3.7.2	Null-Moment-Punkt .....	386
3.7.3	Gestik und Mimik .....	391

3.7.4	ICub .....	392
3.7.5	Prototypen humanoider Roboter .....	393
3.7.6	Der humanoide Roboter zum Selberbauen .....	395
3.7.7	Ausblick .....	396
3.8	Mikrorobotik .....	398
3.8.1	Einführung .....	398
3.8.2	Grundaufbau .....	398
3.9	Kontrollfragen .....	412
<b>4</b>	<b>Montage .....</b>	<b>415</b>
4.1	Montagevorgang und Bewegungsanforderungen .....	416
4.2	Methoden zur montagegerechten Konstruktion .....	420
4.3	Montagegerechtes Konstruieren .....	422
4.3.1	Produktbauweisen .....	423
4.3.2	Ausgewählte Gestaltungsregeln .....	426
4.4	Automatische Montagemaschinen .....	430
4.4.1	Montagelinie .....	432
4.4.2	Rundtaktautomaten .....	439
4.4.3	Montagezellen .....	443
4.4.4	Hybride Montagesysteme .....	446
4.4.5	Flexible Montageautomatisierung .....	447
4.5	Werkstückträger .....	449
4.6	Transfersysteme .....	452
4.7	Kontinuierliche Montage .....	462
4.8	Mikromontage .....	464
4.8.1	Montage von Mikrosystemen .....	464
4.8.2	Modellgesetze und Adhäsionseffekte .....	466
4.8.3	Werkzeuge zur Mikrohandhabung .....	468
4.8.4	Mikrohandhabungsprozesse und -strategien .....	472
4.9	Demontage .....	478
4.9.1	Demontagegerechte Gestaltung .....	479
4.9.2	Automatisierung der Demontage .....	483
4.10	Kontrollfragen .....	486

<b>5</b>	<b>Automatisierung</b>	<b>489</b>
5.1	Automatisierung mit humanoiden Robotern	490
5.1.1	Ausführungen von humanoiden und teilhumanoiden Robotern	491
5.1.2	Humanoide Roboter an den Arbeitsplätzen von Menschen	494
5.2	Humanoide Roboter als Prototyp	495
5.2.1	Hand des humanoiden Roboters	496
5.2.2	Rahmenkonstruktion für Humanoide	497
5.2.3	Sicherheitskonzept: Inbetriebnahme eines humanoiden Roboters	498
5.3	Modulare Robotik	500
5.3.1	Modulare Industrieroboter	501
5.3.2	Modulare externe Achse für Industrieroboter	502
5.3.3	Modulare mobile Plattformen	503
5.3.4	CE-Kennzeichnung in der modularen Robotik	505
5.4	Fernzugriff auf Roboter und Automatisierungssysteme	505
5.4.1	Fernzugriff und Bedrohungen	509
5.4.2	Risikoanalyse	511
5.4.3	Aufbau von Fernleitung und Fernzugang	512
5.4.4	Betriebsart Fernwartung	514
5.4.5	Fernwartung an einer Roboterzelle	515
5.4.6	Zusammenfassung: Fernzugriff auf Maschinen	516
5.5	Projektabwicklung in der Automatisierung	518
5.5.1	Teilautomatisierung einer bestehende Produktionslinie	518
5.5.2	Automatisierung auf der „grünen Wiese“	522
5.5.3	Roboter in der Lebensmittelindustrie	524
5.5.4	Machine-as-a-Service (MaaS)	525
5.6	Automatisierung und Künstliche Intelligenz (KI)	526
5.6.1	Risiken der KI in der Automatisierung	527
5.6.2	KI-Projekt planen	528
5.7	Normative und gesetzliche Regelungen in der Automatisierung	530
5.7.1	Industrieroboter und neue normative Regelungen	530
5.7.2	EU-Maschinenverordnung 1230/2023	534
5.7.3	Weitere normative und gesetzliche EU-Regelungen	541
5.8	Kontrollfragen	543
	<b>Index</b>	<b>547</b>

---

# Vorwort

---

Die industrielle Produktion erlebt derzeit einen tiefgreifenden und rasant fortschreitenden Wandel. Getrieben von bahnbrechenden Fortschritten in der Robotik, hochentwickelten Montagetechnologien, weitreichender Automatisierung sowie den dynamischen Entwicklungen der Digitalisierung – allen voran der künstlichen Intelligenz – verändert sich das industrielle Umfeld grundlegend. Was noch vor Kurzem als ferne Vision galt, ist heute Realität: Mensch-Roboter-Kollaborationen sind ein etablierter Bestandteil moderner Fertigungslinien, autonome mobile Systeme übernehmen selbstständig Transportaufgaben und KI-gestützte Steuerungen optimieren Abläufe in Echtzeit. Selbst menschenähnliche Roboter, sogenannte Humanoide, absolvieren inzwischen erste Einsätze in realen Produktionsumgebungen.

Diese technologische Transformation eröffnet neue Horizonte: Effizienz, Präzision und Anpassungsfähigkeit erreichen ein bislang ungekanntes Niveau. Gleichzeitig wirft dieser Wandel zentrale Fragen auf: Wie gestalten wir diese neue industrielle Realität verantwortungsbewusst? Welche Kompetenzen sind gefragt? Und welche Potenziale entstehen durch die intelligente Verzahnung klassischer Automatisierungstechnik mit digitalen Innovationen – unter Berücksichtigung geltender Normen, Sicherheitsstandards und regulatorischer Vorgaben?

Dieses Buch versteht sich als fundierte Orientierungshilfe in einer sich rasant verändernden Produktionswelt. Es vermittelt solides Grundlagenwissen und gibt anhand praxisnaher Anwendungen, aktueller Technologien und zukunftsgerichteter Entwicklungen einen umfassenden Einblick in die Themenfelder Robotik, Montage und Automation. Die Zielgruppe umfasst Schüler und Studierende technischer Fachrichtungen sowie Ingenieurinnen und Ingenieure und Fachkräfte, die aktiv an der Gestaltung der Produktion von morgen mitwirken werden.

Unser besonderer Dank gilt all jenen, die mit ihrem Fachwissen, ihrer Erfahrung und ihrem Engagement zur Entstehung dieses Buches beigetragen haben. Wir hoffen, dass es für die Leserinnen und Leser eine wertvolle Ressource darstellt – als Wegweiser, Impulsgeber und Werkzeug für eine zukunftsfähige, intelligente und nachhaltige Produktionswelt.

Wien, im Mai 2025

Die Autoren

---

# 1

## Maschinennaher Materialfluss im Industriebetrieb

---

### 1.1 Geschichtlicher Rückblick

Eine moderne Industriegesellschaft kann auf umfassendes Automatisieren nicht verzichten. Automation lässt sich jedoch nicht befehlen und auch nicht verhindern. Es handelt sich um einen historischen Prozess, der qualitativ neue Fragen an die Natur- und Technikwissenschaften stellt. Er gipfelt momentan in der Entwicklung automatisierter Fertigungsprozesse. Daraus erwächst als ständige Aufgabe, laufend eine Verbesserung von Maschine, Verfahren, Methode und Organisation anzustreben und zu erreichen. Als Voraussetzung für die **Automatisierung** muss ein hoher Stand in der Mechanisierung und Steuerungstechnik erreicht sein, also der Ersatz manueller Antriebsleistungen durch Motoren und Mechanismen sowie die Übergabe von Gedächtnis-, Koordinierungs- und Rechenarbeit an Daten verarbeitende Einrichtungen.

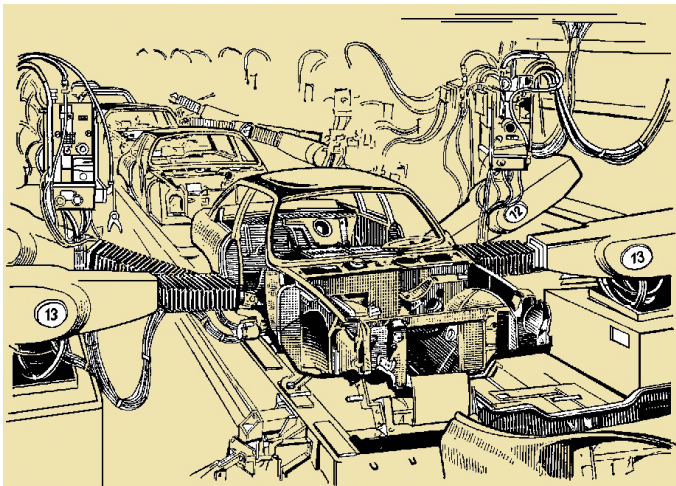
Der Begriff „Automation“ wurde vom Spanier Torres y Quevedo (1852–1936) eingeführt. Er entwickelte u. a. 1913 eine allgemeine Theorie der Ablaufsteuerung (*Essais sur l' Automatique*), die auch für industrielle Prozesse verwendbar war.

Mitte der 1950er-Jahre war man ziemlich begeistert vom automatischen Fabrikbetrieb. So wurden 1954 in den USA Motorkolben von der Firma *Pontiac* vollautomatisch gefertigt. Unflexible Automaten waren der maschinelle Kern und an Roboter war noch nicht zu denken. Ein leitender Angestellter äußerte 1955 auf einem Kongress [1.1] in der Beschreibung starrer automatischer Maschinerie „... wird das Wort ‚Roboter‘ tausende von Malen gebraucht und ich nehme an, dass sie es so oft gehört haben, dass es Ihnen ganz schlecht davon geworden ist. Trotzdem muss ich feststellen, dass ich selber niemals einen Roboter gesehen habe. Ich kenne niemand, der jemals einen gesehen hat und ich weiß weder von einem Ingenieur noch von einer Firma, welche die Absicht haben, einen zu konstruieren“. Doch es gab solche Konstrukteure in den USA und in Großbritannien.

Bei der Entwicklung von **Industrierobotern** wurden Erkenntnisse aus zwei unterschiedlichen Bereichen berücksichtigt. Das sind zum einen die Teleoperatoren und zum anderen die NC-Werkzeugmaschinen. Um radioaktives Material aus der Ferne handhaben zu können, wurden in den späten 1940er-Jahren die Master-Slave-Manipulatoren entwickelt. Mit der NC-Maschine wurde das Prinzip der **Freiprogrammierbarkeit** von Bewegungsabläufen geschaffen. So entstanden um 1958 bei AMF (USA) der erste Versatran-Roboter und 1959 der „Unimate“ bei der Firma *Unimation* (USA). Der Name „Unimate“ ist ein Kunstwort aus *universal* und *automation*. Man bezeichnete sie als **Universaltransportgerät** oder abgekürzt als UTD (*Universal Transfer Device*), um den mehr oder weniger negativ vorbelasteten Begriff „Roboter“ zu vermeiden. Die Bezeichnung „Industrieroboter“ wurde erst später eingeführt. Im Jahre 1961 installierte *General Motors* als erste Großfirma ein Unimate-Testmodell in seinem Presswerk Ternsted in New Jersey [1.2]. Zu weiteren Bestellungen kam es zwei Jahre später.

Eine frühe Roboterlösung wurde übrigens mit dem „Planetbot“ der Firma *Planet Corporation* (USA) schon 1955 vorgestellt. Das Gerät konnte 25 verschiedene Bewegungen ausführen, wobei Nockenscheiben und Endtaster im Spiel waren, was eine Programmierung langwierig gestaltete. Der Antrieb war hydraulisch, wie auch bei weiteren Robotern in der unmittelbar nachfolgenden Zeit.

Eine der ersten Arbeitslinien für das **Punktschweißen** mit dem Roboter wird in Bild 1.1 dargestellt. Es wurden 26 Roboter vom Typ „Unimate“ eingesetzt.

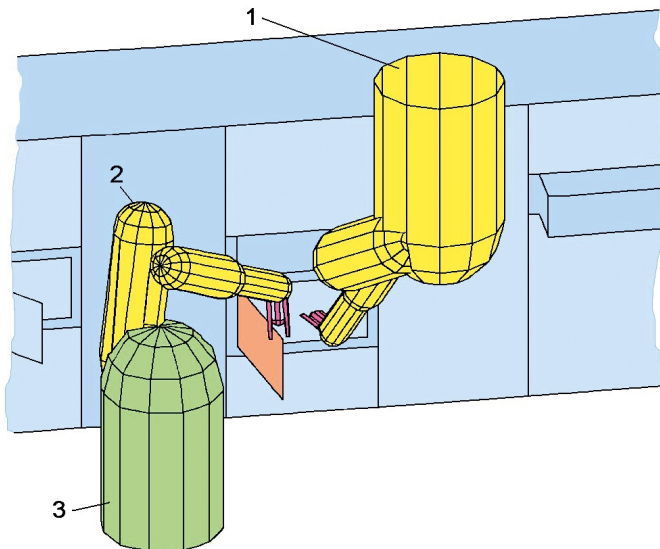


**Bild 1.1** Robotisierte Schweißlinie für das Automobil VEGA in einem Werk von *General Motors* (1970)



Eine Vervielfachung handhabungstechnischer Funktionen zeigt sich bei der Automatisierung der Montage. Nach dem Vorbild der Verpackungs- und Glühlampenmaschinen entstanden in den 1950er-Jahren **Montageautomaten** zunächst als reine Sondermaschinen. Die Handhabungsgeräte waren unflexibel, die erreichbaren Taktzeiten lagen minimal bei 5 Sekunden. Gegenwärtig erreichen Taktautomaten Leistungen, die bei bis zu 150 Takten je Minute liegen. Als unverwüsthliches Zuführgerät an Montageautomaten wurde der **Vibrationswendelförderer** als Peripherie entwickelt. Das Prinzip der Schwingförderer hat man aber schon viel früher in Einzelfällen genutzt. Für die Kleinteilehandhabung konnte man das Prinzip „Schwingtopf“ der Teileform anpassen und auch das Orientieren (Ordnen) mit integrieren. Die Modularisierung von Funktionskomponenten kommt in den 1970er-Jahren in Schwung.

In den 1980er-Jahren beginnt in Deutschland die Roboterforschung mit dem globalen Ziel „Humanisierung der Arbeitswelt“. Problemkreise sind die statische und dynamische Steifigkeit, Präzisionsgetriebe, Verkabelungsstrategien, Übertragungseinheiten für Energie und Signale, Greif- und Bahnplanungssysteme für die automatisierte Montage, kinematische Optimierungen, Kollisionsvermeidung, Roboterprogrammierung und Bediengeräte für eine Führung des Armes im Raum, anwendungsorientierte und CAD-gestützte Offline-Programmiersysteme und z. B. die Simulation von Abläufen mit einer Modellierung des Roboters in zunächst abstrahierten **Hüllformen** (Bild 1.2).



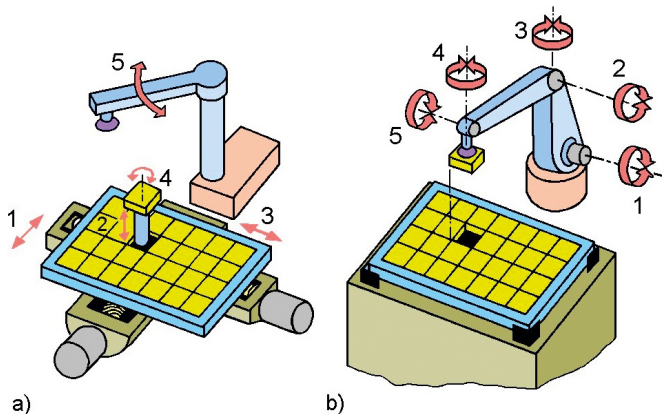
**Bild 1.2** Hüllkörpermodell einer Mehrroboterarbeitszelle

1 Roboter an Deckenlaufschiene, 2 Roboter auf Bodenfahrachse, 3 Person, die die Zelle betritt

Wesentliche Fortschritte sind mit Szenen abbildender Sensorik möglich geworden. Eine Szene repräsentiert einen Ausschnitt der 3D-Umgebung, der dann anhand von zweidimensionalen Abbildern untersucht werden kann. Die optischen Technologien hierzu unterliegen einer rasanten Weiterentwicklung und werden eine Brücke zwischen industrieller Bildverarbeitung und Künstlicher Intelligenz schlagen. Das maschinelle Sehen wird zum Bestandteil der Robotik werden [1.3]. Kennzeichnend ist die Identifikation von Objekten anhand ihrer Geometrie, Position, Orientierung, Ermittlung der Greifpunkte und präzises Positionieren. Das Visionssystem arbeitet mit dem Roboter in einer Regelschleife.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Gestaltung des Umfeldes eines Roboterarbeitsplatzes. Es ist ein bedeutsamer Kostenbestandteil. Es gilt:

- Je weniger ein Roboter kann, desto mehr muss die Peripherie leisten. Allgemein ist für ein gefordertes Automatisierungsniveau die Summe aus Roboter- und Peripheriefunktionen konstant. Was man an **Roboterachsen** spart, muss man meistens in der Peripherie zusetzen. Man sollte allgemein mit Bewegungsachsen sparen.
- Je weniger sich der Roboter an seine Umgebung selbsttätig anpassen kann, desto mehr Fremdanpassung muss von vornherein vorgenommen werden, z. B. Bereitstellung geordneter Teile statt Teile im **Haufwerk**. Das Bild 1.3 zeigt, dass sich Bewegungsachsen verlagern lassen [1.4].
- Je mehr Robotertechnik in komplexe Strukturen integriert ist, desto deutlicher verschmelzen Automatisierung, Robotik und Peripherie miteinander.



**Bild 1.3** Variabilität von Bewegungsachsen. a) Zuführen mit einfachem Einleger (Freiheitsgrad  $F = 1$ ), aktive Peripherie, b) Zuführen mit fünfachsigem Roboter, völlig passive Peripherie  $F = 5$

Im Laufe der Zeit wird sich beim Roboter immer mehr Künstliche Intelligenz ansammeln, was auch die periphere Technik vereinfacht. Vorläufig ist die Peripherie aber noch ein beachtlicher Kostenfaktor.



**Roboterperipherie** (*robot peripherals*): Alle Einrichtungen, die fehlende Funktionen des Roboters ergänzen oder kostengünstiger ausführen und mit denen ein Roboter unmittelbar (1. Peripherie) zusammenarbeitet, wie z.B. Bereitstellungsgeräte für Werkstücke und Werkzeuge.

Vor allem in der Montage werden die meisten Zubringereinrichtungen benötigt, die Kleinteile geordnet bereitstellen, wie z. B. Schrauben, Scheiben und Normteile. Teile mit hohen Ansprüchen an die Qualität der Oberflächen müssen stets magaziniert auf Einzelspeicherplätzen bereitgehalten werden. Somit sind viele Randbedingungen zu beachten [1.5].

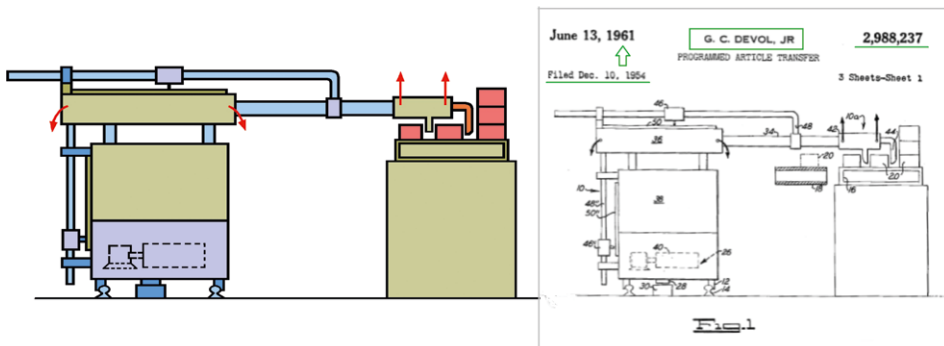
Die Robotik geht künftig in ein neues Fabrikkonzept ein. Dieser Wandel wird als **Industrie 4.0** bezeichnet. Er folgt den früheren Phasen der Industrialisierung: 1. Mechanisierung mit Dampfkraft, 2. Fließbandarbeit, 3. Automatisierung mit kaum flexiblen Eigenschaften, ausgenommen NC-gesteuerte Bearbeitungsmaschinen. Im Kern geht es um eine umfassende datentechnische Vernetzung. Werkstücke und Maschinen werden sich über Elektronik, Sensoren, Software und Internet miteinander verbinden und auch den Menschen angemessen in die Kommunikation einbeziehen. So kommt es dann zu einer bedarfsgerechten Produktion bis herunter zur Losgröße 1. Ein herzustellendes Werkstück findet von selbst seinen Weg durch die Produktionsanlage. Voraussetzung ist natürlich auch eine Hardware, die ausreichend **wandlungsfähig** ist. Dazu gehören Selbstkonfiguration, Selbstoptimierung und Selbstdiagnose. Solchen Anforderungen unterliegen auch die Industrieroboter, allgemein alle Roboter oder roboterähnliche Einrichtungen. An welchen Veränderungen muss gearbeitet werden?

- Ungefährliche, von außen nicht beeinflussbare Aktionen auch bei Anbindung an das Internet
- Flexible Greiforgane mit selbstanpassungsfähiger Schnittstelle Werkstück-Greifer
- Schnittstelle Mensch-Roboter für eine situationsgerechte Kommunikation
- Intelligente Steuerungen, die eine Selbstorganisation und -optimierung ermöglichen
- Austauschbare Roboterwerkzeuge mit IT-Fähigkeiten und Erkennung der Werkzeugzustände
- Qualitative Selbstkontrolle der Arbeitsergebnisse sowie Zugriff auf Wissensdatenbanken

- Direktes Zusammenwirken von Mensch und Roboter im Modus Hand-in-Hand-Arbeit
- Anlernfähigkeit und automatische Objekt- und Szenenerkennung
- Situative Verhaltenssteuerung
- Selbstwartung, Störungsmanagement bis hin zur Selbstreparatur (Austauschbaugruppen)
- Simulationsverfahren (Konstruktion, Planung, Zykluszeit, Programmierung)
- Entwicklung einer intuitiven, einheitlichen Steuerung von Robotern per Sprach- oder Texteingabe
- KI-Integration zur selbstständigen Bewältigung komplexer Aufgaben
- Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an neue Produktionsanforderungen

## 1.2 Zeitleiste Industrieroboter

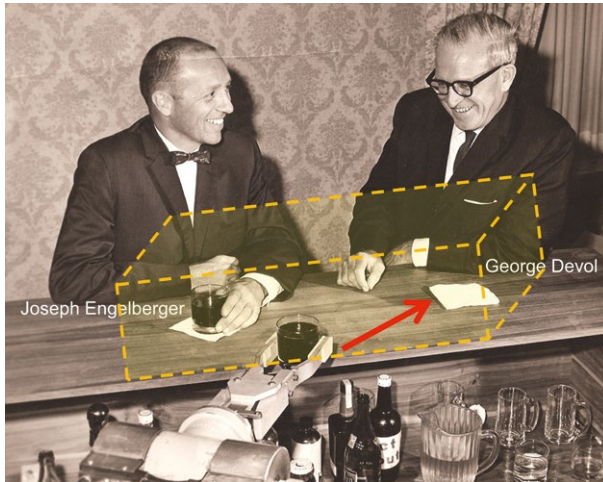
Georg C. Devol reichte 1954 das Patent für den Industrieroboter ein. 1961 wurde ihm das Patent mit der Nummer 2,988,237 erteilt (siehe Bild 1.4). Damit legte er den Grundstein für die Robotik.



**Bild 1.4** Roboteraufbau (links) nach George Devols Patentschrift (rechts, [1.6])

Bereits im Jahr 1956 gründeten die US-Amerikaner George Devol und Joseph Engelberger das Unternehmen *Unimation*. Dieses stellte 1960 den ersten hydraulisch angetriebenen Industrieroboter vor, der wenig später bei *General Motors* zum Einsatz kam.

Bild 1.5 zeigt die beiden Pioniere der Robotik: den Ingenieur und Unternehmer Joseph F. Engelberger (1925–2015) sowie den Ingenieur und Entwickler George C. Devol (1912–2011). Gemeinsam gelten sie als die Väter des ersten Industrieroboters. Engelberger erkannte das wirtschaftliche Potenzial von Devols Idee und half dabei, *Unimation* als erstes Unternehmen für Industrieroboter aufzubauen.



**Bild 1.5** Werbefoto für die Industrieroboter mit Engelberger (links) und Devol (rechts)  
(© Benson Ford Research Center/Kawasaki Heavy Industries Ltd, 1961)

Im Vordergrund in Bild 1.5 ist ein Manipulator zu sehen, der sich mit einem vollen Glas in Richtung der Serviette von George Devol bewegt. Vermutlich handelt es sich dabei um einen Prototyp des berühmten „Unimate“-Roboters, der die industrielle Fertigung später revolutionierte. Somit lässt sich das Bild auch als symbolischer Vorläufer kollaborativer und servicrobotischer Anwendungen interpretieren. Es wird ein möglicher Kollaborationsraum angedeutet, in dem sich Mensch und Roboter treffen können. Auch wenn der gezeigte Arm zu dieser Zeit noch ein Prototyp für industrielle Anwendungen war, deutet die Szene mit dem Tresen, den Gläsern und Servietten eine frühe Vision an: eine Maschine, die nicht nur in einer Fabrik, sondern auch im Alltag der Menschen eine Rolle spielen wird.

**Tabelle 1.1** Chronologie der Meilensteine in der Geschichte der Industrieroboter (Auswahl)

Jahr	Meilenstein
1938	Villard V. Pollard stellt einen Patentantrag für den „ <i>Position Controlling Apparatus</i> “, einen Roboterarm mit dreiachsiger Parallelkinematik, heute oft als Deltabauart bezeichnet.
1954	G. C. Devol (USA) entwirft eine Maschine zum „Programmierten Transport von Gegenständen“ (Industrieroboter), Patenterteilung 1961.
1955	J. Denavit und R. S. Hartenberg entwickeln ein mathematisches Verfahren zur Beschreibung der Kinematik auf Basis homogener Matrizen.
1956	Kommerzieller Roboter PLANETOBOT von „ <i>Planet Corp</i> “ mit Kurvensteuerung und Endtastern; Polarkoordinaten; 25 unabhängige Bewegungen
1957	Patenterteilung zur Robotertechnik an den Briten C. W. Kenward
1958	Roboter VERSATRAN mit zylindrischem Arbeitsraum von <i>American Machine and Foundry</i> (AMF); Tragfähigkeit 10 kg, Wiederholgenauigkeit 3,2 mm
1960	MOBOT, ein ferngesteuertes Gerät mit zwei dreigelenkigen Manipulatorarmen, auf ein Raupenfahrwerk aufgebaut; <i>Hughes-Aircraft</i>
1960	Erste sensorisierte Roboterhand MH-1 von H. A. Ernst (MIT, USA)
1961	Erster industriell eingesetzter Roboter UNIMATE bei <i>General Motors</i>
1963	RANCHO ARM wird im <i>Los Amigos Hospital</i> eingesetzt; Freiheitsgrad 6
1963	Handhabungsautomaten für die Bestückung von Leiterplatten eingesetzt
1966	Die norwegische Firma <i>TRALLFA</i> baut und installiert den ersten Farbspritzroboter.
1969	K. Scheinman (USA) entwickelt einen Sechssachsen-Gelenkarmroboter mit elektrischen Antrieben und Computersteuerung.
1970	Erstes Internationales Symposium (ISIR) über Industrieroboter ( <i>Chicago</i> )
1971	Erste Schweißtransferstraße mit Robotern in der Pkw-Produktion in Sindelfingen ( <i>KUKA</i> )
1973	Erster elektromechanisch angetriebener Roboter FAMULUS (sechssachsig) von der Firma <i>KUKA</i> (Deutschland) entwickelt
1973	Erste Computerprogrammiersprache für Roboter WAVE; 1974 folgt die Sprache AL und wird zur Sprache VAL weiterentwickelt.
1973	Roboter T <sup>3</sup> von <i>Cincinnati Milacron Corporation</i> eingesetzt; hydraulischer Antrieb, NC-Steuerung, Traglast 50 kg
1974	Für Montageindustrieroboter wird die Programmiersprache AL ( <i>Assembly Language</i> ) entwickelt.

Jahr	Meilenstein
1974	Die Firma ASEA (heute ABB) stellt den Roboter IRB-6 vor, einen vollelektrisch angetriebenen und vom Mikrocomputer gesteuerten Roboter (Tragkraft 6 kg).
1975	Montageroboter SIGMA von <i>Olivetti</i> (Italien) entwickelt; kartesischer Arbeitsraum
1976	Selbsttätige Positioniereinrichtung RCC für Montageaufgaben am <i>Stark Draper Laboratory</i> (USA) entwickelt
1978	Der Roboter PUMA (basiert auf einer Vicarm-Technik) wird mit Unterstützung von GM von der Firma UNIMATION entwickelt (1974 bis 1976).
1979	bis 1985, Entwicklung des Robotertyps SCARA in Japan, <i>Yamanashi Universität</i> ; Prof. H. Makino
1979	Erste kommerziell genutzte Robotersprache VAL für PUMA-Roboter entwickelt
1979	Parallelmanipulator in einer Robotermontagezelle von Mc Callion und Pham
1980	Erste vollrobotisierte Fabrik von FANUC (Japan)
1980	Experimentelle Montage in Mensch-Roboter-Kollaboration in Tokio vorgestellt ( <i>Hitachi</i> )
1981	Roboter mit elektrischen Direktantrieben an den Gelenken ( <i>Carnegie Mellon University</i> )
1982	UTAH-MIT-HAND; Greiferhand mit vier Fingern nach dem Vorbild der menschlichen Hand; opponierender Daumen
1982	GM (USA) und FANUC (Japan) vereinbaren den Bau von GMFanuc-Robotern.
1985	Etwa 50 % der Industrieroboter verfügen über elektromechanische Antriebe.
1992	Erste gelungene Hüftoperation mit dem Chirurgieroboter ROBODOC
1992	Prototyp eines Melkroboters durch die <i>Lely Group</i>
1993	Schnittstelle zwischen Roboterarm und Greifer in einer Norm festgelegt
1994	Synchronisierte Steuerung zweier Roboter von YASKAWA
1999	Erste Roboterferndiagnose von der Firma KUKA
2001	Der Roboter KATANA ist erstmals ohne trennende Schutzeinrichtungen (OTS) im Einsatz ( <i>NEURONICS</i> , Schweiz).
2006	Dualarmroboter von der Firma MOTOMAN mit 13 Bewegungsachsen
2006	10 % aller Industrieroboter sind mit Sensoren ausgestattet.
2007	Rund 1 Million Industrieroboter sind weltweit im Einsatz.
2007	Der Industrieroboter TITAN von KUKA bewegt Lasten bis zu 1300 kg.
2011	Doppelarmroboter von verschiedenen Firmen im Angebot

**Tabelle 1.1** Chronologie der Meilensteine in der Geschichte der Industrieroboter (Auswahl) (*Fortsetzung*)

Jahr	Meilenstein
2012	Erste Internationale Konferenz über parallele Seilroboter in Stuttgart
2013	Das österreichische Unternehmen <i>Blue Danube Robotics</i> hat mit „AIRSKIN“ eine taktile Sicherheitslösung für kollaborierende Roboteranwendungen präsentiert.
2015	Der erste zweiarmige Roboter von <i>ABB</i> namens YuMi IRB 14000 wurde präsentiert.
2016	Die technische Spezifikation ISO/TS 15066 definiert biomechanische Grenzwerte für die sichere Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK).
2016	Industrieroboter M-2000iA/2300 von <i>FANUC</i> mit Traglast bis zu 2300 kg
2025	Industrieroboter-Normen ISO 10218 Teil 1 und ISO 10218 Teil 2 wurden überarbeitet.

1.3 Zeitleiste mobile Roboter

Die Entwicklung mobiler Roboter begann mit den ersten **fahrerlosen Transportsystemen** (FTS, *Automated Guided Vehicles – AGVs*), die in den 1950er-Jahren eingeführt wurden. Diese Systeme dienten dem automatisierten Materialtransport in Fabriken und bewegten sich entlang fester Routen, die durch Magnetstreifen, Leitdrähte oder Schienen vorgegeben waren. Trotz ihrer begrenzten Flexibilität gelten sie als Vorläufer moderner mobiler Robotik, da sie erstmals demonstrierten, dass fahrerlose Fahrzeuge zuverlässig wiederkehrende Aufgaben übernehmen können.

Ein bedeutender Meilenstein in der Geschichte mobiler Roboter war das Projekt „Shakey“, das 1966 am *Stanford Research Institute* entwickelt wurde. Shakey war der erste mobile Roboter, der mithilfe von Sensoren, Kameras und einem Computer in der Lage war, seine Umgebung zu erfassen und sich selbstständig darin zu bewegen. Dieses Projekt markierte den Beginn einer klaren Unterscheidung zwischen stationären Industrierobotern und mobilen Robotern, die sich autonom fortbewegen können.

Während „Shakey“ ein Forschungsvorhaben mit wegweisendem Charakter war, entwickelten sich gleichzeitig die industriell eingesetzten FTS kontinuierlich weiter. In den 1980er-Jahren wurden sie zunehmend leistungsfähiger – insbesondere durch den Einsatz verbesserter Sensorik und Steuerungstechnologien. Ab den 1990er-Jahren ermöglichte der Fortschritt in der Informationstechnologie – etwa durch die Einführung von WLAN und Netzwerken – eine deutlich flexiblere Steuerung, Kommunikation und Integration in betriebliche Abläufe.



Der Begriff „mobiler Roboter“ etablierte sich ab den 1980er- und 1990er-Jahren zunehmend sowohl in der Fachliteratur als auch in der industriellen Praxis – zunächst im Zusammenhang mit AGVs und später verstärkt im Kontext moderner AMRs (*Autonomous Mobile Robots*). Die Entwicklung zeigt deutlich, wie eng Automatisierungstechnik und Informationstechnologie heute miteinander verknüpft sind.

Heute haben sich viele FTS zu **autonomen mobilen Robotern (AMRs)** weiterentwickelt. Diese Systeme benötigen keine feste Infrastruktur mehr und können sich mithilfe von Sensoren, Karten und intelligenten Algorithmen selbstständig in dynamischen Umgebungen orientieren und navigieren. Damit leisten sie einen wesentlichen Beitrag zur flexiblen und effizienten Automatisierung moderner Produktions- und Logistikprozesse.

Im Zuge der Weiterentwicklung der mobilen Robotik entstand ab den 1990er-Jahren ein eigenständiger Anwendungsbereich: die **Servicerobotik**. Während industrielle Roboter vorwiegend in automatisierten Fertigungsprozessen zum Einsatz kommen, übernehmen Serviceroboter zunehmend Aufgaben im alltäglichen Umfeld, beispielsweise im Haushalt, im Gesundheitswesen, in der Pflege oder im öffentlichen Raum.

Der Begriff „Serviceroboter“ wurde in Anlehnung an den englischen Begriff „service robot“ geprägt und fand ab den 1990er-Jahren zunehmend Eingang in die Fachliteratur und die Praxis. Die Norm ISO 8373:2012 liefert eine offizielle Definition: Demnach ist ein Serviceroboter ein Roboter, der teil- oder vollautonom Dienstleistungen erbringt, von denen Menschen oder technische Systeme profitieren. Ausgenommen sind klassische industrielle Anwendungen.

Frühere und prägende Beispiele für Serviceroboter sind Staubsaugroboter, Mähroboter oder autonome Zustellroboter. Diese Entwicklung verdeutlicht, dass die mobile Robotik längst über industrielle Einsatzbereiche hinausgewachsen ist. Serviceroboter gelten heute als zentraler Treiber für die zunehmende Integration intelligenter, autonomer Systeme in das tägliche Leben.

**Tabelle 1.2** Chronologie der Meilensteine in der Geschichte der mobilen Roboter (Auswahl)

Jahr	Meilenstein
1948	Mobile autonome Versuchsfahrzeuge ELSIE und ELMER ( <i>Machina Speculatrix</i> ) von Gray und Vivian Walter. G. Walter war ein amerikanisch-britischer Neurologe (1910–1978).
1953	Erstes induktiv geführtes fahrerloses Flurförderzeug (Leiterschleifen im Fußboden) von der nordamerikanischen Firma <i>Barret Vehicle Systems</i> entwickelt
1958	Ralf Mosher konstruiert im Auftrag von <i>General Electric</i> einen „schreitenden Lastwagen“ ( <i>Walking Truck</i> ), Steuerung wie bei einem Master-Slave-System durch Vormachen der Beinbewegungen.

**Tabelle 1.2** Chronologie der Meilensteine in der Geschichte der mobilen Roboter (Auswahl) (*Fortsetzung*)

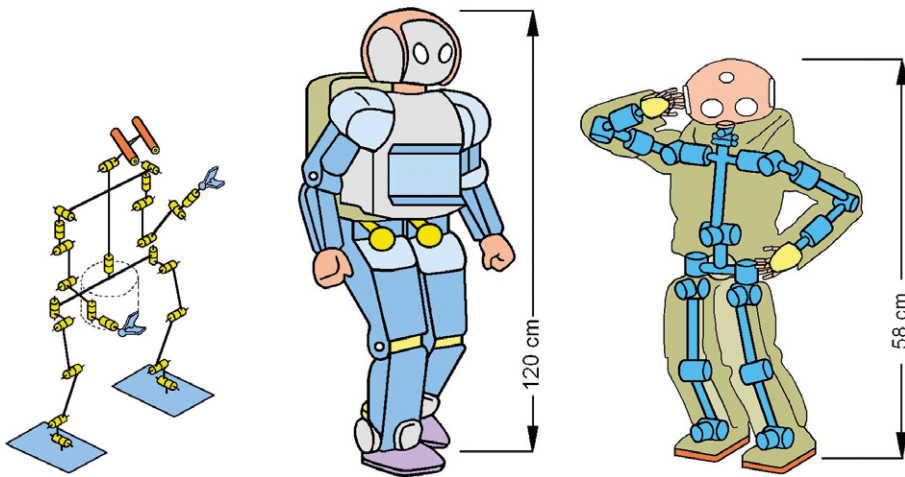
Jahr	Meilenstein
1960	MOBOT Mark II, ein verfahrbarer Roboter mit zwei tentakelähnlichen Armen; 1,8 m lang, aus 300 m fernsteuerbar, Doppelgelenke in Schulter, Ellenbogen und Handgelenk, 2 Kameras, Freiheitsgrad 10 je Arm, weich gepolsterte Hände; <i>Hughes Aircraft Company</i>
1961	BEETLE, freibewegliches Manipulatorfahrzeug auf Raupenfahrgestell mit zwei-armigen Kraftmanipulatoren (je 5 m Armlänge) für Reparaturarbeiten und Inspektionen in radioaktiven Zonen; 85 t schwer, Bleiplatten mit 30 cm Dicke, zwei Personen fahren mit, <i>Jered Industries Detroit</i>
1966	Mobilroboter Shakey für Laborumgebungen; <i>Stanford Research Institute</i> (1966 bis 1972), Leitung: C. Rosen; der Roboter konnte eigene Aktionen planen, Programmierung weitgehend in LISP
1970	STANFORD CART, ein vierrädriges, karrenförmiges Testsystem für Stereosicht von H. Moravec, computergesteuert
1974	Erstes computergesteuertes System mit fahrerlosen Transportfahrzeugen bei VOLVO (Schweden) im Einsatz
1976	bis 1983; MELDOG, ein wegprogrammierbares Radfahrzeug in Hundegröße, gedacht als Blindenführhund; <i>Mechanical Engineering Lab</i> (Japan)
1980	Sechsbeiniges Roboterinsekt ROBOT III; entwickelt an der <i>Western Reserve University, Cleveland (USA)</i>
1982	<i>Planar One-Leg Hopper</i> , ein einbeiniger Hüpfher mit aktiver Balance-Regelung und dynamischer Stabilität, <i>MIT USA</i>
1983	ODEX 1, ein insektoider sechsbeiniger Schreitroboter der Firma <i>Odetics Inc. Anaheim, California</i>
1984	Wachschutzroboter ROBERT II; autonomer Roboter auf Rädern vom <i>Naval Ocean Systems Center, San Diego</i>
1984	Mobiler Roboter FLAKEY für Bewegungen in unbekannter Umgebung, Fuzzy-Logik eingesetzt, von K. Kondige entwickelt ( <i>Stanford</i> )
1984	AUTONOMOUS LAND VEHICLES (ALV), ein von der <i>DARPA</i> initiiertes Roboterfahrzeug für Kriegseinsätze
1984	V. Braitenberg veröffentlicht das Buch „Vehikel – Experimente mit kybernetischen Wesen“, <i>MIT Press, Cambridge, Mass</i>
1985	Rodney Brooks präsentiert einen neuen Ansatz als Simulationsprojekt und leitet ein neues Paradigma für intelligente Roboter ein.

Jahr	Meilenstein
1985	bis 1995; Roboter KAMRO von der <i>TH Karlsruhe</i> (Prof. Rembold), ein Roboter für autonome flexible Montageaufgaben; zweiarmig, Mecanum-Räder
1987	Erste internationale Konferenz über intelligente autonome Systeme in Amsterdam
1988	GENGHIS, ein insektenähnlicher sechsbeiniger Schreitroboter von R. Brooks, <i>AI Lab. MIT, USA</i> ; dezentrale Steuerung, Subsumption-Architektur
1991	ROBUG, ein achtbeiniger Lauf- und Kletterroboter für Einsätze in einem Atomreaktor; ROBUG IV entwickelt von 1995 bis 1999
1994	DANTE II ist ein achtbeiniger Schreitroboter mit vier Beinen vorn und vier Beinen hinten; konstruiert für die Erkundung von Vulkanen, <i>Carnegie Mellon University</i> , stieg in den Krater von Mt. Spur
1995	Sechsrädriger autonomer Roboter KURT als Testplattform für die Untersuchung von Abwasserkanälen, <i>Fraunhofer Institut AIS</i>
1996	Roboterfahrzeug SOJOURNER der <i>NASA</i> entwickelt
2007	Bei der DARPA URBAN CHALLENGE, einem Wettbewerb für autonome Fahrzeuge schaffen 6 von 11 Teams den ganzen Geländekurs.
2013	<i>Amazon</i> testet die Lieferung von Paketen per Drohne
2016	Das Unternehmen <i>Starship Technologies</i> testet seine Zustellroboter für Pakete und Lebensmittel zunächst in London und Tallinn.
2019	Das Unternehmen <i>Agility Robotics</i> setzt den humanoiden Roboter „Digit“ erstmals für die Paketzustellung ein; er kann sich wie ein Mensch bewegen, Treppen steigen und Pakete direkt an die Haustür liefern.

## 1.4 Zeitleiste menschenähnliche Roboter (Humanoide)

Seit Jahrtausenden besteht der Wunsch, menschenähnliche Maschinen zu erschaffen. Bereits in der Antike wurden Anstrengungen unternommen, um den menschlichen Bewegungsapparat abzubilden. Er wird auch noch heute untersucht. So hat 1967 Prof. Kleinwächter (BRD) den menschenähnlichen SYNTELMANN vorgestellt, der als Industriearbeiter eingesetzt werden sollte. Das Bild 1.6 skizziert den kinematischen Aufbau. Jeder Arm enthält sieben (einschließlich Greifhand) und jedes Bein fünf Antriebsmotoren. In der Körpermitte sollte ein Kleincomputer dazu beitragen, den Schwerpunkt des Gerätes stets so auszulenken, dass sicheres Gehen möglich wird, was auf einfachem Weg nicht erreichbar ist. Realisiert und erfolgreich getestet wurde jedoch nur ein beidarmiger Torso mit Stereosicht und sensorisierten Händen.

Im Jahre 1997 beeindruckte der humanoide Roboter **P-3** der Firma *Honda* die Öffentlichkeit mit menschenähnlichen Bewegungen und Aussehen. Er erhielt später in verbesserter Version den Namen ASIMO (*Advanced Step in Innovative Mobility*). Mit einem 30-köpfigen Team und einem Budget von insgesamt 81 Millionen Euro bis zum Prototyp **P-2** wurden erstmals von der Privatwirtschaft große Kapazitäten zur Erforschung der humanoiden Robotik bereitgestellt (1973 WABOT 1, 1985 WABOT 2, 1996 **P-2**).



**Bild 1.6** Kinematischer Aufbau des Roboters SYNTELMANN (links), Humanoid ASIMO, *Honda*, Japan 2003, 54 kg, 2,7 km/h, 6 km/h in einer neueren Version, Akku 52 V (Mitte), und QRIO, *Sony*, Japan 2003, 7 kg, 2,4 km/h (rechts)

Grundstein für die humanoide Robotik ist aber nicht nur, Wissen über die **Biomechanik** zu sammeln, sondern auch programmierbare Rechentechnik. Diese Seite des technischen Fortschritts beginnt 1941 (K. Zuse) und 1944 (H. H. Aiken). Fortan war es durch die schnelle Entwicklung möglich, große Datenmengen und Informationen aufzubereiten und zu speichern. Erst viele Jahre später (1973) wurde der erste humanoide Roboter „WABOT-1“ im Labor von I. Kato der *Waseda-Universität* (Tokio) entwickelt und der Öffentlichkeit vorgestellt. Zuvor war die Entwicklung eines Humanoiden aufgrund der nur eingeschränkt vorhandenen Technologien nicht möglich. Heutige Standardkomponenten entstanden aus der stetigen Verbesserung der für die Herstellung benötigten Prozesse und Werkstoffe. Ein Beispiel ist die Entwicklung der für die Gehplanung nötigen 6-Achs-Kraftsensorik im Fuß eines humanoiden Roboters. Mit den zuvor am Markt befindlichen Sensoren war es unmöglich, die hohen Belastungen, die bei einer Geh- bzw. Laufbewegung auftreten, auszuhalten. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der humanoiden Robotik führten zu neuen Ergebnissen in den Bereichen der Sensorik, Werkstoff- und Antriebstechnik sowie der Theorie des zweibeinigen Schreitens.

**Tabelle 1.3** Chronologie der Meilensteine in der Geschichte der Humanoiden (Auswahl)

Jahr	Meilenstein
1927	TELEVOX ist einer der ersten Roboter in Menschengestalt. Er kontrollierte Wasserstände, schaltete Licht und Geräte ein/aus, wurde vom amerikanischen Ing. Wensley entwickelt.
1929	Erste Ausstellung humanoider Roboter in England und USA
1930	Roboter SABOR II (Schweiz), ein ferngesteuerter Kunstmensch zur Schaustellung, 2,37 m groß, SABOR IV entsteht 1952
1954	HARDIMAN ist ein Verstärker menschlicher Kräfte auf der Basis eines Exoskeletts, von R. Mosher für <i>General Electric</i> konstruiert; Kraftverstärkung 1:25; sollte 680 kg heben können
1961	Gerät HANDYMAN mit menschenähnlichen Armen von <i>General Electric Company</i> (USA); Antrieb: elektrohydraulisch; gedachter Einsatz: Entwicklung nuklearer Flugzeugantriebe
1967	SYNTELMANN, ein zweiarmiger, mobiler, anthropomorph aufgebauter Manipulator als Labormuster; sensorisierte Greifhände (Kraftsensoren) von H. Kleinwächter (Lörrach); vergleichbar mit dem Stanford Arm (USA)
1969	und Folgejahre; M. Vukobratovic (Jugoslawien) widmet sich der Theorie und dem Bau zweibeiniger exoskelettaler Gehhilfen.
1973	WABOT-1 der <i>Waseda-Universität</i> (Prof. Kato); kann auf zwei Beinen statisch gehen, sensorisierte Greifhände
1980	Beginn der ersten Bauserie humanoider Roboter bei <i>Honda</i> (P-Serie)
1980	Ein japanischer Laufroboter bewegt sich mit 45 cm-Schrittlänge.
1984	WABOT-2 entwickelt; 1985 auf der Wissenschaftsausstellung in Tsukuba vorgestellt ( <i>Waseda-Universität</i> , Japan)
1984	Anthropomorpher Roboter WAM 7R mit Freiheitsgrad 50; er liest Noten und spielt mit zehn Fingern und beiden Füßen Orgel, Masse 75 kg, Japan
1989	Entwicklung von MANNY, ein anthropomorphes Testsystem für militärische Schutz- und Sportbekleidung
1993	COG, ein humanoider Robotertorso von R. Brooks für Lernexperimente, Freiheitsgrad 21
1996	Prototyp P-2 von <i>Honda</i> , schreitet und klettert; P-3 wird 1997 vorgestellt und ist der Vorläufer für ASIMO
1997	ROBONAUT, ein beinloser Humanoid (ein Torso) als ferngesteuerter Assistent für Astronauten (NASA); flog 2011 erstmalig zur Raumstation ISS; geschickte Bedienung von Geräten und Werkzeugen

**Tabelle 1.3** Chronologie der Meilensteine in der Geschichte der Humanoiden  
(Auswahl) (*Fortsetzung*)

Jahr	Meilenstein
1998	Roboterkopf KISMET zur Simulation von Gesichtsausdrücken und Emotionen von C. Breazeal. Der Kopf ist nur grob ausgeformt, also eher nicht antropomorph.
2000	Roboter der ARMAR-Serie als Partner für die Interaktion mit Menschen an der <i>Universität Karlsruhe</i> untersucht; mechanischer Freiheitsgrad 25/43 (mit Kopf und Nacken)
2001	HOAP-1, Testplattform für zweibeinige Fortbewegung; Nutzer programmiert selbst, <i>Fujitsu-Automation</i> (Japan)
2003	HRP-2, PROMET, zweibeiniger Humanoid als Ergebnis von Humanoidstudien, Freiheitsgrad 30, Linux Betriebssystem, <i>Kawada Industries</i> , Japan
2003	und Folgejahre; WAKAMURA, ein humanoider Roboter von <i>Mitsubishi</i> für Aufgaben im Haushalt; zweiarmig, Arm dreigelenkig, 1 m groß, Basisdurchmesser 45 cm, 30 kg schwer, Linux, 7 km/h
2003	Kleiner humanoider Roboter QRIO von <i>Sony</i> ; er geht, spricht (japanischer Wortschatz 60000 Wörter), rennt, singt, tanzt und spielt Ball. 58 cm groß, 7 kg schwer. Er hält auch seine Balance, wenn beide Beine den Boden gleichzeitig verlassen
2003	Zweibeinige autonome Laufmaschine JOHNNIE mit 17 angetriebenen Gelenken ausgestattet; 1,8 m groß; Studium des stabilen dynamischen Laufens und Hinderniserkennung, <i>TU München</i>
2003	Bipedaler (zweibeiniger) Roboter ASIMO wird erstmals von der Firma <i>Honda</i> hergestellt. Er kann laufen und Treppen steigen. Freiheitsgrad 28 (später 34), 1,2 m groß, 43 kg schwer, maximale Betriebszeit 40 min
2004	Es sind 30 Exemplare des Roboters ASIMO im Einsatz (Schaustellung, Forschung, Studium der Bewegungen und seit 2007 auch zwei Exemplare in Deutschland).
2005	iCUB ist ein Roboter mit dem Erscheinungsbild eines vierjährigen Kindes, entwickelt von sieben europäischen Universitäten mit Freiheitsgrad 53 (letzte Version), 94 cm groß, 26 kg schwer, <i>Italian Institute of Technology Genua</i> (Italien).
2005	Roboterlady REPLIEE Q2, weiblicher Android mit dem Erscheinungsbild einer 35-jährigen Frau mit 31 Aktoren im Körper. Sie kann nur sitzen oder stehen, <i>Universität Osaka</i> .
2006	Präsentation von RiMAN, ein humanoider Roboter für Betreuung und Pflege im japanischen Gesundheitswesen; 1,58 m groß, 100 kg schwer, Oberfläche aus weicher Silikonhaut mit 320 integrierten Drucksensoren
2006	Erstmalige Vorstellung des autonom agierenden humanoiden Roboters NAO vom französischen Hersteller <i>Aldebaran Robotics</i> . Er dient zur Vermittlung von Sachthemen, z. B. Informatik im Schulbereich. Er kommuniziert in 9 Sprachen.

Jahr	Meilenstein
2007	JUSTIN, ein Roboter für z. B. Außenbordarbeiten an Raumfahrzeugen; zwei Arme mit vierfingrigen Händen, Sensoren in allen Gelenken, <i>Institut für Robotik und Mechatronik der DLR</i>
2008	CARE-O-BOT 3, mobiler Serviceroboter, der bewusst nicht menschenähnlich ausgeführt ist; Fraunhofer <i>Institut für Produktionstechnik und Automatisierung Stuttgart</i>
2009	PETMAN ist ein militärischer Humanoid von <i>Boston Dynamics</i> , Laufgeschwindigkeit 7 km/h.
2009	HRP-4C, ein humanoider (weiblicher) Roboter; 1,58 m groß, 43 kg schwer, mechanischer Freiheitsgrad 34. Er kann Beine, Arme und Kopf bewegen und läuft mit leichtem Schritt; <i>Kawada Industries</i> (Japan).
2022	Nach 22 Jahren beeindruckender Demonstrationen wurde ASIMO, der berühmte humanoide Roboter von Honda, offiziell in den Ruhestand geschickt.
2024	Bei Mercedes-Benz wird der humanoide Roboter „APOLLO“ getestet, bei BMW der Roboter „FIGURE“.
2025	In China haben Hersteller damit begonnen, humanoide Roboter in Serie zu produzieren.
2025	China kündigt Investitionen in Höhe von 120 Milliarden Euro für die Entwicklung humanoider Roboter an. Auch amerikanische und europäische Firmen testen bereits neue Modelle der Humanoiden. Damit ist ein Wettlauf um diese neue Technologie eröffnet.

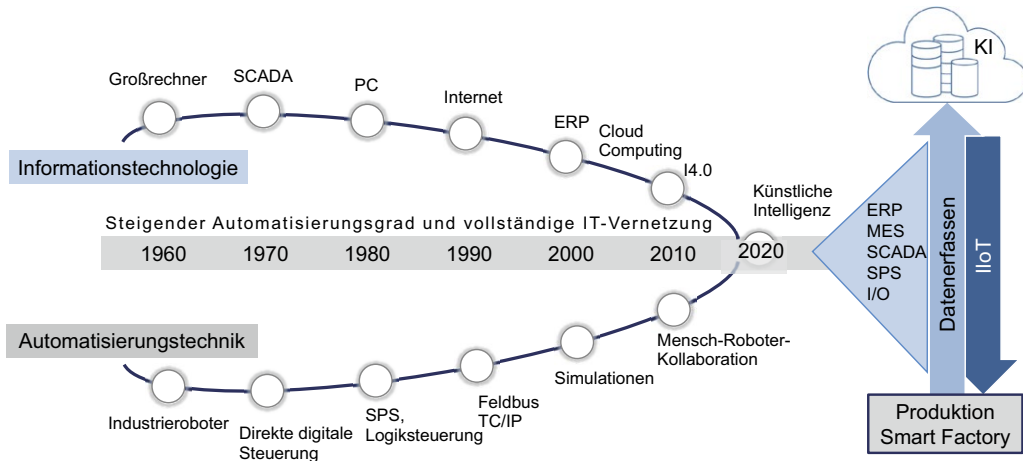
## 1.5 Zeitleiste der Automatisierung

Automatisierung ist kein rein modernes Phänomen, sondern hat eine lange Geschichte, die bis in die Frühzeit der Menschheit zurückreicht. Schon in der Antike entwickelten Kulturen mechanische Vorrichtungen, um körperliche Arbeit zu erleichtern oder Abläufe zu vereinfachen. Die Griechen und Römer nutzten beispielsweise Wasser- und Windkraft, um Mühlen anzutreiben oder komplexe automatische Mechanismen in Tempeln und Theatern zu betreiben.

Im Mittelalter und der frühen Neuzeit wurden Wasserräder, Windmühlen und später Dampfmaschinen weiterentwickelt, die mechanische Energie für verschiedene Produktionsprozesse lieferten. Diese Erfindungen legten die Grundlage für die Industrielle Revolution.

Im 19. und frühen 20. Jahrhundert kamen elektromechanische Steuerungen wie Nockenwellen, Schrittschaltwerke und Relais zum Einsatz, die einfache Abläufe automatisierten und so erste Formen der Prozesssteuerung ermöglichten. Produktionslinien wurden zunehmend mit diesen mechanischen und elektromechanischen Steuerungen ausgestattet, was eine standardisierte Massenproduktion ermöglichte – wenngleich die Systeme noch unflexibel und auf feste Abläufe beschränkt waren. Die Elektrifizierung der Industrie eröffnete zusätzliche Möglichkeiten zur Automatisierung von Maschinen.

Der eigentliche Umbruch begann in der Mitte des 20. Jahrhunderts: Mit dem Aufkommen der Elektronik und der ersten Computertechnologien wurden Prozesse nicht mehr nur mechanisch, sondern zunehmend digital steuerbar. Diese Entwicklung ebnete den Weg für die moderne Automatisierungstechnik – und markierte den Übergang zur Ära der Industrieroboter, fahrerlosen Transportsysteme und mobilen Roboter.



**Bild 1.7** Parallele Entwicklung von Informationstechnologien und Automatisierung

ERP: Enterprise-Resource-Planning; MES: Manufacturing Execution System; SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition; I/O: Eingänge/Ausgänge; SPS: speicherprogrammierbare Steuerung; TC/IP: Transmission Control Internet Protocol; IIoT: Industrial Internet of Things; I4.0: Industrie 4.0

Die Automatisierungstechnik hat sich in den vergangenen 70 Jahren rasant entwickelt (Bild 1.7). Dieser Prozess wurde maßgeblich durch den Fortschritt in der Informationstechnologie beeinflusst. Computer, Netzwerke, Sensoren, Cloud-Systeme und heute sogar Künstliche Intelligenz (KI) haben die Steuerung, Vernetzung und Integration von Maschinen grundlegend verändert. Auch die Entwicklung von Industrierobotern, fahrerlosen Transportsystemen (FTS), mobilen Robotern und Servicerobotern hängt eng mit dieser technologischen Evolution zusammen.



Mit den ersten Großrechnern begann in den 1960er-Jahren die Ära der rechnergestützten Produktionsplanung. Diese Systeme ermöglichten die zentrale Steuerung einfacher Prozesse und erhöhten die Effizienz industrieller Abläufe. In dieser Phase entstanden auch die ersten **Industrieroboter** für Schweiß- oder Montagetätigkeiten. Sie waren noch fest in Produktionslinien integriert. Parallel dazu wurden die ersten **fahrerlosen Transportsysteme** (FTS) entwickelt. Sie nutzten einfache Steuerlogik, um Material auf vordefinierten Routen zu transportieren. Ihre Intelligenz war stark begrenzt, doch sie markierten den Beginn fahrerloser Systeme in der Logistik.

In den 1980er-Jahren kam es durch **Personal Computer** (PC) und speicherprogrammierbare Steuerungen (**SPS**) zu einer Dezentralisierung. Dadurch wurden erstmals dezentrale Steuerarchitekturen möglich. Maschinen konnten nun individuell programmiert, flexibel angepasst und benutzerfreundlich bedient werden. **SCADA-Systeme** (*Supervisory Control and Data Acquisition*) etablierten sich als Werkzeug zur zentralen Überwachung und Steuerung komplexer Anlagen in Echtzeit. Diese Entwicklungen stärkten sowohl die Leistungsfähigkeit industrieller Roboter als auch die Flexibilität von FTS. Parallel dazu entstanden erste Forschungssysteme zu mobilen Robotern, die Sensoren und eine zentrale Recheneinheit zur Navigation in Innenräumen nutzten.

Die 1990er-Jahre waren geprägt von Vernetzung sowie dem Beginn der mobilen und serviceorientierten Robotik. Die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung durch **lokale Netzwerke** und **WLAN** ermöglichte die Kommunikation von Maschinen untereinander. Aus einst „stummen“ Einheiten wurden reaktive Systeme mit Rückkopplung. Dies ermöglichte flexiblere Produktionsprozesse und war der Grundstein für **autonome mobile Roboter** (AMRs), die sich ohne feste Infrastruktur bewegen können. Auch die Servicerobotik gewann in dieser Zeit an Bedeutung: Roboter übernahmen erste Aufgaben im Haushalt, in Krankenhäusern oder öffentlichen Einrichtungen. Die Informationstechnologie (IT) war dabei von entscheidender Bedeutung, beispielsweise für Navigation, Benutzerinteraktion und Fernsteuerung.

Ab den 2000er-Jahren kamen die Cloud, ERP-Systeme und die digitale Integration auf. Mit dem Einzug der **ERP-Systeme** wurden betriebliche Prozesse erstmals ganzheitlich digital abgebildet. Produktions-, Logistik- und Verwaltungsdaten flossen in gemeinsame Systeme ein. Dadurch wurde eine wichtige Grundlage für durchgängige Automatisierung geschaffen. Die aufkommende **Cloud-Technologie** ermöglichte die Speicherung und Verarbeitung großer Datenmengen, die nicht mehr an lokale Systeme gebunden waren. Roboter – sowohl in der Industrie als auch im Servicebereich – konnten nun auf entfernte Rechenleistung und vernetzte Dienste zugreifen.

**Heute** (Bild 1.7) stehen die Themen Industrie 4.0, Künstliche Intelligenz, autonome Systeme und Smart Factory im Mittelpunkt. Im Rahmen von **Industrie 4.0** sind inzwischen nahezu alle Elemente der Produktion digital miteinander vernetzt. Sensoren liefern Echtzeitdaten, Maschinen reagieren autonom und Systeme wie **AMRs** oder Serviceroboter passen ihr Verhalten an ihre Umgebung an. **Künstliche Intelligenz**

analysiert Produktionsdaten, erkennt Muster, optimiert Prozesse und trifft Entscheidungen, ohne dass menschliches Zutun erforderlich ist. In modernen Produktionssystemen sind Industrieroboter längst mit IT-Systemen gekoppelt. **FTS** und lernfähige AMRs verbinden Maschinen und Lager entlang der Fertigung. Serviceroboter interagieren per Sprache, fahren über Gehsteige, erkennen Hindernisse visuell und handeln zunehmend selbstständig.

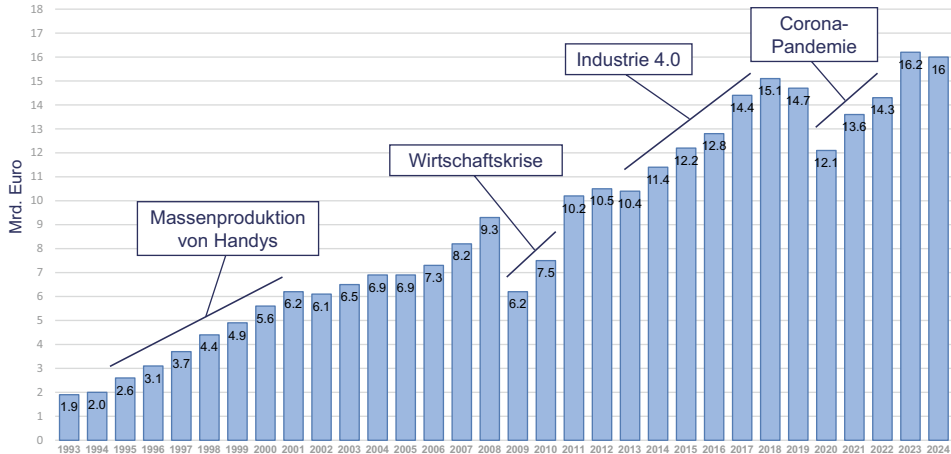
**Tabelle 1.4** Chronologie der Meilensteine in der Geschichte der Automatisierung (Auswahl)

Jahr	Meilensteine
<b>1696</b>	Gottfried Wilhelm Leibniz entwickelte das binäre Zahlensystem. Er legte damit den Grundstein für die moderne Computertechnologie, die heute auf binären Codes basiert.
<b>17. Jh.</b>	Die ersten mechanischen Rechenmaschinen entstehen.
<b>1781</b>	James Watt patentiert Planetengetriebe und treibt die Entwicklung der Dampfmaschine voran.
<b>1785</b>	Die erste mechanische Webmaschine wird von Edmond Cartwright gebaut.
<b>1800</b>	Die erste funktionsfähige Batterie wurde von Alessandro Volta erfunden.
<b>1801</b>	Joseph Marie Jacquard erfindet den mechanischen Webstuhl, der über Lochkarten gesteuert wird und den Beginn der Automatisierung in der Textilindustrie markiert.
<b>1833</b>	Samuel Morse baute den ersten brauchbaren elektromagnetischen Schreibtelegraphen. Die Zeichen wurden codiert und seriell übertragen. Daraus entstanden der Fernschreiber und die standardisierten seriellen Schnittstellen. Diese bildeten die Grundlage für die heutigen Bussysteme.
<b>Ende 19. Jh.</b>	Ende des 19. Jahrhunderts führte die Einführung der Elektrizität zu einer weiteren Entwicklung der Automatisierung.
<b>1913</b>	Henry Ford revolutionierte die Produktion mit der Einführung des Fließbands.
<b>1941</b>	Konrad Zuse präsentiert seine Rechenmaschine Z3. Sie arbeitete mit binären Gleitkommazahlen. Nach heutigem Sprachgebrauch war sie ein Computer. Das Zeitalter der digitalen Revolution war angebrochen.
<b>1947</b>	Die Internationale Organisation für Normung (ISO) wird gegründet und die erste Norm ISO/R 1:1951 Standard-Referenztemperatur für industrielle Längenmessungen wird veröffentlicht.
<b>1948</b>	William B. Shockley prägte den Begriff Transistor für die bereits entwickelten Halbleiterbauelemente. Es begann eine stürmische Entwicklung der Computertechnik, die die Möglichkeiten der Automatisierungstechnik stark beeinflusste.

Jahr	Meilensteine
1954	George Devol erfand Industrieroboter und beantragte ein Patent, das 1961 erteilt wurde. Der Industrieroboter hat sich zum Inbegriff der Automatisierung entwickelt.
1969	Richard Morley stellt seinen „solid-state sequential logic solver“ (Halbleiter-basierende sequenzielle Verriegelungslösung) vor. Dies war die Geburtsstunde der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS).
1970	Schaffung des Universal Product Coding (UPC) und Einführung des Barcodes in den USA. 1977 Einführung des europäischen EAN-Codes (European Article Number). Der Strichcode wird mit optoelektronischen Leseköpfen (Scannern) gelesen. Diese Identifikationsmethoden bildeten die Grundlage für die automatische Warenwirtschaft (Logistik). Zunehmend wird die Barcodetechnik durch RFID-Techniken ergänzt.
1981	IBM präsentierte den IBM 5150, der als erster kommerziell erfolgreicher PC gilt.
1983	Einführung des TCP/IP-Protokolls, das heute die Grundlage des Internets bildet.
1989	Tim Berners-Lee entwickelt das World Wide Web (WWW), das den Zugang zum Internet revolutioniert.
1995	Die GMD (heute Fraunhofer FIT) hat mit dem BSCW ein System vorgestellt, das heute als „Cloud“ bezeichnet wird.
2006	Die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG tritt in Kraft. Sie gilt bis zum 19. Januar 2027.
2010	Mensch-Maschine-Kollaboration: Erster Entwurf der Technischen Spezifikation „ISO/TS 15066 Robotik und Robotergeräte“, die einen Leitfaden für kollaborierende Roboteranwendungen bietet und biomechanische Grenzwerte definiert, die ein Roboter auf einen Menschen ausüben darf.
2011	Das Projekt „Industrie 4.0“ wurde von der Bundesregierung im Rahmen der Hannover Messe erstmals der Öffentlichkeit präsentiert. Industrie 4.0 hat sich seitdem weltweit etabliert und ist zu einem integralen Bestandteil moderner Produktionsprozesse geworden.
2023	Die neue Maschinenverordnung (EU) 2023/1230 reflektiert den gegenwärtigen Stand der Technik und berücksichtigt neue Risiken, die sich aus digitalen Technologien, Künstlicher Intelligenz und umfangreichen Vernetzungen ergeben. Die Maschinenverordnung wird die Maschinenrichtlinie am 20. Januar 2027 ablösen.
2025	Die Automatisierung der Produktion mit humanoiden Robotern sowie die Logistik mit mobilen teilhumanoiden Robotern beginnen.

Das Bild 1.8 zeigt ein Balkendiagramm mit den Jahren 1993 bis 2024 auf der X-Achse, auf der Y-Achse ist der jährliche Umsatz in Milliarden Euro von 0 bis 18 Milliarden Euro zu sehen. Der Umsatz wurde von deutschen Unternehmen weltweit erwirtschaftet, nicht nur durch Verkäufe innerhalb Deutschlands. Da aber im Bereich der

Maschinen und Automatisierung deutsche Unternehmen weltweit tätig sind, liefert das Diagramm Richtwerte zu der weltweiten Entwicklung im Bereich der Automatisierung.



**Bild 1.8** Weltweiter Umsatz der deutschen „Roboter + Automation“-Branche  
(Quelle: VDMA)

Wichtige Rückschlüsse aus dem Diagramm:

- Es stehen Daten zu den Umsätzen im Bereich „Robotik und Automation“ für den Zeitraum von 1993 bis 2024 zur Verfügung.
- Der Umsatz stieg von 1,9 Milliarden auf 16 Milliarden Euro. Dies belegt das stetige Wachstum im Bereich Robotik und Automatisierung.
- Die wesentlichen Ereignisse bzw. Entwicklungen, die den Umsatz beeinflusst haben:
  - Die Massenproduktion von Handys in der zweiten Hälfte der 1990er- bis Anfang der 2000er-Jahre hatte positive Auswirkungen auf die Branche.
  - 2008 – 2009: globale Wirtschaftskrise mit einem Umsatzrückgang von über 3 Mrd. Euro (ca. –30 %).
  - 2011 – 2019: Positive Impulse durch Industrie 4.0 sorgen für eine kontinuierliche Umsatzsteigerung von 10,2 auf 15,1 Milliarden Euro.
  - 2020 – 2021: Corona-Pandemie, Störung von Lieferketten und Produktionsrückstand; der Umsatz fällt auf 12 Mrd. Euro, danach erfolgt eine langsame Erholung.
  - 2023: Die gesamte Branche „Roboter und Automation“ erreicht mit einem Rekordwert von 16,2 Milliarden Euro einen neuen Höchststand.

- 2025: Aufgrund der vielen Kriegsschauplätze weltweit sowie der Störung von Handelsvereinbarungen wird für das Jahr 2025 ein Umsatzrückgang von etwa 15 % prognostiziert.

Trotz mehrerer Rückschläge, wie etwa der globalen Finanzkrise und der Pandemie, ist ein langfristiger Wachstumstrend erkennbar. Dieser ist auf einen signifikanten strukturellen Anstieg der Automatisierung in der Industrie zurückzuführen. Die Robotik- und Automatisierungsbranche hat sich in der Vergangenheit als äußerst krisenresistent erwiesen. Die Daten reflektieren zudem technologische Innovationen und Investitionen in die Bereiche Industrie 4.0, digitale Fertigung und intelligente Maschinen.

## 1.6 Kontrollfragen

1. Wer prägte den Begriff „Automation“ und in welchem Zusammenhang?
2. Was war der Unterschied zwischen den ersten NC-Maschinen und den frühen Industrierobotern wie „Unimate“?
3. Welche zwei Technologien flossen maßgeblich in die Entwicklung der ersten Industrieroboter ein?
4. Was versteht man unter einem „Hüllkörpermodell“ in der Robotertechnik und wozu dient es?
5. Welche Aufgaben übernimmt die Roboterperipherie, und wie beeinflusst sie die Automatisierungskosten?
6. Was bedeutet Industrie 4.0 im Kontext der Robotik, und welche Eigenschaften müssen Roboter dafür erfüllen?
7. Nennen Sie drei technologische Anforderungen, die ein moderner Roboter im Rahmen von Industrie 4.0 erfüllen sollte.
8. Welche Bedeutung hatten George Devol und Joseph Engelberger für die industrielle Robotik?
9. Wie haben sich fahrerlose Transportsysteme (FTS) zu autonomen mobilen Robotern (AMRs) weiterentwickelt?
10. Welche Rolle spielt Künstliche Intelligenz in der modernen Robotik, insbesondere in Bezug auf das maschinelle Sehen und die Peripherie?
11. Was bedeutet die Aussage: „Je weniger ein Roboter kann, desto mehr muss die Peripherie leisten?“

**Literatur- und Quellenverzeichnis**

- [1.1] *Erler, F. u. a.*: Revolution der Roboter – Untersuchungen über Probleme der Automatisierung. Isar Verlag, München 1956
- [1.2] *Nocks, L.*: The Robot–The Life Story of a Technology. Greenwood Press, London 2007
- [1.3] *Jahr, I.*: Lexikon der industriellen Bildverarbeitung. Spurbuchverlag, Baunach 2003
- [1.4] *Hesse, S.*: Industrieroboterpraxis. Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden 1998
- [1.5] *Hesse, S.*: Handhabungstechnik von A bis Z. Hoppenstedt Publishing, Darmstadt 2008
- [1.6] *Google Cloud Storage*, <https://patentimages.storage.googleapis.com/6a/78/93/6b7927856c9bee/US2988237.pdf>, 2025

---

# 2

## Robotik – Technik für den Menschen

---

In der heutigen Gesellschaft wird eine klare Unterscheidung zwischen Robotern, wie sie in der Science-Fiction dargestellt werden, und Maschinen, die bereits Teil der Arbeitswelt sind, vorgenommen. Dazu gehören auch Industrieroboter, die seit mehr als sechs Jahrzehnten erfolgreich in der Automatisierung eingesetzt werden und monotone, gefährliche oder körperlich belastende Aufgaben übernehmen, wie sie etwa in der Fließbandarbeit vorkommen.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich durch den kontinuierlichen Fortschritt in der Robotik in Zukunft ein Wandel vollziehen wird. So könnten **Humanoide Roboter** in zunehmendem Maße Aufgaben nicht nur in der Produktion, sondern auch in der Pflege und im Haushalt übernehmen und damit einen signifikanten Einfluss auf den menschlichen Alltag nehmen. Der Mensch ist nicht für die Ausführung wiederholender, monotoner Tätigkeiten geschaffen, die weder geistige noch kreative Herausforderungen bieten. Obwohl ein vollständig autonomer Haushaltsroboter gegenwärtig noch als Zukunftsvision angesehen wird, zeichnet sich ab, dass solche Maschinen in den kommenden Jahrzehnten viele Aufgaben im Wohnbereich übernehmen könnten – vorausgesetzt, die Sicherheit der Roboter und das Arbeiten in engen Räumen werden gelöst. Dies könnte eine deutliche Verbesserung der Lebensqualität bedeuten.

Die Menschheit steht möglicherweise an der Schwelle zu einer neuen Ära, in der ein jahrhundertalter Traum der Science-Fiction Realität wird: das Zusammenleben mit Robotern im eigenen Zuhause. Humanoide Roboter könnten nicht nur Haushaltsaufgaben bewältigen, sondern auch zur Überwachung von Haus und Hof oder zur Gesundheitskontrolle eingesetzt werden. Es wäre vorstellbar, dass humanoide Roboter bei kritischen Gesundheitswerten einen Alarm auslösen und automatisch Notfallmaßnahmen einleiten.

In Bereichen, in denen Maschinen mit Menschen interagieren, spielt auch emotionale Kommunikation eine entscheidende Rolle. Die Entwicklung eines humanoiden Roboters, der in monotoner Tonlage spricht – wie es etwa bei Navigationssystemen im Auto akzeptabel ist – wird demnach nicht ausreichend sein. Zukünftige Roboter müssen demnach auch in der Lage sein, ihre Sprachmelodie der jeweiligen Situation anzupassen, sei es im Umgang mit Kindern, Gesprächen mit Erwachsenen oder der Pflege älterer Menschen. Ein angemessenes emotionales Reaktionsvermögen wird erwartet, wobei in diesem Bereich noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich unsere Welt in den kommenden hundert Jahren in enger Verbindung mit Robotern weiterentwickeln wird. Humanoide Roboter, intelligente autonome Mobilroboter, Serviceroboter und spezialisierte Maschinen für verschiedenste Anwendungen werden dabei eine zunehmend bedeutende Rolle spielen. Einige innovative Visionen und Lösungsansätze sind bereits heute in wissenschaftlichen Arbeiten dokumentiert.

## 2.1 Systematische Einordnung

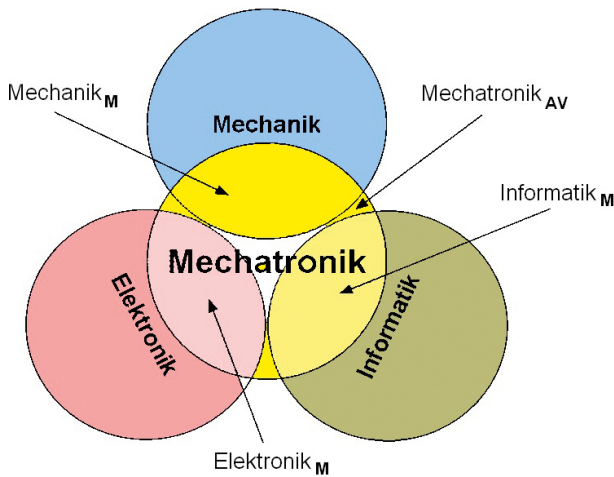
Roboter sind verwirklichte **Mechatronik**, weil sie Mechanik und Kinematik, Elektronik wie auch Informatik in sich vereinen (Bild 2.1). Der Bau eines Roboters verlangt deshalb interdisziplinäres, also mechatronisches, Denken.

Der Begriff **Mechatronik** kommt aus Japan. Ursprünglich wurde das Wort von der Firma *Yaskawa* geschützt und im Jahr 1982 für die Öffentlichkeit freigegeben. In Europa hat insbesondere die deutsche Automobilindustrie diese Bezeichnung aufgegriffen und den Beruf des Mechatronikers eingeführt. Mechatronik ist ein Kunstwort, seinerzeit entstanden aus *Mechanical Engineering and Electronic Engineering* (1969). Nach heutigem Verständnis – vor allem in Europa – beinhaltet der Begriff zusätzlich auch die Informatik. Die Besonderheit der Mechatronik liegt aber darin, dass nur bestimmte Teile aus genannten Bereichen zu einem neuen Gebiet verbunden werden. Vereinfacht dargestellt sieht die heutige Erfolgsformel der Mechatronik so aus:

$$\text{Mechatronik} = \text{Mechanik}_M + \text{Elektronik}_M + \text{Informatik}_M + \text{Mechatronik}_{AV}$$

Dabei stehen  $\text{Mechanik}_M$ ,  $\text{Elektronik}_M$  und  $\text{Informatik}_M$  für die jeweiligen Teilbereiche, die für einen bestimmten Mechatronik-Schwerpunkt benötigt werden und für die Ausübung des entsprechenden Mechatroniker-Berufs notwendig sind.  $\text{Mechatronik}_{AV}$  (AV = *added value* oder Mehrwert) steht für den neu entstandenen Mehrwert, der sich aus der Art und Weise ergibt, wie diese Teilbereiche miteinander verbunden werden.





**Bild 2.1** Grafische Darstellung der Definition von Mechatronik

Wie lässt sich die **Robotik** aus praktischer Sicht systematisieren?

Nach einem schnellen Einzug der Industrieroboter (sogenannte „Arme“) in die Produktion ist in den letzten Jahrzehnten auch Forschung und Entwicklung in der **Mobilrobotik** und neuerlich humanoide Robotik voll in Gang gekommen. Die Industrieroboter sind stationäre Roboter und mobile Roboter sind ortsveränderliche Maschinen, wie z. B. gehende, fahrende, fliegende, schwimmende oder schlangenähnlich kriechende Roboter.

In Zeitschriften, auf Konferenzen und bei Ausstellungen werden die gelungenen Forschungsprojekte der Robotik gezeigt, die bis vor Kurzem nur in den Science-Fiction-Filmen zu sehen waren. Solche Projekte zeigen, dass man heute beinahe alle Fahrzeuge, Flug- und Schwimmobjekte als Roboter vollautomatisch ausführen kann. Spätestens mit dem humanoiden Roboter Asimo (*Honda*; siehe auch Abschnitt 3.7), der zweibeiniges Laufen und Treppensteigen beherrscht und dem japanischer Forscher Hiroshi Ishiguro, der sich ein zweites Ich quasi als Roboter-Zwilling geschaffen hat (siehe Bild 3.83), ist die Idee Realität geworden, einen Menschen in wesentlichen Grundfunktionen als Maschine zu bauen.

Seit den 1960er-Jahren, als man mit der Forschung im Bereich der Mobilroboter begonnen hat, versucht man nun, Roboter sinnvoll in Gruppen einzuteilen. Mit dem technischen Fortschritt hat man die Systematik immer wieder mehr oder weniger angepasst. In Anbetracht dessen, dass alle Transportmittel und Lebewesen als Roboter gemacht werden können, ist es sinnvoll, eine generelle Gruppierung vorzunehmen und die Roboter gemäß Tabelle 2.1 einzuteilen nach

- Anwendungsbereich,
- Einsatzgebiet,

- Ausführung,
- Aufgaben.

Zu den heute traditionellen industriellen Anwendungen der Roboter kommen ständig auch solche für militärische Anwendungen hinzu. Die zivilen und kommunalen Anwendungen wird man in den nächsten Jahren weiter erschließen.

**Tabelle 2.1** Allgemeine Einteilung der Roboter

<b>Anwendungsbereich</b>	Anwendungen in der Industrie Zivile Anwendungen Militärische Anwendungen Kommunale Anwendungen und Umwelt
<b>Einsatzgebiet</b>	Festland, Bauwesen, Bergbau und Untertage-Bergbau Wasser und Unterwasser, Offshore-Bereich Luft- und Raumfahrt
<b>Ausführung</b>	Roboter auf Rädern, Ausführungen mit 1 bis $n$ Rädern Ausführungen mit Raupenketten Roboter mit 1 bis $n$ Beinen, wie z. B. humanoide Roboter, Robotertiere, Roboterinsekten usw. Fliegende Roboter als Flugzeug, Drohne, Ballon, Rakete, Raumschiff usw. Schwimmende Roboter als Containerschiff, Fischerboot, Segeljacht usw. Unterwassertechnik als Kameraroboter oder zur Exploration von Meeresbodenschätzen Roboter mit schlangenförmiger Lokomotion Roboter-Amphibien Kombiausführungen, wie Roboter, die aus diversen Kombinationen bestehen (Rad und Bein, Kette und Bein usw.) Sonderformen, wie z. B. Magnetschweberoboter, kriechende, kletternde Roboter
<b>Aufgaben</b>	Diese Gruppe ist sehr breit aufgestellt und ständig im Wachsen begriffen. Hier können nur wenige Beispiele stellvertretend angeführt werden: Transportfahrzeuge (Güter oder Personentransport) Assistenzroboter (Handwerk, Industrie und Logistik) Bauroboter (Straßenbau, Tunnelbau, Hausbau u. a.) Reinigungsmaschinen (Straßen-, Fassaden- und Fensterreinigung u. a.) Sicherheitsroboter (Bewachung von privaten Häusern, Banken, Sportstätten und Industriegelände)

Unter „**Industrielle Anwendungen**“ versteht man heute die klassischen Industrieroboter (Arme). In der Zukunft kommen Transportfahrzeuge sowie mobile Roboter dazu, die in der Produktion bzw. auf dem Industriegelände für verschiedene Aufgaben eingesetzt werden, einschließlich der humanoiden Roboter. In diese Gruppe gehören auch jene Roboter, die in Hotels, Touristenbüros, Restaurants und im Handwerk als Helfer eingesetzt werden.

In die Gruppe „**Zivile Anwendungen**“ fallen die Roboter für den Hausbedarf, wie z. B. Staubsaugroboter, Rasenmäroboter, **Haushaltsroboter**, Unterhaltungsroboter, Pflegeroboter, sowie Roboter und exoskelettale Helfer für den Personentransport und verschiedene andere Assistenzroboter.

Die Gruppe „**Militärische Anwendungen**“ steht vorwiegend für *Drohnen*, Soldaten, Minensucher, geländegängige Erkundungs- und Transportfahrzeuge, aber auch für Roboter im Bereich der Luft- und Raumfahrt, wenn diese für militärische Zwecke eingesetzt werden.

Die Gruppierung „**Kommunale Anwendungen und Umwelt**“ beinhaltet Roboter, die in Krankenhäusern zum Einsatz kommen, wie z. B. Operationsroboter, Rehabilitationsroboter, Pflegeroboter. Im Bereich Infrastrukturwartung werden Roboter für Straßenreinigung, Wasser- und Gasrohrinspektion, Abwasserkanäle, Versorgung von Geschäften, Gebäudeinspektion und -bewachung, Überwachung von Flussläufen und zum Umweltschutz eingesetzt. In Museen werden die Roboter als Museumsführer verwendet, im Theater als Schauspieler und im Gesundheitswesen beispielsweise für physiotherapeutische Behandlungen.

Bei der Benennung von Robotern ist es am einfachsten, zum bestehenden Berufsfeld des Menschen das Wort Roboter beizufügen, wie etwa der Rezeptionist wäre dann der Roboter-Rezeptionist, der Berater wird zum Roboter-Berater, ein Koch wird zum Roboter-Koch usw. Die gleiche Regel gilt für Maschinen, die mit intelligenten Steuerungen versehen sind und zum Roboter werden. Beispiel: Roboter-Staubsauger, Roboter-Rasenmäher, Roboter-Schreiner usw.

## 2.2 Industrieroboter

### 2.2.1 Einführung und allgemeine Grundlagen

Ein bedeutsamer Teil moderner Handhabungssysteme sind aus der Sicht der Anwendungsmöglichkeiten und des mengenmäßigen Bestandes die Industrieroboter. Sie stellen als mechatronisches Aktorsystem eine Summe von einfachwirkenden Aktoren dar, mit denen komplex wirkende Aktionen an industriellen Arbeitsplätzen ausgeführt werden können.

Im Entwicklungsverlauf der Roboter wurde bis heute vor allem die Geschwindigkeit, die Genauigkeit, der Antriebsstrang, die Traglasten, der Programmumfang sowie die Integrationsfähigkeit umfassender Peripherieausrüstung in die Steuerung beträchtlich verbessert. Im gleichen Zeitraum haben sich die Anwendungsgrenzen stetig erweitert. Es hat sich gezeigt, dass gerade die periphere Ausgestaltung eines Roboterarbeitsplatzes einen Erfolg versprechenden Einsatz von Robotern sicherstellt. Dazu gehören dann auch viele Komponenten aus der konventionellen Handhabungstechnik, wie Magazine, Vibrationswendelförderer und Einrichtungen zum Ordnen von Teilen. Entscheidend ist, den Roboter nur in Verbindung mit einer ganzheitlichen betrieblichen Automation zu sehen [2.5 – 2.7].

Im Betriebsgeschehen besteht die Aufgabe meistens darin, Objekte bewegungsflexibel in einem industriellen Umfeld (auch in Bauwesen und mittelständischen Betrieben) zu handhaben. Zwei Eigenschaften machen das möglich:

- hohe Beweglichkeit des Armes und somit auch des Endeffektors durch mindestens 3 bis 6 frei programmierbare Bewegungsachsen,
- Rechnersteuerung, die verschiedene Bewegungsarten und Bahnformen erzeugen kann und über Sensoren auch auf Gegebenheiten in der Umgebung oder im technologischen Prozess reagieren kann.

Erste industrielle Anwendungen betrafen zunächst die leicht beherrschbaren Prozesse wie Handhabungen in der Massenfertigung, **Beschickung** von Arbeitsmitteln und das Punktschweißen im Karosseriebau. Mit der technischen Vervollkommenung (Leistungsparameter, Programmierung, Endeffektortechnik) begann die Erschließung prozessspezifischer Anwendungen wie das Fügen, Beschichten von Oberflächen und die Kleinteilmontage im elektrotechnischen Marktsegment. Inzwischen gelingen auch solche Abläufe wie das Bahnschweißen, der Klebstoffauftrag sowie spanendes Bearbeiten von Teilen mit einem Drehgelenkroboter, wie z. B. Schleifen.



**Industrieroboter** (*industrial robot*): Automatisch gesteuerter, umprogrammierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und entweder fest installiert oder an einer mobilen Plattform befestigt werden kann, zur Verwendung in Automatisierungsanwendungen in einer industriellen Umgebung (nach ISO 10218-1:2025).

In den USA definiert die **Robotic Industries Association** den Industrieroboter wie folgt:

*„A robot is a reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move material, parts, tools or specialized devices through variable programmed motions for the performance of a variety of tasks“.*

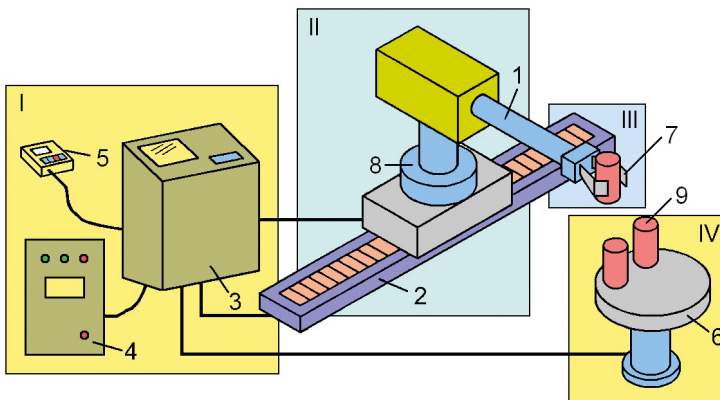
Was versteht man unter dem Begriff „Freiheitsgrad“?



**Freiheitsgrad** (DOF, *Degree of Freedom*): Anzahl der voneinander unabhängigen angetriebenen Bewegungen, die ein Körper im Raum gegenüber einem festen Weltkoordinatensystem ausführen kann.

Gemeint ist hier der **Getriebefreiheitsgrad**  $f$  oder einfach die Achsenanzahl. Der Freiheitsgrad charakterisiert die Beweglichkeit einer Maschinenstruktur, wie z. B. das Führungsgetriebe (Arm) eines Industrieroboters. Es müssen unabhängige Achsen sein, deren Bewegung sich nicht aus anderen Bewegungsachsen zusammensetzen lässt.

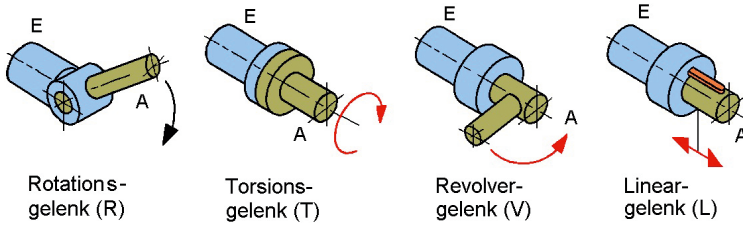
Der Industrieroboter ist zusammengefasst kein produktspezifisch aufgebautes Einzeckgerät, welches durch seine Konstruktion nur einen bestimmten Aufgabentyp erledigen kann, sondern eine wiederverwendbare Komponente der Automatisierung mit vielen Ausrüstungsvarianten. Seine Hauptbestandteile zeigt das Bild 2.2 [2.6 – 2.8].



**Bild 2.2** Hauptbestandteile eines Robotersystems

1 Manipulator (Roboterarm), 2 Bewegungseinheit (externe Achse), 3 Robotersteuerung, 4 Bedienpult, 5 Programmierhandgerät, 6 Drehtisch, 7 Greifer, 8 Drehgelenk, 9 Werkstück, I Steuerung, II ausführende Einrichtung, III Arbeitsorgan, IV Peripherie

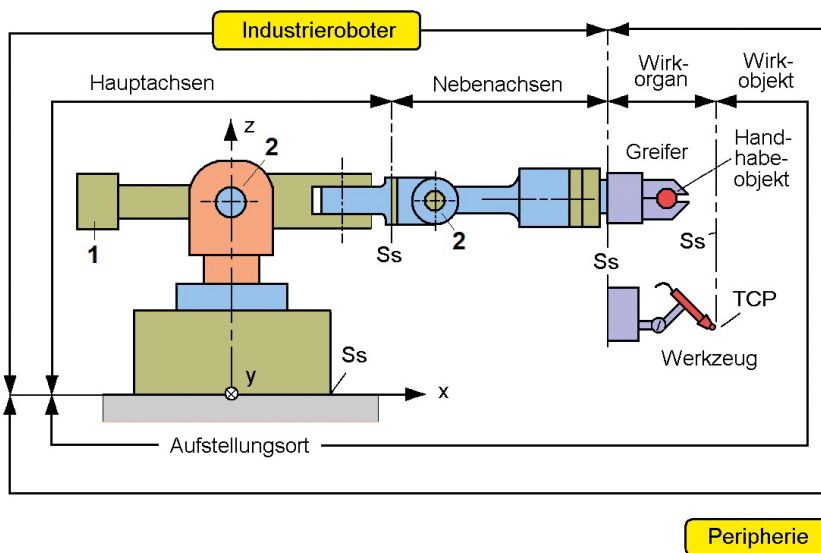
Der Grundaufbau eines Roboters, das ist maßgeblich seine kinematische Struktur, wird durch die Art, die Anordnung im Raum und die Anzahl der Bewegungsachsen bestimmt. Zu unterscheiden sind Dreh- und Schiebeachsen, die als Gelenke bezeichnet werden. Die **Gelenke** werden durch die **Arme** miteinander verbunden. Die vier wichtigsten Gelenktypen werden in Bild 2.3 skizziert. Sie haben jeweils den Freiheitsgrad 1. Kugelgelenke haben den Freiheitsgrad 3, wobei die Beweglichkeit aber aus konstruktiven Gründen stark eingeschränkt ist.



**Bild 2.3** Gelenkarten

E Eingangsglied, A Ausgangsglied

Zusammen mit dem Gestell und dem Endeffektor lassen sich die mechanischen Systemgrenzen z. B. eines **Knickarmroboters** angeben. Das ist in Bild 2.4 zu sehen. Endeffektoren zählt man nicht zum Grundgerät eines Industrieroboters. Sie sind aufgabenspezifisches Zubehör. Die Gesamtzahl der Achsen eines Roboters kann man in Haupt- und Nebenachsen einteilen. Die Flanschfläche des Robotersockels stellt die erste Schnittstelle dar, und zwar die zum Aufstellort (Fußboden, Wand, Decke, Fahrzeug).



**Bild 2.4** Mechanische Systemgrenzen eines Industrieroboters

Ss Schnittstelle (Roboterflansch), 1 Masseausgleich, 2 Drehgelenk



**Hauptachsen** (*primary axes*): Grundachsen, die die Gestalt des Arbeitsraumes im Wesentlichen bestimmen und zur Positionierung des Endeffektors dienen. Es sind bei einem Drehgelenkroboter die Achsen 1 bis 3 für die Makrobewegungen, auch „große Achsen“ genannt. Prinzipiell können Linear- und Drehachsen Hauptachsen sein.



**Nebenachsen** (*secondary axes*): Bewegungsachsen, die im Verhältnis zu den Hauptachsen nur kleine Positionsänderungen bewirken. In der Regel sind es Orientierungsänderungen. Die Nebenachsen werden auch als „Handachsen“ oder „kleine Achsen“ bezeichnet. Sie werden für die Mikrobewegungen im Greifbereich benötigt und sind fast immer rotatorischer Art.

Kinematische Aufbauten lassen sich mit abstrahierten grafischen Symbolen anschaulich beschreiben. Die Sinnbilder nach Bild 2.5 lehnen sich an solche für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen an und sind in der VDI-Richtlinie 2861 festgelegt.

Werden die Bewegungsachsen benummert, beginnt man mit der Achse Nummer 1 am Sockel (Befestigungsfläche), auch wenn der Roboter an der Decke installiert wird. Die Nummerierung wird dann entlang der kinematischen Kette bis zum Endeffektorflansch hin fortgesetzt.

Achsen	Symbolik	Symbol mit Angabe der Bewegungsmöglichkeit
Rotationsachse fluchtend (Teleskop)  Translation nichtfluchtend  Verfahrachse	  	  
Rotationsachse fluchtend  Rotationsachse nicht fluchtend	 	 
Werkzeuge		Klebepistole, Schweißzange
Greifer		Vakuumgreifer Parallelbackengreifer
Kennzeichnung von Systemgrenzen		kurzer Trennstrich = echte Schnittstelle, z.B. wechselbarer Greifer
Trennung zwischen Haupt- und Nebenachsen		Hauptachse  Nebenachse

**Bild 2.5** Symbole zur Darstellung des kinematischen Aufbaus von Industrierobotern [2.4; 2.8]

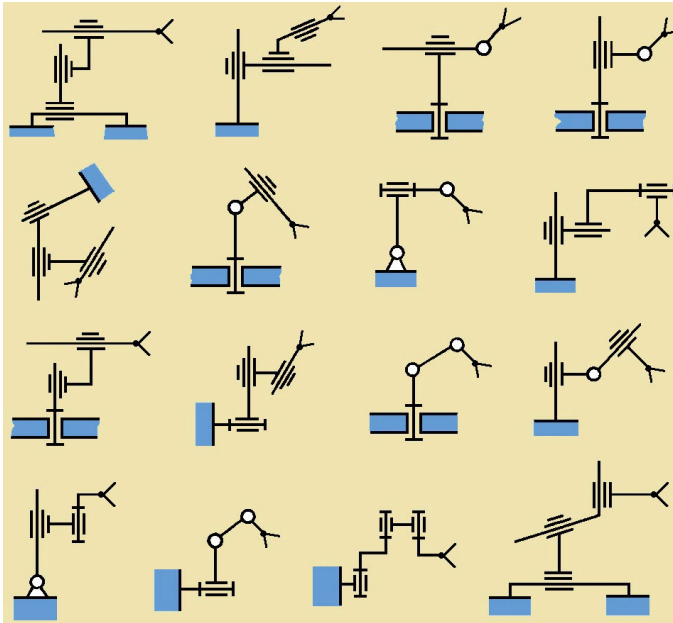
Betrachtet man einen Mechanismus mit drei Hauptachsen, dann lässt sich zeigen, dass viele **Strukturvarianten** möglich sind. So berechnet sich die Anzahl der Variationen  $V$  unter Berücksichtigung der bereits oben genannten Variablen zu

$$V = n^k \quad (2.1)$$

$n$  Anzahl Elemente

$k$  Elemente je Struktur (3 = Grundstruktur)

Die Anzahl der Elemente sei zunächst 2 (Drehen, Schieben). Werden die Achsenrichtungen mit einbezogen, so erhält man je Elementart nochmals 3 (X, Y, Z bzw. A, B, C). Daraus ergeben sich  $V = (2 \cdot 3)^3 = 216$  Varianten. Von diesen Varianten an kinematischen Ketten erfüllen allerdings einige die Bedingung nicht, einen Arbeitsraum auszubilden. Auch würden sich einige Varianten nur in der Bezeichnung unterscheiden und sind ansonsten identisch. Einige Beispiele zeigt das Bild 2.6.



**Bild 2.6** Variationsbeispiele von kinematischen Aufbauten mit drei Grundachsen

Die aktiven Gelenke werden durch Motoren angetrieben und die einzelnen Achsen bestimmen die Lage (Position und Orientierung) des Werkzeugarbeitspunktes TCP (*tool center point*) im Raum. Daraus leiten sich dann auch die Gebrauchseigenschaften für eine bestimmte Anwendung ab bzw. Maßnahmen zur kinematischen Aufrüstung (Handachsen).



Für die Bezeichnung der Achsen gilt nach VDI 2861:

X, Y, Z	Hauptlinearachsen parallel zu den Richtungen $x, y, z$ des Bezugskordinatensystems
U, V, W	Nebenachsen, vorzugsweise weitere Linearachsen
A, B, C	Hauptdrehachsen um die Achsen X, Y, Z des Bezugskordinatensystems
D, E, P	Nebenachsen, vorzugsweise weitere Drehachsen
Q, R, S, T	Bezeichnung für sonstige Achsen

### 2.2.2 Begriffe und Definitionen

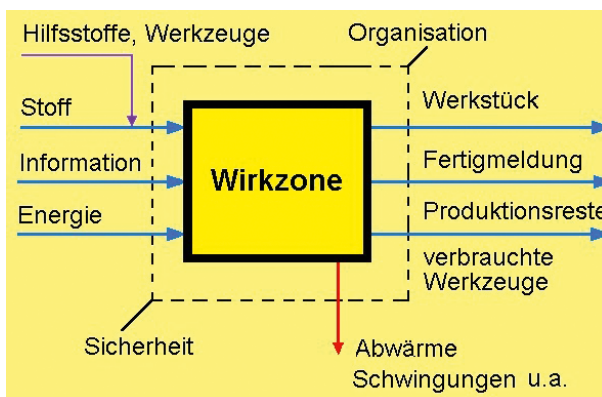
Zahlreiche Fachwörter markieren das Feld von Fabrikautomation und Robotertechnik und kommen auch in diesem Buch vor. Einige Begriffe sollen erläutert werden.

Soll ein fiktiver Fertigungsvorgang in allgemeiner Form betrachtet werden, kann man sich der „Wirkzone“ als Erklärungsmodell bedienen.



**Wirkzone** (*working zone*): abstrakte Darstellung einer beliebigen technologischen Operation. Es ist der Ort, an dem Stoff-, Energie- und Informationsfluss zusammengebracht werden, um am Stoff (Material, Halbzeug, Werkstück) mithilfe von Energie und Information eine Veränderung zu bewirken.

Einem Stoff wird somit mithilfe von Energie eine Information aufgeprägt, so wie es in Bild 2.7 in vereinfachter Fassung zu sehen ist.



**Bild 2.7** Modellhafte Darstellung eines technologischen Vorgangs als Wirkzone

Für die Realisierung bedarf es dazu jedoch vieler Funktionen. Nach Wirkungsbereichen gegliedert sind das:

- **Zeit:** Zyklusablauf, Lagern, Zwischenspeichern, Bunkern,
- **Ort:** Handhaben, Umschlagen, Übergeben, Transportieren, Weitergeben,
- **Quantität und Qualität:** Palettieren, Prüfen, Messen, Sammeln, Diagnostizieren,
- **Sorte:** Ordnen, Sortieren, Kommissionieren, Einrichten und Umrüsten, Identifizieren,
- **Gebrauchseigenschaften:** Bearbeiten, Montieren, Reinigen, Verpacken, Signieren.

Zur Bearbeitung eines Objekts werden wiederum weitere Funktionen erforderlich, wie z. B. das Spannen und Entspannen. Diese Funktionen fallen nun mehrfach an, denn es müssen Werkstücke, Werkzeuge und Vorrichtungen gespannt werden. Dabei können die jeweiligen **Spannmittel** sowohl manuell als auch automatisch betrieben werden.

Unabhängig von allen Automatisierungsbemühungen verbleiben auch noch etliche Funktionen beim Menschen, weil sie momentan nicht genügend sicher und zuverlässig automatisiert werden können oder weil das Aufwand-Nutzenverhältnis zurzeit dagegen spricht. Das sind häufig Funktionen der Überwachung, der Qualitätseinschätzung und Entscheidungsvorgänge bei komplexen Sachverhalten. Oft bleiben aber auch unattraktive, anspruchsarme und monotone körperlich schwere Tätigkeiten übrig.

Die klassische Form der Automatisierung war die **Einzweckautomation** (*dedicated automation*) der Massenproduktion in der Fließ- und Stückgutfertigung, deren charakteristisches Element häufig die automatische Sondermaschine ist. Und später ist es die automatische Transferlinie bis hin zur automatischen Fabrik, z. B. für die Herstellung von Kugellagern. Mit dem tayloristischen Prinzip der Arbeitsteilung konnten jedenfalls enorme Produktionssteigerungen erreicht werden. Bereits Ende der 1960er-Jahre baute die amerikanische Firma *Sylvania* z. B. eine automatische Fließlinie für die Erzeugung von Glühlampen mit einer Jahresproduktion in der Größe des USA-Bedarfs. Es war jedoch nicht möglich, solche Fließlinien ohne Weiteres auf ein anderes Sortiment umzurüsten.



**Automatisierung** (*automatization*): Gesellschaftlicher Prozess, in dessen Verlauf fortschreitend menschliche Tätigkeiten durch Funktionen künstlicher Systeme (Automaten, Roboter, Rechner) ersetzt werden. Die Automatisierungstechnik ist eine eigenständige technische Disziplin.

Im Bereich der Klein- und Mittelserie blieb der Automatisierungsgrad jedoch dürftig, weil die dazu erforderliche Flexibilität an Transferstraßen und Sondermaschinen nicht gegeben war und eine Fertigung großer Lose im Voraus zu unverträglich hohen

Lagerkosten geführt hätte. Heute kann man im Prinzip beliebig flexible Systeme mit hoher Produktivität (und dann auch hohen Anschaffungskosten) aufbauen.

Mit zunehmender Komplexität der technischen Strukturen wächst auch der Aufwand viel stärker an als die **Systemwirksamkeit**. Das verlangt, in Niveaustufen zu denken. Dabei wird nicht automatisiert, was technisch möglich ist, sondern was sich mit kurzen Amortisationszeiten wirtschaftlich vertreten lässt. Gestuft nach der Häufigkeit der Zielsetzung von Automatisierungsprojekten ergibt sich folgende Rangfolge:

- Erzielung von Kostensenkungen,
- Qualitätsverbesserungen,
- Produktivitätssteigerungen,
- Ersatzinvestitionen,
- Verbesserung der ergonomischen Zustände,
- Erweiterungsinvestitionen.

Der Qualitätsvorteil gewinnt dabei ständig an Bedeutung. Bei vielen Produkten spielt sich inzwischen ein harter Wettbewerb auf dem Gebiet der **Qualität** ab. Die menschliche Fehlerrate hat man z. B. bei der manuellen Montage mit  $1,8 \cdot 10^{-4}$  bis  $1,8 \cdot 10^{-3}$  analysiert. Automaten machen es besser.

Der öfters verwendete Begriff „Fabrikautomatisierung“ (Bild 2.8) soll deutlich machen, dass der Weg zum komplexen Einsatz der verfügbaren Automatisierungsmittel beschritten wird. Steuerungstechnisch geht man von einer hierarchischen 5-Stufen-Pyramide aus, gemäß eines Vorschlags des US-amerikanischen *National Bureau of Standard* (NBS). Der erreichte Stand der Automatisierung kann näherungsweise mit dem Automatisierungsgrad (*level of automation*) beurteilt werden. Was ist darunter zu verstehen?



**Automatisierungsgrad** (*level of automation*): Quotient aus der Menge der zum jeweiligen Prozess bereits automatisierten Funktionen zur Menge sämtlicher erforderlicher Funktionen.

Er kann als Maßzahl z. B. für die vergleichende Beurteilung von Lösungsalternativen verwendet werden, wenn man in der Betrachtungseinheit gleiche Maßstäbe ansetzt. Auch das noch erschließbare Potenzial an Rationalisierung wird sichtbar. Es gilt allgemein:

$$A^0 = \frac{\sum(F_{\text{aut}} \cdot P) \cdot 100}{\sum(F_{\text{aut}} \cdot P) + \sum(F_{\text{nichtaut}} \cdot P)} \% \quad (2.2)$$

$F_{\text{aut}}$  automatisierte Funktionen

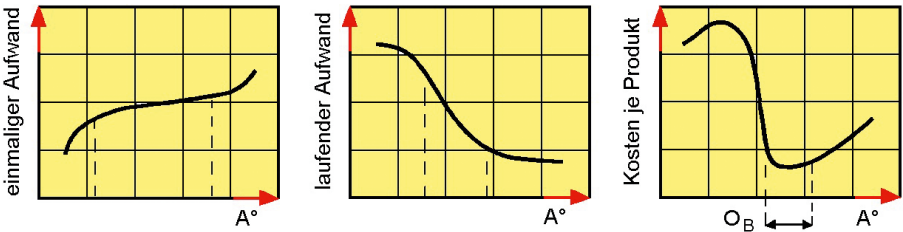
$F_{\text{nichtaut}}$  nicht-automatisierte Funktionen

$P$  Wichtungsfaktor (weil nicht alle Funktionen gleichwichtig sind)

		Automatisierungsbereiche und -ziele			
		Teilefertigung und Montage, diskontinuierlich	Fließverfahrenstechnik, kontinuierlich	Energiwirtschaft	Gebäudedetechnik
Automatisierungsmittel	Informationstechnik	Fabrikautomatisierung	Prozessautomatisierung	Energietechnik	Gebäudeautomatisierung
	Elektrotechnik, Sensorik				
	Maschinenbau, CNC-Technik, Robotik				
		Industriearomatisierung			

**Bild 2.8** Die Fabrikautomation umfasst die Stückgut- und auch einige Anteile der Fließgutfertigung

Je mehr Funktionen in einer Maschine durch eine Steuerung ausgelöst werden können, desto geeigneter ist die Maschine, um Fertigungsabläufe zu automatisieren (und desto teurer wird die Maschine!). Das Ziel besteht nun darin, den jeweils optimalen Automatisierungsgrad zu finden. Das ist jener, der unter Berücksichtigung des einmaligen und laufenden Aufwandes für die jeweilige Produktionsaufgabe die geringsten Gesamtkosten je Erzeugnis verursacht. Die geometrische Addition solcher Aufwandskurven wird in Bild 2.9 gezeigt. Der Bereich für einen empfehlenswerten Automatisierungsgrad resultiert letztlich aus dem nichtproportionalen Verhalten der Aufwandskurven.



**Bild 2.9** Bestimmung des Kostenminimums in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad  $A^\circ$

$O_B$  Bereich des optimalen Automatisierungsgrades  $A^\circ$

Mit dem Automatisierungsgrad steigt in der Regel auch der Integrationsgrad. Es lassen sich für die Fertigungseinrichtungen folgende Integrationsfälle angeben:

- Integration mehrerer Bearbeitungsstellen und damit technologischer Verfahren in eine Maschine mit dem Ziel, nach Möglichkeit die Werkstücke in einer Aufspannung und ohne zusätzliche Transportbewegungen fertigzustellen,
- Integration von Bewegungskomponenten wie Transportieren, Übergeben und Speichern in eine Maschine, mit dem Ziel, Bewegungen und die dazugehörigen Funktionsträger einzusparen,
- Integration von Daten verarbeitenden Einrichtungen mit der Tendenz zur Anreicherung mit Künstlicher Intelligenz, mit dem Ziel, die Fertigungssysteme schneller, besser, entscheidungsstabiler und letztlich klüger betreiben zu können.

Bei dieser Entwicklung spielt die Robotik (*robotics*) eine herausragende Rolle und geht künftig weit über den Bereich der Fertigungstechnik hinaus (Begriffe der Robotik siehe DIN EN ISO 8373).



**Robotik** (*robotics*): Robotertechnik, zu der man Entwurf und Berechnung, Herstellung, Steuerung von Robotern, Einsatz in Standard- und Problemlösungen, Erforschung von Steuerungsvorgängen bei Mensch und Maschine, Sensoren und Endeffektoren sowie deren Anwendung zählt.

Der Begriff „Robotik“ wurde 1942 vom Science-Fiction-Autor Isaak Asimov (1920 – 1992) erstmals in der Erzählung „*Runaround*“ verwendet.

Das Wort „Roboter“ taucht hingegen bereits 1921 erstmals im Theaterstück *R. U. R.* von Karel Čapek (1890 – 1938) auf. Sein Bruder Josef, ein Maler, hatte es ihm vorgeschlagen. Das Wort „Roboter“ hat seine etymologischen Wurzeln im Wort *robota*. In früher Zeit stand es in der tschechischen wie auch slowakischen Sprache allgemein für die Pflichtarbeit von Dienern und die Arbeit aller Sklaven in der Geschichte.



#### **Robotersystem** (*robot system*)

Zusammenfassung folgender Funktionen unter einem Dach:

- Gerätetechnik (Kinematik, Antrieb, Gelenkmodule, Achsverbindungen, Messsysteme),
- Steuerung (Rechnerkopplung, Interpolation, Variation von Koordinatensystemen),
- Programmierung (Sprachen, CAD-Daten, Punkt- und Bahnsteuerung, Prozessbeschreibung u. a.),
- Prozessführung (Geometrie- und Technologiedatenverarbeitung, Verknüpfung von Geometrie, Technologie, Steuer- und Regelstrategie),
- Endeffektor (Greifer, Werkzeuge, integrierte Sensorausstattung).

Roboter kann man als zur Handhabungstechnik (*handling engineering*) gehörig betrachten, selbst wenn zu beobachten ist, dass man inzwischen Industrieroboter auch als Basis für eine Werkzeugmaschine (Arbeitszelle) herrichtet, z. B. für das Fräsen (Hauptproblem: Genauigkeit). Die Handhabungsmaschinen sind dann **wertschöpfende** Werkzeuge.

Roboter lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten gliedern, wie z. B. nach den folgenden:

- Anwendungsbereich (Fabrik, Weltraum, Haushalt, Medizin u. a.),
- Generation (1., 2., 3. ...; steuerungstechnische Entwicklungsschritte),
- kinematischer Aufbau (Portalroboter, SCARA, Parallelroboter u. a.),
- Raumbeweglichkeit (ortsfest, mobil, tauchfähig, flugfähig u. a.),
- Baugröße und Tragkraft (Mikro-, Nanoroboter, Schwerlastroboter u. a.),
- Autonomie (nichtautonom, intelligentes Systemverhalten).

In erster Näherung wird **Autonomie** von Robotern durch das Zusammenspiel nachfolgender Systemkomponenten (nach Dillmann) charakterisiert:

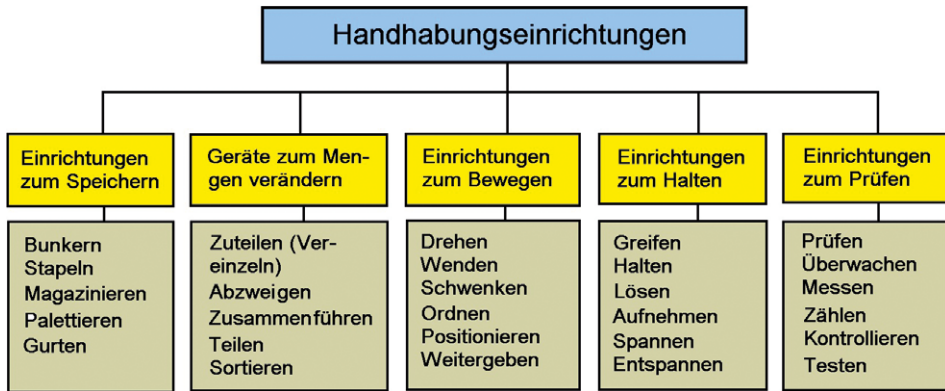
- selbsttätige Planung von Handhabungsfolgen und Aktionssequenzen unter Verwendung von Aufgabenbeschreibung, Planungswissen und Umweltdaten,
- automatische Ausführung von Aktionsplänen und Steuerung der Interaktion des Roboters mit der realen Umgebung,
- Überwachung der Ausführung der Pläne durch Herstellung von Wirkzusammenhängen zwischen Aktionen und erfassten Sensorsignalen sowie Erkennung von Konflikten, Fehlern und deren Behebung.

Zum Begriff der Handhabung, der ja Bezug zur menschlichen Hand nimmt: Bereits in der Antike hat man Griffe an Körben und dergleichen als „Handhabe“ bezeichnet. „*Fasse die Dinge an, wo sie tragbar sind*“ meinte der griechische Philosoph Epiktet (50 – 138 nach der Zeitenwende).



**Handhabungstechnik** (*handling technique*): Gesamtheit aller materiellen Mittel und Verfahren, die dazu dienen, Objekte im unmittelbaren Bereich eines Arbeitsplatzes insbesondere maschinell zu bewegen.

Begriffe und Funktionen der Handhabungstechnik sind in der VDI-Richtlinie 2860 (Montage- und Handhabungstechnik/Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole) enthalten. Begriffe und Gliederung der Greifertechnik kann man in der VDI-Richtlinie 2740 nachlesen. Eine Möglichkeit zur Einteilung der Handhabungseinrichtungen wird in Bild 2.10 vorgestellt [2.9].



**Bild 2.10** Geräte und Hauptfunktionen in der Handhabungstechnik

Eine wichtige und mitunter auch schwierige Anwendung von Robotern und anderen Handhabungseinrichtungen ist die Montage. Weil viele Bauteile zeitlich und räumlich exakt zusammengebracht werden müssen, kann man das als die „Hohe Schule“ der Handhabungstechnik bezeichnen.



**Montieren** (*assembly*): Gesamtheit aller Vorgänge, um geometrisch definierte Bauteile zu einem Objekt zusammenzusetzen, evtl. unter zusätzlicher Anwendung von formlosen Stoffen und des Fertigungsverfahrens Fügen.

Das Verfahren Fügen hat man in der DIN 8593 in neun Gruppen eingeteilt. Das sind die Verfahren Zusammensetzen, Füllen, An-/Einpresse, Fügen durch Urformen oder Umformen, Fügen durch Schweißen, Löten oder Kleben und das textile Fügen, wie z. B. Nähen.

Sinngemäß bezeichnet man dann das Zerlegen von Mehrkörpersystemen in Baugruppen und Einzelteile als **Demontieren**. Für das Montieren und Demontieren ist eine prozessfreundliche Gestaltung von Bauteilen sehr wichtig (siehe Abschnitt 5.9), um zu kostengünstigen und sicheren Lösungsvarianten zu kommen.

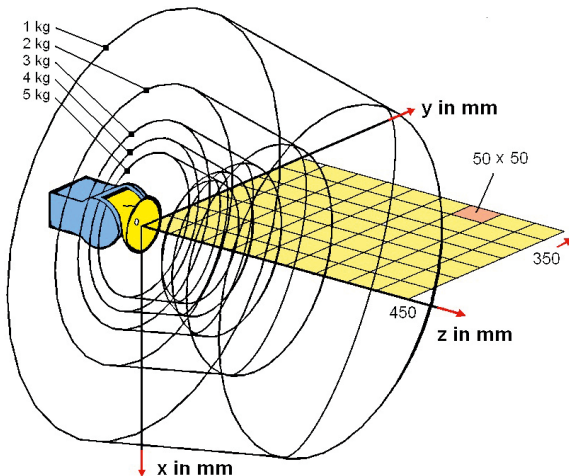
### 2.2.3 Leistungsmerkmale

Der Wert eines Robotersystems wird aus anwendungstechnischer Sicht durch Kenn-  
daten bzw. Leistungsmerkmale beschrieben. Diese sind bisher vor allem für Industrie-  
roboter ausführlich niedergelegt. Man braucht sie, um Roboter anforderungsgerecht  
auswählen zu können und auch für Vergleiche von Robotern unterschiedlicher  
Hersteller. Umfassende Darstellungen finden sich in der Norm DIN EN ISO 9283 [2.3].

Mechanische Kenngrößen und deren Prüfmerkmale enthält die VDI-Richtlinie 2861, Bl. 2 [2.4]. Danach lassen sich die Kenngrößen in vier Gruppen einteilen:

- **geometrische Kenngrößen** (mechanische Systemgrenzen, Raumaufteilung, Arbeitsbereich ...),
- **Belastungskenngrößen** (Nennlast, Nutzlast, Nennmoment, Nenn-Massenträgheitsmoment ...),
- **kinematische Kenngrößen** (Geschwindigkeit des Endeffektors, Beschleunigung, Überschwingweite, Ausschwingzeit, Verfahrzeit, Zykluszeit ...),
- **Genauigkeitsgrößen** (Wiederholgenauigkeit der Pose, Wiederholgenauigkeit der Bahn ...).

Die Belastungskenngrößen sind für die Auswahl eines Roboters besonders wichtig, aber nicht in einer Zahl darstellbar. Die Angaben beziehen sich meistens auf die Schnittstelle Anschlussflansch/Endeffektor. Die Nennlast kann von einem Roboter stets ohne Einschränkung bezüglich Geschwindigkeit und Beschleunigung bewegt werden. Die Nutzlast befindet sich aber an einer anderen Stelle. Deshalb geben die Roboterhersteller Belastungskennlinien an. Ein Beispiel wird in Bild 2.11 gezeigt. Man sieht, dass die zuträgliche Belastung mit dem Abstand vom Flanschmittelpunkt absinkt. Bleiben solche Vorgaben unbeachtet, geht das auf Kosten der Lebensdauer des Roboters.



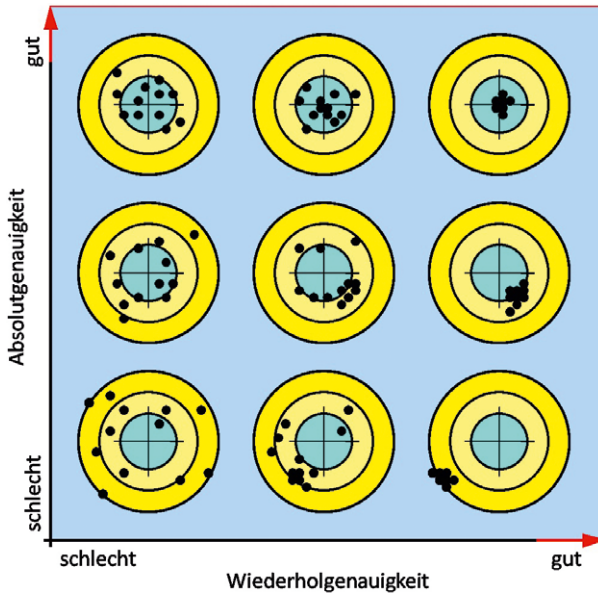
**Bild 2.11**

Beispiel für ein Traglastdiagramm für einen Industrieroboter mit 5 kg Nennlast

Für die Funktionalität ist u. a. die **Wiederholgenauigkeit** bei der Teach-in-Bahnprogrammierung ein wesentliches Gütekriterium. Sie kennzeichnet die Zielpunktabweichung  $\Delta s$  bei wiederholtem Anfahren. Typische Werte liegen zwischen  $\Delta s < \pm 0,02$  mm bei 10 kg Nennlast und  $\Delta s < \pm 0,2$  mm bei 150 kg Nennlast. Die Bahngenauigkeit ist die Ist-Soll-Bahn-Abweichung. Sie liegt bei den Industrierobotern zwischen  $\pm 0,1$  und  $\pm 2$  mm.



Die Wiederholgenauigkeit darf nicht mit der **Absolutgenauigkeit** verwechselt werden. Für die Anwendung von Robotern ist wichtig, wie genau ein programmierter Zielpunkt tatsächlich und wiederholt erreicht wird. Das Bild 2.12 zeigt einige „Trefferbilder“. Man sieht, dass es möglich ist, bei einer schlechten Absolutgenauigkeit trotzdem eine gute Wiederholgenauigkeit zu erreichen.



**Bild 2.12** Mögliche Genauigkeitsbilder bei Punktsteuerung; das Fadenkreuz stellt jeweils die Soll-Position dar

Welche **Störeinflüsse** sind es, die die Arbeitsgenauigkeit beeinflussen? Es sind:

- Gelenkspiele in Lagern und Führungen,
- elastische Verformungen unter statischer und dynamischer Belastung,
- Unterschiede in der Reibung bei verschiedenen Geschwindigkeiten,
- Spiele in Übertragungsgetrieben, z. B. Zahnspeil bei Stirnradgetrieben,
- begrenztes Auflösungsvermögen inkrementaler Wegmesssysteme,
- Temperaturschwankungen in Strukturelementen.

Weitere Kenngrößen sind z. B. Temperaturverhalten, Reparaturfähigkeit, Nutzungsdauer, technische Verfügbarkeit und Schallpegel.

Es gibt aber auch nicht messbare Kenngrößen. Dazu zählen u. a.

- Bedienkomfort,
- Programmieraufwand,