

Frank Schrödel
Mitja Echim

Autonome Systeme

Was Fahrzeuge aus der Robotik lernen können



HANSER

Schrödel / Echim
Autonome Systeme



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

Frank Schrödel
Mitja Echim

Autonome Systeme

Was Fahrzeuge aus der Robotik lernen können

HANSER

Über die Autoren:

Frank Schrödel ist Professor für Antriebs-, Automatisierungs- und Robotertechnik an der HS Schmalkalden. Dr.-Ing. Mitja Echim ist CEO der TOPAS Industriemathematik Innovation gGmbH (Transferzentrum für optimierte, assistierte, hoch-automatisierte und autonome Systeme).



Print-ISBN: 978-3-446-46968-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46969-3

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.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Kolbergerstraße 22 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

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

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © [shutterstock.com/Hakim](https://www.shutterstock.com/Hakim) Graphy

Satz: Frank Schrödel, Mitja Echim

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

All of the biggest technological inventions created by man - the airplane,
the automobile, the computer - says little about his intelligence, but
speaks volumes about his laziness – Mark Kennedy

Für Anna, Lea, Leni, Pauline, Ronja, Sophie sowie Alexander und Jarik
—— Frank Schrödel

Für Jari, Lian und Christiane
—— Mitja Echim

Inhalt

Vorwort	XI
Teil I Einführung	1
1 Einführung in die Robotik	3
1.1 Was sind Roboter und Automaten?	3
1.2 Roboterklassen und -typen	8
1.2.1 Industrieroboter	9
1.2.2 Serviceroboter	19
1.3 Sense-Plan-Act	24
2 Einführung in die automatisierte Fahrzeugführung	29
2.1 Automatisierte Fahrzeugführung vs. Robotik	29
2.2 Level der Autonomie	30
2.2.1 Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens	30
2.2.2 Vom assistierten zum autonomen Fahren	39
2.3 Grundaufbau eines AD-Systems	43
2.4 Komponenten mechatronischer Systeme	45
3 Entwicklungsmethoden komplexer Systeme	55
3.1 Vorgehensmodelle	55
3.1.1 Systems Engineering	65
3.1.2 Rapid Control Prototyping	67
3.1.3 Agiler Entwicklungsprozess	68
3.1.4 Frugalität	72
3.2 Methoden aus der Softwareentwicklung	74
3.2.1 Einheitliche Sprache	74
3.2.2 DevOps-Ansatz	77

3.3	Sicherheitsanalyse und Testverfahren	80
3.3.1	Funktionale Sicherheit	80
3.3.2	Simulation und Test.....	86
Teil II Theoretische Grundlagen.....		101
4	Mathematische und systemtheoretische Grundlagen	103
4.1	Notation.....	103
4.1.1	Mathematische Grundlagen.....	103
4.1.2	Signale und Systeme	105
4.2	Dynamische Systeme	111
4.2.1	Einführung	111
4.2.2	Stabilitätstheorie	113
4.2.3	Numerische Lösungsverfahren.....	117
4.3	Lineare Systeme.....	123
4.3.1	Zeitbereichsanalyse linearer Systeme	124
4.3.2	Frequenzbereichsanalyse linearer Systeme	143
4.3.3	Zeitdiskrete Darstellung linearer Systeme	155
4.4	Numerisches Lösen von Gleichungssystemen.....	161
4.4.1	Lineare Gleichungssysteme.....	161
4.4.2	Nichtlineare Gleichungssysteme.....	165
5	Grundlagen der Industriemathematik.....	173
5.1	Optimierung.....	173
5.1.1	Einführung	174
5.1.2	Lösung beschränkter Optimierungsprobleme	177
5.1.3	Numerische Lösung	180
5.2	Parameteridentifikation	184
5.2.1	Statische Parameteridentifikation	184
5.2.2	Dynamische Parameteridentifikation.....	192
5.3	Optimale Steuerung	201
5.3.1	Transformationen	203
5.3.2	Direkte Methoden	204
5.3.3	Weiterführende Gedanken.....	207
6	Modellbildung mechatronischer Systeme.....	211
6.1	Modellierung	211
6.1.1	Grundidee der Modellierung	211
6.1.2	Theoretische Modellierung	225

6.2	Kinematikmodellierung	235
6.2.1	Kinematik von stationären Robotern.....	235
6.2.2	Kinematik von mobilen Robotern/Fahrzeugen	251
6.3	Dynamikmodellierung.....	263
6.3.1	Differentielle Kinematik und Dynamik von stationären Robotern.....	263
6.3.2	Dynamik von mobilen Robotern/Fahrzeugen	274
7	Regelung mechatronischer Systeme	293
7.1	Grundgedanke einer Steuerung	293
7.2	Grundgedanke einer Regelung.....	301
7.3	Reglersynthese im Frequenzbereich	305
7.4	Reglersynthese im Zustandsraum	309
7.4.1	Polplatzierung	309
7.4.2	Vorfilter	312
7.4.3	Ausgangsrückführung	313
7.4.4	LQ-Regler.....	315
7.4.5	Modellprädiktive Regelung	319
Teil III	Komponenten eines AD-Systems.....	327
8	Wahrnehmung und Interpretation	329
8.1	Messtechnikgrundlagen	329
8.2	Zustandsschätzung.....	339
8.2.1	Luenberger-Beobachter	339
8.2.2	Kalman-Filter	343
8.3	Fahrzeuglokalisierung.....	361
8.3.1	Zustandsmodell	361
8.3.2	Zustandsübergangs- und Sensormodelle.....	366
8.3.3	Sensordatenfusion mittels Kalman-Filter	371
8.4	Umfeldkartierung.....	380
8.4.1	Grid-Mapping	381
8.4.2	Abdeckung großer Gebiete	390
8.4.3	Umgang mit Dynamik in der Umgebung	392
8.5	Verfolgung dynamischer Objekte.....	394
8.5.1	Objekterkennung.....	394
8.5.2	Objektverfolgung mittels Kalman-Filter	398
8.5.3	Prädiktion	404
8.6	Mitfühlende und kollaborierende Roboter.....	408

9	Planung und Entscheidungsfindung	415
9.1	Systemarchitektur	415
9.2	Strategische Ebene	418
9.2.1	Einleitung, Grundidee und Annahmen	420
9.2.2	Mathematische und informationstechnische Grundlagen	420
9.2.3	Suchalgorithmen für Graphen	422
9.3	Taktische Ebene	434
9.3.1	Vorverarbeitung	435
9.3.2	Diskrete taktische Planung	435
9.3.3	Kontinuierliche taktische Planung	445
9.3.4	Reinforcement Learning für Entscheidungsfindung	455
9.4	Analogie von Planungsaufgaben mobiler und stationärer Roboter	458
10	Regelungsverfahren der Robotik	461
10.1	Antriebsregelung	461
10.2	Regelungsverfahren für Serviceroboter	472
10.2.1	Längsdynamikregelung	472
10.2.2	Querdynamikregelung	482
10.2.3	Modellprädiktive Dynamikregelung	489
10.3	Regelungsverfahren für Industrieroboter	493
10.3.1	Modellprädiktive Gelenkwinkelregelung	493
10.3.2	Selbstoptimierende Robotiksysteme	502
11	Relevanz für die Zukunft und Ausblick	511

Vorwort

Die Mobilitätswende und die damit verbundenen technologischen Innovationen, wie selbstfahrende Fahrzeuge, sind in aller Munde. Insbesondere in den letzten Jahrzehnten gibt es geradezu einen Hype um diesen Technologiesektor. Wichtig zu verstehen ist jedoch, dass viele, für die Automatisierung selbstfahrender Fahrzeuge verwendete Konzepte, keinesfalls erst im 21. Jahrhundert entwickelt worden sind. So basieren viele dieser Konzepte auf etablierten Methoden der Automatisierungstechnik, Industriemathematik und Robotik. Daher wagt das vorliegende Buch den Spagat, sowohl diese etablierten Konzepte vorzustellen, als auch aktuelle Entwicklungen im Bereich autonomer Systeme, wie selbstfahrende Fahrzeuge und moderne Robotikanwendungen, zu beleuchten.

Im vorliegenden Buch wird ein solides Grundlagenwissen im Feld der Funktions- und Algorithmenentwicklung für autonome Systeme, wie selbstfahrende Fahrzeuge und moderne Robotikanwendungen, vermittelt. Hierbei sind die verwendeten Ansätze geprägt von etablierten Methoden aus der Automatisierungstechnik, Industriemathematik und Robotik.

Dieses Buch richtet sich an alle technisch Interessierten, die verstehen wollen, welche Methoden, Algorithmen sowie Technologien eingesetzt werden, um selbstfahrende Fahrzeuge und intelligenter Robotikanwendungen zu realisieren. Konkret kann dieses Buch sowohl für Bachelor- als auch für Masterstudierende ein treuer Begleiter durch das Ingenieurs-, Informatik-, Industriemathematik- und Naturwissenschaftsstudium sein. Zudem kann das Buch auch als wertvolles Nachschlagewerk im Berufsalltag für Entwicklungsingenieure im Bereich der Funktionsentwicklung neuartiger Fahrerassistenzfunktionen und intelligenter Robotikanwendungen dienen.

Das Buch gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil werden die Grundlagen der Robotik sowie selbstfahrender Fahrzeuge erläutert. So wird beleuchtet, welchen Funktionsumfang diese Systeme haben, sowie aus welchen Hard- und Softwarekomponenten diese aufgebaut sind. Zudem werden nützliche Hinweise im Rahmen von Vorgehensmodellen vermittelt, welche bei der Bearbeitung von Funktionsentwicklungsprojekten zum Einsatz kommen.

Der zweite Teil des Buches widmet sich den theoretischen Grundlagen – insbesondere den mathematischen und algorithmischen Grundlagen – die das Rückgrat moderner Robotiksysteme und selbstfahrender Fahrzeuge bilden. Der Fokus liegt hierbei auf den systemtheoretischen Grundlagen, der Modellbildung sowie der Regelung.

Abschließend werden diese Grundlagen im dritten Teil des Buches zur Anwendung gebracht. So wird konkret gezeigt, wie die zuvor erläuterten Grundlagen zur Wahrnehmung, Entscheidungsfindung und Planung sowie zur Regelung von modernen Robotiksystemen und selbstfahrenden Fahrzeugen eingesetzt werden können.

Am Ende jedes Kapitels des Buches wird auf relevante Literatur verwiesen, auf welcher die einzelnen Kapitel basieren und welche für ein vertiefendes Verständnis der Inhalte genutzt werden kann. Ebenso verfügt jedes Kapitel über eine Sammlung von Übungsaufgaben, welche ebenfalls zum Vertiefen der besprochenen Inhalte einladen.

Wichtige Kerninhalte des Buches sind in Form von Steckbriefen und Anwendungsbeispielen zusammengefasst, was das Nachschlagen entsprechender Inhalte erleichtert. Ebenso sind vielfältige QR-Tags den einzelnen Kapiteln angefügt, welche auf Videomaterial entsprechender Robotiksysteme und selbstfahrender Fahrzeuge hinführen. Diese sollen das Verinnerlichen der Inhalte des Buches vereinfachen und die Lektüre kurzweilig gestalten.

Viele Ideen und Konzepte dieses Buches sind innerhalb gemeinsamer Projekte mit der Hochschule Schmalkalden, der TOPAS Industriemathematik Transfer GmbH und der IAV GmbH entstanden. Wir möchten uns an dieser Stelle für die starke Unterstützung der beteiligten Mitarbeiter bedanken.

Ebenso möchten wir uns ausdrücklich für die überwältigende Unterstützung von Prof. Dr.-Ing. Jens Jäkel und Dr. Regina Kobes-Schrödel bedanken, welche nie müde wurden, uns mit kritischen Fragen eine Weiterentwicklung des Buches zu ermöglichen.

Ebenso bedanken wir uns von ganzem Herzen bei unseren Lehrstuhlmitarbeitern, welche uns immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

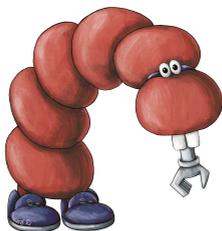
Vor allem geht unser Dank an unsere Familien, welche mit viel Unterstützung, Geduld und Nachsicht überhaupt erst ermöglichten, dieses Buch entstehen zu lassen.

Unser größter Dank gebührt jedoch unserem geschätzten Kollegen und wertvollen Freund, Prof. Dr.-Ing. Rick Voßwinkel. Sein unermesslicher Beitrag hat dieses Buchprojekt erst möglich gemacht – ohne ihn wäre es nicht zu realisieren gewesen!

Frank Schrödel und Mitja Echim

März 2025

Euch gefällt das Thema und ihr wollt mehr erfahren? Einen Einblick in unsere aktuellen Entwicklungsarbeiten aus dem Themenkomplex autonomer Systeme könnt ihr unter folgenden Link gewinnen. Viel Spaß!



TEIL I

Einführung

1

Einführung in die Robotik

Bevor wir tiefer in das Thema selbstfahrender Fahrzeuge einsteigen, möchten wir in diesem Kapitel eine kompakte Einführung in das Themengebiet der Robotik geben. Hierbei werden die wichtigsten Begriffsdefinitionen erläutert, verschiedene Robotertypen eingeführt und vielfältige Anwendungsgebiete von modernen Robotersystemen dargestellt.

■ 1.1 Was sind Roboter und Automaten?

Die Disziplin der Automatisierungstechnik beinhaltet zwei große technische Aufgabenfelder: die Prozessüberwachung und die Prozessführung. Hierbei umfasst die **Prozessüberwachung** Themen wie Messen, Speichern, Analysieren, Visualisieren und Assoziieren (Zuordnung der Messdaten zu dem entsprechenden Sensor) wichtiger Prozessgrößen. Dabei können die Prozessgrößen sowohl direkt als auch indirekt (mittels mathematischer Modelle) erfasst werden. Bei der **Prozessführung** handelt es sich um Methoden zur gezielten Beeinflussung von technischen Prozessen. Diese Beeinflussung kann unter anderem darin bestehen, sicherzustellen, dass die Prozessschritte in der richtigen Reihenfolge ablaufen. Zum anderen kann Beeinflussung bedeuten, dass einzelne wichtige Prozessgrößen (trotz Störungen) auf ihren Sollwerten gehalten werden. Somit wird ersichtlich, dass zur Realisierung einer Prozessautomatisierung sowohl geeignete Eingriffsmöglichkeiten zur Prozessbeeinflussung als auch Überwachungsmöglichkeiten wichtiger Prozessgrößen bereitgestellt werden müssen.

Wenn Tätigkeiten, die bisher von Menschen manuell ausgeführt werden mussten, von Maschinen realisiert werden, ist dies nicht zwingend gleichzusetzen mit einer Prozessautomatisierung. Der Entwurf und die Implementierung von technischen Abläufen und Verfahren, die manuelle Tätigkeiten ersetzen, wird als **Mechanisierung** bezeichnet. Die hierbei entstehenden Maschinen ersetzen körperliche durch maschinelle Tätigkeiten. Auf Kommando laufen dann die zuvor von Menschen ausgeführten Prozesse selbstständig ab. Der Steuereingriff, der die (Teil-)Prozesse zum richtigen Zeitpunkt in Gang setzt, wird weiterhin von Menschen durchgeführt. Darauf aufbauend sorgt die **Automatisierung** für eine eigenständige Steuerung der Prozesse, welche die mechanisierten Teilprozesse aktiviert und überwacht.

Die mechanisierten Abläufe werden nun nach vorgegebenen Programmen selbstständig abgearbeitet. Die Begriffe der Mechanisierung und Automatisierung werden oft im Zusammenhang mit den verschiedenen industriellen Revolutionen verwendet, welche im Folgenden, kurz charakterisiert sind:

- **1. Industrielle Revolution** = Mechanisierung
Bspw.: Einsatz der Dampfmaschinen
Ende des 18. Jahrhunderts gestartet
- **2. Industrielle Revolution** = Elektrifizierung
Bspw.: Einsatz der Fließbandfertigung
Ende des 19. Jahrhunderts gestartet
- **3. Industrielle Revolution** = Automatisierung in der Produktion
Bspw.: Einsatz von Industrierobotern
Gegen 1970 gestartet
- **4. Industrielle Revolution** (Industrie 4.0) = Vernetzung der Produktionsanlage
Bspw.: Bildung eines selbstoptimierenden Gesamtsystems
Im 21. Jahrhundert gestartet
- **5. Industrielle Revolution** (Industrie 5.0) = Kollaborative Robotik und kundenspezifische Massenproduktion
Bspw.: Entwicklung neuer, menschzentrierter Robotikanwendungen
2025 in der inhaltlichen Ausgestaltung befindlich

Im Allgemeinen werden Maschinen mit gesteuerten Arbeitsabläufen als Automaten bezeichnet. Das vorliegende Buch beschäftigt sich mit einer ganz besonderen Klasse von Automaten, den **Robotern**. Der Begriff Roboter ist von dem slawischen Wort „robota“ abgeleitet und bedeutet so viel wie schwere Arbeit oder Zwangsarbeit. Bild 1.1 gibt einen ersten Überblick über die große Spannweite von aktuellen Robotikanwendungen.

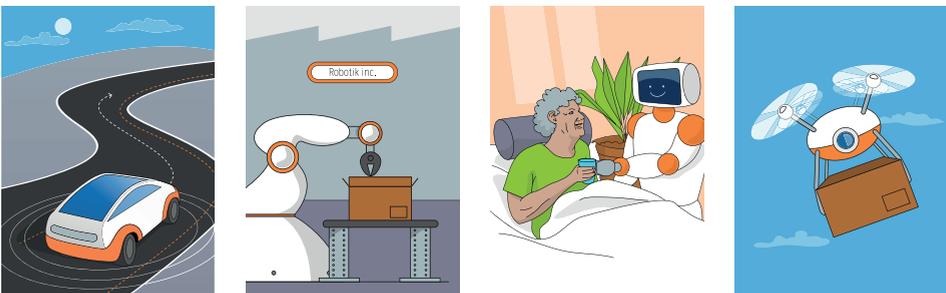


Bild 1.1 Anwendungsgebiete von Automatisierung und Robotik

Zur genaueren Erläuterung des Begriffs Roboter betrachten wir zunächst die Definition des Robot Institute of America (1979). Demzufolge definiert sich ein Roboter wie folgt.



Definition 1.1 (Roboter-Definition des Robot Institute of America). Ein Roboter ist ein programmierbarer, multifunktionaler Manipulator, der dazu dient, Material, Teile, Werkzeuge oder spezielle Geräte durch verschiedene programmierte Bewegungen zu bewegen, um eine Vielzahl von Aufgaben zu erfüllen.

In dieser Definition wird erst einmal allgemein beschrieben, was unter dem Begriff Roboter zu verstehen ist. Aufgrund der weit gefassten Definition lässt sich erahnen, dass Roboter unterschiedliche Aufgaben ausführen können. Um diese unterschiedlichen Aufgabengebiete bestmöglich bedienen zu können, haben sich in den letzten Jahrzehnten sehr unterschiedliche Robotertypen entwickelt, wie Staubsaugroboter, fahrerlose Transport- und Logistiksysteme oder Industrieroboter, vgl. Bild 1.1. Die derzeit wohl kommerziell interessanteste Roboterklasse ist die der Industrieroboter. Nach der VDI-Richtlinie 2860 sind diese wie folgt definiert.



Definition 1.2 (Industrieroboter-Definition nach VDI-Richtlinie 2860). Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolgen und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar oder sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen. Somit können wir Roboter als Unterklasse von Automaten verstehen.



Funfact: Humanoide Roboter werden als Androiden bezeichnet. Handelt es sich um ein Mischwesen aus lebendigem Organismus und Roboter, werden diese Cyborg genannt.

Im Laufe der Menschheitsgeschichte hat die Technologie stets Wege gefunden, unser Leben zu erleichtern, unsere Arbeit zu optimieren und die Grenzen dessen, was möglich ist, zu erweitern. Die rasante Entwicklung in den Bereichen Automatisierung und Robotik stellt einen solchen Meilenstein dar, der darauf abzielt, die **Menschheit zu unterstützen, anstatt sie zu ersetzen**. Diese Systeme finden in einer Vielzahl von Anwendungen Verwendung, von der Fertigungsindustrie über die medizinische Forschung bis hin zu gefährlichen Umgebungen wie Nuklearanlagen oder dem tiefen Meer. Ihr Ziel ist es, Arbeiten zu übernehmen, die für Menschen gefährlich, ermüdend oder schlichtweg unmöglich sind, und dabei stets die Sicherheit und das Wohlbefinden des **Menschen in den Mittelpunkt** zu stellen.



Bild 1.2 5th Avenue in New York im Jahr 1900 (links) und 1913 (rechts)– (Fotos aus https://www.archives.gov/exhibits/picturing_the_century/newcent/newcent_img1.html und <https://www.loc.gov/item/2014691098/> übernommen)

Der Übergang von Pferdekutschen zu Automobilen innerhalb von nur 13 Jahren – ein bemerkenswert kurzer Zeitraum in der Geschichte – symbolisiert nicht nur den Fortschritt der Technologie, sondern auch eine **tiefgreifende Veränderung in der Arbeitswelt** und im alltäglichen Leben der Menschen. Während im Jahr 1900 noch zahlreiche Aufgaben rund um die Pflege und Versorgung der Pferde sowie die Entsorgung ihrer Hinterlassenschaften anfielen, wurden diese mit dem Aufkommen der Automobile überflüssig. Doch diese Veränderung führte nicht zu einem Verlust an Arbeitsplätzen, sondern zur Schaffung neuer Tätigkeitsfelder, die eng mit der neuen Technologie verbunden waren.

Ein Beispiel für einen Beruf, der durch diese technologische Entwicklung entstand, ist der des Automobilmechanikers. Mit der zunehmenden Verbreitung von Autos wuchs der Bedarf an Fachkräften, die Wartung, Reparaturen und Verbesserungen an diesen komplexen Maschinen durchführen konnten. Dieser Beruf ist bis heute von großer Bedeutung, da er sich stetig weiterentwickelt und an die neuesten technologischen Fortschritte anpasst. Ein weiteres Beispiel ist die Rolle des Tankwarts, der mit der Einführung von Benzin- und später Dieselfahrzeugen ins Leben gerufen wurde. Tankstellen mussten errichtet und betrieben werden, um den neuen Kraftfahrzeugen Energie zu liefern. Auch wenn sich die Rolle des Tankwarts in vielen Ländern gewandelt hat, etwa durch die Einführung von Selbstbedienungstankstellen, bleibt die Versorgung der Fahrzeuge mit Energie eine zentrale Aufgabe, die im Zuge der Elektromobilität erneut an Bedeutung gewinnt.

Diese Beispiele verdeutlichen, dass der Fortschritt in der Automatisierung und Robotik nicht zwangsläufig zum Verlust von Arbeitsplätzen führt, sondern zur **Evolution und Entstehung neuer Berufe**. Die Technologie ersetzt Aufgaben, nicht aber den Menschen selbst. Vielmehr schafft sie Möglichkeiten für neue Arten von Tätigkeiten, die Anpassungsfähigkeit, Lernbereitschaft und Innovationsgeist erfordern. Sie eröffnet Perspektiven für Berufe, die vorher nicht denkbar waren und trägt so zu einer dynamischen Entwicklung der Arbeitswelt bei, die sowohl Herausforderungen als auch Chancen mit sich bringt.

Die Relevanz dieser Technologien wird weiter durch den **Fachkräftemangel** und den **demografischen Wandel** in Deutschland und Europa unterstrichen. Mit einer alternden Bevölkerung und einem gleichzeitigen Rückgang der Arbeitskräfte in vielen Sektoren bieten autonome Systeme und Roboter eine wertvolle Ressource, um Lücken zu schließen und die Produktivität zu erhalten oder sogar zu steigern. Sie erlauben es, die Arbeitswelt menschenwürdiger zu gestalten, indem sie monotone, gefährliche oder hochpräzise Tätigkeiten übernehmen, für die ein hohes Maß an Aufmerksamkeit über lange Zeiträume erforderlich ist.

Roboter und automatisierte Systeme sind nicht nur in der Lage, Aufgaben mit einer Präzision und Ausdauer auszuführen, die für Menschen unerreichbar sind, sondern sie tragen auch dazu bei, die Qualität und Konsistenz der Produktion zu verbessern. Doch trotz ihrer Fähigkeiten bleibt der Mensch unersetzlich. Menschen sind notwendig für die Überwachung, Führung und Optimierung dieser Systeme, für die strategische Planung und für die Innovation und Weiterentwicklung der Technologien selbst.

In diesem Sinne ist der Einsatz von Automatisierung und Robotik ein Aufruf zur Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine, wobei der Mensch stets im Mittelpunkt steht. Die Technologie dient als Werkzeug, das unsere Fähigkeiten erweitert, uns vor Gefahren schützt und uns ermöglicht, unsere Zeit und Energie auf die kreativen, strategischen und zwischenmenschlichen Aspekte unserer Arbeit und unseres Lebens zu konzentrieren.

So wie die Automobile einst die Pferdekutschen auf den Straßen von New York ablösten, ohne die Notwendigkeit der Mobilität selbst zu ersetzen, so sollen auch autonome Systeme und Roboter unsere Werkzeuge und Helfer sein – erweitert um die Präzision und Ausdauer der Maschine, aber geleitet von der Weisheit und dem Einfühlungsvermögen des Menschen.

Generell unterscheiden wir bei Betrachtung der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine verschiedene Level der Automatisierung. Je nach Automatisierungslevel ändert sich die Aufgabenzuständigkeit von Mensch und Automatisierungssystem.



Definition 1.3 (Schwach-automatisierter Prozess). Im Fall eines schwach-automatisierten Prozesses sind alle Automatisierungsfunktionen und Regelkreise über den Menschen geschlossen. Der Mensch übernimmt die Fernüberwachung von Prozessgrößen und die Fernbetätigung von Stellgliedern. Das HMI (Human-Machine Interface, dt.: Mensch-Maschine-Schnittstelle) verfügt über eine starke Kopplung mit dem Prozess. Das System ist generell nicht ohne den Menschen funktionsfähig. ■



Definition 1.4 (Hoch-automatisierter Prozess). Bei Prozessen mit einem hohen Automatisierungsgrad sind die Automatisierungsfunktionen und Regelkreise über technisch realisierte Regelkreisalgorithmen geschlossen. An das HMI werden Zustandsmeldungen aus- und Sollwerte eingegeben. Der Mensch kann somit den Prozess nach eigenen Vorgaben planen, führen und optimieren. Das HMI ist weiter vom Prozess entfernt als bei der schwachen Prozessautomatisierung (lose Prozesskopplung). Das System ist im (unoptimierten) Normalbetrieb ohne den Menschen funktionsfähig. ■



Definition 1.5 (Autonomer Prozess bzw. Autonomes System). Von autonomen Systemen wird gesprochen, wenn keinerlei Bedieneingriffe vom Menschen notwendig sind und das System ohne eine detaillierte Programmierung ein vorgegebenes Ziel selbstständig und an die Situation angepasst erreichen kann. Autonom ist in diesem Zusammenhang nicht gleichbedeutend mit eigenverantwortlich. Hierbei ist das HMI weit vom Prozess entfernt und der Prozess ist im Normalfall ohne menschlichen Eingriff voll funktionsfähig. ■

Ein Beispiel für einen autonomen Prozess sind vernetzte Fahrzeuge, welche unübersichtliche Verkehrssituationen durch Informationsaustausch untereinander meistern können. Lediglich Bedieneingriffe vom Menschen sind bei autonomen Systemen nicht erlaubt. HMIs werden auch nicht mehr benötigt, da das System selbstständig Entscheidungen treffen und entsprechend reagieren kann. Somit sind bei der Realisierung von autonomen Prozessen die Regelkreise über technische Mittel geschlossen. Die Bedieneingriffe erfolgen zum Starten/Stoppen des Prozesses sowie bei der Auswahl von Verfahrensvarianten (strategische Entscheidungen) und in Sonderfällen. Das HMI beschreibt den Systemzustand und die gewählte Strategie. Somit ist das HMI weit vom Prozess entfernt (schwache Kopplung). Im Normalfall ist der Prozess allein voll funktionsfähig.

Wenn der Mensch den Prozess führen, optimieren und warten soll, dann müssen Mensch und Automatisierung als Team agieren und funktionieren, analog zu den Zielen der fünften industriellen Revolution.

Eine besondere Herausforderung stellt in diesem Kontext das enge Zusammenwirken von Industrierobotern und Menschen dar. Denn aufgrund ihres großen Gewichts, verbunden mit ihrer großen Masse und Geschwindigkeit, geht ein erhebliches Gefahrenpotenzial von Industrierobotern aus. Die Entwicklung einer hierfür optimierten Arbeitswelt bringt große Herausforderung mit sich. Wichtige Begriffe aus diesem Bereich werden in der nachfolgenden Definition aufgeführt.



Definition 1.6 (Kooperation vs. Kollaboration). Die enge Zusammenarbeit von Menschen und Robotern in derselben Umgebung ohne Barrieren wirft die Frage auf, wie sicher sie ist und wie sie erreicht werden kann. Um sich dieser Frage zu nähern, ist es zunächst wichtig, den „Grad“ dieser Zusammenarbeit zu definieren. Je nach dem Grad der Zusammenarbeit werden spezifische Systemanforderungen (z. B. Sicherheitsanforderungen) festgelegt.

Koexistenz: Mensch und Roboter haben einen gemeinsamen Arbeitsbereich. Beide agieren unabhängig voneinander.

Kooperation: Mensch und Roboter arbeiten an unterschiedlichen Teilaufgaben des Produktes oder Prozesses. Dies geschieht im selben Arbeitsbereich. Die Erarbeitung kann dabei sequentiell oder parallel erfolgen.

Kollaboration: Menschen und Roboter arbeiten parallel und gemeinsam an einem Teil des Endproduktes bzw. Prozesses.

Es gibt Aufgaben, bei denen eine enge Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern möglich und manchmal auch notwendig ist. Solche Roboter, die in der Industrie mit dem Menschen zusammenarbeiten, werden als kollaborative Roboter oder kurz als Cobots bezeichnet. Die Zusammenarbeit zwischen Robotern und Menschen bietet den Vorteil, dass sie die Flexibilität menschlicher Arbeiter, adäquat auf die jeweiligen Gegebenheiten zu reagieren, mit der Präzision und Wiederholgenauigkeit von Robotern bei einer bestimmten Aufgabe verbindet.

■ 1.2 Roboterklassen und -typen

Wie bereits die Begriffsdefinitionen erahnen lassen, existiert eine Vielzahl verschiedener Robotertypen, siehe Bild 1.3. Dies wird auch deutlich, wenn wir eine moderne Industrie-4.0-Anwendung genauer betrachten. Im Kontext von Industrie 4.0 gibt es vielfältige Einsatzpotenziale für Roboter: Logistikeroboter, die Materialien zwischen den einzelnen Bearbeitungsstationen transportieren, sowie Industrieroboter, die an den einzelnen Bearbeitungsstationen bspw. die Produktfertigung vornehmen. Im Folgenden finden sich Steckbriefe zu weitverbreiteten Robotertypen.

Diese Steckbriefe enthalten eine kurze Erläuterung der jeweiligen Robotertypen einschließlich der Vor- und Nachteile sowie der jeweiligen Anwendungsgebiete. Bevor wir jedoch die einzelnen Steckbriefe vorstellen, clustern wir die nachfolgend betrachteten Roboter in zwei Oberkategorien: Industrieroboter und Serviceroboter, welche nachfolgend vorgestellt werden.

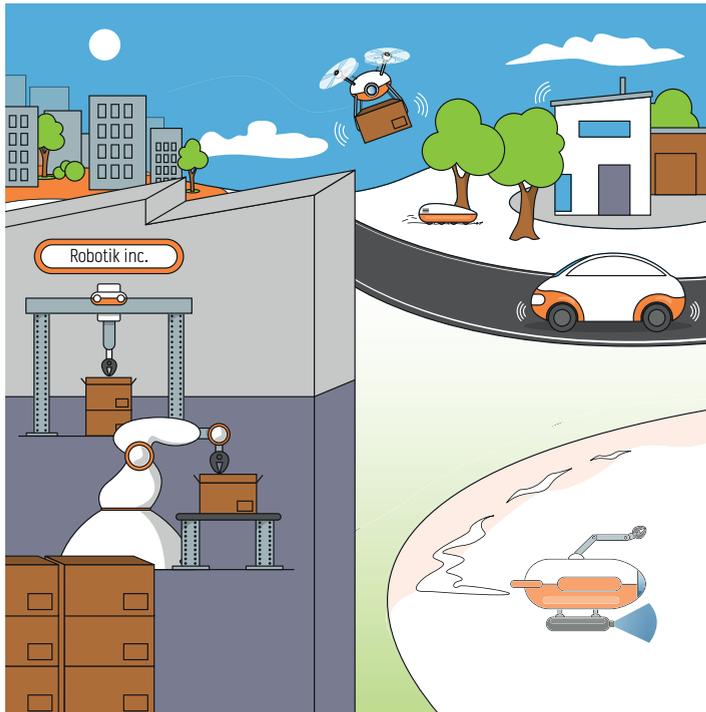


Bild 1.3 Industrielle Anwendungsfelder automatisierter Robotersysteme

1.2.1 Industrieroboter

Die Klasse der Industrieroboter findet bereits heute vielfältigen Einsatz in der Produktion. Der mit Abstand größte Einsatzbereich von Industrierobotern in Deutschland ist die Automobilproduktion. Industrieroboter haben einige Eigenschaften, welche sie von anderen Robotern, insbesondere Servicerobotern, unterscheiden. Diese sind im Folgenden näher beschrieben.

Flexibilität: Industrieroboter ein und derselben Baureihe eignen sich im Allgemeinen für unterschiedliche Einsatzzwecke. So könnte prinzipiell derselbe Roboter lackieren, schweißen, schneiden und vieles mehr. Die konkrete Anwendung wird dabei durch den Arbeitsraum und die zu handhabende Last sowie den verwendeten Endeffektor bzw. das installierte Werkzeug und die Programmierung bestimmt.

Frei programmierbar: Um die genannte Flexibilität zu erreichen, sind Industrieroboter vom Anwender frei programmierbar. Das bedeutet allerdings, dass die einzelnen Arbeitsabläufe in Form eines Programms von dem jeweiligen Anwender oder Installateur definiert werden müssen.

Kommunikation mit Steuerung: Industrieroboter kommunizieren einzig mit einer Steuerung, über die entsprechende Sensorsignale ausgewertet und die implementierten Arbeitsabläufe koordiniert werden. Die Kommunikation mit dem Nutzer erfolgt daher nur mittelbar über die Steuerung.

Sicherung durch äußere Maßnahmen: Insbesondere um schwere Arbeiten zu verrichten (Heben von schweren Lasten oder Verwenden schwerer Werkzeuge), benötigen Industrieroboter ein hohes Eigengewicht und Steifigkeit, um die notwendige Genauigkeit zu realisieren. Wenn zügig gearbeitet werden soll, haben sie neben einer hohen Quetschgefahr auch eine hohe (kinetische) Energie und stellen somit eine immense Gefahr für Personen in ihrem Arbeitsbereich dar. Deshalb werden Industrieroboter meist durch äußere Maßnahmen, wie Sicherheitszäune, gesichert. Daher wird oft versucht, den Arbeitsbereich von Menschen und Industrierobotern strikt zu trennen.

Feste Installation: Die zuvor genannten Aspekte, wie Eigengewicht und die Notwendigkeit von Sicherungsmaßnahmen, führen dazu, dass Industrieroboter in klassischen Anwendungen fest installiert sind.

Die eben beschriebenen Eigenschaften dienen nur als Richtwerte und können im konkreten Fall auch nur teilweise erfüllt sein. Sie bilden allerdings eine Art „gemeinsamen Nenner“ zur Charakterisierung dieser Art der Automaten.

Die Bedeutung von Industrierobotern für die Weltwirtschaft wird durch die **enormen Wachstumsraten**, im Bezug auf den Absatz in den letzten Jahren sowie den prognostizierten Absatz in den kommenden Jahren, ersichtlich, vgl. Bild 1.4.

Dabei sind **Handhabungsaufgaben** der größte Anwendungsbereich und verzeichnen auch weiterhin die größte Wachstumsrate. Neuartige Handhabungsaufgaben, bspw. im Kontext von Industrie 4.0, sind verbunden mit immer anspruchsvoller werdenden Anforderungen an die ausführenden Industrieroboter.

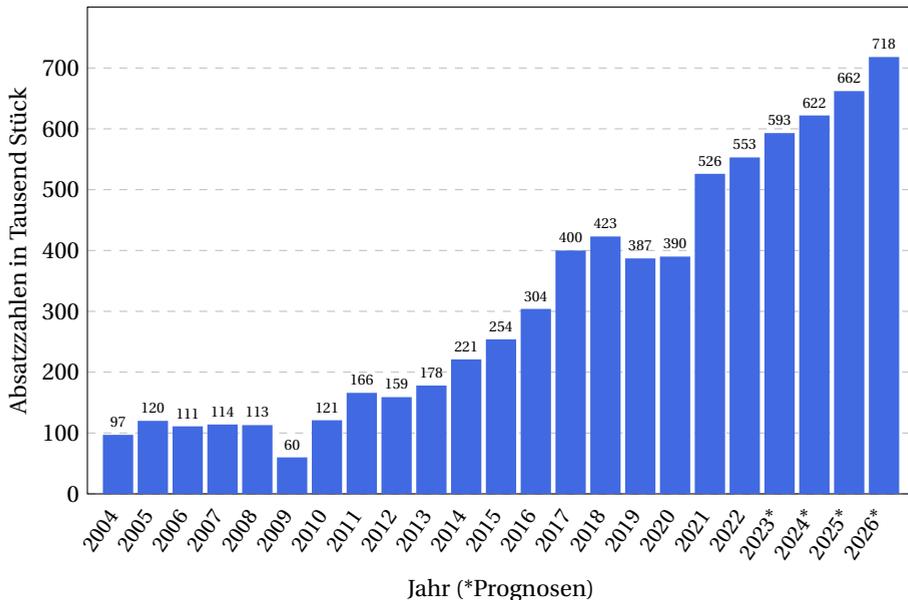


Bild 1.4 Absatz von Industrierobotern weltweit von 2004 bis 2022 und Prognosen bis 2026 (in 1000 Stück; Daten basierend auf [statista.com](https://www.statista.com))

Einige der Anforderungen, welche sich aus den neuen Anwendungsfeldern ergeben, sind in einer Art „Wunschzettel“ im Folgenden formuliert:

- hohe Genauigkeit
- großer Arbeitsraum
- hohe Nutzlast
- hohe Geschwindigkeit
- geringes Eigengewicht
- geringer Energieverbrauch
- einfache Bedienung
- niedrige Anschaffungskosten

Es ist offensichtlich, dass einige der Forderungen nur schwer vereinbar oder gar widersprüchlich sind. So muss bspw. ein Roboter im Allgemeinen aus Steifigkeitsgründen selbst ein hohes Gewicht aufweisen, um hohe Nutzlasten hinreichend genau zu positionieren. Daher ergeben sich hier immer weitere Entwicklungsbedarfe. Großes Augenmerk wird gerade darauf gelegt, dass sich Industrieroboter und Menschen die Arbeitsumgebung teilen können und sich intelligente Mensch-Roboter-Kollaborationen ergeben. Solche hybriden Arbeitsumgebungen ermöglichen eine effiziente Produktion, da die jeweiligen Schwächen (Kraft, Genauigkeit oder Wahrnehmung) durch den jeweils anderen ausgeglichen werden können. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass zum späteren Einsatz eines Industrieroboters mehr Hardware als nur der eigentliche Industrieroboter (bestehend aus den Bewegungskomponenten wie Antrieben, Gelenken und Armen) benötigt wird. Wichtige weitere Hardwarekomponenten sind bspw.:

Steuerungskomponenten: Damit der Roboter konkrete Aufgaben realisieren kann, muss die entsprechende Logik im Steuergerät implementiert werden. Dafür werden im Allgemeinen spezielle Steuergeräte und ggf. numerische Steuerungen (engl.: Numeric Control) verwendet, sodass Roboter typischerweise mit proprietären Sprachen programmiert werden müssen. Für die Anbindung an das Automatisierungssystem (externe Sensoren, Schalter etc.) wird häufig auf Industriesteuerungen (oft speicherprogrammierbare Steuerung, kurz: SPS) zurückgegriffen, welche oft roboterherstellerspezifisch von verschiedenen Anbietern verwendet werden. Die Implementierung der Logik kann mithilfe herstellerspezifischer Software erfolgen, welche auf grafische und textbasierte SPS-Programmiersprachen zurückgreifen. Diese Programmiersprachen sind in der ISO IEC 61131 - Teil 3 genormt. Dort werden fünf Sprachen definiert:

1. Anweisungsliste (AWL)
2. Kontaktplan (KOP)
3. Funktionsbausteinsprache (FUB)
4. Ablaufsprache (kurz: AS, engl.: Sequential Function Chart – SFC)
5. Strukturierter Text (ST)

Effektoren: Industrieroboter werden typischerweise ohne Werkzeug/Greifer ausgeliefert. Somit ist die Konstruktion eines für die spezielle Anwendung geeigneten Werkzeuges/Greifens für den Roboter eine nicht zu unterschätzende Aufgabe bei der Planung einer Industrieroboteranwendung.

Sensoren: Für anspruchsvolle Anwendungen ist der Einsatz zusätzlicher Sensorik notwendig. Diese kann im einfachsten Fall zur Bauteilpositionsbestimmung dienen, bspw. mit Endlagenschaltern. Anspruchsvollere Sensorik kommt etwa zur Arbeitsraumüberwachung, Rekalibrierung des Roboters oder zur Qualitätsüberwachung zum Einsatz. So vielfältig sich diese Aufgaben gestalten, so vielfältige Realisierungsarten geeigneter Sensorik sind kommerziell verfügbar. Aktuell kommen zumeist optische Sensoren (z. B. Kameras oder Lasermesssysteme) zum Einsatz, welche in der Roboterzelle oder direkt an den Roboter montiert werden.

Sicherheitseinrichtung: Final ist zu beachten, dass (wie bereits kurz erwähnt) aus Sicherheitsgründen der Betrieb der meisten Industrieroboter in einer Roboterzelle stattfindet. Eine mögliche Bauweise einer solchen Zelle ist in Bild 1.5 dargestellt. Das Design der Roboterzelle ist anwendungsspezifisch festzulegen. Neuartige kollaborative Roboter (Cobots) sind aufgrund ihrer mechanischen Konstruktion und ihrer sensorischen Ausstattung sowie ihrer programmierten Bewegungslogik in der Lage, auf eine klassische Roboterzelle zu verzichten und gemeinsam mit einem Bediener zu agieren.

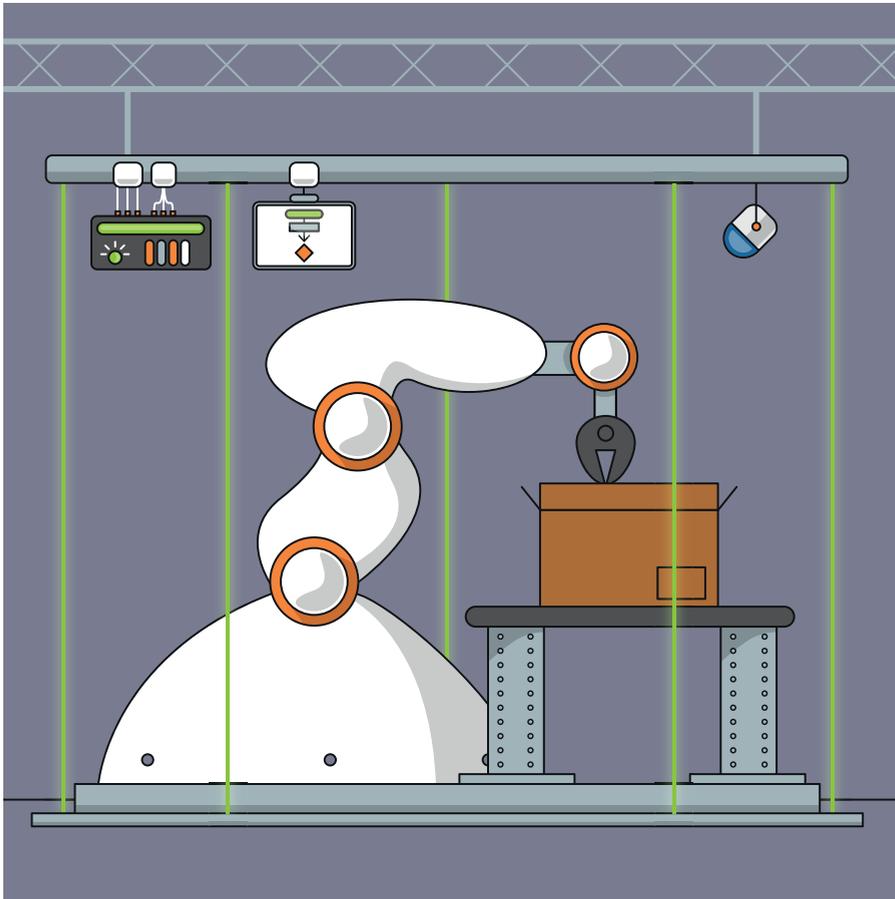


Bild 1.5 Beispiel für den Aufbau einer Roboterzelle

Die Betrachtung der Roboterkinematik spielt eine zentrale Rolle in der Industrierobotik. Hierbei ist unter dem Begriff Kinematik die Untersuchung der Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Armglieder eines Roboters relativ zueinander zu verstehen. Die Grundlage der Kinematikuntersuchung besteht darin, den Roboter in seine einzelnen Bewegungskomponenten zu zerlegen. Konkret wird der Roboter (virtuell) in seine einzelnen Armglieder und die verbindenden Gelenke zerlegt.

Die Gelenke eines Industrieroboters werden nach ihren Freiheitsgraden in translatorische und rotatorische Gelenke unterteilt. Im Fall eines Rotationsgelenkes (oder auch Drehgelenkes) dreht sich ein Roboterarmglied relativ zu einem benachbarten Armglied (oder der Roboterbasis) um eine feste Achse. Dem gegenüber gleitet im Fall eines Translationsgelenkes (oder auch Lineargelenk) ein Roboterarmglied relativ zum benachbarten Armglied (oder der Roboterbasis) entlang einer festen Achse. Die einzelnen Bewegungsfreiheitsgrade der Gelenke sind in Bild 1.6 mit roten Pfeilen dargestellt.



Definition 1.7 (Kinematische Kette). Die schematische Abbildung der Zusammenhänge der einzelnen Roboterarmglieder und deren Gelenke wird als kinematische Kette bezeichnet. Jedes Armglied kann maximal zwei Gelenke besitzen. Hat jedes Armglied des Roboters genau zwei Gelenke, so wird die kinematische Kette als geschlossen und andernfalls als offene Kette bezeichnet. Im Fall der offenen Kette ist üblicherweise ein Ende der kinematischen Kette der Effektor.

Bild 1.6 visualisiert die kinematische Kette für die vier weitverbreitetsten Industrierobertypen. In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass bspw. kartesische Roboter eine geschlossene und horizontal aktuierte Roboter eine offene Kette vorweisen. Je nach Aufbau der kinematischen Kette können Roboter sehr unterschiedliche Bewegungen durchführen.

Der Raum, den ein Roboter mit seinem Effektor durchstreifen kann, wird als **Arbeitsraum** bezeichnet. Je nach Anwendung gibt es sehr unterschiedliche Anforderungen an den Arbeitsraum eines Roboters. In manchen Fällen sollen Roboter zum Bewegen von Lasten über relativ große Entfernungen in Werkhallen eingesetzt werden. Somit muss ein geeigneter Roboter über einen großen Arbeitsraum verfügen.

In anderen Anwendungen steht bspw. das Bestücken von Leiterplatten im Vordergrund, wozu ein deutlich kleinerer Arbeitsraum benötigt wird. Weiterhin sind für manche Aufgaben, wie das Verpacken von Werkstücken, unter Umständen vergleichsweise einfache Bewegungsabläufe notwendig. In anderen Anwendungen kann es bspw. von Nöten sein, auch Hindernisse zu umgreifen, was in deutlich anspruchsvolleren Bewegungsabläufen resultiert. All diese Überlegungen sind die Grundlage dafür, anwendungsspezifisch ein geeignetes Robotersystem auszuwählen.

Das Erzeugen eines guten Verständnisses der zu automatisierenden Anwendung und deren spezifischer Anforderungen an das Automatisierungssystem ist der erste (und oft auch entscheidende) Schritt bei dem Entwurf bzw. der Auswahl eines geeigneten Robotersystems.

	Kinematische Kette	Arbeitsraum	Seitliche Ansicht
Kartesisch aktiviert			
Horizontal aktiviert			
Parallel aktiviert			
Vertikal aktiviert			

Bild 1.6 Kinematische Ketten und Arbeitsräume

Um die Auswahl geeigneter Roboter etwas zu erleichtern, sind im Folgenden die am weitesten verbreiteten Robotertypen in kompakter Form dargestellt. Der Fokus bei der Darstellung liegt auf einer Beschreibung der Vor- und Nachteile sowie möglicher Anwendungsgebiete.

Allgemein

Kartesische Roboter werden oft auch als Portalroboter bezeichnet. Sie bestehen aus mehreren freitragenden Lineareinheiten (Einzelachsen). Der Antrieb dieser Lineareinheiten erfolgt meist über Elektromotoren per Kraftübertragung mittels Zahnriemen oder Spindeln. Auf der Hauptbewegungsachse befindet sich eine Laufkatze, welche mit einem anwendungsspezifischen Arbeitswerkzeug versehen ist. Der mechanische Aufbau dieses Robotertyps lässt sich vergleichsweise einfach realisieren.

Vorteile

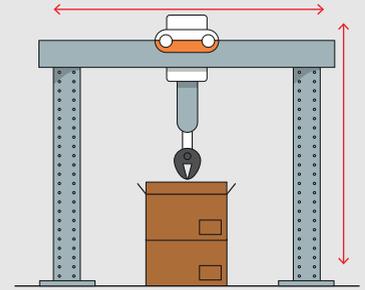
Die beiden größten Vorteile dieser Roboterklasse sind der große Arbeitsraum sowie die z. T. hohen Nutzlasten. Zudem sind sie aufgrund ihres modularen Aufbaus stark an die Gegebenheiten in dem jeweiligen Betrieb anpassbar. Auch können mit diesem Robotertyp, aufgrund des Designs seines mechanische Aufbaus, gute Positioniergenauigkeiten für einen vergleichsweise kostengünstigen Anschaffungspreis erreicht werden.

Herausforderungen

Kartesische Roboter bieten gegenüber den anderen Roboterklassen eine relativ eingeschränkte Beweglichkeit (meist nur drei ansteuerbare Bewegungsachsen). Zudem ist, konstruktionsbedingt, mit diesem Robotertyp die Positionier- und Wiederholgenauigkeit der anderen Industrieroboterklassen häufig nicht leicht erreichbar.

Anwendungsbereiche

Typische Anwendungsbereiche dieser Roboterklasse sind Handhabungsaufgaben, wie das Bewegen und Palettieren (z. T.) schwerer Werkstücke sowie leichtere Montageaufgaben. So kann bspw. das automatisierte Bewegen von schweren Rohmaterialien zu Beginn oder von großen Werkstücken am Ende einer Produktionslinie eine Anwendung dieser Roboterklasse sein. Ebenso finden diese Roboter zum Be- und Endladen bspw. von Spritzgussmaschinen weit verbreitet Anwendung.



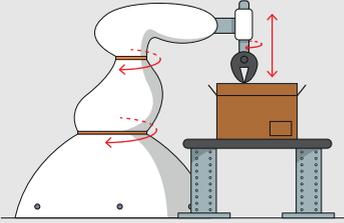
Kartesisch aktuierte Industrieroboter

Aufgebaut aus einzelnen Linearachsen

Pro
Großer Arbeitsraum und hohe Nutzlast

Contra
Eingeschränkte Beweglichkeit und Genauigkeit

Anwendung
Bewegen schwerer Bauteile



Horizontal aktuierte Industrieroboter

Aufgebaut aus
rotatorischen und
translatorischen
Bewegungsachsen

Pro

Hohe Dynamik
und relativ
kostengünstig

Contra

Eingeschränkte
Anwendungsbereiche

Anwendung

Einfache
Handhabungsaufgaben

Allgemein

Der horizontal aktuierte Roboter (engl.: Selective Compliance Assembly Robot Arm, kurz: SCARA) zeichnet sich durch eine in horizontaler Richtung nachgiebige und in vertikaler Richtung steife kinematische Kette aus. Typischerweise verfügt er über vier Bewegungsachsen. So kann er zumeist eine lineare vertikale sowie drei rotatorisch horizontale Bewegungen durchführen.

Vorteile

Ein horizontal aktuierter Roboter weist mehr Bewegungsachsen als ein kartesischer Roboter auf, was die Realisierung etwas anspruchsvollerer Handhabungsaufgaben ermöglicht. Zudem kann diese Roboterklasse hohe Beschleunigungen und zugleich hohe Verfahrensgenauigkeiten realisieren, da die Gewichtseinflüsse sowohl des Roboterarmes als auch der Nutzlast bei den Bewegungen in der horizontalen Ebene keine Störeinflüsse bewirken. Ein weiterer Vorteil dieser Roboterklasse ist, dass sie aufgrund der relativ einfachen Mechanik und der geringen Anzahl von ansteuerbaren Achsen verhältnismäßig kostengünstig in der Anschaffung ist.

Herausforderungen

Jedoch ist diese Roboterklasse konstruktionsbedingt häufig nicht in der Lage, mit ähnlich großen Nutzlasten wie ein kartesischer Roboter zu arbeiten. Ebenso ist diese Roboterklasse nicht in der Lage, komplexe Bewegungsabläufe wie ein Knickarmroboter zu realisieren.

Anwendungsbereiche

Typische Anwendungsbereiche dieser Roboterklasse sind Handhabungsaufgaben, wie das exakte Bestücken von Maschinen, Palettieren sowie teilweise Montageaufgaben. Diese Roboter können ihr volles Potenzial ausschöpfen, wenn kleine Nutzlasten mit einer sehr hohen Taktzeit in einem kleinen Bewegungsraum durch einfache Bewegungsabläufe bewegt werden sollen. Solch eine Aufgabe kann bspw. das Bestücken von Versandkartons am Ende einer Produktionsstrecke sein.



Allgemein

Parallel- oder auch Delta-Roboter weisen eine recht anspruchsvolle Mechanik auf. Sie besitzen mindestens drei Arme, die über Kreuzgelenke mit der Roboterbasis verknüpft sind, die in ihrem Zusammenspiel eine geschlossene kinematische Kette bilden. Die Basis dieses Robotertyps wird in der Regel an der Decke montiert. Von der Basis reichen die einzelnen Armglieder pyramidenförmig nach unten und münden in einem Endeffektor.

Vorteile

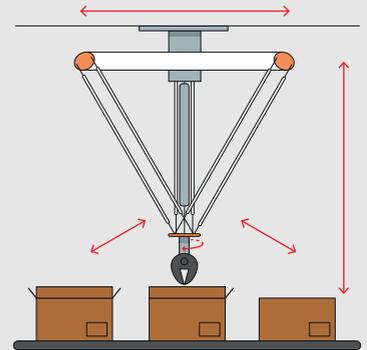
Delta-Roboter zeichnen sich durch ihr geringes Gewicht und somit ihre geringe Bewegungsträgheit aus. Somit sind Delta-Roboter in der Lage sehr schnelle Verfahrgeschwindigkeiten des Endeffektors zu realisieren.

Herausforderungen

Jedoch ist, auf Basis der zugrundeliegenden Mechanik, ihr Arbeitsraum zumeist vergleichsweise klein. Weiterhin können komplexe Bewegungsabläufe (wie mit einem Knickarmroboter möglich) mit diesen Robotertyp nicht realisiert werden. Zudem ist die Berechnung der Roboterbewegungen (Kinematik) aufgrund der anspruchsvollen Mechanik relativ aufwendig.

Anwendungsbereiche

Typische Anwendungsbereiche dieser Roboterklasse sind diejenigen, wo es auf hohe Geschwindigkeiten und Taktzeiten ankommt, wie Verpacken und Bestücken. Ähnlich wie bei den SCARA-Robotern können auch Delta-Roboter ihr volles Potenzial ausspielen, wenn kleine Nutzlasten mit einer sehr kurze Taktzeit in einem kleinen Bewegungsraum durch einfache Bewegungsabläufe bewegt werden sollen. Solch eine Aufgabe kann bspw. das Bestücken von Leiterplatten sein.



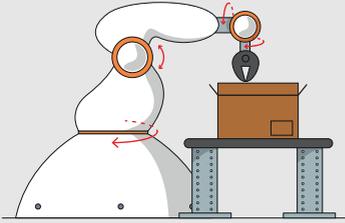
Parallel aktuierte Industrieroboter

Aufgebaut aus parallelen Stäben im Unterarm

Pro
Geringes Gewicht und hohe Verfahrgeschwindigkeit

Contra
Anspruchsvolle Konstruktion und relativ kleiner Arbeitsraum

Anwendung
Anspruchsvolle Handhabungsaufgaben mit kurzen Taktzeiten



Vertikal aktuierte Industrieroboter

Aufgebaut aus einer
großen Anzahl von
Bewegungsachsen

Pro
Hohe Flexibilität

Contra
Anspruchsvolle
Konstruktion
und relativ
kostenintensiv

Anwendung
Anspruchsvolle
Handhabungsaufgaben

Allgemein

Vertikal aktuierte (Knickarm-)Roboter sind eine sehr weit verbreitete Klasse von Robotern. Sie zeichnen sich durch eine große Anzahl ansteuerbarer Bewegungsachsen aus (zumeist fünf bis sechs).

Vorteile

Der Hauptvorteil dieser Roboterklasse besteht in der hohen Flexibilität, da sie über eine hohe Anzahl von zumeist rotatorischen Bewegungsachsen verfügen. Sie sind dadurch von allen Roboterklassen am universellsten einsetzbar. Somit können diese Roboter (je nach Bauweise zumeist) alle sechs Freiheitsgrade im Raum nutzen, wodurch bspw. Umgreifen von Hindernissen als auch anspruchsvolle Montageaufgaben möglich werden.

Herausforderungen

Die hohe Flexibilität dieser Roboterklasse verbunden mit der dafür notwendigen anspruchsvollen Konstruktion, führt jedoch auch dazu, dass diese Roboter relativ kostenintensiv in der Anschaffung sind. Zudem ist der Programmieraufwand dieser Roboter vergleichsweise hoch.

Anwendungsbereiche

Typische Anwendungsbereiche dieser Roboterklasse sind anspruchsvolle Handhabungs- und Montageaufgaben sowie Punktschweißen. Je nach anwendungsspezifischen Anforderungen empfehlen sich verschiedene Unterklassen der vertikal aktuierten (Knickarm-)Roboter. Handelt es sich bspw. um Spezialanwendungen wie das Bestücken von Werkzeugmaschinen im Sondermaschinenbau, bieten sich Cobots besser an. Dies sind besonders leichte Roboter, welche u. a. aufgrund ihrer einfachen Programmierung sehr flexibel einsetzbar und an die entsprechende Aufgabe anpassbar sind. Stehen jedoch eher hohe Taktzeiten, hohe Wiederholgenauigkeiten sowie eine sehr robuste Mechanik im Vordergrund, empfehlen sich klassische Knickarmroboter.



1.2.2 Serviceroboter

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt ausführlich die Industrieroboter dargestellt wurden, widmet sich dieser Abschnitt der Vorstellung von Servicerobotern. Serviceroboter sind zumeist mobile Roboter, welche ein sehr breites Anwendungsfeld aufweisen. Zur Charakterisierung von Servicerobotern und zur Unterscheidung von Industrierobotern bietet es sich wiederum an, die Eigenschaften dieser Roboterklasse zu betrachten:

Flexibilität: Serviceroboter sind im Allgemeinen auf eine Anwendung zugeschnitten. Dieser Einsatzzweck kann zwar dabei beliebig komplex sein, ist aber fest definiert. So wird ein Staubsaugroboter nie den Rasen mähen und anders herum.

Festes Programm: Serviceroboter besitzen ein festes Programm und können nicht von dem jeweiligen Anwender programmiert, sondern maximal konfiguriert werden.

Geringe Gefahr: Der Umgang mit dem Anwender ist eine wichtige Eigenschaft dieser Systeme. Daher müssen sie ein geringes Gefahrenpotenzial besitzen. Aus diesem Grund sind Serviceroboter meist in ihrer Masse und Leistung stark beschränkt. Was nicht heißen soll, dass man sich nicht an seinem Rasenmäherroboter verletzen kann.

Mobil: Die Anwendung von Servicerobotern erfordert im Normalfall, dass sie mobil sind.

Kommunikation mit Anwender: Aufgrund ihres festen Programms und ihrer klar definierten Aufgaben arbeiten Serviceroboter in einer Vielzahl der Anwendungen hochautomatisiert oder autonom und werden durch den Nutzer konfiguriert. Einige Anwendungen, bspw. in der Altenpflege, erfordern hingegen eine direkte Kommunikation mit dem Anwender.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Eigenschaften bzw. die Unterschiede von Industrie- und Servicerobotern gibt Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1 Vergleich zwischen Industrie- und Servicerobotern

Industrieroboter	Serviceroboter
Flexible Anwendung	Feste Anwendung
Frei programmierbar	Festes Programm
Sicherung durch äußere Maßnahmen	In der Regel ungefährlich
Fest installiert	Mobil
Kommunikation mit Steuerung	Interaktion mit Anwender

Die Anwendungsbereiche von Servicerobotern sind sehr vielfältig. Sie sollen dabei überschaubare, wiederkehrende Aufgaben (wie Staubsaugen, Rasenmähen oder auch komplexe, für den Menschen ohne Robotereinsatz belastende Tätigkeiten) übernehmen. Letzteres führt bspw. in die Bereiche Exoskelette, Orthesen und Pflegerobotik. Zum anderen sollen sie Aufgaben übernehmen, die für Menschen gefährlich oder schlichtweg nicht möglich sind. Hierbei stehen vor allem Umgebungen im Vordergrund, die wir als Menschen nicht trivial untersuchen können, wie Weltraum oder Tiefsee. Ein anderer Bereich sind Anwendungen, die permanente Aufmerksamkeit erfordern, wie Sicherheitsfunktionen (Search & Rescue) oder militärische Zwecke.

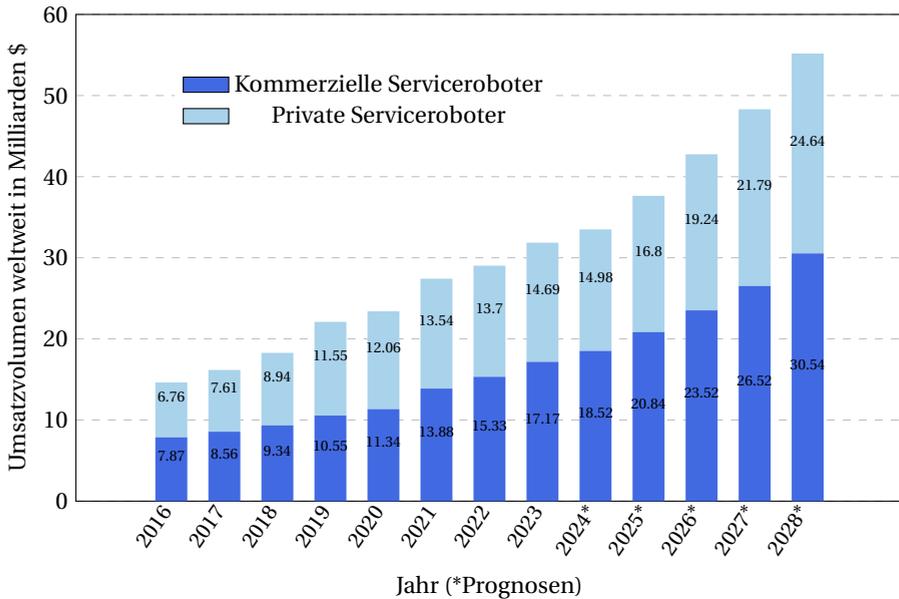


Bild 1.7 Umsatzvolumen von privaten und kommerziellen Servicerobotern zeigt seit 2016 einen ansteigenden Trend – die Daten beruhen auf [statista.com](https://www.statista.com)

Allgemein lassen sich Serviceroboter in private und kommerzielle Anwendungen unterteilen. Beide Märkte befinden sich, gemessen am Umsatzvolumen, in einem anhaltenden Aufwärtstrend, vgl. Bild 1.7. Aus diesem Grund stellen sie für das vorliegende Buch einen wichtigen Fokus dar. In den nachfolgenden Bildern sind zwei beispielhafte Anwendungen von Servicerobotern visualisiert. Dies verdeutlicht nochmals die große Vielzahl von möglichen Anwendungsbereichen dieser Roboter.



Bild 1.8 Exemplarische Anwendungsbereiche von Servicerobotern

Allgemein

Diese Roboter finden momentan vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Es existieren daher sehr unterschiedliche Realisierungsformen dieser Systeme. Ihre Größe und Bauform variieren ebenso stark wie die Anzahl der zur Fortbewegung verwendeten Beine, Räder oder Kettenantriebe. Aktuell beschränkt sich der Einsatz dieser Systeme oft auf mit spezieller Infrastruktur ausgerüstete Gegenden/Bereiche, was die Aufgaben der Umfelderkennung und Entscheidungsfindung dieser Roboter deutlich vereinfacht.

Vorteile

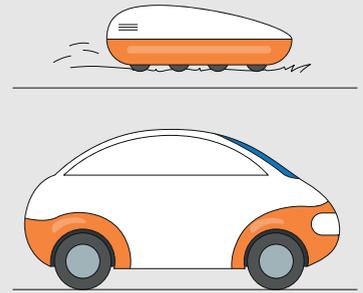
Ein großer Vorteil dieser Roboterklasse ist, dass sie weniger Bewegungsfreiheitsgrade als bei wasser- und luftgebundenen Robotiksystemen bedienen müssen, was die Aufgabe der Fahrzeugführung deutlich vereinfacht. Zudem ist die Definition eines sicheren Zustandes und der damit verbundenen Aktionen im Fehlerfall deutlich einfacher umzusetzen als bei wasser- und luftgebundenen Robotiksystemen, welche abstürzen oder untergehen können.

Herausforderungen

Große Herausforderungen bilden die Entwicklung und Umsetzung zuverlässiger Umfelderkennung sowie Entscheidungsfindung und Bewegungsplanung dieser Roboter in unstrukturiertem Gelände.

Anwendungsbereiche

Die Anwendungsbereiche dieses Zweiges der Serviceroboter sind sehr breit. Es beginnt bei kleinen Staubsaug- und Mährobotern für den Hausgebrauch. Größere rollende Infotainmentsysteme, welche in großen Shoppingzentren eingesetzt werden, zählen auch zu dieser Roboterklasse. Ebenso gibt es heutzutage bereits einige automatisierte Erkundungs- und Rettungsfahrzeuge auf dem Markt, die auch unter diese Roboterklasse fallen und bspw. bei der Schadenserkundung nach der Reaktorkatastrophe in Fukushima eingesetzt wurden. Das jedoch mit Abstand größte Anwendungsfeld bilden automatisierte Logistiksysteme, welche in vielen Betrieben bereits Einzug gehalten haben.



Auf dem Land operierende Serviceroboter

Verfügen über sehr heterogene Bauweisen

Pro

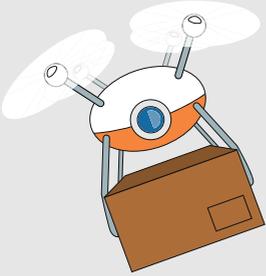
Relativ robuste Roboterklasse mit vergleichsweise einfacher Bewegungssteuerung

Contra

Eingeschränkter Operationsbereich

Anwendung

Staubsaugen, Mähen, Erkunden und Logistik



In der Luft operierende Serviceroboter

Verfügen über sehr heterogene Bauweisen

Pro
Flugfähig

Contra
Schlechtwetteranfällig,
Reichweitenprobleme
und Absturzgefahr

Anwendung
Fernerkundung,
Inspektion und
Logistik

Allgemein

Es gibt vielfältige Realisierungsmöglichkeiten von Robotern, die in der Luft operieren. Hierbei variiert nicht nur die Gehäuseform stark, sondern ebenso die Anzahl und Position der zur Fortbewegung verwendeten Antriebe. Durch das breite Anwendungsgebiet dieser Roboterklasse wächst seit ca. 2010 der Absatzmarkt für diese Systeme.

Vorteile

Der Vorteil dieser Roboterklasse besteht darin, dass sie an Orten eingesetzt werden können, die für an Land oder im Wasser operierende Roboter unzugänglich sind.

Herausforderungen

Gegenüber den bodengebundenen Servicerobotern sind die in der Luft operierenden mit einer Vielzahl weiterer Herausforderungen konfrontiert. Bspw. kann eine Fehlfunktion direkt zu einem Absturz des Roboters und damit zu beträchtlichen mechanischen Beschädigungen führen. Ebenso stellt die z. T. geringe Flugdauer der Roboter eine große Herausforderung in einigen Anwendungen dar. Des Weiteren sei betont, dass diese Roboter sehr sensitiv bei Schlechtwetterverhältnissen, wie Regen und Schnee, sind. Dies liegt an der möglichst gewichtssparenden mechanischen Konstruktion, weshalb oft auf robuste Einhausungen verzichtet wird. Ebenso sei darauf hingewiesen, dass Outdoortests nicht so einfach realisierbar sind wie bei den anderen beiden Roboterklassen, da eine Aufstiegs Genehmigung für den Betrieb vieler flugfähiger Roboter notwendig ist. Zudem ist die Steuerung dieser Roboter zumeist anspruchsvoller als die Steuerung von bodengebundenen Robotern. Der Grund dafür liegt in der größeren Anzahl von zur Verfügung stehenden Bewegungsfreiheitsgraden.

Anwendungsbereiche

In den letzten Jahren wurden zunehmend neue Anwendungsbereiche für diese Roboterklasse erschlossen. So steht neben Foto-, Filmaufnahmen, Fernerkundung, Inspektion (bspw. von Windenergieanlagen) und Kartierung auch Logistik im Fokus dieser Roboter. Gerade das Thema der Postzustellung auf der sogenannten letzten Meile wird aktuell stark durch Logistikunternehmen erforscht. Ebenso existieren viele Machbarkeitsstudien in weiteren Anwendungsfeldern wie Personentransport und Weltraumexploration.

Allgemein

Bei der im Wasser operierenden Roboterklasse gibt es sehr verschiedene Bauarten, welche sich je nach fokussiertem Anwendungsbereich z. T. stark in Größe, Fortbewegungsart und Funktionsweise unterscheiden.

Vorteile

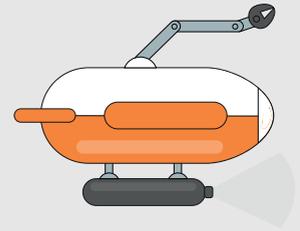
Diese Klasse von Robotern kann auch an Orten eingesetzt werden, die unter Wasser liegen und somit für boden- und luftgebundene Robotersysteme nicht zugänglich sind.

Herausforderungen

Ähnlich wie die luftgebundenen Roboter weisen die wassergebundenen Roboter zusätzliche Herausforderungen im Vergleich zu den landgebundenen Robotern auf. Eine der größten Herausforderungen ist das Dichtigkeitsproblem. Falls die Außenhaut des Roboters nicht perfekt gegen Wasser abgedichtet ist, kann es zum Eindringen von Feuchtigkeit und damit zu einer dauerhaften Schädigung der Roboterelektronik kommen. Solche Fehler können zum Verlust des Roboters führen, da unter Umständen ein Systemausfall des Roboters zum Sinken führen kann. Eine weitere Herausforderung, die das Medium Wasser mit sich bringt, ist, dass Kommunikationswellen zwischen dem Roboter und seinem Operator stark gedämpft werden, was zu großen Verzögerungen in der Kommunikation führt. Zudem ist die Steuerung dieser Roboter anspruchsvoller als die Steuerung von bodengebundenen Robotern aufgrund der größeren Anzahl von zur Verfügung stehenden Bewegungsfreiheitsgraden.

Anwendungsbereiche

Wassergebundene Robotersysteme werden häufig für die Fernerkundung eingesetzt. So bilden sie bspw. ein wichtiges Werkzeug für die Tiefseeforschung. Ebenso finden sie Einsatz, um alte Schiffwracks sowie unter Wasser liegende Ruinen zu erforschen. Ein industriell sehr reizvolles Anwendungsgebiet liegt zudem in der Inspektion schwer zugänglicher Industriebauten unter Wasser. So werden automatisierte Unterwasserfahrzeuge auch bspw. für Inspektionsaufgaben von Unterwasserpipelines eingesetzt.



Im Wasser operierende Serviceroboter

Verfügen über sehr heterogene Bauweisen

Pro

Bewegen sich auf und unter Wasser fort

Contra

Dichtigkeits- und Kommunikationsprobleme sowie Sinkgefahr

Anwendung

Fernerkundung und Inspektion

■ 1.3 Sense-Plan-Act

Wie zuvor dargestellt ist das heutige Anwendungsspektrum von Robotersystemen sehr umfangreich und wächst kontinuierlich weiter. Gleichzeitig nehmen die Anforderungen an moderne Robotersysteme ebenfalls rasant zu. Dies führt dazu, dass immer neue Robotersysteme auf den Markt drängen, welche über äußerst anspruchsvolle Automatisierungsalgorithmen verfügen.

So ist eines der größten Ziele des Robotik- und Automatisierungstechnikeinsatzes im Bereich Industrie 4.0 die Realisierung von selbstoptimierenden Produktionssystemen. Dies umfasst eine intelligente und weitgehend autarke Prozessführung. All dies verfolgt das Ziel der umfassenden Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette. Aufgrund der Komplexität dieser Zielstellung ist leicht ersichtlich, dass hierfür verschiedenste hochspezialisierte und sehr komplexe Robotersysteme zum Einsatz kommen können.

Dies lässt vermuten, dass Robotikexperten eine immer größere Vielfalt von Robotern kennen müssen, wobei jeder Roboter über völlig einzigartige algorithmische Ansätze automatisiert wird. Glücklicherweise folgen jedoch die meisten algorithmischen Ansätze zur Roboterautomatisierung einem einheitlichen Konzept, was die Arbeit in der Praxis mit diesen Maschinen deutlich vereinfacht. Dieser algorithmische Ansatz wird als Sense-Plan-Act-Paradigma bezeichnet. Dieses Paradigma beschreibt, dass die Automatisierungsansätze von Robotersystemen aus drei großen algorithmischen Funktionsclustern bestehen. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Bild 1.9. Dieses Zusammenspiel der drei Funktionscluster findet sich nicht nur bei klassischen Robotikanwendungen, sondern auch bei automatisierten Fahrfunktionen wieder, siehe Abschnitt 2.2.

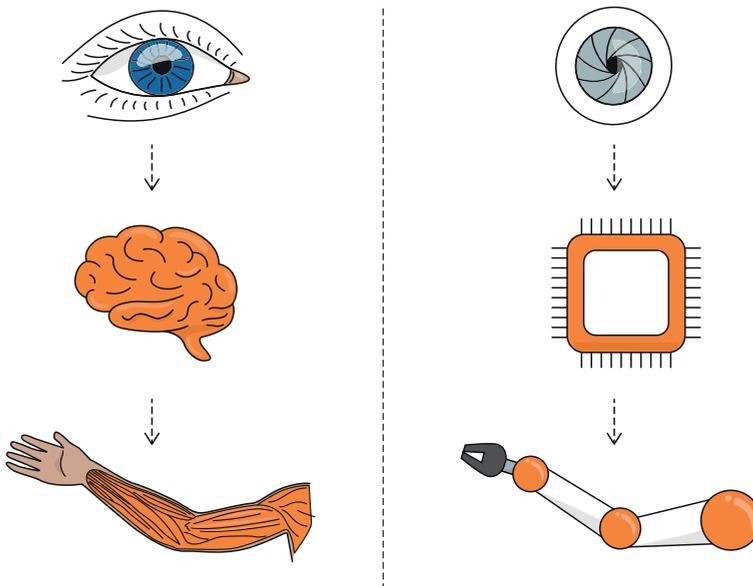


Bild 1.9 Vereinfachte Roboterautomatisierungsarchitektur

Für die Realisierung des Sense-Plan-Act-Paradigmas finden vielfältige Funktionsarchitekturen Einsatz. Die Wahl bzw. das Design der Funktionsarchitektur ist grundlegend, um die Anforderungen an das beabsichtigte Systemverhalten zu erfüllen. Die Ausprägung und der Umfang der Funktionsarchitektur zur Realisierung des Sense-Plan-Act-Paradigmas gestalten sich sehr anwendungsspezifisch. So verwenden bspw. Industrieroboter (die fest vorgegebenen Aufgaben) oder Produktionsanlagen (die fest vorgegebenen Fertigungsabläufen folgen) sehr stark vereinfachte Sense- und Plan-Ansätze. Dies könnte sich wie folgt gestalten: Auslesen diskreter Sensorwerte, wie die Position von Endlagenschaltern (Sense); Realisierung einfacher Aktivierungs- und Deaktivierungslogik von einzelnen Antriebseinheiten (Plan). Jedoch gerade die Beherrschung der hohen Komplexität von modernen automatisierten Systemen (oft als Agenten bezeichnet), insbesondere in unstrukturierten (bspw. urbanen) Bereichen, ist eine anspruchsvolle Aufgabe, welche bei der Entwicklung einer Funktionsarchitektur große Herausforderungen beinhaltet.



Definition 1.8 (Agent). Ein Agent ist ein System, welches unter Anwendung des Sense-Plan-Act-Paradigmas in der Lage ist, sein Umfeld wahrzunehmen und Handlungen auf Basis dessen abzuleiten. Als intelligente Agenten werden diejenigen bezeichnet, die geeignete Aktionen bzgl. einer Zielvorgabe wählen. Die Planung dieser Aktionen erfolgt aufgrund von

- Vorwissen (Wissen über die Umgebung, z. B. Karten)
- Erfahrungswissen (z. B. erlerntes Wissen/Schlussfolgerungen aus Tests)
- Zielvorgaben (üblicherweise mit Prioritäten und Wichtigkeiten versehen)
- Beobachtungen (über die Umgebung und über sich selbst)

Grundlegend existieren zwei verschiedene **klassische Funktionsarchitekturansätze** zur Realisierung des Sense-Plan-Act-Paradigmas im Bereich automatisierter Systeme:

Top-Down: Der erste Funktionsarchitekturansatz wird als funktionsbasierte, Top-Down- oder wissensgesteuerte Architektur bezeichnet. Dabei wird ein explizites Weltmodell zur Entscheidungsfindung verwendet. Eine Gesamtmission für jeden Agenten wird in Teilziele innerhalb einer hierarchischen Kontrollstruktur zerlegt. Das heißt, höhere Schichten in der Hierarchie erstellen Unterziele für die unteren Schichten. Dies beinhaltet die Systematik des Sense-Plan-Act-Paradigmas. Dies hat zur Folge, dass die höheren Planungsschichten lange Planungszyklen und keine schnellen Reaktionen auf dynamische Umweltveränderungen haben. Solche Ansätze sind für strukturierte und hochgradig vorhersehbare Umgebungen gut geeignet. Das für Top-Down-Architekturen notwendige allgemeine Weltmodell ist nur schwer darzustellen und zudem rechenaufwendig.

Bottom-up: Der zweite Funktionsarchitekturansatz wiederum setzt auf reaktives Planen. Reaktive Agenten implementieren Entscheidungs- und Planungsfunktionalität durch Bottom-up-Modelle oder datengesteuerte Modelle, die ohne High-Level-Planung und Gesamtmissionen direkt auf ihren sensorischen Input reagieren. Das Ziel hierbei ist eine zeitnahe robotische Reaktion in dynamischen und unstrukturierten Welten. Der Hauptvorteil hierbei liegt in der Robustheit des direkt gekoppelten Ansatzes von Wahrnehmung und Aktion (Verhalten). Für die Anwendbarkeit eines rein reaktiven Ansatzes müssen jedoch Aktionen explizit definiert und im Voraus zur Verfügung gestellt werden, was zu einem Mangel an Flexibilität in der Architektur führt.

Wie zu vermuten ist, wurden verschiedene hybride Funktionsarchitekturen entwickelt, um die Vorteile der beiden Ansätze zu kombinieren und die Nachteile zu minimieren. Daher sind hybride Architekturen weit verbreitet. All diese Ansätze werden typischerweise innerhalb einer dreischichtigen Architektur kombiniert, bestehend aus den Sense-, Plan- und Act-Clustern.

Sense: Das Funktionscluster Sense umfasst Algorithmen zur Umfeldwahrnehmung, siehe Kapitel 8. Neben klassischen Methoden zur Umfelderkennung und -interpretation können auch Algorithmen zur Situationsklassifikation, -interpretation und -prädiktion mit abgedeckt sein. Hier werden auch kommunizierte Daten verarbeitet. All diese Informationen werden dann in Umfeld- und Situationsmodellen gespeichert. Somit lässt sich dieses Cluster prinzipiell der automatisierungstechnischen Teilaufgabe der Prozessüberwachung zuordnen. Der Umfang und die Ausgestaltung dieser Algorithmen richten sich sehr stark nach dem jeweiligen Anwendungszweck des betrachteten Robotiksystems. So verfügen Serviceroboter zumeist über deutlich anspruchsvollere Sense-Funktionalitäten als klassische Industrieroboter. Weiterhin haben selbstfahrende Transportsysteme in Logistikanwendungen anwendungsbedingt deutlich weiterentwickelte Sense-Funktionalitäten als handelsübliche Rasenmäroboter.

Plan: Das Funktionscluster Plan umfasst Algorithmen zur Entscheidungsfindung und Bewegungsplanung von Robotersystemen. Hauptaufgabe dieses Funktionsclusters ist es, auf Basis der zuvor erzeugten Umfeld- und Situationsmodelle abzuleiten, welche prinzipiellen Manöver der Roboter als Nächstes ausführen soll und mithilfe welcher konkreten Bewegungsabläufe er diese realisieren soll (siehe Kapitel 9). Somit lässt sich dieses Cluster der automatisierungstechnischen Teilaufgabe der Prozessführung zuordnen. Auch hier richten sich Umfang und Ausprägung dieser Algorithmen stark nach dem jeweiligen Anwendungszweck des betrachteten Robotiksystems.

Act: Das Funktionscluster Act umfasst Algorithmen zur Umsetzung und Realisierung der zuvor geplanten Bewegungsabfolgen, siehe Kapitel 10. Somit lässt sich dieses Cluster der automatisierungstechnischen Teilaufgabe der Prozessführung zuordnen. Etwas konkreter umfasst dieses Funktionscluster zwei Hauptaufgaben. Zum einen werden (in einer Kaskadenstruktur) Konzepte der Regelungstechnik verwendet, um die zuvor erzeugten Planungsergebnisse (bspw. gewünschte Bewegungsabläufe in Form von Orts- und Zeitangaben) in konkrete Sollwerte für die einzelnen Antriebssysteme umzusetzen (bspw. Lenkwinkel und longitudinale Fahrzeugbeschleunigung). Die zweite Hauptaufgabe umfasst die Antriebsregelung. Hierbei werden (in einer unterlagerten Kaskade) die konkreten Sollwerte für die einzelnen Antriebssysteme (Lenkung, Antriebsstrang etc.) geregelt. Hier finden vielfältige Regelungskonzepte Anwendung, um die Antriebsregelung robust gegenüber externen Störeinflüssen (Gegenwind, Fahrbahnneigung etc.) zu gestalten und die Einflüsse von Nichtlinearitäten der Antriebssysteme (Hysteresen und Stellgrößenbeschränkungen) zu minimieren. Dies dient zur Vereinfachung der Regelungsaufgabe der äußeren Kaskade und zur Robustheits- und Performance-Erhöhung.

Das Sense-Plan-Act-Paradigma nimmt beim Systemdesign (vgl. V-Modell aus Bild 3.1 auf Seite 58) von modernen Automatisierungssystemen eine zentrale Rolle ein. Konkret bildet das Sense-Plan-Act-Paradigma die Grundlage, um eine Architektur für ein Gesamtsystem abzuleiten. Im Abschnitt 2.3 wird eine erste Ableitung einer generalisierten Funktionsarchitektur auf Basis des Sense-Plan-Act-Paradigmas dargestellt, welche im Teil III des Buches weiter verfeinert und praktisch umgesetzt wird.

■ Übungsaufgaben



Übungsaufgabe 1.1. Mit welchen beiden Tätigkeitsfeldern beschäftigt sich die Automatisierungstechnik? Erläutern Sie diese.



Übungsaufgabe 1.2. Was unterscheidet die Begriffe Mechanisierung und Automatisierung? Bitte wählen Sie bei den folgenden Aussagen entweder ja oder nein aus.

- Um Tätigkeiten zu automatisieren, müssen zunächst technische Einrichtungen und Verfahren entworfen und implementiert werden, um physische Tätigkeiten durch mechanische Tätigkeiten zu ersetzen. Dieser Schritt wird als Mechanisierung bezeichnet.
- Bei der Mechanisierung werden Steuerungseingriffe, welche Teilprozesse in Gang setzen, nicht vom Menschen vorgenommen.
- Automatisierte Produktion ist immer billiger als eine mechanisierte.
- Mechanisierung ist eine Sonderform der Automatisierung. Es werden nur einfache Maschinen verwendet.



Übungsaufgabe 1.3. Beschreiben Sie, welche Art von Prozessen sich im Allgemeinen sehr stark anbieten automatisiert zu werden.



Übungsaufgabe 1.4. Was verstehen Sie unter dem Begriff Industrie 5.0? Gehen Sie dabei auch auf den Unterschied zwischen Kooperation und Kollaboration ein.



Übungsaufgabe 1.5. Es soll ein Roboter zum Verpacken von Flaschen in Versandkartons verwendet werden. Welchen Robotertypen würden Sie hierfür einsetzen (Flaschengröße: 200 ml; Kartongröße: 300 mmx30 mm)? Begründen Sie Ihre Wahl.



Übungsaufgabe 1.6. Beschreiben Sie zwei physikalische/mechanische Einschränkungen, die das Bewegungsverhalten und die Genauigkeit von Industrierobotern beeinflussen könnten?



Übungsaufgabe 1.7. Skizzieren Sie die kinematische Kette und den Arbeitsraum des Roboters, der im Steckbrief des vertikal aktuierten Industrieroboters dargestellt ist.



Übungsaufgabe 1.8. Ordnen Sie folgende Aufgaben den Funktionsclustern Sense, Plan und Act zu:

- Auslesen des Abstandes eines Roboters, basierend auf Kameradaten.
- Ansteuern der Roboterantriebe, auf Basis geplanter Bewegungsabläufe.
- Entscheiden, ob ein mobiler Roboter die aktuelle Transportaufgabe realisieren oder ob er zur Ladestation fahren soll.
- Ausweichbewegungen berechnen, um Kollisionen zu verhindern.

■ Literatur

- Alami, R., Chatila, R., Fleury, S., Ghallab, M. und Ingrand, F. (1998). An architecture for autonomy, *The International Journal of Robotics Research* **17**(4): 315–337.
- Albus, J., Lumia, R., Fiala, J. und Wavering, A. (1989). NASREM – the NASA/NBS standard reference model for telerobot control system architecture, *International Symposium on Industrial Robots*.
- Albus, J. S. (1997). The NIST real-time control system (RCS): an approach to intelligent systems research, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* **9**(2-3): 157–174.
- Arkin, R. C. (1998). *Behavior-Based Robotics*, MIT press.
- Balch, T. und Arkin, R. C. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **14**(6): 926–939.
- Barnhart, R. K., Marshall, D. M. und Shappee, E. (2021). *Introduction to unmanned aircraft systems*, CRC Press.
- Bartneck, C., Belpaeme, T., Eyssele, F., Kanda, T., Keijsers, M. und Šabanovic, S. (2020). *Mensch-Roboter-Interaktion*, Hanser.
- Brooks, R. (1986a). Achieving artificial intelligence through building robots, *Technical report*, Massachusetts Inst. of tech. Cambridge Artificial Intelligence Lab.
- Brooks, R. (1986b). A robust layered control system for a mobile robot, *IEEE Journal on Robotics and Automation* **2**(1): 14–23.
- Brooks, R. (1991). Intelligence without representation, *Artificial intelligence* **47**(1-3): 139–159.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, John Wiley & Sons.
- Gat, E. (1998). On three-layer architectures, *Artificial intelligence and mobile robots* **195**: 210.
- Ghallab, M., Nau, D. und Traverso, P. (2014). The actors view of automated planning and acting: A position paper, *Artificial Intelligence* **208**: 1–17.
- Haun, M. (2013). *Handbuch Robotik: Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*, Springer.
- Hesse, S. (2013). *Industrieroboterpraxis: Automatisierte Handhabung in der Fertigung*, Springer.
- Ingrand, F. und Ghallab, M. (2017). Deliberation for autonomous robots: A survey, *Artificial Intelligence* **247**: 10–44.
- Lunze, J. (2020). *Automatisierungstechnik*, De Gruyter.
- Maier, H. (2016). *Grundlagen der Robotik*, VDE.
- Mareczek, J. (2020). *Grundlagen der Roboter-Manipulatoren*, Springer.
- Müller, R., Franke, J., Henrich, D., Kuhlenkötter, B., Raatz, A. und Verl, A. (2019). *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*, Hanser.
- Murphy, R. R. (2019). *Introduction to AI robotics*, MIT press.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R. und Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*, MIT press.

2

Einführung in die automatisierte Fahrzeugführung

Dieses Kapitel behandelt die Grundbegriffe des automatisierten Fahrens. Zudem verdeutlicht es die Nähe der Wissenschaftsfelder des automatisierten Fahrens und der Robotik.

■ 2.1 Automatisierte Fahrzeugführung vs. Robotik

Stellen wir uns folgende drei User Stories vor:

- Ein **Shuttle** fährt auf einer engen Straße im urbanen Bereich. Hierbei kommt es zu einer Situation, bei welcher der Fahrstreifen durch ein parkendes Auto versperrt ist. Jetzt muss das Shuttle entscheiden, wann es sicher das parkende Auto umfahren kann. Ist die Entscheidung zum Umfahren getroffen, muss das Shuttle im Anschluss einen optimalen Bewegungsablauf für das Umfahrmanöver planen und ausführen (unter Berücksichtigung der sehr engen Straßenverhältnisse).
- Ein **mobiles Robotiksystem** wird in der Werkslogistik eingesetzt. Seine Aufgabe besteht darin, Werkstücke aus einem Materiallager zu einer spezifischen Werkzeugmaschine zu transportieren. Hierbei folgt es einer fest vorgegebenen Route. Auf dieser Route befindet sich unerwarteterweise eine Europalette, welche fälschlich dort abgestellt wurde und nun umfahren werden muss, um die Produktion nicht zum Erliegen zu bringen. Jetzt muss das mobile Robotiksystem entscheiden, wann das Hindernis sicher umfahren werden kann. Ist die Entscheidung zum Umfahren getroffen, muss das mobile Robotiksystem im Anschluss einen optimalen Bewegungsablauf für das Umfahrmanöver planen und ausführen (unter Berücksichtigung der engen Verhältnisse in der Werkhalle).
- Ein **Industrieroboter** wird im Rahmen einer Industrie 5.0-Anwendung zur kooperativen Montage eines Werkstücks eingesetzt. Hierbei führen Werker und Roboter gemeinsam die Montage durch. Bei einem der letzten Montageschritte stellt der Roboter fest, dass sich der Werker falsch positioniert hat, was zu einer Kollision mit der zuvor berechneten Bewegungsbahn des Roboters führen würde. Jetzt muss das Robotiksystem entscheiden, wann der vorab geplante Bewegungsablauf in die Kollisionszone führt. An dieser Stelle muss dann eine Entscheidung zum Umfahren getroffen werden. Im Anschluss muss das Robotiksystem einen optimalen Bewegungsablauf für das Umfahrmanöver planen und ausführen (unter Berücksichtigung der Arbeitsräume).

In allen drei User Stories sind die Entscheidungsfindung und die Bewegungsplanung essenzieller Bestandteil. Sie können allerdings nur sinnvoll angewendet werden, wenn die entsprechende Sensorik die Hindernisse erkennt und die unterlagerte Aktorik bzw. die Reglerstrukturen auch in der Lage sind, die neu geplanten Bewegungsabläufe umzusetzen. Dementsprechend gilt das prinzipielle Sense-Plan-Act-Paradigma neben Robotiksystemen auch für automatisierte Fahrzeuge und kann, wie wir in den nachfolgenden Kapiteln noch sehen werden, weiter verfeinert werden. Darüber hinaus lassen sich nicht nur einzelnen prinzipielle Aufgaben bzw. Verarbeitungsschritte von der Robotik auf automatisierte Fahrfunktionen übertragen sondern auch einzelne Algorithmen und Lösungsstrategien. Daher können, unabhängig von deren konkreter Anwendung, einheitliche methodische Werkzeuge genutzt werden, um diese Aufgaben zu lösen. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel dargestellt, existieren im Gebiet der Robotik bereits einige etablierte Ansätze zum Lösen solcher Fragestellungen, weshalb wir überzeugt sind, dass zukünftige selbstfahrende Fahrzeuge viel von der Robotik lernen und profitieren können.

■ 2.2 Level der Autonomie

Der folgende Abschnitt widmet sich der Fragestellung: Wie lange sprechen wir noch von Fahrerassistenzsystemen und ab wann von automatisiertem oder sogar autonomem Fahren? Hierfür stellen wir zu Beginn die unterschiedlichen Level automatisierter Fahrfunktionen vor. Mithilfe der ausgearbeiteten Klassifikation betrachten wir, aufbauend auf einer kurzen Beschreibung, etablierte Fahrerassistenzsysteme in Relation zu den Automatisierungsleveln. Dabei wird herausgestellt, dass für eine Einstufung der Automatisierungslösung neben der reinen Funktionalität auch die zu betrachtende Umgebungssituation (engl.: Operational Design Domain, kurz: ODD) und die konkrete Automatisierungsaufgabe (engl.: Dynamic Driving Task, kurz: DDT) klar definiert sein müssen.



Definition 2.1 (Operational Design Domain, kurz: ODD). Die ODD beschreibt die spezifischen Bedingungen, unter denen eine bestimmte Fahrfunktion ausgelegt ist. ■



Definition 2.2 (Dynamic Driving Task, kurz: DDT). Die dynamische Fahraufgabe bezeichnet alle betrieblichen und taktischen Echtzeitfunktionen, die für den Betrieb eines Fahrzeuges im Straßenverkehr innerhalb seiner spezifischen ODD erforderlich sind, mit Ausnahme der strategischen Funktionen wie Routenplanung sowie der Auswahl von Zielen und Wegpunkten. ■

2.2.1 Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens

Es existieren vielfältige Assistenzsysteme zur Realisierung verschiedenster Fahraufgaben. Um eine Klassifikation dieser Assistenzsysteme hinsichtlich ihrer Fähigkeit, die Fahrzeugführung zu automatisieren, vornehmen zu können, wurden sogenannte Automatisierungslevel eingeführt. Wir werden zur Klassifizierung den SAE-Standards folgen. Diese Klassifizierung beinhaltet sechs Ausbaustufen der Fahrfunktionen von Level 0 (keine Automatisierung) bis Level 5 (volle Automatisierung).

Die **Automatisierungslevel** beschreiben hierbei jeweils die entsprechenden Mindestanforderungen an die Fahrzeugautomatisierung, vgl. Bild 2.1. Die einzelnen Automatisierungslevel lassen sich anschaulich daran unterscheiden, welche Aufgaben vom Fahrenenden und welche Aufgaben vom Automatisierungssystem realisiert werden. Dies umfasst neben der eigentlichen Fahraufgabe (Lenken oder Bremsen) auch Beobachtungsaufgaben. Beobachtungsaufgaben unterscheiden sich je nachdem, ob die Fahrenenden die Umgebung bzw. die Situation permanent überwachen müssen oder die Automatisierung eine Beschäftigung mit anderen Tätigkeiten erlaubt. Es existieren unterschiedliche Definitionen der einzelnen Level durch unterschiedliche Standardisierungsinstitutionen (Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Society of Automotive Engineers International (SAE) und Verband der Automobilindustrie (VDA)).

Betrachten wir die einzelnen Level aus Bild 2.1, könnte der Eindruck entstehen, dass diese mehr oder weniger einen kontinuierlichen Entwicklungsprozess beschreiben. Allerdings sind zwischen den einzelnen Leveln disruptive Änderungen notwendig. Bspw. ist der Übergang von Level 2 zu Level 3 signifikant. Denn das Versprechen des Automatisierungslevels 3 zielt darauf ab, dass die Fahrenenden nicht mehr permanent die Situation überwachen müssen und das System garantiert, das Geschehen bis zu einer Übernahme durch den Fahrenenden zu beherrschen. Damit sind aus Sicherheitsgründen äußerst umfangreiche Aufwände in der Entwicklung von Hardware und Software notwendig. Daher verwundert es nicht, dass Firmen wie Tesla mit ihrem „Full Self Driving“ zu Beginn des Jahres 2022 keine Automatisierungsgrade höher als Level 2 realisierten. Denn auch hier muss die fahrende Person permanent die Umgebung beobachten und jederzeit eingreifen können, auch wenn das Fahrzeug die Längs- und Querführung übernimmt. Das weltweit erste Fahrzeug, welches mit einer Level 3 Funktion verkauft werden durfte, stammt von Mercedes-Benz. Der „Drive Pilot“ des Stuttgarter Unternehmens erlaubt es dem Fahrenenden, nicht permanent die Situation zu beobachten. Stattdessen haben die Fahrenenden bis zu 10 Sekunden Zeit, die Fahrzeugführung zu übernehmen, wenn sie von dem System aufgefordert werden.

Wie wir allerdings im Folgenden noch sehen werden, ist im Allgemeinen nicht nur die **Funktion** selbst von Interesse sondern auch, in welcher **Umgebung** diese angewendet werden kann/ darf. So ist der „Drive Pilot“ nur auf Autobahnabschnitten und innerhalb eines bestimmten Geschwindigkeitsfensters funktionsfähig. Das hat einerseits technische Gründe, so sind bspw. hochauflösende Karten der Strecken notwendig, als auch regulatorisch-gesetzgeberische Gründe. Somit ist zu erwarten, dass höhere Level der Automatisierung vor allem bei Systemen mit bekannten und begrenzten Arbeitsräumen, wie feste Strecken oder eine bestimmte Art von Umgebungen, Einzug halten werden. Daher verwundert es nicht, dass zurzeit viele Projekte mit automatisierten Shuttle-Lösungen umgesetzt werden, da diese eine feste und bekannte Strecke fahren. Auch automatisiertes Parken steht im Fokus der aktuellen Entwicklung.

Die im Folgenden dargestellten sechs Steckbriefe zu den jeweiligen Automatisierungslevel umfassen eine kurze allgemeine Erläuterung sowie eine Aufteilung der Fahrzeugführungsaufgaben zwischen Fahrenendem und Automatisierungssystem. Um die Darstellungen möglichst intuitiv zu gestalten, werden zur Erläuterung auf den Steckbriefen jeweils zwei User Stories verwendet, welche verdeutlichen, wie schrittweise der Umfang der Automatisierung je Level zunimmt. Hierbei widmet sich eine User Story dem Themenfeld der Personenbeförderung im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) mittels Bus. Die zweite User Story fokussiert sich auf den Individualverkehr.

Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Nicht automatisiert	Assistiert	Teilautomatisiert	Bedingt automatisiert	Hochautomatisiert	Vollautomatisiert
					
Fahrende führen dauerhaft Längs- und Querführung des Fahrzeuges aus.	Fahrende führen dauerhaft Längs- oder Querführung des Fahrzeuges aus.	Fahrende müssen das System dauerhaft überwachen.	Fahrende müssen das System nicht dauerhaft überwachen.	Keine Fahrenden erforderlich im spezifischen Anwendungsfall.	Von „Start“ bis „Ziel“ sind keine Fahrenden zur Fahrzeugführung oder -überwachung erforderlich.
Kein eingreifendes Fahrzeugsystem aktiv.	Das System übernimmt die jeweils andere Fahrfunktion.	Das System übernimmt Längs- und Querführung des Fahrzeuges in einem spezifischen Anwendungsfall.	Das System übernimmt Längs- und Querführung des Fahrzeuges in einem spezifischen Anwendungsfall. Es erkennt Systemgrenzen und fordert die Fahrenden zur Übernahme mit ausreichender Zeit auf.	Das System kann im spezifischen Anwendungsfall alle Situationen selbstständig bewältigen.	Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen.
Die Fahrenden überwachen das Geschehen			Das System überwacht das Geschehen		

Bild 2.1 Überblick über die Level der Automatisierung beim automatisierten Fahren – Quelle: SAE International, Standard J3016

Allgemein

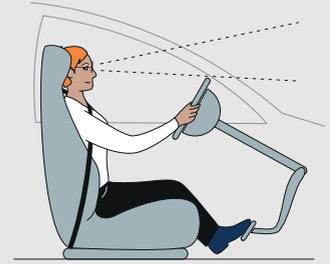
Im Fall des SAE-Levels 0 fahren die Fahrenden eigenständig. Die Quer- und Längsführung des Fahrzeuges zur Realisierung der jeweiligen Fahraufgabe (engl.: DDT) erfolgen ohne Unterstützung der Automatisierung. Allerdings können Systeme wie das Antiblockiersystem (kurz: ABS) oder das elektronische Stabilitätsprogramm (kurz: ESP) vorhanden sein. Diese dienen zur Fahrzeugstabilisierung, nicht zur Fahrzeugführung.



Beispiel 2.1 (User Story ÖPNV). Wir wollen in einer ländlichen Region von unserem Haus zu einem beliebten Einkaufszentrum fahren. Aufgrund der winterlichen Wetterbedingungen haben wir kein Interesse daran, mit unserem eigenen Auto die Fahrt anzutreten. Wir gehen zur Bushaltestelle und nach kurzer Zeit fährt bereits der Bus ein. Die Türen des Busses öffnen sich, der Fahrer grüßt uns freundlich und wir steigen ein. Während der Fahrt hören wir im Hintergrund, wie der Fahrer mit einem Fahrgast über die momentan fürchterlichen Straßenbedingungen und den Nebel spricht. Bei solchen Wetterbedingungen strengt das Fahren wirklich an. An einer schlecht einsehbaren Kreuzung nimmt ein Fahrzeug unserem Bus die Vorfahrt. Als Reaktion muss der Fahrer eine Vollbremsung machen. Der Bus kommt nach wenigen Metern zum Stehen, da das ABS es geschafft hat, den Bremsweg sehr kurz zu halten. ■



Beispiel 2.2 (User Story Individualverkehr). Heute treffen wir uns zu einem gemeinsamen Mittagessen in einem Restaurant in der Gegend. Da das aktuelle Wetter keine Lust auf Laufen oder Radfahren macht, entscheiden wir uns dafür, mit dem Auto zum Restaurant zu fahren. Leider ist das Verkehrsaufkommen auf der leicht überfrosteten Strecke recht hoch. So ist unsere komplette Konzentration auf die Fahrzeugführung gerichtet. Trotz hoher Vorsicht fahren wir eine Kurve etwas zu schnell an, weshalb das Fahrzeug leicht ins Rutschen kommt. Dank des ESP fängt sich das Fahrzeug schnell wieder ab. ■



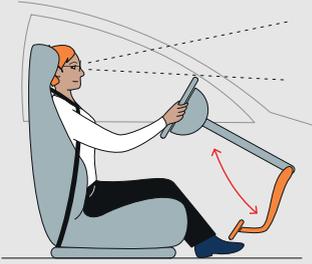
SAE-Level 0 Nicht automatisiert

Lenken und
Beschleunigen/
Bremsen
Fahrende

Beobachtet die
Umgebung
Fahrende

Rückfallebene
der DDT
Fahrende

Befähigung, komplett
Fahrfunktionen zu
realisieren
Keine



SAE-Level 1 Assistiert

Lenken und
Beschleunigen/
Bremsen

Fahrende und System

Beobachtet die
Umgebung

Fahrende

Rückfallebene
der DDT

Fahrende

Befähigung, komplett
Fahrfunktionen zu
realisieren

Einzelne Fahrfunktionen

Allgemein

Im Fall des SAE-Levels 1 werden die Fahrenden bei einzelnen Aufgaben der Quer- und Längsführung des Fahrzeuges von der Automatisierung unterstützt. Eine klassische automatisierte Fahrfunktion des SAE-Levels 1 ist die Automatische Distanzregelung (engl.: Adaptive Cruise Control, kurz: ACC), welche häufig auch als Abstandsregeltempomat bezeichnet wird. Bei Verwendung dieser Fahrfunktion werden die Fahrenden bei der Längsführung unterstützt. Konkret ermöglicht das ACC sowohl eine vorgegebene Wunschgeschwindigkeit als auch einen vorgegebenen Abstand zum Vorderfahrzeug einzustellen. Dafür führt es automatisiert Brems- und Beschleunigungseingriffe durch. Eine zweite Assistenzfunktion aus dem SAE-Level 1 ist der Spurhalteassistent (engl.: Lane Keeping Assist, kurz: LKA). Die Umgebungsüberwachung sowie die Überwachung der korrekten Funktionsfähigkeit der Fahrfunktion ist allerdings weiterhin Aufgabe des Fahrenden. Somit verstehen sich automatisierte Fahrfunktionen der SAE-Level 1 lediglich als Assistenzfunktionen.



Beispiel 2.3 (User Story ÖPNV). Während einer Busfahrt hören wir zu, wie sich der Busfahrer mit einem Fahrgast über seinen neuen Bus unterhält. Der Bus ist mit einem sogenannten ACC ausgestattet, was erlaubt, dass der Bus selbstständig bis zur gewünschten Geschwindigkeit beschleunigt, zu den vorausfahrenden Fahrzeugen einen vorgegebenen Abstand hält und bei Hindernissen selbstständig anhält, schwärmt der Busfahrer. Dies erlaubt es ihm, auch am Ende seiner Schicht den Straßenverkehr noch aufmerksam zu überwachen, denn jetzt strengt ihn das Busfahren deutlich weniger an. Und tatsächlich, der Busfahrer hat seine Füße die ganze Zeit während der Fahrt bequem neben den Pedalen stehen.



Beispiel 2.4 (User Story Individualverkehr). Während einer Autofahrt klingelt unser Telefon und wir nehmen das Gespräch über unsere Freisprechanlage an. Ohne dass wir es merken, fordert das Gespräch einen erheblichen Teil unserer Aufmerksamkeit. Dadurch konzentrieren wir uns zeitweise etwas weniger auf den Straßenverkehr. In einer kurvenreichen Passage kommen wir infolgedessen so nah an den Fahrbahnrand, dass wir fast in den entgegenkommenden Verkehr fahren. Allerdings erkennt dies unser LKA-System rechtzeitig und lenkt selbstständig leicht gegen, wodurch wir sicher auf unserer Fahrspur bleiben.

Allgemein

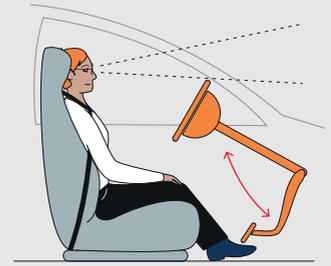
Sobald Assistenzsysteme zur gleichzeitigen Quer- und Längsführung des Fahrzeuges verwendet werden, befinden wir uns in SAE-Level 2. Hierbei wird vom teilautomatisierten Fahren gesprochen. In diesem Fall werden die Fahrenden bei der Quer- und Längsführung des Fahrzeuges von der Automatisierung unterstützt. Die Umgebungsüberwachung sowie die Überwachung der korrekten Funktionsfähigkeit der Fahrfunktion ist auch hier weiterhin Aufgabe des Fahrenden. Somit verstehen wir Automatisierungslösungen aus dem SAE-Level 2 als reine Assistenzsysteme. Betrachten wir das Feld der zivilen Luftfahrt, so stellen wir fest, dass aktuelle kommerziell verfügbaren Lösungen aus diesem Bereich auch maximal Level 2 zuzuordnen sind, da die Verantwortung für die Flugaufgabe nach wie vor komplett beim Menschen liegt.



Beispiel 2.5 (User Story ÖPNV). Nach der guten Resonanz der Fahrer wurden die neuen Busse, welche über ein ACC verfügen, weiter aufgerüstet und verfügen jetzt sogar über ein LKA. Diese Veränderung fällt jedem auf, der den neuen Bus betritt. Denn unser Fahrer strahlt jeden Fahrgast mit einem großen Lächeln an und präsentiert stolz die neue Fahrfunktion. Es sieht wirklich beeindruckend aus: Bei Streckenabschnitten mit gut erkennbaren Fahrbahnmarkierungen sitzt der Busfahrer entspannt da und der Bus fährt wie von Geisterhand, ohne dass der Fahrer die Pedale oder das Lenkrad bedient.



Beispiel 2.6 (User Story Individualverkehr). Während einer Autofahrt kommen wir leider in einen Stau. Jetzt heißt es für die nächsten 10 Minuten immer wieder langsam anfahren und bremsen. Ganz schön nervig, so ein Stop-and-Go Verkehr. Zum Glück verfügt unser Auto über einen Stauassistenten. So können wir einfach den Wunschabstand sowie die Wunschgeschwindigkeit am Lenkrad einstellen. Im Anschluss kümmert sich unser Fahrzeug komplett selbstständig um das nervige Beschleunigen und Bremsen im stockenden Verkehr. Als dann noch unser Fahrzeug anfängt, leichte Lenkbewegungen selbstständig durchzuführen, um auf der Fahrspurmitte zu bleiben, können wir uns entspannt zurücklehnen und uns auf das Beobachten des Verkehrsgeschehens konzentrieren. Als sich der Verkehr allmählich auflöst, beschleunigen wir. Bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h erhalten wir einen Warnhinweis und der Stauassistent deaktiviert sich.



SAE-Level 2 Teilautomatisiert

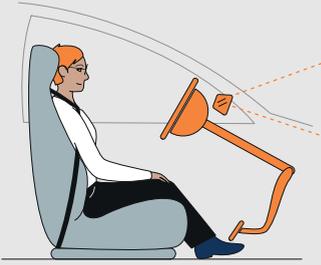
Lenken und
Beschleunigen/
Bremsen
System

Beobachtet die
Umgebung
Fahrende

Rückfallebene
der DDT
Fahrende

Befähigung, komplett
Fahrfunktionen zu
realisieren

Einzelne Fahrfunktionen



SAE-Level 3

Bedingt automatisiert

Lenken und
Beschleunigen/
Bremsen
System

Beobachtet die
Umgebung
System

Rückfallebene
der DDT
Fahrende

Befähigung, komplett
Fahrfunktionen zu
realisieren
Einzelne Fahrfunktionen

Allgemein

Systeme, die in die Kategorie SAE-Level 3 fallen, ermöglichen eine bedingte Automatisierung des Fahrzeuges. In diesem Fall werden die Fahrenden sowohl bei der Quer- und Längsführung des Fahrzeuges als auch bei der Umgebungsüberwachung von der Automatisierung unterstützt. Die Fahrenden müssen allerdings jederzeit in der Lage sein, sämtliche Aspekte des Fahrens wieder zu übernehmen, wenn das System dazu auffordert. Somit bilden die Fahrenden im Fehlerfall eine Rückfallebene für solche Systeme.



Beispiel 2.7 (User Story ÖPNV). Bei der nächsten Fahrt mit dem Bus erzählt uns der Fahrer, dass er in seinem Bus jetzt einige neue Sensoren eingebaut bekommen hat und ein Software-Update eingespielt wurde. Jetzt ist es ein Level-3-Bus. Als wir fragen, was dies bedeutet, schmunzelt uns der Fahrer an. Er meint, der größte Unterschied ist, dass er sich jetzt mehr wie ein Fahrlehrer als ein klassischer Busfahrer fühlt. Er erzählt uns, dass der Bus mittlerweile große Teile der Strecke selbstständig fahren kann. Bei schlecht sichtbaren Streckenmarkierungen, schlechten Sichtverhältnissen und unübersichtlichen Verkehrssituationen (wie Kreuzungen) ist der Bus allerdings noch nicht in der Lage, selbst zu fahren. Daher ist die Hauptaufgabe des Busfahrers im Level-3-Bus, bereit zu sein einzugreifen, wenn das System die Situation nicht mehr handhaben kann und bei einer Aufforderung, die Fahrzeugführung in einer adäquaten Zeit zu übernehmen. So hält der Bus zum Beispiel bei jeder Kreuzung an und wartet auf ein kurzes Bestätigungssignal des Busfahrers, um die Fahrt fortsetzen zu können. Somit ist es hierbei Aufgabe des Fahrenden, das Verkehrsgeschehen zu beobachten und Entscheidungen daraus abzuleiten, wie bspw. die Fahrtfreigabe an Kreuzungen.



Beispiel 2.8 (User Story Individualverkehr). Bei unserer nächsten Fahrt zum Restaurant verwenden wir ein neues Car-Sharing-Auto. Auf dem Fahrzeug ist ein großer Aufkleber mit der Aufschrift „SAE-Level 3“ angebracht. Mit diesem Auto macht die Fahrt noch mehr Spaß als mit unserem eigenen PKW! Das neue Fahrzeug ist in der Lage, bei großen Teilen der Strecke zum Restaurant selbstständig das Bremsen, Beschleunigen und Lenken zu übernehmen. Wir haben primär nur beobachtende Aufgaben, um bei Aufforderung das Fahrzeug manuell führen zu können.

Allgemein

Fahrfunktionen, die der Kategorie SAE-Level 4 angehören, ermöglichen eine automatisierte Fahrzeugführung ohne die Erwartung, dass die Fahrenden auf Anforderung (bspw. im Fehlerfall) in die Fahrzeugführung korrigierend eingreifen. Somit ist das Fahrzeug in der Lage, ohne menschliche Reaktion sein Verhalten automatisiert zu steuern. An dieser Stelle dient die Automatisierung nicht mehr als reines Assistenzsystem. In diesem Fall werden sowohl Quer- und Längsführung des Fahrzeuges als auch Umgebungsüberwachung sowie Fehlerhandling von der Automatisierung realisiert. Die Fahrenden müssen keine Aufgaben zur Fahrzeugführung übernehmen. Allerdings ist die ODD der Fahrzeuge eingeschränkt.



Beispiel 2.9 (User Story ÖPNV). Wir staunen nicht schlecht. Das Aussehen unseres Busses hat sich komplett gewandelt. Als die Bustür aufging und wir einsteigen wollten, winkt uns unser Busfahrer zu und kontrolliert wie immer unsere Fahrkarte. Jedoch ist jetzt sein Fahrersitz dem Innenraum zugewandt und es gibt weder Fahrpedale noch ein Lenkrad. Nachdem wir eingestiegen sind, schließt sich die Bustür und der Bus fährt von selbst los. Der Busfahrer hat jetzt die Möglichkeit, sich während der Fahrt um das Wohlbefinden seiner Passagiere zu kümmern. Nach kurzer Fahrt treffen wir auf eine Baustelle, die umfahren werden muss. Hier muss unser Busfahrer eine Meldung an den Teleoperator absetzen und dieser führt den Bus teleoperiert durch die Baustelle (Mensch in Leitstand steuert Bus fern, auf Basis der Sensorwerte des Buses).



Beispiel 2.10 (User Story Individualverkehr). Als wir bei unserer nächsten Fahrt wieder das SAE-Level-3-Fahrzeug buchen wollen, ist dieses leider gerade nicht verfügbar. Nichts ahnend buchen wir für unsere Fahrt das gerade neu erschienene Level-4-Fahrzeug. Als wir gerade in das Auto steigen wollen, stoppen wir. Das Auto verfügt weder über ein Lenkrad noch über Fahrpedale. Als hätte das Auto unsere Verwunderung bemerkt, begrüßt uns eine freundliche Stimme aus dem Audiosystem des Fahrzeuges und bittet uns, das Fahrzeug zu betreten. Die freundliche Stimme fragt uns, wo wir hinfahren möchten und erklärt uns, dass die Fahrt wenige Minuten länger dauern wird als sonst, da einige Straßen für dieses neue Fahrzeug noch zu anspruchsvoll wären. Wir folgen den Ausführungen der Stimme so gebannt, dass wir nicht merken, dass sich das Fahrzeug bereits in Bewegung gesetzt hat.



SAE-Level 4 Hochautomatisiert

Lenken und
Beschleunigen/
Bremsen
System

Beobachtet die
Umgebung
System

Rückfallebene
der DDT
System

Befähigung, komplett
Fahrfunktionen zu
realisieren
Einzelne Fahrfunktionen



SAE-Level 5 Vollautomatisiert

Lenken und
Beschleunigen/
Bremsen

System

Beobachtet die
Umgebung

System

Rückfallebene
der DDT

System

Befähigung, komplett
Fahrfunktionen zu
realisieren

Alle Fahrfunktionen

Allgemein

Ähnlich zu Fahrfunktionen der Kategorie SAE-Level 4 ermöglichen auch Fahrfunktionen der Kategorie 5 eine automatisierte Fahrzeugführung ohne die Erwartung, dass die Fahrenden auf Anforderung (bspw. im Fehlerfall) in die Fahrzeugführung korrigierend eingreifen. Somit ist auch hier die Automatisierung in der Lage, ohne menschliche Reaktion das Fahrzeug automatisiert zu steuern, weshalb wir in diesem Zusammenhang vom autonomen Fahren sprechen. In diesem Fall werden sowohl die Quer- und die Längsführung des Fahrzeuges als auch die Umgebungsüberwachung sowie das Fehlerhandling von der Automatisierung realisiert. Die Fahrenden müssen hier keine Aufgaben zur Fahrzeugführung mehr übernehmen. Als Ergänzung zu Fahrfunktionen der Kategorie SAE-Level 4 wird hier jedoch eine vollständige Fahrzeugautomatisierung angestrebt, bei der die dynamische Fahraufgabe unter jeder Fahrbahn- und Umgebungsbedingung durchgeführt werden kann. Wir haben somit eine Automatisierung vom Start bis zum Ziel und die Insassen sind lediglich Passagiere.



Beispiel 2.11 (User Story ÖPNV). Mittlerweile ist unser Bus in der Lage, sämtliche Strecken sowohl inner- als auch außerorts selbstständig zurückzulegen. Zudem scheint es so, dass unser Busfahrer seine neue Bestimmung gefunden hat. Er geht komplett in der neuen Aufgabe der Passagierbetreuung auf. Als er uns sieht, bleibt er kurz an unserem Sitz stehen und sagt grinsend „Jetzt fühle ich mich weder als Fahrer noch als Fahrlehrer. Ich bin jetzt ein Steward – und ich liebe es!“. Schmunzelnd läuft er zum nächsten Fahrgast, reicht ihm ein Getränk und beginnt wieder seine Geschichten über den Wandel des Busfahrerberufes zu erzählen.



Beispiel 2.12 (User Story Individualverkehr). Das neue Level-5-Car-Sharing-Fahrzeug ist jetzt in der Lage, sämtliche Straßen in der Region sicher zu befahren. Zudem hat sich die gesamte Innengestaltung des Fahrzeuges stark gewandelt. Mittlerweile ähnelt das Aussehen des Fahrgastraumes mehr einem futuristischen Wohnzimmer als einem ursprünglichen Auto. Sobald wir das Fahrzeug betreten, ändert sich das Interieur und die Lichtgestaltung entsprechend unserer Vorlieben. Das Fahrzeug fährt ohne lästige Interaktionen mit uns auf der optimalen Route zu unserem Ziel. So macht Autofahren Spaß!

2.2.2 Vom assistierten zum autonomen Fahren

In diesem Abschnitt werden die verbreitetsten Fahrerassistenzsysteme (FAS) eingeführt. Zudem wird besprochen, wie die Kombinationen dieser FAS zur Realisierung von automatisierten Fahrfunktionen führen können. Wie in Bild 2.2 dargestellt, wird zwischen drei Kategorien für FAS unterschieden:

- FAS zur aktiven Fahrzeugführung, welche Teilfunktionen in der Längs- oder Querführung des Fahrzeuges übernehmen. Die Zuschaltung dieser Funktionen erfolgt situationsbedingt und im Allgemeinen durch aktives Handeln des Fahrenden.
- Komfort-Assistenzsysteme, welche nicht direkt in die Fahrdynamik eingreifen. Hierzu zählen vor allem Systeme, die das Licht an die jeweilige Situation anpassen oder zusätzliche Informationen für den Fahrenden bereitstellen.
- Stabilisierende FAS, welche dazu dienen, permanent das Fahrverhalten zu überwachen und korrigierend einzugreifen.

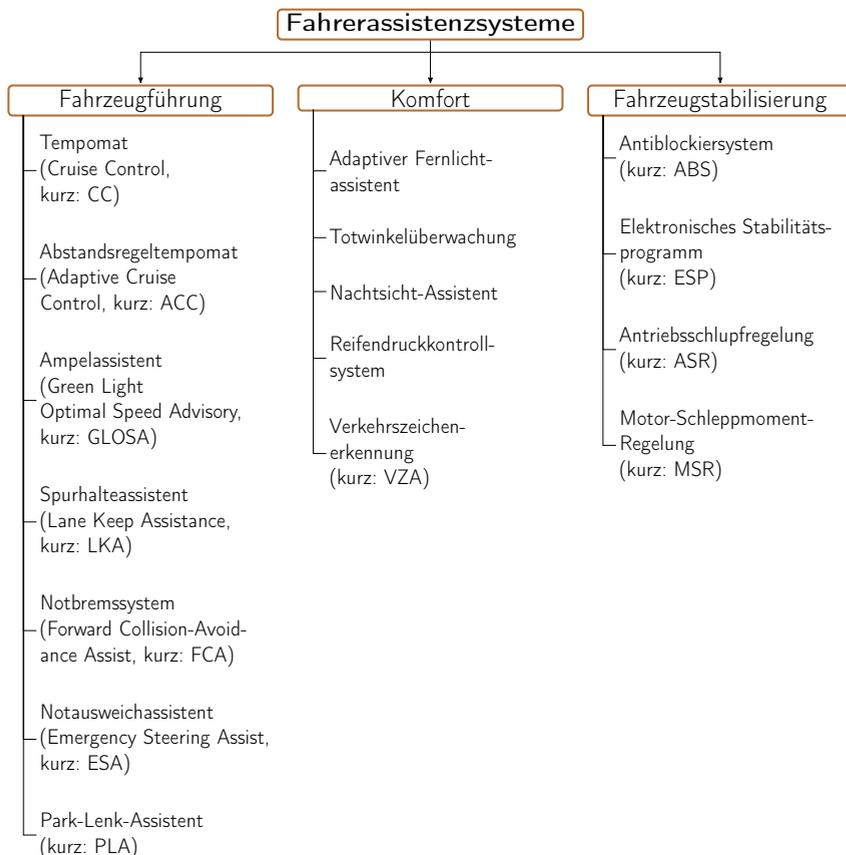


Bild 2.2 Überblick Fahrerassistenzsysteme

Da stetig auf die grundlegenden FAS zur Fahrzeugführung zurückgegriffen wird, werden diese folgend in kompakter Form auf funktionaler Ebene beschrieben.