

Horst Czichos

# Mechatronik

Grundlagen und Anwendungen  
technischer Systeme

*3. Auflage*



Springer Vieweg

---

# Mechatronik

---

Horst Czichos

# Mechatronik

Grundlagen und Anwendungen  
technischer Systeme

3., überarbeitete und erweiterte Auflage



Springer Vieweg

Horst Czichos  
Beuth Hochschule für Technik  
Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-658-09949-7  
DOI 10.1007/978-3-658-09950-3

ISBN 978-3-658-09950-3 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2006, 2008, 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

*Lektorat:* Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
([www.springer.com](http://www.springer.com))



---

## Vorwort zur 3. Auflage

Die Mechatronik ist mit der systemtechnischen Kombination von Mechanik – Elektronik – Informatik in Verbindung mit Sensorik und Aktorik für Regelung und Steuerung heute eine grundlegende interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft für alle Bereiche der Technik.

Das Mechatronik-Buch ist ein *Kompedium* für Studierende und Ingenieure aller Technikbereiche. Es führt historisch getrennt entstandene physikalische und technologische Elemente – systemtechnisch bewertet – zusammen. Die Konzeption des Buches und die Besonderheiten der interdisziplinären Darstellung sind im Vorwort der ersten Auflage (Seite VII) und in den Anmerkungen zum Buch (Seite XI) erläutert.

Das Mechatronik-Buch vermittelt kompaktes Grundlagenwissen, unterstützt den Dialog zwischen den in der Mechatronik zusammenfließenden Einzeldisziplinen und illustriert das breite Anwendungsspektrum mechatronischer Systeme. Sie entstehen als Innovationen häufig an den Schnittstellen von Disziplinen.

Die aktuelle Auflage des Mechatronik-Buches wurde in den Grundlagen vertieft und in den Anwendungen erweitert. Die folgenden Stichworte geben eine Übersicht über neu aufgenommene Themenfelder:

- Metrologische und messtechnische Grundlagen der Sensorik,
- Sensorbasierte Cyber-physische Systeme,
- Funktionssicherheit und Strukturintegrität technischer Systeme,
- Zustandsüberwachung von Maschinen,
- Nano-Interface-Technologie zur Erhöhung der Speicherkapazität von Computern,
- Monitoring der baulichen Infrastruktur.

Für die zahlreichen konstruktiven Kommentare und Hinweise zur Vertiefung und Erweiterung des Inhalts dieses Buches sowie zur Bild- und Textgestaltung danke ich sehr herzlich – insbesondere Dr. Rosemarie Helmerich, BAM (Bauliche Infrastruktur), Dir. und Prof. Dr. Robert Wynands, PTB (Metrologische Grundlagen), Prof. Dr. Frank Talke UCSD USA (Computertechnik) und Prof. Dr. Alexander Reinefeld ZIB (Technische Informatik).

Ebenso herzlich gilt mein Dank Herrn Thomas Zipsner und Frau Imke Zander, Lektorat Maschinenbau Springer Vieweg, für die wiederum ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Berlin, März 2015

Horst Czichos

---

# Vorwort der 1. Auflage

Die Mechatronik betrifft heute die gesamte Technik. Ein Wissenschaftsmagazin formulierte dies so: *Vom Synonym für komplexe Regelkreisläufe, in denen elektronische Schaltungen oder datenverarbeitende Systeme mechanische Vorgänge steuern, hat sich die Mechatronik in den letzten 30 Jahren zu einer handfesten „Zukunftswissenschaft“ gewandelt.*

Dieses Buch ist ein *Kompedium* – ein kurzes Lehrbuch und Nachschlagewerk. Es verfolgt das Ziel einer ganzheitlichen Darstellung der Mechatronik und führt dazu Teilbereiche verschiedener Ingenieurdisziplinen und der Physik integrierend und teilweise vereinfachend im systemtechnischen Rahmen zusammen. Einbezogen sind Erkenntnisse aus der Tätigkeit als Physiker und Ingenieur in der fachübergreifenden Forschung und Lehre sowie interdisziplinäre Beiträge aus Wissenschaft und Industrie, wofür ich besonders folgenden Kolleginnen und Kollegen herzlich danke:

- Grundlagen: Dr. G. Bachmann, VDI-Technologiezentrum: *Nanotechnologie*; Prof. Dr. M. Kochsiek, Dir. u. Prof. Dr. R. Schwartz, PTB: *Messen mechanischer Größen, Kraftmess- und Wägetechnik*; Dr. Anita Schmidt, BAM: *Messunsicherheit*; Dr. M. Koch, Uni Stuttgart: *Grenzwertbeurteilungen*; Dr. W. Hässelbarth, BAM: *Referenzmaterialien, Referenzverfahren*; Dr. K. Dobler, Dr. E. Zabler, BOSCH: *Sensorik*; Dr. J. Goebbels, BAM: *Computertomographie*; Dr. W. Habel, BAM: *Faseroptik-Sensoren*; Dr. H. Sturm, BAM: *Rasterkraftmikroskopie*; Dr. W. Daum, BAM: *Embedded Sensors*; Dr. M. Golze, BAM: *Qualitätsmanagement*.
- Anwendungen: Prof. Dr. W. Gärtner, Dipl. Ing. R. Neumann, TFH Berlin: *Fotokamera*; Prof. Dr. F. Talke, University of California, San Diego: *Audio-Video-Computertechnik*; H. Petri, Dr. R. Herrtwich, Dr. W. Enkelmann: DaimlerChrysler: *Fahrzeugtechnik*; Prof. Dr. R. Tränkler, Institut für Mess- und Automatisierungstechnik, UniBW München: *Gebäudetechnik, Sensorik, Aktorik*; Dr. Christiane Maierhofer, Dr. W. Rücker, Dr. H. Wigenhauser, BAM: *ZfP Baulicher Anlagen*.

Das Buch ist mit der Einteilung in *Grundlagen* und *Anwendungen* modular gegliedert und kann je nach Interesse – *Informieren, Lernen, Anwenden* – vielfach genutzt werden. Um eine übersichtliche, knappe Darstellung zu erzielen wurden die Textpassagen kurz gehalten und die jeweils wichtigsten Informationen als „Wort-Bild-

Graphik-Kombinationen“ in den Abbildungen des Buches konzentriert. Studenten können das Buch sowohl beim Bachelor-Studium (Grundlagen-Kapitel plus studiengangorientierte Anwendungs-Kapitel) als auch beim Diplom- bzw. Master-Studium (gesamtes Buch) verwenden. Die Bilder können dabei als zusammenfassende Repetitoriums-Unterlagen dienen. Für berufliche Anwendungen gibt das Buch kompakte Grundlagen-Zusammenstellungen und Beispiele zum Stand der Technik in einer zum Nachschlagen geeigneten Form.

Für die Realisierung des Buches in der Reihe *Viewegs Fachbücher der Technik* und die hilfreichen Hinweise zur Gliederung und Gestaltung danke ich Herrn Ewald Schmitt und Herrn Thomas Zipsner vom Vieweg Verlag.

Berlin, Juli 2006

Horst Czichos

---

## Anmerkungen zum Buch

Die Mechatronik ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft und führt historisch getrennt entstandene physikalische und technologische Elemente systemtechnisch bewertet zusammen. Um gemäß der im Vorwort erläuterten Konzeption eine „ganzheitliche Textgestaltung“ zu erzielen, musste bei der Schreibweise von den Formelzeichen-Konventionen der Einzeldisziplinen – die sich ja unabhängig voneinander entwickelt hatten – abgewichen werden.

Auf die Problematik unterschiedlicher Terminologien in den Einzeldisziplinen der Natur- und Ingenieurwissenschaften hat bereits Feynman aufmerksam gemacht. Er schreibt in seinen Feynman Lectures: *The difficulties of science are to a large extent the difficulties of notations, the units, and all the other artificialities which are invented by man not by nature. For example, in the electrical literature, the symbol  $j$  is commonly used instead of the symbol  $i$  to denote the imaginary unit  $\sqrt{-1}$ . Electrical engineers insist that they cannot use what everyone else in the world uses for imaginary numbers because  $i$  must be the electrical current.*

Für das interdisziplinäre Gebiet der Mechatronik lässt sich die Schwierigkeit einer einheitlichen Schreibweise von Systemparametern in Text, Formeln und Graphiken durch ein einfaches Beispiel verdeutlichen. In der Elektrotechnik ist es üblich, zeitunabhängige Größen mit Großbuchstaben und Zeitfunktionen mit Kleinbuchstaben zu kennzeichnen, also z. B. Gleichspannung und Gleichstrom mit  $U$  und  $I$  sowie Wechselspannung und Wechselstrom mit  $u$  und  $i$ . In der Technischen Mechanik ist dagegen diese Unterscheidung unüblich. So bezeichnen dort beispielsweise die Großbuchstaben  $F$  und  $M$  die mechanischen Größen Kraft und Moment, während die Kleinbuchstaben  $f$  und  $m$  Frequenz und Masse kennzeichnen. Damit kann eine Zeitabhängigkeit von Kraft  $F$  oder Moment  $M$  nicht durch die Kleinbuchstaben  $f$  oder  $m$  ausgedrückt werden; außerdem können alle vier Größen zeitunabhängig oder zeitabhängig sein. Mechatronische Systeme enthalten nun sowohl elektrische als auch mechanische Größen, so dass hier die elegante Methode der Kennzeichnung der Zeitabhängigkeit von Systemparametern durch Groß- und Kleinschreibung von Formelgrößen nicht durchgängig anwendbar ist. Ähnlich schwierig ist es, die in Einzeldisziplinen üblichen konventionellen Schreibweisen von Skalaren, Vektoren, komplexen Größen oder regelungstechnischen Variablen im Zeitbereich, Bildbereich, Zustandsraum (z. B. **Fettdruck**, *Kursivschrift*, Unterstreichungen,

^-Zusatzsymbole, *Fraktur*schrift) im gesamten Buchtext einheitlich zu gestalten. Da es also für das interdisziplinäre Gebiet der Mechatronik kaum möglich ist, einen einheitlichen „Formelzeichen-Katalog“ aufzustellen, sind in diesem Buch die Bezeichnungen und Formelzeichen pragmatisch jeweils direkt den Formeln oder Bildern zugeordnet und dort definiert.

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Grundlagen

<b>1</b>	<b>Technik und Mechatronik</b>	<b>3</b>
1.1	Mechatronik in der Makro/Mikro/Nano-Technik	5
1.2	Mechatronik als Wissenschafts- und Technikgebiet	9
<b>2</b>	<b>Technische Systeme</b>	<b>11</b>
2.1	Systemtechnische Grundlagen	11
2.2	Funktion technischer Systeme	15
2.3	Struktur technischer Systeme	18
2.4	Systemeigenschaften	20
2.5	Funktionssicherheit und Strukturintegrität technischer Systeme	22
2.6	Technische Diagnostik und Condition Monitoring	25
<b>3</b>	<b>Mechatronische Systeme</b>	<b>29</b>
3.1	Modellbildung	30
3.2	Mechanik in mechatronischen Systemen	31
3.3	Elektronik in mechatronischen Systemen	35
3.4	Informatik in mechatronischen Systemen	40
3.5	Beschreibung mechatronischer Systeme	43
3.5.1	Modellierungsgrundlagen aus der Physik	43
3.5.2	Zeitbereich	44
3.5.3	Bildbereich	44
3.5.4	Zustandsraum	48
3.6	Gestaltung mechatronischer Systeme	50
3.6.1	Systemtechnische Gestaltungsgrundlagen	52
3.6.2	Funktionszusammenhang	52
3.6.3	Wirkzusammenhang	54
3.6.4	Bauzusammenhang	54
3.6.5	Systemzusammenhang	58
3.7	Entwicklungsmethodik Mechatronik	58

<b>4</b>	<b>Regelung und Steuerung</b>	65
4.1	Prinzipien der Regelung und Steuerung	66
4.2	Regelfunktionen und Regler-Module	69
4.3	Mehrgrößen-Regelung	72
4.4	Binäre Steuerungstechnik	73
4.5	Steuerung und Regelung mit Mechatronik	74
<b>5</b>	<b>Messtechnik und Sensorik</b>	77
5.1	Metrologische und messtechnische Grundlagen	78
5.1.1	Struktur der Messtechnik	78
5.1.2	Maßsystem	80
5.1.3	Metrologische Methodik der Messtechnik	82
5.1.4	Messunsicherheit und Messgenauigkeit	84
5.1.5	Instrumentelle Messunsicherheit und Kalibrierung	89
5.1.6	Messunsicherheitsbudget für Messfunktionen	90
5.1.7	Qualitätsmanagement im Mess- und Prüfwesen	91
5.2	Sensortechnische Grundlagen	93
5.2.1	Physikalische Sensoreffekte	93
5.2.2	Funktion und Kennzeichen technischer Sensoren	95
5.2.3	Messkette	97
5.2.4	Messstrategie der Sensorik	100
5.3	Sensorik geometrischer Größen	102
5.3.1	Längenmesstechnik	102
5.3.2	Faseroptische Sensorik	108
5.3.3	Dehnungsmessstreifen (DMS)-Technik	111
5.4	Sensorik kinematischer Größen	114
5.4.1	Positionssensorik (Wege, Winkel)	114
5.4.2	Geschwindigkeitssensorik	122
5.4.3	Beschleunigungssensorik	123
5.5	Sensorik dynamischer Größen	127
5.5.1	Kraftsensorik	127
5.5.2	Drehmomentsensorik	135
5.5.3	Drucksensorik	137
5.6	Sensorik von Einflussgrößen	139
5.6.1	Temperatursensorik	140
5.6.2	Feuchtesensorik	143
5.7	Mikrosensorik	145
5.8	Strukturintegrierte Sensorik	149
5.9	Cyber-physische Systeme	152



<b>6</b>	<b>Aktorik</b>	157
6.1	Elektromechanische Aktoren	158
6.1.1	Funktionsprinzipien elektromechanischer Aktoren	158
6.1.2	Elektromotoren als Aktoren	159
6.2	Piezoelektrische Aktoren	162
6.3	Fluidmechanische Aktoren	165
6.4	Thermomechanische Aktoren	169
6.5	Aktoreigenschaften und Kenndaten: Übersicht	173
6.6	Sensor-Aktor Prozessorik	173
6.6.1	Sensor-Aktor-Signalverarbeitung	175
6.6.2	Anwendungsspezifische Signalverarbeitung	178
6.7	Adaptronik	179
6.8	Mikroaktorik	180

## Teil II Anwendungen

<b>7</b>	<b>Maschinenbau</b>	189
7.1	Maschinenelemente	189
7.2	Mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul	191
7.3	Tribologische Systeme	193
7.3.1	Mechatronisches Magnetlager	197
7.3.2	Automatisiertes Getriebe	200
7.4	Zustandsüberwachung von Maschinen	203
<b>8</b>	<b>Positionierungstechnik und Robotik</b>	207
8.1	Mechatronische Positionierungstechnik	207
8.2	Handhabungs- und Robotertechnik	208
<b>9</b>	<b>Produktionstechnik</b>	223
9.1	Mechatronik in Werkzeugmaschinen	224
9.2	Mikro-Produktionstechnologien	226
9.3	Mikrotechnologien für Sensoren und Aktoren	234
<b>10</b>	<b>Gerätetechnik</b>	237
10.1	Mikrosystemtechnik	237
10.2	Mechatronisches Gerät Waage	240
10.3	Mechatronisches Gerät Fotokamera	246
<b>11</b>	<b>Audio-Video-Technik</b>	253
11.1	Optische Datenspeicher	254
11.2	CD-Player und DVD-Player	257

<b>12</b>	<b>Computertechnik</b>	263
12.1	Magnetische Datenspeicher	264
12.2	Mechatronisches System Festplattenlaufwerk	265
12.3	Mikromechanik und Tribologie in Festplattenlaufwerken	266
12.4	Nano-Interface-Technologie in Festplattenlaufwerken	270
<b>13</b>	<b>Fahrzeugtechnik</b>	273
13.1	Funktion Fahren: Fahrdynamik und Fahrwerk	273
13.2	Funktion Lenken: Elektronisches Stabilitätsprogramm	278
13.3	Funktion Bremsen: Bremssysteme	284
13.4	Funktion Tasten: Distanzsensorik	289
13.5	Funktion Beleuchten: Adaptive Lichttechnik	290
<b>14</b>	<b>Bauliche Infrastruktur</b>	295
14.1	Zustandsüberwachung der baulichen Infrastruktur	296
14.2	Bauwerksüberwachung mit zerstörungsfreier Prüfung, Sensorik und Aktorik	298
14.2.1	Techniken zur Bauwerksüberwachung	299
14.2.2	Automatisierung der Infrastrukturüberwachung	302
14.2.3	Anwendungsbeispiel Hauptbahnhof Berlin	304
14.3	Bauwerksmonitoring	307
14.3.1	Verkehrsbauwerke	308
14.3.2	Windenergieanlagen	310
14.3.3	Aktive Bauwerke	311
14.4	Sensorik historischer Baustrukturen	311
14.5	Mechatronik in der Gebäudetechnik	315
<b>15</b>	<b>Medizintechnik</b>	321
15.1	Biosignale und Biosensorik	321
15.2	Medizinische Gerätetechnik	325
15.2.1	Blutdrucksensorik	326
15.2.2	Bildgebende Verfahren: Sonografie, Tomografie	329
15.3	Bioaktoren	334
	<b>Bildnachweis</b>	337
	<b>Anmerkungen zur Literatur</b>	339
	<b>Literatur</b>	341
	<b>Sachverzeichnis</b>	343

---

# Teil I

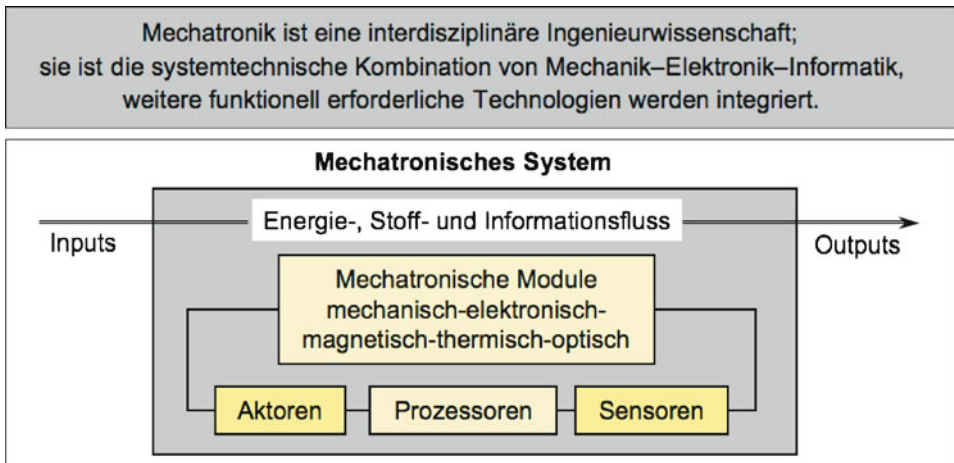
## Grundlagen

Der Begriff *Mechatronik* wurde Ende der 1960er Jahre in Japan geprägt und hat sich in der Technik weltweit eingeführt:

The term mechatronics denotes an interdisciplinary field of engineering, including mechanics, electronics, controls, and computer engineering. Virtually every newly designed engineering product is a mechatronic system (MECHATRONICS, International Edition of Higher Education, McGraw-Hill, 2003).

Die Aufgaben der Mechatronik lassen sich folgendermaßen kennzeichnen:

Die Mechatronik ist ein interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Im Vordergrund steht die Ergänzung



**Abb. 1.1** Stichwortartige Übersicht über die Mechatronik

und Erweiterung mechanischer Systeme durch Sensoren und Mikrorechner zur Realisierung teilintelligenter Produkte und Systeme (DER BROCKHAUS, Leipzig, 2000).

Mechatronische Systeme sind Produkte der Technik, die auf dem Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Informatik basieren. Sie können in Funktionsgruppen unterteilt werden, die meist Regelkreise bilden und aus Modulen mit mechanisch-elektrisch-magnetisch-thermisch-optischen Bauelementen, *Sensorik* zur Erfassung von Messgrößen des Systemzustandes, *Aktorik* zur Regelung und Steuerung sowie *Prozessorik* und *Informatik* zur Informationsverarbeitung bestehen, siehe Abb. 1.1.

### Die Entwicklung der Mechatronik

Unter der Überschrift „Die stille Revolution der Mechatronik“ erläuterte ein Wissenschaftsmagazin die Entwicklung der Mechatronik zur grundlegenden interdisziplinären Wissenschaft für die gesamte Technik mit folgenden Beispielen:

*Mechatronik im Automobil* In den Anfängen der Automobiltechnik kam ein PKW mit 3 Elektromotoren für Anlasser, Lichtmaschine und Scheibenwischer aus. Mit der Entwicklung des Anti-Blockier-Systems, ABS, 1978/79 haben mechatronische Komponenten in den Fahrzeugbau Einzug erhalten. Die Anti-Schlupf-Regelung, ASR, und das Elektronische Stabilitätsprogramm, ESP, sind zwei weitere von vielen Neuerungen die den Kraftstoffverbrauch gesenkt und die Sicherheit erhöht haben. 95 % der in Deutschland getretenen Pedale leiten die Bremswünsche als „brake-by-wire“, d. h. via Kabel an elektronische Steueranlagen weiter. Die Maschine reagiert in der Regel 400 ms schneller als der Fahrer. Mechatronik ist die Triebfeder in der Automobilindustrie: 30 % der Herstellungskosten und 90 % aller Innovationen eines neuen PKW entfallen heute auf mechatronische Systeme. Rund 75 Steuerprozessoren verarbeiten circa 200 Megabyte Software. Organisiert in 5 Netzwerken bewegen sie bis zu 150 Elektromotoren für Komfort und Sicherheit. Wichtige Systeme sind immer redundant eingebaut, um mögliche Ausfälle eines einzelnen Systems zu kompensieren. Ein moderner PKW ist das Ergebnis einer 25-jährigen mechatronischen Evolution und die ist noch lange nicht zu Ende.

*Mechatronik in der Luft* Moderne Flugzeuge sind mit „fly-by-wire“ ausgestattet. Der Ausschlag des Steuers wird nicht mehr direkt in eine Ruderbewegung umgesetzt. Der Pilot gibt den neuen Kurs in den Computer ein. In Sekundenbruchteilen ermittelt der die optimalen Ruderbewegungen unter Berücksichtigung aller Nebeneffekte. Geschwindigkeitsänderungen durch das Ausfahren des Fahrwerks oder Turbulenzen verursachen eine Änderung des Auftriebs an den Tragflächen und damit eine Kursänderung. Das Fly-by-Wire gleicht diese Veränderungen automatisch aus. Der Pilot erhält so mehr Zeit für die Überwachung der anderen Instrumente. Die Manövrierfähigkeit der „Fly-by-wire“-Flugzeuge hat mit einer Drehrate von 15 Grad pro Sekunde fast „Kampffjet-Charakter“. Um einem Ausfall vorzubeugen, sind mechatronische Systeme in Flugzeugen dreifach redundant eingebaut.

*Mechatronik erweitert die Möglichkeiten für Schienenfahrzeuge* Das European Train Control System, ETCS, verlagert die Informationen von Signalanlagen an der Strecke in den Führerstand. Kleine Signalgeber in den Gleisen erfassen die Zugposition. Die Streckeninformationen werden direkt an Lokführer und Zentrale weitergegeben. Würde die Eisenbahn heute noch einmal erfunden, sähe sie wahrscheinlich wie das Rail-Cap aus, ein modular aufgebautes „Schientaxi“. Weichen müssen nicht mehr gestellt werden. Mit Sensoren an den Rädern sucht sich das Rail-Cap selber seinen Weg. Ohne bewegliche Teile erhöht sich die Lebensdauer der Weichen beträchtlich. Die völlig neu konstruierte Feder-Neige-Technik ist Kernstück des Fahrgastkomforts. Sensoren messen die Erschütterungen des unteren Fahrzeugteils. Ein Computer ermittelt die entsprechenden Gegenkräfte, die die Aktoren umsetzen. Die Fahrgastkabine selbst bleibt damit völlig ruhig. Wandernde Magnetfelder, ähnlich wie beim Transrapid, ziehen das Fahrzeug mit. Das Nachrüsten von bestehenden Trassen ist kein Problem. Damit wird die Mechatronik auf der Schiene zu dem was sie auf der Straße längst ist: eine Grundbedingung im modernen Fahrzeugbau.

*Mechatronik für die Robotertechnik* Roboter sind Mechatronik pur. Sie vereinen Mechanik, Kinematik, Informatik und Elektrik in sich. Beim Bau eines Roboters muss interdisziplinär – also mechatronisch gedacht werden. Die Bedeutung der Roboter wird weiter zunehmen. Eine „technische Revolution“ haben vollautomatische Systeme in der produzierenden Industrie ausgelöst. Das Ergebnis dieser Entwicklungen: der sechssachsige Roboterarm. Flexibler als ein menschlicher Arm kann ihm fast jeder Arbeitsablauf einprogrammiert werden. Ein funktionaler Umbau ist mit dem einfachen Austauschen der „Werkzeughand“ erledigt. Produktivität bedeutet viele Teile pro Zeiteinheit mit konstanter Qualität herzustellen. Mit Mechatronik produziert heute z. B. eine vollautomatische Fertigungsstraße alle 16 Sekunden ein pneumatisches Ventil in 60 einzelnen Arbeitsschritten. 3000 gefertigte Ventile pro Tag entsprechen einem Produktionszuwachs von 1000 % gegenüber 300 Stück bei manueller Herstellung. Der Weltmarkt fordert Produktionsanlagen, die hochkomplexe Aufgaben schnell erledigen, dabei aber einfach zu bedienen und robust sind. Bei gut eingesetzter Mechatronik ist das komplizierte Zusammenspiel von Elektrik, Pneumatik, Mechanik und Informatik nicht zu erkennen.

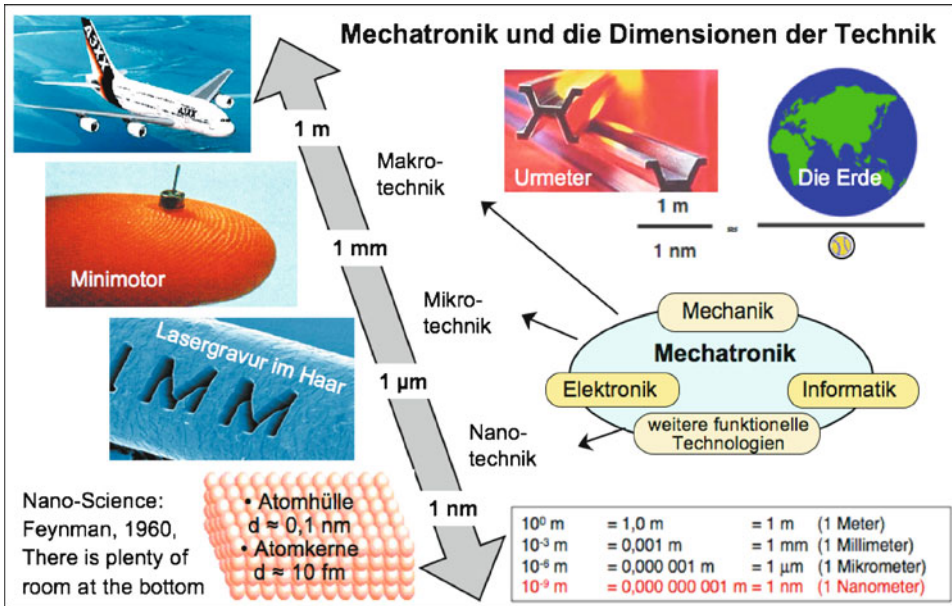
hitec 4/2004



---

## 1.1 Mechatronik in der Makro/Mikro/Nano-Technik

Das Aufgabengebiet der Mechatronik in der Technik betrifft heute technische Erzeugnisse und Konstruktionen, deren geometrische Dimensionen mehr als 10 Größenordnungen umfassen. Die Übersichtsdarstellung von Abb. 1.2 illustriert – ausgehend vom klassischen



**Abb. 1.2** Dimensionsbereiche der heutigen Technik: Makrotechnik, Mikrotechnik, Nanotechnik

Urmeter – dass das Größenverhältnis Meter/Nanometer vergleichbar ist mit dem Größenverhältnis des Erddurchmessers zum Durchmesser einer Haselnuss.

**Makrotechnik** mit cm/m-Dimensionen ist die Technik der Geräte, Apparate, Maschinen und technischen Anlagen. Kennzeichnend für die Mechatronik ist die Erweiterung der klassischen Elektromechanik durch elektronische Schaltkreise und datenverarbeitende Module sowie der Ersatz mechanischer Energie- und Signalflüsse durch Elektrik, Elektronik, Magnetik, Optik.

**Mikrotechnik** mit mm/ $\mu\text{m}$ -Bauteilabmessungen ist das Gebiet der Feinwerktechnik und Mikrosystemtechnik. Ein Mikrosystem vereint mit Mikro-Fertigungstechnik und miniaturisierter Aufbau- und Verbindungstechnik Funktionalitäten aus Mikromechanik, Mikrofluidik, Mikrooptik, Mikromagnetik, Mikroelektronik.

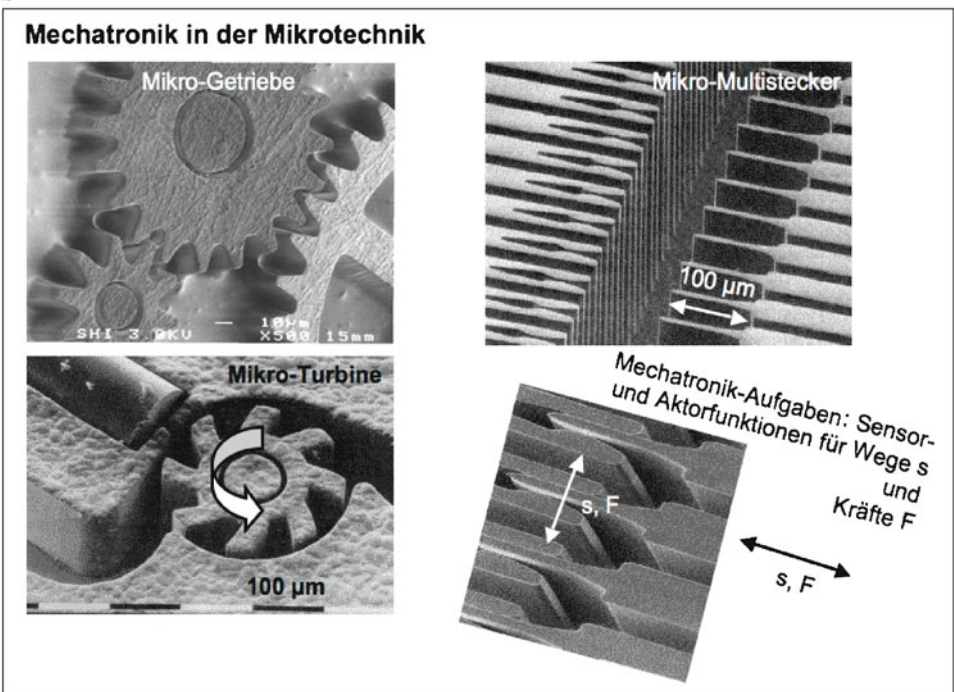
**Nanotechnik** nutzt nanoskalige Effekte der Physik, Chemie und Biologie. Die Nanowissenschaft wurde 1960 durch Feynman (Physik-Nobelpreisträger 1965) begründet. Beispiele der nano-mechatronischen Gerätetechnik sind das Rastertunnelmikroskop (siehe Abb. 1.3d) und das Rasterkraftmikroskop (siehe Abb. 5.68 und 5.69). Sie ermöglichen durch mechatronische Piezo-Aktorik die Darstellung von Materialoberflächen im atomaren Maßstab und die Bestimmung nanoskaliger Kräfte, z.B. zur Optimierung magnetischer Datenspeicher und elektronischer Mikrochips.

Beispiele der Mechatronik in der Makrotechnik, der Mikrotechnik und der Nanotechnik zeigt Abb. 1.3.

a



b

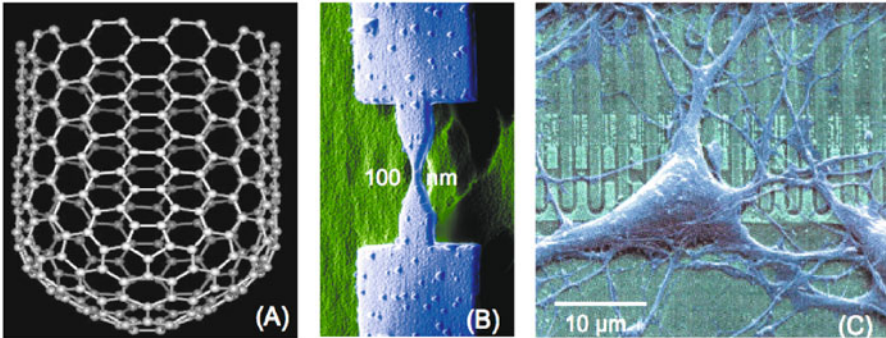




c

### Exkurs zur Nanotechnik: grundlegende Kennzeichen in Stichworten

- **Nanotechnik:** Herstellung, Analyse, Manipulation von Objekten atomar/molekularer Abmessungen unter Nutzung physikalischer, chemischer und biologischer Prinzipien.
- **Nanotechnische Systeme:** technische Gebilde, deren Funktionen dominant von nanoskaligen Effekten der Systembausteine abhängig sind.
- **Eigenschaften von Nano-Objekten:** (a) Quantenmechanisches Verhalten (b) spezifische Volumen/Oberfläche-Relation (c) veränderte Nano/Makro-Stoffkenndaten
- **Beispiele:** (A) **Mechanik, Carbon-Tubes**, Eigenschaften:  $\varnothing < 10 \text{ nm}$ , Druckfestigkeit 2 x Kevlar, Zugfestigkeit 10 x Stahl, Steifigkeit 2000 x Diamant
- (B) **Elektronik, "Quantendraht"** (C) **Biologie/Elektronik, Nervenzelle auf Si-Struktur:** Möglichkeit der elektronisch/ biologischen Signalkopplung

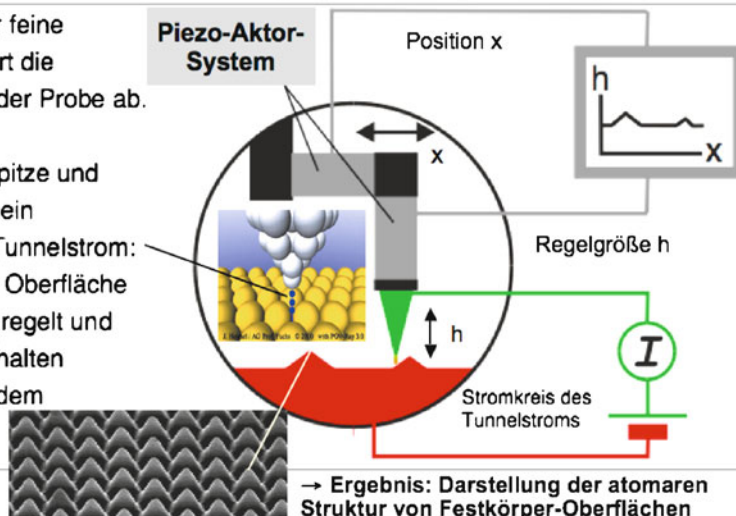


d

### Mechatronik in der Nanotechnik: Beispiel Rastertunnelmikroskop

- 1) Eine atomar feine Spitze rastert die Oberfläche der Probe ab.

- 2) Zwischen Spitze und Probe fließt ein konstanter Tunnelstrom:
  - Abstand zur Oberfläche wird nachgeregt und konstant gehalten
  - Spitze folgt dem Höhenprofil



**Abb. 1.3** Mechatronische Systeme der Makrotechnik, Mikrotechnik und Nanotechnik, Beispiele

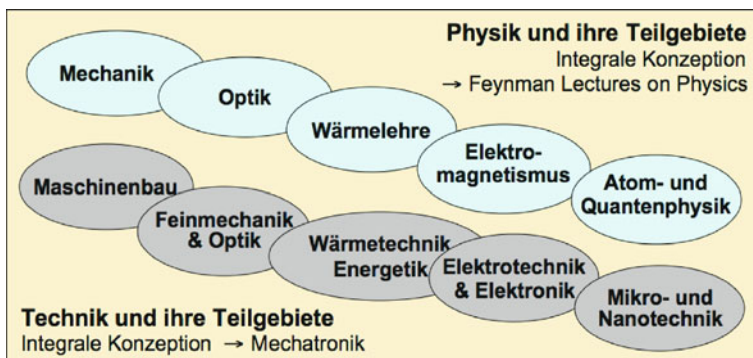
## 1.2 Mechatronik als Wissenschafts- und Technikgebiet

Aus der einleitend genannten Definition der Mechatronik geht hervor, dass sie mehrere Fachdisziplinen in sich vereinigt und damit das Ziel eines „ganzheitlichen“ Wissenschafts- und Technikgebiets verfolgt. Der Begriff „Ganzheit“ hat als methodischer Begriff im 20. Jahrhundert in vielen Wissenschaften Eingang gefunden. Ganzheit ist etwas, das nicht durch einzelne Eigenschaften seiner Bestandteile, sondern erst durch deren gefügigten Zusammenhang (Struktur) bestimmt ist. Die Ganzheit ist mehr als die Summe der Teile, die selbst nur aus dem Ganzen heraus zu verstehen sind. In ihrer Methodik folgt die Mechatronik in der Technik damit in gewisser Weise Entwicklungen, die auch in anderen Wissenschaftsgebieten stattgefunden haben.

In der Physik erfolgte die historische Entwicklung der einzelnen Teilbereiche etwa in folgender Reihenfolge: Mechanik – Optik – Wärmelehre – Elektromagnetismus – Atom- und Quantenphysik. Eine neuartige ganzheitliche Physik-Didaktik hatte Richard P. Feynman Anfang der 1960er Jahre in seinen *Feynman Lectures on Physics* entwickelt. Mit einer integralen Konzeption betrachtete er Analogien von Mechanik und Elektromagnetismus und simulierte die Fahrdynamik eines Automobils mit einem mechanisch-elektrischen „Computational Modeling“. Mit dieser integralen Konzeption können die systematischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Teilbereichen in einem Gesamtbild der Physik deutlich gemacht werden.

Auch in der Technik entstanden zunächst einzelne Teilbereiche: Maschinenbau – Feinmechanik & Optik – Wärmetechnik und Energietechnik – Elektrotechnik und Elektronik – Mikro- und Nanotechnik. Nachdem sich Maschinenbau und Elektrotechnik durch die Erfindungen von Elektromotor und Generator (Siemens 1866) zur „Elektromechanik“ vereinigt hatten entwickelte sich Ende der 1960er Jahre durch die Integration mit Elektronik, Computertechnik und Informatik das interdisziplinäre Technikgebiet der Mechatronik.

Einen Überblick über die Teilgebiete, die in ihrer Gesamtheit die Physik und die Technik bilden, gibt Abb. 1.4.



**Abb. 1.4** Darstellung von Physik und Technik in integraler Betrachtung

Parallel zur Entwicklung der Mechatronik entstand ab den 1970er Jahren das INTERNET als globales System der Informations- und Kommunikationstechnik (IuK). Seit Anfang der 1990er Jahre gibt es Bestrebungen, dieses IuK-Netz zu einem INTERNET DER DINGE (*Internet of things, IoT*) auszubauen. Ziel ist es, mit Sensoren (embedded sensors) Zustandsinformation über reale Objekte (*things*) zu gewinnen und damit sog. Cyber-physische Systeme (CPS) zu entwickeln, (*cyber*, griechisch *kybernesis*: Steuerung). CPS benutzen sensorische Elemente der Mechatronik, die physikalische Daten erfassen und über digitale Netze mittels Aktoren auf Produktions-, Logistik- und Engineeringprozesse einwirken, wobei sie über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen. Ein Beispiel aus der Transportlogistik von Gefahrgut ist in Abschn. 5.9 dargestellt.

Insgesamt kann die Entwicklung der Technik im Hinblick auf ihre Bedeutung für Industrie, Wirtschaft und Gesellschaft in folgenden Phasen gesehen werden:

1. Phase: INDUSTRIELLE REVOLUTION durch Entwicklung mechanischer Technologien mit Hilfe von Dampfmaschinen (James Watt, 1769) und mechanischer Automatisierungstechnik (z. B. Webstuhl, 1785).
2. Phase: Entwicklung der ELEKTROMECHANIK durch Vereinigung von mechanischen mit elektrischen Technologien und Elektrifizierung der Technik.
3. Phase: Entwicklung der MECHATRONIK durch systemtechnische Kombination der Elektromechanik mit Elektronik, Computertechnik, Informatik und Digitalisierung der Datenverarbeitung.
4. Phase: Zukünftige Entwicklung von CYBER-PHYSISCHEN SYSTEMEN (CPS) im Verbund von Mechatronik und Internet-Kommunikation.

Die Mechatronik ist damit grundlegender Bestandteil zukunftsorientierter technologischer Entwicklungen, für die 2011 die Bezeichnung „Industrie 4.0“ geprägt wurde ([www.plattform-i40.de](http://www.plattform-i40.de)).

In der Technik ist heute anstelle der schlecht abgrenzbaren Ausdrücke Maschine, Gerät, Apparat als allgemeiner Begriff das **Technische System** gewählt worden. Es ist durch die Funktion gekennzeichnet, Stoff (Material), Energie und/oder Information umzuwandeln, zu transportieren und/oder zu speichern. Es ist stofflich-konkret und besteht aus Werkstoffen mit definierten Eigenschaften, die aus der Verfahrenstechnik hervorgehen. Von der Form her ist es ein räumliches Gebilde und setzt sich aus Bauteilen zusammen, die Gestaltgebung erfolgt in der Fertigungstechnik (DER BROCKHAUS, Leipzig, 2000).

Technische Systeme können dementsprechend eingeteilt werden in:

- Materialbasierte technische Systeme.
  - Aufgabe: Stoffe gewinnen, bearbeiten, transportieren, etc.
  - Beispiel: Produktionsanlage, Transportsystem.
- Energiebasierte technische Systeme.
  - Aufgabe: Energie umwandeln, verteilen, nutzen, etc.
  - Beispiel: Generator, Antriebssystem.
- Informationsbasierte technische Systeme.
  - Aufgabe: Informationen generieren, übertragen, darstellen, etc.
  - Beispiel: DVD-Player, Smartphone.

---

## 2.1 Systemtechnische Grundlagen

Technische Systeme sind nach der Systemtheorie durch ihre *Funktion* und die sie tragende *Struktur* gekennzeichnet, siehe Abb. 2.1.

- Die **Systemstruktur** besteht aus interaktiven Systemelementen (Bauelementen). Sie wird durch eine virtuelle, zweckmäßig definierte Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt, um die Systemelemente mit ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen (Interaktionen) beschreiben zu können.

- Ein **System** ist ein Gebilde, das durch *Funktion* und *Struktur* verbunden ist und durch eine Systemgrenze von seiner Umgebung virtuell abgegrenzt werden kann.
- Die **Systemfunktion** besteht in der Überführung operativer Eingangsgrößen in funktionelle Ausgangsgrößen, sie wird getragen von der Struktur des Systems.
- Die **Systemstruktur** besteht aus der Gesamtheit der Systemelemente, ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen.

**Systemstruktur:**  $S = \{ A, P, R \}$ , mit

A: Systemelemente

$A = \{ a_1, a_2, \dots, a_n \}$ ,  
(n Anzahl der Elemente)

P: Eigenschaften der Elemente

$P = \{ P(a_i) \}$

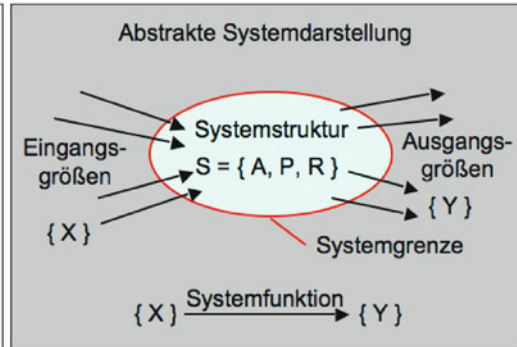
R: Wechselwirkungen der Elemente

$R = \{ R(a_i, a_j) \}$

**Systemfunktion:**  $\{ X \} \rightarrow \{ Y \}$

X: Eingangsgrößen

Y: Ausgangsgrößen



**Abb. 2.1** Definition und Kennzeichen technischer Systeme

- Die für die **Systemfunktion** erforderlichen Eingangsgrößen (Inputs) werden von der Systemstruktur aufgenommen und über Interaktionen der Systemelemente in Ausgangsgrößen (Outputs) überführt. Die Systemfunktion wird beschrieben durch Input/Output-Beziehungen zwischen operativen Eingangsgrößen und funktionellen Ausgangsgrößen.
- Jeder Input und Output kann den kybernetischen Grundkategorien Stoffe (Material), Energie, Information zugeordnet werden.

Die aufgabengemäße Systemfunktion bildet die Rahmenbedingung für die zu gestaltende Systemstruktur. Es gilt die Regel *structure follows function* (Peter Drucker).

Die Anwendung der systemtechnischen Beschreibung ist in Abb. 2.2 an einfachen „Zwei-Element-Systemen“ eines mechanischen Getriebes und eines elektrischen Transformators dargestellt.

Nach der Erläuterung der elementaren Systembegriffe in Abb. 2.2 illustriert Abb. 2.3 die Gesamtdarstellung eines technischen Systems am Beispiel eines Industrieroboters. Die Strukturbegriffe kennzeichnen die Roboterstruktur und bilden die Grundlage für die Konstruktion und die Montage der Roboterelemente. Die Funktionsbegriffe benennen die operativen Parameter für Antrieb, Regelung und die funktionellen Parameter des Greifens oder des Bearbeiten, die Details sind in Kap. 8 (Robotik) beschrieben.

Bei der Systembeschreibung in Abb. 2.1 sind wichtige Aspekte realer technischer Systeme noch nicht dargestellt. Dies betrifft mögliche Veränderungen von Bauteileigenschaften durch die mit der Funktionserfüllung verbundenen statischen und dynamischen Be-



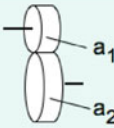

System-Charakteristika	Mechanisches System: Getriebe	Elektrisches System: Transformator
System-Piktogramm		 Spulensystem Sp <sub>1</sub> , Sp <sub>2</sub>
Systemstruktur A Elemente	a <sub>1</sub> Antriebsrad a <sub>2</sub> Abtriebsrad	Sp <sub>1</sub> Primärspule Sp <sub>2</sub> Sekundärspule
P Eigenschaften P(a <sub>1</sub> ), P(a <sub>2</sub> )	Verzahnungsarten Teilkreise, Module, etc.	Spulenarten Windungszahlen, etc.
R Wechselwirkungen R(a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> )	Tribologischer Kontakt Traktion, Reibung, etc.	Induktive Kopplung Wirbelstromverluste, etc.
Systemfunktion X Eingangsgrößen	Eingangsdrehmoment M <sub>1</sub> Eingangsdrehzahl n <sub>1</sub>	Eingangsspannung U <sub>1</sub> Eingangsstrom I <sub>1</sub>
Y Ausgangsgrößen	Ausgangsdrehmoment M <sub>2</sub> Ausgangsdrehzahl n <sub>2</sub>	Ausgangsspannung U <sub>2</sub> Ausgangsstrom I <sub>2</sub>
Funktionalität	(M <sub>1</sub> , n <sub>1</sub> ) → (M <sub>2</sub> , n <sub>2</sub> )	(U <sub>1</sub> , I <sub>1</sub> ) → (U <sub>2</sub> , I <sub>2</sub> )

Abb. 2.2 Die elementaren Merkmale technischer Systeme, erläutert an einfachen Beispielen

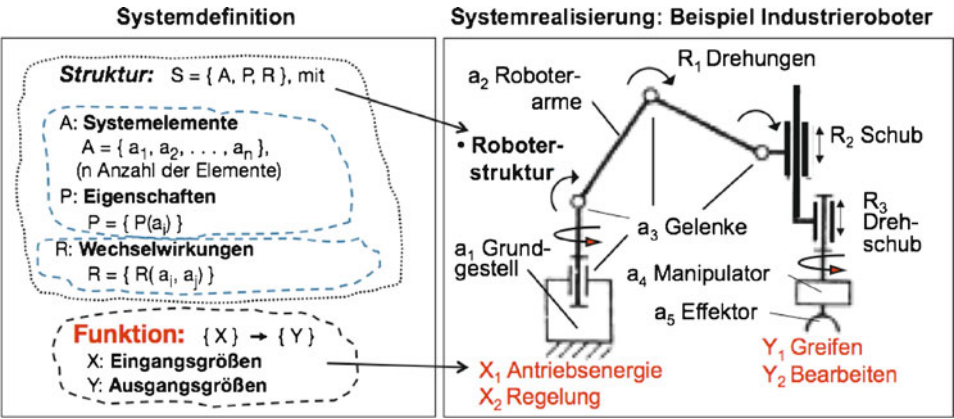
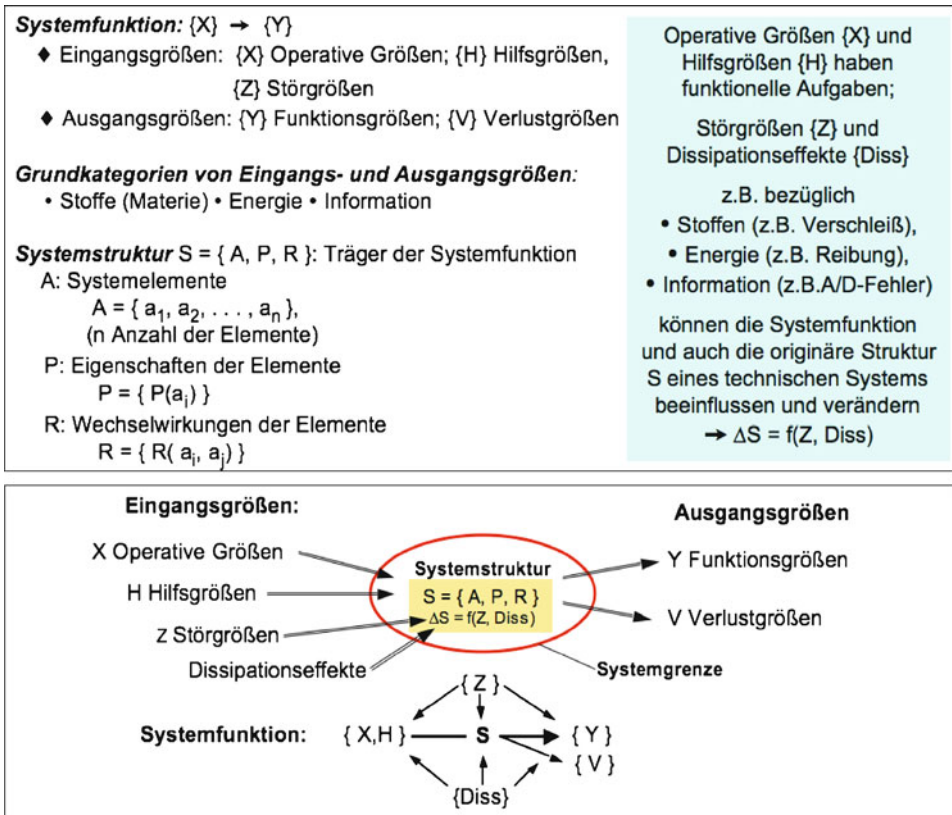


Abb. 2.3 Industrieroboter als Beispiel eines technischen Systems

anspruchungen und mögliche Umwelteinflüsse. Die aufgabenspezifisch gestaltete Systemfunktion und die sie tragenden Systemstruktur können im Betrieb negativ beeinflusst werden durch:

- Störeinflüsse:
  - mechanische Vibrationen, impulsförmige Stoß- oder Prallvorgänge,



**Abb. 2.4** Allgemeine Darstellung eines Technischen Systems mit Berücksichtigung von Störeinflüssen und Dissipationseffekten

- elektromagnetische Störfelder, Einstreuungen, Spannungs-/Stromspitzen,
- thermische Einflüsse, Temperaturschwankungen,
- atmosphärische und klimatische Einflüsse, wie Feuchte, Gaskontaminationen.
- Dissipationseffekte, worunter hier unerwünschte Veränderung von Systemelementen oder Systemparametern durch irreversible Prozesse verstanden werden, wie z. B.
  - Reibung, d. h. Umwandlung mechanischer Bewegungsenergie in Wärme,
  - Verschleiß, d. h. Stoff- und Formänderungen von Systemelementen,
  - Signal-Informationsverluste bei Analog-Digital-Umwandlungen.

Diese Einflüsse müssen bei der Gestaltung, der Auslegung und dem Betrieb konkreter technischer Systeme natürlich system- und anwendungsspezifisch berücksichtigt werden. Eine allgemeine Systemdarstellung mit der Berücksichtigung von Störeinflüssen und Dissipationseffekten gibt Abb. 2.4. Die Fragen der „Funktionssicherheit“ und der „Strukturintegrität“ technischer Systeme werden in Abschn. 2.5 behandelt.

2.2 Funktion technischer Systeme

Die Funktion technischer Systeme besteht in der Überführung von Eingangsgrößen in aufgabenspezifisch erforderliche Ausgangsgrößen. Als *Prozess* wird die Gesamtheit der systeminternen Vorgänge bezeichnet, durch die Material, Energie und Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird. Abbildung 2.5 stellt die Systemfunktion am Modell eines technischen Systems mit Energieflüssen dar.

Für die Darstellung von Systemfunktionen werden häufig Systemelemente als „Black Box“ betrachtet und darauf die aus der Elektrotechnik bekannte „Vierpoldarstellung“ in verallgemeinerter Form angewandt. An den Input- und Output-Schnittstellen eines Vierpols kann man stets zwei „Klemmenpaare“ unterscheiden: Potentialdifferenz und Strom. Sie können in allgemeiner, energieartunabhängiger Bezeichnung als *effort*  $\varepsilon(t)$  und *flow*  $\phi(t)$  bezeichnet werden. Für Systemelemente mit Energieflüssen  $E$  ist die übertragene Leistung  $P = dE/dt = \text{Potentialdifferenz } \varepsilon(t) \cdot \text{Strom } \phi(t)$ . Abbildung 2.6 zeigt diese Zusammenhänge für mechanische, elektrische, magnetische, hydraulische und thermische Systemelemente.

Mit den generalisierten Systemgrößen können Systemanalogien Mechanik – Elektrik – Thermik – Fluidik dargestellt werden, siehe Abb. 2.7. Für jeden Bereich sind die konstitutiven Größen und die domänenspezifische Leistungsgleichung aufgeführt. Außerdem sind die jeweiligen Effort-Flow-Relationen in einer Analogie zum Ohm’schen Gesetz (Effort  $U = \text{Widerstand } R \cdot \text{Flow } I$ ) hinzugefügt, da bei jeden Flow ein Bewegungswiderstand auftritt.

Im unteren Teil von Abb. 2.7 sind der generalisierte Leistungsfluss  $P = \text{Effort } \varepsilon \cdot \text{Flow } \phi$  und die spezifischen Leistungsgleichungen der einzelnen Domänen genannt.

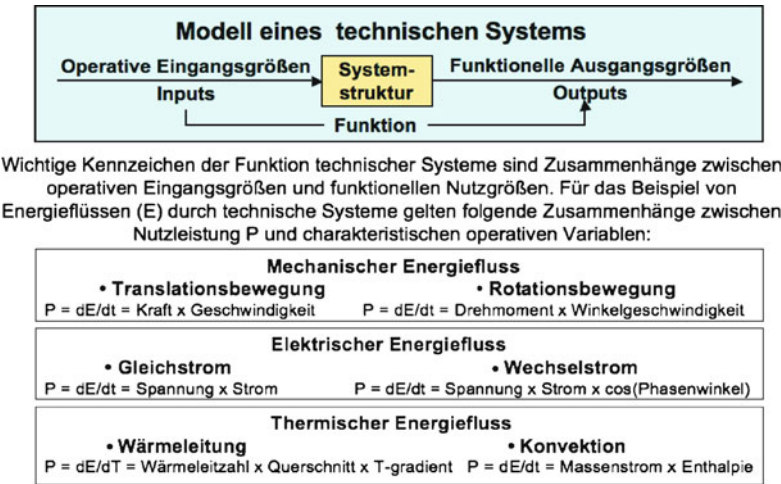


Abb. 2.5 Beispiel der Darstellung von Systemfunktionen



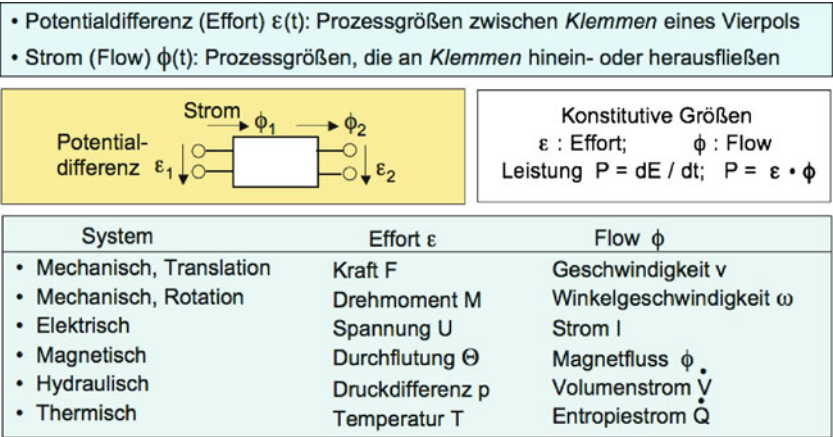


Abb. 2.6 Funktionsgrößen technischer Systeme: effort und flow

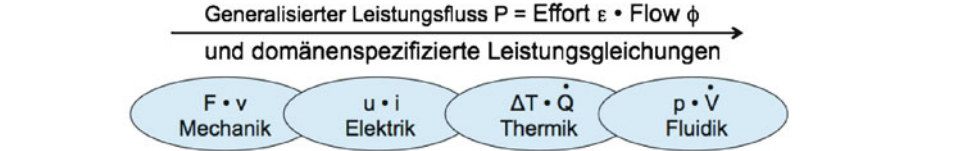
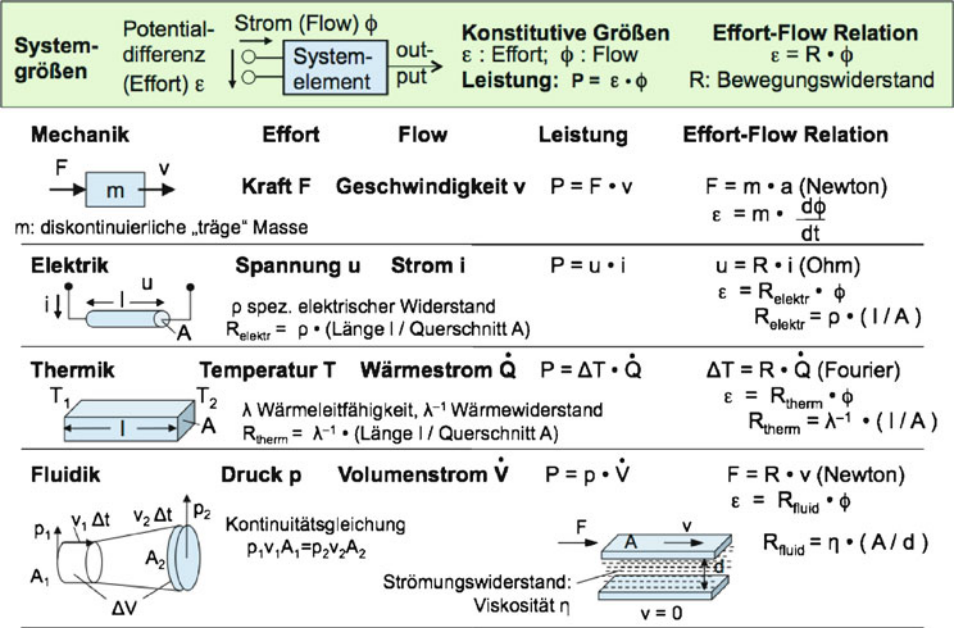
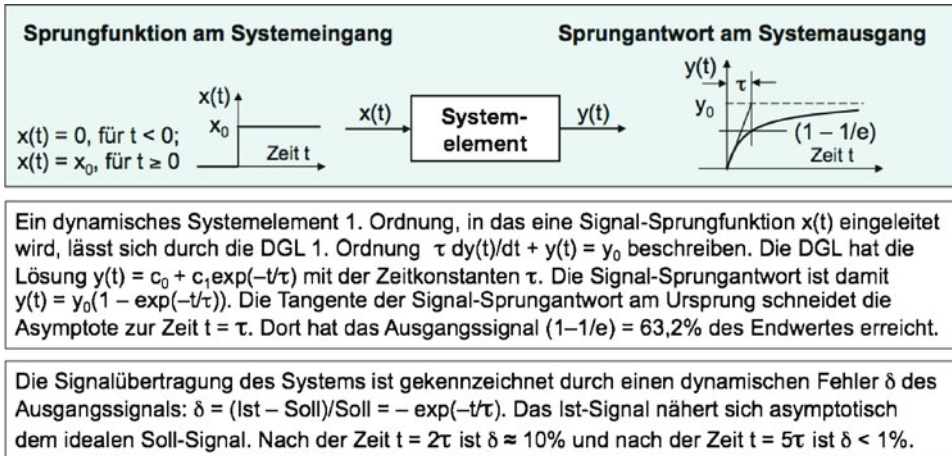


Abb. 2.7 Systemanalogien Mechanik – Elektrik – Thermik – Fluidik, generalisierter Leistungsfluss und domänenspezifizierte Leistungsgleichungen



**Abb. 2.8** Signalübertragung von Systemelementen: Sprungfunktion am Systemeingang und Sprungantwort am Systemausgang

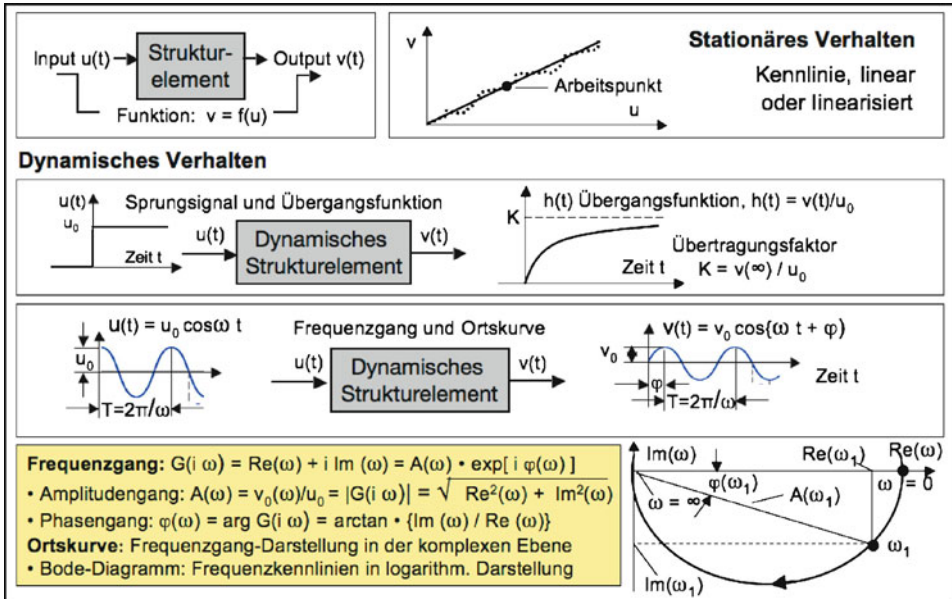
### Signalübertragungsverhalten

Zu den wichtigsten funktionellen Eigenschaften eines technischen Systems gehören die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen, die *Input/Output-Relationen*. Zur Beschreibung des Signalübertragungsverhaltens von Systemelementen verwendet man als Eingangssignale bestimmte *Testfunktionen*, die sich einfach realisieren lassen, beobachtet das sich ergebende Ausgangssignal und kennzeichnet es durch *Übergangsfunktionen*. Die am häufigsten verwendete Kennzeichnungsmöglichkeit des dynamischen Signalübertragungsverhaltens durch eine Sprungfunktion illustriert Abb. 2.8.

Wenn das Ausgangssignal zeitunabhängig ist spricht man von einem stationären Zustand. Im stationären Zustand wird der Zusammenhang zwischen den Eingangsgröße  $u$  eines Systemelements und der Ausgangsgröße  $v$  mathematisch durch den funktionalen Zusammenhang  $v = f(u)$  gekennzeichnet und durch eine *u-v-Kennlinie* graphisch dargestellt.

Der dynamische (zeitabhängige) Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße eines Systemelements und der Ausgangsgröße wird beschrieben durch:

- *Frequenzgang* und *Ortskurve*: Kennzeichnung der bei Übertragung eines Eingangssignals  $u(t) = u_0 \cos \omega t$  ( $u_0$  Anfangsamplitude,  $\omega$  Kreisfrequenz) sich ergebenden Ausgangsamplitude  $v$  und der Phasenverschiebung  $\varphi$  im eingeschwungenen Zustand. Die Ortskurvendarstellung erfolgt häufig in der komplexen Ebene mit kartesischen Real(Re)-Imaginärteil(Im)-Koordinaten bzw. Polarkoordinaten mit der Zeigerlänge  $A = v(\omega)/u$  und dem Winkel  $\varphi$  (Quadrantenvorzeichen beachten).
- *Bode-Diagramm*: Frequenzkennlinien in logarithmischer Darstellung.



**Abb. 2.9** Kennzeichnung stationärer und dynamischer Eigenschaften technischer Systeme

Diese Darstellungsarten sind aus der Elektrotechnik wohlbekannt; eine zusammenfassende Übersicht mit kennzeichnenden Stichworten bei Verwendung des Symbols  $i$  für die imaginäre Einheit  $\sqrt{-1}$  gibt Abb. 2.9.

### 2.3 Struktur technischer Systeme

Die elementaren Strukturen technischer Systeme lassen sich in abstrakter, vereinfachender Darstellung gemäß Abb. 2.10 in die folgenden Kategorien einteilen:

- Quellen,
- Speicher,
- Übertrager,
- Wandler,
- Senken.

Neben der *Mehrpole-Darstellung* der Strukturelemente als Blockschaltbilder ist im unteren Teil von Abb. 2.11 die *Bondgraph-Darstellung* wiedergegeben. Sie ist eine graphische Kennzeichnung von Mehrpol-Strukturelementen mit Energieübertragung und beschreibt durch einen *Energie-Bond* in Form eines Halbpfeils mit Nennung des jeweiligen effort/flow-Paares die Richtung des Energiestromes. (Ein Beispiel der Bondgraphdarstellung zeigt Abb. 2.13.)

Strukturelement	Quelle	Speicher	Übertrager	Wandler	Senke
Symbolische Darstellung					
Wirkungsweise	Output-Abgabe aus einem Vorrat	Input-Output Differenz-Speicherung	Input-Output Kopplung	Input-Output Umformung	Input-Dissipation
Mehrpol-Darstellung $\phi$ flow; $\epsilon$ effort					
Bondgraph-darstellung					

Abb. 2.10 Klassifikation der elementaren Strukturelemente technischer Systeme

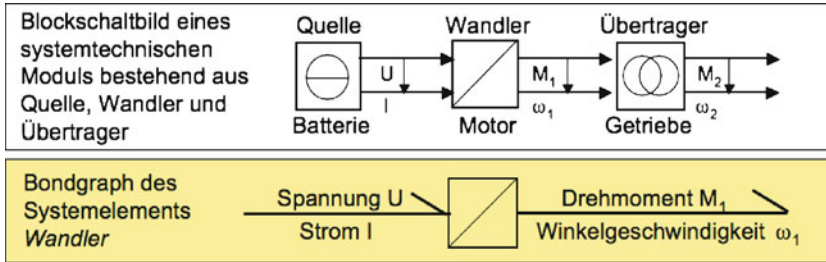
Energieform	Quelle	Speicher	Übertrager	Wandler	Senke
<b>Mechanisch</b> F Kraft s Weg v Geschwindigkeit E Energie	<ul style="list-style-type: none"><li>Wasser- Staubecken- energie</li><li>Windenergie</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Feder <math>F = ks</math> </li><li>Bewegte Masse m <math>F = ma, E = mv^2/2</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Hebel</li><li>Gelenk</li><li>Getriebe</li><li>Fluidstrom</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Kolben im Zylinder</li><li>Strömung</li><li>Tragflügel- Profil</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Dämpfer</li><li>Reibung</li></ul>
<b>Thermisch</b> T Temperatur	<ul style="list-style-type: none"><li>Sonnenenergie</li><li>Erdwärme</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Wärmespeicher <math>E = mc_p T</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Wärmeleitung</li><li>Strahlung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Peltier- Element</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Kalte Umgebung</li></ul>
<b>Thermo- dynamisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Verbrennung</li><li>Exothermik</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Gas- oder Dampf- Volumen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Verdampfung</li><li>Kondensation</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Verdichtung</li><li>Expansion</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Drosselung</li></ul>
<b>Elektrisch</b> U Spannung I Strom $Q = dI/dt$ Ladung E Energie	<ul style="list-style-type: none"><li>Akkumulator</li><li>Elektrische Netze</li><li>Sender</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Kondensator  <math>C = Q/U, E = CU^2/2</math></li><li>Induktivität  <math>L = U/(dI/dt), E = LI^2/2</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Elektrische Leitung</li><li>Transformator</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Piezoaktor</li><li>Elektromotor</li><li>Generator</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Widerstand R Verlust- leistung <math>P = RI^2</math> </li><li>Wirbelstrom</li></ul>
<b>Chemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Exotherme Reaktion</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Akkumulator</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Materiestrom</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Chemische Reaktion</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Endotherme Reaktion</li></ul>

Abb. 2.11 Elementare Strukturelemente technischer Systeme: Beispiele mit unterschiedlichen Energieformen

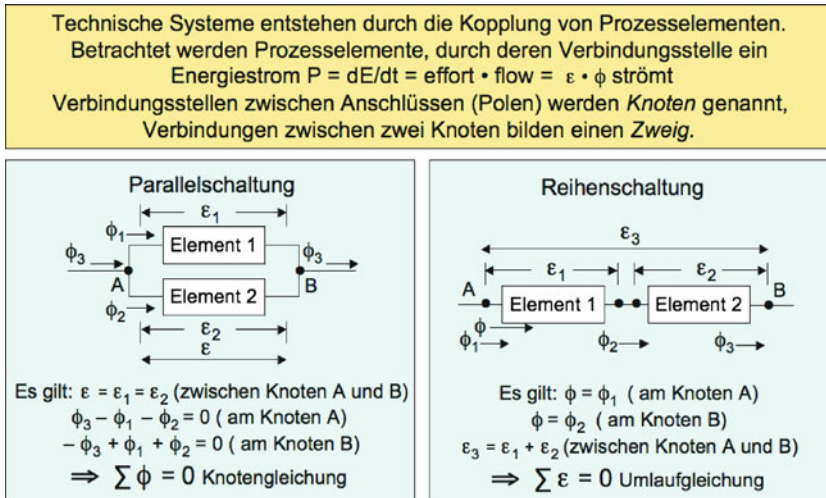
Beispiele der elementaren Strukturelemente technischer Systeme mit unterschiedlichen Energieformen gibt Abb. 2.11.

Kombination von Systemelementen zu System-Modulen

System-Module entstehen durch das „Zusammenschalten“ mehrerer elementarer Strukturelemente und ihrer zugehörigen Input/Output-Funktionsgrößen. Ein einfaches Beispiel eines elektro-mechanischen Moduls, gebildet aus der Kombination einer Quelle (Batterie)



**Abb. 2.12** Beispiel der Kombination von Strukturelementen zu einem System-Modul



**Abb. 2.13** Elementare Verschaltungsarten von System- oder Prozesselementen

mit einem Wandler (Motor) und einem Übertrager (Getriebe) zeigt Abb. 2.12. Der untere Teil illustriert die Bondgraph-Darstellung des Wandlers.

Die elementaren Möglichkeiten des Zusammenfügens von Systemelementen zu Modulen sind die in Abb. 2.13 dargestellten, aus der Elektrotechnik bekannten Parallel- und Reihenschaltungen.

Die grundlegenden Regeln der Zusammenschaltung elektrischer Prozesselemente sind die Kirchhoff'schen Regeln. In Verallgemeinerung dieser Gleichungen können für technische Systeme allgemeine Bilanzgleichungen in Form von Kontinuitätsgleichungen und Kompatibilitätsgleichungen aufgestellt werden, siehe Abb. 2.14.

## 2.4 Systemeigenschaften

Die Eigenschaften technischer Systeme werden durch ihre Funktion und die sie tragende Systemstruktur bestimmt. Wie in der allgemeinen Systembeschreibung von Abb. 2.4 zu-

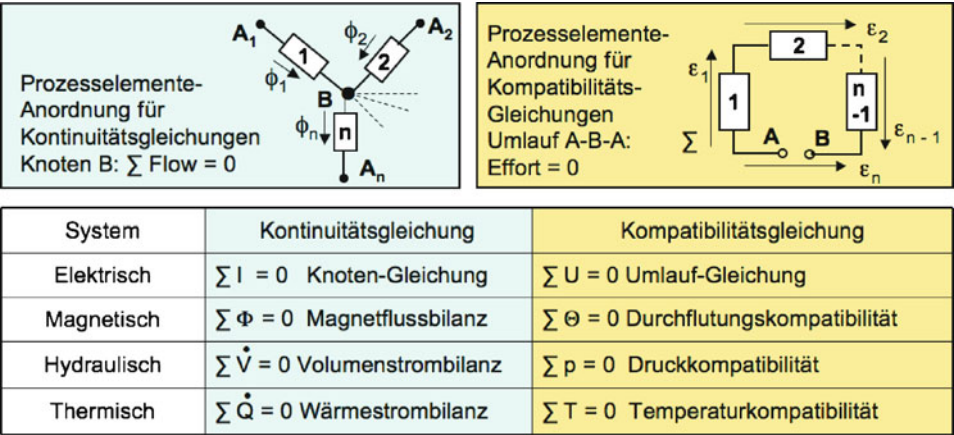


Abb. 2.14 Bilanzgleichungen technischer Systeme

sammenfassend dargestellt, sind dabei sowohl die Nutzfunktion als auch Störgrößen und Dissipationseffekte zu beachten. Die technischen Systemeigenschaften können durch die folgende Begriffe der wesentlichen Merkmale stichwortartig beschrieben werden:

- Determiniertheit: bestimmbare oder zufallsbedingte (stochastische) Systeme,
- Komplexität: Art, Zahl der Systemelemente, Vielfalt ihrer Wechselwirkungen,
- Dynamik: stationäres oder dynamisches Verhalten des Systems,
- Wechselwirkung mit der Systemumgebung: geschlossene oder offene Systeme,
- Stabilität: Reaktion eines Systems auf Störungen von außen.

Das Systemverhalten kann dabei folgende Merkmale aufweisen:

- linear – nichtlinear,
- diskret (zeit- oder zustandsdiskret) – kontinuierlich,
- zeitvariant (Systemverhalten ändert sich mit der Zeit) – zeitinvariant,
- geregelt oder ungeregelt,
- adaptiv (anpassend),
- autonom (unabhängig) von äußerer Steuerung.

Technische Systeme werden für Aufgaben aus Technik, Wirtschaft, Gesellschaft geschaffen und müssen dafür allgemein wichtige Systemeigenschaften aufweisen, dazu gehören insbesondere:

Funktionalität

Die Funktionalität eines technischen Systems besteht darin, unter bestimmten Bedingungen erstrebte Wirkungen herbei zu führen, dabei ist die technische Effizienz – das Verhältnis von Output zu Input – z. B. der energetische Wirkungsgrad, die Stoffausnutzung oder die Produktivität, zu maximieren. Die Funktion technischer Systeme wird von der



Struktur des Systems getragen. Die Systemstruktur ist durch Konstruktion, Design und Produktion geeignet zu gestalten.

### **Qualität und Konformität**

Qualität ist die Beschaffenheit eines Produktes oder Systems bezüglich seiner Eignung, bestimmungsgemäße Funktionen sowie festgelegte und vorausgesetzte Regeln zu erfüllen. Qualitätsaspekte können nicht nachträglich in technische Produkte „hineingeprüft“ werden. Die Qualität technischer Systeme ist durch ein *Total Quality Management* zu gewährleisten (Qualitätsmanagementnorm ISO 9001).

Konformität ist die Übereinstimmung mit vorgegeben Normen und Beschaffenheitsregeln. Erzeugnisse dürfen in der Europäischen Union erst dann in den Verkehr gebracht werden, wenn der Hersteller durch eine Konformitätserklärung oder die Konformitätsbescheinigung einer unabhängigen Prüfstelle (*conformity assessment*) nachgewiesen hat, dass die grundlegenden Anforderungen der betreffenden EG-Richtlinien erfüllt sind. Das Konformitätsbewertungssystem ist verbunden mit internationalen Normen für die Qualitätssicherung (Normenreihe EN ISO 9000) und für Anforderungen, denen die für die Qualitätssicherung zuständigen Stellen genügen müssen, z. B. durch Akkreditierung. Zuständig in Deutschland ist die Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS ([www.dakks.de](http://www.dakks.de)).

### **Wirtschaftlichkeit**

Technische Entscheidungen unterliegen wegen der grundsätzlichen Knappheit der Ressourcen, die für Herstellung und Nutzen technischer Systeme erforderlich sind, dem Gebot der Sparsamkeit. Das ökonomische Prinzip verlangt, das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand zu maximieren, das heißt, einen bestimmten Nutzen mit möglichst geringem Aufwand, bzw. mit einem bestimmten Aufwand einen möglichst hohen Nutzen zu erreichen.

### **Umweltverträglichkeit**

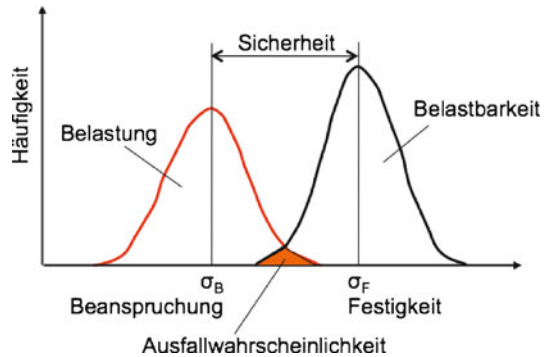
Menschliches Leben ist auf die Technik angewiesen, und jede Technik greift in Naturverhältnisse ein. Hieraus ergibt sich die Verantwortung des Menschen für den Schutz der Umwelt und der Ressourcen. Dabei kann und muss er technische Mittel einsetzen. Geboten ist der sparsame Umgang mit natürlichen Ressourcen: Energiesparen; rohstoffsparendes Konstruieren und Fertigen; Recycling; Verlängerung der Lebensdauer von Produkten; Minimierung von Emissionen, Immissionen und Abfallmengen durch Abwasser- und Abgasreinigung; Abfallverwertung. Versäumnisse können die Lebensmöglichkeiten späterer Generationen einschränken; irreversible Umweltschäden sind zu vermeiden.

---

## **2.5 Funktionssicherheit und Strukturintegrität technischer Systeme**

Sicherheit bei der Anwendung und Nutzung technischer Systeme bedeutet die Abwesenheit von Gefahren für Leben oder Gesundheit. Wegen der Fehlbarkeit der Menschen, der

**Abb. 2.15** Interferenzmodell zur Kennzeichnung von Sicherheit und Ausfallwahrscheinlichkeit



Möglichkeit technischen Versagens und der begrenzten Beherrschbarkeit von Naturvorgängen gibt es keine absolute Sicherheit. Das Risiko, das mit einem bestimmten technischen Vorgang oder Zustand verbunden ist, wird zusammenfassend durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben, die (a) die zu erwartenden Häufigkeit des Eintritts eines zum Schaden führenden Ereignisses und (b) das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß berücksichtigt (DIN VDI 31000).

Technische Sicherheit bedeutet, dass die komplementäre Größe, das „Risiko“ – gekennzeichnet durch das Produkt von Schadenswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß – unter einem vertretbaren Grenzkrisiko bleibt.

Das Versagen eines technischen Systems oder eines seiner Teile wird deutsch als *Ausfall* und international als *failure* bezeichnet: the termination of the ability of an item to perform a required function (ISO 13372:2004).

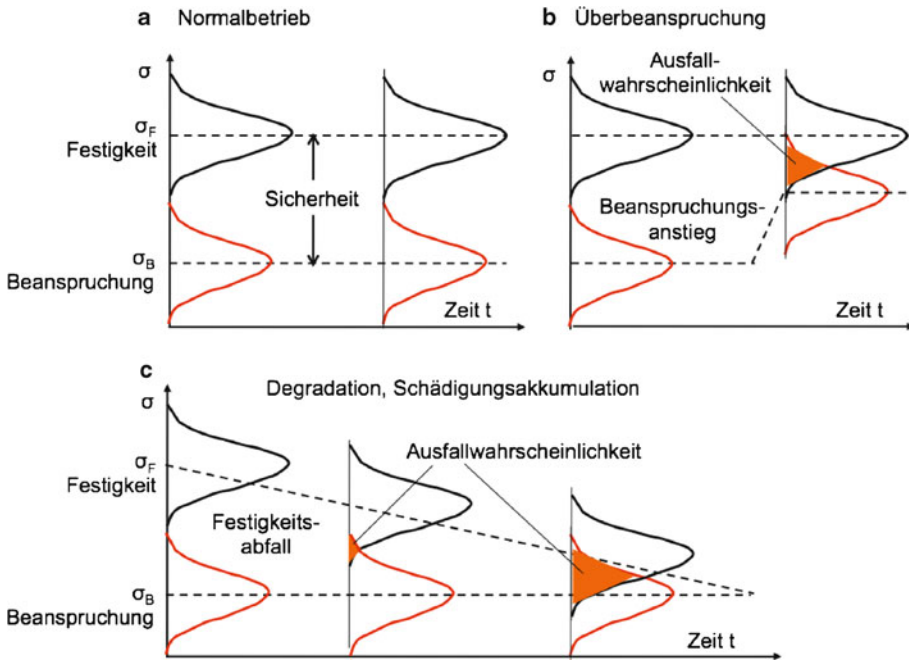
Ausfälle können entstehen, wenn die Belastung (z. B. durch eine mechanische Spannung  $\sigma_B$ ) die Belastbarkeit (z. B. die Festigkeit  $\sigma_F$ ) eines Bauteils übersteigt. Die technische Zuverlässigkeit ist eine stochastische Größe. Sie kann empirisch durch die experimentelle Ermittlung der Ausfallhäufigkeit ermittelt werden.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit lässt sich dann in einem *Interferenzmodell* als Schnittmenge der Häufigkeitsverteilungen von Belastung und Belastbarkeit graphisch darstellen, siehe Abb. 2.15. **Technische Sicherheit** kann in dem Interferenzmodell durch den Abstand zwischen Belastung und Belastbarkeit gekennzeichnet werden.

**Technische Zuverlässigkeit** ist die Eigenschaft eines Bauteils oder eines technischen Systems für eine bestimmte Gebrauchsdauer („Lebensdauer“) funktionstüchtig zu bleiben. Die Zuverlässigkeit ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil oder ein technisches System seine bestimmungsgemäße Funktion für eine bestimmte Gebrauchsdauer unter den gegebenen Funktions- und Beanspruchungsbedingungen ausfallfrei, d. h. ohne Versagen erfüllt. Die Versagensmechanismen lassen sich in zwei grundlegende Klassen einteilen:

- **Überbeanspruchung:** Überschreiten der allgemeinen „Materialfestigkeit“ durch einen plötzlichen Anstieg der mechanischen, elektrischen oder thermischen Beanspruchung.





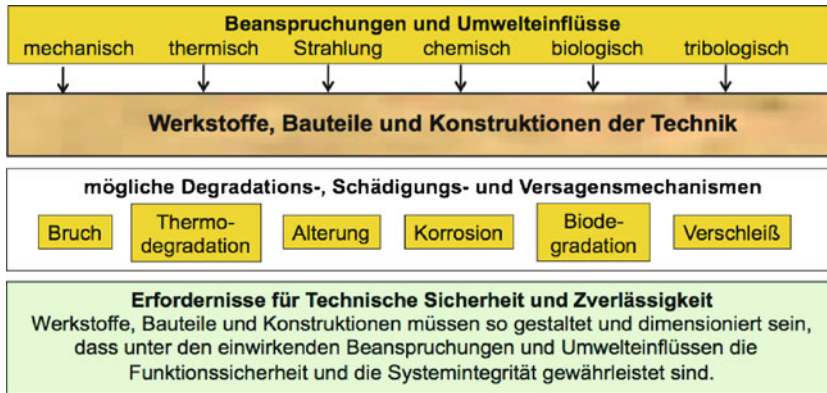
**Abb. 2.16** Dynamisches Interferenzmodell zur Kennzeichnung von Sicherheit und Ausfallwahrscheinlichkeit

Beispiele: mechanischer Stabilitätsverlust durch Knicken, Zusammenbrechen elektronischer Schaltungen durch Ladungsdurchschläge, Änderung von Materialeigenschaften bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur.

- Degradation: voranschreitender Prozess der Schädigungsakkumulation in Werkstoffen, der zur Minderung von Leistungsmerkmalen und Schwächung der Belastbarkeit führt. Beispiele der Degradation von Metallen: Rissbildung und Risswachstum, Kriechen, Verschleiß, Korrosion. Beispiele der Degradation von Kunststoffen: Versprödung, mangelhafte UV- bzw. Lichtbeständigkeit.

Die Einflüsse der Versagensmechanismen auf die technische Sicherheit und Zuverlässigkeit eines Bauteils sind in Abb. 2.16 in einem dynamischen Interferenzmodell dargestellt.

Das dynamische Interferenzmodell bezieht sich auf die technische Zuverlässigkeit eines Bauteils. Die Systemzuverlässigkeit hängt natürlich von der Zuverlässigkeit aller Systemkomponenten ab. Wenn die Systemstruktur durch eine serielle Kombination der Systembauelemente modelliert werden kann, lässt sich nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Systemzuverlässigkeit als Produkt der Bauteilzuverlässigkeiten ausdrücken. Dies bedeutet, dass die Systemzuverlässigkeit mit der Anzahl der Systemkomponenten abnimmt und dass die schlechteste Bauteilzuverlässigkeit die Systemzuver-



**Abb. 2.17** Erfordernisse für Sicherheit und Zuverlässigkeit technischer Systeme

lässigkeit bestimmt. Für eine hohe Systemzuverlässigkeit muss die Zuverlässigkeit der einzelnen Systemkomponenten verbessert werden.

Die Zuverlässigkeitsbetrachtungen zeigen, dass die Zuverlässigkeit technischer Systeme sowohl von der inneren Systemstruktur als auch von den äußeren Beanspruchungsbedingungen und deren statistischer Streuung abhängt. Abbildung 2.17 gibt eine vereinfachende Übersicht über die auf Werkstoffe, Bauteile und Konstruktionen der Technik einwirkenden Beanspruchungen und Umwelteinflüsse, bezeichnet die möglichen Degradations-, Schädigungs- und Versagensmechanismen und nennt die grundlegenden Erfordernisse für Sicherheit und Zuverlässigkeit technischer Systeme.

## 2.6 Technische Diagnostik und Condition Monitoring

Die Methoden zur Analyse relevanter Parameter für Sicherheit und Zuverlässigkeit technischer Systeme werden international unter dem Begriff „Technical Diagnostics“ zusammengefasst. Die Zustandsüberwachung technischer Systeme wird als „Condition Monitoring“ bezeichnet.

Die technische Diagnostik ist detailliert im HANDBOOK OF TECHNICAL DIAGNOSTICS (Springer 2013) mit folgender Gliederung dargestellt, siehe Tab. 2.1.

- A Methoden und Techniken für die Diagnostik und Zustandsüberwachung,
- B Technische Diagnostik von Maschinen und Anlagen,
- C Strukturüberwachung und Funktionsüberwachung.

Die Methoden der technischen Diagnostik reichen von der Spannungs- und Dehnungsanalyse (Stress and Strain Determination) über die Radiologie und Computertomografie bis hin zur Mikrostrukturanalyse. Als „Nondestructive Evaluation“ wird die Zerstörungs-

**Tab. 2.1** Grundlagen und Anwendungen der technischen Diagnostik

Technical Diagnostics	Principles, Methods, Application (Handbook Chapters)
<b>A</b> Methods and Techniques for Diagnostics and Monitoring	Overview of Diagnostics and Monitoring Methods and Techniques
	Stress and Strain Determination Modal Analysis Vibration Analysis Acoustic Emission
	Nondestructive Evaluation Infrared Thermography Industrial Radiology Computed Tomography Embedded Sensors
	Micro-Diagnostics Surface Chemical Analysis Subsurface Microstructural Analysis
<b>B</b> Technical Diagnostics of Machines and Plants	Principles and Concepts of Technical Failure Analysis
	Failure Analysis: Case Studies Machinery Diagnostics
<b>C</b> Structural Health Monitoring and Performance Control	Principles, Concepts and Assessment of Structural Health Monitoring
	Buildings Bridges Pipelines Electrical Power Stations and Transmission Networks OffshoreWind Structures Railway Systems
	Guidelines to Structural Health

freie Prüfung (ZfP) bezeichnet. Die wichtigsten ZfP-Verfahren für die Zustandsüberwachung sind die Ultraschallsensorik, das Wirbelstromverfahren und die Radiographie (siehe Abschn. 7.4 Zustandsüberwachung von Maschinen).

Die Anwendungsbereiche der in Tab. 2.1 zusammengestellten Prinzipien und Methoden der technischen Diagnostik umfassen die *Machinery Diagnostics* (Tab. 2.1, B) und die Zustandsüberwachung der technischen Infrastruktur (Tab. 2.1, C): Bauwerke, Brücken, Pipelines, Elektrizitätswerke, Stromnetze, Windenergieanlagen, Bahnsysteme. Die Technische Diagnostik bietet damit heute ein wichtiges Instrumentarium für die Strukturintegrität (structural health) und die Funktionssicherheit (performance) von Maschinen und technischen Anlagen. Anwendungen im Maschinenbau und in der baulichen Infrastruktur sind in den Kap. 7 und 14 dargestellt.

**Condition Monitoring**

Für die Sicherheit und Zuverlässigkeit technischer Systeme ist die Methode des *Condition Monitoring* (Zustandsüberwachung) entwickelt worden. Condition Monitoring dient der Erkennung eines *faults* (Fehlzustand) in einem technischen System: *the condition of an item that occurs when one of its components or assemblies degrades or exhibits abnormal behaviour* (ISO 13372:2004).

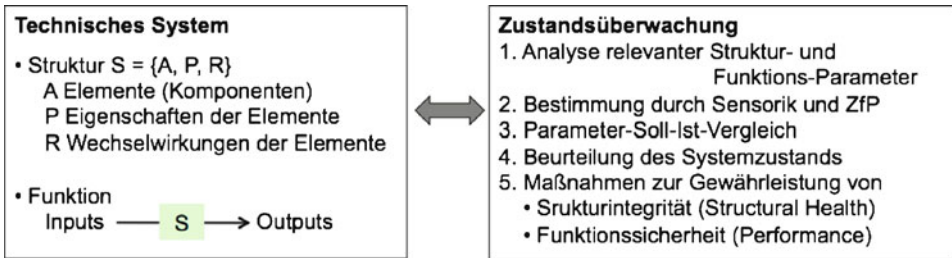


Abb. 2.18 Technisches System und Zustandsüberwachung

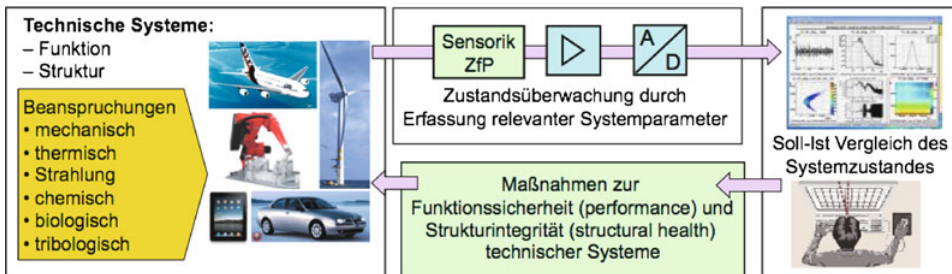


Abb. 2.19 Methodik der Zustandsüberwachung technischer Systeme

Aufgabe der Zustandsüberwachung ist es, in technischen Systemen einen *Fehlzustand* (a) zu detektieren, (b) zu lokalisieren, (c) nach Art, Gefährlichkeit, Zeitverhalten zu charakterisieren und (d) frühzeitig vor Ausfall (z. B. Verlust der Tragfähigkeit) zu warnen. Aus systemtechnischer Sicht hat die Zustandsüberwachung zwei Aufgaben:

- Funktionsüberwachung (performance control) der operativen Funktionsparameter technischer Systeme durch Sensorik und Regelungstechnik zur Gewährleistung der *Funktionssicherheit*.
- Strukturüberwachung (structural health monitoring) mit strukturintegrierter Sensorik (embedded sensors) zur Gewährleistung der *Strukturintegrität*.

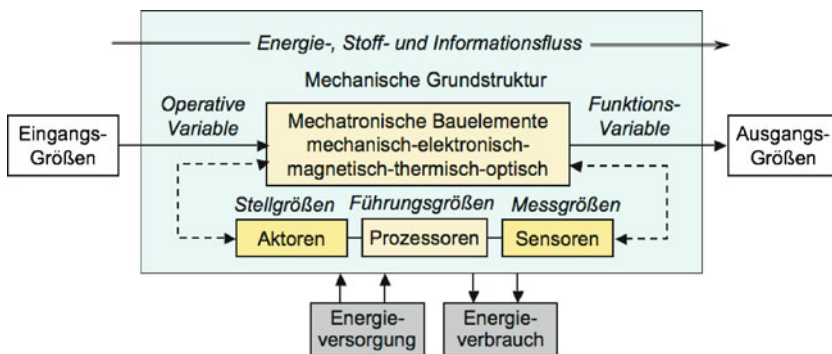
Die Methodik der Zustandsüberwachung ist anhand der Prinzipdarstellung technischer Systeme in Abb. 2.18 stichwortartig beschrieben.

Abbildung 2.19 illustriert das Prinzip der Zustandsüberwachung technischer Systeme. Mit Sensorik und Zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) werden funktionelle und strukturelle Systemparameter erfasst und ein Soll-Ist-Vergleich des jeweiligen Systemzustands vorgenommen. Mit systemspezifischen Auswertungs- und Beurteilungsmethoden können Maßnahmen zur Funktionssicherheit und der Strukturintegrität getroffen werden. Die Anwendung des Condition Monitoring ist im Abschn. 7.4 *Zustandsüberwachung von Maschinen* dargestellt.

Mechatronische Systeme sind technische Systeme, die auf dem Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Informatik basieren.

## Aufbau mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme haben eine mechanische Grundstruktur, die je nach geforderter Funktionalität – gekennzeichnet durch Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen – mit mechanischen, elektronischen, magnetischen, thermischen, optischen und weiteren funktionell erforderlichen Bauelementen verknüpft ist, siehe Abb. 3.1. Sensoren ermitteln funktionsrelevante Messgrößen und führen sie, umgewandelt in elektrische Führungsgrößen, Prozessoren zu. Die Prozessoren erzeugen zusammen mit Aktoren Stellgrößen für die Regelung oder Steuerung zur Optimierung der Funktionalität des Systems.



**Abb. 3.1** Übersicht über den grundsätzlichen Aufbau mechatronischer Systeme

### 3.1 Modellbildung

Mit Modellbildungen werden mechatronische Systeme in ihren funktionellen und strukturellen Aspekten klassifiziert und ihr Verhalten untersucht. Jede Modellbildung muss infolge der Komplexität realer technischer Systeme vereinfachende Annahmen treffen und besitzt auch nur eine begrenzte Gültigkeit. Eine Modellierung ist daher häufig nur auf Baugruppen oder Module mechatronischer Systeme anwendbar.

Die *funktionsorientierte Methodik* modelliert Input-Output-Relationen mit den Grundgleichungen:

- Bilanzgleichungen, z. B. für gespeicherte Massen, Energien, Impulse,
- Konstitutive Gleichungen, z. B. physikalisch-chemische Zustandsgleichungen,
- Phänomenologische Gleichungen, z. B. Gleichungen für Prozesse (Wärmeleitung),
- Entropiebilanzgleichungen, z. B. wenn mehrere irreversible Vorgänge stattfinden,
- Verknüpfungsgleichungen, z. B. Verschaltungsgleichungen für Prozesselemente.

Die *strukturorientierte Methodik* modelliert strukturelle Prozesselemente mit den Kategorien:

- Quellen: Output-Abgabe aus einem Vorrat, z. B.: Akkumulator, Öl/Gas-Brenner Speicher; Input-Output Differenz-Speicherung, z. B. Feder, Kondensator, Tank,
- Senken: Input-Dissipation, z. B. Dämpfer, Reibung, elektrischer Widerstand, hydraulische Drossel,
- Übertrager: Input-Output-Kopplung, z. B. Getriebe, Transformator, Wärmeübertrager, Druckübersetzer,
- Wandler: Input-Output-Umformung, z. B. Generator, Elektromotor, Verbrennungsmotor, Elektromagnet, Ventilator, Pumpe.

Das Verhalten von Systemen kann auf unterschiedliche Weise gekennzeichnet werden: es kann durch physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben, an Hand von Messungen ermittelt oder in mathematischen Modellen dargestellt werden. Man unterscheidet bei Systemen gewöhnlich zwischen dem dynamischen (zeitabhängigen) und dem statischen oder stationären Verhalten. Zur Klassifikation der Modellbildung mechatronischer Systeme dienen die in Abb. 3.2 erläuterten Begriffe

- Linearität,
- Strukturparameter,
- Zeitabhängigkeit,
- Arbeitsweise,
- Determiniertheit,
- Parametervielfalt.



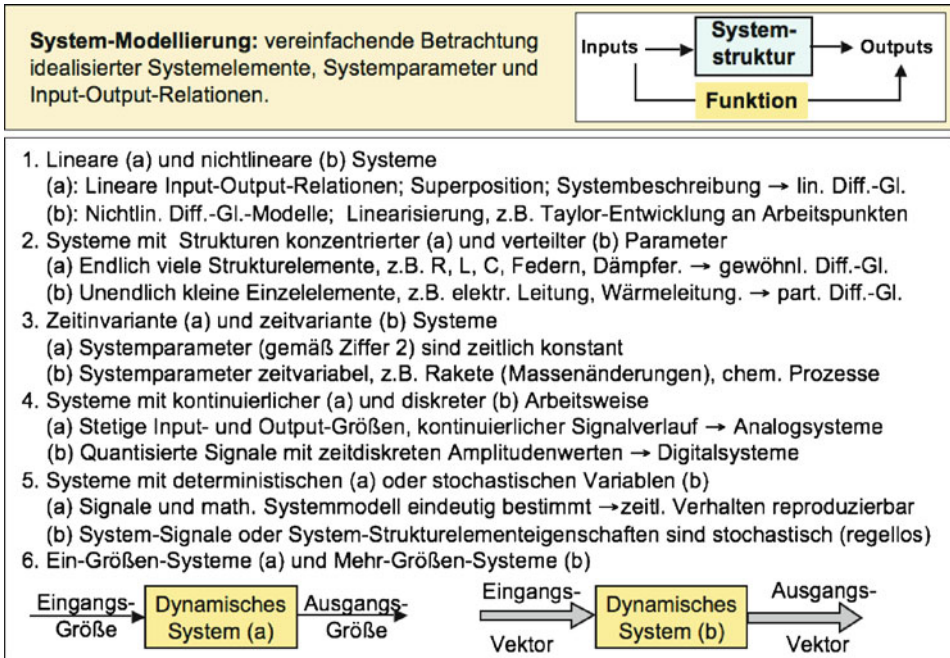


Abb. 3.2 Modellierungsklassen mechatronischer Systeme

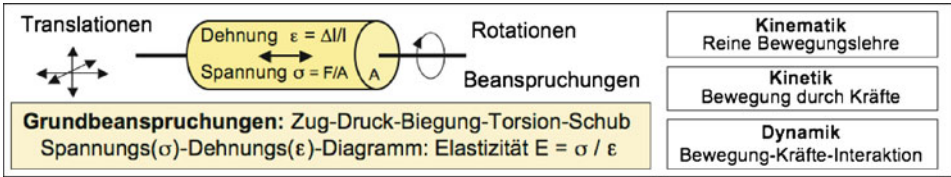
## 3.2 Mechanik in mechatronischen Systemen

Die Mechanik bildet in der Mechatronik mit der *Kinematik*, *Kinetik* und *Dynamik* die Grundlage für die Realisierung von Bewegungen, Kräften und mechanischen Energieflüssen. Die strukturmekanische Funktionsfähigkeit technischer Systeme erfordert, dass die äußere Beanspruchung eines Bauteils in allen Belastungssituationen kleiner sein muss als die Tragfähigkeit. Durch Festigkeitsbetrachtungen sind zulässige Belastungen, erforderliche Bauteilabmessungen, geeignete Werkstoffe und die Sicherheit gegen Versagen zu gewährleisten. Für die Modellbildung der Mechanik mechatronischer Systeme gibt Abb. 3.3 eine elementare Zusammenstellung in knappster Form.

Für die Modellierung mechanischer Module mechatronischer Systeme sind die Elemente *Feder*, *Dämpfer*, *Masse* von besonderer Bedeutung. Operative Variable sind Kraft  $F$ , Translation  $x$ , Geschwindigkeit  $v$ , siehe Abb. 3.4.

### Schwingungen

Die Funktionsvariablen mechatronischer Systeme können zeitperiodischen Veränderungen – allgemein als Schwingungen bezeichnet – unterworfen sein, ihre fundamentale Kennzeichen sind am Beispiel mechanischer Schwingungen in den Abb. 3.5 und 3.6 dargestellt.



### Grundregeln der Kinematik

- Zur Beschreibung von Bewegungen benötigt man ein geometrisches Bezugssystem
- Bewegungen bestehen aus Translationen (Linear-Wege  $s$ ) und Rotationen (Drehwinkel  $\varphi$ )
- Ein frei beweglicher Körper hat 3 Translations- und 3 Rotations-Freiheitsgrade

### Grundregeln der Kinetik (Newtonsche Axiome)

1. Impuls  $I = \text{Masse } m \times \text{Geschwindigkeit } v$ ;  $I$  und  $v$  sind gleichgerichtete Vektoren
2. Kraft  $F = \text{Masse } m \times \text{Beschleunigung } a$ ;  $F$  und  $a$  sind gleichgerichtete Vektoren
3. *Actio = Reactio*; Mechanische Interaktionen zwischen zwei Körpern sind gleich

### Grundgleichungen

• Arbeit  $W = \int F ds$  • Leistung  $P = dW/dt = Fv$

• Kinetische Energie  $E = mv^2/2$

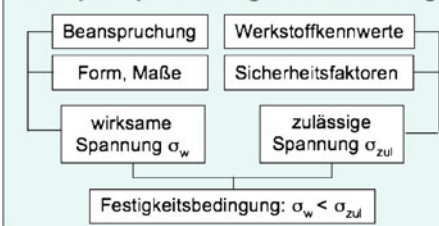
### Gleichgewichtsbedingungen

• Kräfte:  $\sum F = 0$  • Momente:  $\sum M = 0$

### Bilanzgleichungen

- Erhaltungssätze (geschlossene Systeme)
  - Massenbilanz :  $\sum m = \text{konst.}$
  - Impulsbilanz :  $\sum I = \text{konst.}$
  - Energiebilanz :  $\sum E = \text{konst.}$




### Grundprinzip der Festigkeitsbetrachtung



Translation		Rotation	
$s$	Weg	$\varphi$	Drehwinkel
$v = ds/dt$	Geschwindigkeit	$\omega = d\varphi/dt$	Winkelgeschwindigkeit
$a = dv/dt$	Beschleunigung	$\Omega = d\omega/dt$	Winkelbeschleunigung
$m$	Masse	$\Theta$	Trägheitsmoment
$F$	Kraft	$M$	Drehmoment
$I = m v$	Impuls	$L = \Theta \omega$	Drehimpuls
$F = m a$	Kräftesatz	$M = \Theta d\omega/dt$	Momentensatz
$E = mv^2/2$	kinetische Energie	$E = \Theta \omega^2/2$	kinetische Energie
$W = \int F ds$	Arbeit	$W = \int M d\varphi$	Arbeit
$P = F v$	Leistung	$P = M \omega$	Leistung

**Abb. 3.3** Grundlagen für die Modellbildung der Mechanik in mechatronischen Systemen



Feder k	Dämpfer d	Masse m
Elastizität, Speicher	Widerstand, Senke	Trägheit, Speicher
 $\xrightarrow{F_k} x$	 $\xrightarrow{F_d} \frac{dx}{dt} = v$	 $\xrightarrow{F_m} \frac{d^2x}{dt^2}$
$F_k = k \cdot x = k \int v dt$	$F_d = d \cdot v$	$F_m = m \cdot dv/dt$
Kraft folgt durch Integration von v	Kraft ist proportional zu v	Kraft folgt durch Differentiation von v
Verformungsenergie $E = \frac{1}{2} (k \cdot x^2)$	Verlustleistung $P = d \cdot v^2$	Kinetische Energie $E = \frac{1}{2} (m \cdot v^2)$

**Abb. 3.4** Feder, Dämpfer, Masse: wichtige mechanische Modellelemente in der Mechatronik

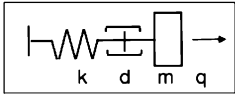
**Schwingungen sind zeitperiodische Vorgänge**

- **Signalarten**  
determinierte Signale: (a) periodisch → harmonisch (Sinus) oder → allgemein periodisch  
(b) nicht periodisch → z.B. Sprungfunktion oder → Stoßfunktion  
stochastische Signale → statistische Zufallsvariable
- **Kinematik:** *Freie Schwingungen:* Translation oder Rotation, ein oder mehrere Freiheitsgrade,  
→ lineare oder nichtlineare homogene, gewöhnliche Differentialgleichungen (DGL)
- **Kinetik:** *Erzwungene Schwingungen:* Externe Anregung eines schwingungsfähigen Systems,  
→ inhomogene DGL

*Selbsterregte Schwingungen:* Schwingungsanregung aus Energiespeicher  
*Parametererregte Schwingungen:* Anregung durch zeitabhängige Systemparameter

**Beschreibung freier Schwingungen mit einem Freiheitsgrad (1-F Schwinger)**

Differentialgleichung:  $m\ddot{q} + d\dot{q} + kq = 0$  , m Trägheit, d Dämpfung, k Steifigkeit  
Ungedämpfte freie Schwingungen:  
 $\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$  ,  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ : Eigenkreisfrequenz  
Die Lösung lautet  $q(t) = \text{Amplitude} \cdot \cos(\omega_0 t + \text{Phase } \varphi)$ .  
Bei Schwingungen mit Dämpfung, Dämpfungsmaß  $D = d / 2m \omega_0$ ,  
ergibt sich die Differentialgleichung  $\ddot{q} + 2D \omega_0 \dot{q} + \omega_0^2 q = 0$   
zur Beschreibung von Systemen 2. Ordnung mit konzentrierten Parametern.



**Abb. 3.5** Die grundlegenden Kennzeichen von Schwingungen

**Dynamik**

Als Dynamik bezeichnet man allgemein die Wechselwirkungen von Bewegungen und Kräften. Der Begriff schließt die Kinetik und die Statik mit ein. Die Strukturdynamik befasst sich mit der Dynamik und dem Schwingungsverhalten der Strukturelemente von Systemen. Die Dynamik des einfachen mechanischen Moduls illustriert Abb. 3.7.

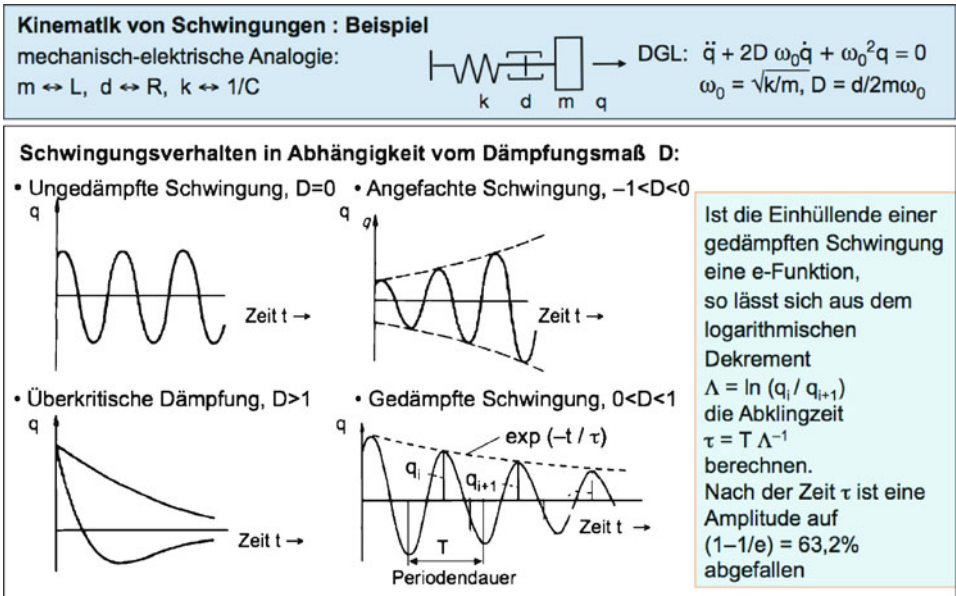


Abb. 3.6 Kinematik von Schwingungen

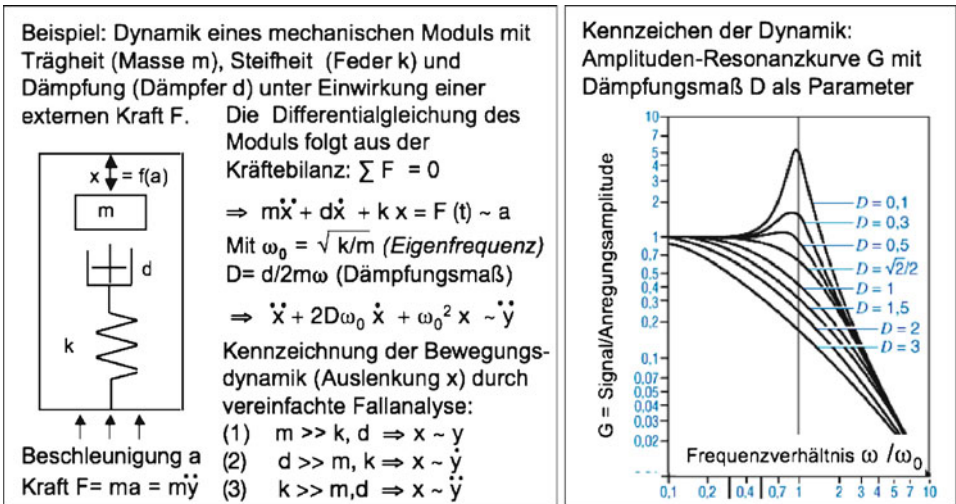


Abb. 3.7 Kennzeichen der Dynamik eines einfachen mechanischen Moduls, Beispiel

3.3    Elektronik in mechatronischen Systemen

Die Elektronik ist sowohl anteiliger Namensgeber als auch wichtiger integraler Bestandteil der Mechatronik. Die meisten mechatronischen Systeme enthalten elektronische Komponenten, die in vielen Fällen zu elektronischen Modulen zusammengeschaltet sind. Für die Mechatronik werden auch anwendungsspezifische Chips, die ASICS (Application Specific Integrated Circuits) entwickelt, siehe Abschn. 6.6. Die für die Mechatronik wichtigsten Kategorien der Elektronik und elementare Modellierungselemente sind in Abb. 3.8 in knappster Form zusammenfassend aufgeführt.

**Passive Elemente**

- **Widerstände R:** Proportionalität von Spannung  $U$  (effort) und durchfließendem Strom  $I$  (flow). Ohmsches Gesetz  $U = R \cdot I$ ; allgemein:  $U = Z \cdot I$ , mit  $Z$  Impedanz  $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C$  ( $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  Frequenz;  $L$  Induktivität;  $C$  Kapazität)
- **Kapazitäten C** speichern elektr. Ladung  $Q$  proportional zur Spannung  $Q = C \cdot U$ ,
- **Induktivitäten L:**  $U = L \cdot dI/dt$ . Eine Spule (Induktivität  $L$  und Windungszahl  $N$ ) speichert einen magnetischen Fluss  $\Phi$  proportional zum durchfließenden elektrischen Strom  $I = dQ/dt$ . Es gilt  $N \cdot \Phi = L \cdot I$ .

Kapazität C	Widerstand R	Induktivität L
Elektrisches Feld, <i>Speicher</i>	Ohmsche Verluste, <i>Senke</i>	Magnetisches Feld, <i>Speicher</i>
$U_C = Q/C = 1/C \int I \cdot dt$	$U_R = R \cdot I = R \cdot dQ/dt$	$U_L = L \cdot dI/dt$
Spannung folgt durch Integration von $I$	Spannung ist proportional zu $I$	Spannung folgt durch Differentiation von $I$
Elektrische Energie $E = \frac{1}{2} (C \cdot U^2)$	Verlustleistung $P = R \cdot I^2$	Magnetische Energie $E = \frac{1}{2} (L \cdot I^2)$

**Dioden** leiten Strom bevorzugt in einer Richtung (Durchlassrichtung).

**Transistoren** sind dreipolige Komponenten mit Verstärkungs- oder Schaltfunktion

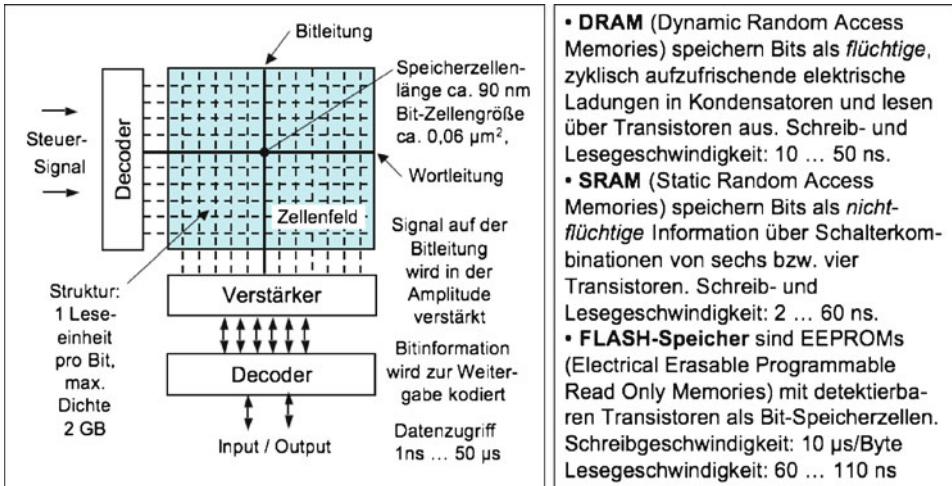
- Bipolartransistoren können als zwei gegeneinander geschaltete Dioden mit den drei Elektroden Basis, Emitter und Kollektor betrachtet werden.
- Feldeffekttransistoren (FET) arbeiten mit zwischen Quelle und Senke fließenden Strömen (n-Typ: Elektronen, p-Typ: Löcher), gesteuert durch elektrische Felder.

**Thyristoren** sind Leistungselektronik-Schalter, bestehend aus drei aufeinander folgenden pn-Übergängen: Ströme  $I$ : 1 bis 2000 A; Spannungen  $U$  bis 5000 V.

**Integrierte Schaltkreise (IC)** vereinen photolithographisch planar erzeugte Elemente elektronischer Schaltungen – wie Transistoren, Dioden, Kondensatoren, Widerstände, Induktivitäten – auf einem Halbleiter-Chip (meist Siliziumelektronik).

**Operationsverstärker**, ursprünglich entwickelt für mathematische Analogrechner-Operationen, bestehen prinzipiell aus mindestens drei gleichspannungsgekoppelten Verstärkerstufen: Differenzverstärker, Spannungsverstärker, Stromverstärker.

Abb. 3.8    Grundlagen für die Modellbildung der Elektronik in mechatronischen Systemen



**Abb. 3.9** Aufbauprinzip und typische Ausführungsarten von Halbleiterspeichern

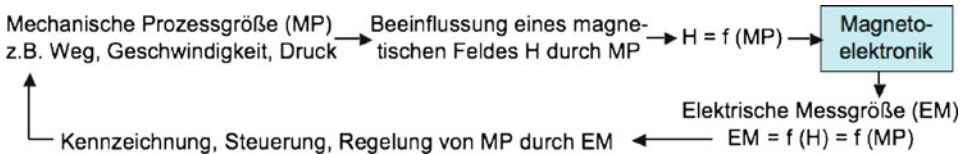
Elektronische Bauelemente und Module werden in mechatronischen Systemen sowohl als *Analogtechnik* in Schaltkreisen mit wert- und zeitkontinuierlichen Prozessgrößen als auch als *Digitaltechnik* in integrierten Schaltkreisen (IC) eingesetzt. Die für die Funktion mechatronischer Systeme erforderlichen Informations- und Signalflüsse werden heute meist digitalisiert, wobei mittels ICs umfangreiche Datenmengen zu speichern und zu verarbeiten sind. Die meisten Schaltkreise werden in CMOS-Technologie (Complementary Metal Oxide Semiconductor) aufgebaut. Die Schaltungstechnik basiert auf Paaren jeweils eines p- und eines n-leitenden MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Wird eine Spannung an das Paar angelegt, sperrt immer ein MOSFET des Paares. Der Integrationsgrad von ICs reicht von SSI (Small Scale Integration) mit etwa 100 Funktionselementen pro Chip (ca.  $3 \text{ mm}^2$  Fläche) bis zu VLSI (Very Large Scale Integration) mit bis zu 1 Mio. Funktionselemente pro Chip (ca.  $30 \text{ mm}^2$  Fläche).

### Halbleiterspeicher

Speicher nutzen physikalische Effekte, die binäre ja/nein- oder logisch1/logisch0-Zustände (z. B. leitend/nichtleitend oder geladen/ungeladen) eindeutig erzeugen und erkennen lassen. Eine Ja/Nein-Informationseinheit heißt *Bit* (Binary Digit). Eine Zusammenfassung von Bits, die zusammenfassend verarbeitet werden kann, nennt man *Wort*. Acht Bits werden als *Byte* bezeichnet. Halbleiterspeicher (Semiconductor Memories) bestehen aus Speicherzellen, die in einer Matrixstruktur angeordnet sind. Jede Speicherzelle kann einzeln adressiert werden und speichert ein Bit. Grundzüge der Halbleiterspeichertechnik sind in Abb. 3.9 dargestellt.

### Magnetoelektronik

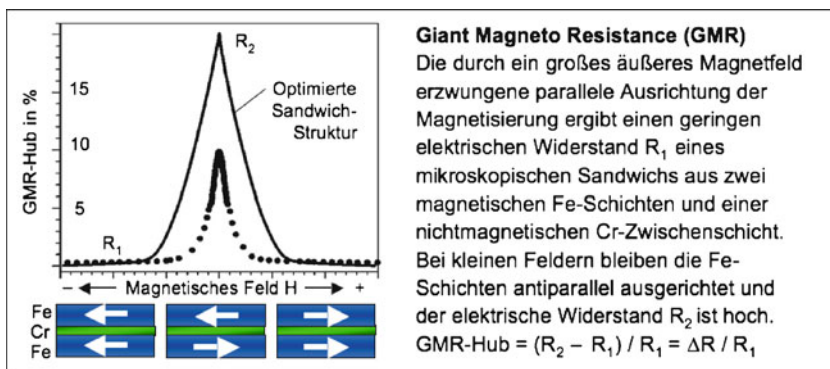
Als Magnetoelektronik wird die Änderung elektrischer Materialeigenschaften durch magnetische Felder bezeichnet. Magnetoelektronische Materialien, Bauelemente und Sensoren werden heute in mechatronischen Systemen eingesetzt, die von Computer-Schreib/Leseköpfen (vgl. Kap. 12, Abb. 12.2) bis zur berührungslos arbeitenden Automobilsensorik reichen (vgl. Kap. 13, Abb. 13.9). Die elementare „mechano-magneto-elektronische Funktionskette“ für die Anwendung der Magnetoelektronik in der Mechatronik lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen:



Wichtige Effekte der Magnetoelektronik für Anwendungen in der Mechatronik sind:

- *Hall-Effekt* und *Gauß-Effekt* → Sensorik, siehe Abschn. 5.4.1, Abb. 5.49,
- *AMR, Anisotropic Magnetic Resistance* → Sensorik, siehe. Abschn. 5.4.1, Abb. 5.46,
- *GMR (Giant Magneto Resistance) Effekt* → Sensorik, siehe. Abschn. 5.7, Abb. 5.82.

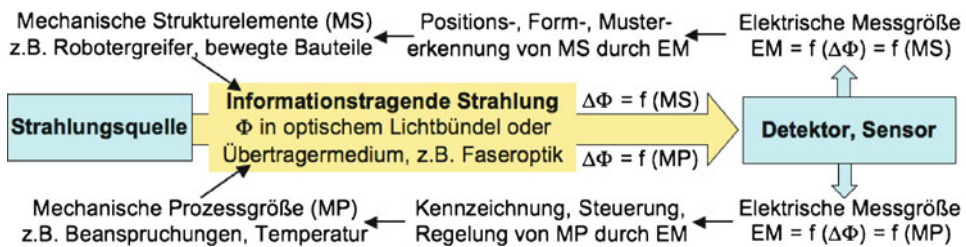
Der GMR-Riesenmagneto-Widerstandseffekt (Physik-Nobelpreis 2007, P. Grünberg und A. Fert) ist ein quantenmechanischer Resonanzeffekt in dünnen, abwechselnd ferromagnetischen und nichtmagnetischen Sandwichstrukturen. Er ist gekennzeichnet durch eine – sensorisch mit hoher Empfindlichkeit nutzbaren – Änderung des elektrischen Widerstandes unter dem Einfluss eines Magnetfeldes, siehe Abb. 3.10. Durch Anwendung der GMR-Magnetoelektronik konnte ab 1998 die Leistungsfähigkeit des mechatronischen Systems *Computer-Festplattenlaufwerk* (siehe Kap. 12) erheblich gesteigert und die Speicherdichte auf ca. 17 Gbit/cm<sup>2</sup> erhöht werden.



**Abb. 3.10** Prinzipdarstellung des Riesenmagnetowiderstandeffektes GMR

## Optoelektronik

Die Anwendung der Optoelektronik – Kombination von Optik und Elektronik unter Nutzung des *äußeren und inneren lichtelektrischen Effektes* – für funktionelle Aufgaben mechatronischer Systeme bietet den Vorteil, die besonderen Eigenschaften des Lichtes anwenden zu können. Die Physik kennzeichnet sichtbares Licht als optische Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm, der zwischen dem Ultraviolett (UV)- und dem Infrarot (IR)-Bereich des elektromagnetischen Spektrums liegt. Licht kann als elektromagnetische Welle oder als ein Strom von Teilchen (Photonen oder Lichtquanten), der durch die Quantenmechanik beschrieben wird, angesehen werden. *Optoelektronische Komponenten* formen optische Energie in elektrische Energie (Empfänger) bzw. elektrische Energie in optische Energie (Sender) um. Die opto-elektronischen Wandlereffekte können durch mechanische Strukturelemente beeinflusst und damit die Optoelektronik für Aufgaben der Mechatronik genutzt werden. Die elementare „mechano-opto-elektronische Funktionskette“ zur berührungslosen Sensorik mechanischer Strukturelemente oder zur Steuerung und Regelung von Prozessgrößen (vgl. Kap. 4) lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen:



Eine Übersicht über Strahlungsquellen sowie Detektoren und Sensoren gibt Abb. 3.11.

Von den in Abb. 3.11 übersichtsmäßig dargestellten Bauelementen der Optoelektronik haben Laser den breitesten Anwendungsbereich als integrierte Bestandteile mechatronischer Systeme. Die Physik des Lasers basiert bekanntlich auf dem Bohr'schen Atommodell und der Lichtquantentheorie von Einstein. Physikalische Voraussetzung für die Lichtausstrahlung aus Materie ist, dass durch Zufuhr von Energie  $\Delta E$ , z. B. durch thermische, elektrische oder optische Anregung, ein Elektron von einem Grundniveau im Bohr'schen Atommodell auf ein energetisch höheres Niveau übergeht. Beim Rückgang auf das Elektronen-Grundniveau wird ein Photon gemäß  $\Delta E = h \cdot \nu$  ausgestrahlt ( $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum,  $\nu$ : Frequenz). Das physikalische Laserprinzip in der einfachsten Art und den elementaren Aufbau eines Lasers zeigt Abb. 3.12.

Laser-Strahlung ist grundsätzlich einfarbig (monochromatisch), eng gebündelt und sehr intensiv. Es können Lichtpulse von  $10^{-15}$  s Dauer (Femtosekunden-Laser) erzeugt werden. Andererseits sind Leistungsdichten bis zu  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>, lokale Temperaturen von mehreren 1000 °C und Materialverdampfung möglich. Anwendungsbeispiele der Lasertechnik in mechatronischen Systemen reichen von der berührungslosen optischen Sensorik (Kap. 5) und MOEMS (Micro Opto-Electrical-Mechanical Systems) für Positionierungsaufgaben (Abschn. 8.1), bis hin zu Strahltechniken für die Mikro/Nano-Produktion und



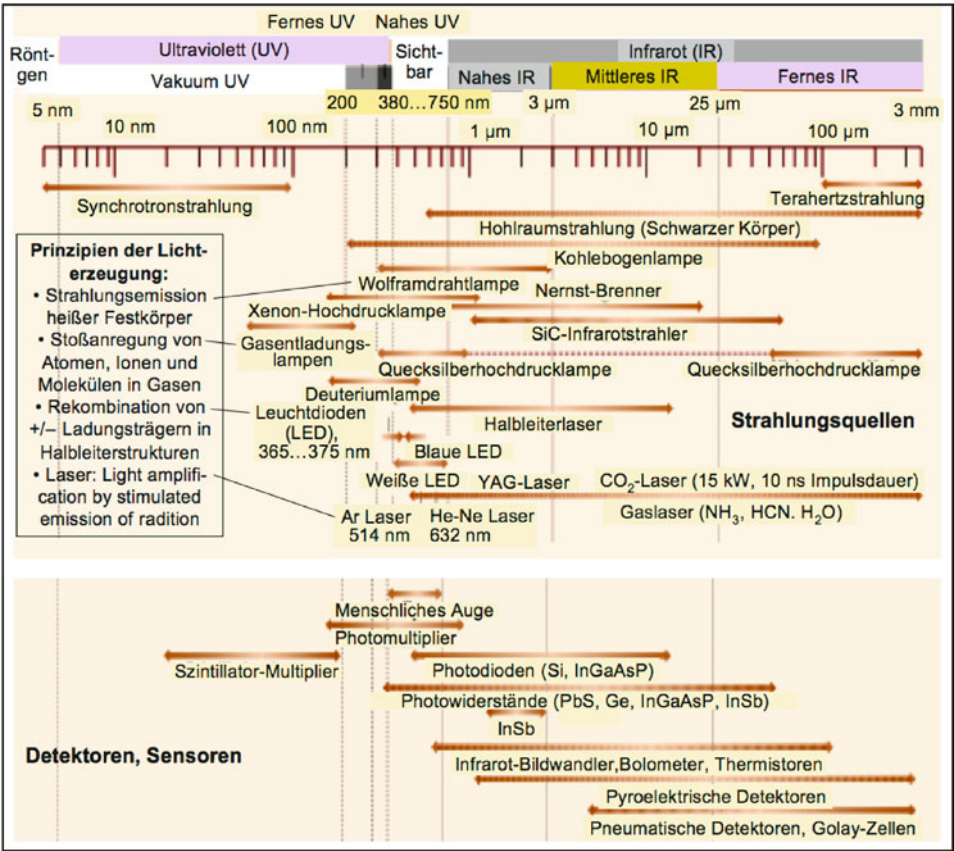


Abb. 3.11 Übersicht über Strahlungsquellen, Sensoren und Detektoren der Optoelektronik

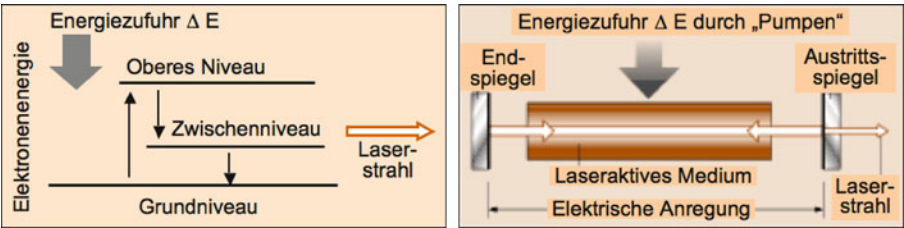


Abb. 3.12 Prinzip eines Lasers (Light amplification by stimulated emission of radiation)

die Lithographie (Abschn. 9.2) sowie dem mechano-optischen Auslesen von Datenspeichern in der Audio/Video-Technik (Kap. 11). Weitere Anwendungsbeispiele der Optoelektronik: Automatisierungstechnik (Lichtschranken, Positionierung), Nachrichtentechnik (Lichtwellenleiter-Transfer, Optokoppler), Signal-, Zeichen-, Symbolanzeigetechnik (LED-Displays).

### 3.4 Informatik in mechatronischen Systemen

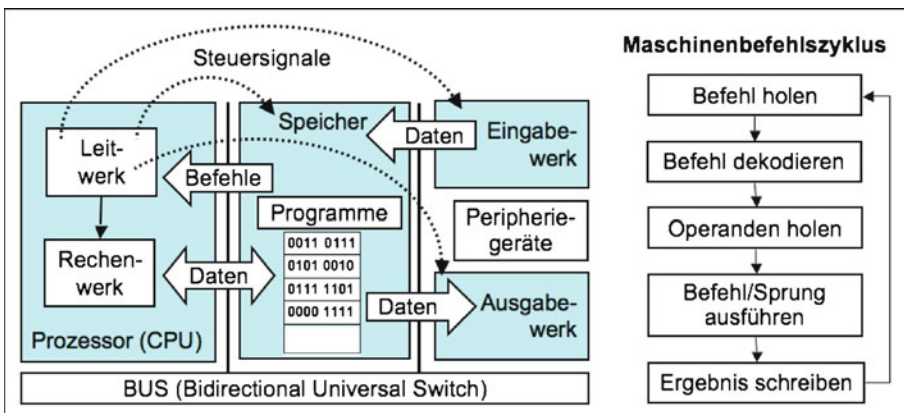
Die Informatik ist neben Mechanik und Elektronik der dritte grundlegende, in die Mechatronik integrierte Technologiebereich. Werkzeuge der Informatik sind Rechner (Computer). Sie verarbeiten Informationen mit Hilfe einer programmierbaren Rechenvorschrift (Algorithmus) und können in der Mechatronik mit ihrer Universalität und leichten Programmierbarkeit als logische Fortsetzung der Elektronik angesehen werden. Computer stehen neben der Sensorik im Vordergrund bei der Erweiterung und Ergänzung mechanischer Systeme zu teileintelligenten Produkten und Systemen, (siehe Kap. 1). Von universeller Anwendbarkeit sind Computer mit der Von-Neumann-Rechnerarchitektur. Der *Technologieführer* (Springer 2006) kennzeichnet sie nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand der theoretischen Informatik als *Universalrechner, die im Prinzip jedes Problem lösen können, das überhaupt von einer Maschine lösbar ist*.

#### Rechnerfunktion und Rechnerstruktur

Die Funktion von Rechnern als *informationsverarbeitende Systeme* ist nicht durch ihre Bauart festgelegt ist, sondern basiert auf dem Zusammenwirken geeigneter Programme und genügend großer Speicher. Da heutige Rechner nur binäre Informationen speichern und verarbeiten, müssen Daten und Programme in dieser Form vorliegen.

Mikrorechner, die mit der Von-Neumann-Architektur in der Mechatronik vielfältig eingesetzt werden, haben gemäß Abb. 3.13 folgende Komponenten:

- *Rechenwerk* (Arithmetic Logic Unit, ALU): Es führt die grundlegenden Rechenoperationen und logischen Verknüpfungen aus.
- *Leitwerk* (Control Unit): Es liest jeweils einen Befehl aus dem Speicher, dekodiert ihn und sendet die entsprechenden Steuersignale an das Rechen-, Speicher- und



**Abb. 3.13** Aufbau eines Rechners mit Von-Neumann-Architektur



Ein/Ausgabewerk. Programme bestehen aus Maschinenbefehlen, die sequentiell ebenfalls im Speicher abgelegt sind. Man unterscheidet zwischen arithmetisch/logischen Befehlen, Transportbefehlen und Sprungbefehlen.

- *Speicherwerk* (Memory): Es hat nummerierte Zellen gleicher Größe (üblicherweise 8 Bit) und speichert Daten und Programme in DRAM-Speichern, vgl. Abb. 3.9.
- *Prozessor* (Central Processing Unit, CPU): Integration von Rechen- und Leitwerk auf einem Chip, häufig auch zusammen mit *Caches*, schnellen Zwischenspeichern in SRAM-Technologie, vgl. Abb. 3.9.
- *Ein/Ausgabewerk* (I/O Unit): Es steuert die Peripheriegeräte. Dazu zählen Bildschirm, Tastatur und Maus sowie Hintergrundspeicher und Netzanbindung.
- *Komponenten-Verbindungssystem* (Bidirectional Universal Switch, BUS).

Neben ihren funktionalen Eigenschaften werden Rechner nach folgenden Merkmalen kategorisiert: *Leistung* (Speicherkapazität, Antwortzeit, Durchsatz), *Zuverlässigkeit* (Verfügbarkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit), *Stromverbrauch* (Watt), *Sicherheit* (Vertraulichkeit, Integrität), *Kosten* (Anschaffungs-, Betrieb-, Stilllegungskosten).

### Eingebettete Systeme, Mikrocontroller

In der Mechatronik werden Mikrorechner heute meist als *Mikrocontroller* direkt in mechatronische Systeme integriert (*Embedded Systems*). Ein Mikrocontroller enthält mindestens die CPU-Funktion, Festwert-Langzeitspeicher als ROM (Read Only Memory) oder EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory), Eingabe- und Ausgabe-Fähigkeit (I/O) und Schreib/Lese-Speicher (RAM) auf einem Chip. Im Unterschied zum Mikrorechner arbeitet der Mikrocontroller mit einem fest vorgegebenen Programm. Der Maschinencode wird im Programmspeicher abgelegt und bleibt dort dauerhaft gespeichert. Die CPU greift über das BUS-System auf diese Komponente zu, liest die als Zahlenwerte verschlüsselten Befehle ein und führt sie aus. In mechatronischen Systemen verarbeiten Mikrocontroller im Allgemeinen Sensorsignale und steuern Aktoren. Die für die Mechatronik besonders wichtige *Sensor-Aktor-Prozessorik* wird in Abschn. 6.6 behandelt.

### Softwaretechnik

Softwaretechnik ist die praktische Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse auf den Entwurf und die Konstruktion von Computerprogrammen, verbunden mit der Dokumentation, die zur Entwicklung, Benutzung und Wartung der Programme erforderlich ist. Grundlegend für die Softwaretechnik und Softwareerstellung sind die anzuwendenden *Algorithmen*. Ein Algorithmus ist eine vollständig festgelegte endliche Folge von Vorschriften, nach denen aus zulässigen Eingangsdaten eines Systems die zu einer Aufgabenlösung erforderlichen Ausgangsdaten erzeugt werden. Zu den wichtigsten Algorithmen bzw. Algorithmenklassen gehören die Sortialgorithmen, Suchalgorithmen, rekursive Algorithmen, Graphenalgorithmen, kryptographische, genetische und numerische Algorithmen. Zur Formulierung von Algorithmen bedient man sich *Programmiersprachen*:

- *Maschinensprachen* sind die direkt auf einem Prozessor ausführbaren binären Zahlen-codes, sie werden in binärer 0-1-Form eingegeben.
- *Assembleranweisungen* ersetzen Zahlencodes durch einprägsame Abkürzungen (Mnemonics), die vor der Ausführung von einem Übersetzerprogramm, dem *Assembler*, in sequentielle Maschinenbefehle für den Rechner umgesetzt werden.
- *Höhere Programmiersprachen*, (wie z. B. die ursprünglich zur Programmierung des Betriebssystems Unix entwickelte Sprache C und ihre Nachfolger C++ und Java) bieten die Möglichkeit zur Formulierung parallel ablaufender Algorithmen, sie müssen zu ihrer Ausführung im Rechner durch *Compiler* übersetzt werden.

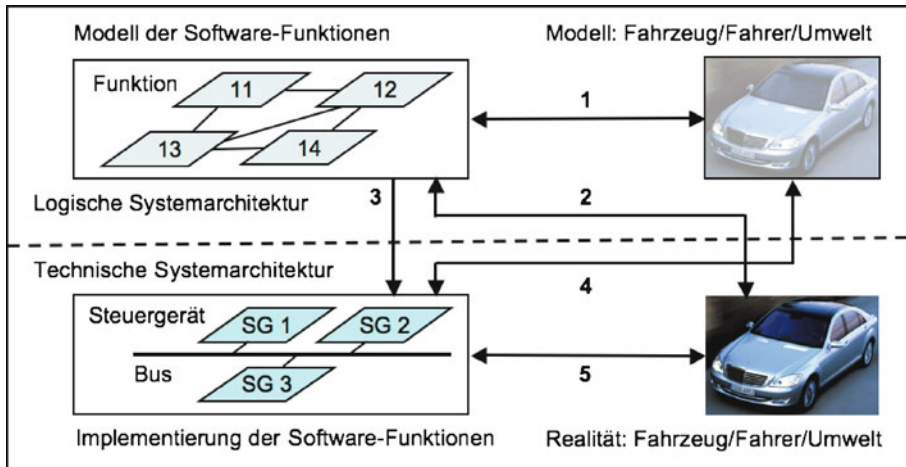
Die Softwareerstellung (*Software Engineering*) gliedert sich in die folgenden Phasen:

1. Problemanalyse, 2. Entwurf, 3. Implementierung, 4. Test, 5. Wartung.

- Beim *Wasserfall-Modell* laufen die Entwicklungsphasen strikt sequentiell ab. Jede Phase produziert ein Dokument, das zum Ausgangspunkt der nächsten Phase wird (Lebenszyklus des Softwaresystems).
- Beim *Prototyping-Modell* werden bereits bei der Problemanalyse oder beim Entwurf sog. Prototypen entwickelt, d. h. vereinfachte Vorversionen des Softwareprodukts, an denen man frühzeitig die Erfüllung der Anforderungen sowie die Eignung von Entwurfsentscheidungen überprüfen kann.
- Das *Spiralmodell* vereint Wasserfall-Modell und Prototyping und bezieht auch eine Risikoanalyse mit ein. Die Entwicklung eines Softwaresystems vollzieht sich dabei in spiralförmigen Zyklen, wobei in jedem Zyklus ein Prototyp entwickelt wird, an dem die Anforderungen überprüft und die verbleibenden Risiken für die weitere Entwicklung analysiert werden.

Standardnotation für die Erprobung von Softwaremodellen vor der Implementierung ist die *Unified Modeling Language* (UML), eine Sammlung von Diagrammarten (z. B. Klassendiagramme, Sequenzdiagramme, Zustandsdiagramme), mit denen man verschiedene Sichtweisen auf ein (objektorientiertes) Softwaresystem darstellen kann. Die *Entwicklungsdokumentation* umfasst alle Dokumente, die bei der Entwicklung der Software angefallen sind, also Anforderungsdefinition, Entwurfsdokumente, Testprotokolle und sonstige Wartungsunterlagen sowie die Implementierungsbeschreibung. Ein wichtiger Teil der Implementierungsbeschreibung ist die Spezifikation der *Modulschnittstellen* (engl.: API, application programming interface). Die Mensch-Maschine-Kommunikation ist in einer psychologisch und ergonomisch möglichst günstigen Weise zu gestalten (*Software-Ergonomie*).

Software ist traditionell als Unikat entwickelt worden. Heute stellt der „Produktlinienansatz“ des Software Engineering einen systematischen Ansatz für die Wiederverwendbarkeit von Software mit gemeinsamen „Quellcodes“ dar. Diese architekturorientierte Software-Entwicklungsmethodik orientiert sich an dem Funktionsmodell des technischen Systems, auf das die Software angewendet werden soll. Die Methodik umfasst



**Abb. 3.14** Die Methodik der modellbasierten Entwicklung von Software-Funktionen, illustriert am Beispiel des mechatronischen Systems Kraftfahrzeug

fünf grundlegende Vorgehensschritte und wird am Beispiel des mechatronischen Systems Fahrzeug/Fahrer/Umwelt (siehe Abb. 3.14; vgl. Kap. 13 Fahrzeugtechnik) illustriert: 1 Modellierung und Simulation der Software-Funktionen sowie des Fahrzeugs, Fahrers und der Umwelt auf dem Rechner, 2 Rapid-Prototyping der Software-Funktionen im realen Fahrzeug, 3 Implementierung der Software-Funktionen auf einem Netzwerk von Steuergeräten, 4 Integration und Test der Steuergeräte mit Laborfahrzeugen und Prüfständen, 5 Test und Kalibrierung der Software-Funktionen der Steuergeräte im Fahrzeug.

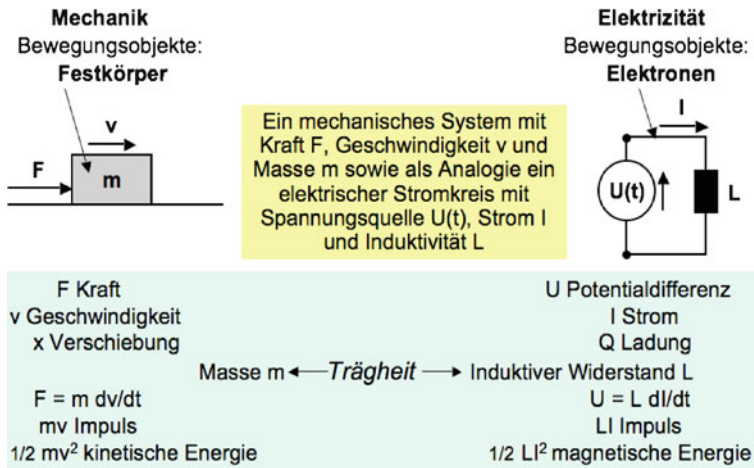
## 3.5 Beschreibung mechatronischer Systeme

Die Beschreibung mechatronischer Systeme erfordert das Zusammenfügen mathematischer Modelle, die ursprünglich separat für einzelne Ingenieurdisziplinen, insbesondere die Technische Mechanik und die Elektrotechnik, entwickelt wurden.

### 3.5.1 Modellierungsgrundlagen aus der Physik

Die interdisziplinäre Beschreibung mechatronischer Systeme kann auf Feynmans *Analogs in Physics* aufbauen. Feynman hatte die vereinheitlichende Beschreibung elektrischer und mechanischer Systeme physikalisch wie folgt begründet, Abb. 3.15:

We can study electrical and mechanical systems by the **principle that the same equations have the same solutions**. In an electrical circuit with a coil of inductance  $L$  and a voltage  $U$ ,



**Abb. 3.15** Analogien zwischen einfachen physikalischen Systemen

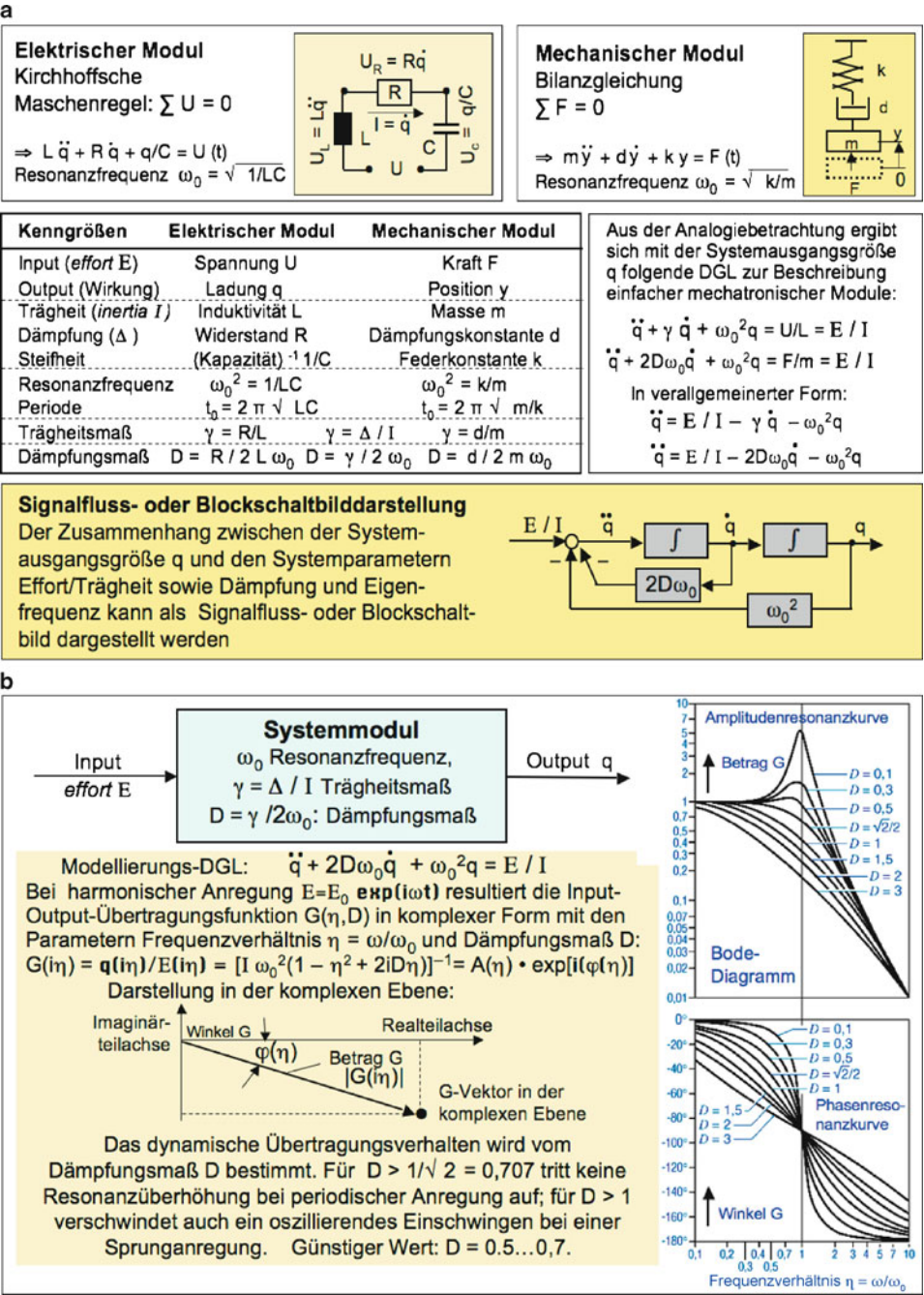
the electrical current  $I$  depends on the voltage according to the relation  $U = L dI/dt$ . This equation has the same form as Newton's law of motion. The rate of doing work on the inductance is voltage times current, and in the mechanical system it is force times velocity. Therefore, in the case of energy, the equations not only correspond mathematically, but also have the same physical meaning as well.

### 3.5.2 Zeitbereich

Für die Modellierung mechatronischer Systeme werden häufig einzelne Strukturelemente zusammengeschaltet und ihre Input/Output-Relationen – gekennzeichnet durch Differentialgleichungen (DGL) – und das dynamische Systemverhalten im Zeitbereich (Originalbereich) betrachtet. Die wesentlichen Aspekte sind in Abb. 3.16 am Beispiel eines verallgemeinerten Systemmoduls mit den Elementen *Trägheit*, *Dämpfung*, *Steifheit*, der aus einer Analogiebetrachtung einfacher mechanischer und elektrischer Module resultiert, dargestellt.

### 3.5.3 Bildbereich

Die Beschreibung mechatronischer Systeme durch modellierende mathematische Gleichungen kann auch in einem „Bildbereich“ erfolgen. Diese Modellierung geht davon aus, dass mathematische Funktionen von einem Original- in einen Bildbereich transformiert, dort einfacher gelöst und die Lösung wieder in den Originalbereich zurück transformiert werden können. Einfaches Beispiel: Logarithmenrechnen.



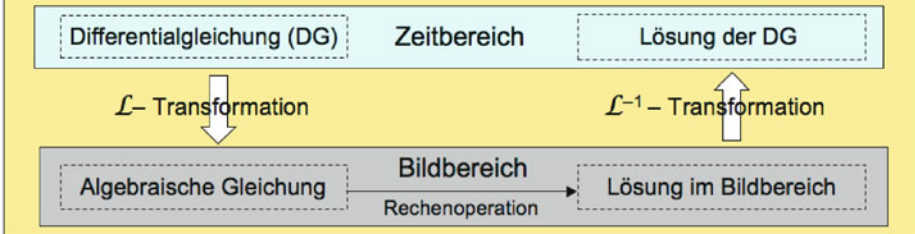


Die Laplace-Transformation ist eine umkehrbar eindeutige Zuordnung (Integraltransformation) einer Originalfunktion  $f(t)$  im Zeitbereich zu einer Bildfunktion  $F(s)$  im Frequenzbereich über das Laplace-Integral von  $f(t)$  mit den Integrationsgrenzen von 0 bis  $\infty$ .

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-st) dt = \mathcal{L}\{f(t)\} \text{ mit } s = \delta + j\omega, \text{ wobei } f(t) = 0 \text{ für } t < 0; j \text{ Imaginärzahl}$$

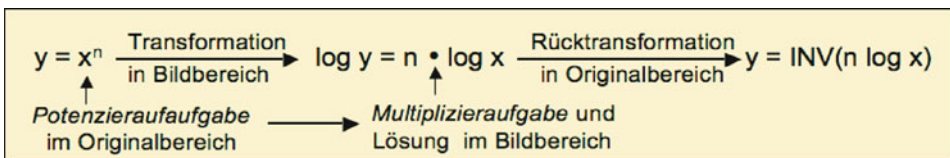
$$\text{Rücktransformation (Umkehrintegral): } f(t) = 1/2\pi j \int F(s) \exp(st) ds = \mathcal{L}^{-1}\{F(s)\}$$

Die Methodik der Laplace-Transformation lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen:



Zur Anwendung der Laplace-Transformation brauchen die mathematischen Prozeduren der Transformation und Rücktransformation häufig nicht rechnerisch durchgeführt zu werden, da es Tabellen mit Korrespondenzen von Original- und Bildfunktionen gibt,  
 → HÜTTE, Seite I 13 und A 81; → Papula, Mathematik, Bd.2, 10. Aufl., S. 666 ff.

**Abb. 3.17** Die Methodik der Laplace-Transformation: Lösung eines mathematischen Problems durch Transformation vom „Originalbereich“ in einen „Bildbereich“ und Rücktransformation



Für mechatronische Systeme, die durch Differentialgleichungen modelliert werden können, benötigt man Funktionaltransformationen zwischen dem Originalbereich (Zeitbereich) und einem für die Lösung günstigen Bildbereich. Hierfür ist eine Modifizierung der Fourier-Transformation, die Laplace-Transformation, geeignet. Sie überführt gemäß der Methodik von Abb. 3.17 eine gegebene Funktion  $f(t)$  vom reellen Zeitbereich ( $t = \text{Zeit}$ ) in eine Funktion  $F(s)$  im komplexen Bildbereich (Frequenzbereich).

Die Laplace-Transformation bildet reellwertige Originalfunktionen auf komplexwertige Bildfunktionen ab, dabei entsprechen der Differentiation und Integration im reellen Originalbereich einfache algebraische Operationen im Bildbereich. Die Algebraisierung bewirkt, dass gewöhnliche Differentialgleichungen im Originalbereich auf algebraische Gleichungen im Bildbereich abgebildet werden.

Im Zusammenhang mit der Beschreibung von Systemen im Bildbereich mittels Laplace-Transformation sind aus der Elektrotechnik die bereits in Abschn. 2.2 erwähnten Methoden der Kennzeichnung des Systemverhaltens durch den *Frequenzgang* und die *Ortskurvendarstellung* bekannt, siehe Abb. 3.18.

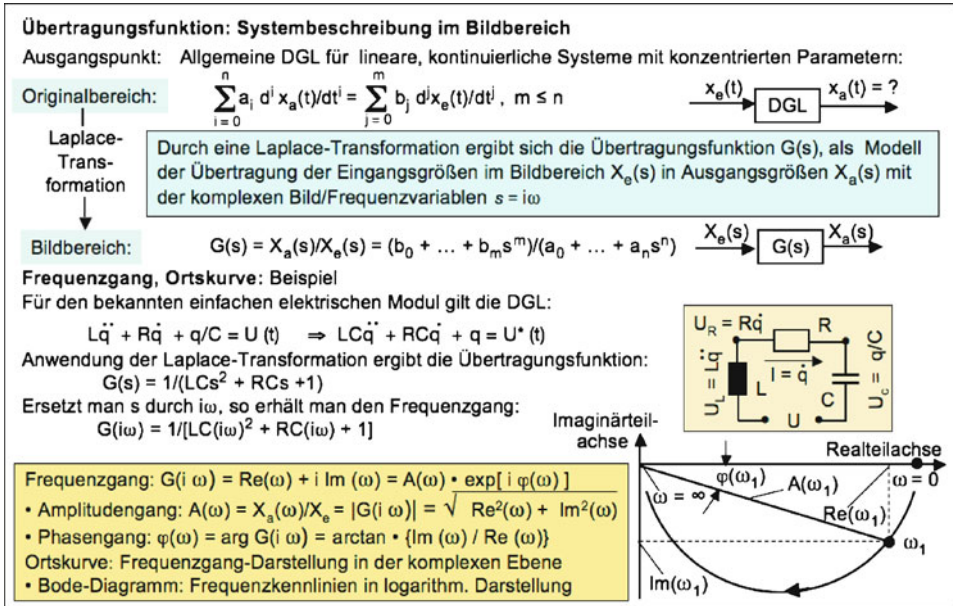


Abb. 3.18 Beschreibungsmöglichkeiten für mechatronische Systeme im Bildbereich

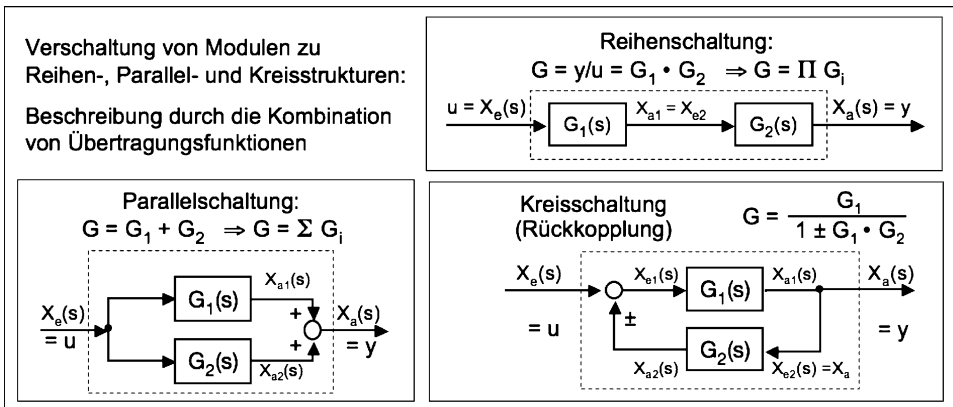
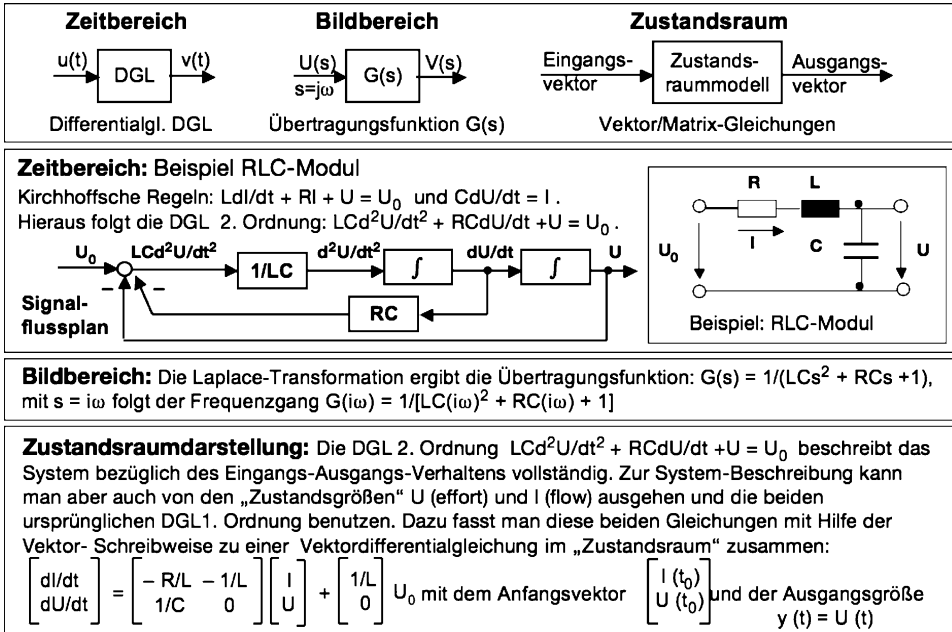


Abb. 3.19 Modulverschaltungen unter Anwendung von Übertragungsfunktionen

Ein Vorteil von Systemmodellierungen mittels Übertragungsfunktionen besteht darin, dass damit auch das Zusammenschalten von Systemmodulen in Form von Reihen-, Parallel- und Kreisstrukturen beschrieben werden kann, siehe Abb. 3.19.



**Abb. 3.20** Beschreibungsmöglichkeiten mechatronischer Module, Beispiel

### 3.5.4 Zustandsraum

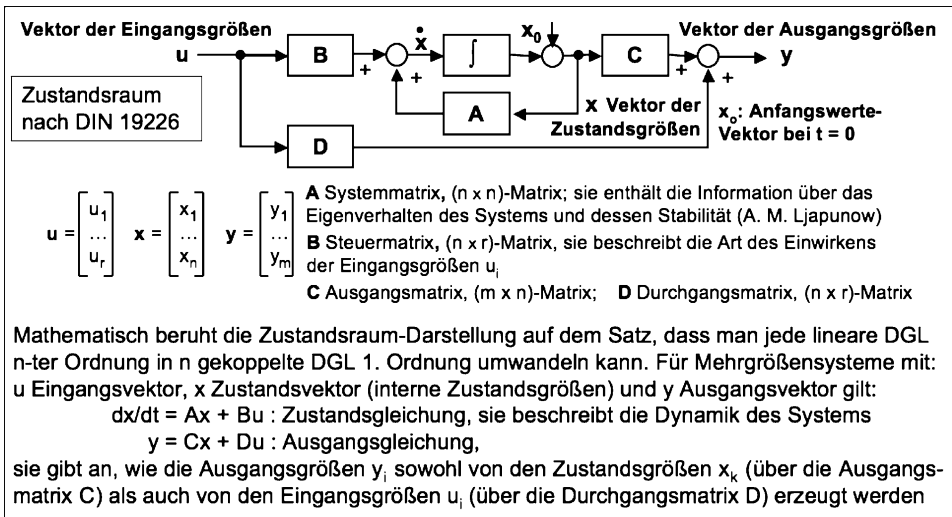
Die Beschreibungsmöglichkeiten mechatronischer Systeme können noch durch eine *Zustandsraumdarstellung* erweitert werden. Damit stehen für die Modellbildung mehrere Methoden zur Verfügung:

- *Zeitbereich:* Modellierung mit Differentialgleichungen, Testfunktionen (z. B. harmonische Anregung, Sprungfunktion), Blockschaltbildern, Mehrpoldiagrammen, Bondgraphen, Signalflussplänen,
- *Bildbereich:* Modellierung mit Laplace-Transformation, Übertragungsfunktion, Darstellung von Amplituden- und Frequenzgang,
- *Zustandsraumdarstellung:* Modellierung mit Vektor/Matrix-Gleichungen.

Eine vergleichende Übersicht über die Beschreibungsmöglichkeiten mechatronischer Systeme im Zeitbereich, Bildbereich und Zustandsraum geben die folgenden Darstellungen am Beispiel des wohlbekannten elektronischen RLC-Moduls, Abb. 3.20.

Die **Zustandsraumdarstellung** ist insbesondere für die im nächsten Kapitel behandelte Regelungstechnik in der Mechatronik von Bedeutung, sie ist in DIN 19226 wie folgt gekennzeichnet: *Wird bei einem Übertragungsglied die Zuordnung der Ausgangsgrößen zu den Eingangsgrößen durch ein System von Differentialgleichungen und gewöhnlichen*





**Abb. 3.21** Modellbildung mechatronischer Systeme: Zustandsraumdarstellung

Gleichungen beschrieben, so lässt sich dieses durch die Einführung von Zustandsgrößen als Zwischengrößen in Zustandsgleichungen umformen, die ein System von Differentialgleichungen jeweils 1. Ordnung und ein System gewöhnlicher Gleichungen sind.

Der **Zustandsraum** ist ein mathematischer Raum, der von den zeitlich veränderlichen Variablen eines dynamischen Systems und ihren zeitlichen Ableitungen aufgespannt wird, siehe Abb. 3.21. Bei der Zustandsraumdarstellung werden die Einzelzustände eines Systems zu einem Zustandsvektor zusammengefasst und als Ortsvektor im (zwei- oder mehrdimensionalen) Zustandsraum interpretiert. Es lässt sich mathematisch zeigen, dass die Punkte des Zustandsraums das System eindeutig charakterisieren. Die zeitliche Entwicklung eines Systems wird durch Kurven im Zustandsraum, den „Trajektorien“ dargestellt. Die Zustandsraumdarstellung bietet die Möglichkeit, den inneren Zustand eines Systems durch eine „Systemmatrix“ (Matrix A in Abb. 3.21) beschreiben zu können, während Systembeschreibungen im Bildbereich mittels Übertragungsfunktion G (ebenso wie Sprunganregungs-Sprungantwort-Relationen im Zeitbereich) nur das funktionelle Eingangs-Ausgangsverhalten eines Systems, nicht jedoch das Verhalten der inneren Systemstruktur kennzeichnen. Die Zustandsraumdarstellung ermöglicht die gleichzeitige Modellierung der System-Funktion und der System-Struktur. Damit kann auch die Stabilität technischer Systeme in einer mathematisch ganzheitlichen Betrachtung modelliert werden.

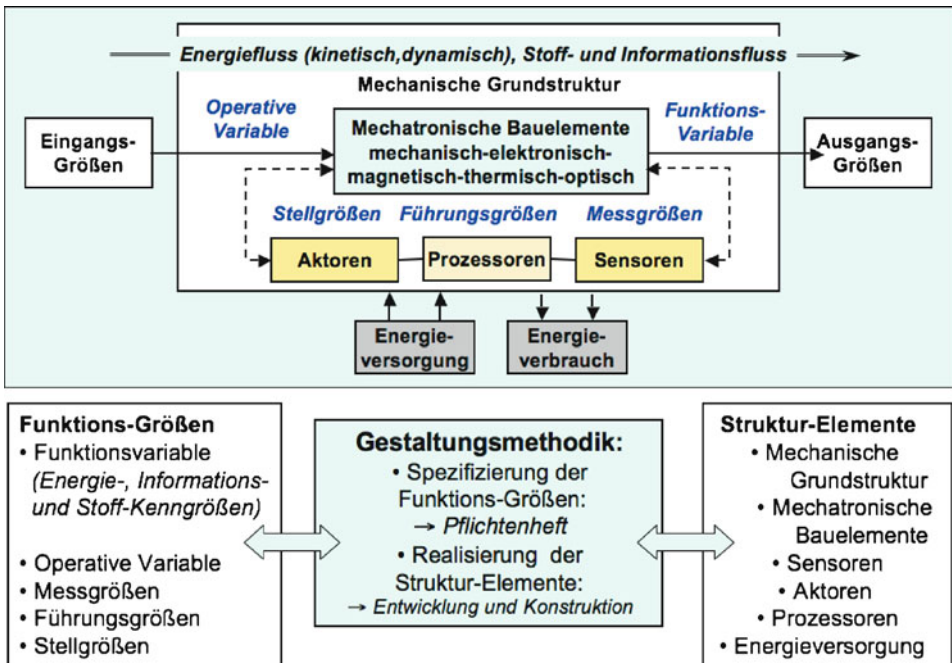
### 3.6 Gestaltung mechatronischer Systeme

Die Gestaltungsmethodik mechatronischer Systeme muss infolge der Komplexität der Mechatronik – wie die in Abschn. 3.1 behandelte Modellierungsmethodik – von vereinfachenden Annahmen ausgehen und hat insbesondere Folgendes zu berücksichtigen:

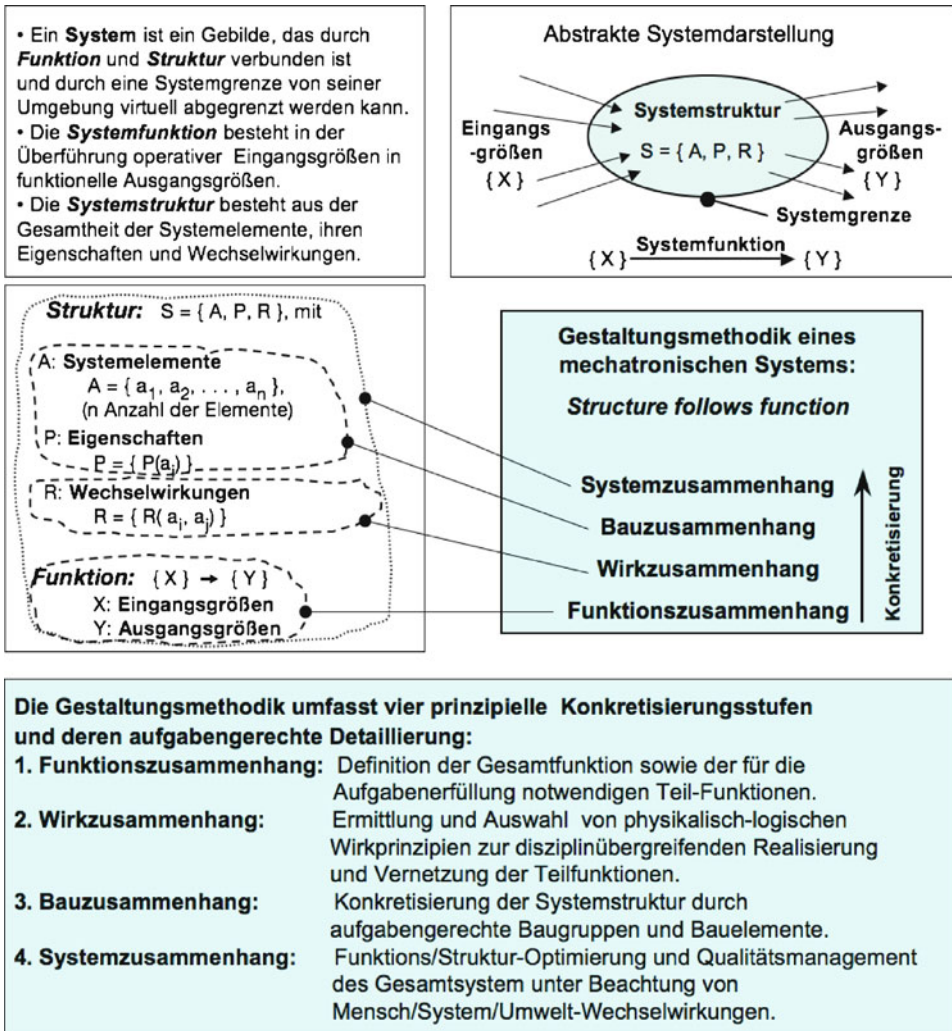
- die allgemeine Konstruktionssystematik für die Entwicklung technischer Produkte unter Berücksichtigung der interdisziplinären Natur mechatronischer Systeme,
- die – ausgehend von der aufgabenspezifischen Funktion – optimal in Hard- und Software zu gestaltenden Systemstruktur und die erforderlichen Produktionsmittel.

Wie in der Übersicht über den grundsätzlichen Aufbau mechatronischer Systeme in Abb. 3.1 dargestellt, lösen mechatronische Systeme interdisziplinäre Aufgaben der Technik durch Sensorik, Aktorik und Prozessorik im systemtechnischen Zusammenwirken mechanischer und nicht-mechanischer Bauelemente sowie modularer Baugruppen. Ausgangspunkt für die Erstellung einer systemtechnischen Gestaltungsmethodik ist die Prinzipdarstellung eines mechatronischen Systems, siehe Abb. 3.22.

In Abb. 3.22 sind die allgemeinen Merkmale mechatronischer Systeme vereinfachend in die folgenden elementaren Gruppen eingeteilt: (a) Funktions-Größen und (b) Strukturelemente.



**Abb. 3.22** Prinzipdarstellung eines mechatronischen Systems: Ausgangspunkt zur Gestaltung



**Abb. 3.23** Gestaltung mechatronischer Systeme: die allgemeine Systemdefinition und die abstrakte Systemdarstellung sowie die daraus entwickelte Gestaltungsmethodik unter Verwendung von Begriffen aus der Konstruktionssystematik

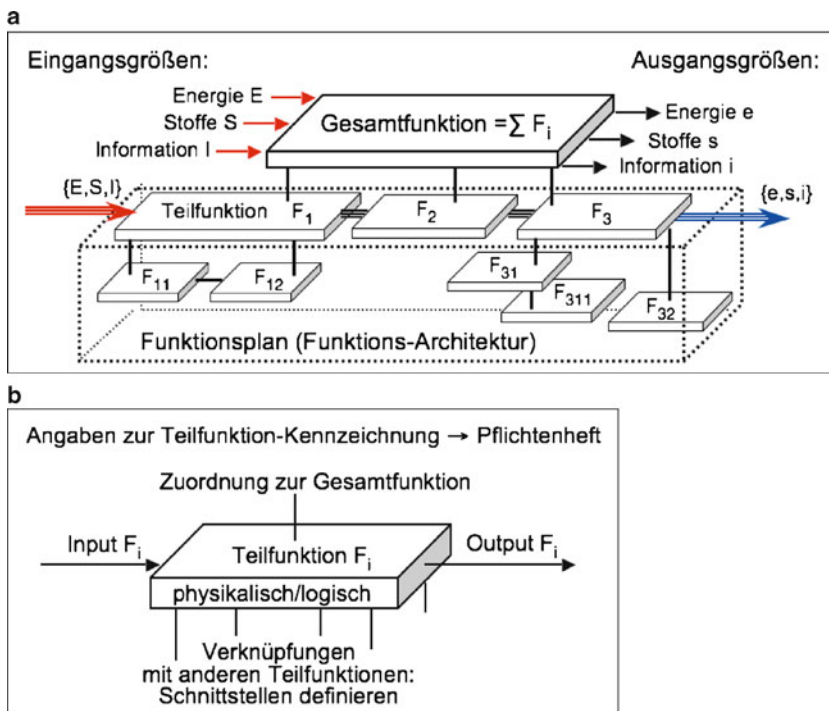
Zur Gestaltung eines mechatronischen Systems sind gemäß dieser vereinfachenden Modellierung die *Funktionsgrößen* entsprechend der konkret vorgegebenen Aufgabenstellung in einem *Pflichtenheft* zu spezifizieren und die *Struktur-Elemente* durch Anwendung der bekannten Methoden der *Konstruktionssystematik* zu realisieren.

### 3.6.1 Systemtechnische Gestaltungsgrundlagen

Grundlage für die systemtechnische Gestaltungsmethodik ist die in Abb. 3.23 nochmals wiedergegebene allgemeine Darstellung eines technischen Systems (vgl. Abb. 2.1) Ausgehend von dem Leitsatz *Structure follows function* ergeben sich daraus die im unteren Teil von Abb. 3.23 aufgeführten vier prinzipiellen Vorgehensschritte der Gestaltungsmethodik mechatronischer Systeme.

### 3.6.2 Funktionszusammenhang

Im ersten Schritt der Gestaltung eines mechatronischen Systems ist dessen aufgabenspezifische Funktion umfassend und präzise zu definieren. Die *Gesamtfunktion* kennzeichnet die zu erfüllende System-Gesamtaufgabe. *Teilfunktionen* sind Aufgliederungen einfacher zu lösender Teilaufgaben. Der *Funktionsplan* ist deren Verknüpfung durch physikalische und logische Wirkprinzipien. Abbildung 3.24 illustriert die grundlegenden Aspekte des Funktionszusammenhangs in allgemeiner Form.



**Abb. 3.24** Funktionszusammenhang: Funktionsplan der Gesamtfunktion (a) und Angaben zur Kennzeichnung von Teilfunktionen (b)

Tab. 3.1 Allgemein anwendbare Funktion zur Kennzeichnung von Teilfunktionen

Merkmal	Allgemein anwendbare Funktion	Symbol	Funktionsmerkmal	Beispiele
Art	Wandeln		Art, Erscheinungsform E und A unterschiedlich	El. Motor, El. Magnet Generator, Lüfter
Größe	Ändern <div>Vergrößern Verkleinern</div>	 	$A > E$ $A < E$	Hebel, Getriebe Transformator Kompressor
Anzahl	Verknüpfen <div>Bündeln Verzweigen</div>	 	Anzahl (A) < Anzahl (E) Anzahl (A) > Anzahl (E)	Mehrweggetriebe Elektr. Kabelbaum Fluid-Ventil
Ort	Leiten <div>Führen Sperren</div>	 	Ort von A $\neq$ Ort von E Ort von A = Ort von E	Führung, Gelenk Lichtleiter, Rohrleiter Schaltkreis, Bremse
Zeit	Speichern		Zeitpunkt von A $\neq$ Zeitpunkt von E	Schwungrad, Elektr. Batterie, CD, DVD

Die gestalterische Aufgliederung der Gesamtfunktion eines mechatronischen Systems in lösbare Teilfunktionen geht aus von allgemein anwendbaren Funktionen; Beispiele sind in der Tab. 3.1 genannt. Für Steuerungsfunktionen werden häufig logische Funktionen (Boole), z. B. UND, ODER, NAND, NOR verwendet, (vgl. Abb. 4.12).

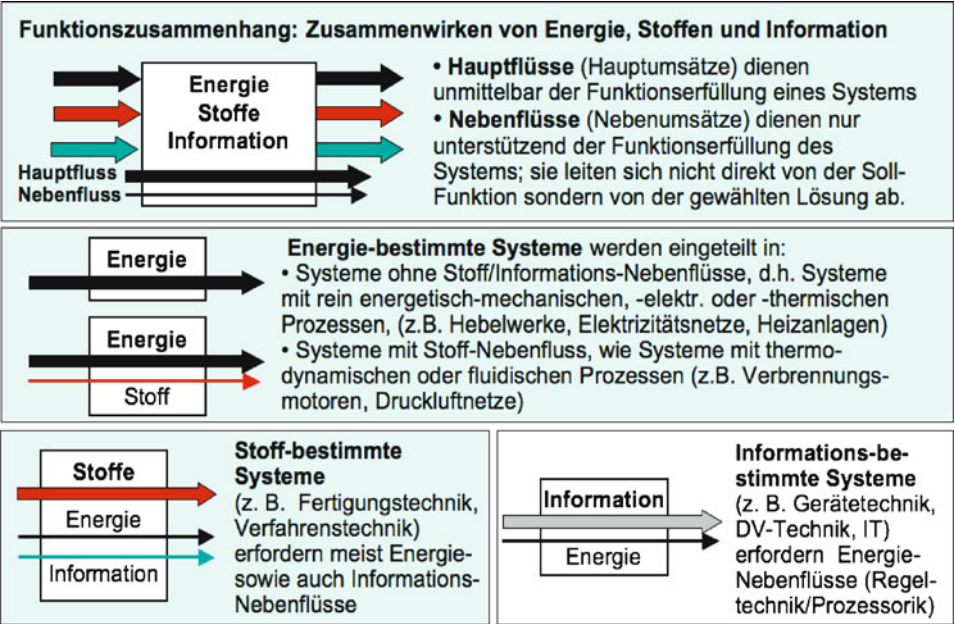
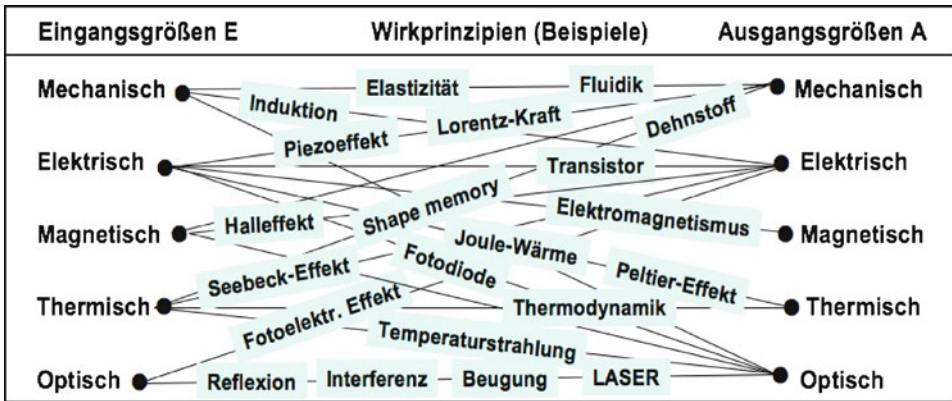


Abb. 3.25 Funktionszusammenhang: Haupt- und Nebenflüsse nach kybernetischen Kategorien





**Abb. 3.26** Wirkprinzipien für die Umwandlung von Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen

Der Funktionszusammenhang mechatronischer Systeme beinhaltet stets ein Zusammenwirken von Energie, Stoffen, Information und ihrer funktionellen Variablen entsprechend der allgemeinen Übersicht von Abb. 3.25.

### 3.6.3 Wirkzusammenhang

Der zweite Schritt bei der Gestaltung eines mechatronischen Systems besteht darin, die im ersten Schritt festgelegten Teilfunktionen des Funktionszusammenhangs durch Wirkzusammenhänge, d. h. physikalisch-technische Effekte und deren geometrisch-stoffliche Merkmale zu realisieren. Abbildung 3.26 nennt Beispiele von Wirkprinzipien.

Wirkprinzipien können gemäß Abb. 3.27 nach der physikalischen Natur ihrer Eingangs- und Ausgangsgrößen in *Übertrager-* und *Wandlerprinzipien* eingeteilt werden. Besonders wichtige Wandler sind Sensoren und Aktoren (vgl. Kap. 5 und 6).

Die abstrakte Beschreibung des *Funktionszusammenhangs* und des *Wirkzusammenhangs* wird in Abb. 3.28 exemplarisch am Beispiel der Positionierung eines Radarspiegels konkretisiert (Detaildarstellung: siehe Abb. 4.13 und 4.14).

### 3.6.4 Bauzusammenhang

Im dritten Gestaltungsschritt ist der Bauzusammenhang, d. h. die konstruktive Struktur des Systems festzulegen. Abbildung 3.29 gibt dazu eine allgemeine Übersicht. Mechanische Bauelemente müssen die strukturmechanische Funktionalität gewährleisten und Aufgaben der Kinematik, Kinetik und Dynamik realisieren (vgl. Abschn. 3.2). Elektronische, magnetische, thermische und optische Bauelemente sind aufgabengerecht für die nicht-mechanischen Teilfunktionen des Funktionszusammenhangs auszuliegen.

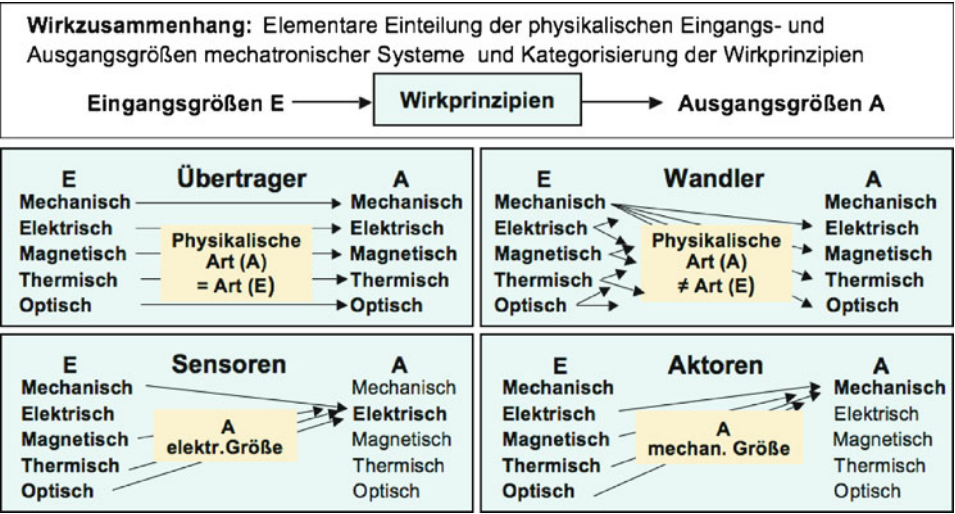


Abb. 3.27 Übersicht über die Klassifikation von Wirkprinzipien und ihre technische Realisierung

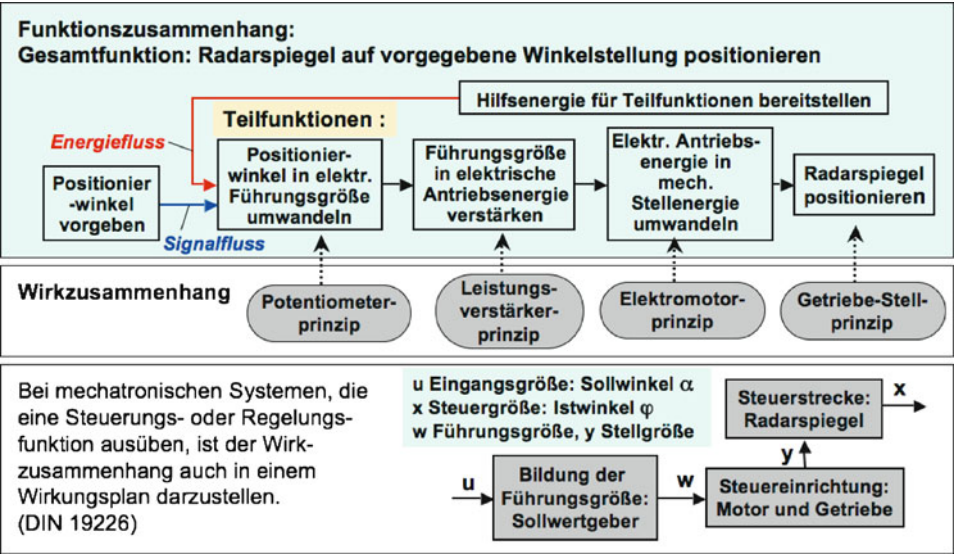
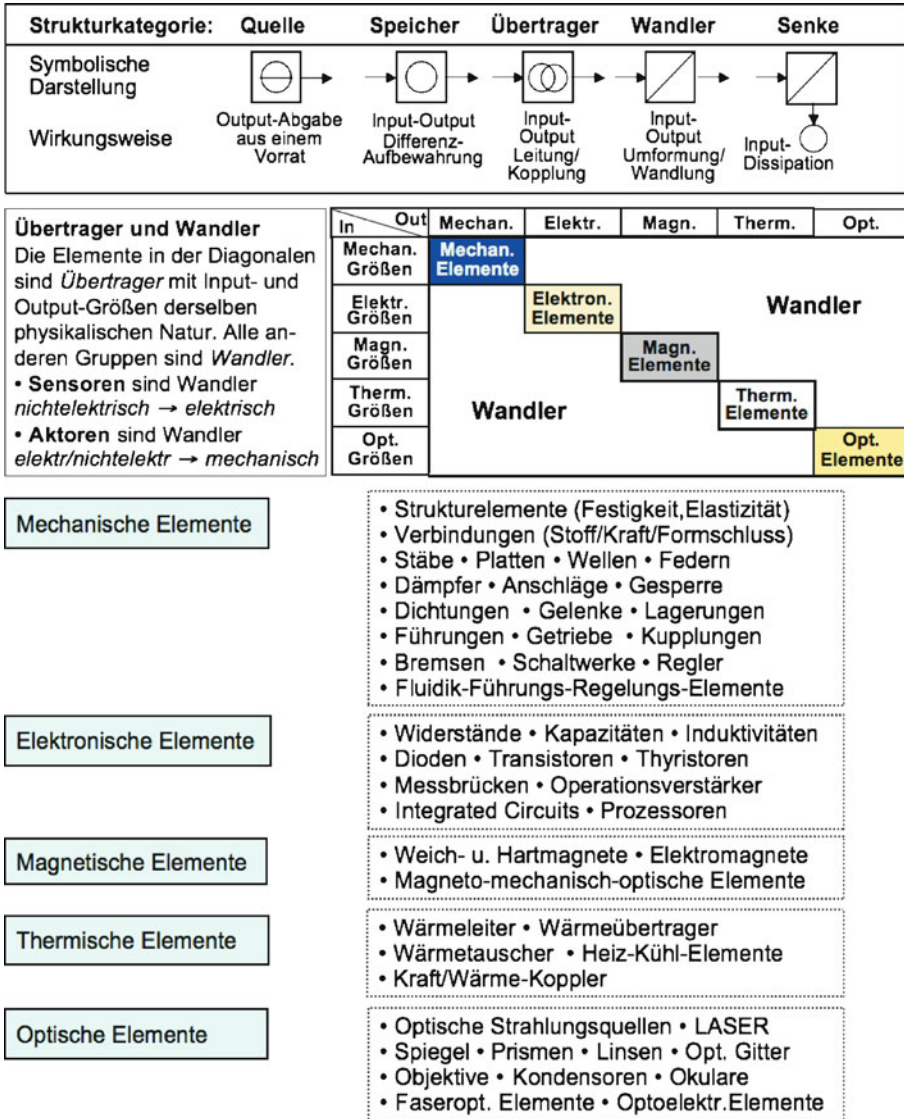


Abb. 3.28 Funktionszusammenhang und Wirkzusammenhang: technisches Beispiel

**Werkstoffe für die Bauteile technischer Systeme**

Für die Bauteile technischer Systeme werden Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen benötigt. Bei *Strukturwerkstoffen* stehen die mechanisch-thermischen Eigenschaften wie z. B. Festigkeit, Korrosions- und Verschleißbeständigkeit, im Vordergrund. *Funktionswerkstoffe* sind Materialien, die besondere funktionelle Eigenschaften,



**Abb. 3.29** Module und Elemente für die Gestaltung des Bauzusammenhangs

z. B. physikalischer und chemischer Art, für technische Bauteile, wie optische Gläser, Halbleiter, Magnetwerkstoffe, nutzen. Grunderfordernis für die technische Funktion ist, dass Festigkeit und Beständigkeit der Bauteile qualitativ und quantitativ äußeren Beanspruchungen (mechanisch, tribologisch, thermisch, elektrochemisch, elektromagnetisch, biologisch) widerstehen, damit die technische Funktion erfüllt ist und kein Versagen auf-



tritt. Für die Bauteile technischer Systeme werden „Ingenieurwerkstoffe“ aus folgenden Materialklassen verwendet:

- *Naturstoffe*: Bei den als Werkstoff verwendeten Naturstoffen wird unterschieden zwischen mineralischen Naturstoffen (z. B. Marmor, Granit, Sandstein; Glimmer, Saphir, Rubin, Diamant) und organischen Naturstoffen (z. B. Holz, Kautschuk, Naturfasern). Die Eigenschaften vieler mineralischer Naturstoffe, z. B. hohe Härte und gute chemische Beständigkeit, werden geprägt durch starke Hauptvalenzbindungen und stabile Kristallgitterstrukturen. Die organischen Naturstoffe weisen meist komplexe Strukturen mit richtungsabhängigen Eigenschaften auf.
- *Metalle*: Sie besitzen eine Mikrostruktur mit frei beweglichen Elektronen (*Elektronengas*). Die Atomrümpfe werden durch das Elektronengas zusammengehalten. Die freien Valenzelektronen des Elektronengases sind die Ursache für die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie den Glanz der Metalle. Die metallische Bindung – als Wechselwirkung zwischen der Gesamtheit der Atomrümpfe und dem Elektronengas – wird durch eine Verschiebung der Atomrümpfe nicht wesentlich beeinflusst. Hierauf beruht die gute Verformbarkeit der Metalle. Die Metalle bilden in der Technik die wichtigste Gruppe der Konstruktions- oder Strukturwerkstoffe, bei denen es vor allem auf die mechanischen Eigenschaften ankommt.
- *Halbleiter*: Eine Übergangsstellung zwischen den Metallen und den anorganisch-nichtmetallischen Stoffen nehmen die Halbleiter ein. Ihre wichtigsten Vertreter sind die Elemente Silizium und Germanium mit kovalenter Bindung und Diamantstruktur sowie die ähnlich aufgebauten Halbleiter Galliumarsenid (GaAs) und Indiumantimonid (InSb). In den am absoluten Nullpunkt nichtleitenden Halbleitern können durch thermische Energie oder durch Dotierung mit Fremdatomen einzelne Bindungselektronen freigesetzt werden und als Leitungselektronen zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Halbleiter stellen wichtige Funktionswerkstoffe für die Elektronik dar.
- *Anorganisch-nichtmetallische Stoffe*: Die Atome werden durch kovalente Bindung und Ionenbindung zusammengehalten. Aufgrund fehlender freier Valenzelektronen sind sie grundsätzlich schlechte Leiter für Elektrizität und Wärme. Da die Bindungsenergien erheblich höher sind als bei der metallischen Bindung, zeichnen sich anorganisch-nichtmetallische Stoffe, wie z. B. Keramik, durch hohe Härten und Schmelztemperaturen aus. Eine plastische Verformung wie bei Metallen ist analog nicht begründbar, da bereits bei der Verschiebung der atomaren Bestandteile um einen Gitterabstand theoretisch eine Kation-Anion-Bindung in eine Kation-Kation- oder Anion-Anion-Abstoßung umgewandelt der eine gerichtete kovalente Bindung aufgebrochen werden muss.
- *Organische Stoffe*: Organische Stoffe, deren technisch wichtigste Vertreter die Polymerwerkstoffe sind, bestehen aus Makromolekülen, die im Allgemeinen Kohlenstoff in kovalenter Bindung mit sich selbst und einigen Elementen niedriger Ordnungszahl enthalten. Deren Kettenmoleküle sind untereinander durch (schwache) zwischenmolekulare Bindungen verknüpft, woraus niedrige Schmelztemperaturen resultieren

(Thermoplaste). Sie können auch chemisch miteinander vernetzt sein und sind dann unlöslich und unschmelzbar (Elastomere, Duroplaste).

- *Verbundwerkstoffe*: Sie werden mit dem Ziel, Struktur- oder Funktionswerkstoffe mit besonderen Eigenschaften zu erhalten, als Kombination mehrerer Phasen oder Werkstoffkomponenten in bestimmter geometrisch abgrenzbarer Form aufgebaut, z. B. in Form von Dispersionen oder Faserverbundwerkstoffen.

### Gestaltung des Bauzusammenhangs

Für die Gestaltung des Bauzusammenhangs gelten die bekannten konstruktiven Grundregeln *Eindeutigkeit, Einfachheit, Sicherheit* mit den Stichworten:

- *beanspruchungsgerecht* (Statik, Dynamik, Korrosion, Verschleiß),
- *formgebungsgerecht*,
- *fertigungsgerecht*,
- *verbindungsgerecht* (Passungen),
- *normgerecht*,
- *ergonomiegerecht*,
- *transport- und verpackungsgerecht*,
- *recyclinggerecht*.

Bei der Planung und Konstruktion des Bauzusammenhangs ist zu beachten, dass eine vorgegebene Funktion durch unterschiedliche Wirkzusammenhänge realisiert werden kann. Ein für einen ganzen Wirtschaftszweig wichtiges Beispiel zeigt Abb. 3.30.

### 3.6.5 Systemzusammenhang

Der vierte Schritt zur Gestaltung mechatronischer Systeme betrifft Systemzusammenhang, Optimierung und Qualitätsmanagement des Gesamtsystems, Abb. 3.31.

Die Kennzeichnung des Systemzusammenhangs nach Abb. 3.24 macht deutlich, dass Anwendung und Gebrauch technischer Systeme die Beachtung von Mensch/System/-Umwelt-Wechselwirkungen (*Anthropotechnik*) erfordern. Die Methoden und Einrichtungen für das gezielte Einwirken des Menschen auf technische Prozesse sind in DIN 19222 *Leittechnik* zusammengestellt. Abbildung 3.32 gibt dazu eine allgemeine Übersicht.

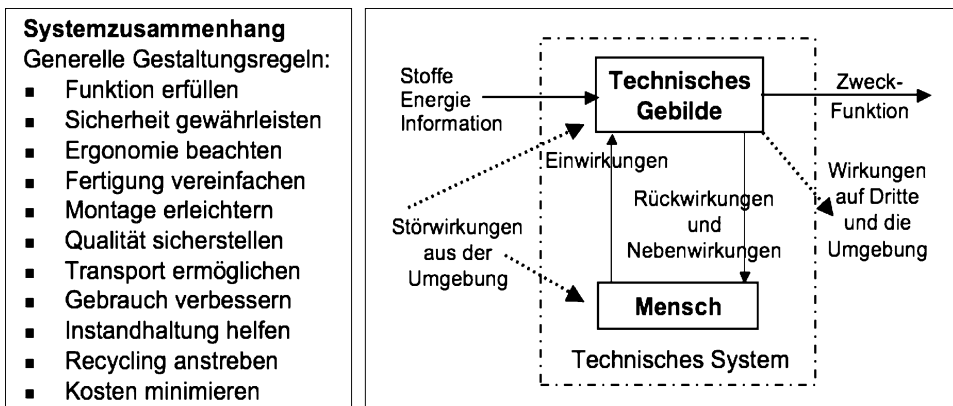
---

## 3.7 Entwicklungsmethodik Mechatronik

Für die Gestaltung mechatronischer Systeme sind infolge des funktionell erforderlichen interdisziplinären Zusammenwirkens von Mechanik, Elektronik und Informatik folgende Aspekte der Entwicklungsmethodik zu betonen:

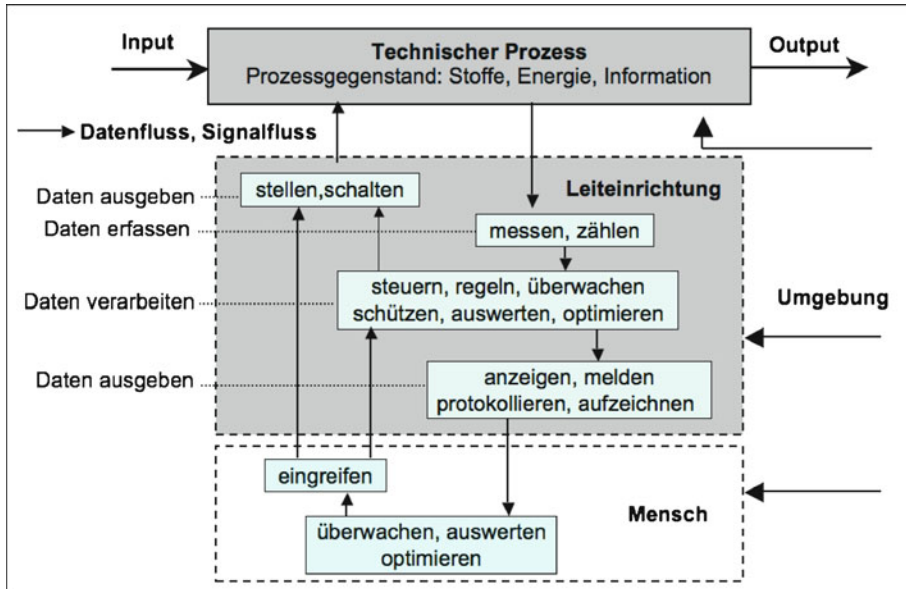


**Abb. 3.30** Funktionszusammenhang und unterschiedliche Wirkzusammenhänge, Beispiel



**Abb. 3.31** Generelle Aspekte der Gestaltung des Systemzusammenhangs

- *Auslegungskonzeption:* Die Auslegung eines mechatronischen Systems geht von der zu erfüllenden Funktion unter Berücksichtigung energetischer Aspekte der Wandlung mechanischer, elektrischer, thermischer oder chemischer Energie in die benötigte Energieform aus. Dem schließt sich die funktionelle Verknüpfung der Informationsflüsse durch analoge Komponenten oder Mikrorechner sowie die Entwicklung von Kontrollalgorithmen an.
- *Systemaufbau:* Die systemtechnisch basierte konstruktive Gestaltung der Systemstruktur hat bereits im Entwicklungsprozess die interdisziplinäre Verknüpfung mechani-



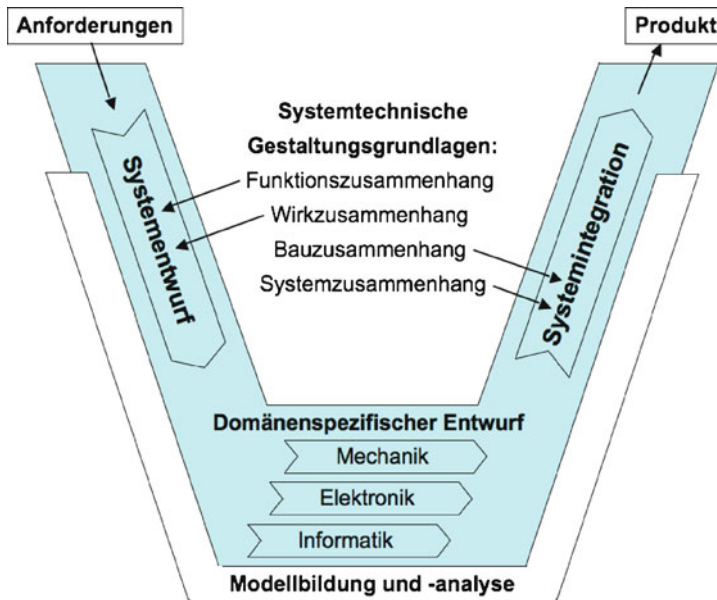
**Abb. 3.32** Leittechnik: Prozessführung technischer Systeme durch den Menschen

scher mit elektronischen und anderen funktionellen Baugruppen und deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen, so dass diese Module eine funktionelle Einheit bilden. Steuerung und Regelung des Energieflusses sowie des Gesamtprozesses müssen auf Grund der Komplexität technischer Systeme eine hohe Flexibilität aufweisen. Dies erfordert, dass die messtechnische Erfassung von Prozess- und Störgrößen möglichst vollständig durch Sensoren gesichert ist sowie eine intelligente Informationsverarbeitung erfolgt.

- **Systemoptimierung:** Das methodische Vorgehen der Mechatronik beim Systementwurf beruht auf der gleichzeitigen Optimierung und gegenseitigen Abstimmung der Systemmodule, um statt der bloßen Addition von Einzelfunktionen durch gezielte Verlagerung von Teilaufgaben in funktionell optimierte Systemkomponenten verbesserte Eigenschaften des Gesamtsystems zu erzielen. Wesentlich für die Gestaltung mechatronischer Systeme ist die Einbeziehung von Informatik-Komponenten, die anhand von Messdaten, z. B. Energiefluss, Aktorzustand, Prozessdaten, mittels geeigneter Software durch Steuerung von Aktoren eine flexible und intelligente Anpassung an die bestimmungsgemäße Funktion des mechatronischen Systems ermöglichen.

### Entwicklungskonzeption

Die logische Abfolge der wesentlichen Teilschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme kann durch das aus der Softwareentwicklung übernommene *V-Modell* dargestellt werden (VDI-Richtlinie 2206 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*). Die



**Abb. 3.33** Modell der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (V-Modell)

Grundzüge der Entwicklungsmethodik sind in Abb. 3.33 dargestellt, einbezogen wurden die im vorhergehenden Abschnitt behandelten vier konzeptionellen Teilschritte der systemtechnischen Gestaltungsgrundlagen (vgl. Abb. 3.23).

Die in Abb. 3.33 skizzierte Entwicklungsmethodik kennzeichnet das systematische, fallweise aufgabenspezifisch zu modifizierende Vorgehen, das von den Anforderungen zu der Konkretisierung eines mechatronischen Systems (Produkt) führt.

- *Anforderungen*: Ausgangspunkt bildet ein konkreter Entwicklungsauftrag. Die Aufgabenstellung wurde präzisiert und in Form von Anforderungen beschrieben. Diese Anforderungen bilden zugleich den Maßstab, anhand dessen das spätere Produkt zu bewerten ist.
- *Systementwurf*: Ziel ist die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzepts, das unter den Gesichtspunkten des Funktionszusammenhangs und des Wirkzusammenhangs die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beschreibt. Hierzu wird die Gesamtfunktion eines Systems in wesentliche Teilfunktionen zerlegt (siehe Abb. 3.24 und 3.25). Diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zugeordnet (siehe Abb. 3.26 und 3.27), und die Funktionserfüllung wird im Systemzusammenhang geprüft.
- *Domänenspezifischer Entwurf*: Auf der Basis des Systementwurfs mit Funktionszusammenhang und Wirkzusammenhang erfolgt die weitere Konkretisierung meist getrennt in den beteiligten hauptsächlichen Domänen. Grundlegende Aspekte der Mecha-

nik, Elektronik und Informatik in mechatronischen Systemen wurden übersichtsmäßig in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 zusammengestellt. Detaillierte Auslegungen und Berechnungen sind nötig, um insbesondere bei kritischen Funktionen die Funktionserfüllung sicherzustellen.

- *Systemintegration*: Die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen werden unter Realisierung des Bauzusammenhangs (siehe Abb. 3.29) und des Systemzusammenhangs (siehe Abb. 3.31) integriert und systemische Eigenschaftsabsicherungen (Verifikation, Validierung) vorgenommen. Hauptsächliche Integrationsarten:
  - *Integration verteilter Komponenten*: Komponenten wie Aktoren, Sensoren und Leistungsstellglieder werden über Signal- und Energieflüsse miteinander verbunden. Die Verarbeitung der Energieflüsse erfolgt mit Hilfe von Verkabelung und Steckverbinder, die der Signale über Kommunikationssysteme (z. B. Sensor-Aktor-Bus, Feldbus etc.), siehe Abschn. 6.6 *Sensor-Aktor-Prozessorik*.
  - *Räumliche Integration*: Die Komponenten werden räumlich integriert und bilden eine komplexe Funktionseinheit, z. B. Integration der Elemente eines Positionierungssystems in einem Gehäuse (Sollwertgeber, Regler, Leistungsverstärker, Motor, Getriebe, Winkelsensor, Stellachse, siehe das Beispiel in Abb. 4.14). Unerwünschte Wechselwirkungen infolge hoher Integrationsdichte (Erwärmung, Streufelder, Spannungsspitzen) sind zu berücksichtigen und elektronische Komponenten an das Einsatzumfeld (Temperatur, Feuchte, Schwingungen) anzupassen; ggf. sind zusätzliche Maßnahmen (Kapselung, Kühlung) erforderlich, um System-Funktion, -Zuverlässigkeit und -Sicherheit zu gewährleisten.
- *Integration von Produkt und Produktionssystem*: Die für den Produktentwurf gültige Integrationsforderung muss auch an den Entwurf von Produktionssystemen gestellt werden, dies bedingt u. a.:
  - Fertigungs- und Montageprozesse, mit denen mechanische, elektronische und informationstechnische Komponenten systemisch integriert werden. Mechatronische Produktionstechnologien sind daher in analoger Weise wie mechatronische Produkte durch zahlreiche Schnittstellen und Wechselwirkungen geprägt und müssen frühzeitig in die Entwurfsphasen von Abb. 3.23 einbezogen werden.
  - Die funktionale und räumliche Integration der Komponenten im Produkt erfordert auch eine integrierte, die mechanischen, elektrischen und die anderen funktionellen Eigenschaften einbeziehende Prüftechnik nach der Montage. Diese Form der mechatronischen Qualitätssicherung hat für die Erschließung der wirtschaftlichen Potenziale mechatronischer Produkte eine hohe Bedeutung.

### Entwicklungswerkzeuge

Der Entwurf mechatronischer Systeme gemäß Abb. 3.33 erfordert den Einsatz vielfältiger Entwicklungswerkzeuge, die sich in folgende Hauptklassen gliedern lassen:

- *Anforderungsbeschreibung*: Die Anforderungen an das zu entwickelnde System werden in Form von Forderungen und Wünschen konkretisiert und in der Anforderungs-

liste bzw. im Lastenheft meist in textueller Form und in Checklisten dokumentiert (Anforderungsmanagement, Requirement Engineering).

- *Funktionsmodellierung*: Ziel der Funktionsmodellierung ist es, die Entwurfsaufgabe auf lösungsneutraler Ebene zu formulieren und in einer Funktionsarchitektur darzustellen, siehe Abb. 3.24 und 3.25. Mit „Systems-Engineering-Werkzeugen“ – z. B. *MATLAB/SIMULINK* mit regelungstechnischen Blockschaltbildsystemen – werden Soll- und Fehlverhalten analysiert und spezifiziert sowie Untersuchungen zur Kompatibilität von Funktionen und Einflussanalysen durchgeführt.
- *CAD-Werkzeuge*: CAD-Systeme ermöglichen die Modellierung der Gestalt des zukünftigen Produkts. Durch die Auswahl geeigneter Wirkprinzipien und Lösungselemente sowie die Bestimmung der Geometrie-, Technologie- und Werkstoffparameter wird die Gestalt zunehmend konkretisiert (Grobdimensionierung). Hierfür stellt das CAD-System Abmessungen und ableitbare Größen zur Verfügung. Ergebnis des domänenspezifischen Entwurfs ist ein vollständiges CAD-Modell des Produkts und seiner Komponenten, das neben geometrischen Informationen (Abmessungen, Toleranzen etc.) auch Strukturinformationen (Baustruktur, Stücklisten) und Fertigungsinformationen umfasst.
- *FEM-Werkzeuge*: Für detaillierte Analysen von Feldproblemen im Bereich der Strukturmechanik und Strukturdynamik, Elektromagnetik, Fluidodynamik, Akustik oder von Temperaturfeldern kommt die Finite Elemente Methode (FEM) zum Einsatz. Dazu wird das betrachtete Kontinuum durch eine endliche (finite) Anzahl kleiner Elemente diskretisiert. Untersucht werden kann beispielsweise, wie sich ein Bauteil unter statischer Last verformt und wo Spannungen auftreten (z. B. zum Festigkeitsnachweis); aber auch Analysen dynamischer und nichtlinearer Vorgänge können durchgeführt werden (z. B. Schwingungsanalyse, Crash-Analyse).
- *MKS-Werkzeuge*: Die Simulation von Mehrkörpersystemen (MKS) wird eingesetzt, um das Bewegungsverhalten komplexer Systeme zu untersuchen, die aus einer Vielzahl gekoppelter beweglicher Teile bestehen. Das Anwendungsspektrum reicht von der Überprüfung des Bewegungsverhaltens einzelner, aus wenigen Bauteilen bestehender Baugruppen über die Identifikation von Kollisionsproblemen durch Bauteilbewegungen bis hin zum Bewegungsverhalten eines Gesamtsystems. Ferner können mittels MKS-Simulation Kräfte und Momente bestimmt werden, die durch Bewegungen auf das System einwirken.

Sobald bei einer Mechatronik-Entwicklung Systementwurf und zugehörige Komponentenentwürfe vorliegen, wird zur Verifikation bzw. Validierung eine HIL (Hardware-in-the-loop) Umgebung aufgebaut, die der zu testenden Komponente bzw. dem zu testenden System die reale Umgebung durch eine Echtzeitsimulation simuliert. Die *Embedded Software* – eingeteilt in Betriebssystemsoftware (wie Laufzeitsteuerung und Hardwaretreiber) und Anwendersoftware – bestimmt die Funktionen der durch Mikroprozessoren gesteuerten Systemmodule, mit denen die im folgenden Kapitel behandelte Regelung und Steuerung mechatronischer Systeme durchgeführt wird.



Die Wissenschaftsgebiete *Regelung* und *Steuerung* sind heute Teilgebiete der *Kybernetik*, einer formalen fachübergreifenden Wissenschaft, die sich mit der mathematischen Beschreibung und modellartigen Erklärung dynamischer (komplexer) Systeme befasst und damit auch von grundlegender Bedeutung für die Mechatronik ist. Im Hinblick auf technische Anwendungen können die Regelungstechnik und die Steuerungstechnik in einer allgemeinen Übersicht wie folgt beschrieben werden:

## Regelung

- Die Regelungstechnik hat die Aufgabe, in technischen Systemen funktionelle Größen (Regelgrößen) trotz des Einflusses äußerer Störungen (Störgrößen) konstant zu halten oder den zeitlichen Verlauf vorgegebener Sollgrößen (Führungsgrößen) möglichst genau nachzuführen.
- Die Regelungstechnik arbeitet mit dem Prinzip der Rückführung (*feed-back*), wofür die Prozess- und Störgrößen durch *Sensoren* zu erfassen sind.
- Die Regelungstechnik führt die Vielfalt geregelter technischer Systeme auf die Grundform des Regelkreises mit zwei Baugliedern zurück:
  - die *Regelstrecke*, die von der vorgegebenen technischen Anlage gebildet wird, und
  - den *Regler*, der das Zeitverhalten der Strecke kontrolliert und auf sie korrigierend einwirkt.
- Bindeglied zwischen Regler und Regelstrecke ist das *Stellglied* (*Aktor*), das je nach Steuersignal unmittelbar den zu regulierenden Stoff-, Energie- oder Informationsstrom beeinflusst.

## Steuerung

- Die Steuerungstechnik hat die Aufgabe, Ausgangsgrößen technischer Systeme entsprechend vorgegebenen Eingangsgrößen zu beeinflussen.



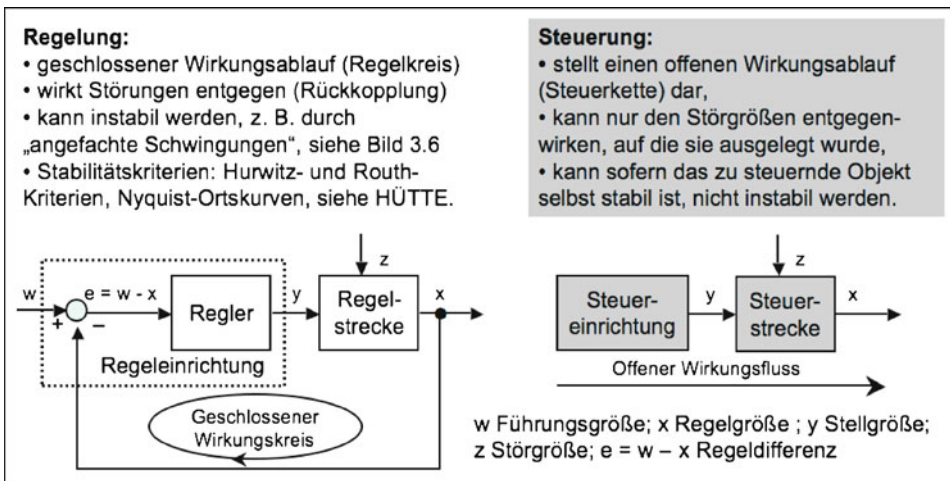
- Im Unterschied zur Regelung (Regelungstechnik) ist der Wirkungsweg nicht in sich geschlossen, das heißt, der Erfolg des Steuerns wird nicht durch Rückkopplung zurückgeführt.
- Steuerungen lassen sich unterscheiden nach
  - Signalart: analoge, digitale, binäre Steuerung,
  - Hilfsenergie der Steuereinrichtung: pneumatisch, hydraulisch, elektrisch,
  - zu steuernder Größe: Mengensteuerung, Drehzahlsteuerung,
  - Stellglied-Bauelementen: z. B. Transistor-, Relais-, Ventilsteuerung,
  - Steuerungsprozess-Führungsweise: Folge- und Programmsteuerung.
- Bei der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) sind die Steuerungsfunktionen als Programme in einem Speicher enthalten; die Programmabarbeitung erfolgt mittels elektronischer Schaltungen.

## 4.1 Prinzipien der Regelung und Steuerung

Die einleitend beschriebenen Merkmale der Regelungstechnik und Steuerungstechnik sowie ihre Unterschiede sind in Abb. 4.1 in einer vergleichenden Übersicht dargestellt.

Die Signalflüsse der Regelungs- und Steuerungstechnik werden in Blockschaltbildern dargestellt, die als *Signalflusspläne* oder *Wirkungspläne* (DIN 19 226) bezeichnet werden. Abbildung 4.2 zeigt die *Wirkungspläne* der Regelung und der Steuerung und Abb. 4.3 gibt eine Übersicht über die in Blockschaltbildern verwendeten Symbole.

Die Prinzipien der Steuerung und der Regelung sind in Abb. 4.4 am Beispiel einer Temperatursteuerung und einer Temperaturregelung illustriert.



**Abb. 4.1** Die elementaren Merkmale und Unterschiede der Regelung und Steuerung

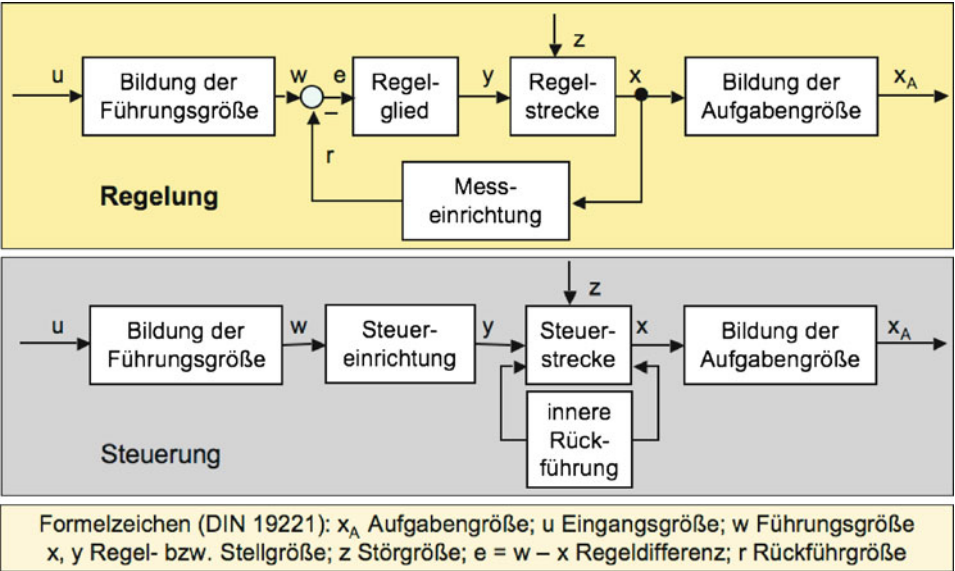


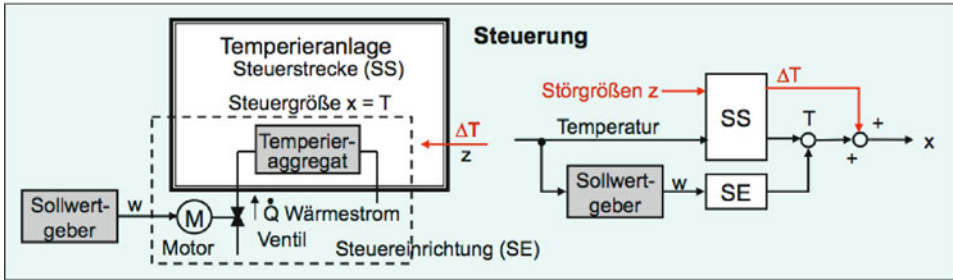
Abb. 4.2 Wirkungspläne der Regelung und Steuerung technischer Systeme

Benennung	Symbol	Mathematische Operation
Verzweigungspunkt		$X_3 = X_2 = X_1$
Summenpunkt		$X_3 = X_1 \pm X_2$
Multiplikationsstelle		$X_3 = X_1 \cdot X_2$
Divisionsstelle		$X_3 = X_1 / X_2$
Lineare Operation		$X_2 = L (X_1)$
Nichtlineare Operation		$X_2 = N (X_1)$

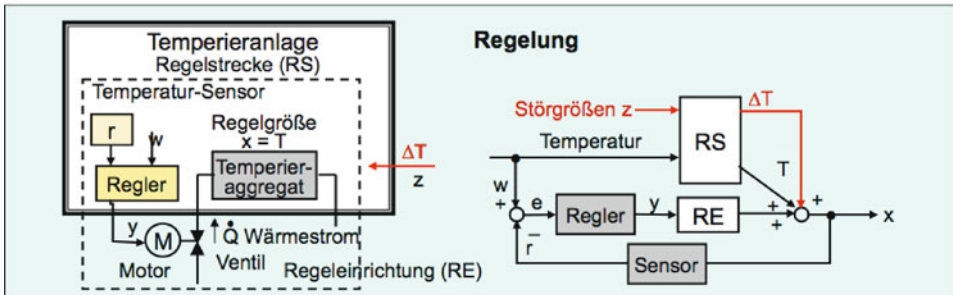
Abb. 4.3 Signalverknüpfungen und Symbole in Blockschaltdarstellungen

Das Prinzip der Steuerung ist in Abb. 4.4a dargestellt. Steuergröße ist die Temperatur  $T$ . Sie wird an einem Sollwertgeber voreingestellt. Die Steuereinrichtung führt über einen Motor und ein Ventil den zum Erreichen der vorgegebenen Temperatur erforderlichen Wärmestrom dem Temperaturaggregat gemäß der Wärmestrom/Temperatur-Kennlinie zu. Wie aus dem Blockschaltdbild hervorgeht, wird die Temperatur  $T$  nur durch die Sollwertvorgabe gesteuert. Äußere Störgrößen, z. B. durch Öffnen eines Fensters oder durch starke Sonneneinstrahlung können nicht berücksichtigt werden.

a



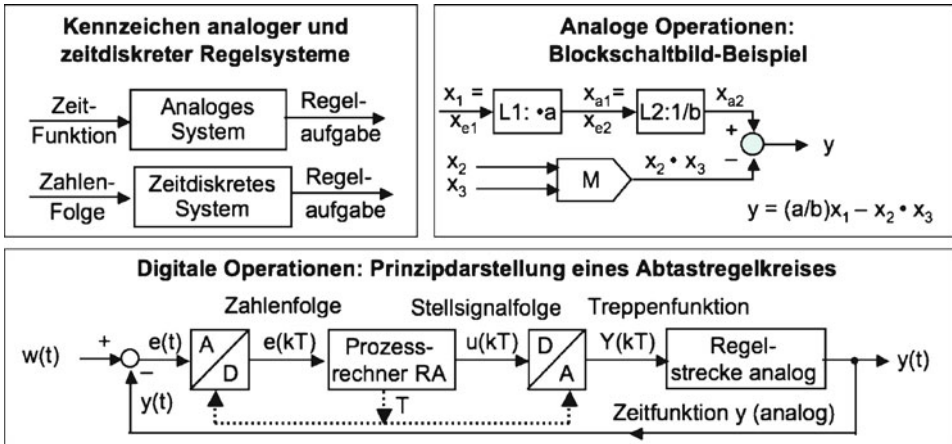
b



**Abb. 4.4** Steuerung (a) und Regelung (b): Anwendungsbeispiel

Das Prinzip der Regelung illustriert Abb. 4.4b. Hier wird die Ist-Temperatur mit einem Sensor gemessen und mit dem eingestellten Temperatur-Sollwert verglichen. Weicht der Istwert vom Sollwert ab, wird über einen Regler, der die Abweichung verarbeitet, der Wärmestrom verändert. Sämtliche Störungen  $\Delta T$  werden vom Regler berücksichtigt und möglichst beseitigt. Anhand der Blockschaltbilder erkennt man wiederum den offenen der Steuerung (Steuerkette) und den geschlossenen Wirkungsablauf der Regelung (Regelkreis).

Regeltechnische Systeme können mit *analogen* und *diskreten* Signalfüssen arbeiten. Die elementaren Kennzeichen analoger und zeitdiskreter Systeme zeigt Abb. 4.5. Die Prinzipdarstellung analoger Operationen illustriert das Blockschaltbild-Beispiel. Bei einer digitalen Regelung (DDC direct digital control) werden analoge Werte der Regeldifferenz  $e = w - y$  periodisch (Abtastzeit  $T$ ) in digitale Werte einer Zahlenfolge  $e(kT)$  umgewandelt. Der Prozessrechner als Regler berechnet nach einem Regelalgorithmus (RA) die Folge der Stellsignalwerte  $u(kT)$  aus den Werten der Zahlenfolge  $e(kT)$ . Die berechneten diskreten Stellgrößen  $u(kT)$  werden vom DA-Umsetzer (Halteglied) in analoge Signale einer Treppenfunktion  $Y(kT)$  mit der Abtastperiode  $kT$  umgewandelt. Es resultiert eine *diskrete Systemdarstellung*, mit Zahlenfolgen-Signalen.



**Abb. 4.5** Beispiele regeltechnischer analoger und digitaler Operationen

## 4.2 Regelfunktionen und Regler-Module

Das funktionale Verhalten von Reglern ist mathematisch beschreibbar und normativ festgelegt. Die elementaren Regelfunktionen und Regler-Module zeigen die folgenden Abbildungen in Text-Bild-Graphik Kombinationen:

- Genormte Darstellungen der Regelungstechnik und Steuerungstechnik zeigt Abb. 4.6.
- Ausführungsbeispiele des einfachen P-Reglers sind in Abb. 4.7 dargestellt.
- Eine Übersicht über die elementaren Regler-Module (P, I, D, PID) gibt Abb. 4.8.

Der anwendungstechnisch wichtigste Regler ist der PID-Regler. Sein prinzipieller Aufbau ist in der Blockschaltbilddarstellung von Abb. 4.9 für eine Regelgröße  $x$  und eine Stellgröße  $y$  als Ausgangsgröße schematisch vereinfacht dargestellt. Die Eingangsgröße des PID-Reglers, die Regeldifferenz  $e = w - x$ , wird durch einen Vergleich von Führungsgröße  $w$  und Regelgröße  $x$  gebildet und in drei Zweige des Proportional-, Integral- und Differenzialanteils eingeleitet. Nach Durchführung der jeweiligen mathematischen Operationen resultiert durch Überlagerung die Stellgröße  $y$ .

Für technische Anwendungen gibt es Regler in folgenden Klassen:

- *Kompaktregler*, die über Regelalgorithmen, z. B. für Positions-, Druck- oder Temperaturregelung verfügen, wobei die Parameter meist durch Selbstoptimierung ermittelt und automatisch als Standardwerte übernommen werden.
- *Prozessregler*, die neben Regelalgorithmen auch mit anderen Funktionen, wie z. B. Visualisierung, ausgestattet sind und in die Bedienoberfläche eines Prozessleitsystems eingebunden werden können.

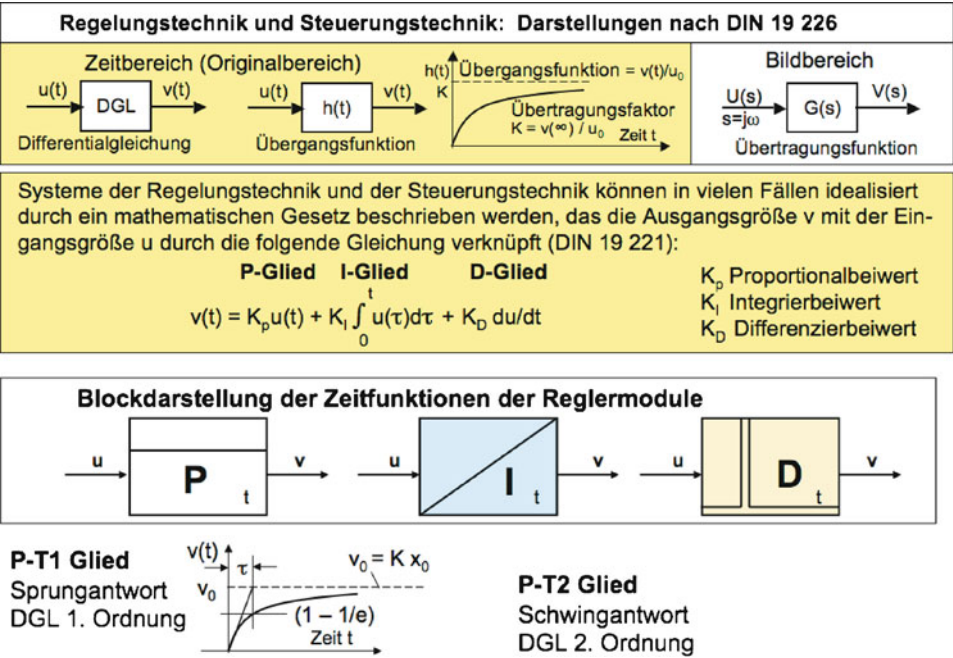


Abb. 4.6 Regelungstechnische Funktionen und Regler-Grundmodule

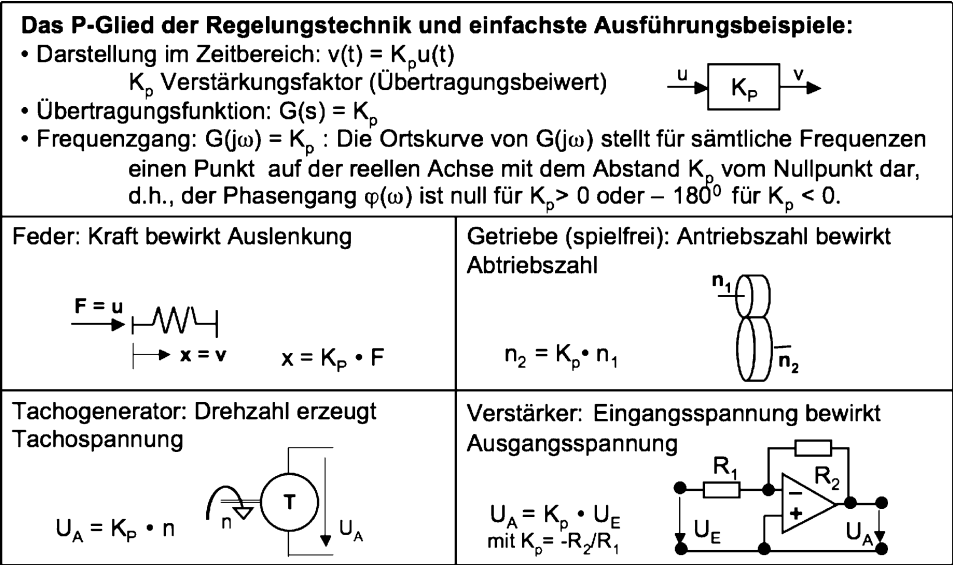
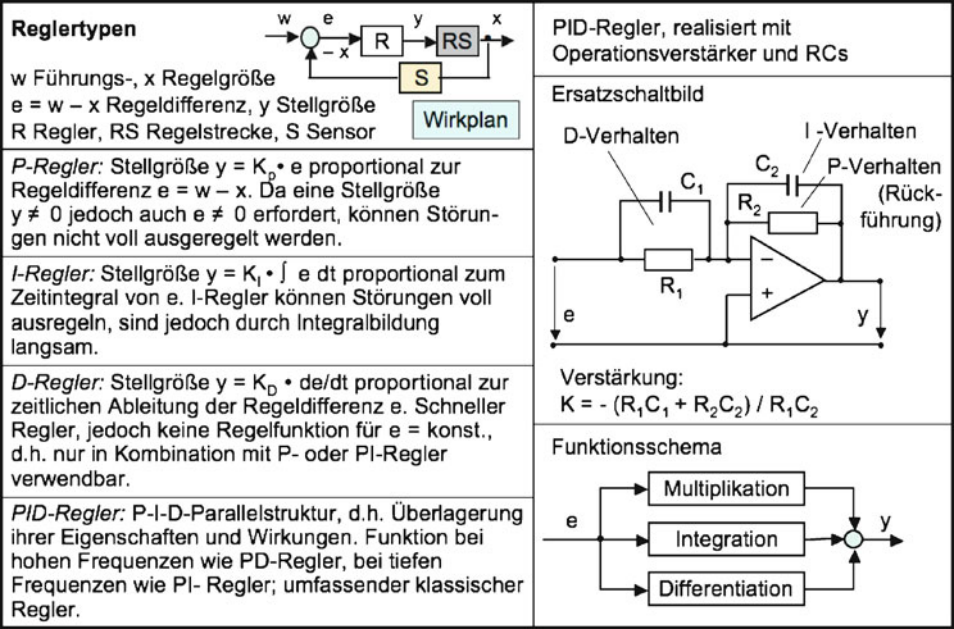
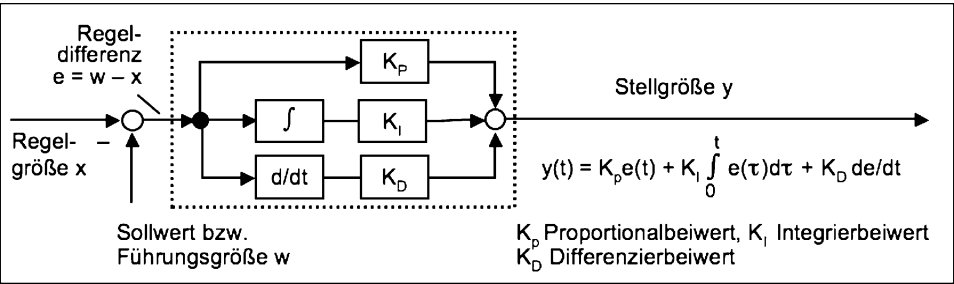


Abb. 4.7 Der einfache P-Regler: Kennzeichen und Realisierungsbeispiele für mechanische, elektromechanische und elektronische Module



**Abb. 4.8** Übersicht über die elementaren Reglertypen (P, I, D, PID) und ihre Kennzeichen



**Abb. 4.9** Blockschaltbilddarstellung eines PID-Reglers

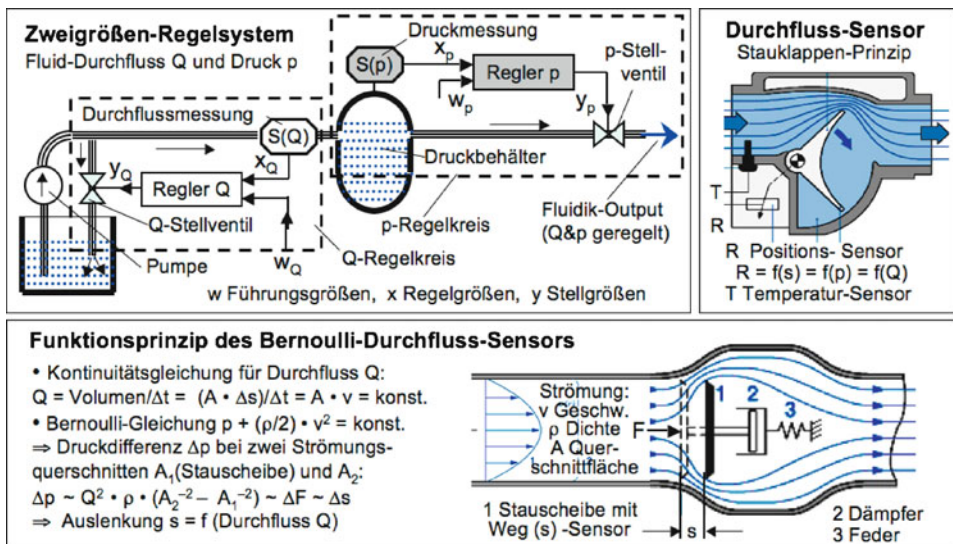
- *Universalregler*, die mit gleichen Funktionen wie Prozessregler ausgestattet sind.
- *Spezialregler*, die für einzelne Technik- oder Industriebereiche, wie z. B. Wägetechnik oder für spezielle Regelungsaufgaben, wie z. B. Motorregelung ausgelegt und optimiert sind.



### 4.3 Mehrgrößen-Regelung

In technischen Systemen sind häufig mehrere Größen zu regeln, die zugehörige Regelungstechnik wird als *Mehrgrößen-Regelung* bezeichnet. Ein Mehrgrößensystem (multivariable Regelstrecke) ist ein System mit mehreren Ausgangs- bzw. Regelgrößen, die jeweils von mehreren Eingangs- bzw. Stellgrößen beeinflusst werden.

Von besonderer Bedeutung bei der Mehrgrößenregelung sind Fragen der Stabilität, und zwar im Wesentlichen auf Grund der Kopplungen von Einzelregelkreisen. Derartige regelungstechnische Aufgaben treten häufig in der Verfahrenstechnik und in Fluidiksystemen auf. Dabei ist die *Durchflussmessung* z. B. in der verfahrenstechnischen Industrie eine wesentliche Grundlage der *Prozessautomatisierung*. Der Durchfluss eines Fluids in einer gefüllten Rohrleitung ist die durch den Querschnitt fließende Stoffmenge (Volumendurchfluss oder Massendurchfluss). Die Sensorik der Mehrgrößen-Regelung in der Fluidik basiert auf der Kontinuitätsgleichung für den Durchfluss und der Bernoulli-Gleichung. Abbildung 4.10 zeigt ein Zweigrößen-Regelsystem (Durchfluss- und Druckregelung) und das Funktionsprinzip eines Bernoulli-Durchflusssensors. Man erkennt dabei zwei Regelkreise, die durch die gekoppelten Regelstrecken miteinander verbunden sind.



**Abb. 4.10** Fluidik-Regelsystem: Beispiel einer Zwei-Größen-Regelung für Durchfluss und Druck



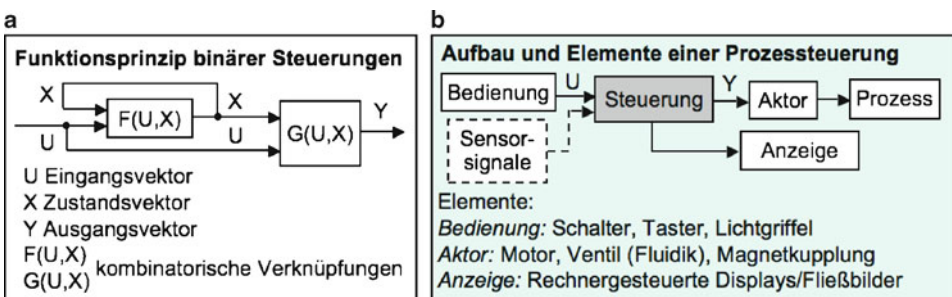
## 4.4 Binäre Steuerungstechnik

Die binäre Steuerungstechnik steuert technische Prozesse durch Binärsignale, Signale, die entweder den Zustand „0“ oder „1“ annehmen können und verarbeitet sie mit Verknüpfungs-, Zeit- und Speichergliedern zu binären Ausgangssignalen. Jede binäre Steuerung kann durch einen *Mealy-Automaten* beschrieben werden, Abb. 4.11a.

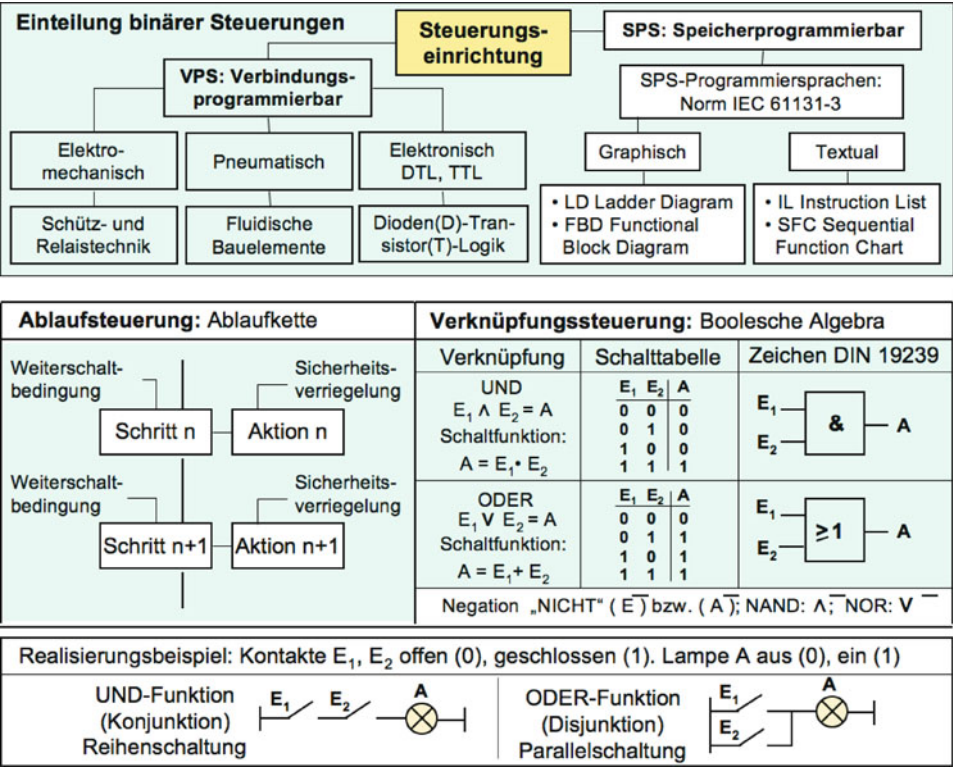
Bei diesem automatentheoretischen Modell resultiert der Ausgangsvektor  $Y$  aus dem Signal-Eingangsvektor  $U$  und den in der Steuerungseinrichtung gespeicherten Zuständen des Zustandsvektors  $X$ . Die Funktionen  $F(U,X)$  und  $G(U,X)$  stellen kombinatorische Verknüpfungen dar. Abbildung 4.11b zeigt den Aufbau und die Elemente einer binären Steuereinrichtung. Der Eingangsvektor setzt sich aus Signalen zusammen, die von den Bedienelementen erzeugt werden und den Signalen der den Prozess messtechnisch erfassenden Sensoren. Der Ausgangsvektor steuert die Anzeigeelemente und die Aktoren (Stellglieder) mit deren Hilfe der Prozess gesteuert wird.

Abbildung 4.12 gibt eine stichwortartige Übersicht über die Einteilung und die Funktion binärer Steuerungen. Theoretische Grundlagen sind die auf der Booleschen Aussagenlogik aufbauende Theorie der kombinatorischen Schaltungen und Modellvorstellungen der Automatentheorie sequentieller Schaltungen.

- *Verbindungsprogrammierbare Steuerungen* arbeiten elektromechanisch (z. B. Schütz- oder Relaisstechnik), pneumatisch (Fluidik) oder elektronisch.
- *Speicherprogrammierbare Steuerungen* realisieren Steuerfunktionen durch in Speichern abgelegte Programme. Eine normierte Plattform für die SPS-Programmiersprachen (meist Multitasking und Echtzeit-Software) ist IEC 61131-3.
- *Ablaufsteuerungen* folgen festgelegten schrittweisen Abläufen, bei dem jeder Schritt einen Aktionssteil und eine Weiterschaltbedingung enthält. Das Weiterschalten auf den nächsten Schritt erfolgt immer dann, wenn die aktuelle Weiterschaltbedingung erfüllt ist.
- *Verknüpfungssteuerungen* ordnen im Sinn boolescher Verknüpfungen den Signalzuständen von Eingangsgrößen, Zwischenspeichern und Zeitgliedern Zustandsbelegungen der Ausgangssignale zu.



**Abb. 4.11** Binäre Steuerungen: Funktionsprinzip (a) und Anwendungskonfiguration (b)



Steuerung

Die steuerungstechnische Realisierung des mechatronischen Systems zur Radarspiegelpositionierung zeigt Abb. 4.13. Nach der zu steuernden Größe handelt es sich um eine Drehwinkelsteuerung. Das System hat einen offenen Wirkungsablauf. Es ist stabil, kann aber Störeinflüssen (z. B. Windmomenten) nicht entgegenwirken. Blockschaltbildartig dargestellt und stichwortartig beschrieben sind alle Graphiken und Kenndaten, die dieses mechatronische System kennzeichnen:

- Funktion,
- Struktur,
- Wirkungsplan,
- Steuerdiagramm,
- Bauzusammenhang.

Regelung

Die regelungstechnische Lösung der Radarwinkelpositionierung ist in Abb. 4.14 dargestellt. Die Positionierung erfolgt in einem Regelkreis, dessen Stabilität mit geeigneten Kriterien zu prüfen ist. Der Unterschied zu der steuerungstechnischen Lösung besteht in der Einfügung eines Sensors und eines Reglers. Damit können die Ist/Soll-Positionen abgeglichen und Störgrößen „ausgeregelt“ werden. Der Vergleich von Steuerung und Regelung lässt die im Fall der Regelung aufwändigere Systemstruktur und den erweiterten Wirkungsplan erkennen.

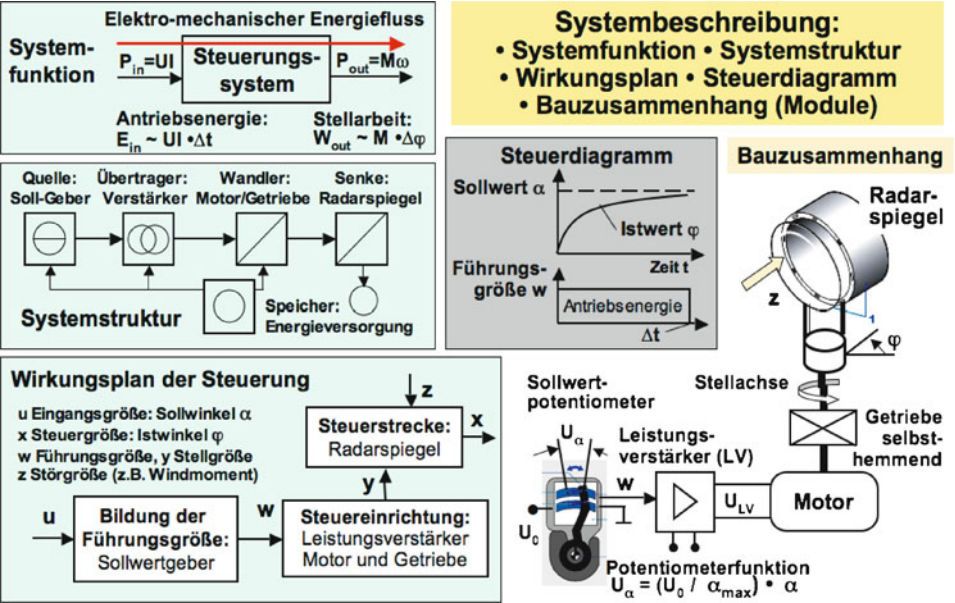
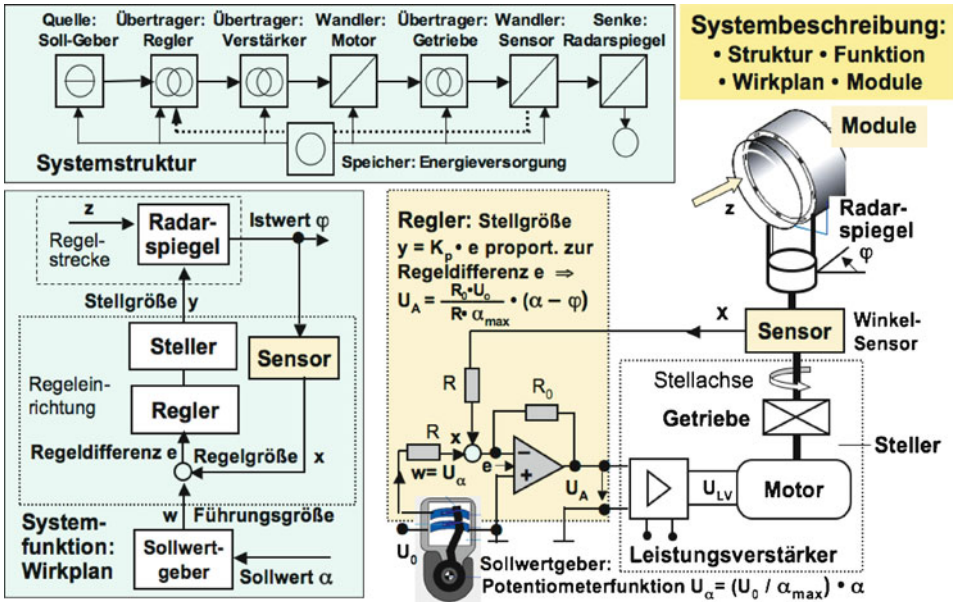
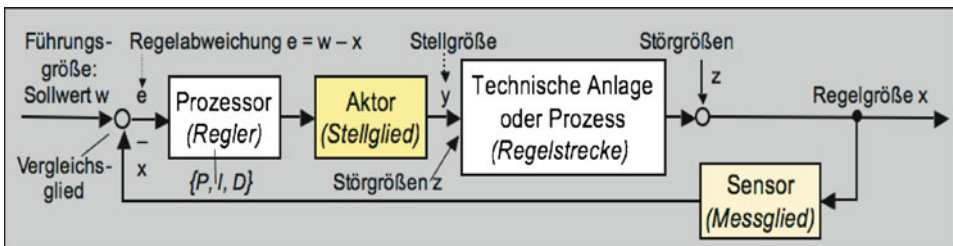


Abb. 4.13 Mechatronisches Steuerungs-System zur Radarspiegel-Positionierung



**Abb. 4.14** Mechatronisches Regelungs-System zur Radarspiegel-Positionierung



**Abb. 4.15** Regelkreis-Wirkplan der Mechatronik mit Sensorik und Aktorik

Grundlegende Erfordernisse für die Regelungstechnik mechatronischer Systeme sind

- Sensoren als Messglieder und
- Aktoren als Stellglieder.

Sie werden in den nächsten Kapiteln systematisch dargestellt. Den zusammenfassenden Wirkplan für die Regelungstechnik in der Mechatronik zeigt Abb. 4.15.

Messtechnik und Sensorik sind von grundlegender Bedeutung für alle technischen Produkte und Systeme: von der Entwicklung, der Konstruktion und der Fertigung bis hin zur Funktionsoptimierung und zum Qualitätsmanagement. Die *Messtechnik* liefert *Messdaten* für Werkstoffe, Bauteile, Konstruktionen und die *Funktionsgrößen* technischer Produkte, Systeme und Anlagen. Die *Sensorik* wandelt Funktionsgrößen in elektrische Signale um. Sie ermöglicht damit die Anwendung der leistungsfähigen elektrischen Messtechnik auf die Sensor-Ausgangssignale, die Nutzung der elektronischen Signal/Bild-Verarbeitung und den Einsatz der programmierbaren Prozesssteuerung für Aktorik, Regelung und Automatisierungstechnik.

Die Sensorik für die Mechatronik lässt sich nach den nichtelektrischen Funktionsgrößen der Technik gliedern:

- Sensorik geometrischer Größen,
  - Längenmesstechnik – Form- und Maßsensorik,
  - Dehnungssensorik mechanisch oder thermisch beanspruchter Bauteile,
- Sensorik kinematischer Größen,
  - Positionssensorik (Wege, Winkel) – Geschwindigkeitssensorik,
  - Drehzahlsensorik – Beschleunigungssensorik,
- Sensorik dynamischer Größen,
  - Kraftsensorik – Drehmomentsensorik – Drucksensorik,
- Sensorik von Einflussgrößen,
  - Temperatursensorik – Feuchtesensorik.

Die wichtigsten Sensoren für technische Systeme sind mit ihren Input- und Outputgrößen mit einer Matrixübersicht in Tab. 5.1 zusammengestellt. Sie werden im Folgenden – nach einer Einführung in die messtechnischen und sensortechnischen Grundlagen – mit ihren Prinzipien und technischen Eigenschaften systematisch beschrieben.

**Tab. 5.1** Sensorik-Übersicht: Matrixdarstellung der Input- und Outputgrößen von Sensoren

In \ Out	Elektrischer Widerstand: resistiv R      induktiv L      kapazitiv C			Spannung U	Strom I	Ladung Q
Position: Länge l, Weg s Winkel $\varphi$	Potentiometer, Magnetoresistiver Sensor, Gauß-Feldplatte	Differenzial-Transformator, Tauchanker-Wegsensor	Kapazitiver Wegsensor	Hall-Sensor, Optoelektronischer Lichtschranken-Sensor	Wirbelstrom-Sensor	
Dehnung $\epsilon = \Delta l / l_0$	Dehnungsmessstreifen				Faseroptische Sensoren	
Geschwindigkeit $v = ds/dt$	Magnetoresist. Drehwinkel-S.	Indukt. Drehwinkel-S.		Magnetpol-Drehzahl-S.	Optoelektron. Drehzahl-S.	Gyrometer/Piezoe-Sensor
Beschleunigung $a = dv/dt$	Seismische Masse-Dämpfer-Feder-Systeme, Rückführung auf Wegmessung: resistiv, induktiv, kapazitiv, optoelektronisch, piezoresistiv ; Hall/Gauß-Sensorik oder Dehnungsmessung (DMS)					
Kraft F Moment $F \cdot l$	Piezoresistiver Sensor, Dehnstoffe	Magnetoelastischer Sensor	Kraftkompensations-Sensor	Federelemente oder DMS, Rückführung auf s-, $\epsilon$ -Messung		Piezoelektrischer Sensor
Druck $p = \text{Kraft}/\text{Fläche}$	Piezoresistiv Dehnstoff-S	Magnetoelastischer S.	Kapazitiver Drucksensor	Federelemente oder DMS: Rückführung auf s-, $\epsilon$ - Messung		Piezoelektrischer Sensor
Temperatur T	NTC/ PTC-Widerstände			Thermoelemente	Optoelektron. Pyrometer	
Feuchte $f_{\text{abs}}, f_{\text{rel}}$	Resistives Hygrometer		Kondensator Hygrometer			

## 5.1 Metrologische und messtechnische Grundlagen

Grundlage der Messtechnik ist die *Metrologie*. Sie wird im Internationalen Wörterbuch der Metrologie VIM (International Vocabulary of Metrology) als *Wissenschaft vom Messen und ihre Anwendung* definiert.

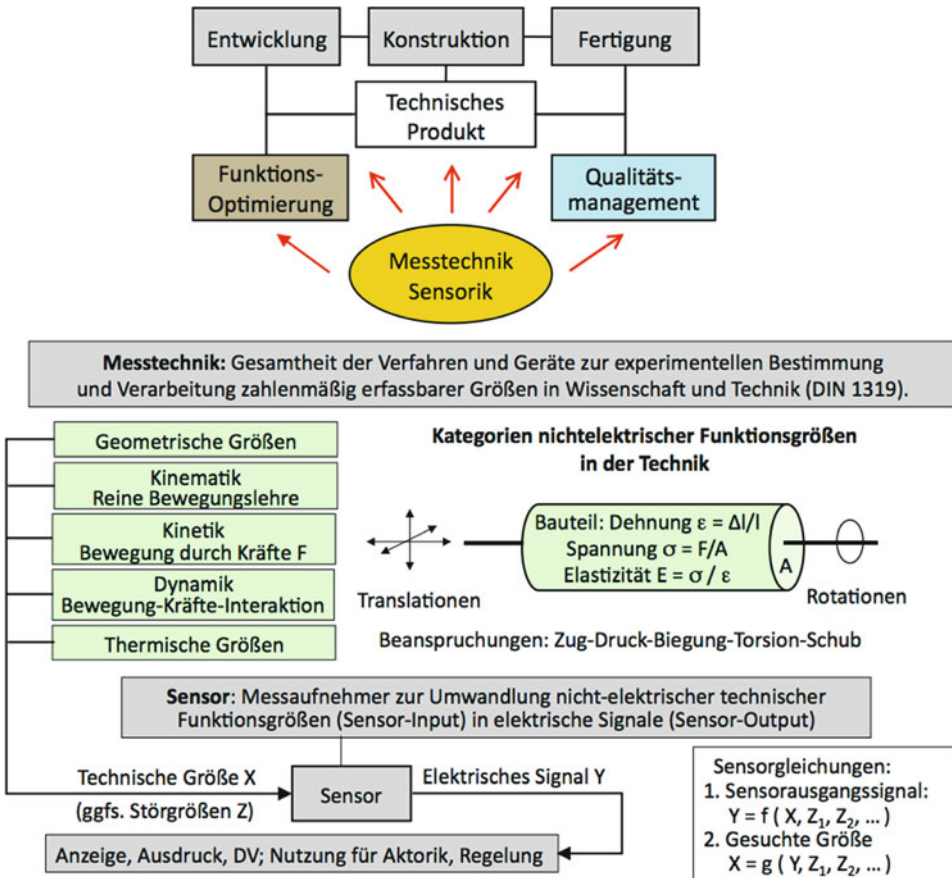
Abbildung 5.1 beschreibt Definition und Aufgaben der Messtechnik und Sensorik.

### 5.1.1 Struktur der Messtechnik

Für die Durchführung einer Messung sind im Allgemeinen mehrere Messglieder erforderlich, die eine Messeinrichtung oder ein Messsystem bilden. Die Art und Weise, wie die Messgeräte zusammengeschaltet und die Messsignale verknüpft sind, wird als Struktur des Messsystems bezeichnet. Die grundlegende Struktur eines Messsystems ist die *Messkette*, bestehend aus Messgliedern und Hilfsgeräten mit den folgenden hauptsächlichen Aufgaben, siehe Abb. 5.2:

- Messgrößenaufnahme. Erfassung der Messgröße mit geeigneten Messaufnehmern und Sensoren sowie Abgabe eines weiterverarbeitbaren (meist elektrischen) Messsignals als zeitliche Abbildungsfunktion der Messgröße.



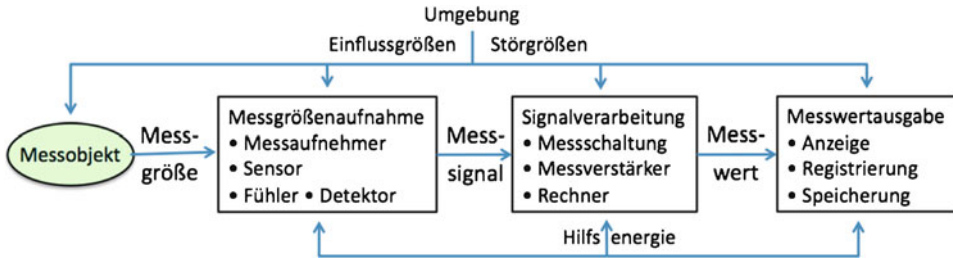


**Abb. 5.1** Definition und Aufgaben der Messtechnik und Sensorik

- Messsignalverarbeitung. Anpassung, Verstärkung oder Umwandlung von elektrischen Messsignalen in darstellbare Messwerte mit Hilfe von Messschaltungen, Messverstärkern oder Rechnern.
- Messwertausgabe. Anzeige und Registrierung bzw. Speicherung und Dokumentation von Messwerten in analoger oder digitaler Form.

Die Struktur des Messsystems bestimmt das statische und dynamische Verhalten der Messeinrichtung, wobei äußere Einfluss- oder Störgrößen aus der Umgebung die Messgeräteparameter, den Signalfluss und das Messergebnis beeinflussen können.





**Abb. 5.2** Grundlegende Struktur der Messtechnik: die Messkette

## 5.1.2 Maßsystem

Die metrologische Basis der Messtechnik ist das heute weltweit eingeführte Internationale Einheitensystem, das *Système International d' Unités (SI)*. Es wurde durch den Staatsvertrag der Meterkonvention von 1875 und die *Generalkonferenz für Maß und Gewicht CGPM* begründet.

Die Festlegung der Maße und Gewichte ist ein hoheitliches Recht; zuständig in Deutschland ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Internationales Zentrum für die Maßeinheiten ist das *Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM)* in Sevres bei Paris ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

Als *Basisgrößen und Basiseinheiten* sind im Internationalen Einheitensystem sieben physikalische Größen festgelegt. Die folgende Übersicht nennt Stichworte ihrer Realisierung zusammen mit Unsicherheiten der Realisierung (Typ B Messunsicherheit) gemäß CODATA (*Committee on Data for Science and Technology*):

- **Zeit:** Sekunde (s), Mehrfaches der Periodendauer elektromagnetischer Strahlung bei einem energetischen Übergang im Nuklid  $^{133}\text{Cs}$ ; technisch realisiert als „Atomuhr“, Unsicherheit  $2 \times 10^{-16}$ , d. h. Abweichung von einer Sekunde in 150 Millionen Jahren.
- **Länge:** Meter (m), definiert über Lichtgeschwindigkeit  $c$  (Naturkonstante) und Zeit gemäß  $\text{Länge} = c \cdot \text{Zeit}$ . Unsicherheit  $10^{-12}$ .
- **Masse:** Kilogramm (kg), Internationaler Platin-Iridium Prototyp, aufbewahrt beim BIPM, Unsicherheit  $2 \times 10^{-8}$ .
- **Stoffmenge:** Mol (mol), definiert über die Teilchenzahl ( $^{12}\text{C}$  in 12 Gramm), Unsicherheit  $3 \times 10^{-7}$ .
- **Temperatur:** Kelvin (K), Tripelpunkt des Wassers (0 K entspricht  $-273,16^\circ\text{C}$ ), Unsicherheit  $3 \times 10^{-7}$ .
- **Lichtstärke:** Candela (cd), definiert über monochromatische Strahlung ( $540 \times 10^{12}$  Hz), Unsicherheit  $10^{-4}$ .
- **Stromstärke:** Ampere (A), definiert über Kraftwirkung zwischen elektrischen Leitern, Unsicherheit  $9 \times 10^{-8}$ .

**Tab. 5.2** Technische Größen mit Symbolen und SI-Einheiten (Beispiele)

Technische Größe	Name	Symbol	in SI-Einheiten	in SI-Basis-Einheiten
Kraft (Masse · Beschleunigung)	Newton	N		$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Druck, mech. Spannung	Pascal	Pa	$\text{N}/\text{m}^2$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Energie, Arbeit, Wärme	Joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Leistung	Watt	W	$\text{J}/\text{s}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
Elektrische Ladung	Coulomb	C		$\text{s} \cdot \text{A}$
Elektrische Spannung	Volt	V		$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
Elektrische Kapazität	Farad	F	$\text{C}/\text{V}$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
Elektrischer Widerstand	Ohm	$\Omega$	$\text{V}/\text{A}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
Elektrische Leitfähigkeit	Siemens	S	$\text{A}/\text{V}$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$

Unter Benutzung physikalischer Gesetze – z. B. Kraft = Masse · Beschleunigung, Arbeit = Kraft · Weg – lassen sich technische Größen auf SI-Basiseinheiten zurückführen. Tabelle 5.2 nennt dazu einige Beispiele.

**Rückführung der Maßeinheiten auf Naturkonstanten**

Es ist ein grundlegendes Bestreben der Physik, die Basiseinheiten des physikalischen Maßsystems auf *Naturkonstanten* zurückzuführen. Damit werden physikalische Größen bezeichnet, deren numerischer Wert sich weder räumlich noch zeitlich verändert. Als Ergebnis sorgfältiger Beobachtungen und Messungen sind heute zahlreiche Naturkonstanten bekannt. Diese physikalischen Daten werden alle vier Jahre von CODATA (*Committee on Data for Science and Technology*, [www.codata.org](http://www.codata.org)) veröffentlicht. Von den sieben Basisgrößen des SI-Systems sind gegenwärtig nur drei Basisgrößen durch Naturkonstanten definiert, nämlich die Sekunde (Caesiumatomzustände, „Atomuhr“), das Meter (Lichtgeschwindigkeit) und die Lichtstärke cd (Referenzstrahlung). Für die Neufassung des Internationalen SI-Einheitensystems ist gemäß der SI-Broschüre von 2010 vorgesehen auch die anderen vier anderen Basisgrößen neu zu definieren. An der technisch-experimentellen Realisierung wird mit höchster Präzisionsmesstechnik in metrologischen Staatsinstituten (USA: NIST, England: NPL, Deutschland: PTB) gearbeitet.

- Neudefinition des *Kilogramms* kg als Einheit der Masse basierend auf dem exakten Zahlenwert des Planck’schen Wirkungsquantums  $h$ . Das Kilogramm kann dann definiert werden als die Masse eines Körpers, der bei Vergleich von mechanischer und elektrischer Leistung (experimentell realisiert in einer *Watt-Waage*) den Wert  $h$  ergibt. Eine alternative Methode, die an der PTB erarbeitet wird, besteht in der Bestimmung der Zahl der Atome im exakt bestimmten Volumen einer Silizium-Kugel, was heute

mit einer relativen Unsicherheit von  $3 \times 10^{-8}$  möglich ist; 1 kg ist gleich der Masse von  $2,1502 \dots \times 10^{25}$  Atomen des Silizium-Isotops  $^{28}\text{Si}$ .

- Neudefinition des *Ampere* A als Einheit der elektrischen Stromstärke, basierend auf einem festen Wert der Elementarladung  $e$ . Das Ampere ist der elektrische Strom eines Flusses von Elementarladungen, die pro Sekunde in einer elektronischen *Einzel-elektronen-Pumpe* gezählt werden;  $6,2415 \dots \times 10^{18}$  Elektronen pro Sekunde ergeben 1 Ampere.
- Neudefinition des *Kelvin* K als thermodynamisch begründete Temperatur T, basierend auf der Boltzmann-Konstanten  $k_B$ . Ein Kelvin ist die Änderung der Temperatur, die gemäß der Relation  $E = k_B \cdot T$  in einem Gasthermometer eine Änderung der thermischen Energie E um den Wert der Boltzmann-Konstanten bewirkt.
- Neudefinition des *Mol* als Stoffmengeneinheit, basierend auf der Avogadrokonstanten  $N_A$ , sie hat die Dimension einer reziproken Stoffmenge und ist eine Naturkonstante.

Mit der Neudefinition des Internationalen Einheitensystems werden die Grundlagen für die Maße der Physik – und damit auch für die daraus abgeleiteten Maße der Technik – insgesamt auf Naturkonstanten zurückgeführt.

### 5.1.3 Metrologische Methodik der Messtechnik

Um eine technisch interessierende Größe (Messgröße) messen zu können, sind eine *Vergleichsgröße*, ein *Messprinzip*, ein *Messverfahren*, eine *Messmethode* und ein *Messgerät* erforderlich. Das Messgerät vereinigt häufig die Aufgaben von Messgrößenaufnahme, Messsignalverarbeitung und Messwertausgabe.

- Das *Messprinzip* ist die physikalische Grundlage einer Messung.
- Die *Messmethode* ist die methodische Anwendung des Messprinzips. Messmethoden sind allgemeine, grundlegende Regeln für die Durchführung von Messungen. Sie können gegliedert werden in direkte Methoden (Messgröße gleich Aufgabengröße) und indirekte Methoden (Messgröße ungleich Aufgabengröße) sowie analoge und digitale Methoden mit kontinuierlicher bzw. diskreter Messwertangabe. Ausschlagmethoden führen zu einer unmittelbaren Messwertdarstellung; bei Kompensationsmethoden wird ein Nullabgleich zwischen der Messgröße und einer Referenzgröße durchgeführt.
- Das *Messverfahren* ist die praktische Realisierung des Messprinzips.
- Das *Messgerät* liefert die Messwerte. Messgeräte werden allgemein als *Messmittel* bezeichnet (DIN 1319-2). Sie liefern in Form von Skalen- oder Ziffernanzeigen Messwerte einer Messgröße.

*Prüfgeräte* stellen dagegen fest, ob das zu prüfende Objekt geforderte Eigenschaften aufweist, vorgegebenen Bedingungen entspricht oder Konformitätsanforderungen technischer Regeln erfüllt (conformity assessment). Prüfen ist immer mit einer Ent-

scheidung verbunden, z. B. wird zwischen gut und schlecht (attributiv) oder zwischen Sollmenge erreicht und Sollmenge nicht erreicht (quantitativ) entschieden. Im Gegensatz hierzu geben Messgeräte keine Wertung ab.

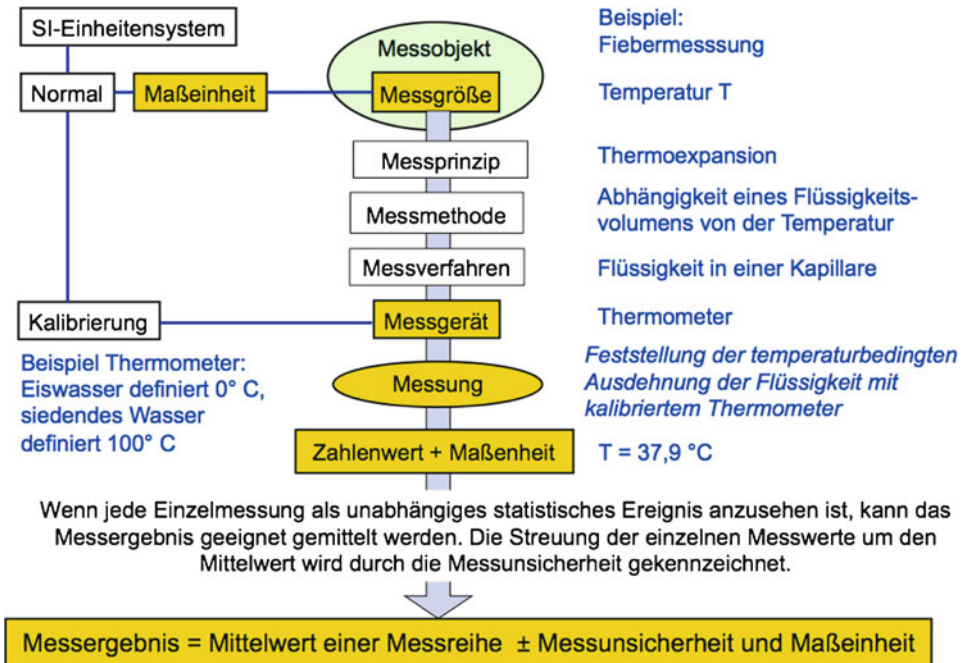
Messgeräte müssen justiert, kalibriert und falls erforderlich geeicht sein.

- *Justieren* heißt, ein Messgerät oder eine Maßverkörperung so einzustellen oder abzugleichen, dass die Anzeige vom richtigen Wert so wenig wie möglich abweicht oder die Abweichung innerhalb bestimmter Fehlergrenzen bleibt.
- *Kalibrieren* heißt, den Zusammenhang zwischen der Anzeige eines Messgerätes und dem wahren Wert der Messgröße bei vorgegebenen Messbedingungen zu ermitteln. Der wahre Wert der Messgröße wird durch Vergleich mit einem Normalgerät ermittelt, das auf ein (nationales) Normal zurückgeführt sein muss.
- Eichen ist das eichbehördliche Prüfen eines Messgerätes oder einer Maßverkörperung nach Eichvorschriften (nicht zu verwechseln mit Kalibrieren).
- Der *Messwert* wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit angegeben.
- Das *Messergebnis* wird im Allgemeinen aus mehreren wiederholt ermittelten Messwerten einer Messgröße (Messreihe) oder aus den Messwerten verschiedener Messgrößen berechnet. Beim Messen, Kalibrieren und Justieren sind gegebenenfalls einwirkende Einfluss- und Störgrößen (z. B. Temperatureinflüsse, Erschütterungen, elektromagnetische Felder) zu beachten und vorgegebene Messbedingungen einzuhalten.

Die Durchführung einer Messung erfordert damit die folgenden Schritte:

1. Definition der Messgröße und der zur Messgröße gehörenden Maßeinheit,
2. Zusammenstellung der Rahmenbedingungen der Messung durch Kennzeichnung von (a) Messobjekt (Stoff, Form), (b) Einflussgrößen (Ort, Zeit), (c) Umgebungsbedingungen (z. B. Umgebungstemperatur, Luftfeuchte),
3. ein Normal (Maßverkörperung) für die Maßeinheit der Messgröße und der Bezug (Rückführung, traceability) dieses Normals auf eine primäre Darstellung dieser Größe (z. B. in einem nationalen Metrologieinstitut),
4. ein *Messprinzip* als physikalische Grundlage der Messung, eine *Messmethode* als methodische Anwendung und ein *Messverfahren* als praktische Realisierung eines Messprinzips,
5. ein *Messgerät*, für das der Zusammenhang zwischen der Anzeige und dem wahren Wert der Messgröße durch *Kalibrieren* des Messgerätes mit dem Normal hergestellt wird,
6. Festlegung des Messablaufs, z. B. Einzelmessung, Wiederholmessung, Messreihe,
7. Ermittlung des Messergebnisses als Einzelmesswert oder geeigneter Mittelwert einer Messreihe, Angabe als Produkt aus Zahlenwert und Maßeinheit,
8. Bestimmung der *Messunsicherheit*,
9. Angabe des vollständigen Messergebnisses: Zahlenwert  $\pm$  Messunsicherheit und Maßeinheit.

Abbildung 5.3 zeigt den Ablaufplan der metrologischen Methodik der Messtechnik.

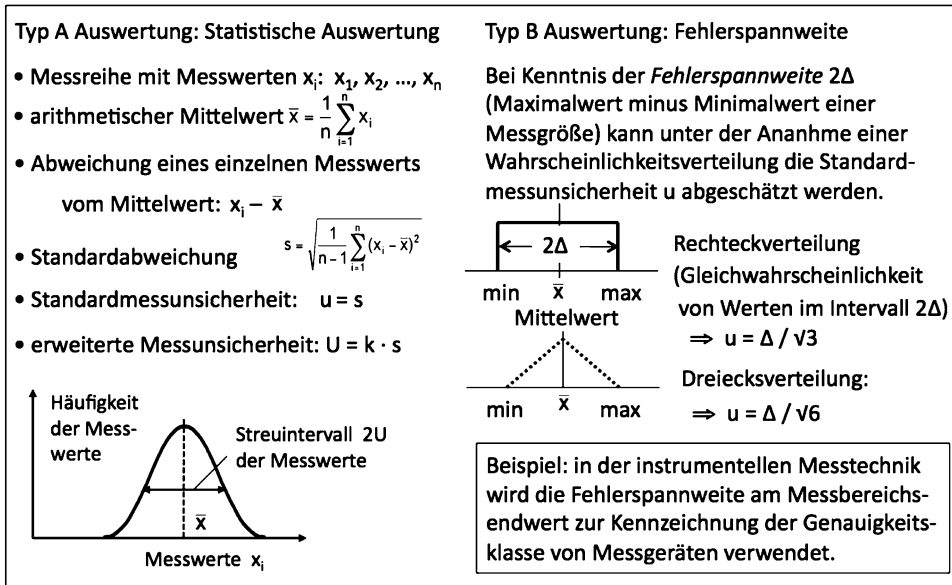


**Abb. 5.3** Die metrologische Methodik der Messtechnik

### 5.1.4 Messunsicherheit und Messgenauigkeit

Ein Messergebnis ist nur dann vollständig, wenn es eine Angabe über Messabweichungen enthält – traditionell als *Messunsicherheit* bezeichnet. Hierunter versteht man den Bereich der Werte, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden können, da jede Messung von Unsicherheitsquellen beeinflusst wird. Grundlage zur Ermittlung der Messunsicherheit ist der *International Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement GUM* ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). Man unterscheidet zwei Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit, siehe Abb. 5.4.

Die statistische Auswertung von Messungen (Typ A Auswertung nach GUM) bezieht sich auf eine durch eine definierte Probenahme (*sampling*) genau zu kennzeichnende „Stichprobe“, d. h. eine Messreihe mit  $n$  voneinander unabhängigen Einzelmesswerten  $x_i$ . Kenngrößen sind der *arithmetischen Mittelwert* und die *Standardabweichung*  $s$ , die als *Standardmessunsicherheit*  $u = s$  das Maß für die Streuung der Einzelmesswerte um den Mittelwert ist. Die erweiterte Messunsicherheit  $U = k \cdot s$  kennzeichnet mit dem Wert  $2U$  das Streuintervall der Messwerte bezogen auf die Häufigkeitsverteilung der Einzelmesswerte (z. B. Normalverteilung nach Gauß). Im Intervall  $\pm s$  liegen 68,3 % der Messwerte, im Intervall  $\pm 2s$  liegen 95,5 % der Messwerte und im Intervall  $\pm 3s$  liegen 99,7 % der Messwerte bei einer Normalverteilung.



**Abb. 5.4** Übersicht über die Methodik der Bestimmung der Messunsicherheit

Die Typ B Auswertung betrachtet die *Fehlerspannweite* und wird beispielsweise bei der Kennzeichnung der Genauigkeitsklasse von Messgeräten verwendet.

Neben den durch eine statistische Auswertung zu erfassenden Messabweichungen können „systematische Messabweichungen“ auftreten. Sie sind häufig vorzeichenbehaftet und können dann korrigiert werden. Abbildung 5.5 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Messabweichungen und Abb. 5.6 über mögliche Quellen.

### Genauigkeit von Messungen: Präzision und Richtigkeit

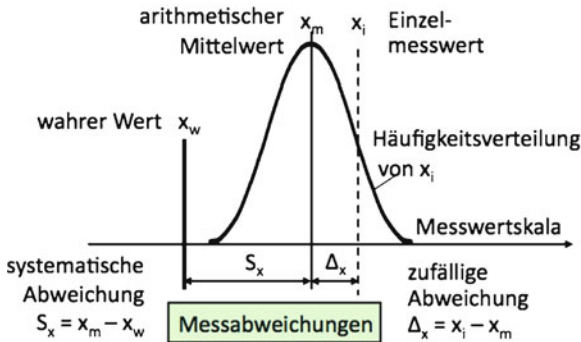
Mit dem Begriff *Genauigkeit* wird in der Messtechnik die Kombination von *Präzision* und *Richtigkeit bezeichnet*. Zur zusammenfassenden Beurteilung ob die Messungen einer Messreihe präzise und richtig sind dient das anschauliche Zielscheibenmodell, Abb. 5.7, dessen Zentrum der „wahre Wert“ ist.

- **Präzision:** Ausmaß der Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen unabhängiger Messungen.
- **Richtigkeit:** Ausmaß der Übereinstimmung des Mittelwertes von Messwerten mit dem wahren Wert der Messgröße.

Messtechnisch anzustreben ist der Fall (a), der durch eine kleine Messunsicherheit und keine systematischen Messabweichungen gekennzeichnet ist, während der Fall (d) sowohl unpräzise als auch falsch ist. Eine messtechnische Problematik stellen Messergebnisse dar, die zwar eine hohe Präzision aber (möglicherweise unerkannte) systematische Fehler aufweisen, wie Fall (c).

Messabweichungen („Messfehler“) werden traditionell eingeteilt in

- Zufällige Abweichung  $\Delta$ : Abweichung eines Einzelwertes (Ist) vom Mittelwert (Soll) einer Messreihe
- Systematische Fehler  $S$ : Abweichung des Mittelwertes einer Messreihe vom „wahren Wert“



Beispiel:  
Systematischer Fehler  $S_i$  einer Längenmessung in Abhängigkeit der Einflussgröße Temperatur  $T$ :  
 $S_i = l_w \cdot \alpha \cdot (T_M - T_0)$   
Korrektion:  $-S_i$

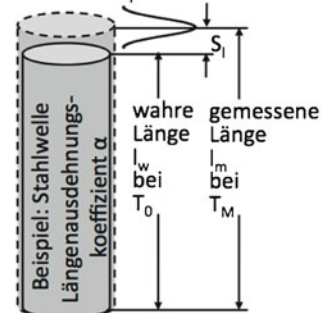


Abb. 5.5 Übersicht über Messabweichungen

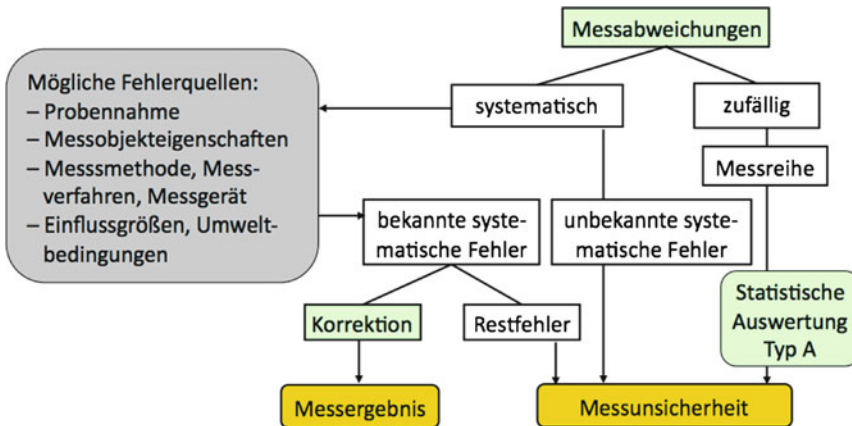
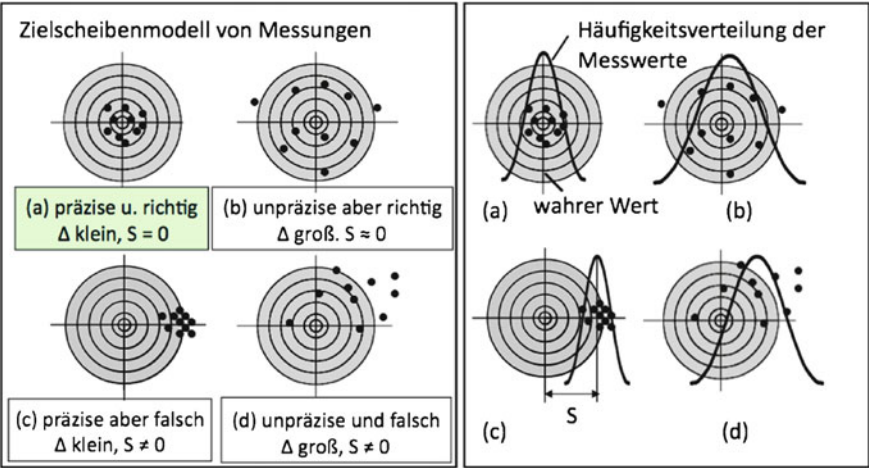


Abb. 5.6 Übersicht über mögliche Fehlerquellen von Messabweichungen

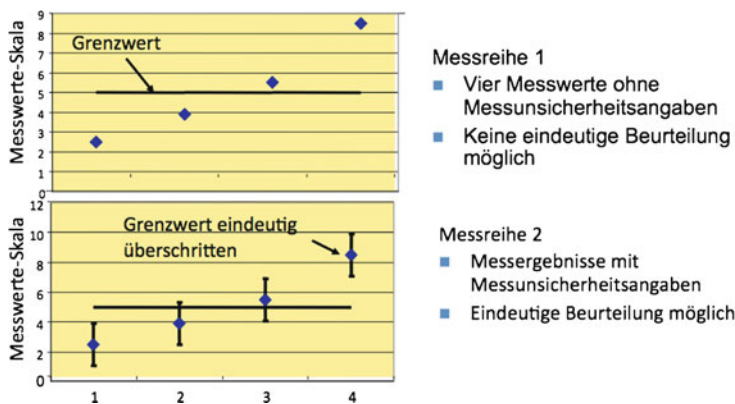
### Grenzwertbeurteilung von Messwerten

Die Messunsicherheit ist von großer Bedeutung für die Beurteilung der Aussagefähigkeit von Messungen im Hinblick darauf, ob ein Messobjekt vorgeschriebene oder vereinbarte Grenzwerte (z. B. zulässiger Festigkeitsgrenzwerte) erfüllt. Abbildung 5.8 illustriert, dass dies nur bei Kenntnis der Messunsicherheiten möglich ist. Die allgemeine Regel für die Grenzwertbeurteilung von Messwerten ist in Abb. 5.9 dargestellt.





**Abb. 5.7** Zielscheibenmodell zur Illustration von Präzision und Richtigkeit von Messungen

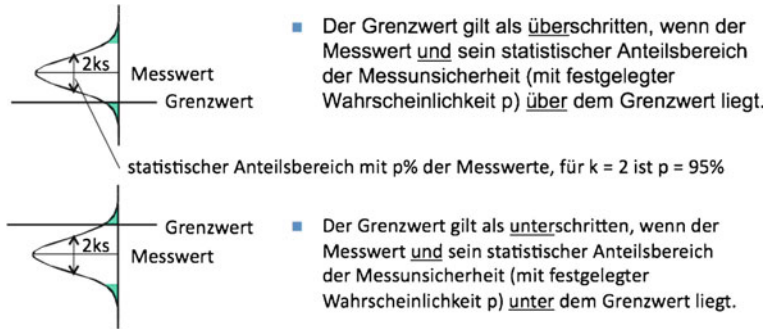


**Abb. 5.8** Die Bedeutung von Messunsicherheitsangaben zur Grenzwertbeurteilung

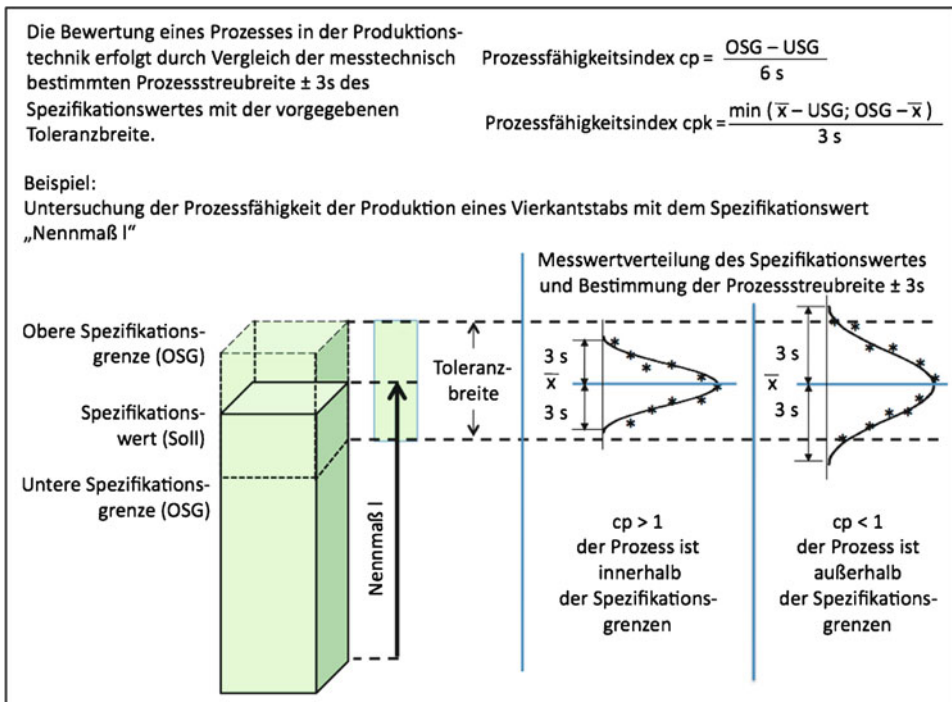
**Prozessfähigkeitsbeurteilung von Technologien und Produktionsprozessen**

Messtechnik und statistische Messgrößenauswertung bilden die Grundlage für die Beurteilung der „Prozessfähigkeit“ oder „Qualitätsfähigkeit“ von Technologien und Produktionsprozessen. Abbildung 5.10 gibt die Definitionen der Prozessfähigkeitsindizes und beschreibt ein Anwendungsbeispiel.

Kenngrößen für die Prozess- oder Qualitätsfähigkeit sind „Prozessfähigkeitsindizes“. Hiermit wird das Verhältnis zwischen der Häufigkeitsverteilung eines messbaren Eigenschafts- oder Qualitätsmerkmals und der für dieses Merkmal vorgegebenen Toleranzbreite bezeichnet. Der Prozessfähigkeitsindex  $cp$  gibt eine Aussage über die



**Abb. 5.9** Regel für die Grenzwertbeurteilung von Messwerten



**Abb. 5.10** Definition der Prozessfähigkeitsindizes und ein einfaches Beispiel der Prozessfähigkeitsbeurteilung

Streuung eines (Produktions-)Prozesses unabhängig von der Lage des Mittelwertes des betreffenden Produktmerkmals. Der  $cpk$ -Wert ermöglicht eine Aussage über Streubreite und Lage des Mittelwertes des Produktmerkmals relativ zu der nächsten Spezifikationsgrenze.

**Messgerätetypen:**

- Analoggeräte mit Skalenanzeige.
- Digitalgeräte mit Ziffernanzeige.

Instrumentelle Messunsicherheit (traditionell „Messgerätefehler“)

Abweichung des Ausgangssignals eines Messgerätes vom wahren Wert, gekennzeichnet durch ein Fehlergrenzenintervall der „Fehlerspannweite“  $2\Delta$

- Analoggeräte: Die **Genauigkeitsklasse p** gibt in % die symmetrische Fehlergrenze  $\Delta$  bezogen auf den Messbereichsendwert  $y_{\max}$  an:  $p = (\Delta / y_{\max})100$  [%]. Als statistische Sicherheit für die Einhaltung der Klassengrenzen gilt 95 % als vereinbart.

Messgerätekategorie	Genauigkeitsklasse p in %
Präzisionsmessgeräte	0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,05
Feinmessgeräte	0,1; 0,2; 0,5
Betriebsmessgeräte	1; 1,5; 2,5; 5

Beispiel: Bei einem Voltmeter, Klasse 1,  $U_{\max} = 10$  V ist im gesamtem Messbereich die Fehlergrenze  $\Delta = 0,1$  V und der relative Fehler z. B. bei einem Messwert von 2 V ist gleich  $(0,1 \text{ V} / 2 \text{ V}) \cdot 100 = 5\%$ .

- Digitalgeräte: Die Fehlergrenze beträgt  $\pm 1$  Ziffernschritt (digit) auf der niederwertigsten Stelle der Ziffernanzeige (least significant unit).

Abb. 5.11 Übersicht über Messgerätetypen und Genauigkeitsklassen

5.1.5 Instrumentelle Messunsicherheit und Kalibrierung

Die Kennzeichnung der instrumentellen Messunsicherheit basiert auf der Typ-B-Methode (siehe Abb. 5.4) und ist eine pauschale Angabe über maximal bei der Verwendung von Messgeräten zu erwartende Messabweichungen, siehe Abb. 5.11.

Messgeräte müssen kalibriert sein. Kalibrieren heißt, den Zusammenhang zwischen der Anzeige eines Messgerätes und dem wahren Wert der Messgröße bei vorgegebenen Messbedingungen zu ermitteln. Der wahre Wert der Messgröße wird durch einen Vergleich mit einem Normalgerät bestimmt, das auf ein (nationales) Normal zurückgeführt sein muss (Rückführbarkeit: traceability). Ein Beispiel zeigt Abb. 5.12.

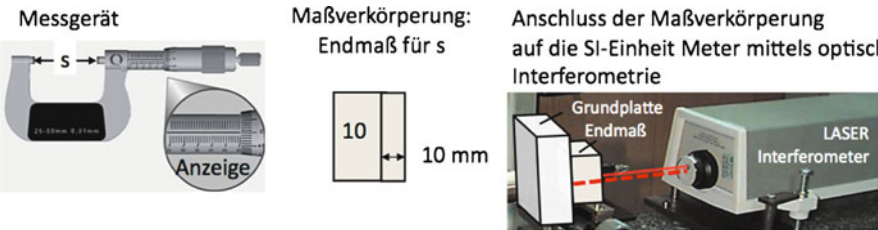
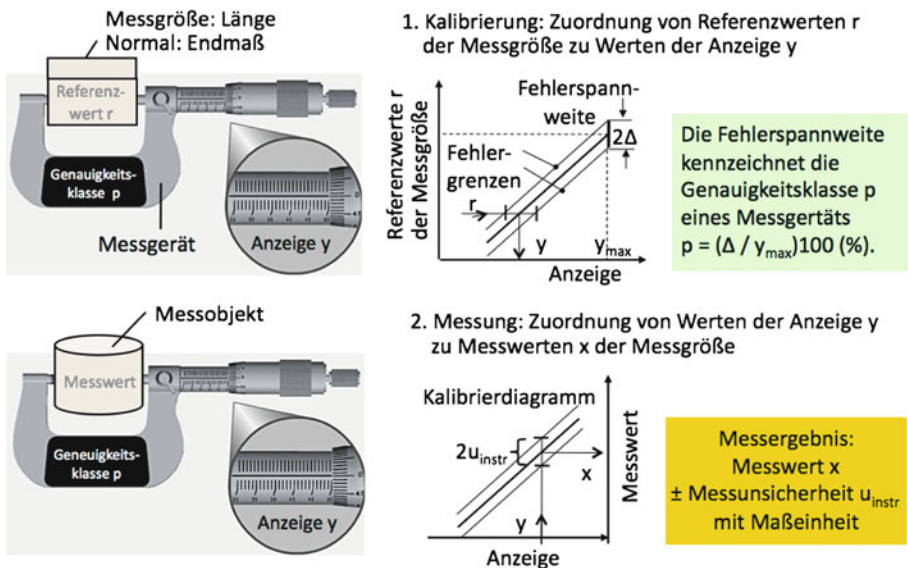


Abb. 5.12 Beispiel der metrologischen traceability eines Gerätes der Längenmesstechnik



**Abb. 5.13** Beispiel der Methodik des Kalibrierens von Messgeräten

Der Zusammenhang zwischen der Anzeige und dem wahren Wert der Messgröße wird durch ein Kalibrierdiagramm („Kennlinie“ des Messgerätes) graphisch dargestellt. Die aus zwei Schritten bestehende Methodik des Kalibrierens ist in Abb. 5.13 beispielhaft illustriert.

### 5.1.6 Messunsicherheitsbudget für Messfunktionen

In technischen Aufgabenstellungen ist häufig eine Aufgabengröße  $y$  durch eine *Messfunktion*  $y = f(A, B, C, \dots)$  aus mehreren, voneinander unabhängiger Messgrößen  $A, B, C, \dots$  zu bestimmen, z.B. mechanische Spannung = Kraft/Fläche, elektrischer Widerstand = Elektrische Spannung/Elektrischer Strom.

In diesen Fällen kann bei Kenntnis der Messunsicherheiten ( $u$ ) der einzelnen Messgrößen  $A, B, C, \dots$  bzw. der Genauigkeitsklassen ( $p$ ) der verwendeten Messgeräte – das *Messunsicherheitsbudget* der Messfunktion durch das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz bestimmt werden. Für die Messfunktionen, die mathematisch aus Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division oder Potenzbildung resultieren, ergeben sich die in Abb. 5.14 zusammengestellten Formeln.

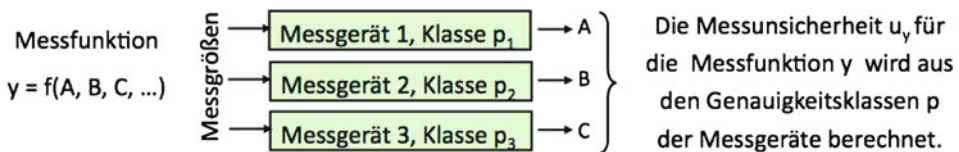
Die Bestimmung von Messunsicherheitsbudgets für Messfunktionen mit mehreren Variablen – die separat mit Messgeräten bekannter Genauigkeitsklassen gemessen werden – wird mit Beispielen aus der Elektrotechnik, Abb. 5.15, und der Mechanik/Werkstofftechnik, Abb. 5.16, illustriert.

Bei Kenntnis der Messunsicherheiten der Messgrößen A, B, C mit den Absolutwerten  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  bzw. Relativwerten  $\delta_A = u_A/A$ ,  $\delta_B = u_B/B$ ,  $\delta_C = u_C/C$  ergibt sich die gesamte Messunsicherheit aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$u_y = \sqrt{[(\partial y / \partial A) u_A]^2 + [(\partial y / \partial B) u_B]^2 + \dots} \quad \text{mit folgenden Spezialfällen:}$$

- Summen/Differenzfunktion  $y = A + B$ ;  $y = A - B \Rightarrow u_y = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$
- Produkt/Quotientenfunktion  $y = A \cdot B$ ;  $y = A / B \Rightarrow u_y/y = \delta_y = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$
- Potenzfunktion  $y = A^n \Rightarrow u_y/y = \delta_y = |n| \cdot u_A/A = |n| \cdot \delta_A$

**Abb. 5.14** Fehlerfortpflanzungsgesetz zur Bestimmung von Messunsicherheitsbudgets



Für eine Produktfunktion  $y = A \cdot B \cdot C \Rightarrow u_y/y = \delta_y = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2 + \delta_C^2} = \sqrt{p_A^2 + p_B^2 + p_C^2}$

**• Beispiel: Messung eines elektrischen Widerstandes**  
 Messfunktion  $R = U / I$

Amperemeter  
Klasse  $p_I = 0.2\%$

Strom  $I$   
Spannung  $U$

Voltmeter  
Klasse  $p_U = 0.5\%$

$$u_y/R = \delta_R = \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2} = \sqrt{p_U^2 + p_I^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,2^2} = 0,54\%$$

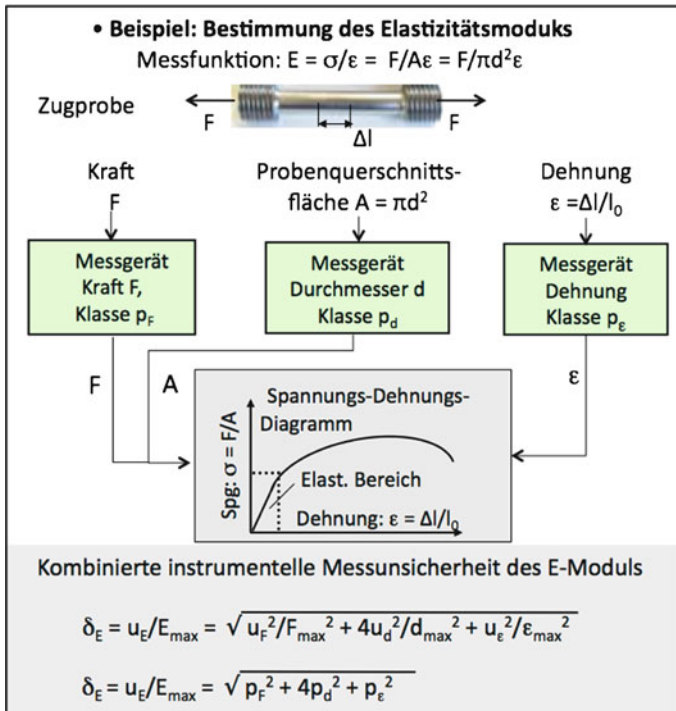
Die kombinierte instrumentelle Messunsicherheit für den Widerstand beträgt 0,54%

**Abb. 5.15** Beispiel der Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets für zwei Variable

### 5.1.7 Qualitätsmanagement im Mess- und Prüfwesen

Durch ein geeignetes Qualitätsmanagement ist sicherzustellen, dass in der Anwendung der Messtechnik und Sensorik bestimmungsgemäße Funktionen sowie festgelegte und vorausgesetzte Regeln erfüllt werden. Wichtige Hilfsmittel für die Qualitätssicherung im Mess- und Prüfwesen sind Referenzmaterialien und Referenzverfahren:

- Referenzmaterial: Material oder Substanz von ausreichender Homogenität, von dem bzw. der ein oder mehrere Merkmalwerte so genau festgelegt sind, dass sie zur Kalibrierung Zuweisung von Stoffwerten verwendet werden (ISO Guide 30, 1992).
- Referenzverfahren: Eingehend charakterisiertes und nachweislich beherrschtes Prüf-, Mess- oder Analysenverfahren zur
  - Qualitätsbewertung anderer Verfahren für vergleichbare Aufgaben,



**Abb. 5.16** Beispiel der Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets für drei Variable

- Charakterisierung von Referenzmaterialien einschließlich Referenzobjekten,
- Bestimmung von Referenzwerten.

Die Ergebnisunsicherheit eines Referenzverfahrens muss angemessen abgeschätzt und dem Verwendungszweck entsprechend beschaffen sein.

Europaweite Regelungen zum Betreiben von Mess- und Prüflaboratorien wurden mit der Bildung der Europäischen Union durch den Vertrag von Maastricht vom November 1993 und der Gründung des europäischen Binnenmarkts geschaffen (Euro-Norm EN 45 001). In der Norm DIN EN ISO 17025 sind die jetzt international geltenden Allgemeinen Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien festgelegt. Die Norm ist gegliedert in die Hauptabschnitte

- Anforderungen an das Management,
- Technische Anforderungen.

Die Norm 17025 enthält alle Erfordernisse, die Prüf- und Kalibrierlaboratorien erfüllen müssen, wenn sie nachweisen wollen, dass sie ein Qualitätsmanagement betreiben, technisch kompetent und fähig sind, fachlich begründete Ergebnisse zu erzielen. Die Ak-



zeptanz von Prüf- und Kalibrierergebnissen zwischen Staaten wird vereinfacht, wenn Laboratorien dieser Internationalen Norm entsprechend akkreditiert sind. Laboratorien können ihre Eignung zur Durchführung bestimmter Prüfungen in Intercomparisons und Proficiency Tests feststellen, siehe EPTIS, European Information System on Proficiency Testing Systems, [www.eptis.bam.de](http://www.eptis.bam.de).

5.2 Sensortechnische Grundlagen

Durch Sensorik können Messgrößen erfasst und – umgewandelt in elektrische Signale – mit elektronischen Geräten (Schreiber, Drucker) dargestellt sowie für Aufgaben der Ak-torik und der Steuer-/Regelungs-/Automatisierungstechnik verwendet werden.

5.2.1 Physikalische Sensoreffekte

Sensoren nutzen Wandlereffekte für physikalische Größen. Tabelle 5.3 gibt dazu eine allgemeine Übersicht, die Sensoreffekte mit elektrischem Signalausgang sind hervor-gehoben.

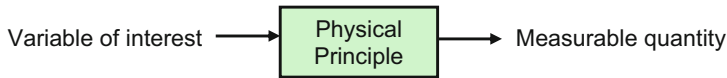
Die in Tab. 5.3 kategorisierten Wandlerprinzipien der Sensorik basieren auf physika-lischen Effekten, die in der englischsprachigen Literatur als „Physical Principles for the

Tab. 5.3 Physikalische Wandlerprinzipien für Sensoren

Eingangs- größe	Ausgangsgröße				
	mechanisch	thermisch	elektrisch	magnetisch	optisch
mechanisch	Hebel, Pendel, Schiefe Ebene, Elastische Deformation, Fluidik	Wärmepumpe, Kältepumpe, Reibung	Geometrie-abhängigkeit von R, L, C, Induktion, Piezoeffekte	Magneto-elastische Effekte, Magneto-hydrodynamik	Interferometrie, Spannungs-optik, Tribo-lumineszenz
thermisch	Thermoelastizität, Dampfdruck, Explosionsdruck	Thermische Kreisprozesse	Temperatur-abhängigkeit von R, L, C, Thermo-Elektrizität, Pyroelektrizität	Thermo-magnetische Effekte	Wärme-strahlung, Thermo-lumineszenz
elektrisch	Induktion, Lorentz-Kraft, Piezoeffekte, Elektrostriktion	Joulesche Wärme, Peltier-Effekt, Thomsons Effekt	Transformator, Transistor, Influenz	Elektro-Magnetismus, Magnetoelekt. Effekte	Elektro-opt. Kerr-Effekt, Elektro-lumineszenz
magnetisch	Magneto-mechanische Effekte	Magneto-kalorische Effekte	Magneto-elek-trische Effekte, Hall-Effekt	Magn. Suszep-tibilität, magn. Hysterese	Magneto-optische Effekte
optisch	Strahlungsdruck	Absorption	Photoeffekt, Optoelektronik	Magnetoopt. Speicher	Interferenz, Bildwandler, LASER



Transformation of Variable of Interest into measurable Quantities“ gekennzeichnet sind und häufig nach ihrem Entdecker benannt werden.



Einige Beispiele von „physical principles“ für die grundlegenden Sensorkategorien sind im Folgenden genannt (Quelle: MECHATRONICS, McGraw-Hill, 2003).

### Sensorik geometrischer Größen

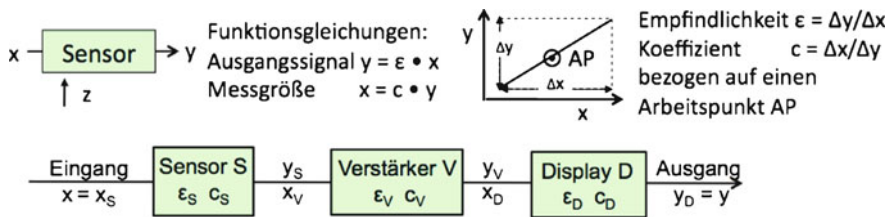
- *Raoult's effect*: Resistance of a conductor changes when its length is changed.  
→ This effect is partially responsible for the response of a strain gauge.
- *Poisson effect*: A material deforms in a direction perpendicular to an applied stress.  
→ This effect is partially responsible for the response of a strain gauge.
- *Snell's law*: Reflected and refracted rays of light at an optical interface are related to the angle of incidence.  
→ Fibre-optical strain sensors are based on this law.

### Sensorik kinematischer Größen

- *Coriolis effect*: A body moving relative to a rotating frame of reference experiences a force relative to the frame.  
→ A coriolis gyrometer detects disturbing torque moments acting detrimental on a moving automobile.
- *Doppler effect*: The frequency received from a wave source (e. g., sound or light) depends on the speed of the source.  
→ A laser doppler velocimeter uses the frequency shift of laser light reflected off of moving bodies, e. g. machinery components or moving automobiles.
- *Gauss effect*: The resistance of a conductor increases when magnetized.  
→ This effect is used to determine lateral or rotational motions of moving components in machines or in automobiles.
- *Hall effect*: A voltage is generated perpendicular to current flow in a magnetic field.  
→ A Hall effect proximity sensor detects when a magnetic field changes due to the motion of a metallic object.

### Sensorik dynamischer Größen

- *Lorentz's law*: There is a force on a charged particle moving in an electric and magnetic field.  
→ The Lorentz force is the basic effect for the operation of motors and generators.



**Abb. 5.17** Die Kennzeichen eines Sensors im stationären Zustand

- *Piezoelectric effect*: Charge is displaced across a crystal when it is strained.  
→ A piezoelectric accelerometer measures charge polarization across a piezoelectric crystal subject to deformations due to a force.

### Sensorik von thermischen Einflussgrößen

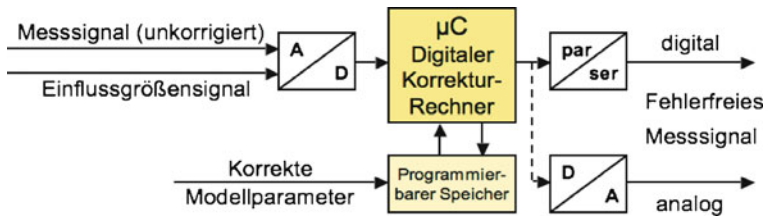
- *Biot's law*: The rate of heat conduction through a medium is directly proportional to the temperature difference across the medium.  
→ This *principle* is basic to time constants associated with temperature transducers.
- *Joule's law*: Heat is produced by current flowing through a resistor.  
→ The design of a hot-wire anemometer is based on this principle.
- *Seebeck effect*: Dissimilar metals in contact result in a voltage difference across the junction that depends on temperature.  
→ Principle of a thermocouple.

## 5.2.2 Funktion und Kennzeichen technischer Sensoren

Ein Sensor ist ein „interdisziplinärer Messgrößenwandler“ zur Umwandlung einer Sensor-Eingangsgröße in eine Sensor-Ausgangsgröße. Die von einem Sensor zu bestimmenden Eingangsgrößen sind meist mechanische Größen mit mechanischen Einheiten, z. B. Kraft  $F$  in Newton und die Ausgangsgrößen sind elektrische Größen, z. B. Spannung  $U$  in Volt oder Strom  $I$  in Ampere. Eine Zeitabhängigkeit der Sensorvariablen kann nicht (wie in der Elektrotechnik üblich) durch Kleinschreibung der Formelzeichen ausgedrückt werden (denn ein kleines  $f$  würde nicht eine zeitabhängige Kraft, sondern eine Frequenz bedeuten). Zeitabhängige Sensorvariablen werden ggf. durch  $X(t)$  oder  $x(t)$  und  $Y(t)$  oder  $y(t)$  dargestellt.

### Funktion von Sensoren

Die Funktion eines Sensors wird gekennzeichnet durch Funktionsgleichungen sowie die Empfindlichkeit an einem betrachteten Arbeitspunkt, siehe Abb. 5.17. Die graphische Darstellung des Zusammenhangs von Messgröße  $x$  und Sensor-Ausgangssignal  $y$  im stationären Zustand ist die *Sensorkennlinie*.



**Abb. 5.18** Prinzip eines Moduls zur Korrektur von Sensor-Einflussgrößen

Wenn ein Sensor mit einem Verstärker und einem Display zusammengeschaltet wird, multiplizieren sich Empfindlichkeit bzw. Koeffizient der drei Elemente. Das Ausgangssignal ist dann  $y = (\varepsilon_S \cdot \varepsilon_V \cdot \varepsilon_D) \cdot x$ , und die Messgröße  $x = (c_S \cdot c_V \cdot c_D) \cdot y$ .

Die Sensorfunktion kann durch Einflussgrößen oder Störgrößen  $z$  beeinflusst werden. Bei der Kennlinie sind Abweichungen (systematische Fehler) möglich, die durch Justieren reduziert werden können:

- Linearitätsabweichung: Abweichung von der Näherungsgeraden,
- Anfangspunkt/Nullpunkt-Abweichung: Verschiebung der Kennlinie,
- Steigungs-/Empfindlichkeits-Abweichung: Verdrehung der Kennlinie.

Bestimmte Einflussgrößen auf die Sensorfunktion, wie z. B. Variation der Umgebungstemperatur können durch Korrekturmodule ausgeglichen werden. Hierzu werden korrekte Modellparameter (Sollgrößen) in einem programmierbaren Speicher abgelegt. Unter Verwendung eines Korrekturrechners lassen sich durch Soll-Ist-Vergleiche und Korrekturen „fehlerfreie“ Messsignale gewinnen, Abb. 5.18.

### Kennzeichen von Sensoren

Für die technische Anwendung müssen Sensoren geeignete Eigenschaften haben, dazu gehören:

- Sensorprinzip,
- Messgröße  $X$ , Messbereich, Güteklasse,
- Ausgangssignal  $Y$ ,
  - analog zu Strom, Spannung,  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $f$ ,
  - analog oder digital codiert,
  - $Y$ - $X$ -Kennlinie (stetig oder quantisiert),
- Statisches und dynamisches Verhalten,
- Schnittstellen-Kompatibilität,
- Herstellungstechnologie, Kosten,
- Qualität, Sicherheit, Zuverlässigkeit,
- Umweltverträglichkeit, Recycling.

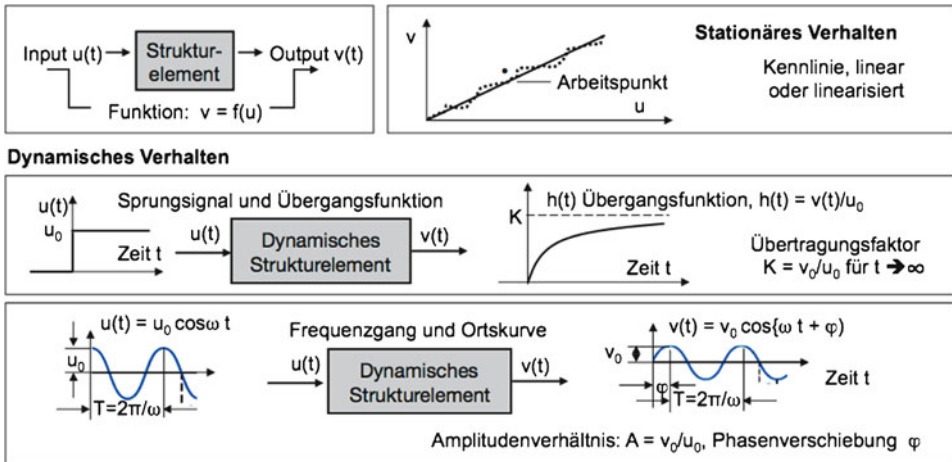


Abb. 5.19 Signalübertragungsverhalten von Systemelementen

### Signalübertragungsverhalten

Ein wichtiges Charakteristikum zur Kennzeichnung der Funktion der Elemente technischer Systeme ist das bereits in Abschn. 2.2 beschriebene Signalübertragungsverhalten. Abbildung 5.19 illustriert das durch Testfunktionen charakterisierte stationäre (zeitunabhängige) Verhalten und das dynamische (zeitabhängige) Verhalten.

### 5.2.3 Messkette

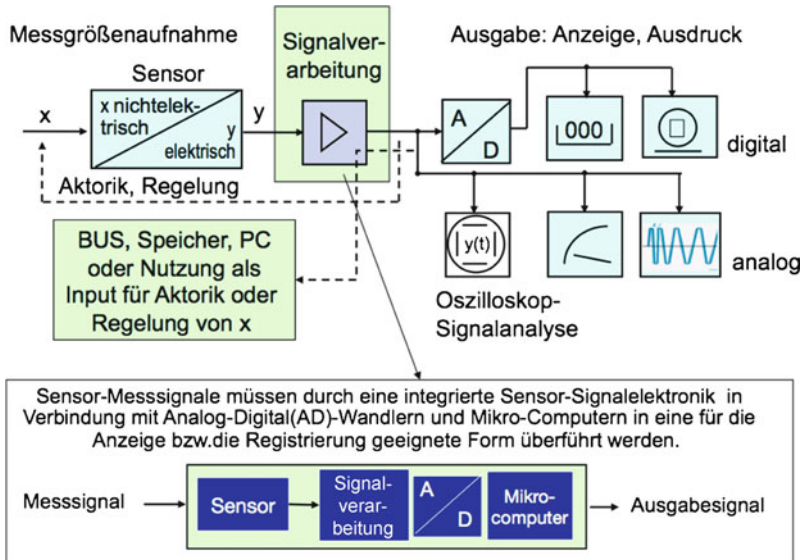
Die Messkette ist die technische Realisierung der in Abb. 5.2 dargestellten grundlegenden Struktur der Messtechnik. Abbildung 5.20 zeigt das Blockschaltbild zur Messgrößenaufnahme, Signalverarbeitung, Ausgabe und die Möglichkeiten zur Nutzung für Speicherung, Aktorik oder Regelung.

#### Signalverarbeitung und Signalausgabe einer Messkette

Die **Signalverarbeitung** in einer Messkette hat folgende – am gegebenen Anwendungsfall speziell auszurichtende – Aufgaben:

Signalaufbereitung:

- Verstärkung (DC, AC),
- Gleichrichtung (auch phasensynchron),
- Signal-Pulsformung,
- Spannungs-/Frequenz-Umsetzung,
- Frequenzfilterung,
- Kennlinien-Linearisierung,



**Abb. 5.20** Messkette: Aufbau und Funktion

- $\Delta$ Temperatur-Kompensation (analog, digital),
- Nullabgleich,
- Servo-Regelung (Kompensationsprinzip),
- kurzschluss- und überspannungssichere Ausgangsstufen,
- Signalmultiplexer,
- Serialisierung der Signale (analog, digital),
- Signal-Codierung,
- Signal-Busschnittstelle, ...

Die AD-Umsetzung muss gewährleisten, dass auch die höchste im Signal vorkommende Frequenz  $f_{\max}$  erfasst und das Shannon'sche Theorem erfüllt wird: Abtastfrequenz  $> 2f_{\max}$ .

Mikrocomputer in der Sensorik müssen in Echtzeit arbeiten und umfassen neben der Zentraleinheit CPU (Central Processing Unit) zur Bearbeitung arithmetischer Operationen und logischer Verknüpfungen spezielle Funktions-Module zur Signalerfassung und zur Erzeugung von Ansteuersignalen für externe Stellglieder, z. B. „Application-specific integrated circuits“ (ASIC).

Die **Signalausgabe** hat die Aufgabe, die mit den verschiedenen Sensoren erfassten Messsignale am Ausgang einer Messkette in aufgabengerechter Form abzugreifen, zu speichern, darzustellen, auszudrucken oder weiter zu verarbeiten. Die Messketten-Ausgangssignale können Funktionen von statischen oder dynamischen Variablen mit wert/zeit-kontinuierlichen oder wert/zeit-diskreten Verläufen sein. Zu unterscheiden sind:

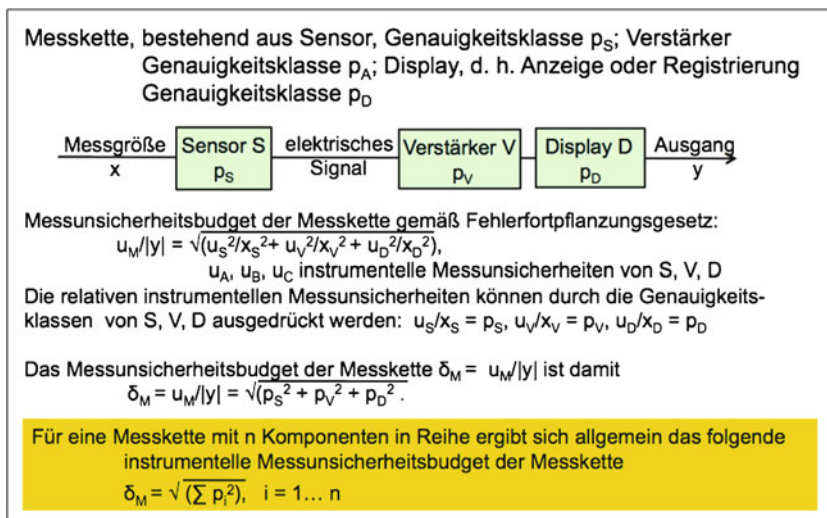
- amplitudenanaloge Signale: Messwert ist die Amplitude der Zeitfunktion.
- zeitanaloge Signale: Messwert ist die Zeitdauer des Impulses.
- frequenzanaloge Signale: Messwert ist die Frequenz einer (periodischen oder stochastischen) Impulsfolge.
- digitale Signale: Messwert ist ein Bitsignal.

Betrachtet man insgesamt den Signaldurchlauf durch eine sensortechnische Messkette, so gibt es – nach einer geeigneten Signalaufbereitung – für die aufgabenbezogene Nutzung von Sensorausgangssignalen folgende Möglichkeiten:

- Anzeige in digitaler oder analoger Form,
- Ausdruck in digitaler oder analoger Form,
- Signalanalyse: Bestimmung von Amplituden- und Frequenzmerkmalen,
- Nutzung für Aufgaben der Aktorik oder der Regelung,
- Nutzung für informationstechnische Aufgaben mittels BUS, Speicher, PC.

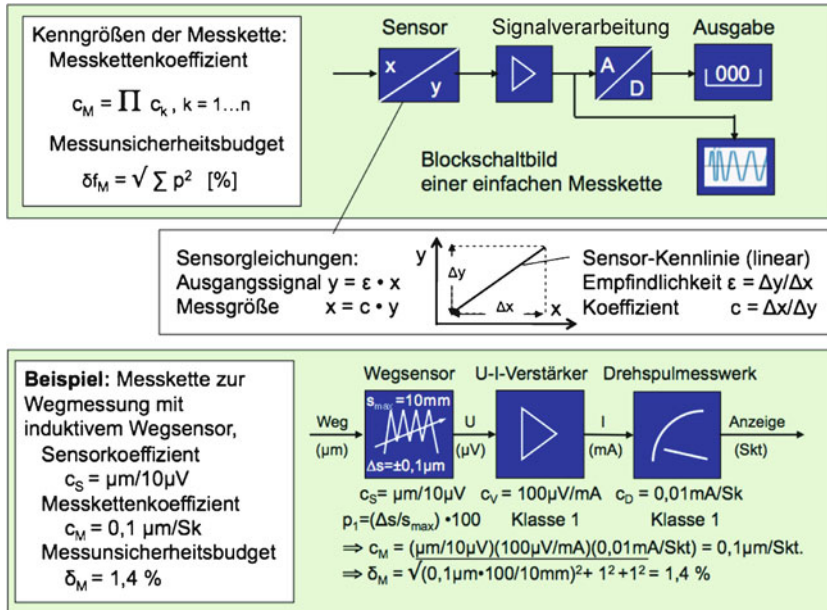
### Messunsicherheitsbudget einer Messkette

Für eine Messkette ist die in Abschn. 5.1.5 definierte instrumentelle Messunsicherheit auf die gesamte Messkette zu erweitern. Die dafür anzuwendende Methodik ist für die einfachste Messkette in Abb. 5.21 beschrieben.



**Abb. 5.21** Methodik zur Bestimmung des Messunsicherheitsbudgets einer Messkette





**Abb. 5.22** Blockschaltbild einer Messkette mit Kenngrößen

### Gesamtdarstellung einer Messkette mit Kenngrößen

Eine zusammenfassende Übersicht über die Darstellung und die Kenngrößen einer Messkette zusammen mit dem Beispiel zur Wegmessung mit einem induktiven Wegsensor zeigt Abb. 5.22.

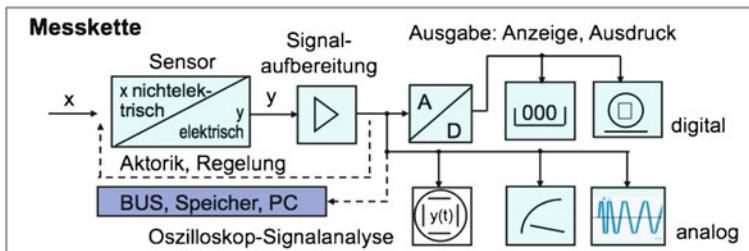
## 5.2.4 Messstrategie der Sensorik

Die Messstrategie der Sensorik kombiniert Metrologie und Sensortechnik und umfasst folgende Schritte:

1. Definition der Messgröße und der metrologischen Bezugsgröße  
 → Internationales Einheitensystem SI, siehe Abschn. 5.1.2,
2. Kennzeichnung der Rahmenbedingungen (Messobjekt, Umweltgrößen),
3. Auswahl eines geeigneten Sensors für die Messgröße, siehe Auswahlmatrix,

Messgröße	Sensor-Ausgangssignal				
	resistiv	induktiv	kapazitiv	Spannung	Strom
<b>Dehnung</b> $\epsilon = \Delta l / l$	Dehnungsmessstreifen (DMS)				Faseroptische Sensoren
<b>Position:</b> Länge l, Weg s Winkel	Potentiometer, Magnetoresistiver Sensor, Gauß-Feldplatte	Tauchanker-Wegsensor Diff.-Transformator	Kapazitiver Wegsensor	Hall-Sensor, Optoelektron. Lichtschranken-Sensor	Wirbelstrom-Sensor
<b>Geschwindigkeit</b> $v = ds/dt$	Magnetoresist. Drehwinkel-S.	Indukt. Drehwinkel-S.		Magnetpol-Drehzahl-S.	Optoelektron. Drehzahl-S.
<b>Beschleunigung</b> $a = dv/dt$	Seismische Sensoren: Masse-Dämpfer-Feder-Systeme, Rückführung auf Wegmessung: resistiv, induktiv, kapazitiv, optoelektronisch, piezoresistiv; Hall/Gauß-Sensorik oder Dehnungsmessung (DMS)				
<b>Kraft F</b> Moment $F \cdot l$	Piezoresistiver Sensor, Dehnstoffsensor	Magneto-elastischer Sensor	Kraftkompensations-Sensor	Rückführung auf Weg (s)-, oder Dehnungs ( $\epsilon$ )-Messung, d. h. $F = f(s)$ oder $F = f(\epsilon)$	
<b>Druck</b> $p = \text{Kraft}/\text{Fläche}$	Piezoresistiver Sensor, Dehnstoffsensor	Magneto-elastischer Sensor	Kapazitiver Drucksensor	Rückführung auf Weg (s)-, oder Dehnungs ( $\epsilon$ )-Messung, d. h. $F = f(s)$ oder $F = f(\epsilon)$	
<b>Temperatur T</b>	NTC und PTC-Widerstände			Thermoelemente	Optoelektron. Pyrometer

4. Strukturierung der Messkette, Details und Beispiel siehe Abschn. 5.2.3,



5. Festlegung des Messablaufs (Einzelmessung, Wiederholmessung, Messreihe),
6. Durchführung der Messung  
→ Metrologische Methodik der Messtechnik, siehe Abschn. 5.1.3,
7. Datenregistrierung, Datenspeicherung, Auswertung,
8. Fehlerbetrachtung und Messunsicherheitsbudget  
→ Messunsicherheit und Messgenauigkeit, siehe Abschn. 5.1.4,
9. Dokumentation und technischer Bericht.

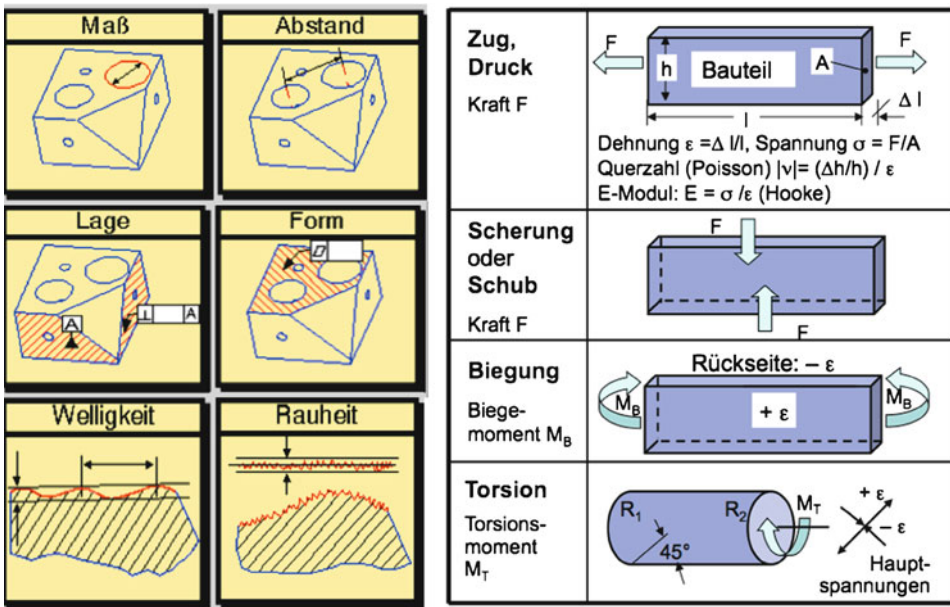
### 5.3 Sensorik geometrischer Größen

Alle technischen Systeme bestehen aus Bauteilen mit geometrisch definierter Gestalt und spezifizierten Werkstoffen. Die Sensorik geometrischer Größen hat die Aufgabe, die Gestaltparameter technischer Bauteile zu kennzeichnen und Veränderungen durch mechanische oder thermische Beanspruchungen zu bestimmen. Abbildung 5.23 gibt eine Übersicht über die grundlegenden Gestaltparameter (links) und mechanischen Beanspruchungen (rechts).

#### 5.3.1 Längenmesstechnik

Die Kennzeichnung der Gestaltparameter technischer Bauteile gemäß Abb. 5.23 erfolgt durch die klassischen Geräte der *Längenmesstechnik* und mit *Oberflächen- und Konturmessgeräten* siehe Abb. 5.24.

In der Längenmesstechnik sollen nach dem Abbeschen Komparatorprinzip Messobjekt und Maßverkörperung in einer Ebene fluchtend angeordnet sein, um Messfehler 1. Ordnung – d. h. eine Messabweichung  $\Delta$  proportional zum Winkel  $\alpha$  einer möglichen Parallaxe zu vermeiden. Abbildung 5.25 illustriert, dass bei einem Messschieber das Abbe'sche Prinzip nicht erfüllt ist. Bei einer Messschraube ist es erfüllt, so dass hier der Fehler um etwa zwei Größenordnungen kleiner ist.



**Abb. 5.23** Gestaltparameter und Beanspruchungsarten von Bauteilen

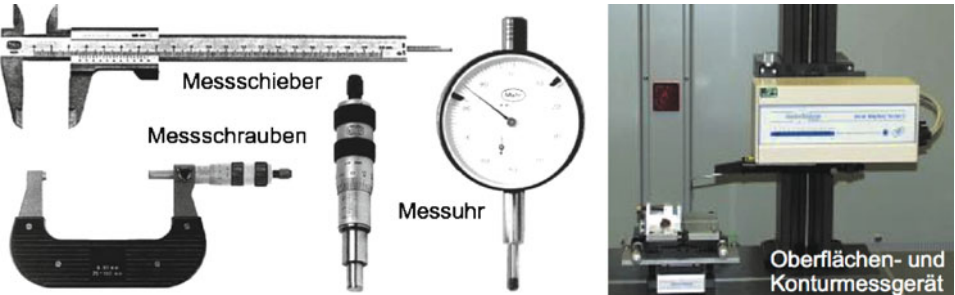


Abb. 5.24 Klassische Messgeräte der Längenmesstechnik



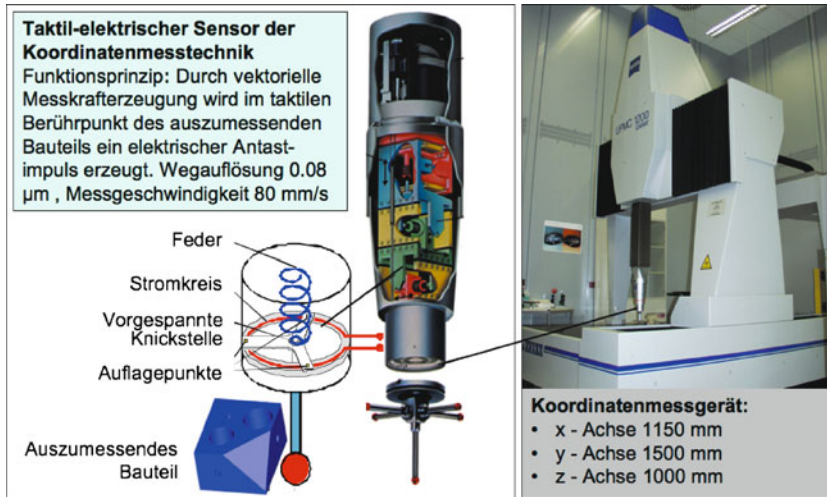
Abb. 5.25 Längenmesstechnik und das Abbe'sche Komparatorprinzip

Koordinatenmesstechnik

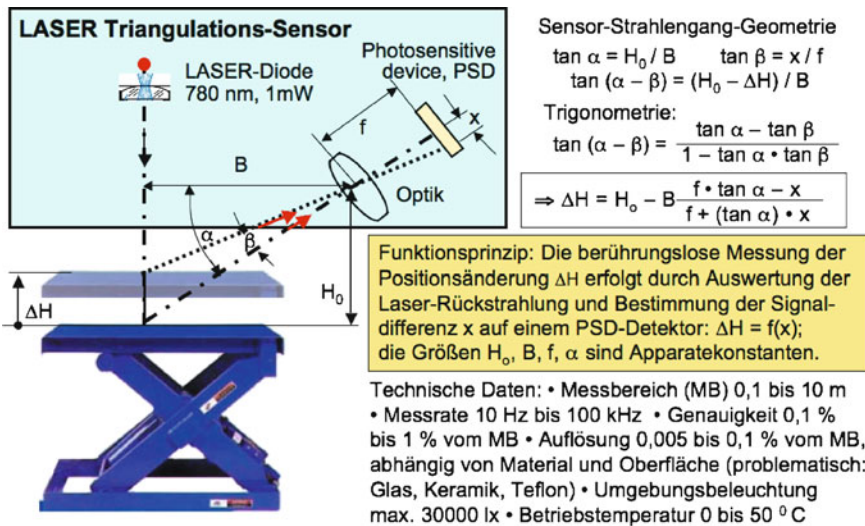
Koordinatenmessgeräte sind Längenmessgeräte mit taktil-elektrischer Sensorik. Das Funktionsprinzip, der Tastsensor und der Geräteaufbau sind in Abb. 5.26 dargestellt.

Berührungslose Längenmesstechnik

Für die mechanisch „berührungslose“ Bestimmung der geometrischen Größen von Bauteilen wurden die Methoden der LASER-Triangulation (Abb. 5.27) und der Computertomografie (Abb. 5.28) entwickelt.



**Abb. 5.26** Übersicht über die Methodik der Koordinatenmesstechnik

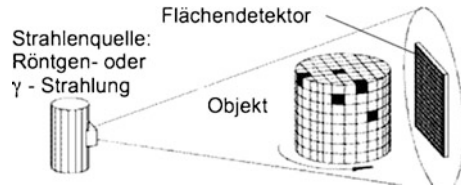


**Abb. 5.27** Das Prinzip der LASER-Triangulation

### Computertomografie

Die Computertomografie ermöglicht mit der Durchstrahlung von Bauteilen Längenmessungen auch an mechanisch unzugänglichen Stellen von komplexen Bauteilen wie z. B. Motorblöcken. Bei der Computertomografie wird das zu untersuchende Bauteil mit einem fein gebündelten Röntgen- oder Gammastrahl in einer bestimmten Querschnittsebene in zahlreichen Positionen und Richtungen (Translation und Rotation des Bauteils) durch-

**Abb. 5.28** Prinzip der Computertomografie



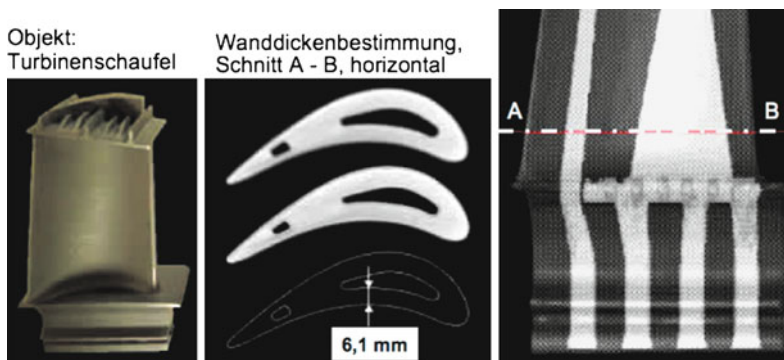
strahlt, siehe Abb. 5.28. Alle Intensitätswerte des durchgetretenen Strahls werden von einem Detektor gemessen und einem Rechner zugeführt, der den lokalen Absorptionskoeffizienten, d. h. die Dichte jedes Querschnittselements im Bauteil berechnet. Als Ergebnis werden berührungslos und zerstörungsfrei gewonnene Querschnittsbilder des Bauteils in beliebigen Schnittebenen konstruiert, auf einem Bildschirm dargestellt, elektronisch gespeichert und als Bilddateien mit Ortsauflösungen bis zu 1  $\mu\text{m}$  (Mikro-CT) ausgegeben.

Die CT wird zur Vermessung komplexer Bauteile in vielen Bereichen der Technik angewendet z. B. im Turbinenbau, siehe Abb. 5.29, oder in der Qualitätssicherung bei Kommunikationstechnologien, siehe Abb. 5.30. Die Computertomografie ermöglicht auch neue, wissenschaftlich Erkenntnisse bei der Vermessung historisch wertvoller Kunstwerke und Kulturgüter, siehe Abb. 5.31.

### Oberflächenmesstechnik

Aufgabe der Oberflächenrauheitsmesstechnik ist allgemein die Erfassung der Mikrogeometrie technischer Oberflächen. Oberflächenmessgrößen können sich in integraler Art auf gesamte Oberflächenbereiche oder auf Profilschnitte, Tangentialschnitte oder Äquidistanzsnitte parallel zur idealen Oberfläche beziehen, siehe Abb. 5.32. Messtechniken sind in Abb. 5.33 zusammengestellt.

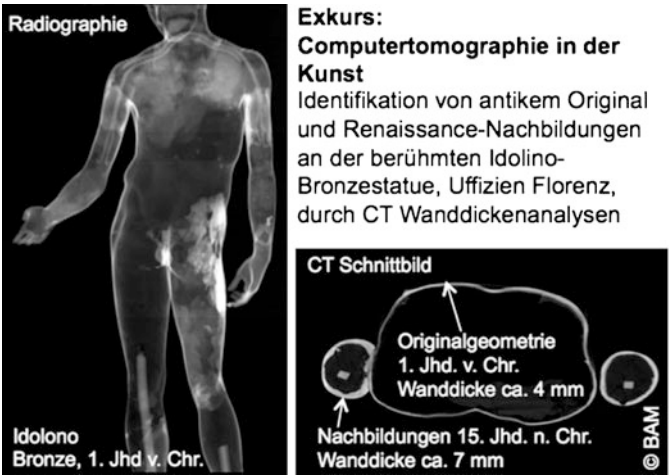
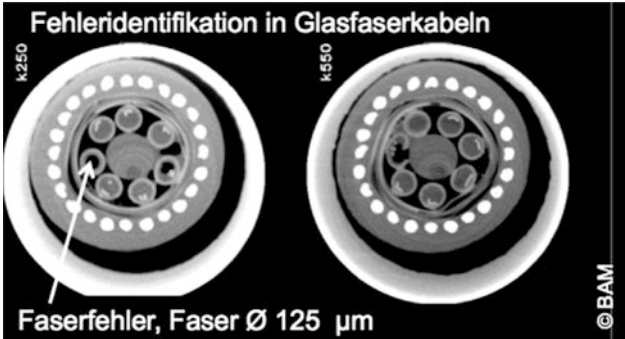
Die *Tastschnitttechnik* besteht aus der Abtastung des Oberflächenprofils durch eine Diamantnadel mit einem Tastsystem, der Aufzeichnung eines überhöhten Profilschnitts mit elektronischen Hilfsmitteln und der Berechnung von Rauheitsmessgrößen. Verfah-



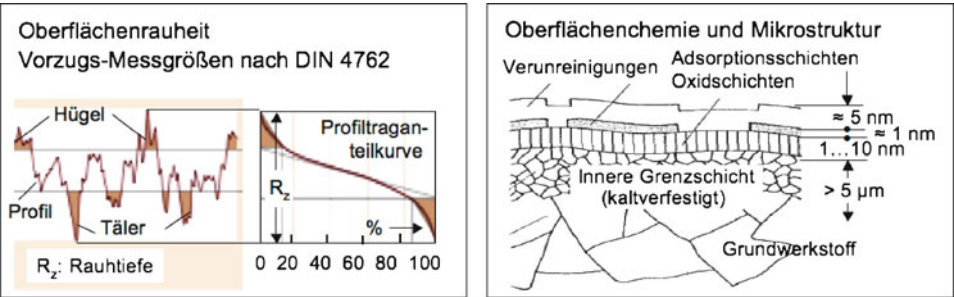
**Abb. 5.29** Computertomografie von Turbinenschaufeln, rechts Vertikalschnitt mit Kühlkanälen



**Abb. 5.30** Computertomografie von Glasfaserkabeln



**Abb. 5.31** Computertomografie in der Kunst: Vermessung einer antiken Bronzestatue



**Abb. 5.32** Kennzeichen technischer Oberflächen

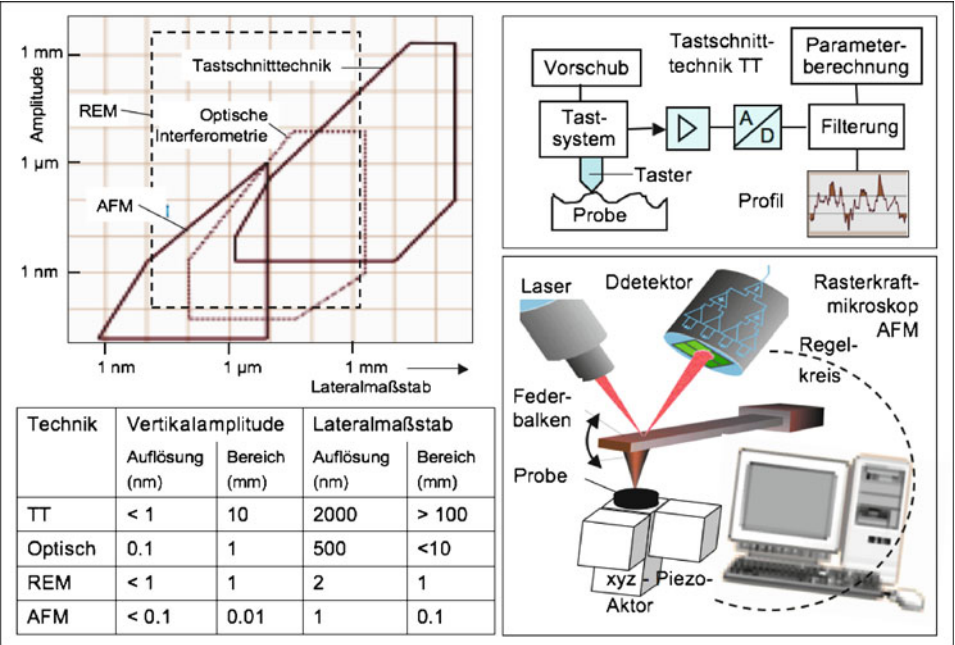


Abb. 5.33 Prinzipien und Kennzeichen von Oberflächenmessverfahren

renskennzeichen: vertikale Auflösung besser als 0,01  $\mu\text{m}$ , horizontale Auflösung begrenzt durch Spitzenradius (z. B. 5  $\mu\text{m}$ ) und Kegelwinkel (z. B. 60°), Problematik der Nichterfassung von „Profil-Hinterschnitten“ und plastischer Kontaktdeformation, z. B. bei der Abtastung weicher Oberflächen.

Das *Interferenzmikroskop* arbeitet mit „optischen Schnitten“ parallel zur auszumessenden Oberfläche. Lichtinterferenzen ergeben ein Höhenschichtlinienbild von (spiegelnden, nicht zu rauen) Oberflächen mit Niveaulinien im Abstand von einer halben Lichtwellenlänge; die messbaren Rautiefenunterschiede betragen ca. 0,01  $\mu\text{m}$ . Durch elektronische Signalbehandlung lassen sich Auflösungen bis in den Nanometerbereich erzielen.

Das Prinzip des *Rasterkraftmikroskops* (AFM, atomic force microscope) ist in Abb. 5.69 dargestellt. Die Tastspitze, meist aus Silizium, die an einem Federbalken ausgeformt wurde, soll mit konstanter Kraft auf der Probe aufliegen. Die dazugehörige elastische Federbalken-Deformation wird mit einem Lichtzeiger gemessen, der den Strahl eines Lasers auf den Federbalken und anschließend auf einen Positionsdetektor projiziert. Ändert sich die Kraft während des Scanvorgangs (Bewegung der Probe in x- und y-Richtung), so ändert sich die Federbalken-Auslenkung und damit die Position des Laserpunkts auf dem Positionsdetektor.

Diese Abweichung wird mittels eines aus Operationsverstärkern (OP) aufgebauten Analogrechners einem Regler zugeführt. Eine Korrekturspannung für die vertikale z-Position wird nach Verstärkung dem z-Piezoversteller zugeführt und gleicht die Abwei-

chung der Sollkraft aus. Steuerung und Datenaufnahme erfolgen über einen Steuerrechner, wobei für jeden Pixelpunkt der Position (x, y) ein Helligkeitswert eingetragen wird, welcher der Korrekturspannung entspricht. Da die Längenausdehnung eines Piezoaktors dieser Spannung proportional ist, entsteht ein Bild der gemessenen Höhen-Topographie.

In Abb. 5.33 sind die Auflösungs- und Messbereiche der beschriebenen Verfahren dargestellt; ergänzend wurden auch die Bereichsdaten der Rasterelektronenmikroskopie (REM) aufgenommen.

### 5.3.2 Faseroptische Sensorik

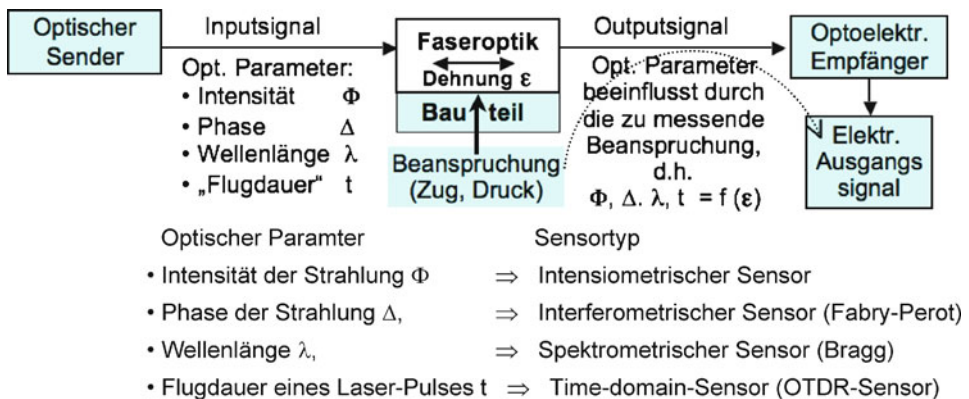
Faseroptische Sensoren basieren auf der Beeinflussung lichtleitergeführter optischer Strahlung durch eine mechanische Beanspruchung (Zug, Druck). Dies bewirkt eine Dehnung  $\varepsilon$  des Lichtleiters und verändert in messbarer Weise optische Parameter im Outputsignal, woraus (unter der Voraussetzung einer mechanisch-optischen Kalibrierung) auf die mechanische Beanspruchung geschlossen werden kann. Abbildung 5.34 nennt die optischen Parameter und die zugehörigen Sensortypen.

Die Funktionsprinzipien, Eigenschaften und technische Daten dieser Sensortypen sind in Abb. 5.35 zusammenfassend dargestellt.

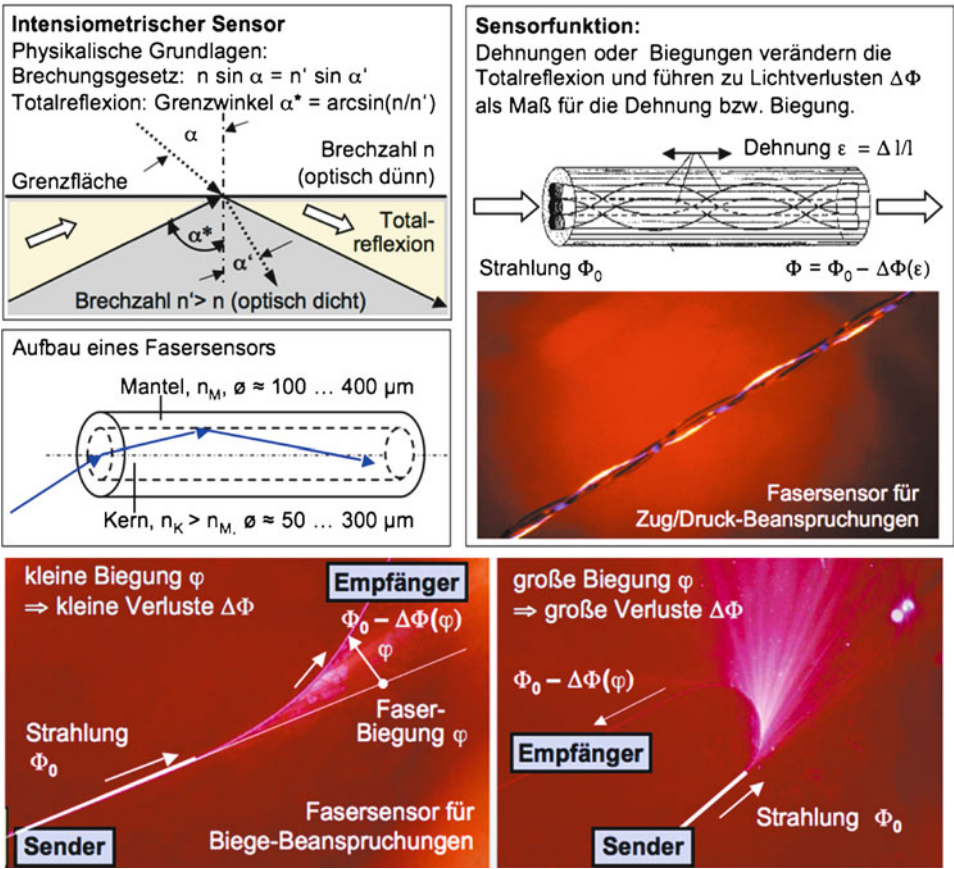
#### Eigenschaften und technische Daten von optischen Fasersensoren

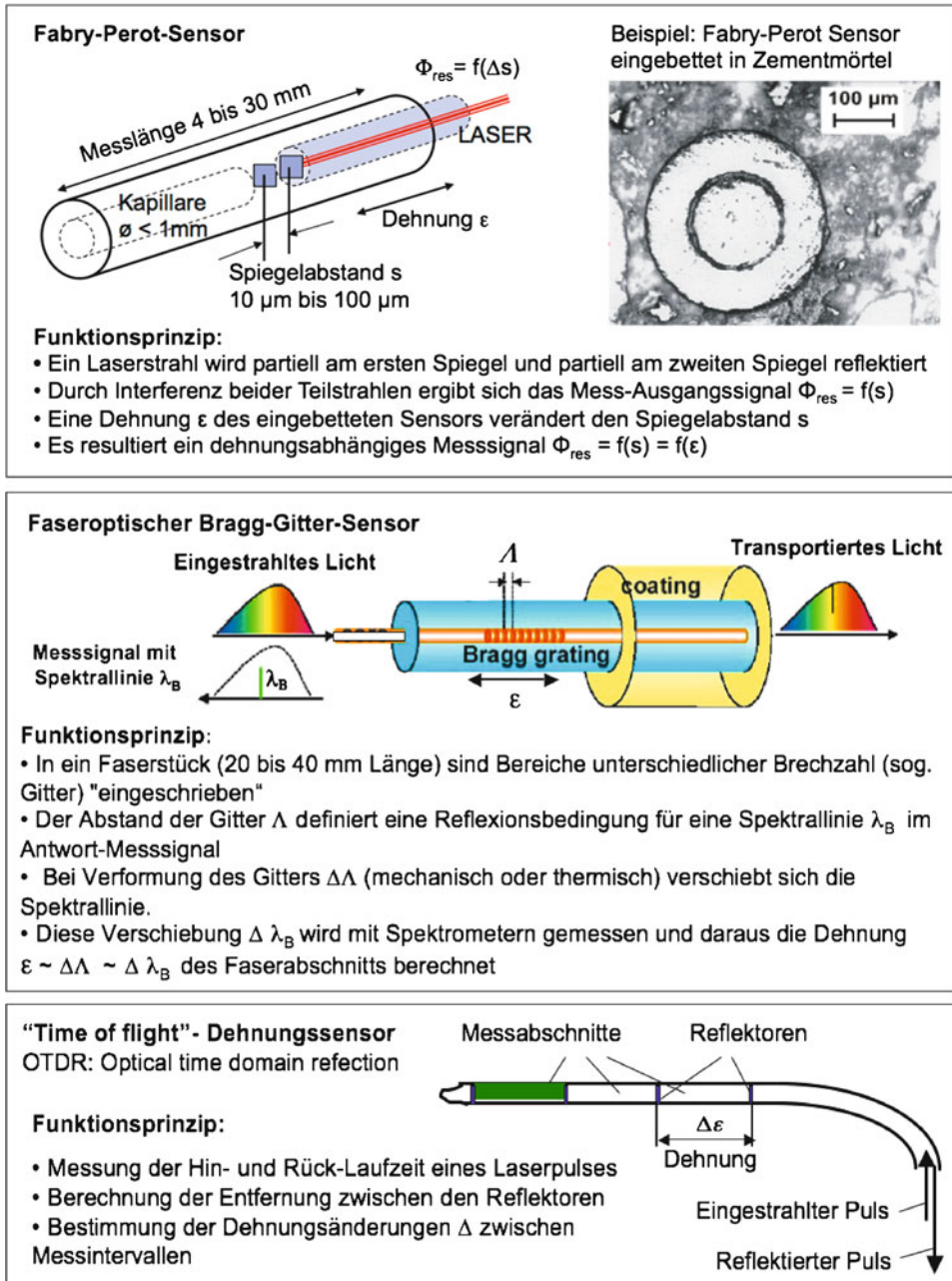
Die für die Anwendung faseroptischer Sensoren wichtigsten Eigenschaften sind:

- geringe Abmessungen, Sensordurchmesser  $< 0,5$  mm, Verwendung als *embedded sensors* für die strukturintegrierte Sensorik möglich,
- keine elektrischen Komponenten am Messort, chemisch inert, energie- bzw. verlustarm, temperaturstabil, daher einsetzbar,



**Abb. 5.34** Funktionsprinzip faseroptischer Sensoren





**Abb. 5.35** Faseroptische Sensoren, Übersicht über die Funktionsprinzipien



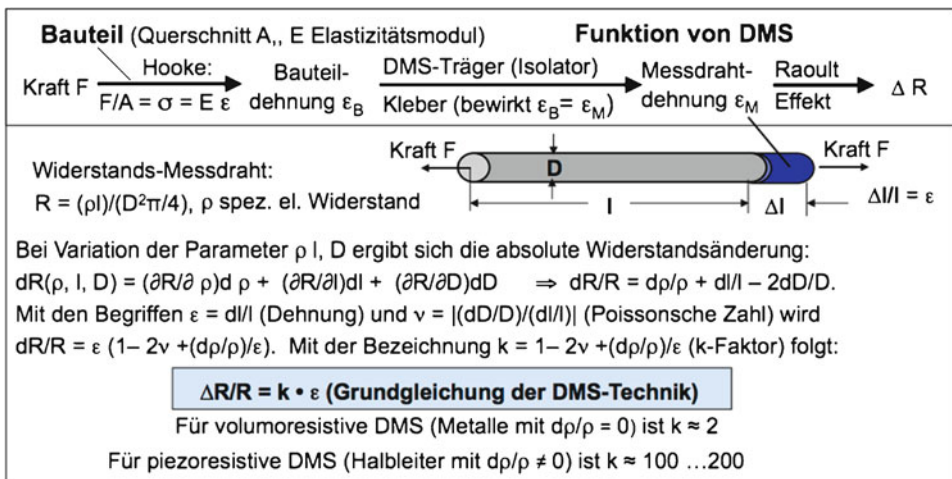
- in elektromagnetischen Feldern,
- in Hochspannungs- und Kernstrahlungsbereichen,
- im Umfeld explosiver und aggressiver Medien,
- bei hohen Temperaturen ( $> 1000^\circ\text{C}$ ),
- hohe statische und dynamische Auflösung bei Dehnungsmessungen (in einigen Fällen  $< 0,1 \mu\text{m/m}$ , d. h. besser als  $10^{-4} \%$ ) und bis zu einigen MHz,
- Sensorfaser kann in mehrere Messabschnitte eingeteilt werden, dadurch (online)-Abfrage der Messgröße nach Ort und Größe,
- Gestaltung räumlich verteilter Fasersensor-Netzwerke,
- Kompatibilität zu elektronischen Bild- und Datenverarbeitungssystemen.

### 5.3.3 Dehnungsmessstreifen (DMS)-Technik

Dehnungsmessstreifen (DMS) bestehen aus dünnen Widerstandsmessdrähten oder -leiterbahnen. Sie werden – elektrisch isoliert in DMS-Trägerfolien – auf mechanisch beanspruchte Bauteile aufgeklebt und wandeln Bauteildehnungen in elektrische Signale um. Die Abb. 5.36 und 5.37 erläutern Funktionsprinzip und Ausführungsarten.

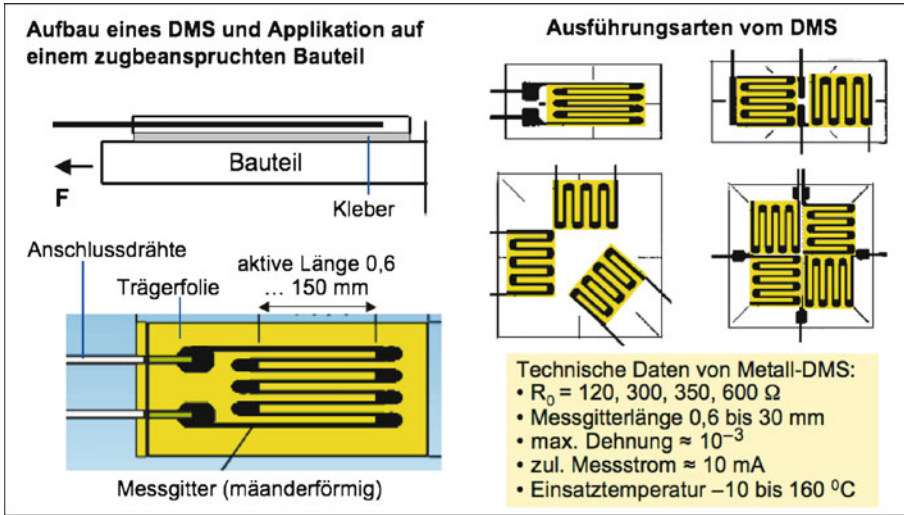
Als Messschaltungen für DMS werden Wheatstone-Brücken in Form von Viertel-, Halb- und Vollbrücken (1, 2 oder 4 aktive DMS) eingesetzt, siehe Abb. 5.38.

Die in Abb. 5.38 dargestellte Eigenschaft einer Wheatstone-Brücke, dass sich gleichsinnige  $\Delta R$  in nicht benachbarten Brückenzweigen addieren und in benachbarten Zweigen subtrahieren, muss bei der DMS-Zuordnung (z. B.  $+\Delta R$  bei Dehnung,  $-\Delta R$  bei Stauchung eines mechanisch beanspruchten DMS) berücksichtigt werden.

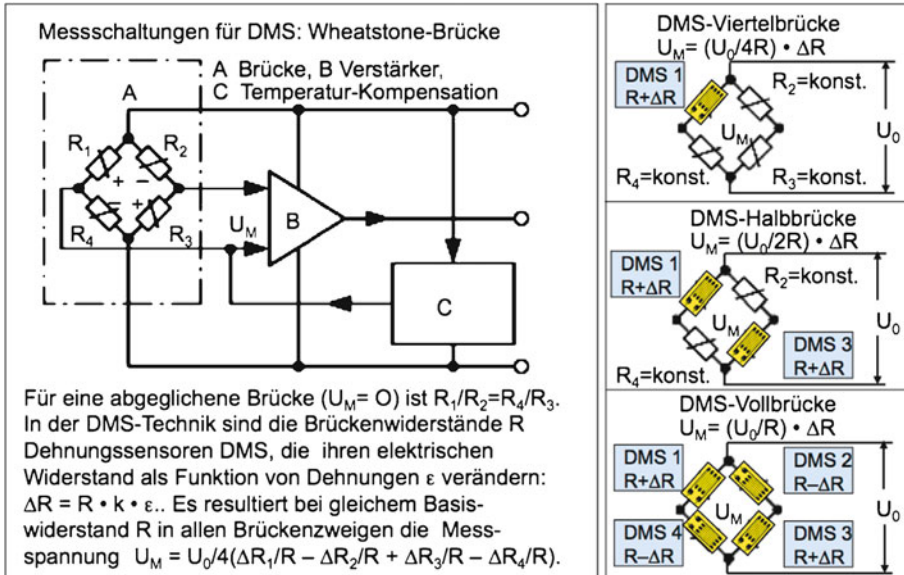


**Abb. 5.36** Funktion von DMS und die Grundgleichung der DMS-Technik

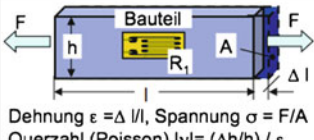
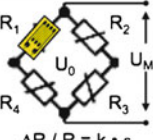
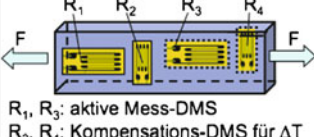
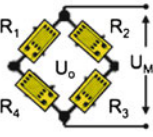
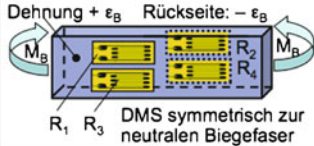
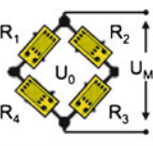
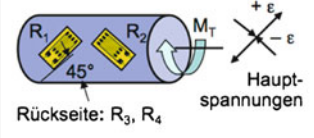
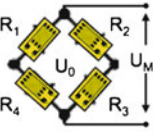




**Abb. 5.37** DMS-Leiterbahnen sind mäanderförmig gestaltet, um große elektrische Widerstandslängen zu erzielen. DMS-Rosetten (rechts) dienen zur flächenhaften Beanspruchungsanalyse



**Abb. 5.38** Blockschaltbild für DMS-Messschaltungen mit Brückenzweigpolaritäten

Beanspr.	Applikation der DMS	Messschaltung	Messgleichung
<b>Zug, Druck</b> Kraft F	 Dehnung $\varepsilon = \Delta l / l$ , Spannung $\sigma = F / A$ Querkzahl (Poisson) $ \nu  = (\Delta h / h) / \varepsilon$	 $\Delta R / R = k \cdot \varepsilon$	$U_M = (U_0 / 4 R_1) \cdot \Delta R_1$ . Bei elastischer Deformation gilt $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (Hooke) mit $\varepsilon < 10^{-3}$ , E: Elastizitätsmodul. Es folgt $U_M = [(U_0 k) / (4 A E)] \cdot F$ $\Rightarrow F = [(4 A E) / (U_0 k)] \cdot U_M$
<b>Zug, Druck</b> Kraft F	 R <sub>1</sub> , R <sub>3</sub> : aktive Mess-DMS R <sub>2</sub> , R <sub>4</sub> : Kompensations-DMS für ΔT		Vollbrücke mit aktiven DMS R <sub>1</sub> und R <sub>2</sub> sowie Kompensations-DMS R <sub>2</sub> und R <sub>4</sub> für ΔT $\Rightarrow U_M = [(U_0 k) / (2 A E)] (1 + \nu) \cdot F$ . Kompensierte Einflussgrößen: $\varepsilon (\Delta T)$ , $\varepsilon$ (Biegung), $\varepsilon$ (Torsion)
<b>Biegung</b> Biegemoment M <sub>B</sub>	 DMS symmetrisch zur neutralen Biegefaser		Vollbrücke mit vier aktiven DMS. Da $+\varepsilon_B$ für R <sub>1</sub> , R <sub>3</sub> ; $-\varepsilon_B$ für R <sub>2</sub> , R <sub>4</sub> $\Rightarrow U_M = U_0 \cdot k \cdot \varepsilon (M_B)$ Kompensierte Einflussgrößen: $\varepsilon (\Delta T)$ , $\varepsilon$ (Zug/Druck), $\varepsilon$ (Torsion)
<b>Torsion</b> Torsionsmoment M <sub>T</sub>	 Rückseite: R <sub>3</sub> , R <sub>4</sub> Hauptspannungen		Vollbrücke mit vier aktiven DMS in Richtung der Hauptspannungen. Da $\Delta R_1, \Delta R_3 = f(+\varepsilon)$ und $\Delta R_2, \Delta R_4 = f(-\varepsilon) \Rightarrow U_M = U_0 \cdot k \cdot \varepsilon (M_T)$ Kompensierte Einflussgrößen: $\varepsilon (\Delta T)$ , $\varepsilon$ (Zug/Druck), $\varepsilon$ (Biegung)

**Abb. 5.39** Dehnungsmessstreifentechnik: Applikation zur Bestimmung der statischen oder dynamischen mechanischen Grundbeanspruchungen Zug, Druck, Biegung, Torsion

Durch einflussgrößenbedingte Dehnungen, z. B.  $\varepsilon = f(\Delta T)$  können den Messwiderständen  $\Delta R$ -Störsignale überlagert sein; sie können durch vorzeichengerechtes Einbringen von „Störgrößen-Kompensations-Widerständen“ mit  $\Delta R = -\Delta R$  (Störung) in einzelne Brückenarme zur Kompensation von Störgrößen genutzt werden.

Die Applikation von DMS zur Bestimmung der grundlegenden ein axialen mechanischen Beanspruchungen von Bauteilen – Zug, Druck, Biegung, Torsion – ist übersichtsmäßig in Abb. 5.39 dargestellt. Zur Bestimmung mehraxialer mechanischer Bauteilbeanspruchungen werden DMS-Kombinationen, z. B. DMS mit zwei unter 90° zueinander angeordneten Messgittern oder DMS-Rosetten mit jeweils drei Messgittern in 0°/45°/90°- oder 0°/60°/120°-Anordnung verwendet.

Dehnungsmessstreifen können überall dort eingesetzt werden, wo durch das Aufkleben von DMS mechanisch-funktionelle Beanspruchungen erfasst und sensortechnisch in elektrische Größen umgesetzt werden können. Die DMS-Technik ist auch das wichtigste Prinzip zur Realisierung von Kraftsensoren aller Art unter Verwendung geeigneter Elastizitätskörper. Bedeutende Anwendungsbereiche sind auch die elektromechanische Wägetechnik und die Bauwerksüberwachung.

## 5.4 Sensorik kinematischer Größen

Kinematik heißt *Bewegungslehre*. Die Bewegungsvorgänge der Technik umfassen Linearbewegungen (Translationen), Drehbewegungen (Rotationen) und deren Überlagerungen. Sie werden gekennzeichnet durch die kinematischen Größen *Weg*  $s$ , *Geschwindigkeit*  $v = ds/dt$  und *Beschleunigung*  $a = dv/dt$ . Dementsprechend umfasst die Sensorik kinematischer Größen die Positionssensorik, die Geschwindigkeitssensorik und die Beschleunigungssensorik.

### 5.4.1 Positionssensorik (Wege, Winkel)

Für die Positionsmesstechnik gibt es heute eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren mit elektrischem Signalausgang. Sie sind zur Übersicht in Abb. 5.40 nach physikalischen Prinzipien mit unterschiedlichen Symbol-Piktogrammen gegliedert.

Die Funktionsprinzipien und technischen Ausführungsarten der Positionssensoren werden im Folgenden zusammen mit einigen Anwendungsbeispielen erläutert.

**Resistive Positionssensoren** nutzen das aus der Elektrotechnik bekannte Potentiometerprinzip. Der zu messende Weg  $s$  bewirkt die Bewegung eines Schleifers auf einem elektrischen Widerstand  $R_0$ , so dass eine elektrische Messspannung  $U_M = f(s)$  abgegriffen werden kann. Bei geeigneter technischer Ausführung besteht ein linearer Zusammenhang zwischen mechanischer Eingangsgröße und elektrischer Ausgangsgröße des Sensors, siehe Abb. 5.41.

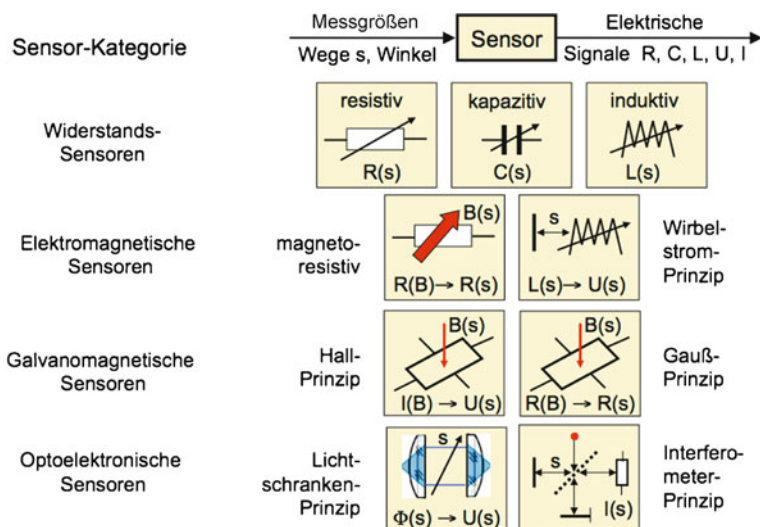
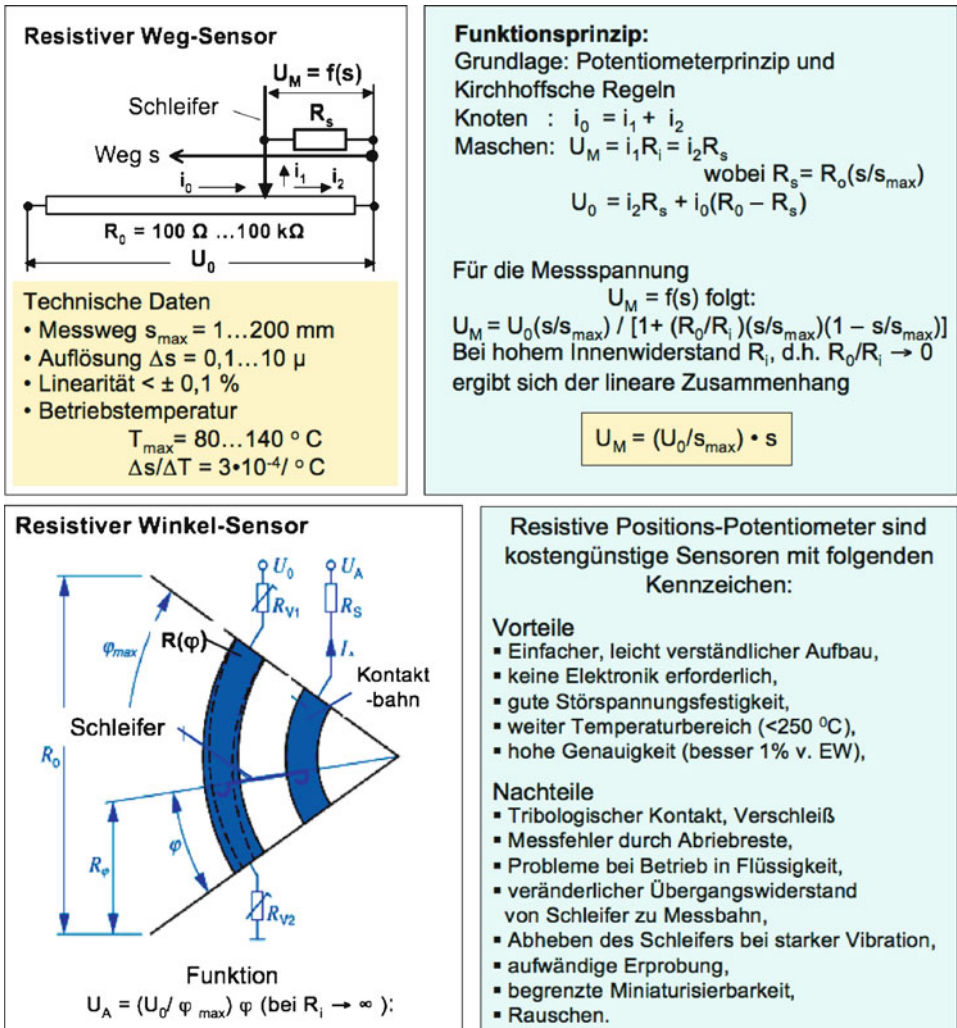


Abb. 5.40 Übersicht über Positionssensoren für Wege und Winkel

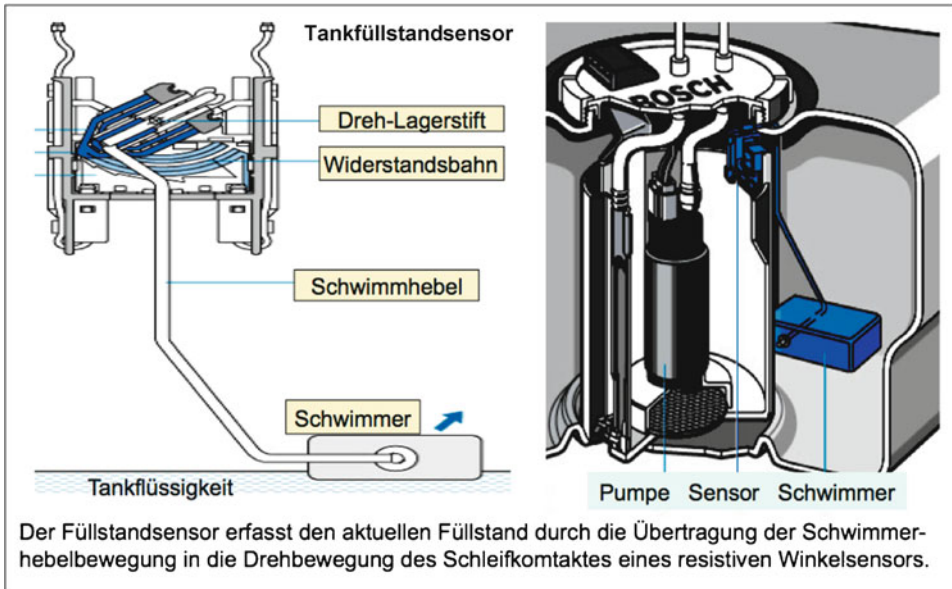


**Abb. 5.41** Funktionsprinzip und Eigenschaften resistiver Weg- und Winkelsensoren

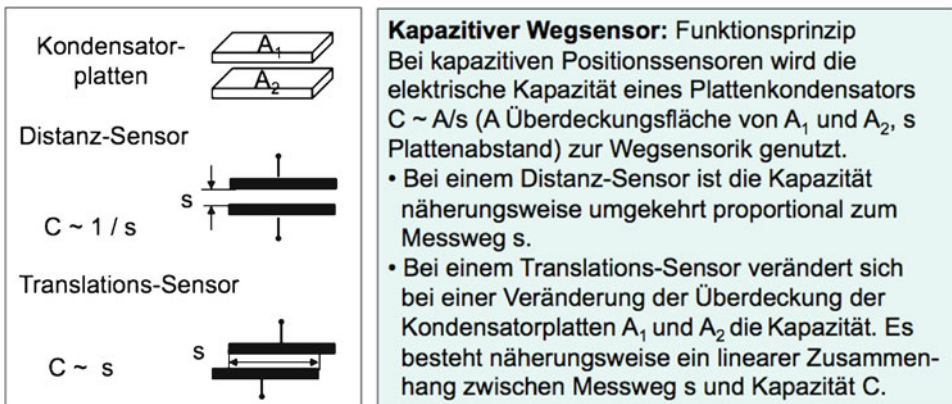
Die „Robustheit“ von Potentiometersensoren ist für zahlreiche technische Anwendungen vorteilhaft. Beispiele aus der Automobiltechnik: Drosselklappenwinkelsensor, Fahrpedalsensor, Tankfüllstandsensor (siehe Abb. 5.42).

Bei **kapazitiven Positionssensoren** wird durch den Messweg  $s$  die elektrische Kapazität  $C$  eines Kondensators (Plattenflächen  $A_1$ ,  $A_2$ ) gesteuert, siehe Abb. 5.43. Die Messspannung ergibt sich gemäß  $U_M = Q/C$  und die Ladung  $Q$  ist das Integral des Stromes über der Zeit  $Q = \int I \cdot dt$ . Kapazitive Positionssensoren benötigen wegen der Problematik von Störkapazitäten bei den Anschlussleitungen spezielle Messschaltungen und ggfs. eine





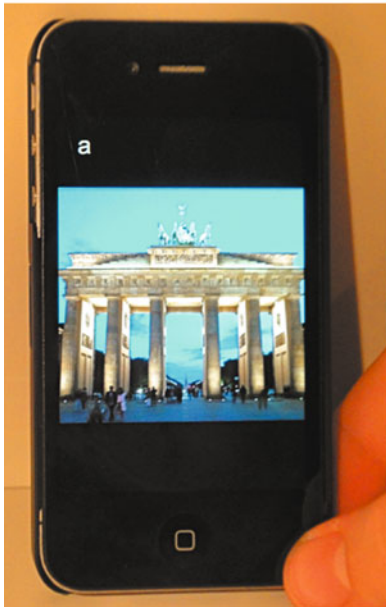
**Abb. 5.42** Tankfüllstandsensor als Beispiel der Anwendung resistiver Positionssensoren



**Abb. 5.43** Funktionsprinzip kapazitiver Positionssensoren

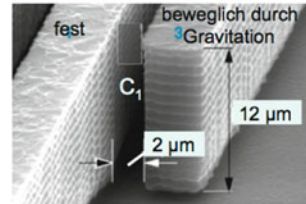
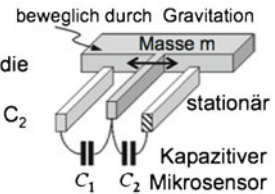
elektronische Signalverarbeitung zur Linearisierung ihrer durch das physikalische Prinzip bedingte nichtlinearen Kennlinien.

Kapazitive Sensoren reagieren auf Abstandsänderungen der Kondensatorplatten im Mikrometerbereich und haben Anwendungen in der Mikrosystemtechnik. Ein Beispiel ist die Verwendung von kapazitiven Mikrosensoren als Signalgeber für die Bildlagenautomatik in Smartphones, siehe Abb. 5.44. Die Bildlageautomatik nutzt die Wirkung der stets senkrecht gerichteten mechanischen Gravitation.

**Smartphone mit Bildlageautomatik durch kapazitiven Mikrosensor**


(a) Gerät senkrecht und Sensor waagrecht. Keine Gravitationskraftwirkung auf die bewegliche Masse  $m$ ; die elektrischen Kapazitäten  $C_1, C_2$  sind gleich, d. h.  $\Delta C = 0$ .

(b) Gerät waagrecht und Sensor senkrecht. Die Gravitationskraft wirkt auf die bewegliche Masse, so dass  $C_1 \neq C_2$ , die Differenz  $\Delta C$  bewirkt das Steuersignal für das waagerechte Bild.



**Abb. 5.44** Ein kapazitiver Positions-Mikrosensor steuert die Bildlageautomatik in Smartphones

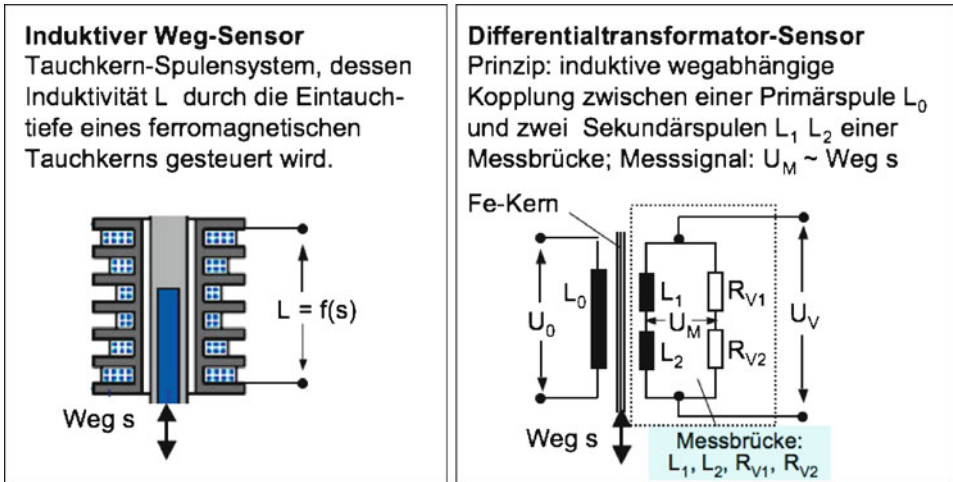
**Induktive Positionssensoren** nutzen die weg- oder winkelabhängige Beeinflussung der Induktion von wechsellspannungsgespeisten Spulensystemen durch eine Verschiebung von Eisenkernen. Abbildung 5.45 illustriert die elementaren Funktionsprinzipien. Typische technische Daten:

- Messweg  $s = 0,1 \dots 100 \text{ mm}$ ,
- Auflösung  $\Delta s \approx 0,1 \mu\text{m}$ ,
- Linearitätsabweichung  $< 1 \%$ ,
- Betriebstemperatur  $-50 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

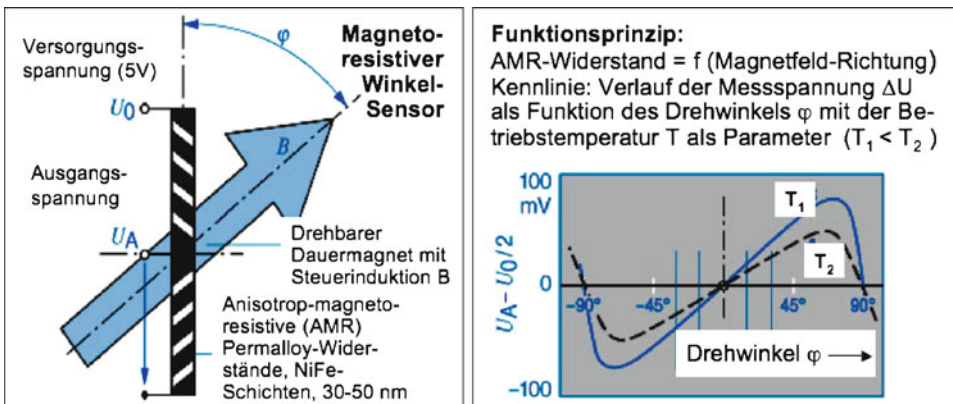
**Magnetoresistive Positionssensoren** sind Winkelsensoren, deren elektrischer Widerstand durch einen Magnetisierungsvektor beeinflussbar ist, siehe Abb. 5.46. Ist der Magnetisierungsvektor (z. B. in Form eines Dauermagneten) mit einem Bauteil fest verbunden, so kann mit dem Sensor berührungslos der Drehwinkel des Bauteils bestimmt werden. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist der Kfz-Lenkradwinkelsensor, siehe Abb. 5.47.

**Wirbelstrom-Positionssensoren** nutzen den physikalischen Effekt, dass die Induktivität und der Wirkwiderstand einer mit hochfrequentem Wechselstrom gespeisten Spule durch die Annäherung eines scheibenförmigen Leiters (z. B. aus Al oder Cu) beeinflusst





**Abb. 5.45** Funktionsprinzipien induktiver Positionssensoren

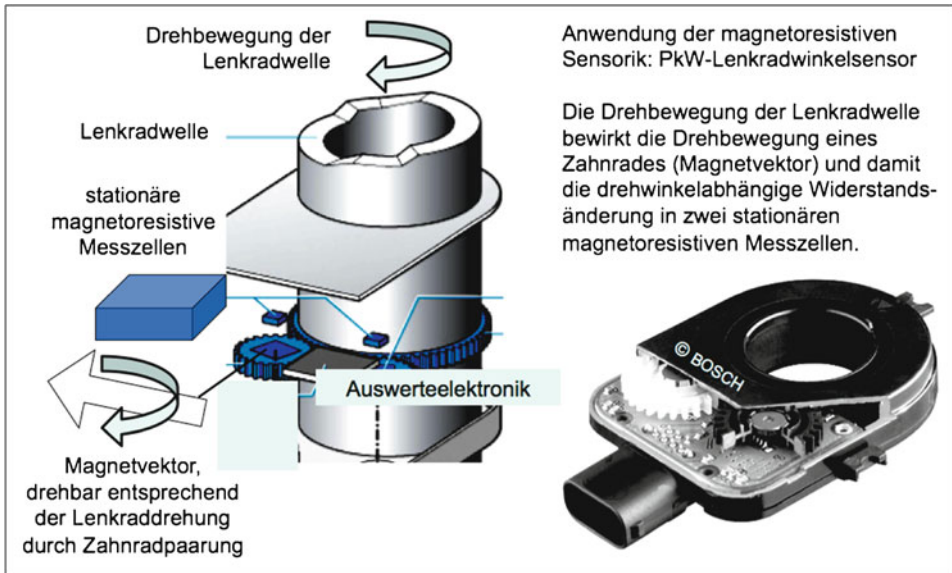


**Abb. 5.46** Funktionsprinzip eines magnetoresistiven Drehwinkelsensors

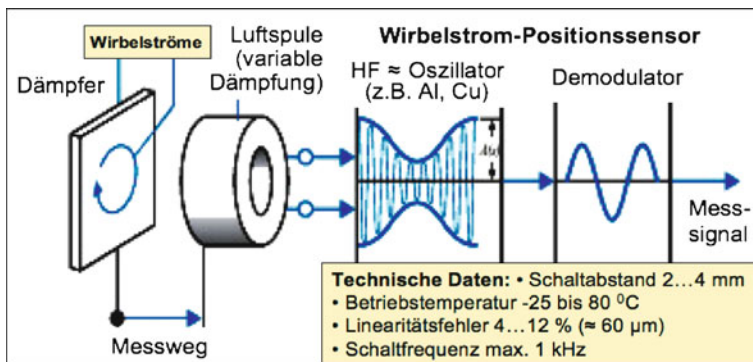
werden. Ursache dafür sind die Wirbelströme, die in der Dämpferscheibe durch die zunehmende magnetische Kopplung entstehen.

Die Position (Messweg) der Dämpferscheibe kann aus der Veränderung der Induktivität oder des Wirkwiderstandes bestimmt werden. Das Prinzip ist in Abb. 5.48 dargestellt. Es kann in variabler Weise zur berührungslosen Positionsbestimmung und insbesondere als Signalgeber für Näherungsschalter angewendet werden.

Galvanomagnetische Sensoren erfassen als **Hall-Sensoren** oder **Feldplatten-Sensoren** die Bewegung eines magnetischen Induktionsfeldes  $B$ , das auf eine stromdurchflossene Sensor-Feldplatte (SFP) wirkt. Abbildung 5.49 zeigt das physikalische Prinzip: Eine Hall-Spannung  $U_H$  quer zum Feldplattenstrom  $I$  entsteht durch Elektronenablenkung wenn



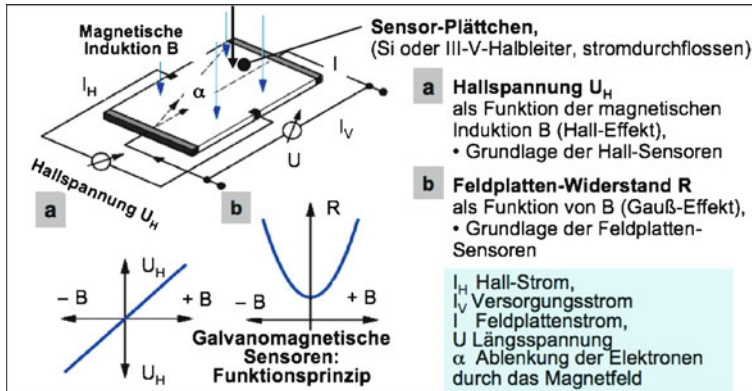
**Abb. 5.47** Anwendung eines AMR-Drehwinkelsensors als Pkw-Lenkradwinkelsensor



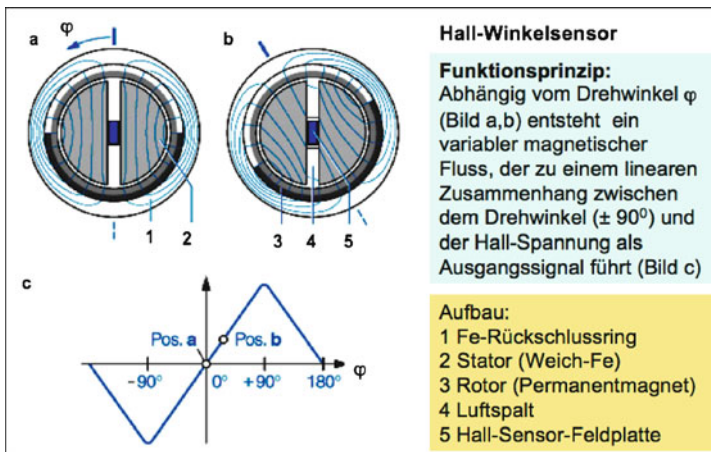
**Abb. 5.48** Funktionsprinzip und technische Daten eines Wirbelstromwegsensors

eine SFP senkrecht von der magnetischen Induktion  $B$  eines bewegten Bauteils durchsetzt wird. Dabei verändert sich gleichzeitig der SFP-Widerstand nach einer etwa parabelförmigen Kennlinie (Gauß-Effekt). Wenn die magnetische Induktion  $B$  von der Position  $s$  des bewegten Bauteils abhängt, gilt  $U_H = f(s)$  und  $R = f(s)$ , d. h. der Hall-Effekt und der Gauß-Effekt können für berührungslose Positionssensoren verwendet werden.

Galvanomagnetische Sensoren können als Rotations- oder Translations-Sensoren gestaltet werden. Abbildung 5.50 zeigt die technische Ausführung eines Hall-Winkelsensors (moveable magnet), bestehend aus einem drehbaren Magnetring und halbkreisförmigen Leiterstücken, die den Stator bilden.



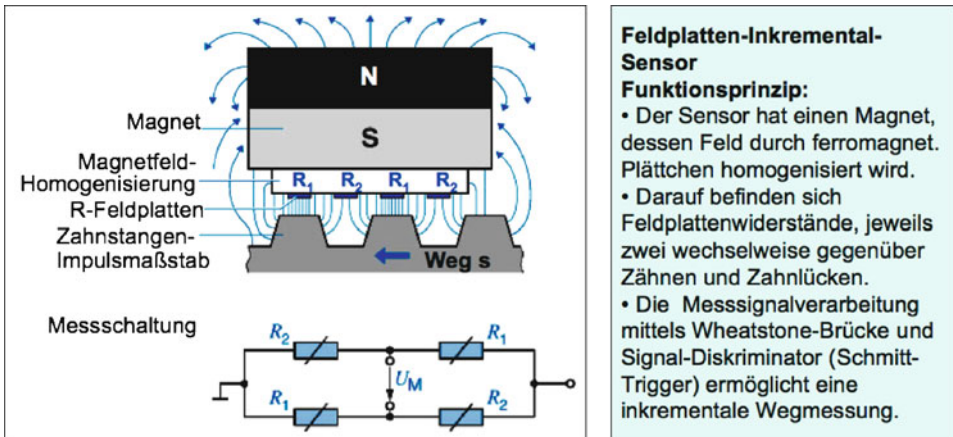
**Abb. 5.49** Galvanomagnetisches Prinzip: Grundlage der Hall- und Feldplatten-Sensoren



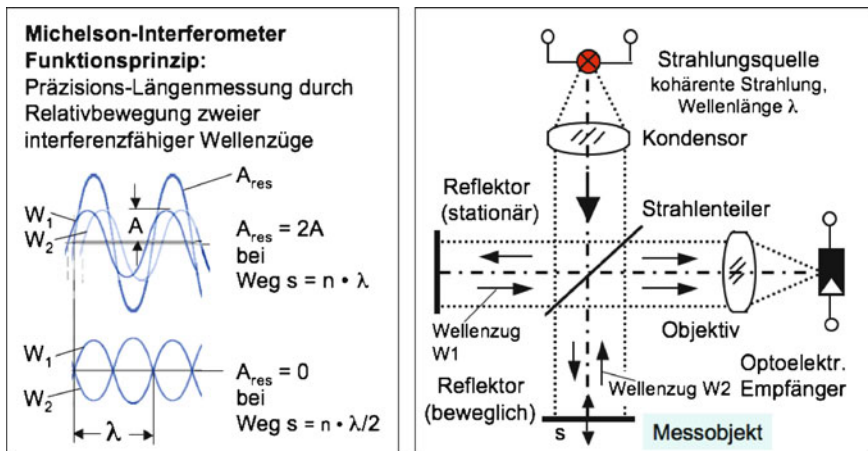
**Abb. 5.50** Technische Ausführung eines Hall-Winkelsensors

Die technische Ausführung eines Feldplattensensors für Translationsbewegungen ist in Abb. 5.51 dargestellt. Das Sensorsystem besteht aus der Kombination eines Dauermagneten mit vier Feldplatten, die eine Vollbrücke bilden und einer Messsignalverarbeitung mit Digitalausgang. Es liefert Informationen über Translationsbewegungen in digitaler Form und ist damit für numerisch gesteuerte oder geregelte Bewegungssysteme geeignet.

**Optoelektronische Bewegungssensoren** bestimmen Wege oder Winkel durch eine messtechnisch auszuwertende Beeinflussung optoelektronischer Strahlengänge. Beim Michelson-Interferometer, Abb. 5.52, ist das Empfängersignal in Abhängigkeit einer Translation  $s$  des beweglichen Reflektors ein  $\sin^2$ -Signal mit der Periode  $\lambda/2$ . Bei Verwendung eines HeNe-Lasers ( $\lambda = 0,6238 \mu\text{m}$ ) und einer Interpolation um den Faktor 1000 können Wege mit einer Auflösung bis zum nm-Bereich gemessen werden. Anwendungen: z. B. Ultrapräzisionsmaschinen, Waferstepper-Messsysteme, Mikrolithografiegeräte.

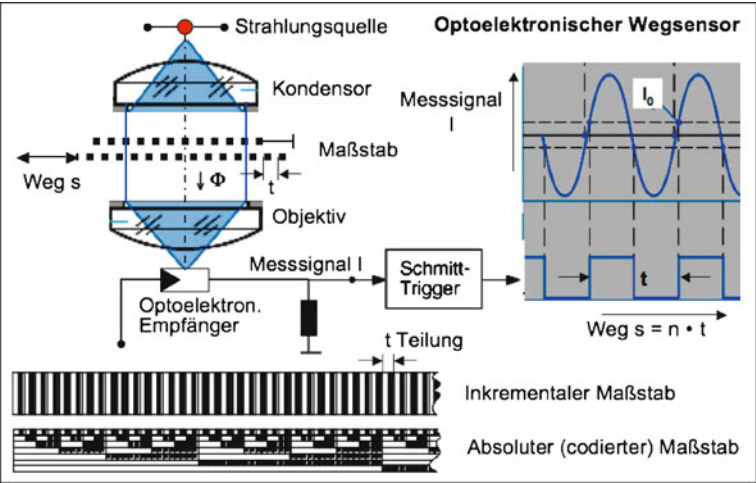


**Abb. 5.51** Technische Ausführung eines Feldplattensensors zur Erfassung von Translationen



**Abb. 5.52** Optoelektronischer Wegsensor: Interferometerprinzip

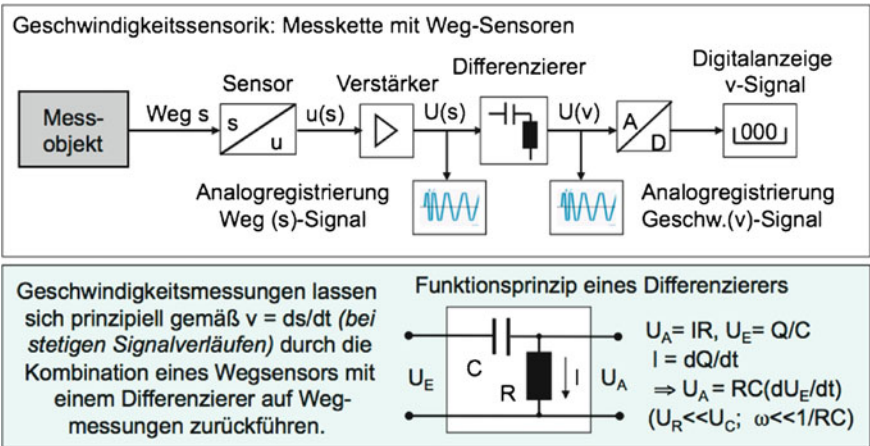
Lichtschranken-Wegsensoren, Abb. 5.53, haben inkrementale oder codierte Maßstabteilungen auf Glas, Glaskeramik oder Stahl mit Teilungsperioden bis 512 nm. In gekapselter Ausführung sind sie das Standardmesssystem für Werkzeugmaschinen.



**Abb. 5.53** Optoelektronischer Wegsensor: Lichtschrankenprinzip

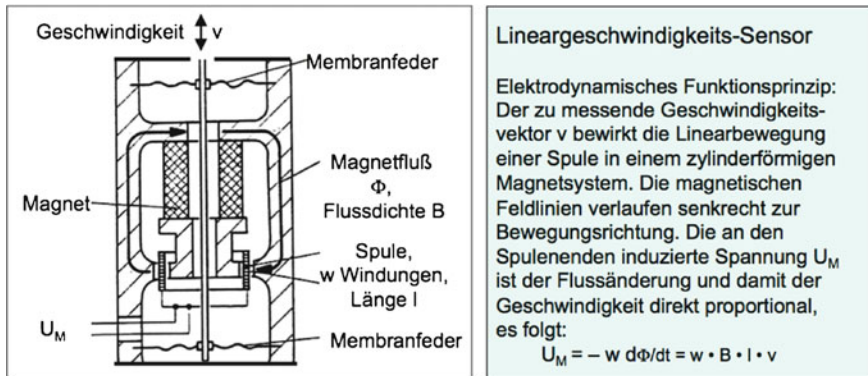
**5.4.2 Geschwindigkeitssensorik**

Die Geschwindigkeitsmesstechnik für mechanisch bewegte Bauteile technischer Systeme kann – entsprechend der Definition der Geschwindigkeit  $v = ds/dt$  als mathematische Ableitung des Weges  $s$  nach der Zeit  $t$  – auf die Wegmesstechnik zurückgeführt werden. Hierzu werden Wegmesssignale (z. B. eines induktiven Wegsensors) elektronisch differenziert, Abb. 5.54. Störsignale, die gegebenenfalls ebenfalls differenziert werden, müssen durch gute Abschirmung und Filterung eliminiert werden.



**Abb. 5.54** Messkette zur Geschwindigkeitsmessung mit Wegsensoren





**Abb. 5.55** Elektrodynamischer Wegsensor für Lineargeschwindigkeiten

Für die direkte Messung von Linear-Geschwindigkeiten technischer Objekte kann das elektrodynamische Prinzip angewendet werden, siehe Abb. 5.55.

### Geschwindigkeitssensorik in der Verkehrsüberwachung

Die Geschwindigkeitssensorik hat eine wichtige Aufgabe im Straßenverkehr. Zur amtlichen Verkehrsüberwachung dürfen in Deutschland nur geeichte Geschwindigkeitsmessgeräte eingesetzt werden. Voraussetzung für jede Eichung ist, dass die betreffende Bauart von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zur Eichung zugelassen ist. Tabelle 5.4 gibt eine Übersicht über die Sensormethoden zur Verkehrsüberwachung.

### Drehzahlsensorik

Drehzahlen und Rotationsgeschwindigkeiten können mit verschiedenen Sensortechniken ermittelt werden. Abbildung 5.56 zeigt Ausführungsarten als induktiver Drehzahlsensor, Hall-Rotationssensor und Multipol-Drehzahlsensor.

## 5.4.3 Beschleunigungssensorik

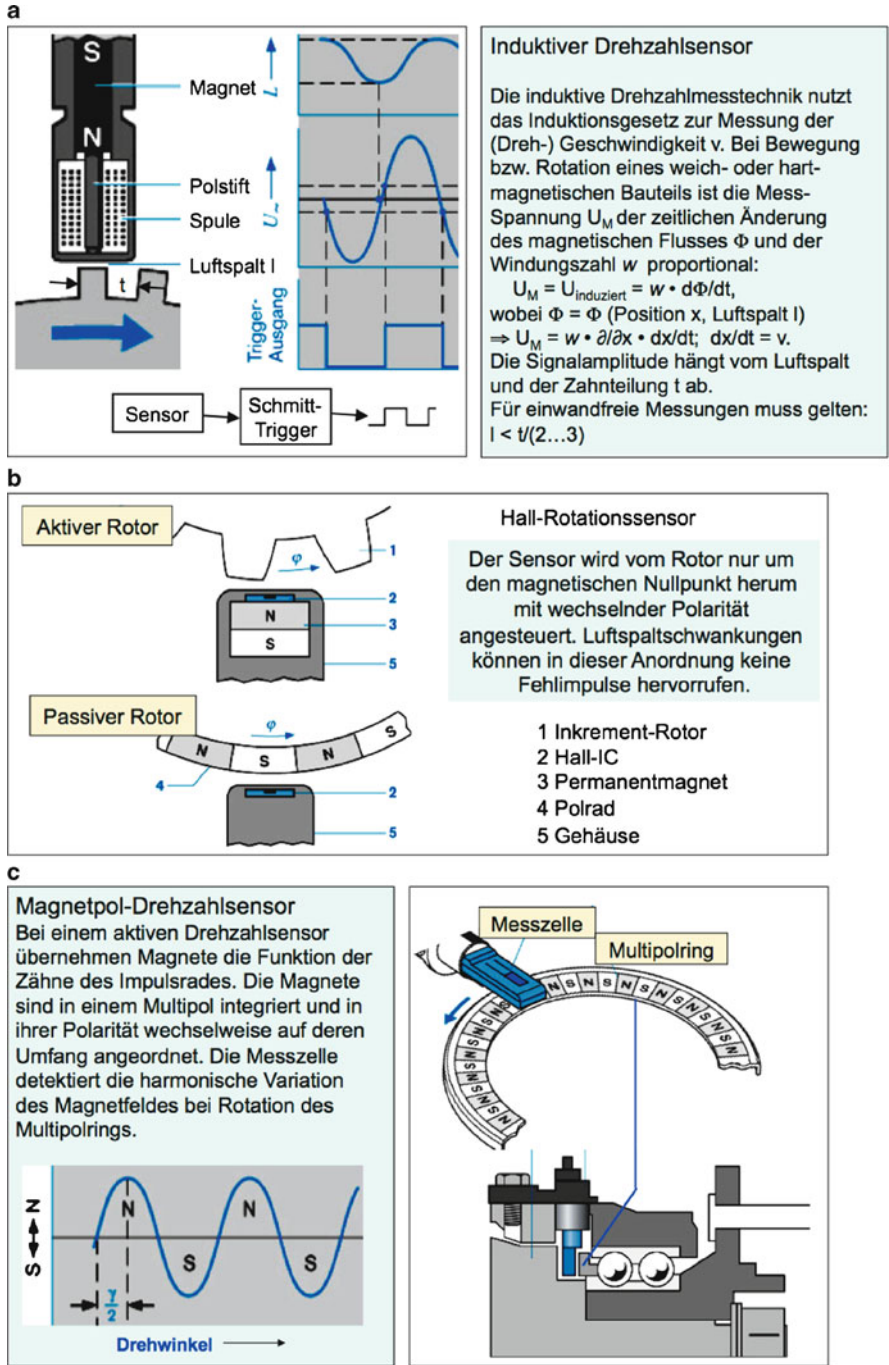
Beschleunigungen sind sowohl kinematisch als auch dynamisch von großer Bedeutung, da bewegte Massen  $m$  nach Newton gemäß  $F = m \cdot a$  mit Kräften  $F$  verbunden, und damit wichtige Parameter sowohl für die Funktion als auch für die strukturelle Stabilität technischer Systeme sind. Für Beschleunigungsmessungen werden seismische Sensoren verwendet, ihr Funktionsprinzip ist in Abb. 5.57 beschrieben.

Die technischen Ausführungen seismischer Sensoren können nach der inneren Messtechnik zur Bestimmung der Auslenkung der seismischen Masse unterschieden werden. Den Aufbau eines mikromechanischen Beschleunigungssensors nach dem kapazitiven Prinzip zeigt Abb. 5.58.

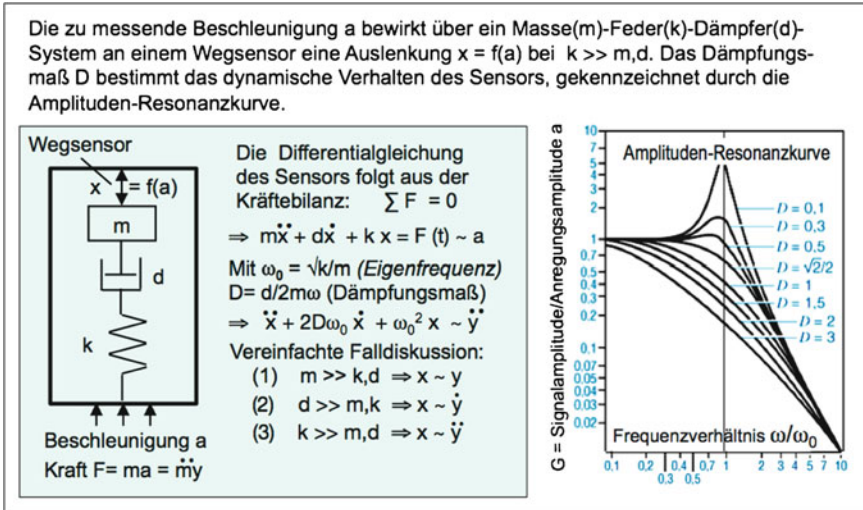


**Tab. 5.4** Sensorprinzipien zur Geschwindigkeitsüberwachung im Straßenverkehr

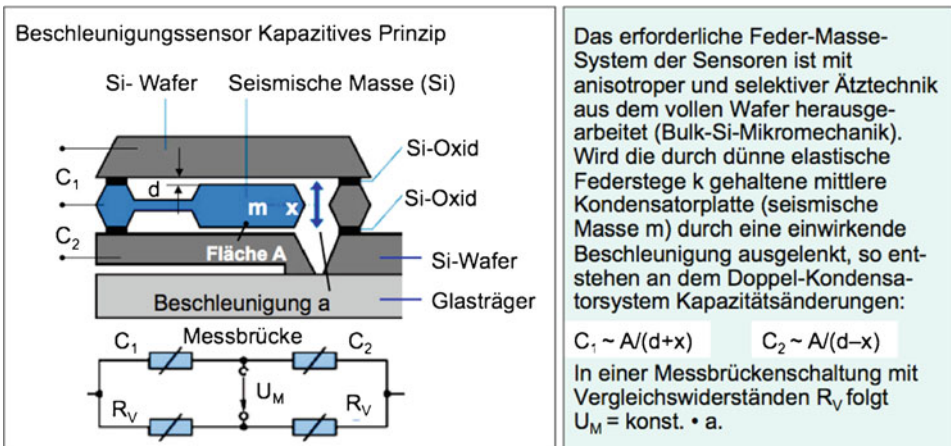
Sensorprinzip	Funktion und Anwendung
Radaranlage	Vom Gerät ausgesendete Radarstrahlen werden vom Fahrzeug reflektiert, die Frequenz des reflektierten Strahls ist aufgrund des Dopplereffektes größer (wenn das Fahrzeug auf das Gerät zufährt) oder kleiner (wenn es vom Gerät wegfährt) als die des ausgesendeten. Aus der Frequenzdifferenz wird die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet
Laseroptische Sensoren	Das Gerät sendet eine Folge von Laserimpulsen aus und empfängt den vom Fahrzeug reflektierten Anteil. Für jeden dieser Impulse wird die Laufzeit bis zum Wiedereintreffen gemessen und daraus jeweils unter Verwendung der bekannten Lichtgeschwindigkeit die zugehörige Entfernung zum Fahrzeug berechnet
Laserscanner	Laserscanner ermöglichen die Geschwindigkeitsmessung auf mehreren Fahrstreifen gleichzeitig. Während des Scans sendet das Gerät jeweils kurze Laserimpulse aus und empfängt den vom jeweiligen Fahrzeug reflektierten Anteil. Für jeden dieser Impulse wird die Laufzeit bis zum Wiedereintreffen gemessen und daraus unter Verwendung der bekannten Lichtgeschwindigkeit die zugehörige Entfernung zum Fahrzeug berechnet
Lichtschrankenmessgerät	Mehrere quer zur Fahrbahn ausgerichtete Lichtschranken sind hintereinander mit bekanntem Abstand aufgebaut. Das Fahrzeug liefert beim Unterbrechen jeder Lichtschranke ein elektrisches Signal. Aus den Zeitabständen zwischen den Signalen und dem Lichtschrankenabstand wird die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet
Faseroptischer Messfühler	Faseroptische Messfühler nutzen den Effekt, dass die Übertragungsdämpfung bei Lichtleitfasern ansteigt, wenn beim Überfahren eines Fahrzeugs Druck auf sie ausgeübt wird. Mehrere faseroptische Messfühler sind hintereinander mit bekanntem Abstand in die Fahrbahn eingelassen. Das Gerät misst die Zeitabstände zwischen den durch den Fahrdruck ausgelösten Sensorsignalen und berechnet unter Berücksichtigung des Abstandes die Fahrzeuggeschwindigkeit
Piezelektrischer Drucksensor	Mehrere als Koaxialkabel ausgeführte piezelektrische Drucksensoren sind hintereinander mit bekanntem Abstand in die Fahrbahn eingelassen. Das Fahrzeug liefert beim Überfahren jedes Sensors ein elektrisches Signal. Das Gerät misst die Zeitabstände zwischen den Signalen und berechnet unter Berücksichtigung des Abstandes die Fahrzeuggeschwindigkeit
Induktionsschleifen	Mehrere Induktionsschleifen sind hintereinander mit bekanntem Abstand in die Fahrbahn eingelassen. Das Fahrzeug liefert beim Überfahren jeder Induktionsschleife einen elektrischen Signalverlauf. Das Gerät misst den Zeitversatz zwischen den Signalen und berechnet unter Berücksichtigung des Abstandes die Fahrzeuggeschwindigkeit



**Abb. 5.56** Drehzahl-Sensorprinzipien. Induktiver Sensor (a), Hall-Sensor (b), Multipolsensor (c)



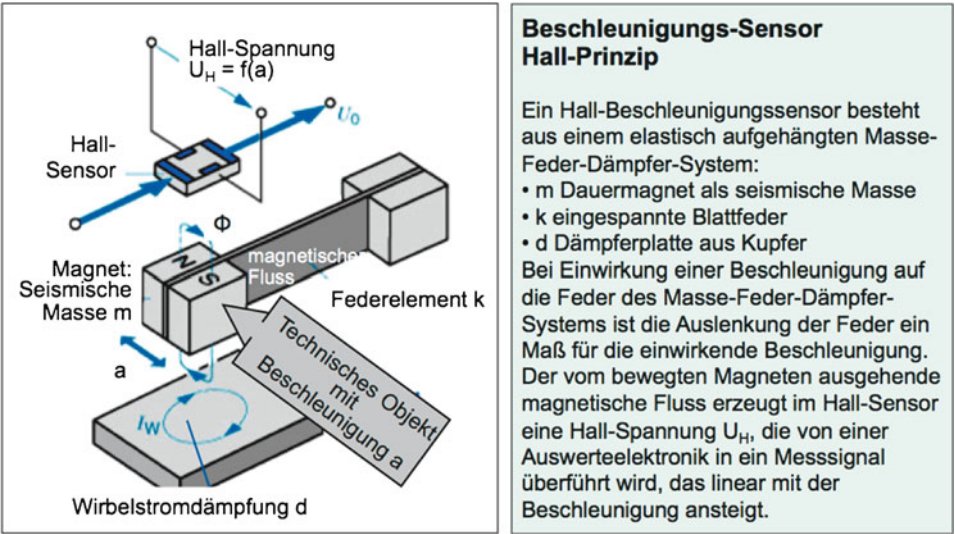
**Abb. 5.57** Das seismische Prinzip: physikalische Grundlage für Beschleunigungssensoren



**Abb. 5.58** Mikromechanischer Beschleunigungssensor, kapazitives Prinzip

Eine weitere Ausführungsart von Beschleunigungssensoren mit vielfältigen technischen Anwendungsmöglichkeiten nutzt den Hall-Effekt (vgl. Abb. 5.49) zur internen Messung der Auslenkung der seismischen Masse als Funktion der zu bestimmenden Beschleunigung. Abbildung 5.59 illustriert das Funktionsprinzip und den Aufbau.

Die Beschleunigungssensorik hat einen außerordentlich breiten Anwendungsbereich. In Tab. 5.5 sind charakteristische Beschleunigungssensoren in der Fahrzeugtechnik (vgl. Kap. 13) mit ihren typischen Messbereichen – bezogen auf die Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  – zusammengestellt.



**Abb. 5.59** Hall-Beschleunigungssensor, Aufbau und Funktion

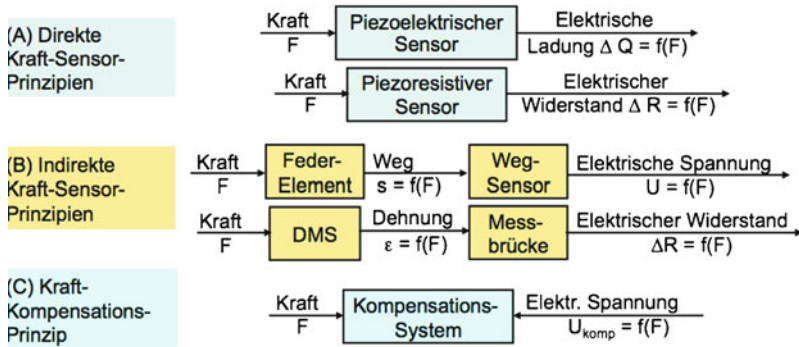
**Tab. 5.5** Beschleunigungssensorik in der Fahrzeugtechnik

Anwendung	Messbereich
Motor-Klopfregelung	1 ... 10 g
Passagierschutz im Pkw	
– Airbag, Gurtstraffer	50 g
– Überrollbügel	4 g
– Gurtblockierung	0,4 g
Antiblockiersystem ABS	0,8 ... 1,2 g
Fahrwerkregelung	
– Fahrzeugaufbau	1 g
– Fahrzeugachsen	10 g

## 5.5   Sensorik dynamischer Größen

### 5.5.1   Kraftsensorik

Die Kraft ist eine vektorielle physikalische Größe mit folgender Definition der Einheit Newton: Ein Newton ist die Kraft  $F$ , die einem Körper der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  die Beschleunigung  $a = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  erteilt. Kräfte können aus physikalischen Wirkprinzipien bestimmt werden. Abbildung 5.60 nennt die grundlegenden Prinzipien der Kraftsensorik.



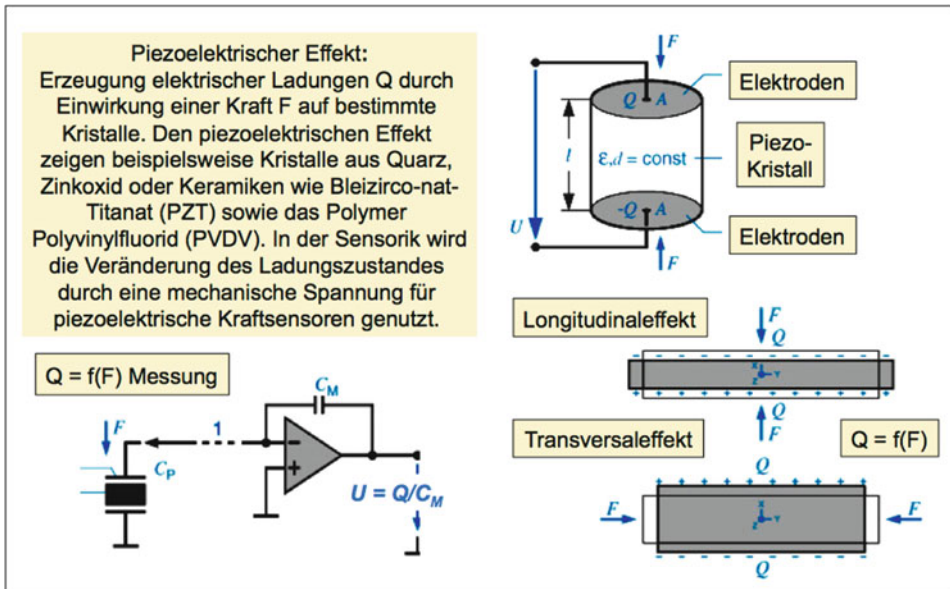
**Abb. 5.60** Übersicht über Sensorprinzipien zur Kraftmessung

- (A) Direkte Kraftsensoren basieren auf intrinsischen mechano-elektrischen Effekten. Piezoelektrische und piezoresistive Sensoren bestehen aus Stoffen, deren Ladungsgleichgewicht bzw. elektrischer Widerstand sich in Abhängigkeit auf sie einwirkender Kräfte oder mechanischer Spannungen in mess- und kalibrierbarer Weise verändert.
- (B) Indirekte Kraftsensoren nutzen „Zwischengrößen“ zur Kraftdetektion. Induktive Kraftsensoren führen die Kraftmessung über ein Federdiagramm auf eine Wegmessung z. B. mit induktiven Wegsensoren zurück. DMS-Kraftsensoren bewirken über elastische Dehnungen  $\varepsilon$  (Hooke'sches Gesetz) von DMS elektrische Widerstandsänderungen gemäß  $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ .
- (C) Kraft-Kompensationsprinzipien bestimmen eine zu messende Kraft  $F_M$  durch den Vergleich mit einer bekannten, meist elektromechanisch variierbaren Gegenkraft  $F_K$ .

**Piezoelektrische Sensoren** sind direkte Kraftsensoren, bei denen durch Krafteinwirkung auf Piezokristalle im Kristallgitter negative gegen positive Gitterpunkte verschoben werden, so dass an den Kristalloberflächen Ladungsunterschiede  $Q$  als Funktion der Kraft  $F$  gemessen werden  $Q = kF$ , siehe Abb. 5.61. Der Proportionalitätsfaktor  $k$  ist der Piezomodul, z. B.  $2,3 \cdot 10^{-12}$  As/N für Quarz. Piezoelektrische Kraftaufnehmer sind mechanisch sehr steif, sie erfordern Ladungsverstärker zur Messsignalverarbeitung und sind hauptsächlich zur Messung dynamischer Vorgänge ( $f > 1$  Hz) geeignet, z. B. Aufnahme von p-V-Indikatordiagrammen an Verbrennungsmotoren. Kenndaten piezoelektrischer Kraftsensoren: hohe Druckfestigkeit von ca.  $4 \cdot 10^5$  N/cm<sup>2</sup>, Messgliedkoeffizient  $c = 6 \cdot 10^2$  bis  $3 \cdot 10^3$  N/m, Temperaturkoeffizient  $< 0,5$  %/°C, Betriebstemperaturen bis 500 °C.

Der piezoelektrische Effekt ist umkehrbar (*inverser piezoelektrischer Effekt*). Beim Anlegen einer Hochspannung an einen Piezokristall dehnt sich dieser aus, wodurch sich eine „Aktorfunktion“ ergibt: elektrische Spannung → mechanische Bewegung, siehe Abschn. 6.2. Piezoaktoren haben eine intrinsische, elektrisch steuerbare Elastizität und sind bei Belastungszyklen bis zu  $10^9$  praktisch wartungsfrei. Sie haben eine hohe Positionier-





**Abb. 5.61** Der piezelektrische Effekt von Kraftsensoren

genauigkeit (nm bis etwa  $100\ \mu\text{m}$ ), eine große Steifigkeit ( $>5\ \text{MN/mm}$ ) und eine sehr kleine Ansprechzeit (Sprungantwort-Zeitkonstanten  $<50\ \mu\text{s}$ ).

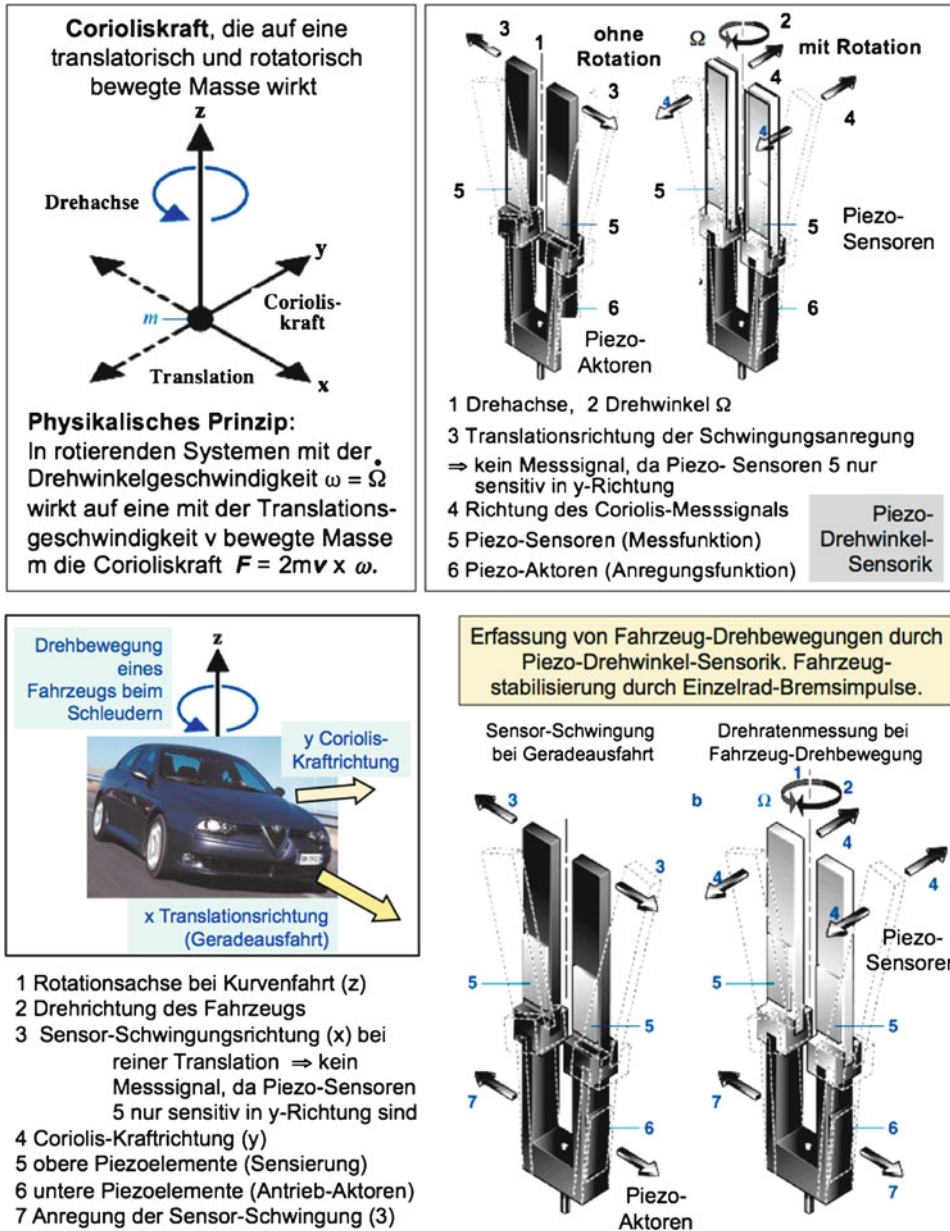
### Anwendungsbeispiel des piezelektrischen Sensoreffekts

Der piezelektrische Effekt kann für die Sensorik der Fahrdynamik eines Automobils genutzt werden, siehe Abb. 5.62. Betrachtet wird modellmäßig in einem x-y-z-Koordinatensystem ein sich in x-Richtung bewegendes Automobil (Masse  $m$ ), seine Drehbewegung um die z-Achse („Schleudern“) und die damit verbundene, in y-Richtung wirkende Corioliskraft. Der Coriolis-Sensor (Gyroskop) ist in Stimmgabelform gestaltet. Am unteren Teil befinden sich Piezo-Aktoren, die eine Schwingbewegung der beiden oberen Teile der Stimmgabel in x-Richtung (Fahrtrichtung) bewirken. Am oberen Teil befinden sich Piezosensoren, die nur auf die in y-Richtung wirkende Corioliskraft ansprechen. Beim Auftreten einer Schleuder-Drehbewegung bewirkt die Corioliskraft  $F$  die Auslenkung der oberen Sensorteile und damit die piezelektrische Messung der Drehwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Fahrzeugs. Über eine Steuerelektronik werden gezielte Bremsimpulse an einzelnen Rädern ausgelöst, wodurch der Schleuderbewegung des Fahrzeugs entgegengewirkt und die Fahrdynamik stabilisiert werden kann.

**Piezoresistive Sensoren** bestehen aus Materialien, deren elektrischer Widerstand kraft- bzw. druckabhängig ist, Abb. 5.63 gibt dazu eine Übersicht.

Indirekt arbeitende Kraftsensoren führen die Kraftmessung über geeignete elastische Federelemente oder Dehnelement auf Wegmessungen oder Dehnungsmessungen zurück.





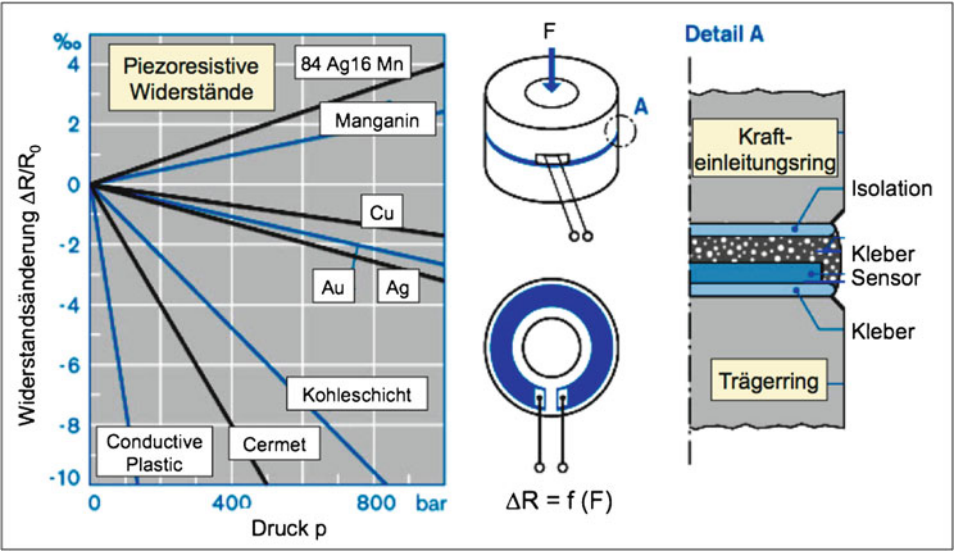


Abb. 5.63 Kennlinien und Aufbau piezoresistiver Sensoren

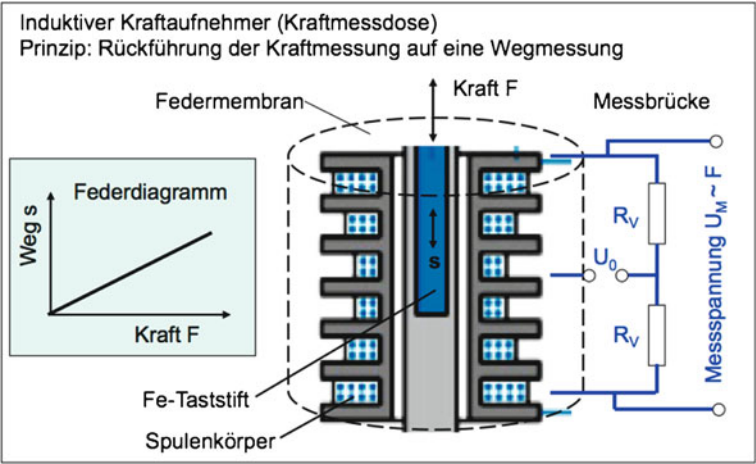
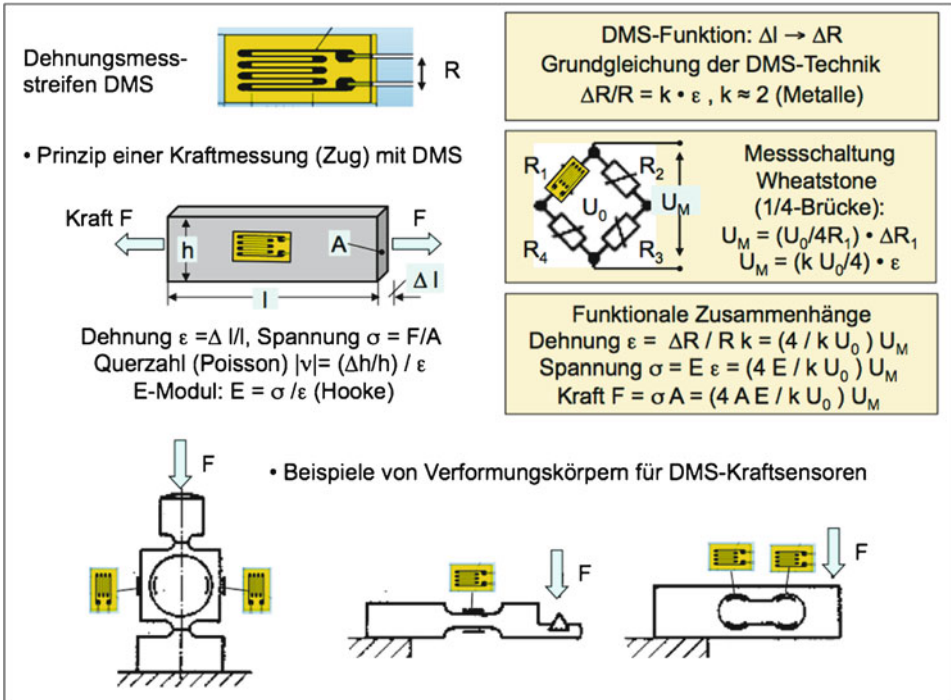


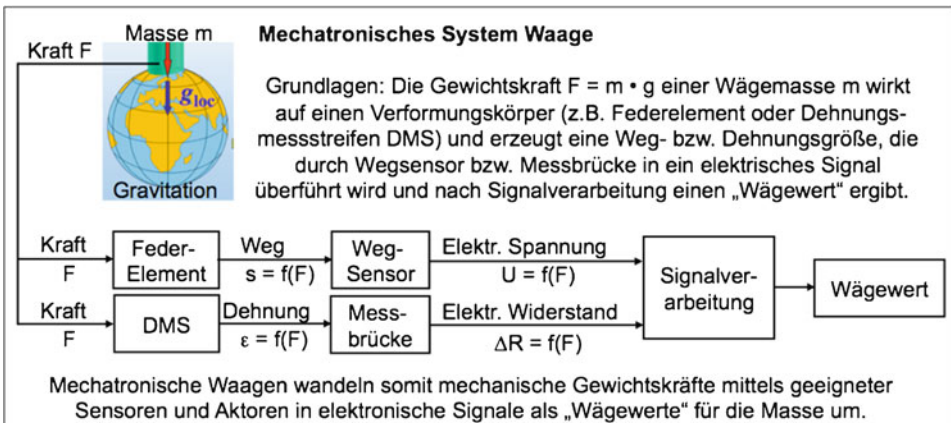
Abb. 5.64 Prinzip und Aufbau induktiver Kraftmessdosen

Die Abb. 5.64 und 5.65 zeigen die wichtigsten Ausführungsarten (Abb. 5.64 **induktive Kraftmessdosen**, Abb. 5.65 **DMS-Kraftsensoren**).

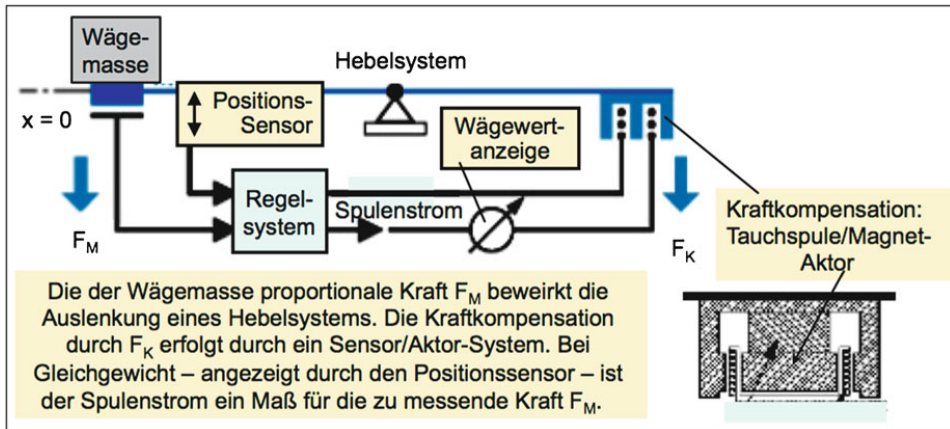
Ein Hauptanwendungsgebiet der indirekten Kraftsensorik ist die mechatronische **Wägetechnik**. Die physikalische Grundlage und die sensorteknische Methodik sind in kurzer Form in Abb. 5.66 dargestellt, das mechatronische System Waage wird in Abschn. 10.2 behandelt.



**Abb. 5.65** Prinzip und Aufbau von DMS-Kraftsensoren



**Abb. 5.66** Das Funktionsprinzip mechatronischer Waagen



**Abb. 5.67** Das Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation in der Wägetechnik

Mikrowaagen arbeiten meist nach dem Prinzip der **elektromagnetischen Kraftkompensation**. Dabei wird die der Wägemasse proportionale Kraft  $F_M$  durch den Vergleich mit einer bekannten, elektromagnetisch variierbaren Gegenkraft  $F_K$  bestimmt, siehe Abb. 5.67.

### Dimensionen der Kraftmesstechnik

Die technischen Anwendungen der Kraftsensorik reichen von der *Makrotechnik* mit zu messenden und zu kalibrierenden Kräften im Mega-Newton-Bereich bis hin zur *Nanotechnik*, bei der Kräfte mit Dimensionen unterhalb von Mikro-Newton bis in den Nano-Newton-Bereich zu detektieren sind, siehe Abb. 5.68.

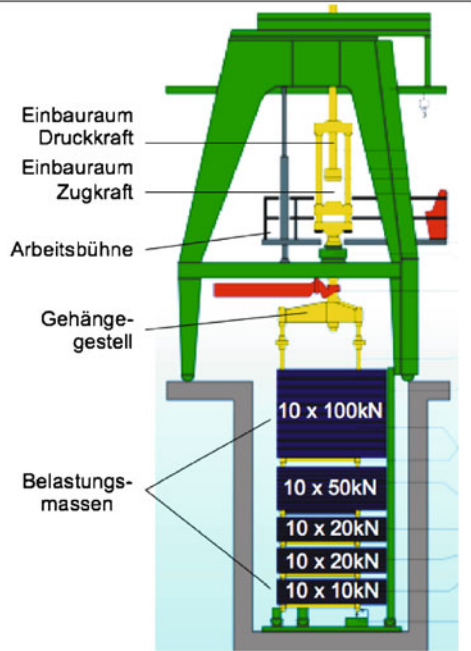
Die Anwendungsmöglichkeiten des in dem Prinzipbild von Abb. 5.68b wiedergegebenen Rasterkraftmikroskops reichen von den dargestellten Beispielen aus der Mikro-Elektronik bis hin zur Mikro-Mechanik und Nano-Tribologie. Die mechatronische Systemtechnik der Rasterkraftmikroskopie ist in Abb. 5.69 dargestellt.

Abbildung 5.69 zeigt schematisch die wichtigsten Komponenten eines Rasterkraftmikroskops (AFM, atomic force microscope). Die Spitze, meist aus Silizium, die an einem Federbalken ausgeformt wurde, soll mit konstanter Kraft auf der Probe aufliegen. Die dazugehörige elastische Federbalken-Deformation wird mit einem Lichtzeiger gemessen, der den Strahl eines Lasers auf den Federbalken und anschließend auf einen Positionsdetektor projiziert. Ändert sich die Kraft während des Scanvorgangs (Bewegung der Probe in x- und y-Richtung), so ändert sich die Federbalken-Auslenkung und damit die Position des Laserpunkts auf dem Positionsdetektor. Diese Abweichung wird mittels eines aus Operationsverstärkern (OP) aufgebauten Analogrechners einem Regler zugeführt. Eine Korrekturspannung für die vertikale z-Position wird nach Verstärkung dem z-Piezoversteller zugeführt und gleicht die Abweichung der Sollkraft aus. Steuerung und Datenaufnahme erfolgen über einen Steuerrechner, wobei für jeden Pixelpunkt der Positi-

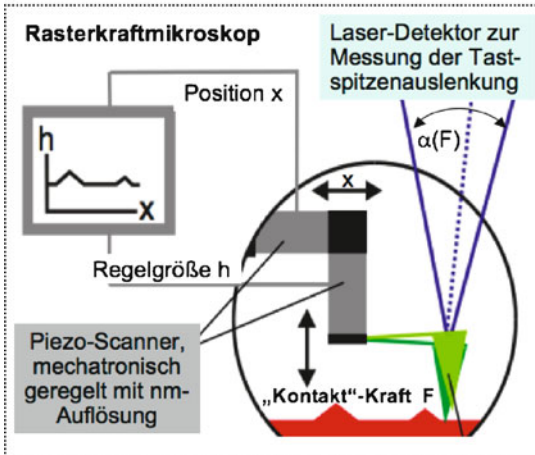


a

### 2-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt



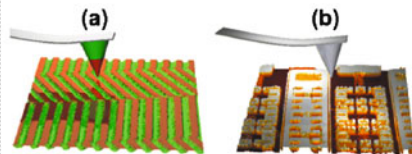
b



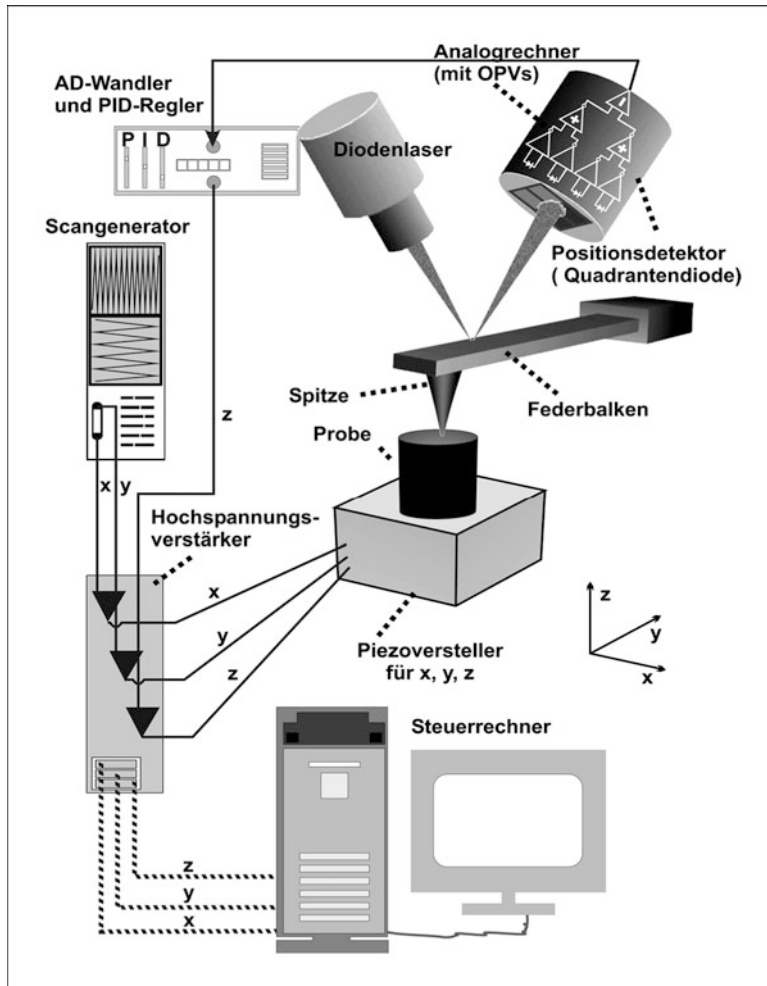
### Anwendungsbeispiele:

(a) Bestimmung magnetischer Datenspeicherstrukturen (z.B. Computertafelplatten) mit einer magnetischen Sondenspitze.

(b) Analyse elektronischer Mikrochipstrukturen durch Messung des Kraft/Kapazität-Zusammenhangs zwischen Probe und Sondenspitze.



**Abb. 5.68** Dimensionen der Kraftmesstechnik. **a** Darstellung der Krafteinheit im MN-Bereich, **b** Prinzip des Rasterkraftmikroskops zur Detektion von Kräften  $< \mu\text{N}$ ; Oberflächen-Scanbereich  $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ , laterale Auflösung 0,1 bis 10 nm



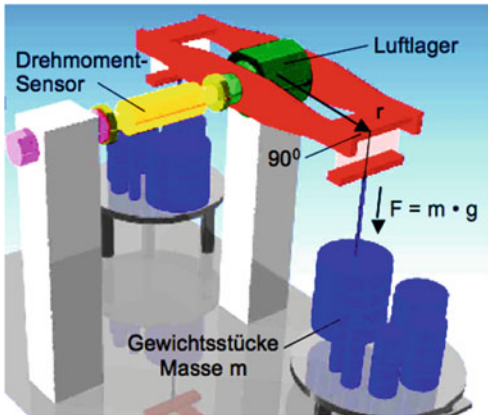
**Abb. 5.69** Prinzip des mechatronischen Systems eines Rasterkraftmikroskops

on  $(x, y)$  ein Helligkeitswert eingetragen wird, welcher der Korrekturspannung entspricht. Da die Längenausdehnung eines Piezoaktors dieser Spannung proportional ist, (sieht man von Hysterese ab), entsteht ein Bild der gemessenen Höhen-Topographie.

### 5.5.2 Drehmomentsensorik

Drehmomente  $M$  haben für Rotationsbewegungen eine vergleichbare Bedeutung wie Kräfte  $F$  für Translationsbewegungen. Ein Drehmoment ist ein „drehachsenparalleler“ Vektor, beschrieben durch das Vektorprodukt  $M = r \times F$ . Die Definition der metrologischen



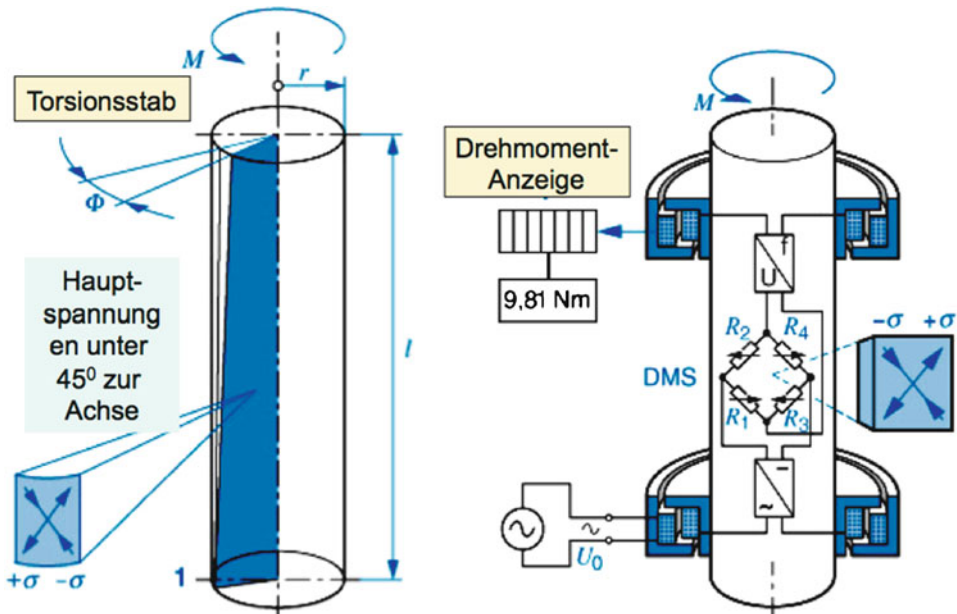

**Definition der Einheit Drehmoment:**

Ein Newtonmeter ist das von einer im senkrechten Abstand  $r = 1\text{ m}$  von einem Drehpunkt angreifenden Kraft  $F = 1\text{ N}$  erzeugte Drehmoment  $M = r \cdot F$ .

**Prinzip einer Drehmoment-Normal-Messeinrichtung:**

Die Gewichtskraft  $F$  einer Masse  $m$  (Dichte  $\rho_M$ ) im Schwerfeld  $g$  und in der Atmosphäre (Dichte der Luft  $\rho_L$ ) der Erde greift senkrecht am Ende eines Hebels der Länge  $r$  an  
 $\Rightarrow M = m g r (1 - \rho_L / \rho_M)$

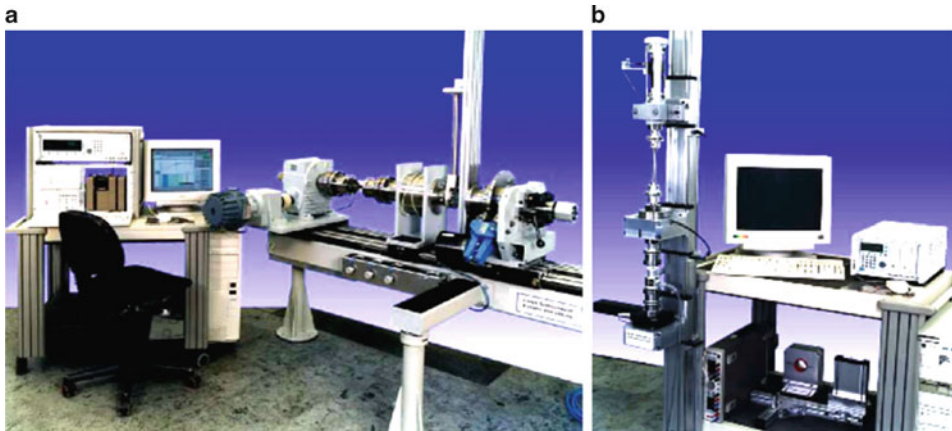
**Abb. 5.70** Definition und metrologische Darstellung der Maßeinheit Drehmoment



**Abb. 5.71** Gestaltung von Drehmoment-Sensoren mit Dehnungsmessstreifen

Einheit Drehmoment und das Prinzip einer Drehmoment-Normal-Messeinrichtung sind in Abb. 5.70 dargestellt. Drehmomentsensoren werden in der technischen Ausführung meist mit Dehnungsmessstreifen realisiert, wobei die DMS gemäß DMS-Applikationsregeln in Richtung der Torsions-Hauptspannungen anzuordnen sind, siehe Abb. 5.71.

Drehmomentsensoren müssen – wie alle Messwertaufnehmer – zum metrologischen Anschluss (*traceability*) an Mess-Normale, zur Kennlinienfestlegung und zur Bestim-



**Abb. 5.72** Drehmoment-Kalibriereinrichtungen. **a** Horizontalbauweise, 2000 N m, **b** Vertikalbauweise, 20 N m

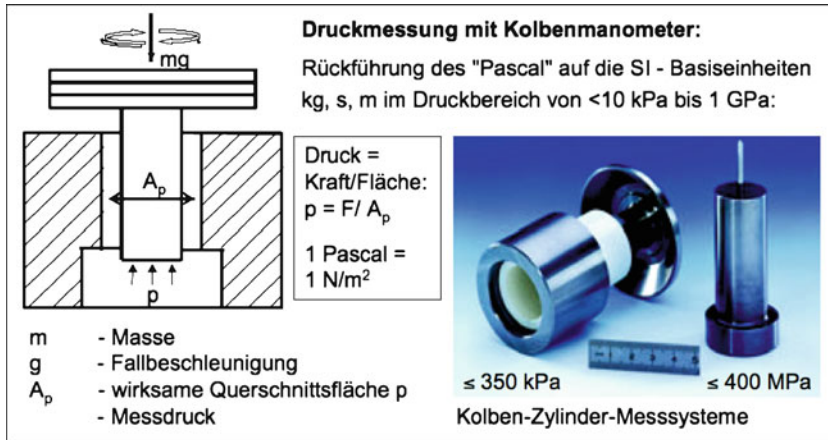
mung des dynamischen Verhaltens kalibriert werden. Abbildung 5.72 zeigt Drehmoment-Kalibriereinrichtungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mit Referenzdrehmomentaufnehmern.

### 5.5.3 Drucksensorik

Unter dem Druck  $p$  versteht man metrologisch das Verhältnis der senkrecht gerichteten Kraft  $F_N$  und der Fläche  $A$ , auf die sie wirkt:  $p = F_N/A$ . Ein Pascal (Pa) ist der Druck, der von der Kraft 1 N bei senkrechter Wirkung auf die Fläche  $1 \text{ m}^2$  erzeugt wird. Für die Druckmesstechnik gelten folgende Begriffe:

- Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$ : Druck, bezogen auf den Bezugsdruck  $p = 0 \text{ Pa}$  (Vakuum).
- Atmosphärischer Luftdruck  $p_{\text{amb}}$ : Der durch die Gewichtskraft der Lufthülle (bis etwa 500 km Höhe) hervorgerufene, von der geographischen Höhe  $h$  abhängige Luftdruck. Für  $h = 0$  beträgt der mittlere atmosphärische Luftdruck  $p_{\text{amb}} = 1013,25 \text{ hPa}$  mit relativen Schwankungen von  $\pm 5 \%$ .
- Differenzdruck  $D_p$ : Wenn die Differenz zweier Drücke  $p_1$  und  $p_2$  selbst die Messgröße ist, spricht man vom Differenzdruck  $D_p$ .
- Atmosphärische Druckdifferenz (Überdruck)  $p_e$ : Ist gleich dem Differenzdruck  $p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}$  und wichtigste Messgröße im technischen Bereich. Man bezeichnet  $p_e$  als positiven Überdruck, wenn  $p_{\text{abs}} > p_{\text{amb}}$  ist.

Sensoren zur Druckmessung basieren auf Prinzipien der unmittelbaren oder der mittelbaren Druckmessung.



**Abb. 5.73** Prinzip des Kolbenmanometers

### Unmittelbare Druckmessverfahren

- Flüssigkeits-Druckmessgeräte: Der zu messende Druck  $p$  wird durch Vergleich mit der Gewichtskraft einer Flüssigkeitssäule (Höhe  $h$ , Dichte  $\rho$ ) bestimmt ( $g$  örtliche Fallbeschleunigung):  $p = h \rho g$ .
- Kolbenmanometer: Der zu messende Druck wirkt auf eine definierte Fläche  $A$  (Stirnfläche eines rotierenden Kolbens) und bewirkt eine Kraft  $F$ , die durch die Gewichtskraft  $m \cdot g$  des Kolbens kompensiert wird:  $p = F/A = m g/A$ , Abb. 5.73.

### Mittelbare Druckmessverfahren

- Mechanische Druckmessgeräte: Druckmessgeräte mit federelastischem Messglied (Bourdonrohr), dessen Wände sich proportional zum Druck verformen.
- Elektronische Drucksensoren unter Anwendung verschiedener Sensoreffekte: piezoresistiv, resistiv, kapazitiv, DMS-Mikrosensorik, siehe Abb. 5.74.

Der in Abb. 5.74b mit seinem Aufbau und seiner Funktion dargestellte Mikro-Drucksensor nutzt die Tatsache aus, dass der spezifische Widerstand von dotiertem Silizium stark von der mechanischen Verzerrung abhängt (Piezowiderstandseffekt). Bei diesen Mikrodrucksensoren werden an örtlich unterschiedlichen Stellen der Membran durch Dotierung lokal begrenzte piezoresistive Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  erzeugt, die zu einer Wheatstone-Messbrücke zusammengeschaltet werden. Im unbeanspruchten Zustand ist  $R_1 = R_2$  und die Messspannung  $U_M$  ist gleich Null. Bei Einwirken eines zu messenden Drucks  $p$  auf die Membran werden die piezoresistiven Widerstände  $R_1 \neq R_2$  und es resultiert eine Messspannung  $U_M = f(p)$ . Piezoresistive Mikro-Drucksensoren haben wichtige Anwendungen als Bremskreisdruksensoren in der Automobiltechnik.

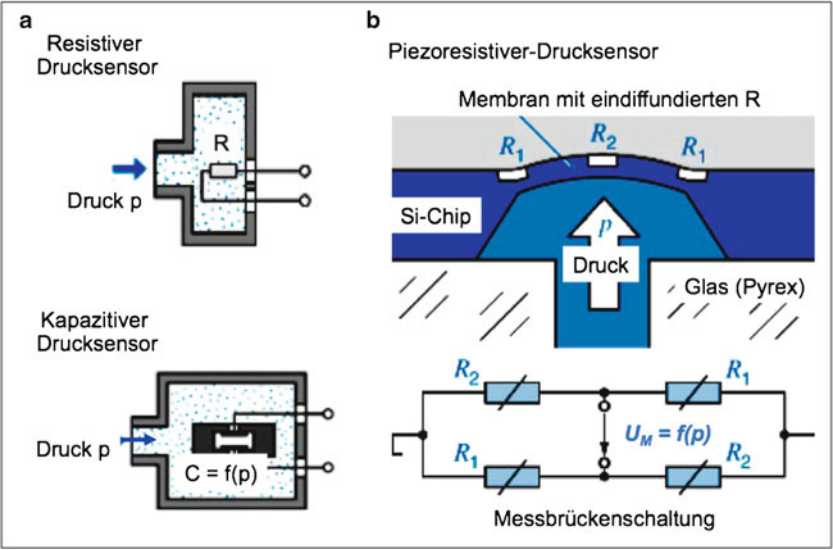


Abb. 5.74 Drucksensorik: mittelbare Druckmessverfahren

## 5.6 Sensorik von Einflussgrößen

Die Sensorik der Funktionsgrößen mechatronischer Systeme ist zu ergänzen durch die Sensorik von Einflussgrößen. Sie haben meist keine direkten funktionell-operativen Aufgaben, können aber die Funktionsvariablen und das Systemverhalten beeinflussen und verändern. Wie in Abb. 5.75 dargestellt, gehören zu den wichtigsten Einflussgrößen die Temperatur und die Feuchte.

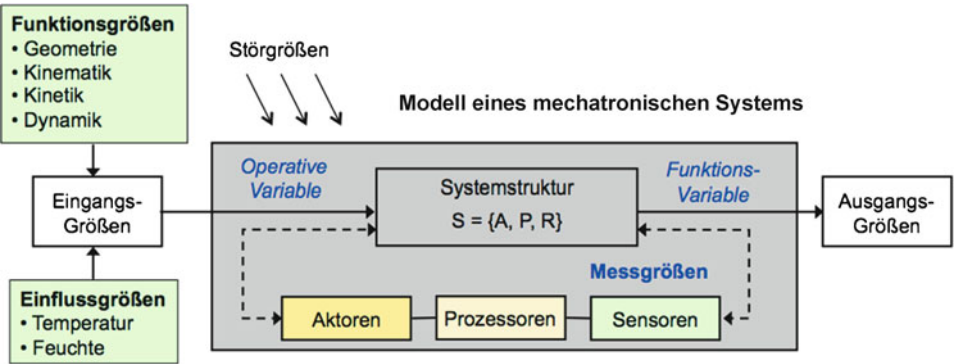


Abb. 5.75 Messgrößenkategorien für die Sensorik mechatronischer Systeme

Daneben können Störgrößen auftreten, z. B. mechanische Vibrationen, Stoß- und Prallvorgänge, Strahlung unterschiedlicher physikalischer Natur, Gase und chemische Substanzen. Sie sind mit speziellen Messaufnehmern und Sensoren zu detektieren.

Die aus der Sensorik von Einflussgrößen gewonnenen Signale können sowohl zu erweiterten Systembeschreibungen als auch zur Korrektur von Sensor-Messsignalen verwendet werden. Wie in Abschn. 5.2.2 unter dem Stichwort *Smart Sensor* beschrieben (siehe Abb. 5.18) werden korrekte Modellparameter (Sollgrößen) in einem PROM gespeichert. Unter Verwendung eines Mikrorechners ( $\mu\text{C}$ ) lassen sich durch Soll/Ist-Vergleiche korrigierte Messsignale gewinnen. Mit dieser Methodik lassen sich nicht nur die statische Eigenschaften von Sensoren korrigieren, sondern auch das dynamische Sensorverhalten durch Auswertung der das dynamische Verhalten beschreibenden Differentialgleichung verbessern.

### 5.6.1 Temperatursensorik

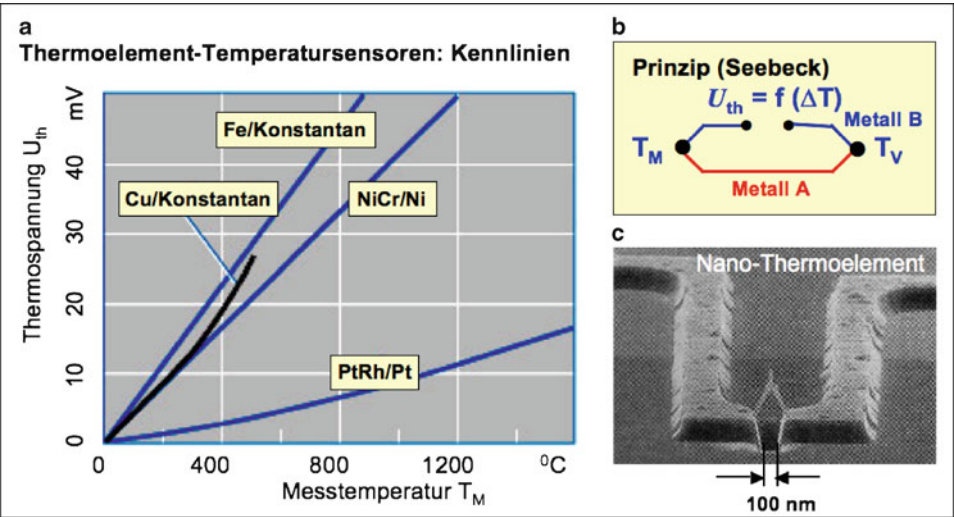
Die Temperatur  $T$  ist physikalisch gesehen eine ungerichtete, den Energiezustand eines Mediums charakterisierende Größe, die vom Ort mit den Raumkoordinaten  $(x, y, z)$  und der Zeit  $t$  abhängen kann:  $T = T(x, y, z; t)$ .

Die Temperatursensorik ist in der Technik in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung, beispielsweise zur Bestimmung der Temperatur als:

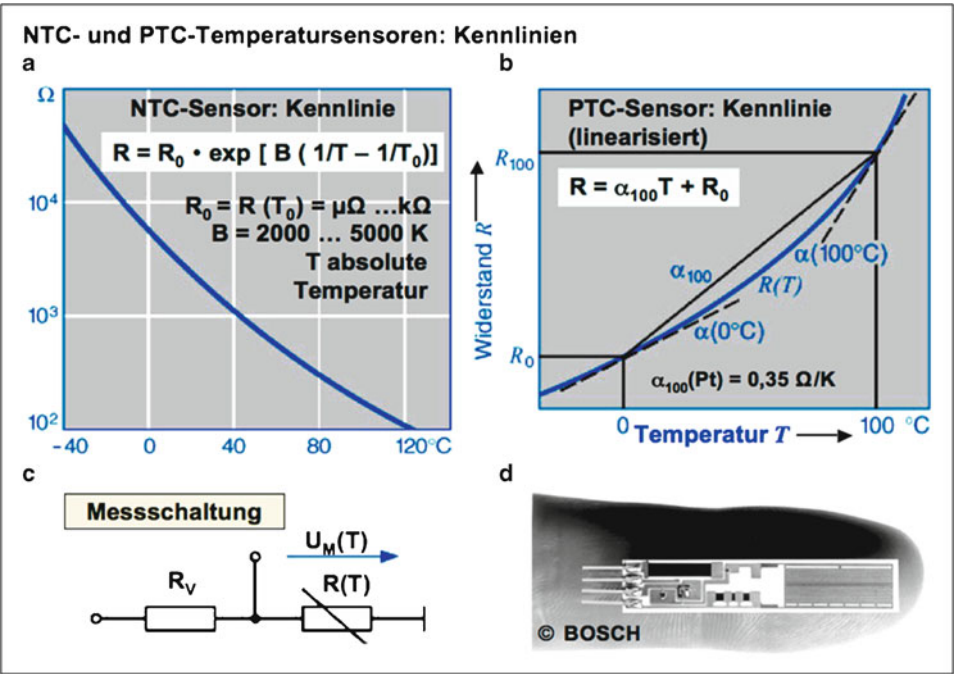
- Zustandsgröße des thermischen Zustands eines Bauteils oder Systems,
- Einfluss- oder Störgröße bei temperaturbeeinflussbaren Sensorprinzipien,
- Prozessvariable für temperaturgesteuerte oder -geregelter Systeme.

Zur Temperaturmessung können prinzipiell alle sich mit der Temperatur reproduzierbar ändernden Eigenschaften fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe herangezogen werden. Von besonderer Bedeutung sind Temperatursensoren, mit denen Bauteil- oder Prozesstemperaturen in elektrische Größen für umgesetzt werden können.

**Thermoelemente** basieren auf dem Seebeck-Effekt, siehe Abb. 5.76. In einem Leiterkreis mit zwei verschiedenen Metallen, an deren Verbindungspunkten unterschiedliche Temperaturen vorliegen, gilt  $U = b \cdot \Delta T + c \cdot \Delta T^2$ ,  $b$  und  $c$  sind Materialkonstanten. Thermoelemente weisen nahezu lineare Kennlinien auf, für nicht zu große Temperaturbereiche  $\Delta T$  gilt  $U = k \cdot \Delta T$ . Thermoelementpaar-Kenndaten sind in DIN IEC 584 genormt, z. B. NiCr/NiAl:  $k = 40,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  (bei  $20^\circ\text{C}$ ), Messbereich  $-270 \dots 1300^\circ\text{C}$ . Für industrielle Anwendungen werden die Thermopaardrähte z. B. mit Keramikröhrchen isoliert und in eine Schutzarmatur eingebaut. Kürzere Einstellzeiten erhält man mit Mantelthermoelementen, bei denen die Thermopaare zur Isolation in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eingebettet und mit einem Edelstahlmantel umhüllt sind. Außendurchmesser von weniger als 3 mm sind dabei realisierbar. Die Miniaturisierung von Thermoelementen ist für Forschungszwecke bereits bis in den Nanometerbereich gelungen, siehe Abb. 5.76c.

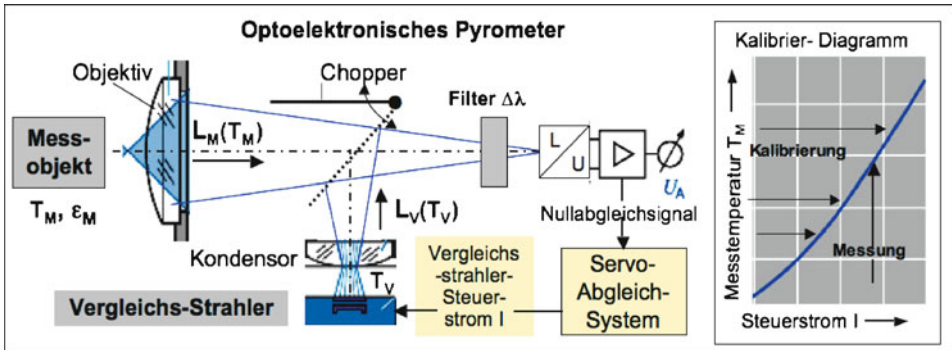


**Abb. 5.76** Thermoelement-Tempersensoren. **b** Prinzip, **a** Kennlinien und **c** Beispiel eines Nano-Thermoelements zur Temperaturanalyse von Mikrochips (FAZ, 31/1/2001)



**Abb. 5.77** Kennzeichen von NTC- und PTC-Tempersensoren: **a**, **b** Kennlinien, **c** Messschaltung, **d** Beispiel: Mikrotechnik-Temperatur-Sensor mit integrierter Signal-Prozessorik





**Abb. 5.78** Darstellung des Prinzips eines berührungslosen Temperatursensors

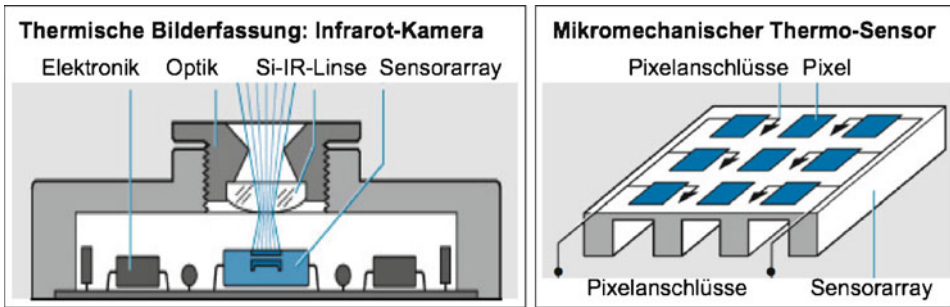
**Widerstandsthermometer** basieren auf der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes. Die Sensoren haben je nach elektrischem Leitungsmechanismus Kennlinien mit negativem Temperaturkoeffizienten, NTC (Heißeiter, Thermistoren) oder positivem Temperaturkoeffizienten, PTC (Metalle), siehe Abb. 5.77. Wichtige Anwendungen von PTC-Temperatursensoren betreffen die Erfassung der Betriebstemperaturen in technischen Systemen. Als Beispiel zeigt Abb. 5.77d die technische Ausführung eines Mikrotechnik-Temperatur-Sensors mit integrierter Signal-Prozessorik.

NTC-Temperatursensoren auf Halbleiterbasis nutzen entweder die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit homogener Halbleiterproben oder aber die Temperaturabhängigkeit der Kennlinie von PN-Übergängen. Silizium-Temperatursensoren werden gewöhnlich als Ausbreitungswiderstände realisiert. Der Widerstand zwischen einer kreisförmigen Kontaktierung mit dem Durchmesser  $d$  und dem flächigen Rückseitenkontakt einer Siliziumscheibe mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$  beträgt  $R = 1/2 \rho/d$  und ist unabhängig von der Dicke und dem Durchmesser der Scheibe, solange diese beiden Größen groß gegen den Kontaktdurchmesser  $d$  sind.

**Pyrometersensoren** bestimmen Temperaturen berührungslos aus der Messung der Temperaturstrahlung. Grundlage ist das Planck'sche Strahlungsgesetz. Es beschreibt für einen idealen Strahler (Schwarzer Körper, Emissionsgrad  $\epsilon = 1$ ) den physikalischen Zusammenhang zwischen der spektralen Strahldichte pro Raumwinkel  $L = f(T, \lambda)$  und den Parametern Wellenlänge  $\lambda$  und Temperatur  $T$ . Die Methode erfordert die Festlegung von Messgeometrie-Raumwinkel und  $\Delta\lambda$  sowie die Kenntnis des Emissionsgrads des Messobjektes und eine Kalibrierung an einem Schwarzen Körper.

Bei einem *Teilstrahlungs-pyrometer* werden gemäß Abb. 5.78 bei definiertem  $\Delta\lambda$  die Strahldichten  $L_M$  und  $L_V$  im Wechsellicht (Chopper)-Betrieb verglichen. Bei Nullabgleich ist der Vergleichsstrahler-Steuerstrom ein Maß für die Objekttemperatur.

Die pyrometrische Temperatursensorik kann durch mikrotechnologische Herstellungsverfahren zur thermischen Bilderfassung erweitert werden. Das Prinzip einer einfachen Infrarot-Kamera ist in Abb. 5.79 dargestellt. Die von einem Messobjekt



**Abb. 5.79** Prinzip einer einfachen Infrarot-Kamera zur thermischen Bilderfassung

ausgehende Infrarot (IR)-Strahlung wird mit einer IR-durchlässigen Optik auf einem Thermoelement-Sensorarray abgebildet. Das Array besteht aus hintereinander geschalteten „Thermoelement-Pixeln“. Die „heißen“ Thermoelementpunkte liegen auf einer thermisch gut isolierten dünnen Membran, die „kalten“ Thermoelementpunkte auf dem dickeren Chiprand. Durch eine geeignete Signalverarbeitung mit einem ASIC (Appliation Specific Integrated Circuit) können unter Verwendung eines Temperatur-Referenzsensors Bilder von flächenhaften Temperaturverteilungen gewonnen werden. Die Anwendung der Thermografie in der Bauwerksüberwachung ist in Abschn. 14.2 dargestellt.

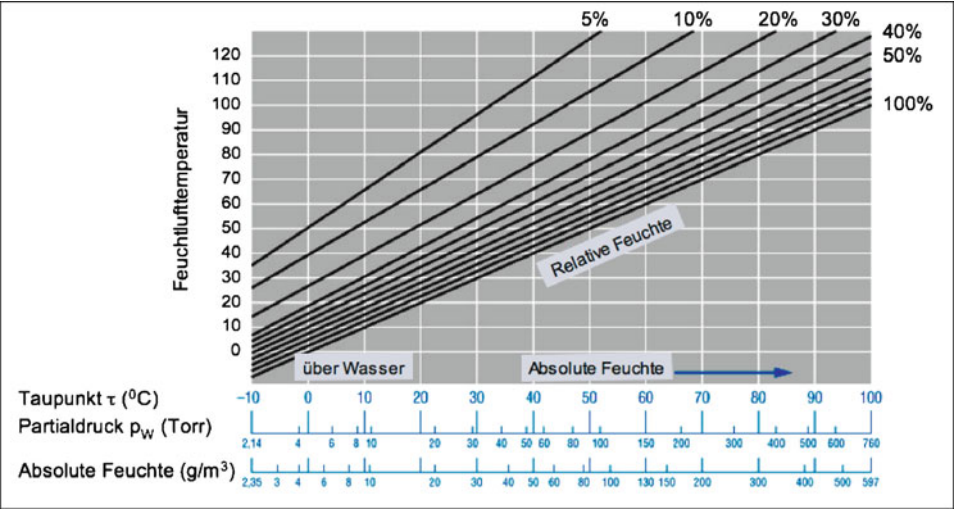
### 5.6.2 Feuchtesensorik

Die Feuchte kennzeichnet allgemein den Wassergehalt in gasförmigen, flüssigen und festen Stoffen. Im engeren Sinn wird damit der Gehalt gasförmigen Wassers (Wasserdampf) in Luft bezeichnet. Der Sättigungszustand bei isobarer Abkühlung wird durch die *Taupunkt-Temperatur* markiert.

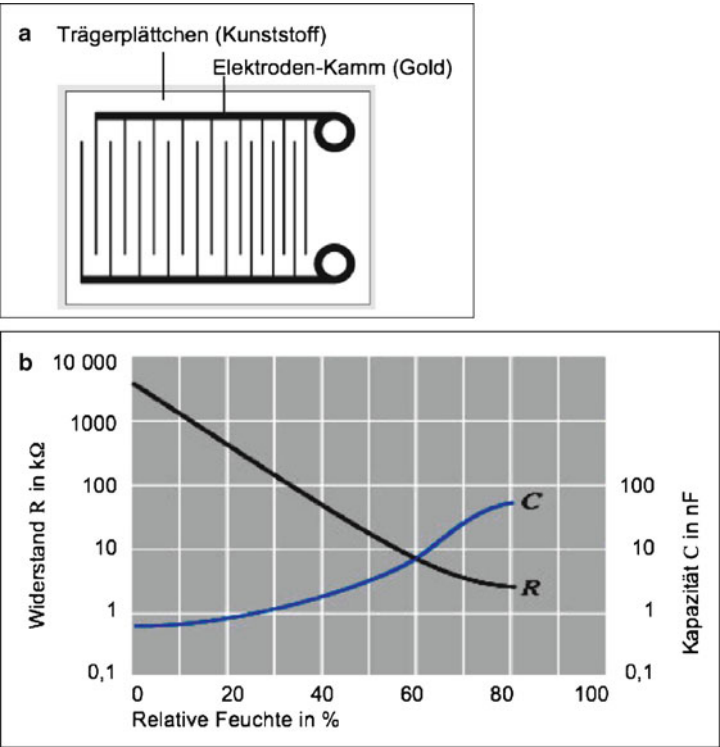
In der Technik ist die Feuchte die wichtigste „Umwelt-Einflussgröße“ für alle unter atmosphärischen Bedingungen operierenden technischen Systeme. Sie wird durch folgende Definitionen beschrieben:

- Die *absolute Feuchte*  $f_{\text{abs}}$  ist die in dem Gasvolumen  $V$  von einem Kubikmeter enthaltene Wasserdampfmenge  $m$  in  $\text{g}/\text{m}^3$ :  $f_{\text{abs}} = m/V$ .
- Die *maximale Feuchte* (Sättigungskonzentration)  $f_{\text{max}}$  ist die bei einer bestimmten Temperatur in dem Gasvolumen  $V$  von einem Kubikmeter maximal mögliche Wasserdampfmenge  $m_{\text{max}}$ :  $f_{\text{max}} = m_{\text{max}}/V$ .
- Die *relative Feuchte* ist der Quotient aus der absoluten Feuchte und der bei gleicher Temperatur maximal möglichen Feuchte:  $\Phi = f_{\text{abs}}/f_{\text{max}}$ . Es gilt auch die Beziehung  $\Phi = \text{Wasserdampf-Partialdruck}/\text{Wasserdampf-Sättigungsdruck}$ .

In Abb. 5.80 sind die für die Feuchtesensorik wichtigen Zusammenhänge dargestellt.



**Abb. 5.80** Temperatur-Feuchte-Diagramm für Luft



**Abb. 5.81** **a** Prinzipieller Aufbau eines kapazitiven Feuchtesensors, **b** Typische Kennlinien resistiver ( $R$ ) und kapazitiver ( $C$ ) Feuchtesensoren

**Tab. 5.6** Übersicht über direkte und indirekte Methoden der Feuchtesensorik

Methode	Verfahren	Sensor
<b>Direkte Methoden</b> Messung der absoluten Feuchte	Sättigungsverfahren	Taupunkt-Hygrometer LiCl- Taupunkt-Hygrometer
	Verdunstungsverfahren	Psychrometer
	Absorptionsverfahren	Volumen-Hygrometer Elektrolyse-Hygrometer Kondensatmengen-Hygrometer
	Energetische Verfahren	Infrarot-Hygrometer Mikrowellen-Hygrometer Elektr. Entladungshygrometer Diffusions-Hygrometer
<b>Indirekte Methoden</b> Messung der relativen Feuchte	Hygroskopische Verfahren	Elektr. Leitfilm-Hygrometer Kondensator-Hygrometer Haar-Hygrometer Bistreifen-Hygrometer Farb-Hygrometer Quarz-Hygrometer Gravimetrisches Hygrometer

Als Feuchtesensoren mit elektrischem Signalausgang werden meist resistive oder kapazitive Messfühler verwendet. Das Sensorprinzip basiert auf hygroskopischen Schichten, die in Abhängigkeit von der relativen Feuchte reversibel Wasser speichern können. Bei einem resistiven Feuchtesensor befindet sich zwischen einem Elektrodenpaar ein isolierendes Substrat, auf das hygroskopisches Salz (LiF) aufgebracht wird. Die Leitfähigkeit des Sensors nimmt mit zunehmender Feuchte zu, d. h. der elektrische Widerstand nimmt ab. Bei kapazitiven Feuchtesensoren dient eine hygroskopische, isolierende Schicht (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Kunststoff), als Dielektrikum eines Kondensators.

Die Abb. 5.81a zeigt den prinzipiellen Aufbau: Eine der Elektroden der kammförmigen Struktur ist wasserdampfdurchlässig. Mit wachsender relativer Feuchte nimmt das Dielektrikum Wasser auf und die Kapazität des Sensors nimmt zu, siehe Kennlinie Abb. 5.81b.

Eine Methodenübersicht zur Feuchtesensorik mit ihren verschiedenen Verfahren und den zugehörigen Sensoren gibt Tab. 5.6.

## 5.7 Mikrosensorik

In der Mechatronik werden Sensoren häufig in miniaturisierter Ausführung benötigt, insbesondere für *Embedded Sensors* der strukturintegrierten Sensorik, die im folgenden Abschnitt dargestellt ist. Unter Mikrosensoren versteht man Sensoren, bei denen mindestens

eine Abmessung im Submillimeterbereich liegt. Die Miniaturisierung ermöglicht eine hohe Funktionsdichte und Messungen mit großer Orts- oder Zeitaufösung. Mikrosensoren lassen sich außerdem zusammen mit der Mikroelektronik auf einem gemeinsamen Substrat zu kompakten Sensor-Modulen integrieren. Herstellungstechnologien für Mikrosensoren sind in Abschn. 9.3 dargestellt.

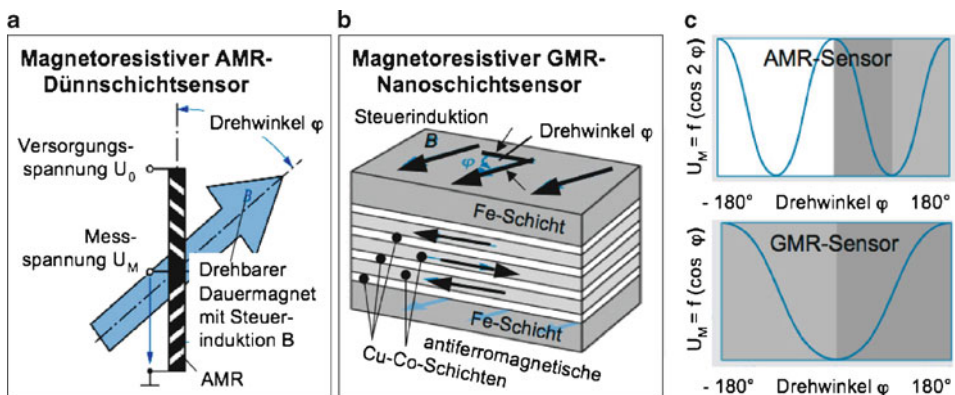
### Mikrosensoren für kinematische Größen

Mikrosensoren für kinematische Größen sind miniaturisierte Sensoren zur Umwandlung der Funktionsgrößen *Position (Wege, Winkel)*, *Geschwindigkeit und Drehzahl*, *Beschleunigung* in elektrische Größen. Durch Anwendung mikro-mechanischer Herstellungsverfahren auf die im Abschn. 5.4 behandelten Sensoren kinematischer Größen können Mikro-Positionssensoren (Weg- und Winkelsensoren) der folgenden Kategorien hergestellt werden:

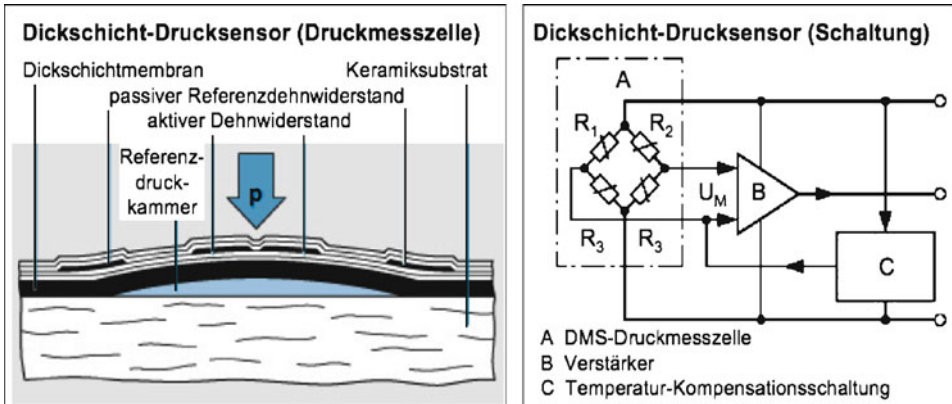
- Widerstandssensoren,
- Elektromagnetische Sensoren,
- Galvanomagnetische Sensoren,
- Optoelektronische Sensoren.

Als kompakte und berührungslos (verschleißfrei) arbeitende Mikro-Drehwinkelsensoren haben magneto-resistive Dünnschichtsensoren eine große Bedeutung erlangt, insbesondere in der Fahrzeugtechnik-Sensorik, siehe Kap. 13. Die Prinzipien der Magnetoelektronik und ihre Anwendung in der mechatronischen Sensorik wurden bereits Abschn. 5.4 erläutert. Abbildung 5.82 zeigt den Aufbau magneto-resistiver Mikrosensoren vom Typ AMR (Anisotrop Magneto Resistive) und GMR (Giant Magneto Resistive) und erläutert vergleichend ihre Funktionen.

AMR-Sensoren bestehen aus 30 ... 50 nm dünnen NiFe-Schichten, deren elektrischer Widerstand (und damit die Messspannung  $U_M$ ) nach einer  $\cos 2\varphi$ -Funktion vom Drehwin-



**Abb. 5.82** Aufbau und Funktion magneto-resistiver Mikro-Drehwinkelsensoren



**Abb. 5.83** Drucksensor nach dem Piezowiderstandsprinzip, realisiert in Volumenmikromechanik

kel  $\varphi$  zwischen AMR-Sensor und der (mit einem Messobjekt verbundenen) Steuerinduktion B abhängt. GMR-Sensoren sind aus CuCo-Nanoschichten aufgebaut. Im Unterschied zu AMR-Sensoren hängt ihr Widerstand nur vom einfachen Drehwinkel  $\varphi$  ab. Damit ist mit GMR-Sensoren die Bestimmung von Drehwinkeln über volle  $360^\circ$  möglich, siehe Abb. 5.82c.

### Mikrosensoren für dynamische Größen

Die meisten der in Dickschichttechnik hergestellten Mikrodruckaufnehmer nutzen die Tatsache aus, dass der spezifische Widerstand von dotiertem Silizium stark von der mechanischen Verzerrung abhängt (Piezowiderstandseffekt). Daher lässt sich die druckabhängige Auslenkung einer Si-Membran über die elektrische Widerstandsänderung eines dotierten Bereiches der Membran detektieren (Prinzip der Kraft-Weg-Wandlung). Abbildung 5.83 zeigt den Aufbau und die Messschaltung eines Mikrodrucksensors.

Beschleunigungs- und Drehratesensoren erfassen die Beschleunigung  $a$  indirekt über die Auslenkung einer seismischen Testmasse  $m$  infolge der Newton'schen Trägheitskraft  $F = m \cdot a$ . Das Prinzip eines kapazitiven Mikrobeschleunigungssensors und seinen mikrostrukturellen Aufbau zeigt Abb. 5.84.

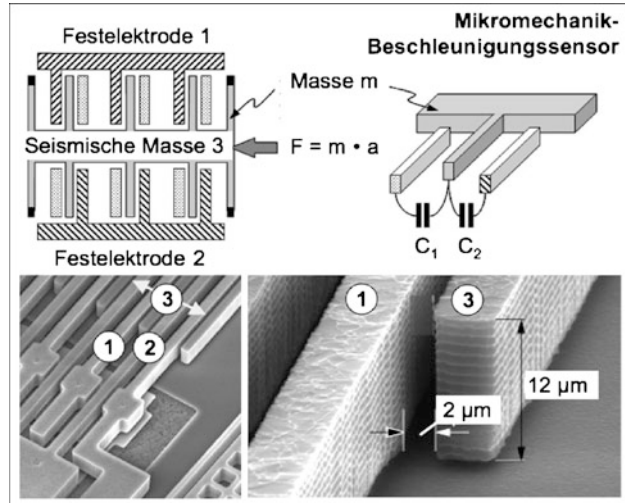
Bei einem Mikromechanik-Beschleunigungssensor liegt die seismische Masse im  $\mu\text{Gramm}$ -Bereich, und es müssen Kapazitätsänderungen von weniger als  $1 \text{ fF}$  detektiert werden. Dies ist nur durch eine sensornahe Signalverarbeitung möglich, d. h. Integration von Sensor und Auswerteelektronik auf einem gemeinsamen Si-Substrat.

### Mikrosensoren für thermische Größen

Die Temperatur ist die wichtigste Einflussgröße und häufig auch eine Prozessgröße mechatronischer Systeme. Die Sensorprinzipien zur Temperaturmessung (Thermoelemente, Widerstandsthermometer, optoelektronische Pyrometer) lassen sich sämtlich miniaturisieren. Ausführungsbeispiele von Mikrosensoren für die Temperatur wurden bereits in Ab-



**Abb. 5.84** Kapazitiver Mikromechanik-Beschleunigungssensor

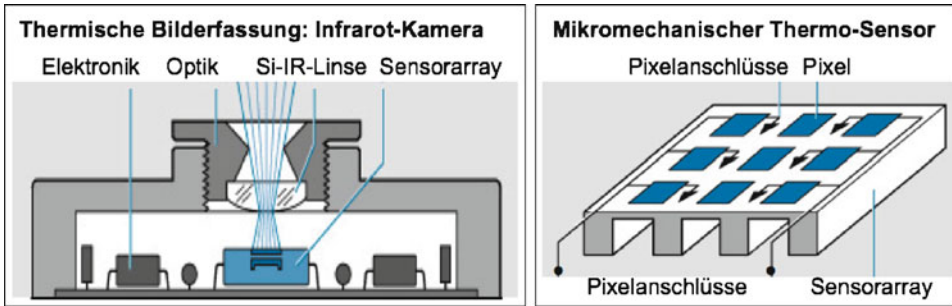


schn. 5.6.1 dargestellt, siehe Abb. 5.76c (Nano-Thermoelement) und Abb. 5.77d (Mikro-Widerstandsthermometer).

Widerstandsthermometer auf Halbleiterbasis nutzen entweder die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit homogener Halbleiterproben oder aber die Temperaturabhängigkeit der Kennlinie von PN-Übergängen. Silizium-Temperatur Sensoren werden gewöhnlich als Ausbreitungswiderstände realisiert. Der Widerstand zwischen einer kreisförmigen Kontaktierung mit dem Durchmesser  $d$  und dem flächigen Rückseitenkontakt einer Siliziumscheibe mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$  beträgt  $R = \frac{1}{2} \rho/d$  und ist unabhängig von der Dicke und dem Durchmesser der Scheibe, solange diese beiden Größen groß gegen den Kontaktdurchmesser  $d$  sind.

Thermoelemente basieren auf der Kombination geeigneter Metalllegierungen. Für industrielle Anwendungen werden die Thermopaardrähte z. B. mit Keramikröhrchen isoliert und in eine Schutzarmatur eingebaut. Kürzere Einstellzeiten erhält man mit Mantelthermoelementen, bei denen die Thermopaare zur Isolation in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  eingebettet und mit einem Edelstahlmantel umhüllt sind. Außendurchmesser von weniger als 3 mm sind dabei realisierbar.

Die pyrometrische Temperatursensorik (vgl. Abb. 5.78) kann durch mikrotechnologische Herstellungsverfahren zur thermischen Bilderfassung erweitert werden. Das Prinzip einer einfachen Infrarot-Kamera ist in Abb. 5.85 dargestellt. Die von einem Messobjekt ausgehende Infrarot (IR)-Strahlung (Strahlungsleistung  $\times$  Emissionskoeffizient) wird mit einer IR-durchlässigen Optik auf einem Thermoelement-Sensorarray abgebildet. Das Array besteht aus hintereinander geschalteten „Thermoelement-Pixeln“ (siehe Thermoelement-Prinzip, Abb. 5.76b). Die „heißen“ Thermoelementpunkte liegen auf einer thermisch gut isolierten dünnen Membran, die „kalten“ Thermoelementpunkte auf dem dickeren Chiprand. Durch eine geeignete Signalverarbeitung mit einem ASIC



**Abb. 5.85** Prinzip einer einfachen Infrarot-Kamera zur thermischen Bilderfassung

(Application Specific Integrated Circuit) können unter Verwendung eines Temperatur-Referenzsensors Bilder von flächenhaften Temperaturverteilungen gewonnen werden.

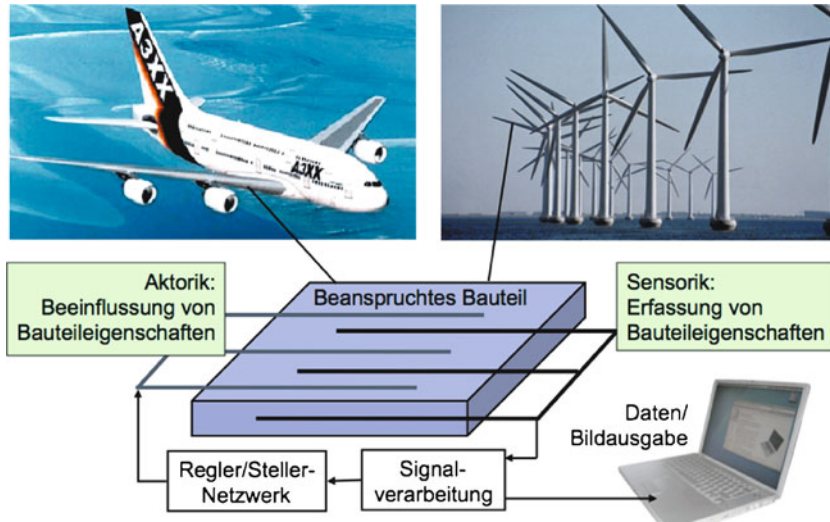
## 5.8 Strukturintegrierte Sensorik

Die Sensorik wird neben der Bestimmung der „operativen Funktionsgrößen“ technischer Systeme zunehmend zur Überwachung der Strukturintegrität technischer Systeme eingesetzt. Wie in Kap. 2 dargestellt, kann sich die Struktur technischer Systeme unter der Einwirkung der operativen Funktionsgrößen – und insbesondere durch Umwelteinflüsse, Störgrößen und Dissipationseffekte – verändern. Hierdurch kann nun wiederum die Funktion des Systems gestört werden oder bei gravierenden Strukturänderungen völlig versagen. Für die Beobachtung, Messung und Überwachung der Eigenschaften und Kenngrößen der strukturellen Bauelemente technischer System von besonderer Bedeutung sind Sensoren, die direkt in strukturelle Bauteile integriert werden können. Im internationalen Sprachgebrauch wird dies als „Embedded Sensors for Structural Health Monitoring“ bezeichnet.

Das Prinzip der strukturintegrierten Sensorik ist in abstrakter Form in Abb. 5.86 dargestellt. Der Sensorausgang kann nach Signalverarbeitung über ein Regler-Steller-Netzwerk einem Aktor zugeführt werden, der im Sinne einer Adaptronik (vgl. Abschn. 6.7) die Eigenschaften des Strukturelements den funktionellen Erfordernissen anpassen kann. Außerdem muss natürlich eine computerunterstützte Daten- und Bildausgabe möglich sein.

Die einfachste Möglichkeit einer strukturintegrierten Sensorik ist das Aufkleben von Dehnungsmessstreifen auf beanspruchte Strukturelemente mechatronischer Systeme. Anwendungen von „Embedded DMS“ sind in den Kap. 10 und 14 mit Beispielen aus der Gerätetechnik und dem Bereich der baulichen Infrastruktur dargestellt.

Embedded Sensors, die in das Innere von Bauteilen integriert werden, müssen über folgenden Eigenschaften verfügen:



**Abb. 5.86** Modelldarstellung zur strukturintegrierten Sensorik

- (a) Geometrische Adaptionfähigkeit zur punktuellen, flächenförmigen oder räumlichen Detektion von Bauteilveränderungen, z. B. Rissbildungen, Korrosion,
- (b) Sensorische Eigenschaften zur Umwandlung struktureller Kenn- und Messgrößen in anzeigbare oder für eine Aktorik weiterverarbeitbare elektrische oder optische Signale.

Sensoreffekte mit elektrischen oder optischen Signalen sind in Tab. 5.7 zusammengestellt.

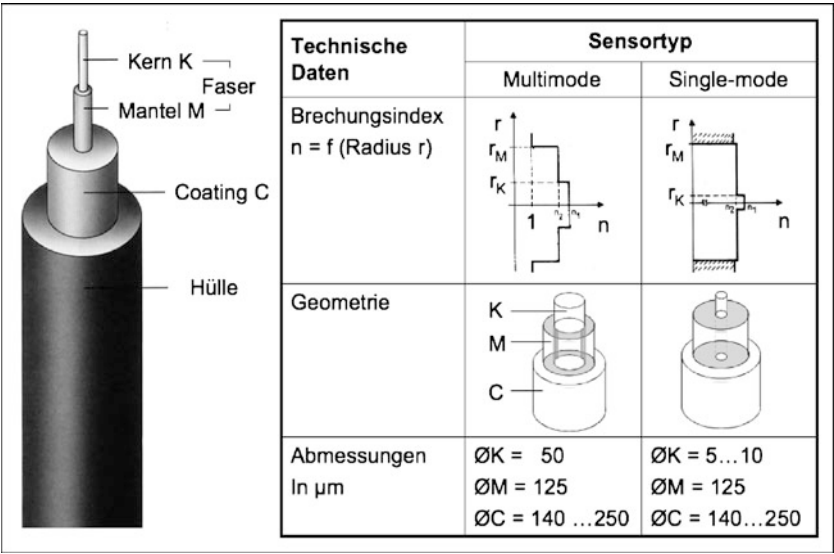
Für die Ermittlung strukturell wichtiger Werkstoff- bzw. Bauteileigenschaften hat die Dehnung die größte Bedeutung. Aus den gemessenen Dehnungen lassen sich Änderungen der Werkstoff- bzw. Bauteilintegrität und mögliche kritische Beanspruchungen erkennen. Die wichtigsten Embedded Sensors für diese Aufgaben sind piezoelektrische und faseroptische Sensoren. Das Funktionsprinzip faseroptischer Sensoren wurde in Abschn. 5.3.2 behandelt. Abbildung 5.87 nennt für optische Si-Fasern die bei der Verwendung als Embedded Sensors wichtigen Kenndaten.

Die technische Anwendung faseroptischer Detektoren in der strukturintegrierten Sensorik erfordert, dass sie in eine Messkette eingebunden werden, die jeweils aufgabenspezifisch auszulegen ist, das Prinzip ist in Abb. 5.88 dargestellt.

Bei der Anwendung von Sensoren, die direkt in Bauteile oder Strukturmodule eingebettet werden, sind natürlich auch die Aspekte der Kalibrierung und der Kompensation von Störgrößen zu berücksichtigen. Abbildung 5.89 zeigt dazu ein messtechnisches Konzept mit einer Messfaser und einer Referenzfaser zur Kompensation von Temperatureinflüssen nach dem Prinzip des Michelson-Interferometers (vgl. Abb. 5.52).

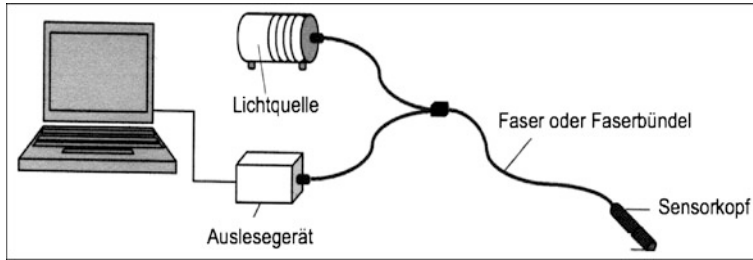
**Tab. 5.7** Sensoreffekte für die werkstoff-, bauteil- und strukturintegrierte Sensorik

Kenn/Messgrößen von Strukturelementen	Sensoreffekte	
	elektrisches Signal	optisches Signal
<b>mechanisch</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Dehnung</li><li>• Schwingung</li><li>• Beschleunigung</li><li>• Kraft</li><li>• Druck</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• piezoelektrischer Effekt</li><li>• piezoresistiver Effekt</li><li>• Widerstandsänderung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Änderung der<ul style="list-style-type: none"><li>– Transmission</li><li>– Wellenlänge</li><li>– Phase</li><li>– Laufzeit</li></ul></li></ul>
<b>chemisch-physikalisch</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Temperatur</li><li>• Wärmefluss</li><li>• Feuchte</li><li>• O<sub>2</sub>-Konzentration</li><li>• ph-Wert</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Thermowiderstand</li><li>• Thermoelektrischer Effekt</li><li>• Elektrische Leitfähigkeit</li><li>• Chemowiderstand</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fluoreszenz</li><li>• Änderung der<ul style="list-style-type: none"><li>– Transmission</li><li>– Reflexion</li><li>– Phase</li><li>– Raman-Streuung</li><li>– Brillouin-Streuung</li></ul></li></ul>

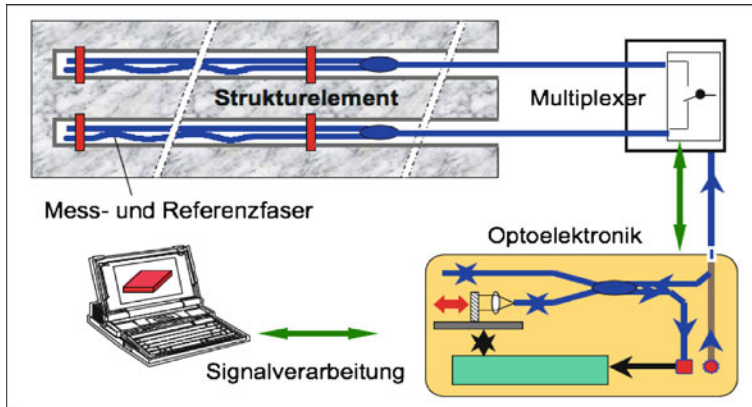


**Abb. 5.87** Kenndaten faseroptischer Sensoren, die als Embedded Sensors verwendet werden

Ein wichtiger Anwendungsbereich von *embedded sensors* ist die Strukturmechanik. Mit eingebetteten Sensoren kann die strukturelle Funktionsfähigkeit technischer Systeme – die erfordert, dass die Festigkeit bzw. Tragfähigkeit eines Bauteils in allen Belastungssituationen größer sein muss als die äußere Beanspruchung – überwacht werden.



**Abb. 5.88** Prinzip einer faseroptischen Anordnung für die strukturintegrierte Sensorik



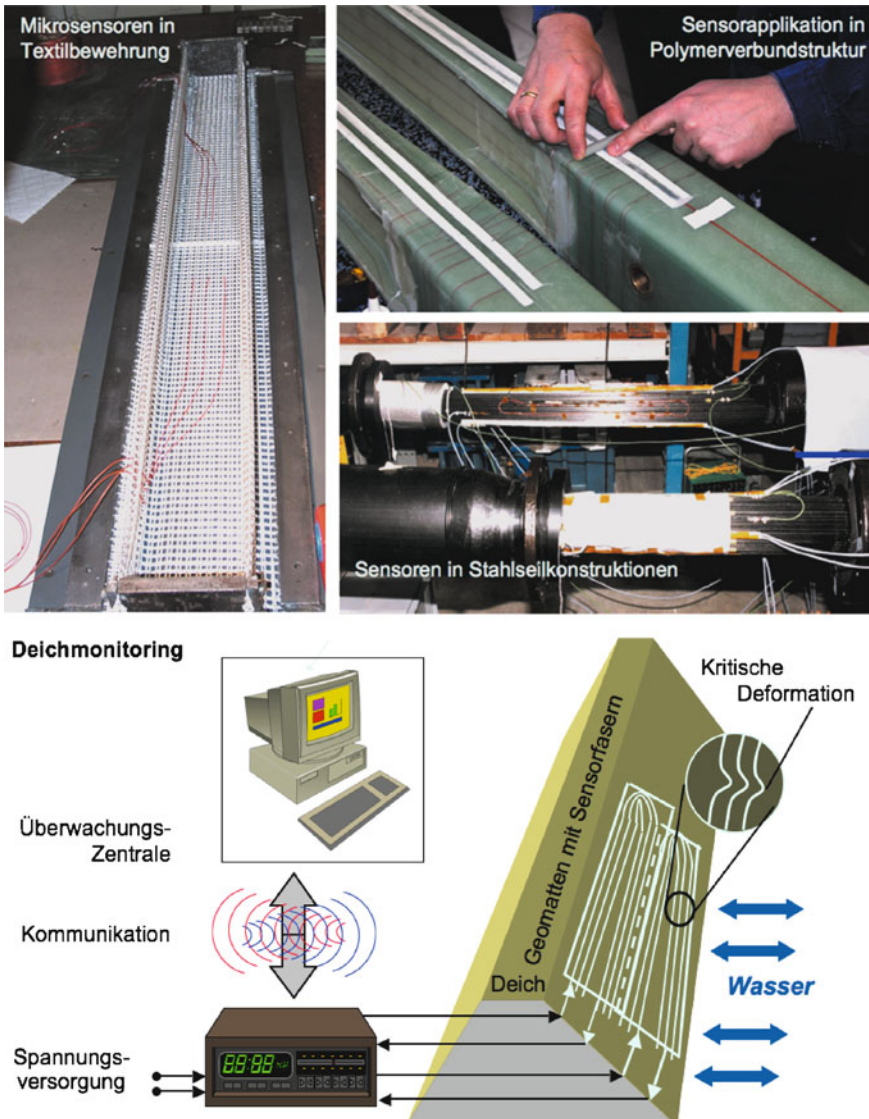
**Abb. 5.89** Messaufbau eines faseroptischen Systems, Michelson-Interferometer-Prinzip

Beispiele für die Integration von Sensoren in Bauteile unterschiedlicher Werkstoffklassen sowie zur Überwachung einer Deichanlage zeigt Abb. 5.90.

Für die Signalübertragung von Sensoren, die in technischen Objekten eingebettet sind, wurden Sender-Empfänger-Systeme entwickelt, bei denen mit einer **RFID-Technologie** (radio-frequency identification) Sensorsignale mittels elektromagnetischer Wellen übertragen werden. Ein RFID-Tag besteht aus einem, in ein technisches Objekt (oder in ein Lebewesen) eingebetteten *Transponder*, der einen kennzeichnenden Code enthält sowie einem Lesegerät zum Auslesen der Kennung, womit sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten der strukturintegrierten Sensorik ergeben.

## 5.9 Cyber-physische Systeme

Durch die Kombination von Sensorik, RFID-Technologien und den IuK-Möglichkeiten des Internet können neue technische Systeme geschaffen werden, für die im Entwicklungsprojekt Industrie 4.0 ([www.plattform-i40.de](http://www.plattform-i40.de)) die Bezeichnung *Cyber-physische Sys-*



**Abb. 5.90** Strukturintegrierte Sensorik zur Überwachung technischer Anlagen, Beispiele

teme (CPS) geprägt wurde. CPS benutzen Sensoren, die physikalische Daten erfassen und über digitale Netze mittels Aktoren auf Produktions-, Logistik- und Engineeringprozesse einwirken, wobei sie über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen. Als Beispiel wird ein sensorbasiertes System der Gefahrgutlogistik dargestellt. Ziel ist, den Umgang mit Gefahrgütern durch den Einsatz von Sensoren, Identifikationstechniken und Telematikanwendungen einfacher, sicherer und wirtschaftlicher zu gestalten.



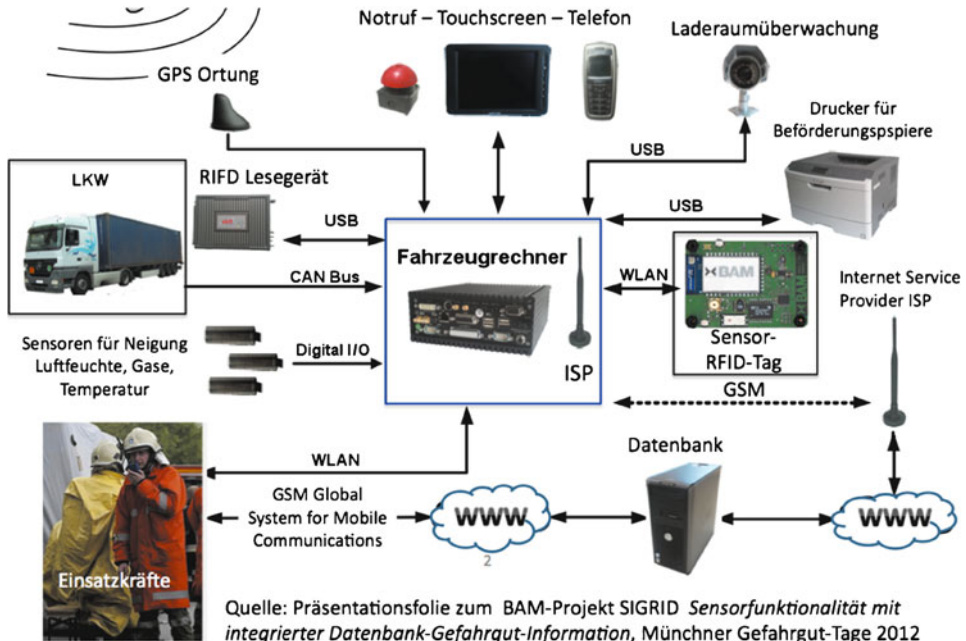


**Abb. 5.91** Logistikkonzept des Gefahrguttransports

Das Logistikkonzept sieht vor (siehe Abb. 5.91), dass Gefahrgutbehälter mit einem aktiven Sensor-RFID-Tag ausgestattet sind, auf dem alle verpackungsrelevanten Daten abgelegt sind: Zulassungscode, Füllgüter, Werkstoff, Gewicht, Füllvolumen, Herstellungs- und Inspektionsdatum. Der Sensor-RFID-Tag kann über UHF-RFID, aber auch über WLAN (wireless local area network) kommunizieren. Alle Daten werden zusätzlich in einer Datenbank des Herstellers gespeichert, auf die auch über das Internet zugegriffen werden kann.

Bei der Beladung eines Transportfahrzeugs mit Gefahrgut werden die Stoff- und Verpackungsdaten an den Fahrzeugrechner in der Fahrerkabine übermittelt. Der Fahrzeugrechner ist über eine Internetverbindung mit der Datenbank GEFAHRGUT der BAM verbunden. Die Datenbank GEFAHRGUT kann eine Überprüfung der Zusammenladeverbote und der Mengenbegrenzungen durchführen. Sollte die Ladung gegen Beförderungsvorschriften verstoßen, wird ein Fehlerbericht an den Fahrzeugrechner gesendet. Ansonsten erhält der Fahrer die zu berücksichtigenden Tunnelbeschränkungs-codes und das Beförderungspapier. Als Datenformate stehen derzeit XML (extensible markup language) und PDF (portable document format) zur Verfügung. Die gesamte Kommunikation mit der Datenbank GEFAHRGUT findet über eine XML-Schnittstelle statt.

Während des Transports übermitteln Sensoren die aktuellen Messwerte für Temperatur, Luftfeuchte sowie Sauerstoffgehalt und das Brandgas Kohlenmonoxid an den Fahrzeugrechner, der über das Mobilfunknetz mit einem Zentralrechner verbunden ist. Bei einem Unfall, einer Überschreitung der Grenzwerte oder dem Verlassen einer vorher angegebenen Route wird eine Alarmmeldung an den Zentralrechner geschickt.



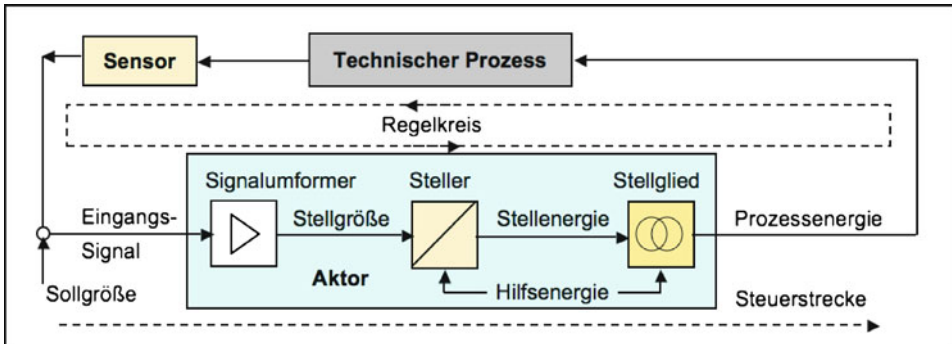
**Abb. 5.92** Systemüberblick über das sensorbasierte System der Gefahrgut-Transportlogistik

Einen Systemüberblick über das sensorbasierte System der Gefahrgut-Transportlogistik gibt Abb. 5.92. Der Fahrzeugrechner stellt mit einem robusten Industrie-PC die Kommunikationszentrale auf dem Lkw dar. Zu den wesentlichen Funktionen des Fahrzeugrechners zählt die Erfassung der aktuellen Position mittels GPS, die Navigation, die Bereitstellung der Beförderungspapiere, die Datenkommunikation über die Mobilfunknetze, die Überwachung des Laderaums über Videokamera und Sensoren, sowie die Bereitstellung einer WLAN-Schnittstelle für die Erfassung von Ladungs- und Sensordaten, aber auch für die Information von Einsatzkräften.

Aktoren haben in der Mechatronik die Aufgabe, mit steuerungs- und regelungstechnischen Funktionsprinzipien Bewegungen zu erzeugen, Kräfte auszuüben oder mechanische Arbeit zu leisten. Sie können auch zum impulsförmigen Stofftransport eingesetzt werden, wie z. B. in Einspritzmotoren oder Tintenstrahldruckern. Tabelle 6.1 gibt eine Übersicht über die hauptsächlichen Aktortypen und ihre Funktionsprinzipien.

**Tab. 6.1** Gliederung von Aktoren nach der für die Aktorfunktion benötigten Hilfsenergie

Aktor-Energie	Aktortyp	Prinzip	Beispiele
Elektrische Energie	Elektromagnetisch	Kraftwirkung auf Körper im Magnetfeld	Hubmagnet, Dreh- und Schwingmagnet
	Elektrodynamisch	Lorentzkraft auf elektrischen Leiter im Magnetfeld	DC-, AC-Motor, Tauchspule, Linearmotor
	Piezoelektrisch	Piezokristall-Dickenänderung durch elektr. Spannung	Piezo-Motor, Tinten drucker, Einspritzventil
	Magnetostriktiv	Ferromagnetische Volumenänderung im Magnetfeld	Stelleinheit, Translator,
	Magn/Elekt/rheol	Viskositätsänderung im elektrischen/magnetischen Feld	Kupplung, Stoßdämpfer, Pumpenantrieb
Strömungsenergie (Fluidik)	Pneumatisch	Fluidische Druckdifferenz, Verdrängungsströmung	Schubmotor Membranantrieb
	Hydraulisch	Fluidische Druckdifferenz, Verdrängungsströmung	Translations-, Rotationsmotor
Thermische Energie	Thermobimetall	Wärmeausdehnungsdifferenz eines Materialverbundes	Thermoschalter
	Formgedächtnis	Gefügeumwandlung	Stellelemente
	Dehnstoff	Volumenänderung	Stellantrieb, Thermostat
Chemische Energie	Elektrochemisch	Druckänderung durch elektrochemische Reaktion	Gasdosierer, Dehnungs-Stellelement



**Abb. 6.1** Der prinzipielle Aufbau eines Aktors und seine Funktion

Aktoren steuern oder regeln technische Prozesse. Ihre Funktion und technische Ausführung erläutert Abb. 6.1 am Beispiel eines elektromechanischen Aktors:

- In mechatronischen Systemen wird das Eingangssignal eines Aktors meist aus der (elektrischen) Ausgangsgröße eines Sensors gebildet.
- Das Aktor-Eingangssignal wird durch einen *Signalumformer* (z. B. Verstärker, elektronischer Schaltkreis) in eine *Stellgröße* umgeformt und einem *Steller* zugeführt.
- Der *Steller* (z. B. Elektromotor) ist ein *Wandler*, der die *Hilfsenergie* – gesteuert durch die *Stellgröße* – in die benötigte *Stellenergie* umwandelt.
- Das *Stellglied* (z. B. Getriebe) überführt die *Stellenergie* in *Prozessenergie*, z. B. Bewegungsenergie für Translationen, Rotationen, Kräfte oder Drehmomente.

## 6.1 Elektromechanische Aktoren

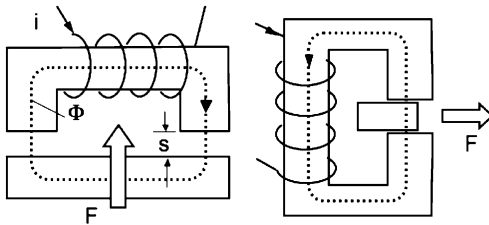
### 6.1.1 Funktionsprinzipien elektromechanischer Aktoren

Physikalische Grundlagen der elektromechanischen Aktoren sind das elektromagnetische und das elektrodynamische Prinzip, siehe Abb. 6.2 und 6.3. In einem stationären Feld der elektrischen Feldstärke  $E$  und der magnetischen Flussdichte  $B$  wirkt auf eine mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegte elektrische Ladung  $Q$  die Lorentz-Kraft  $F = Q(E + v \times B)$ . Die Vektoren  $v$ ,  $B$ ,  $F$  bilden ein rechtwinkliges kartesisches Koordinatensystem. Die Kraft des elektrostatischen Feldes (Coulombkraft  $F = Q \cdot E$ ) ist gering und wird in der Mikroaktuatorik angewendet (Mikromotor, Elektrometer, Elektrostatischer Lautsprecher), siehe Abschn. 6.8. Die Kräfte des Magnetfeldes sind wesentlich größer. Der magnetische Fluss wird in der Regel in einem magnetisch gut leitenden Pfad (Eisen) geführt, um höhere Kräfte zu erzeugen sowie Streufelder (Störungen der Umgebung) zu verringern.

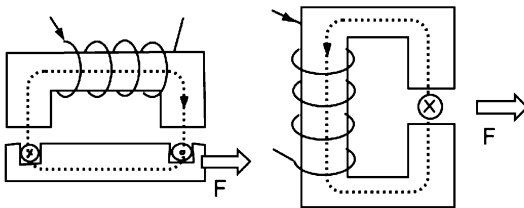
Durch die Kombination eines elektrodynamischen Aktors mit einem mechanisch zu bewegenden Element können mechatronische Bewegungssysteme aufgebaut werden, siehe

**Elektromagnetisches Aktor-Prinzip**

- Bei Elektromagneten (Eisenkern in einer Spule mit Strom  $i$  und Windungszahl  $N$ ) treten an Trennflächen unterschiedlicher Permeabilität  $\mu$  Kraftwirkungen auf.
- Ein Elektromagnet wird gekennzeichnet durch die magnetischen Zustandsgrößen *effort* (Durchflutung  $\Theta = N \cdot i$ ) und *flow* (Magnetfluss  $\Phi = \int B \, dA$ ).
- Die Kraftwirkung ist proportional zur Änderung der im Feld gespeicherten Energie  $W = 1/2 B H A l$  ( $A$  Querschnitt,  $l$  Länge der Feldlinie).

**Reluktanzprinzip, variabler Luftspalt, ausgeprägte Pole**

- Ursache des Feldes: Durchflutung  $\Theta$
- Feldstärke:  $H = N i / l$
- Flussdichte  $B = \mu H$  (max 2 Tesla)
- Die Wirkung geht vom Fluss aus  $\Phi = B A$
- Kraft: ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ ,  $\mu_{Luft} = \mu$ )  
 $F = \Delta W / \Delta s = A B^2 / 2\mu$

**Abb. 6.2** Das elektromagnetische Prinzip und seine elementaren Kennzeichen**Elektrodynamisches Aktorprinzip: Lorentz-Kraft auf bewegte Ladungen im elektromagnetischen Feld, konstanter Luftspalt, in Eisen eingebettete oder freitragende Wicklung,  $l$ : Leiterlänge im Magnetfeld****Kraft auf Leiter im Magnetfeld:**

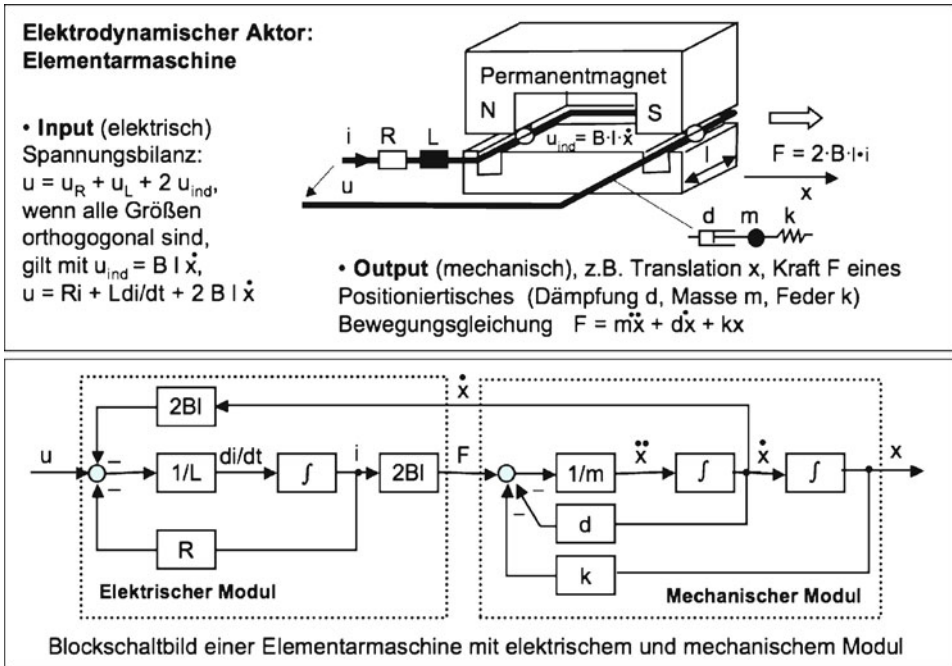
- $F = i l B$ ;  $F$ ,  $i$  und  $B$  stehen senkrecht zueinander
- Berechnung von  $B$ :  
 $N i = H l = H_{Luft} l_{Luft} + H_{Fe} l_{Fe}$   
für  $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$   $\mu_{Luft} = \mu_0$   
 $H_{Luft} = N i / l_{Luft}$   $B = \mu_0 H_{Luft}$
- Spannung am Leiter:  
 $P_{mech} = P_{elektr} = F x = u i$   
 $u(t) = B l x$

**Abb. 6.3** Das elektrodynamische Prinzip und seine elementaren Kennzeichen

Abb. 6.4. Das Prinzip hat vielfältige Anwendungen in der Mechatronik. In CD/DVD-Playern wird es beispielsweise zur automatischen Fokussierung der Laserstrahlabtastung beim Auslesen der in einer CD (compact disc) gespeicherten Datenspur verwendet, siehe Abb. 11.11. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Mechatronische Waage mit elektromagnetischer Kraftkompensation, siehe Abb. 10.10.

**6.1.2 Elektromotoren als Aktoren**

Elektromotoren sind die klassischen Aktoren der Elektromechanik. Sie basieren auf elektrodynamischen und elektromagnetischen Prinzipien und wandeln elektrische Energie in



**Abb. 6.4** Das Prinzip einer mechatronischen Elementarmaschine

mechanische Arbeit um. Die Umwandlung beruht auf den Kräften bzw. Drehmomenten, die ein Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter ausübt. Elektromotoren werden nach der Art der mechatronischen Bewegungsausübung in Linearmotoren (Wanderfeldmotoren) und Rotationsmotoren (Elektromotoren im engeren Sinn) sowie nach der Art der Stromversorgung in Gleich-, Wechsel- und Drehstrommotoren eingeteilt. Die folgenden Stichworte geben eine kurze Übersicht.

### Linearmotoren

Linearmotoren sind elektrische Antriebsmotoren mit geradliniger Vortrieb-Bewegung, bei dem sich der eine Motorteil unter dem Einfluss elektromagnetischer Kräfte berührungslos gegenüber dem anderen geradlinig verschiebt. Anwendungsbereiche: Positionierungssysteme für Werkzeugmaschinen; Antriebsmittel für Magnetschwebbahnen, Sekundärteil meist als Fahrschiene ausgebildet.

### Gleichstrommotoren

Dem Anker wird über einen Stromwender (Kommutator) fortlaufend umgepolter Strom zugeführt. Die stromdurchflossene Wicklung wird im Magnetfeld der im Ständer angebrachten Elektromagnete (Feldmagnete) rotatorisch abgelenkt; der Anker dreht sich, die nächste Wicklung erhält Strom usw.



### Einteilung von Gleichstrommotoren:

- Direkt an Gleichspannung: kleine Motoren ohne Zusatzwicklungen:
  - Nebenschluss Parallelschaltung von Anker- und Erreger-Wicklung konstantes Feld bzw. Fluss  $c \cdot \phi$ , feste Drehzahl,
  - Hauptschluss: Anker- und Erreger-Wicklung in Reihe geschaltet automatische Feldschwächung bei hohen Drehzahlen erhöhtes Anzugsdrehmoment gegenüber Nebenschluss, variable Drehzahl,
- Elektronisch gespeist:
  - Permanenterragt: konstanter Fluss durch Permanentmagneten,
  - Fremderregt: getrennte elektronische Speisung von Anker- und Erregerwicklung,
- Elektronisch kommutiert:
  - mechanischer Kommutator durch elektronische Schalter ersetzt, kein Bürstenverschleiß, mechanischer Teil kleiner, in der Regel permanenterragt, Erregung rotierend innen, Anker außen. Werden die Ströme nicht wie beim Gleichstrommotor geschaltet, sondern sinusförmig geregelt, spricht man von einem Synchronmotor.

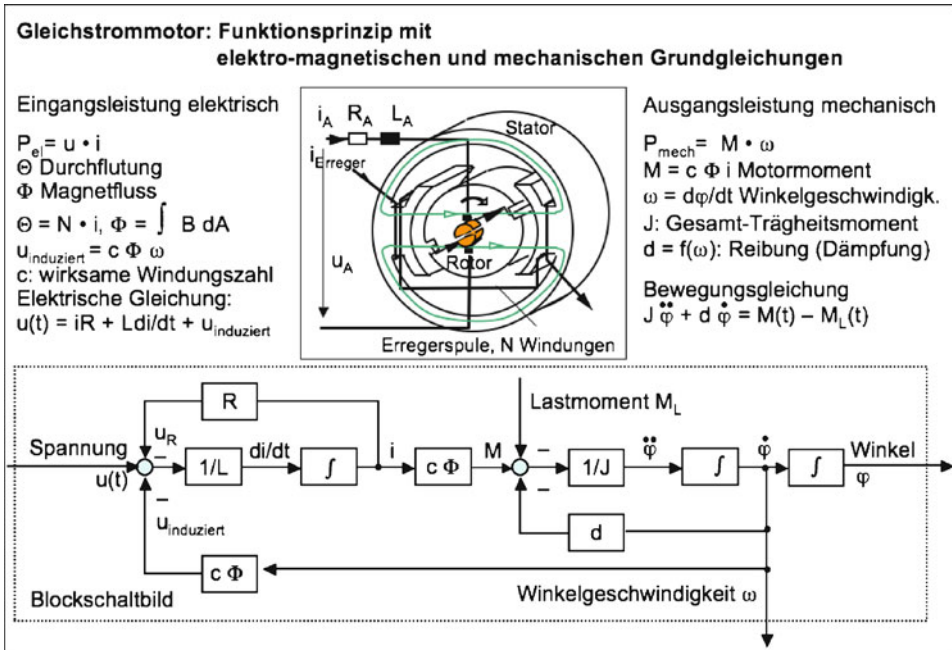
### Wechselstrom- und Drehstrommotoren

Das Prinzip ist das gleiche wie beim kommutatorlosen Gleichstrommotor (Commutatorless DC-Motor). In der Regel drei Ständerwicklungen, die sinusförmig gespeist werden. Bei einphasiger Speisung muss zum Anlaufen die Drehrichtung durch Hilfswicklungen festgelegt werden. Unterschiedliche Läuferbauformen machen daraus Synchron-, Reluktanz- oder Asynchronmotoren.

### Einteilung der Wechselstrommotoren:

- Synchronmotor: Durch Speisung mit einem Frequenzumrichter kann die Drehzahlverstellt werden. Bei Speisung durch das Versorgungsnetz feste Drehzahl, spezielle Anlaufverfahren notwendig.
- Reluktanzmotor: Läufer des Synchronmotors ohne Erregung, nur die Polform ist entscheidend. Das Reluktanzprinzip erzeugt geringere Kräfte.
- Asynchronmotor: Läufer mit Kurzschlusskäfig oder gewickelter Läufer mit Schleifringen. Durch einen geringen Schlupf wird in der Läuferwicklung eine kleine Spannung induziert, die durch den Kurzschluss einen hohen Strom hervorruft, der zusammen mit dem Fluss ein Drehmoment erzeugt. Durch Speisung mit einem Frequenzumrichter kann die Drehzahl verstellt werden. Anlauf am Netz ohne spezielle Anlaufverfahren.
- Schrittmotor: Die Synchron- und Reluktanzmotoren können als Schrittmotoren stark überdimensioniert gebaut werden. Der Läufer folgt dann genau den Strömen im außen liegenden Anker. Man spart damit den Positionssensor.

Der in der Mechatronik für Aktoren am häufigsten verwendete Elektromotortyp ist der Gleichstrommotor mit außerordentlich vielfältigen Bauformen und Anwendungen in der



**Abb. 6.5** Funktionsprinzip, Grundgleichungen und Blockschaltbild eines Gleichstrommotors

Makrotechnik bis hin zur Mikrotechnik. In Abb. 6.5 sind die allgemeinen Merkmale von Gleichstrommotoren in einer vereinfachten Übersicht zusammengefasst.

Typische Anwendungsbereiche von Gleichstrommotoren reichen von Fahrzeugantrieben über Anlasser für Verbrennungskraftmaschinen zu Scheibenwischantrieben und Kleinantrieben in Hausgeräten bis zu mechatronischen Regelantrieben in CD-Playern.

Im Bereich der reinen Mikrotechnik sind infolge von Skalierungseffekten häufig elektrostatische Mikroaktoren günstiger, siehe dazu Abschn. 6.8.

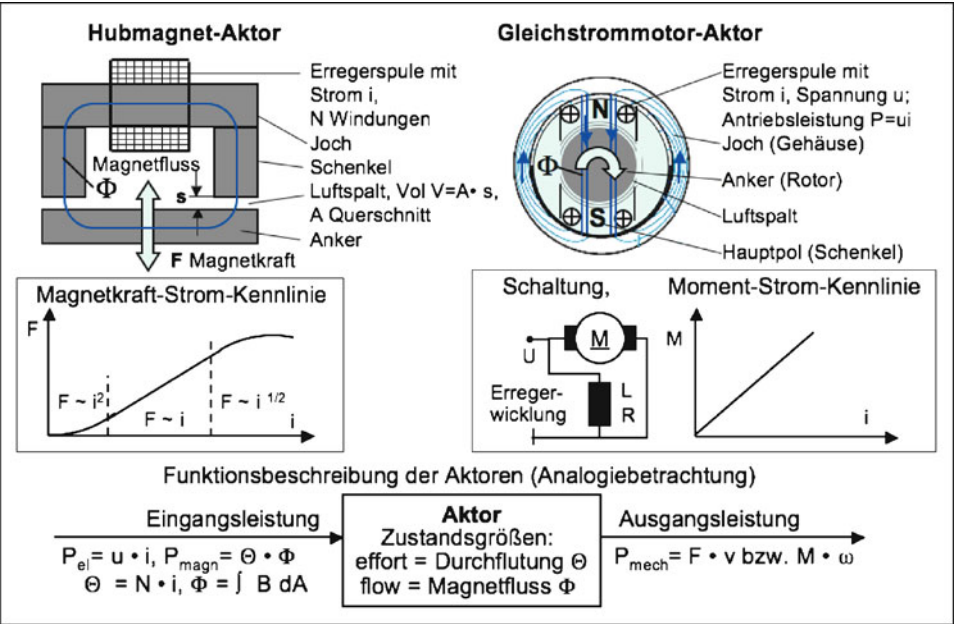
Ebenso wie Gleichstrommotor-Aktoren werden in der Mechatronik auch Hubmagnet-Aktoren vielfältig eingesetzt. Abbildung 6.6 zeigt dazu eine Analogiebetrachtung.

Elektromotoren bilden in der Mechatronik häufig den zentralen Teil eines gesamten Aktorsystems. In Abb. 6.7 ist der Systemzusammenhang vereinfacht dargestellt.

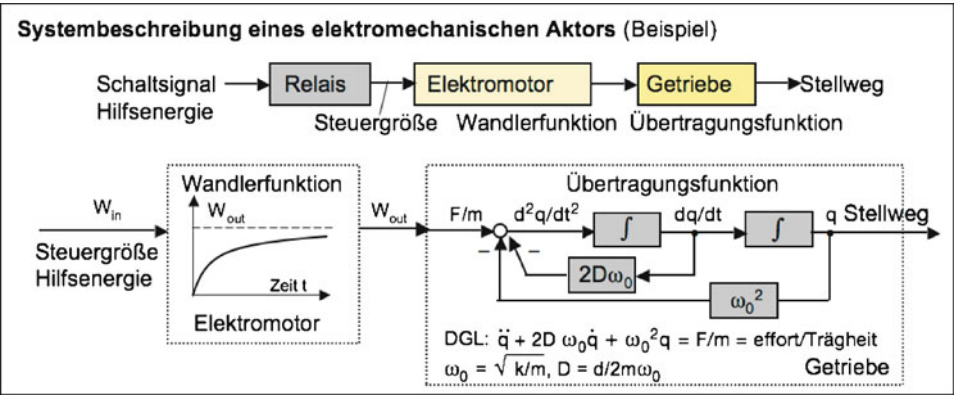
Elektromotorische Aktoren sind mit einer geeigneten Steuerungstechnik zu betreiben. Abbildung 6.8 zeigt dazu ein einfaches Beispiel.

## 6.2 Piezoelektrische Aktoren

Bei bestimmten Festkörpern tritt bei Einwirkung einer mechanischen Spannung eine Verschiebung von Teilen der negativ geladenen Atomhülle gegenüber dem positiv gelade-



**Abb. 6.6** Aufbau und Kennzeichen von Aktoren: Analogiebetrachtung elektromagnetischer und elektrodynamischer Aktoren



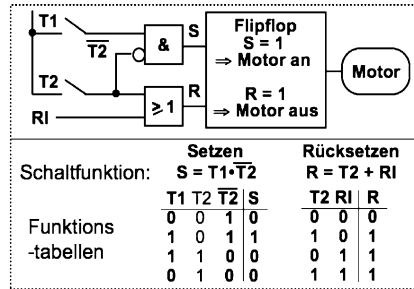
**Abb. 6.7** Elektromotor als Bestandteil eines mechatronischen Aktorsystems

nen Kristallgitter auf; es bilden sich mikroskopische Dipole innerhalb der Elementarzellen. Die piezoelektrische Polarisation tritt nur in unsymmetrischen Kristallgittern mit einer polaren Achse auf und ist richtungsabhängig. Den piezoelektrischen Effekt zeigen beispielsweise Kristalle aus Quarz, Lithiumniobat und Zinkoxid oder Keramiken wie Bleizirconat-Titanat (PZT) sowie das Polymer Polyvinylfluorid (PVDV). In der Sensorik

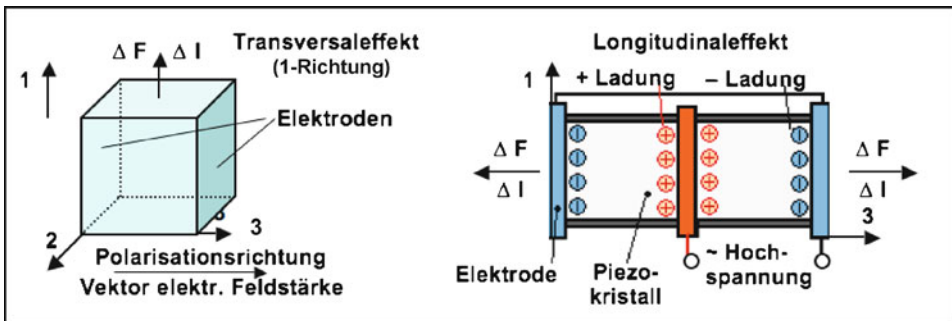
### Steuerung elektromechanischer Aktoren

Beispiel: Ein- und Ausschalten eines Stellmotors

- Einschalten: Betätigung des Tasters T1
- Ausschalten: Betätigung des Schalters T2
- Bei gleichzeitiger Betätigung beider Taster dominiert der Ausschaltbefehl über den Einschaltbefehl
- Direktes Ausschalten durch Richtimpuls RI („Not-Aus“)



**Abb. 6.8** Beispiel einer einfachen Steuerungsfunktion für einen elektromechanischen Aktor



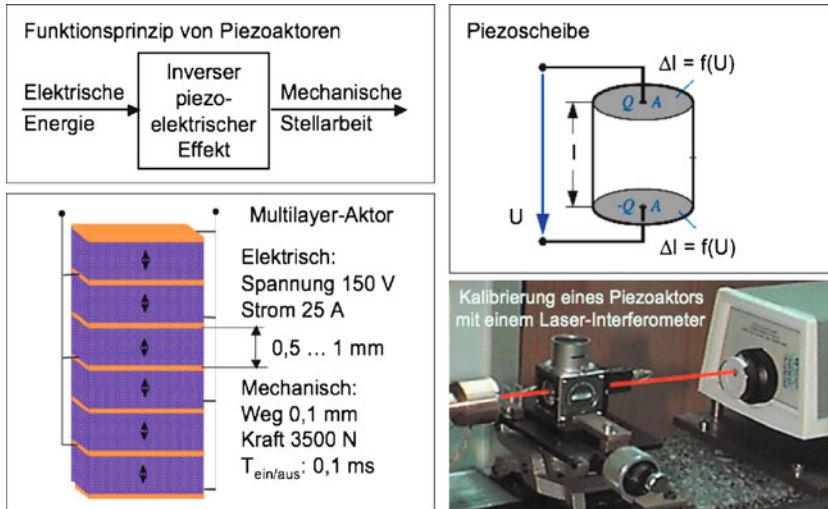
**Abb. 6.9** Der inverse piezoelektrische Effekt, Grundlage der Piezo-Aktoren

wird die Veränderung des Ladungszustandes durch eine mechanische Spannung für piezoelektrische Kraftsensoren genutzt (vgl. Abb. 5.82). Piezoelektrische Aktoren basieren auf dem inversen piezoelektrischen Transversal- oder Longitudinaleffekt, siehe Abb. 6.9. Sie dehnen sich unter einer angelegten elektrischen Spannung aus und können damit einen mechanischen Druck ausüben. Eine Zugwirkung kann durch mechanische oder elektrische Vorspannung erreicht werden. Piezoaktoren sind damit elektro-mechanische Wandler, elektrisch steuerbar und im nm- bis  $\mu\text{m}$ -Bereich exakt positionierbar. In elektrischer Hinsicht sind sie reine Kapazitäten und verbrauchen nur im aktiven Betrieb elektrische Energie.

Piezo-Aktoren haben keine mechanisch beweglichen Teile, sie sind bei Belastungszyklen bis zu  $10^9$  praktisch wartungsfrei. Abbildung 6.10 zeigt das Funktionsprinzip und Ausführungsarten in Form von Piezoscheiben und Multilayer-Aktoren sowie die Kalibrierung mit einem Laser-Interferometer.

Piezoaktoren sind durch Eigenschaften gekennzeichnet, die neuartige Anwendungen in der Technik ermöglichen. Dies zeigt die folgende Übersicht:

- Piezomodul: Dehnung/Einheit des elektrischen Feldes,
- Spannungskoeffizient: Dehnung/Einheit der Ladungsdichte,



**Abb. 6.10** Piezoelektrische Aktoren: Ausführungsarten, Kalibrierung, Anwendungsbeispiel

- Positioniergenauigkeit im Stellbereich  $< \text{nm}$  bis etwa  $100 \mu\text{m}$ ,
- Steifigkeit:  $> 5 \text{ MN/mm}$  für einen PZT-Aktor mit  $100 \mu\text{m}$  Stellbereich,
- Dynamik: Sprungantwort-Zeitkonstanten  $< 50 \mu\text{s}$ .

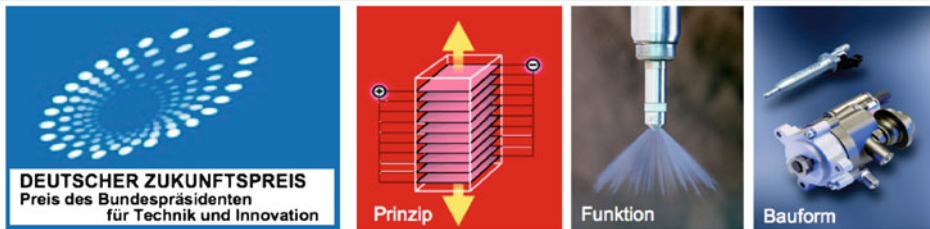
Die einzigartigen technischen Eigenschaften von Piezo-Aktoren haben die Entwicklung technischer Systeme von großer technisch-wirtschaftlicher Bedeutung ermöglicht, wie die Beispiele von Abb. 6.11 aus unterschiedlichen Technikbereichen zeigen:

- **Motortechnik:** Neuartige Piezo-Injektortechnik – ausgezeichnet durch den Deutschen Zukunftspreis 2005 des Bundespräsidenten – ermöglicht eine erhebliche Verbesserung der Motortechnik für Kraftfahrzeuge.
- **Druck- und Medientechnik:** Piezo-Aktoren sind der mechatronische Funktionsmodul der vielseitig verwendbaren Tintenstrahldrucker, bei denen durch piezogesteuerten Abschuss (DOD, drop on demand) von Tintentröpfchen das Druckbild erzeugt wird. (Für den impulsförmigen Stofftransport in der Drucktechnik kommen auch elektrothermische Fluid-Aktoren zur Anwendung, siehe Abb. 6.18).

## 6.3 Fluidmechanische Aktoren

Fluidmechanische Aktoren sind hydraulische oder pneumatische Stelleinrichtungen, die flüssige oder gasförmige Energieträger zur Ausübung von Bewegungen, Kräften und mechanischer Arbeit in mechatronischen Systemen nutzen. Die Funktion fluidmechanischer





### Piezo-Injektoren: neue Technik für saubere und sparsame Motoren

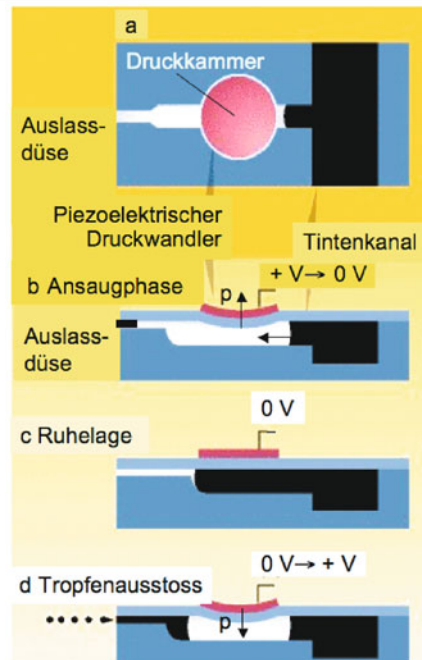
– DEUTSCHER ZUKUNFTSPREIS, 250 000 €, Pressemitteilung 16. Dezember 2005 –

- Kernkomponente eines Dieselmotors ist das Einspritzsystem. Es besteht aus einer Pumpe, die den Kraftstoff auf ein hohes Druckniveau bringt, und einer Düse, die mit Hilfe eines Ventils fein dosiert Kraftstoff in den Motorzylinder einschießt.
- Je höher der Druck und je genauer Dosis und Zeitpunkt des Einspritzens sind, desto effizienter und schadstoffärmer ist die Verbrennung.
- Die Piezo-Technik ist ein neuer Weg zur Steuerung der Ventile. Wesentlicher Bestandteil des Piezo-Injektors ist ein **Aktor**, der aus mehreren hundert dünnen Piezo-Keramikschichten besteht und durch Spannungsimpulse gesteuert die Einspritzdüse öffnet und schließt.
- Piezo-Steller haben gegenüber den Stellern mit elektromagnetischem Antrieb prinzipielle Vorteile: Sie sind schneller, haben höhere Stellkraft, hohe Schaltgeschwindigkeit und erlauben eine kompaktere Bauweise.
- Durch den Einsatz des Piezo-Aktors kann eine weitere Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit der Schadstoffemission erzielt werden.
- Die Vorteile der Piezo-Direkteinspritzung sind so überzeugend, dass die Piezo-Technologie demnächst auch bei Direkteinspritzsystemen für Benzinmotoren eingesetzt werden soll.

### Piezo-Aktoren im Tintenstrahldrucker

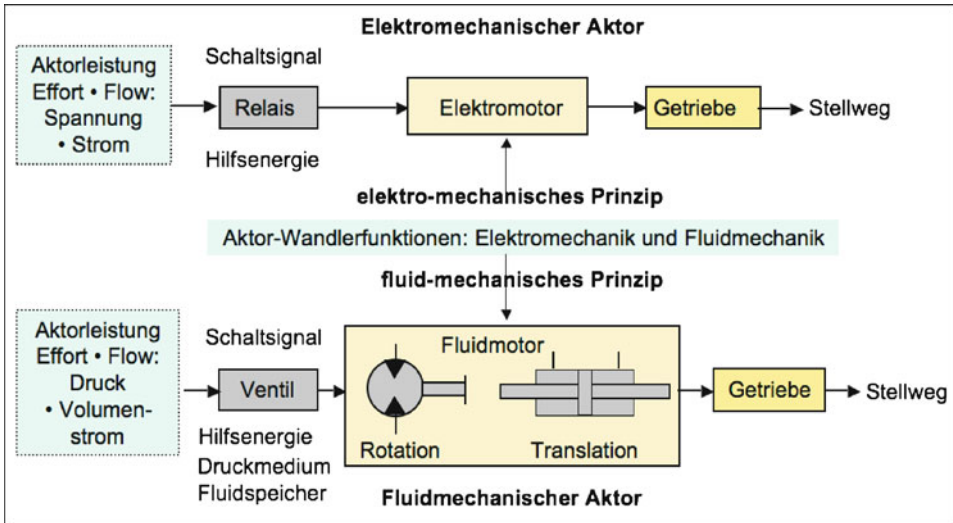
a: Elektrisch ansteuerbare Piezo-Schwingmembranen befinden sich auf der Druckkammer zwischen Tintenkanal und Auslassdüse.

b... d: Die Piezoschwinger erzeugen durch Spannungswechsel ( $0\text{ V} \leftrightarrow +\text{V}$ ) Saug/Druckimpulse  $p$  für Tintentransport, Tröpfchenbildung und Tröpfchenflug zum Papier.

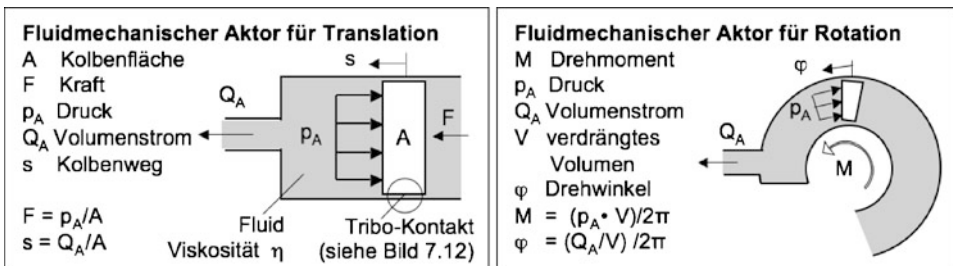


**Abb. 6.11** Technik-Innovationen durch Piezo-Aktorik: Motortechnik und Tintenstrahldrucker





**Abb. 6.12** Analogiebetrachtung fluidischer und elektromechanischer Aktoren



**Abb. 6.13** Prinzipdarstellungen fluidmechanischer Aktoren für Translation und Rotation

Aktoren kann in Analogie zu der elektromechanischer Aktoren gesehen werden. Abbildung 6.12 gibt dazu eine Übersicht. Die Leistung fluidmechanischer Aktoren ergibt sich wie bei anderen mechatronischen Funktionsmodulen aus dem Produkt von Effort und Flow (vgl. Abb. 2.6). Für Fluidik-Aktoren sind dies die Größen Druck und Volumenstrom.

Als fluidmechanische Stellantriebe werden meist *hydrostatische Energiewandler* verwendet. Sie arbeiten nach dem Verdrängungsprinzip und wandeln Druckenergie in mechanische Arbeit um und umgekehrt. Das Funktionsprinzip fluidmechanischer Aktoren für Translation und Rotation ist in Abb. 6.13 in einfachen Darstellungen wiedergegeben.

Fluidmechanische Aktoren sind rheologisch-tribologische Systeme, siehe Abschn. 7.3. Bei ihnen treten bei der Funktionsausübung unvermeidlich *Energieverluste* infolge innerer Reibung (Viskosität) des strömenden Fluids sowie durch Reibung in Tribo-Kontakten der Bewegungselemente auf. *Stoffverluste* des Aktormediums können durch Leckage verursacht werden. Fluid-thermische Verluste entstehen durch Strömungswiderstände, die die

fluidische Energie durch Drosselung in Wärme wandeln. Diese wird teils an die Umgebung abgegeben, teils von dem Fluid selbst aufgenommen und abtransportiert. Bei inkompressiblen Medien nimmt der Wärmestrom mit dem Volumenstrom und der Druckdifferenz zu. Die Steuerung der funktionell genutzten Energieumwandlung zwischen fluidischer und mechanischer Energie übernehmen *fluidmechanische Verstärker*. Schaltventile öffnen und schließen Durchlassöffnungen, die einen Fluidstrom zu oder von einem fluidmechanischen Energiewandler freigeben oder sperren. Die Energiesteuerprinzipien und die Wandlerprinzipien hydraulischer und pneumatischer Stellglieder sind ähnlich, ihre wesentlichen Kennzeichen sind in der folgenden Übersicht stichwortartig zusammengestellt.

- **Hydraulische Aktoren**

- Aktormedium: Flüssigkeit (meist Öl), Bereitstellung aus Vorratsbehälter, nahezu inkompressibel, selbstschmierend (Kolben/Zylinder, Ventile), Viskosität temperaturabhängig,
- Leitungsanschlüsse: Zu- und Rücklauf, ggfs. Leckanschluss,
- Druckbereich bis zu 30 MPa,
- Aktorische Stellaufgaben mit hoher Laststeifigkeit, gehobene Anforderungen an Gleichlaufverhalten und Positioniergenauigkeit im geschlossenen Regelkreis.

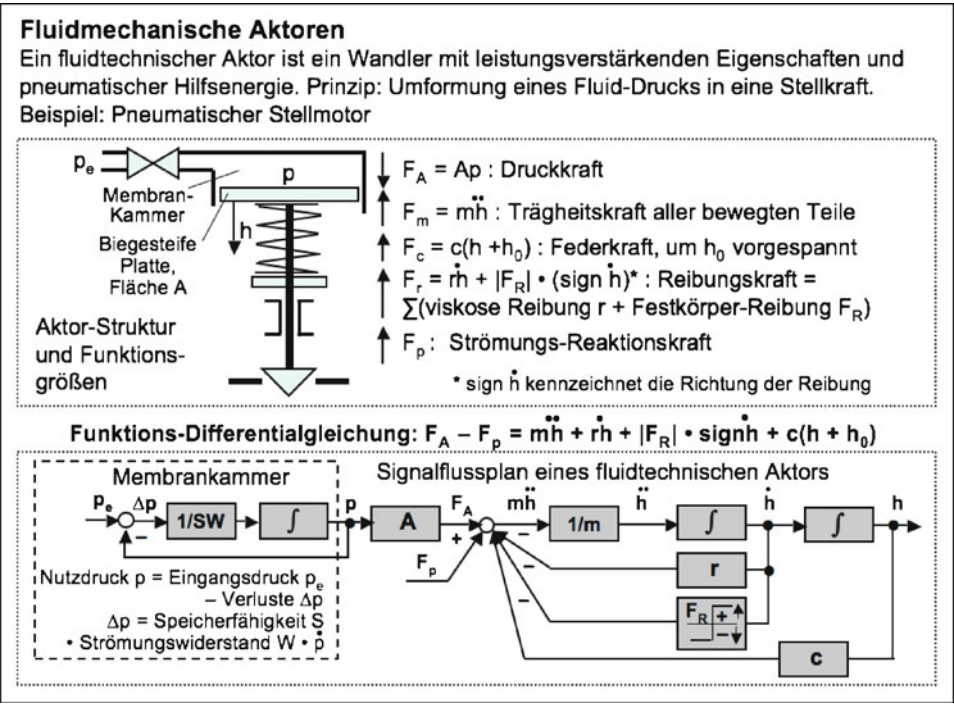
- **Pneumatische Aktoren**

- Aktormedium: Gas (meist Luft), Bereitstellung durch Umgebungsluft, kompressibel, Schmierung bewegter Stellelemente notwendig, Viskositätsänderungen unbedeutend,
- Leitungsanschlüsse: Nur Druckanschluss, Rücklauf direkt in Umgebung,
- Druckbereich bis ca. 1 MPa und ca. 0,05 MPa bei Unterdruckstellern,
- Aktoren mit geringem Kraftbedarf, Positionierung durch mechanische Anschläge in offenen Steuerketten.

Der Vergleich fluidmechanischer und elektromechanischer Aktoren lässt folgende Unterschiede erkennen:

- Vorteil hydraulischer Aktoren gegenüber elektromechanischen Aktoren ist generell ihre höhere Leistungsdichte und ihr geringeres Bauvolumen, d. h. relativ kleine Antriebe können große Kräfte und Drehmomente erzeugen. Fluidische Aktoren sind vor allem bei translatorischen Funktionen als Linearwandler wegen ihres einfachen Aufbaus und ihres geringen Gewichts bei vergleichbarer Leistung den elektromechanischen Aktoren in zahlreichen Anwendungen überlegen.
- Nachteil fluidischer Aktoren insbesondere bei rotatorischen Funktionen ist ihr kleinerer Wirkungsgrad und das Problem der Fluidelastizität bei Aktoren mit kompressiblen Medien, wenn präzise Positionierungsaufgaben durchzuführen sind.

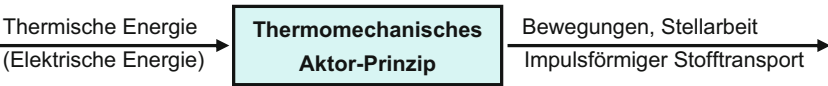
Der Anwendungsbereich von Fluidikaktoren ist wie der Einsatzbereich elektromechanischer Aktoren außerordentlich breit. Abbildung 6.14 zeigt als charakteristisches Beispiel einen pneumatischen Stellmotor.



**Abb. 6.14** Pneumatischer Stellmotor als Beispiel eines fluidmechanischen Aktorsystems

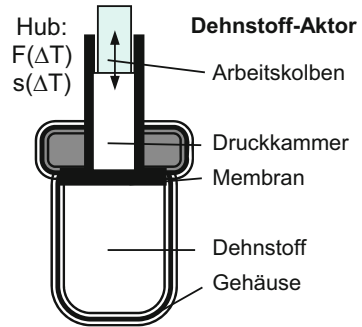
## 6.4 Thermomechanische Aktoren

Thermomechanische Aktoren operieren im Unterschied zu den behandelten elektromechanischen, piezoelektrischen und fluidmechanischen Aktoren mit thermischer Aktorstellenergie. Sie können temperaturgesteuert Bewegungen ausüben und mechanische Stellarbeit leisten, aber auch elektronisch gesteuert thermomechanischen Stofftransport realisieren, wie z. B. in Tintenstrahl Druckern.



Die hauptsächlichen Typen thermomechanischer Aktoren für Bewegungen und mechanische Stellarbeit sind *Dehnstoff-Aktoren*, *Formgedächtnis-Aktoren* und *Thermobimetall-Aktoren*. Für den impulsförmigen Stofftransport in der Drucktechnik kommen *Elektrothermische Fluidaktoren* zur Anwendung.

**Abb. 6.15** Aufbau eines  
Dehnstoff-Aktors



### Dehnstoff-Aktoren

Dehnstoff-Aktoren nutzen die große Volumen-Temperatur-Abhängigkeit von festen und flüssigen Stoffen mit hohem Wärmeausdehnungskoeffizienten. Durch Zuführung thermischer Energie wird eine mit wachsender Temperatur auftretende Volumenzunahme mit Hilfe konstruktiver Mittel in eine Aktor-Bewegung umgesetzt, siehe Abb. 6.15.

Typische Dehnstoff-Aktor-Kenndaten:

Hubbereich $s$	5–25 mm
Stellkraft $F$	250–1500 N
Arbeitstemperatur	–20 bis +120 °C
Reaktionszeit	8–50 s

### Formgedächtnis-Aktoren

Formgedächtnis-Aktoren basieren auf Materialien mit thermisch reversiblen Kristallgitter-Konfigurationen (shape memory alloys, SMA). Ein technisch wichtiges Beispiel ist die thermomechanisch wechselseitig steuerbare Umwandlung (diffusionsloses Umklappen) der kubisch-flächenzentrierten (kfz) Austenit-Kristallgitterstruktur in Martensit mit tetragonal raumzentriertem Gitter. Beim Verformen von SMA (z. B. Titan-Nickel-Legierungen) wird bei Überschreiten einer kritischen mechanischen Spannung in dem bei Raumtemperatur vorliegenden Austenit Martensit induziert. Bei Erwärmen wird oberhalb der Austenittemperatur  $A$  das Gefüge wieder austenitisch und das Bauteil nimmt wieder seine ursprüngliche Form an. Den Zyklus zeigt Abb. 6.16.

### Thermobimetall-Aktoren

Thermobimetall-Aktoren sind Schichtverbundwerkstoffe aus mindestens zwei miteinander verbundenen Komponenten mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, siehe Abb. 6.17.

Bei Erwärmung erfolgt durch die thermisch induzierte unterschiedlich große Dehnung der beiden Komponenten eine mechanische Auslenkung. Der Aktor entwickelt damit gegen äußere Kräfte eine Federspannung (thermische Richtkraft), er kann temperaturge-

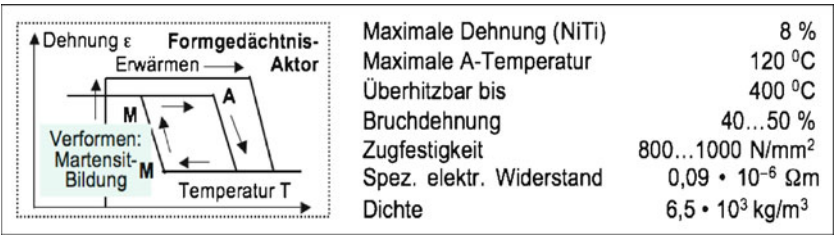


Abb. 6.16 Funktionsprinzip und typische technische Daten von Formgedächtnis-Aktoren

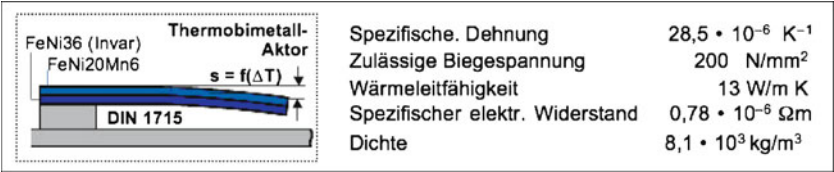


Abb. 6.17 Aufbau und typische technische Daten von Thermobimetall-Aktoren

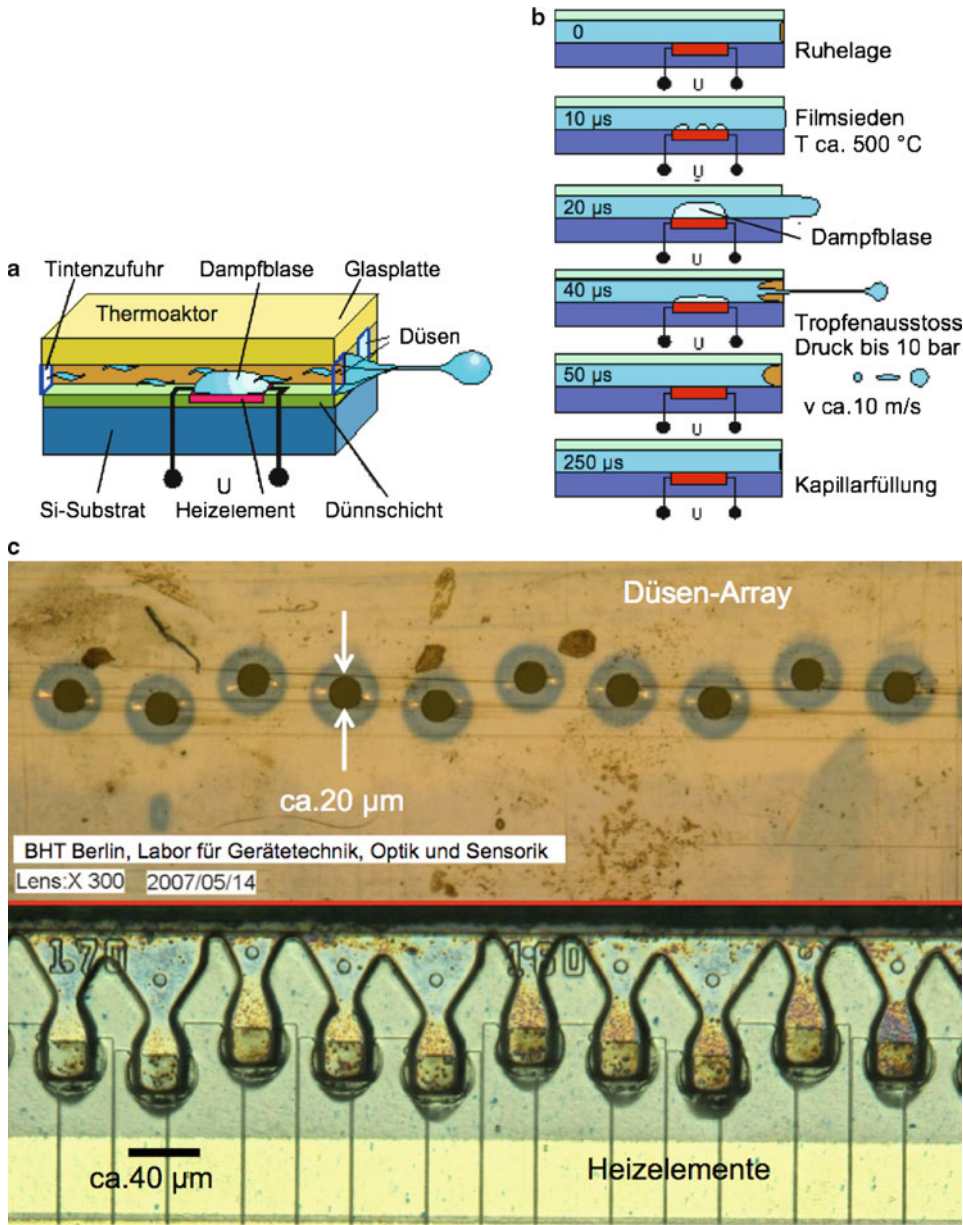
steuert mechanische Energie speichern und mit aktorischer Wirkung von Auslenkungen oder Arbeitsleistung wieder abgeben.

Elektrothermische Fluidaktoren

Elektrothermische Fluidaktoren sind mechatronische Module für die Tintendrucktechnik: die Erzeugung von Schrift und Bild durch elektronisch gesteuerte Positionierung von Tintentröpfchen auf einer Papieroberfläche. Die Druckfarben treten aus einem Düsenarray aus, das zeilenweise über das Papier geführt wird. Die Aktorarrays werden ähnlich wie Mikrosensoren (siehe Abschn. 9.3) mikrotechnologisch hergestellt. Abbildung 6.18 illustriert (a) den prinzipiellen Aufbau, (b) den Funktionsablauf und (c) das Düsen-Array und die Heizelemente.

Der Funktionsablauf des Thermoaktors im Tintenstrahlprinter ist in Abb. 6.18b dargestellt. Durch einen elektrischen Spannungsimpuls wird in weniger als 10µs an dem Heizelement eine Temperatur von etwa 500 °C erzeugt und die Tinte in der Düse impulsartig zum Sieden gebracht. Nach etwa 20µs bildet sich eine geschossene Dampfblase, die mit hohem Druck und hoher Fluggeschwindigkeit einen Tintentropfen aus der Düse austreibt. Die Blase kollabiert nach etwa 50µs und saugt neue Tinte an so dass nach etwa 250µs ein neuer Funktionszyklus beginnen kann.

Tintenstrahlprinter mit diesem Aktorprinzip arbeiten mit getrennten Tintenpatronen für die drei subtraktiven Grundfarben Cyan, Magenta, Gelb sowie Schwarz. Abbildung 6.18c zeigt einen Schnitt durch das Düsenarray und die Heizelemente.



**Abb. 6.18** a Aufbau eines Thermoaktors im Tintenstrahlendrucker, b Funktionsablauf, c Schnittdarstellung durch das Düsen-Array und die Heizelemente



## 6.5 Aktoreigenschaften und Kenndaten: Übersicht

Aktoren haben folgende Typenmerkmale, ihre Kenndatenfelder zeigt Abb. 6.19:

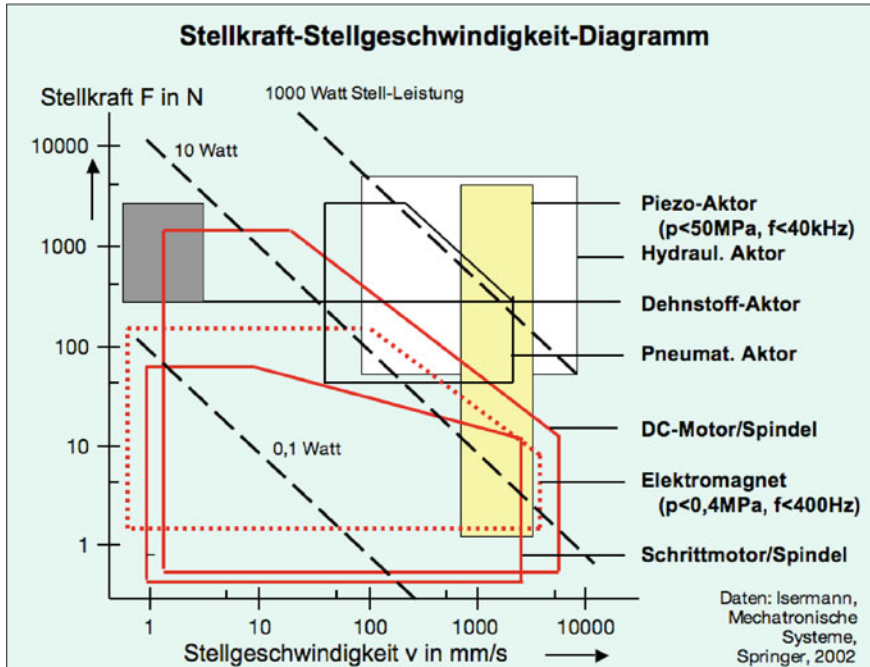
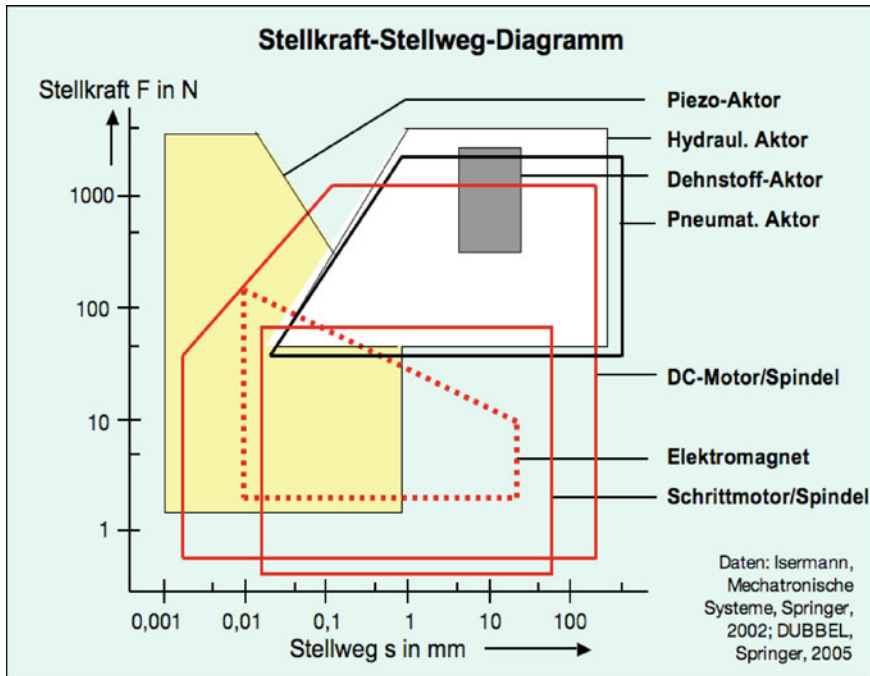
- *Elektromagnetische Aktoren*: günstigstes *Kurzhubelement* (10–25 mm), einfacher und kompakter Aufbau ermöglicht mit elektrischer Hilfsenergie schnelle Steuerstrecken (z. B. *Einspritzsysteme*), Magnetkraft-Weg-Kennlinie durch geometrische Magnetkreis-Formgebung und FE-Programme präzise auslegbar, auch für nichtlineare Funktionsabläufe.
- *Elektrodynamische Aktoren*: gute Stellgenauigkeit, größere Stellbereiche (bis 100 mm) bei ähnlich hoher Stellgeschwindigkeit wie Piezo-Aktoren, Schrittmotoren bei kleinen Stell-Leistungen (< 500 W) kostengünstige Alternative, variable Servo-Antriebe für Antreiben/Bremsen.
- *Piezoelektrische Aktoren*: Stellwege nm bis 1 mm, Positioniergenauigkeit < 1 nm, Stellkraft 1–5000 N, hohe Steifigkeit (z. B. 5 MN/mm für 120 µm-Aktor), Sprungantwort-Zeitkonstante < 50 µs, keine mechanisch bewegten Teile, nur druckbelastbar, benötigen anspruchsvolle kapazitive Verstärker.
- *Fluidmechanische Aktoren (pneumatisch oder hydraulisch)*: kompakt-robuster Aufbau, hohe Stellkräfte bis 5000 N ( $F_{\text{pneum}} < F_{\text{hydraul}}$ ), hohe Leistungsdichten, Positioniergenauigkeit > 10 µm, statisch genaue und dynamisch schnelle Aktoren durch *Fluidtronik*: Fluidik plus Elektronik.
- *Thermomechanische Aktoren*: temperaturgesteuerte, robuste Aktoren, benötigen keine elektrische Spannungsversorgung, geeignet für Schaltelemente (Bimetall), Zweipunkt-Regelungen (Formgedächtnis) und hohe Stellkräfte (Dehnstoff).

---

## 6.6 Sensor-Aktor Prozessorik

Die Funktionsabläufe in der Mechatronik erfordern ein aufgabenorientiertes Zusammenwirken der *Prozessorik* von Sensoren und Aktoren, die meist Regelkreise bilden. Die drei grundlegenden Signal-Kommunikationsstrukturen sind Ring, Stern und Linientopologie. Bei einer *Ringstruktur* sind alle Kommunikationsteilnehmer durch jeweils einen Hin- und Rückleiter verbunden und bilden damit eine Vollstruktur ab. In einer *Sternstruktur* werden alle Zuleitungen in strukturierter, modifizierbarer Verkabelung mit einem zentralen Knotenpunkt, dem sog. Sternkoppler verbunden. Bei *Linienstrukturen* hängen die Kommunikationsteilnehmer an einem zentralen Datenleiter. Die *Bustopologie* ist ein Spezialfall der Linientopologie, wobei die Zuleitung zum Hauptanschluss kurz sein muss.

Mechatronische Systeme haben dynamische Signalabläufe und benötigen daher eine Signalverarbeitung in *Echtzeit* (DIN 44 300), d. h. sie erfordern Signalverarbeitungssysteme, bei denen Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit und die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die



**Abb. 6.19** Kenndatenfelder von Aktoren

Daten können nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorbestimmten Zeiten anfallen.

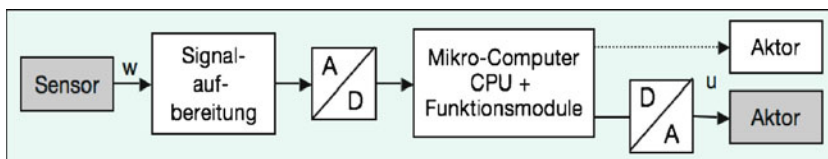
### 6.6.1 Sensor-Aktor-Signalverarbeitung

Die von einem Sensor gelieferte Führungsgröße  $w$  muss durch geeignete Signalaufbereitung in Verbindung mit Analog-Digital-Umsetzern (ADU) und Mikro-Computern sowie ggf. Digital-Analog-Umsetzern (DAU) in die für die Ansteuerung eines Aktors erforderliche Stellgröße  $u$  umgesetzt werden, siehe Abb. 6.20. Eingesetzt werden dazu insbesondere auch *Microcontroller* und *Embedded Systems*, siehe Abschn. 3.4.

Die *Signalaufbereitung* der Sensor/Aktor-Prozessorik hat im weitesten Sinn folgende elektronische Komponenten vorzuhalten und aufgabenspezifisch einzusetzen:

- Verstärkung (DC, AC),
- Gleichrichtung (auch phasensynchron),
- Signal-Pulsformung,
- Spannungs-/Frequenz-Umwandlung,
- Frequenzfilterung,
- AD- und/oder DA-Umsetzung,
- Kennlinien-Linearisierung,
- Temperaturdifferenz-Kompensation (analog, digital),
- Nullabgleich,
- Servo-Regelung (Kompensationsprinzip),
- Stabilisierung der Spannungsversorgung,
- kurzschluss- und überspannungssichere Ausgangsstufen,
- Signalmultiplexer,
- Serialisierung der Signale (analog, digital),
- Signal-Codierung,
- Signal-Busschnittstelle.

*Analog-Digital-Umsetzer* müssen gewährleisten, dass auch die höchste im Signal vorkommende Frequenz  $f_{\max}$  erfasst und das Shannon'sche Theorem erfüllt wird: Abtastfrequenz  $> 2f_{\max}$ . AD-Umsetzer unterscheiden sich durch die Wandlerstruktur:



**Abb. 6.20** Prozessorik-Elemente für das Zusammenwirken von Sensoren und Aktoren

- Beim *Parallelverfahren* (Flash-Verfahren) wird das analoge Eingangssignal einer Komparatorkette (1023 Komparatoren für einen 10-Bit-Wandler) zugeführt und in einem Zyklus mit allen Referenzspannungen verglichen.
- Das *Wägeverfahrenprinzip* hat nur einen Komparator und benötigt für eine Wortbreite von 10 Bit 10 Zyklen.
- *Zählverfahren-( $\sigma$ - $\delta$ )-ADU* arbeiten mit Integrator und Komparator, wobei die Zeit für den Ladevorgang und das Erreichen einer Komparatorschwelle für die digitale Impulsbildung herangezogen werden.
- *Rampenverfahren* arbeiten mit Integrator und Komparator, wobei die Zeit für die Integration der analogen Eingangsgröße bis zum Erreichen einer Komparatorschwelle mit einem Zähler gemessen wird und den digitalen Wert bildet.

*Digital-Analog-Umsetzer* setzen diskrete Signale in quantisierte, quasianaloge Spannungen oder Ströme um.

- *Parallel-Verfahren*: Steuerung dual gestufter Widerstandsketten/Stromquellen,
- *Seriell-Verfahren*: Pulsbreitenmodulation und Tiefpass-Filter.

*Mikrocomputer* umfassen neben der Zentraleinheit CPU (Central Processing Unit) zur Bearbeitung arithmetischer Operationen und logischer Verknüpfungen spezielle Funktions-Module zur Signalerfassung und zur Erzeugung von Ansteuersignalen für externe Stellglieder.

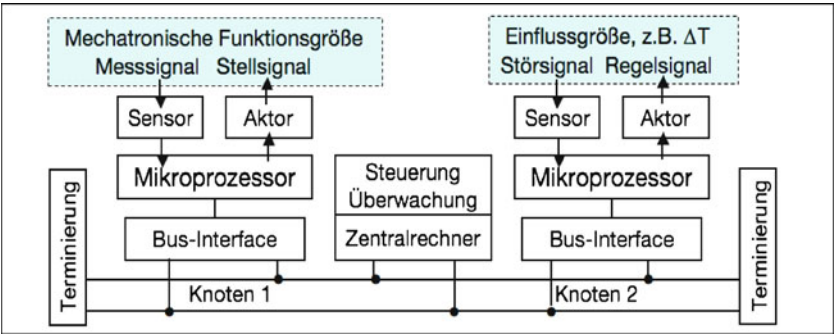
*Mikroprozessoren* müssen als *Prozessrechner* mit *Echtzeit-Programmen* in *echtzeit-tauglichen Strukturen* ausgelegt sein.

*Mikrocontroller* sind speziell an regelungs- und steuerungstechnische Abläufe angepasste Mikroprozessoren (vgl. Abschn. 3.4). Sie enthalten auf einem Chip:

- einen Mikroprozessor ( $\mu$ P),
- Speicher für Programme und Daten,
- Schnittstellen für Steuerung und Kommunikation,
- Analog-Digital-Umsetzer und Digital-Analog-Umsetzer,
- Taktgeber, Zähler, Digitalausgänge,
- Interrupt-Funktionen für die Echtzeit-Datenverarbeitung.

*Bussysteme* (BUS: Bidirectional Universal Switch) dienen als standardisierte Schnittstellen für die Sensor-Aktor-Kommunikation und ermöglichen im Zusammenwirken mit einer Zentraleinheit auch die Mehrfachnutzung von Leitungen.

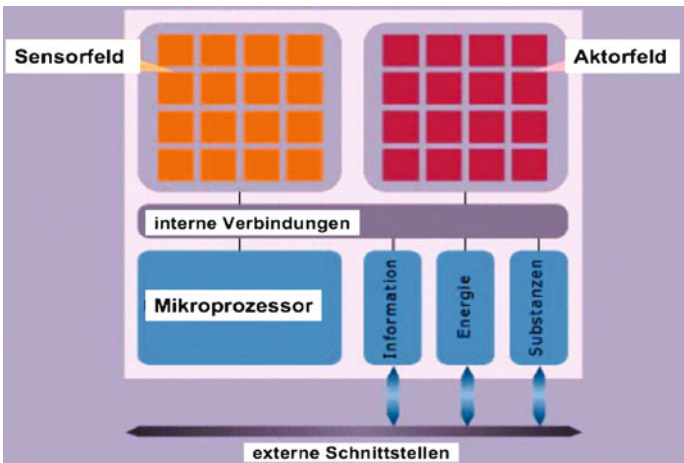
Für die Mechatronik sind insbesondere die folgenden standardisierten Bussysteme von Bedeutung: *CAN – Controller Area Network* (EN 50 325): Das CAN-Bussystem wurde ursprünglich im Zusammenhang mit dem verstärkten Einsatz von Sensoren in Kraftfahrzeugen mit dem Ziel der Reduzierung des Verkabelungsaufwands und der Erhöhung von Verfügbarkeit, Fehlersicherheit und Zuverlässigkeit entwickelt. Abbildung 6.21 zeigt



**Abb. 6.21** Prinzipieller Aufbau eines Bussystems für die Sensor/Aktor-Prozessorik

in schematisch vereinfachter Darstellung seinen Aufbau. Das Controller Area Network dient sowohl der Sensor/Aktor-Prozessorik als auch der Erfassung und Eliminierung von Störeinflüssen und hat folgende grundlegende Kennzeichen: Am Knoten 1 werden Sensorsignale über  $\mu$ Ps verarbeitet und zur Prozessregelung lokal für die Aktorbetätigung eingesetzt. Am Knoten 2 wird eine Störgröße (z. B.  $\Delta T$ ) gemessen, über  $\mu$ P sowie ein Bussystem verarbeitet und so ein Regelsignal zur Störsignal-Kompensation gewonnen. Die Teilprozesse kommunizieren miteinander und mit einem Zentralrechner, der die Aufgabe der zentralen Steuerung und Überwachung hat. Als Verbindung dienen Twisted-pair-Kabel, die an den Enden zur Signal-Reflexionsminderung durch Widerstandsnetzwerke terminiert sind.

*ASI – Aktor-Sensor-Interface* (EN 50 295 und IEC 62 026): Bei dem AS-Interface sorgt ein Kommunikations-„Master“ aktiv für den Datenaustausch zwischen sich und den



**Abb. 6.22** Prinzip der Vernetzung von Sensorik und Aktorik in der Mikrosystemtechnik

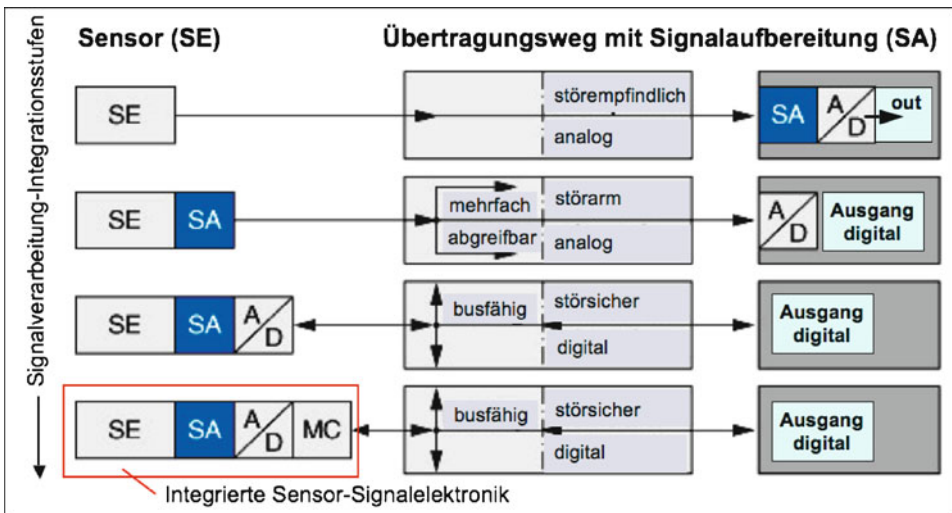
mit ihm verbundenen passiven Komponenten, den „Slaves“. An einen ASI-Master können zahlreiche Komponenten als Slaves hierarchiefrei angeschlossen werden. Damit können vielfältige Bustopologien mit oder ohne Stichleitungen aufgebaut werden. Dies gilt für Stern-, Linien-, Ring- und Baumstrukturen. Bussysteme mit ASI-Master werden beispielsweise in speicherprogrammierbaren mechatronischen Steuerungen (vgl. Abschn. 4.4) eingesetzt.

In der Mikrosystemtechnik werden Aktorfelder, Sensorfelder, Mikroprozessoren zusammen mit internen Verbindungen in einen Chip integriert, siehe Abb. 6.22.

### 6.6.2 Anwendungsspezifische Signalverarbeitung

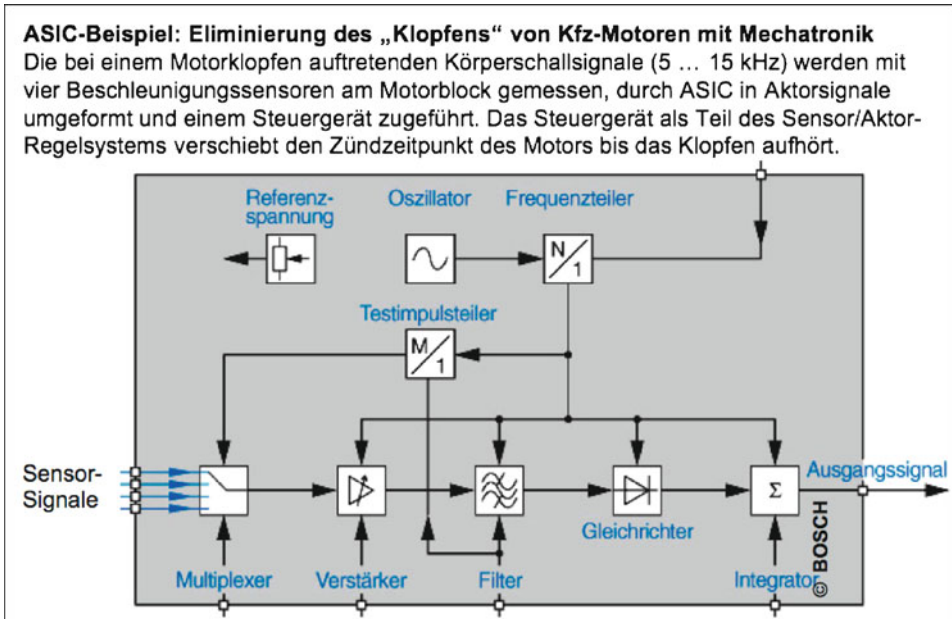
Die Sensor/Aktor-Signalverarbeitung kann entweder auf der Sensorseite oder auf der Steuergeräteseite des betreffenden Sensor/Aktor-Moduls erfolgen. Wie in Abb. 6.23 dargestellt, können durch eine hybride oder monolithische Integration von Sensor (SE) und Signalaufbereitung (SA) unterschiedliche Signalverarbeitungs-Integrationsstufen bis hin zu komplexen digitalen Schaltungen in Verbindung mit Analog-Digital(AD)-Wandlern und Mikrocomputern realisiert werden. Die Integration direkt am Ort eines Sensors hat den Vorteil, dass der Sensor und die Signalaufbereitung gemeinsam abgeglichen werden können. Sie bilden damit eine unzertrennliche und meist sehr störsichere Einheit, die ggf. auch gemeinsam ausgetauscht werden kann.

Für die technische Ausführung der Prozessork der Sensor/Aktor-Funktionen werden häufig anwendungsspezifische integrierte Schaltungen mit der Bezeichnung ASIC (Application Specific Integrated Circuits) entwickelt. Ein Beispiel zeigt Abb. 6.24.



**Abb. 6.23** Integrationsstufen von Sensoren und Sensor-Signalaufbereitung





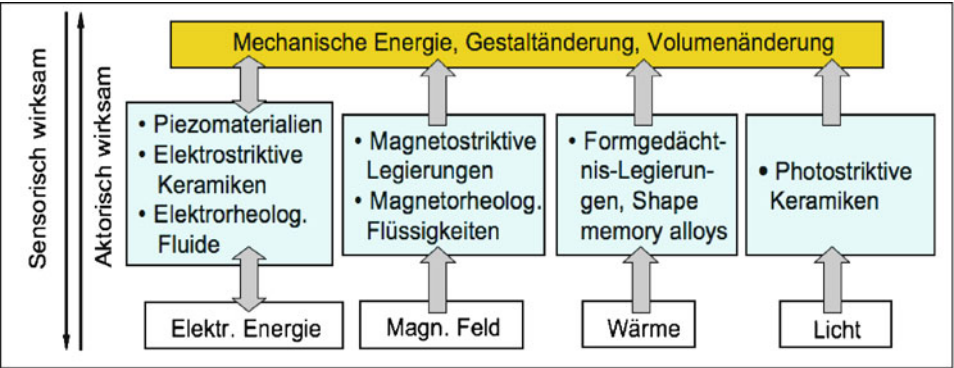
**Abb. 6.24** Beispiel der Anwendung von Application Specific Integrated Circuits (ASIC)

## 6.7 Adaptronik

Der Begriff Adaptronik bezeichnet mechatronische Systeme, deren Strukturelemente aus Multifunktionswerkstoffen mit intrinsischen sensorisch/aktorischen Eigenschaften bestehen, die als strukturelle Bauelemente mechatronischer Systeme selbstoptimierend auf äußere Beanspruchungen reagieren können, siehe Abb. 6.25.

Die in Abb. 6.25 zusammengestellten Multifunktionswerkstoffe haben ein breites Anwendungspotential für adaptronische Systeme. Beispiele von Anwendungsmöglichkeiten sind adaptive Tilger und Kompensatoren zur Beruhigung von Schwingungen in Werkzeugmaschinen oder Kraftfahrzeugen sowie mechatronische Strukturen zu einer adaptiven Lärmunterdrückung (Active Structural Acoustic Control).

Zentrale Bauelemente für adaptronische Systeme sind adaptive Aktoren, die auf den in diesem Kapitel behandelten Aktorprinzipien aufbauen. Als Beispiel eines adaptronischen Aktors ist in Abb. 6.26 das Modell eines piezokeramischer Biegewandlers, der zur semiaktiven Schwingungsdämpfung verwendet werden kann, mit einer Zusammenstellung charakteristischer Eigenschaften und technischer Daten dargestellt. Für technische Anwendungen ist dies durch eine geeignete Prozessorik mit zugehörigen elektronischen Schaltungen, Bausteinen und Modulen zu ergänzen.



Funktionswerkstoff	Funktionsprinzip und Materialbeispiele
Piezoelektrische Werkstoffe	Umwandlung mechanischer (Deformations-)Energie in elektrische Energie (Piezoeffekt) und umgekehrt (inverser Piezoeffekt) durch Ladungsverschiebungen in einem Kristallgitter (z.B. Pb-Zr-Titanat)
Elektrostriktive Keramiken	Volumenänderung durch einwirkendes elektrisches Feld (z.B. Pb-Mg-Niob-Oxide)
Photostriktive Keramiken	Volumenänderung durch inversen Piezoeffekt, ausgelöst durch optische Strahlung und inhärenten Photoeffekt (z.B. Pb-Li-Zr-Ti)
Magnetostriktive Keramiken	Volumenänderung durch Ausrichtung magnetischer Domänen in einem Magnetfeld (z.B. TERFENOL-Keramik)
Elektorrheologische Fluide	Viskositätsänderung einer Flüssigkeit durch elektrisches Feld (z.B. elektroaktive Suspensionen)
Magnetorheologische Fluide	Viskositätsänderung einer Flüssigkeit durch magnetisches Feld (z.B. magnetoaktive Suspensionen)
Formgedächtnislegierungen	Gestaltänderung durch temperaturabhängige Martensit/Austenit- Gefügeumwandlung (z.B. NiTi), $\Delta s = + 5$ bis $+ 8 \%$ bei $T = 35$ bis $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\Delta s = - 5$ bis $- 8 \%$ bei $19$ bis $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , Aktivierungsfrequenz $< 2 \text{ Hz}$

**Abb. 6.25** Übersicht über Multifunktionswerkstoffe für adaptronische Strukturelemente

## 6.8 Mikroaktuatorik

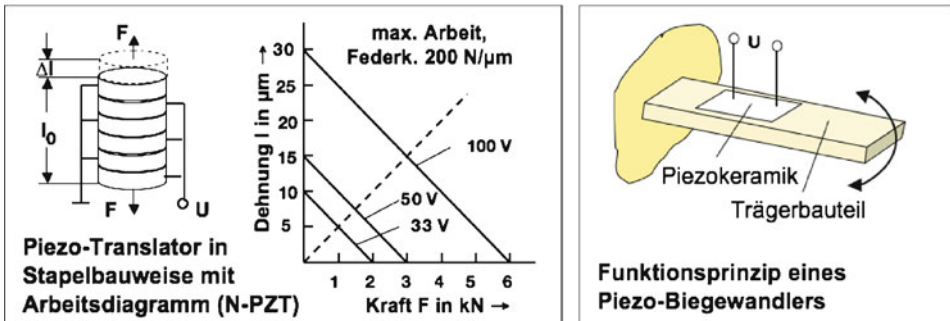
In der Mechatronik werden Aktoren, wie auch Sensoren (vgl. Abschn. 5.9), häufig in miniaturisierter Ausführung benötigt. Unter Mikroaktoren versteht man Aktoren, bei denen mindestens eine Abmessung im Submillimeterbereich liegt. Die für die Herstellung von Mikroaktoren verwendbaren Mikrotechnologien sind in Abschn. 9.3 dargestellt.

Bei der Gestaltung von Mikroaktoren sind „Größeneffekte“ zu berücksichtigen. Sie bedeuten, dass Aktorprinzipien nicht beliebig „herunterskaliert“ werden können. Unterschreitet man (je nach Verfahren) eine gewisse Größe, so können sich Größenverhältnisse umkehren und (Stör-)Kräfte dominieren, die vorher aufgrund des größeren Gewichts ak-

♦ **Piezo-Translatoren (PZT)** bestehen aus piezo-aktiven Keramik-Scheiben, Dicke  $d = 20 \dots 100 \mu\text{m}$  (Niedervolt-PZT), bzw.  $d = 0,5 \dots 1 \text{ mm}$  (Hochvolt-PZT)

**Eigenschaften und technische Daten:** • Stellbereich  $\text{nm} \dots \text{mm}$  • Stellgenauigkeit  $\Delta s < \text{nm}$  • Steifigkeit  $5 \text{ MN/mm}$  • Druckbelastbarkeit  $p_D < 50000 \text{ N}$ , (Zugbelastbarkeit  $p_z < 10 \%$  von  $p_D$ ) • Ansprechzeit-Sprungantwort  $< 0,1 \text{ ms}$  • Keine bewegten Teile, keine Tribologie, d. h. keine Reibung, kein Verschleiß • Hohe Kapazität (C-Verstärker nötig)

♦ **Piezo-Biegewandler** arbeiten mit einer Piezokeramik-Folie, die außerhalb der neutralen Faser auf ein Trägerbauteil aufgebracht wird. Die Lateral-Dehnung einer Piezokeramik bei Anlegen eines elektrischen Feldes (Spannung  $U$ ) führt zu einer adaptiv nutzbaren Biegeverformung des Systems.



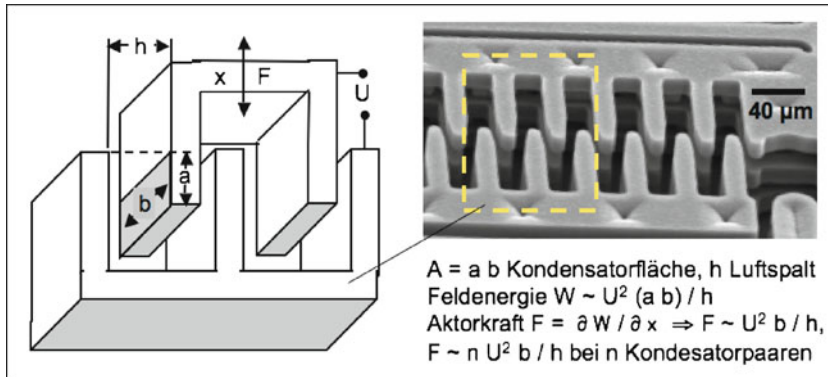
**Abb. 6.26** Modell eines Piezo-Biegewandlers für die Adaptionik

torisch zu bewegendem Bauteile noch nicht relevant waren. Eine wichtige Auswirkung der Miniaturisierung von Aktoren sind insbesondere steigende Adhäsionskräfte zwischen Aktor und zu bewegendem Bauteil in Form elektrostatischer Kräfte und van-der-Waals-Kräfte. Sie können bewirken, dass sich Bauteile nicht mehr allein von der Berührungsfläche lösen, sondern haften bleiben. Die Adhäsionskräfte sind abstandsabhängig und nehmen mit größer werdender Distanz quadratisch ab. Wenn sich Adhäsionskräfte nicht kontrollieren lassen, z. B. durch eine geeignete Aktorbeschichtung, kann versucht werden, eine zur Haltekraft umgekehrte Kraft aufzubringen, beispielsweise durch einen Luftstoß. In der Mikroaktorik ist wie in der Mikroelektronik auch ein Schutz von Halbleiterbauelementen vor zerstörerischen elektrostatischen Entladungen, ein *ESD-Schutz* (*Electro Static Discharge*) erforderlich.

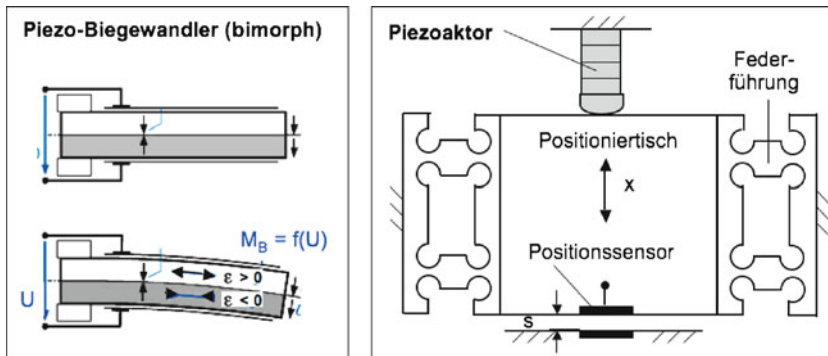
Die Mikroaktorik hat mit einer geeigneten Skalierung der entsprechenden mechatronischen Systeme die grundlegenden Aufgaben der Mechatronik, nämlich Bewegungs-, Energie-, Stoff- und Informationsübertragung durchzuführen. Dies wird im Folgenden an Beispielen von Mikroaktoren für die Mikromechanik, für optische Informations- und Kommunikationssysteme sowie für Fluidiktransport und Stoffdosierung dargestellt.

### Mikroaktoren für mikromechanische Translation und Rotation

Für die Mikroaktorik von Bewegungsvorgängen kommen aufgrund von Skalierungserfordernissen häufig elektrostatische Prinzipien zur Anwendung. Die in Abschn. 6.1 behandel-



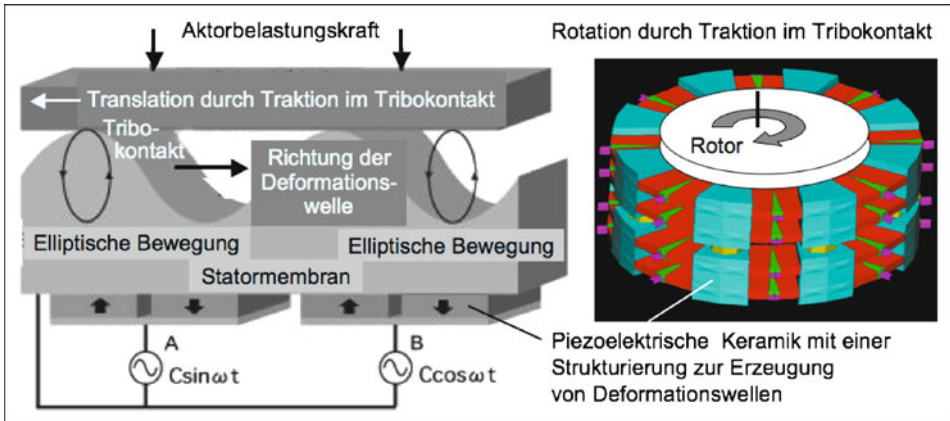
**Abb. 6.27** Elektrostatischer Mikroaktor für Translationsbewegungen



**Abb. 6.28** Beispiele von Mikro-Piezoaktoren

ten elektromagnetischen Aktorprinzipien der Makrotechnik sind in der Mikrotechnik von geringerer Bedeutung, weil sich elektromagnetische Kraftwirkungen meist proportional zur vierten Potenz von Bauteildimensionen verringern. Elektrostatische Aktoren (Kondensatoren) können dagegen nach den Coulomb'schen Gesetzen Kraftwirkungen proportional zum Quadrat von Kondensatorabmessungen ausüben. Damit lassen sich mit elektrostatischen Aktoren kleine Massen bewegen, da Gewichtskräfte mit der dritten Potenz von Bauteilabmessungen abnehmen. Abbildung 6.27 zeigt das Beispiel eines elektrostatischen *Kamm-Aktors* für Translationsamplituden bis zu etwa  $100\,\mu\text{m}$  je nach konstruktiver Gestaltung. Die Kraftwirkung ist proportional zum Quadrat der angelegten Spannung, und die Aktorabmessungen liegen ab 25 Kondensatorpaarungen im mm-Bereich. Mikroaktoren für Rotationsbewegungen lassen sich durch Anordnung der Kondensatorpaare tangential zum Drehpunkt gestalten. Das Funktionsprinzip elektrostatischer Mikroaktoren hat vielfältige Anwendungen, z. B. für Mikroschalter, Mikroventile oder Mikromotoren.

Neben den elektrostatischen Wirkprinzipien wird in der Mikroaktorik für Bewegungsvorgänge insbesondere der in Abschn. 6.2 mit seinem Funktionsprinzip und



**Abb. 6.29** Prinzip eines piezoelektrischen Mikroantriebs für Translation und Rotation

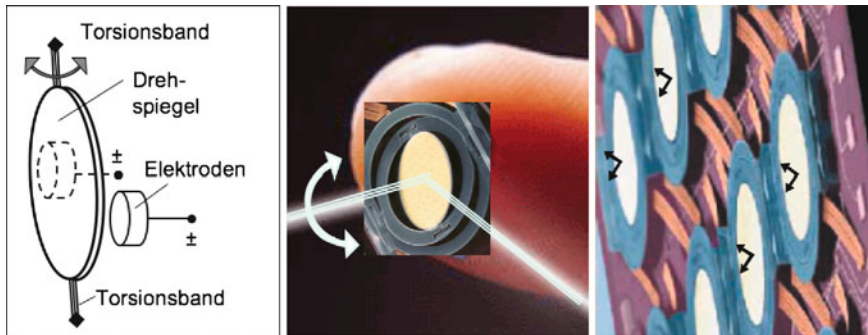
seinen technischen Kenndaten dargestellte *inverse piezoelektrische Effekt* genutzt. Er hat den Vorteil, dass die aktorisch genutzte Bewegung auf einer elektronisch steuer- und regelbaren „Festkörper-Expansion“ basiert, wodurch – bei geeigneter Halterung und Lagerung der Bewegungsobjekte, z. B. in Federführungen – Bewegungen im Nanometer-Dimensionsbereich der Kristallgitterabmessungen der Piezo-Materialien möglich werden. Abbildung 6.28 zeigt auf der linken Seite einen bimorphen Piezo-Biegewandler, der aus zwei gegensinnig polarisierten Piezokeramiken mit positiver und negativer Dehnung  $\varepsilon$  aufgebaut ist. Auf der rechten Seite ist ein piezogetriebener, federgelagerter Positionierstisch dargestellt, wie er zur nanoskaligen Positionierung von Rastertunnelmikroskopen eingesetzt wird (vgl. Abb. 8.5).

Die Piezoaktorik kann auch zur Realisierung elektronisch steuer-/regelbarer Mikroantriebe für Linear- und Rotationsbewegungen ohne zusätzliche mechanische Führung angewandt werden. Das Prinzip ist in Abb. 6.29 schematisch vereinfacht dargestellt.

Piezoelektrische Mikroaktoren arbeiten mit direktem Festkörper-Reibungskontakt (*Tribokontakt*) und sind tribologische Systeme, siehe Abschn. 7.3. Durch eine geeignete konstruktive Gestaltung der Statorelemente werden bei Anlegen einer angepassten elektrischen Wechselspannung, die jeweils von einer Elektrode zur nächsten umgeschaltet wird, translatorische oder rotatorische Deformationswellen erzeugt. Die Deformationswellen bewirken in den Tribokontakten impulsförmige Kontakt-Reibungskräfte zwischen den stationären und den beweglichen Elementen des Aktorsystems und führen durch die Reibungs-Traktion zu schrittweisen Relativbewegungen, die den funktionellen Output des Mikroaktors darstellen.

Piezoelemente haben in zahlreichen Bereichen der Technik die Entwicklung innovativer mechatronischer Systeme möglich gemacht. Bedeutende Beispiele reichen vom Tintenstrahldrucker und der Motortechnik (siehe Abb. 6.11) bis hin zum nobelpreisgekrönten Rastertunnelmikroskop (siehe Abb. 8.5) und zur Sonographie in der Medizintechnik (siehe





**Abb. 6.30** Beispiel der optoelektronischen Positionierung informationstragender Strahlung

Abb. 15.6). Im anglo-amerikanischen Sprachgebrauch werden elektromechanische Mikroaktoren als *MEMS* (Micro Electro-Mechanical Systems) bezeichnet. Beispiele von MEMS und ihre Anwendung in der Mikropositionierungstechnik sind in Abschn. 8.1 dargestellt.

### Mikroaktoren für optische Informations- und Kommunikationstechnik

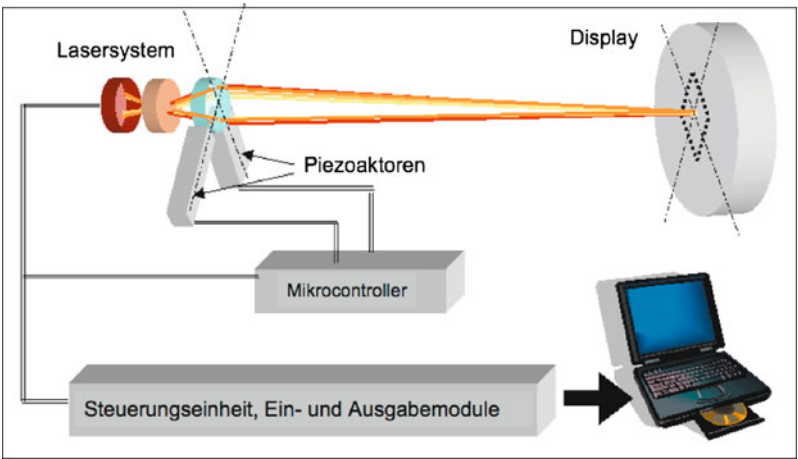
In der Informations- und Kommunikationstechnik wird zunehmend Licht in Verbindung mit Lasertechnik und Faseroptik als *optischer Informationsträger* zur schnellen Informationsübertragung hoher Bandbreite eingesetzt. Da die optischen Informations- und Kommunikationstechnologien nicht nur „punktuell“ Informationen übertragen sollen, benötigen sie natürlich Hilfsmittel sowohl zum Schalten als auch zum zweidimensionalen oder dreidimensionalen „Display“ der optisch übertragenen Informationen.

Unter Anwendung der optischen Prinzipien von Reflexion und Brechung können hierfür auch die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen elektrostatischen und piezoelektrischen Methoden der Mikroaktorik genutzt werden. Je nach Anforderungserfordernis lassen sich damit sehr vielfältige *MOEMS* (*Micro Opto-Electrical-Mechanical Systems*)-Aktorsysteme realisieren, siehe Abschn. 8.1. Wie in Abb. 6.30 vereinfacht dargestellt, kann beispielsweise zur Abbildung bzw. zum Positionieren von Lichtstrahlen ein elektrodengesteuerter Silizium-Drehspiegel, der an zwei Torsionsbändern aufgehängt ist, verwendet werden. Abbildung 6.31 illustriert das Funktionsprinzip eines mit Mikro-Piezoaktoren gesteuerten flächenhaft arbeitenden Display-Systems.

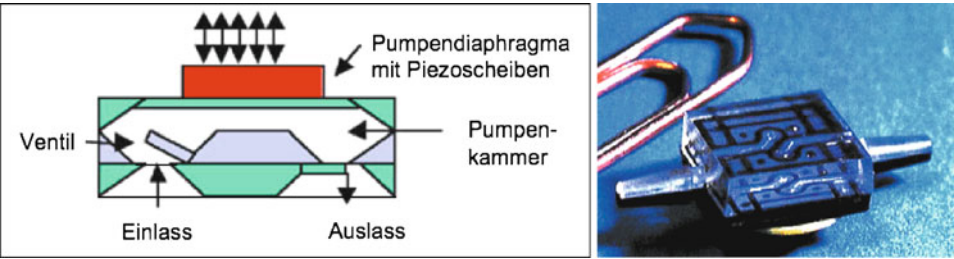
### Mikroaktoren für Fluidik-Transport und Stoffdosierung

Mikroaktoren können auch zur Steuerung des Transportes von Flüssigkeiten und Gasen eingesetzt werden, insbesondere für die Dosierung kleiner Mengen, wie z. B. in der analytischen Chemie oder der Medizintechnik (siehe Kap. 15). Für Mikroventile und Mikropumpen kommen sowohl elektrostatische als auch piezoelektrische Wirkprinzipien zur Anwendung. Mikropumpen besitzen eine das Medium fördernde Pumpenkammer mit einer meist kapazitiv oder piezoelektrisch ansteuerbaren Membran (Pumpendiaphragma)





**Abb. 6.31** Beispiel eines optoelektronischen Mikroaktors mit piezoelektrischem Wirkprinzip



**Abb. 6.32** Beispiel einer Mikropumpe mit elektrostatischem Mikroaktorprinzip

und sind mit Ein- und Auslassventilen versehen. Sie werden meist mittels anisotroper Ätztechnik aus Silizium-Wafern oder mit abgeformten Polymerteilen mit dem LIGA-Verfahren hergestellt (siehe Abschn. 9.2). Das Beispiel einer Mikropumpe mit elektrostatischem Antrieb zeigt mit einem Größenvergleich Abb. 6.32.

---

## **Teil II**

### **Anwendungen**

Die interdisziplinäre Entwicklung des Maschinenbaus und die Bedeutung mechatronischer Systeme werden im Standardwerk des Maschinenbaus, dem *DUBBEL, Taschenbuch für den Maschinenbau*, wie folgt beschrieben: *Waren früher Maschinen und feinwerktechnische Geräte dadurch gekennzeichnet, dass sie hauptsächlich aus mechanischen Komponenten bestanden, so zeigt sich heute, dass durch das Zusammenwirken mechanischer, elektrischer und elektronischer Komponenten die Leistungsfähigkeit technischer Systeme erheblich gesteigert werden kann.*

## 7.1 Maschinenelemente

Die Maschinenelemente – Konstruktionselemente für die mechanischen Funktionen von Maschinen – lassen sich durch einen kurzen historischen Rückblick illustrieren:

- Leonardo da Vinci skizzierte bereits 1492 in dem 1965 wiederentdeckten *Codex Madrid I*, die wesentlichen Prinzipien der *Elementi macchinali*.
- Franz Reuleaux teilte in seiner *Theoretischen Kinematik* (1875) die *Mechanismen von Maschinen* in 22 elementare Klassen ein, siehe Abb. 7.1.

Die Prinzipien der Realisierung mechanischer Funktionen von Maschinen durch elementare Elemente, wie sie von Leonardo da Vinci als *Elementi macchinali* erstmals skizziert wurden, gelten universell – bis hin zur Mikromechanik, siehe Abb. 7.2.

Die heutige Konstruktionssystematik der Maschinenelemente gliedert nach *Funktion* und *Wirkprinzip*, siehe Tab. 7.1. Anwendungen der Mechatronik betreffen im Wesentlichen Federn und Tribologische Systeme, insbesondere Lager und Getriebe.

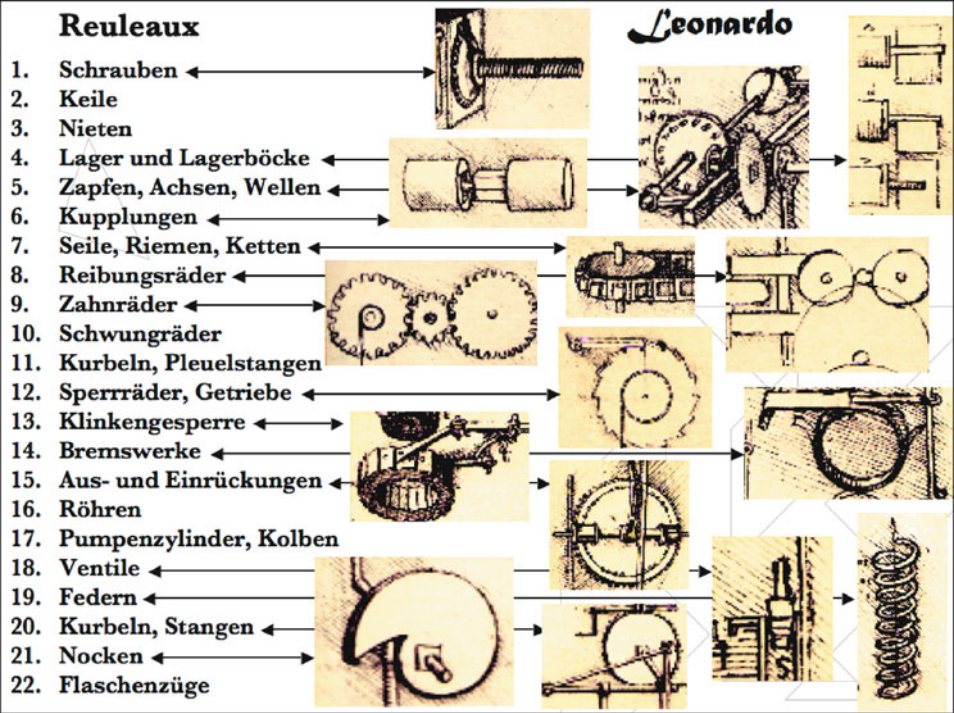


Abb. 7.1 Historische Darstellungen der klassischen Mechanismen von Maschinen

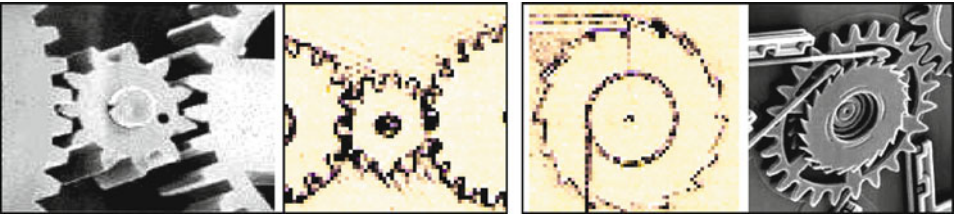


Abb. 7.2 Beispiele mikromechanischer Zahnräder und Getriebe, (Rasterelektronenmikroskopie, 100-µm-Maßstab) im Vergleich zu den Skizzen Leonardo da Vincis (Nr. 9 und 12 in Abb. 7.1)

**Tab. 7.1** Die elementaren Kategorien der Maschinenelemente

Kategorie		Konstruktionselemente: Wirkprinzip
Bauteilverbindungen		Feste Lagezuordnung von Bauteilen durch Form-Kraft(Reib)- oder Stoffschluss
Federn		Aufnehmen, Speichern und Übertragen mechanischer Energie (Kräfte, Momente, Bewegungen)
Tribologische Systeme	Lager und Führungen	Aufnahme und Übertragen von Kräften zwischen relativ zueinander bewegten Komponenten mit vorgegebenen Freiheitsgraden
	Kupplungen und Gelenke	Übertragen von Rotationsenergie (Drehmomente, Drehbewegungen) über Wirkflächenpaare von Wellensystemen
	Getriebe	Übertragen von Leistungen über Formschluss oder Reibschluss von Wirkflächenpaaren bei Änderung von Kräften, Momenten und Geschwindigkeiten
Elemente zu Führung von Fluiden		Führen, Verändern und zeitweises Sperren von Fluiden nach Gesetzen der Hydro- oder Gasdynamik
Dichtungen		Sperren oder Vermindern von Fluid- oder Partikelströmen durch Fugen miteinander verbundener Bauteile

**7.2    Mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul**

Das Funktionsprinzip von Federn besteht in der Aufnahme, Speicherung und Übertragung mechanischer Energie, wie in Abb. 7.3a vereinfacht dargestellt.

Durch das Zusammenschalten von Federn mit Dämpfern lassen sich mechanische Module für vielfältige Aufgaben realisieren. Ihre mechanische Funktionalität ist in der herkömmlichen Modellbildung jedoch durch ihre fest vorgegebenen Parameter *Feder-Konstante*  $k$  und *Dämpfungs-Konstante*  $d$  fixiert.

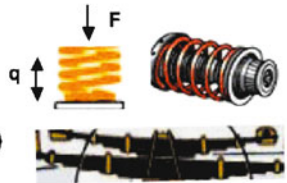
Mit Methoden der Mechatronik können „aktive“ Feder-Dämpfer-Module gestaltet werden, wie sie insbesondere in der Fahrzeugtechnik benötigt werden (vgl. Abschn. 14.1). Hierzu wird, wie in Abb. 7.3b dargestellt, die Basis-Feder-Dämpfer-Einheit durch eine Kombination aus Hydraulik-Zylinder und Gasfederspeicher ersetzt. In Verbindung mit einer geeigneten Sensorik können durch diese „Aktivierung“ geregelte Module mit „adaptiver Funktionalität“ geschaffen werden, die aber natürlich mit größerem technischen Aufwand und höheren Systemkosten verbunden sind.

a

**Federn:** klassische mechanische Konstruktionselemente

**Funktionen:** Aufnehmen und Abgeben mechanischer Energie mit dem Wirkprinzip-Ziel:

- Erzeugen von Kräften und Momenten
  - ohne Energieabbau (Kraftschluss, Reibschluss)
  - mit Energieabbau (Federantriebe)
- Mildern von Stößen und schwingenden Belastungen.

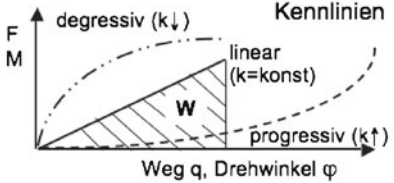


Ausführungsbeispiele


**Wirkungen:**

- Formänderungsarbeit:  $W = \int F \cdot dq$   
(F Kraft, M Moment)  $W = \int M_T \cdot d\varphi$
- Federsteifigkeit:  $k = F/q$   
 $k_T = M_T / \varphi$   
 $\delta = 1/c$
- Nachgiebigkeit:
- Federschaltungen:
  - Parallelschaltung:  $F_{ges} = \sum F_i$   
 $k_{ges} = \sum c_i$
  - Reihenschaltung:  $q_{ges} = \sum q_i$   
 $\delta_{ges} = \sum \delta_i$
- Dämpfung  $\psi = \frac{\text{Verlustarbeit } \Delta W(q/q_{i+1})}{\text{Formänderungsarbeit } W}$

**Kennlinien**



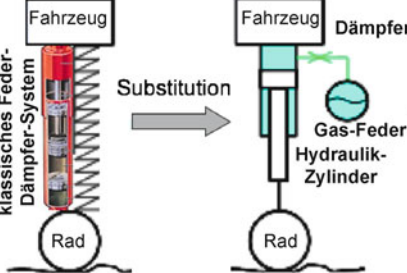
**Schwingungsverhalten**



Abklingzeit  $\tau = T \Lambda^{-1}$  mit  $\Lambda = \ln(q_i/q_{i+1})$   
T Periodendauer,  $\Lambda$  log. Dekrement

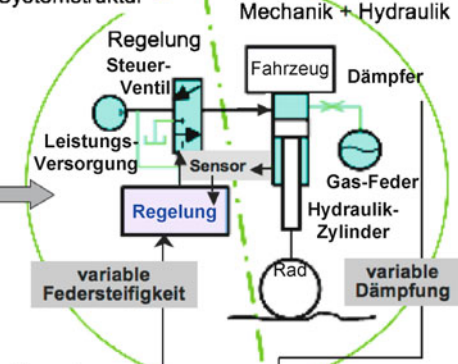
b

**Mechatronischer Feder-Dämpfer Modul**



Substitution

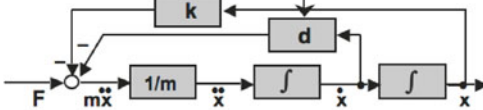
**Systemstruktur**



**Mechanik + Hydraulik**

**Wirkprinzip mechatronischer Module:**  
Substitution „passiver“ Elemente durch „aktive“ (geregelte) Elemente  
Funktions-DGL:  $m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F$

**Signalflussplan**



**Abb. 7.3** Konstruktionselement Feder (a), mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul (b)



## 7.3 Tribologische Systeme

In der Technik können Bewegungen, Kraft- und Energieübertragungen, aber auch Materialbearbeitung und -umformung, häufig nur durch kontaktierende, relativ zueinander bewegte Bauelemente realisiert werden. Dies ist stets mit Reibung sowie häufig mit Verschleiß verbunden und gehört zum Aufgabenbereich der *Tribologie* (tribein, griechisch reiben). Das fachübergreifende Wissenschafts- und Technikgebiet *Tribologie* wurde Mitte der 1960er-Jahre mit folgender Definition begründet (Peter Jost, 1966):

- Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices.

Im deutschen Sprachgebrauch kann die Wortkombination „interacting surfaces“ durch den in der Konstruktionstechnik für funktionelle Oberflächen gebräuchlichen Begriff „Wirkflächen“ übersetzt werden womit die Tribologie-Definition wie folgt lautet:

- Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren.

Das Gebiet vereinigt Elemente aus Physik und Chemie sowie den Werkstoff- und Ingenieurwissenschaften und kann unter Berücksichtigung seiner Bedeutung für die Technik wie folgt gekennzeichnet werden:

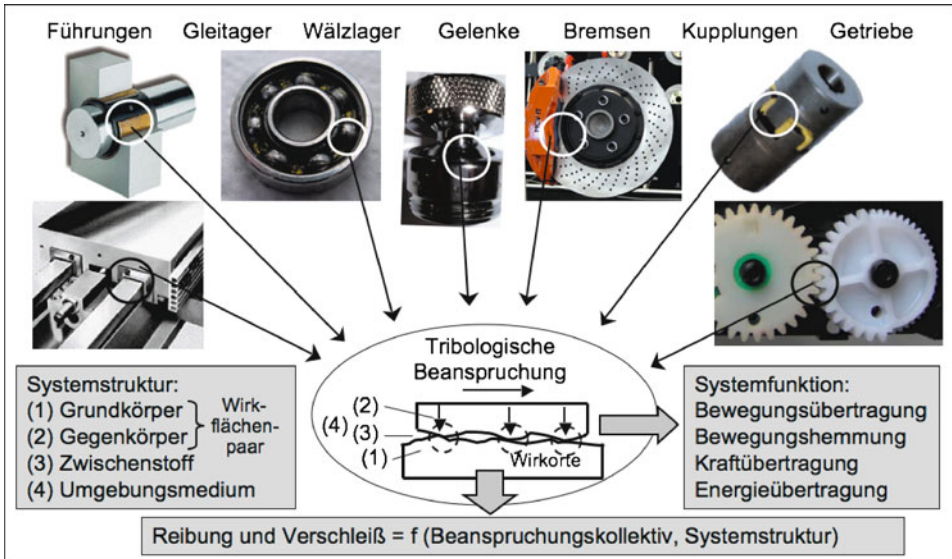
- Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.

Eine Übersicht über tribologische Systeme des Maschinenbaus und ihre gemeinsamen Kennzeichen – Systemstruktur, Systemfunktion, tribologische Beanspruchung, Reibung und Verschleiß – gibt Abb. 7.4.

Die Funktion von Tribosystemen wird über *Wirkflächen* von Bauteilen realisiert, die durch die funktionellen Kräfte und Relativbewegungen *tribologischen Beanspruchungen* ausgesetzt sind. Tribologische Beanspruchungen sind stets mit Reibung verbunden und können zu Verschleiß führen. Reibung und Verschleiß sind keine „Materialeigenschaften“, sondern entstehen durch Wechselwirkungsprozesse kontaktierender Körper oder Stoffe und müssen stets auf die Material-Paarung, d. h. allgemein auf das betreffende tribologische System, bezogen werden, in symbolischer Schreibweise:

- **Reibung, Verschleiß = f (Beanspruchungskollektiv, Systemstruktur).**

**Reibung** ist ein *Bewegungswiderstand*. Er äußert sich als Widerstandskraft sich berührender Körper gegen die Einleitung einer Relativbewegung (Ruhereibung, statische

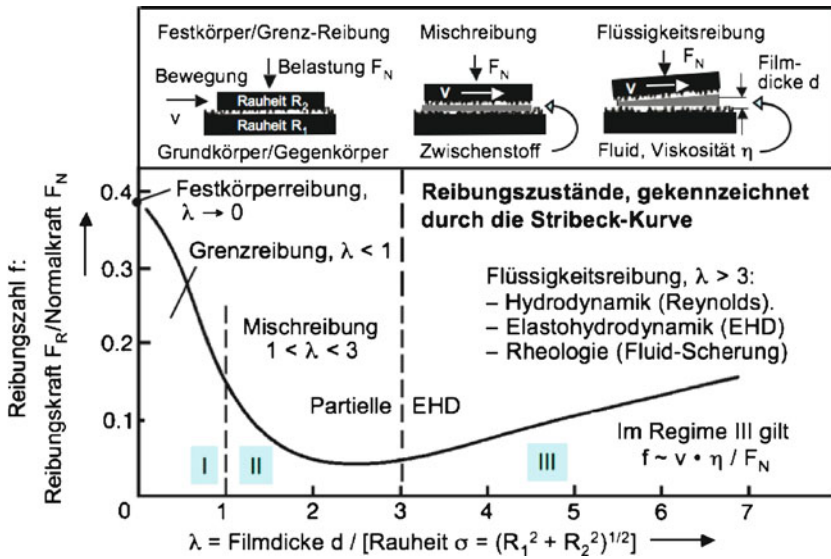


**Abb. 7.4** Tribologische Systeme des Maschinenbaus und ihre gemeinsamen Kennzeichen: Systemstruktur, Systemfunktion, tribologische Beanspruchung, Reibung und Verschleiß

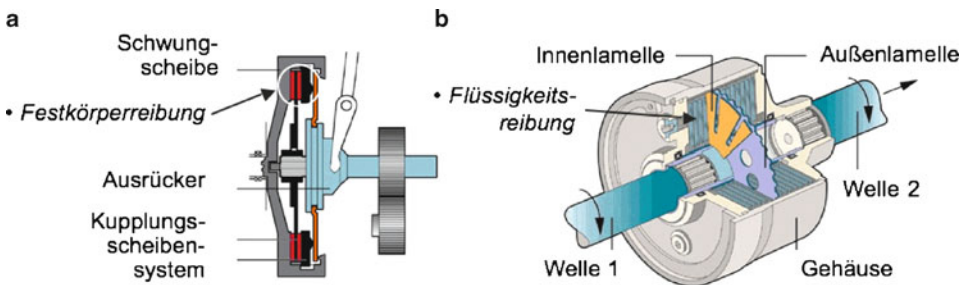
Reibung) oder deren Aufrechterhaltung (Bewegungsreibung, dynamische Reibung). Roll- oder Wälzreibung ist der Bewegungswiderstand gegen eine Rollbewegung, Gleitreibung ist der Bewegungswiderstand gegen eine Translationsbewegung. Abbildung 7.5 gibt eine Übersicht über die Reibungszustände der Gleitreibung, gekennzeichnet durch die Stribeck-Kurve.

- *Festkörperreibung*: Reibung beim unmittelbaren Kontakt fester Körper,
- *Grenzreibung/Grenzschichtreibung*: Festkörperreibung, bei der die Oberflächen der Reibpartner mit einem molekularen Grenzschichtfilm bedeckt sind,
- *Flüssigkeitsreibung*: Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden flüssigen Film, der hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt werden kann,
- *Gasreibung*: Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden gasförmigen Film, der aerostatisch oder aerodynamisch erzeugt werden kann,
- *Mischreibung*: Reibung, bei Koexistenz von Festkörperreibung und Flüssigkeitsreibung.

Reibung hat in der Technik eine „duale Rolle“. Einerseits ist sie als Dissipationseffekt mit Energieverlusten verbunden. Andererseits basieren ganze Wirtschaftszweige, wie Transport und Verkehr, technisch auf *Haftreibung* und *Traktion* von Reifen/Straße- oder Rad/Schiene-Systemen. Reibung ermöglicht auch durch *Reibschluss* die Übertragung mechanischer Leistungsflüsse. Abbildung 7.6 zeigt dazu Beispiele aus den Bereichen I und III der Stribeck-Kurve.



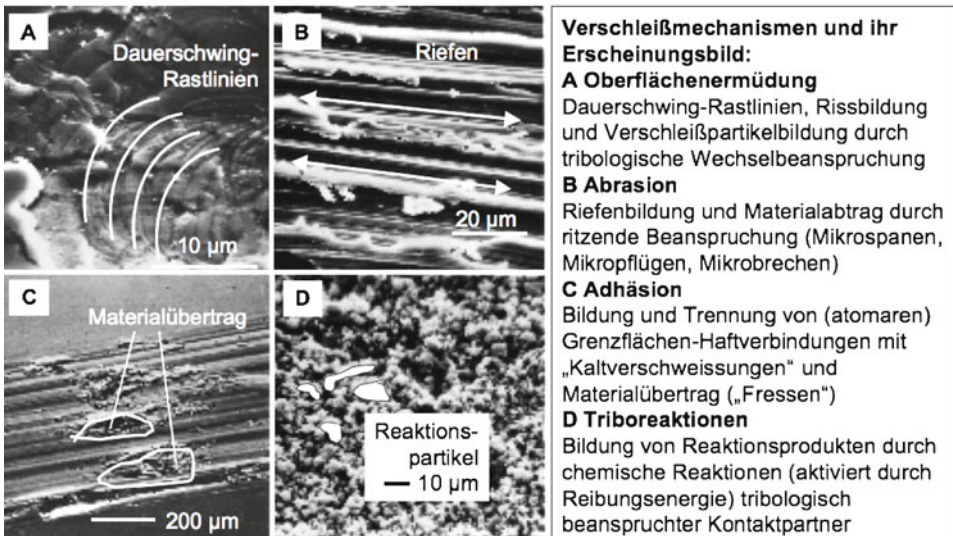
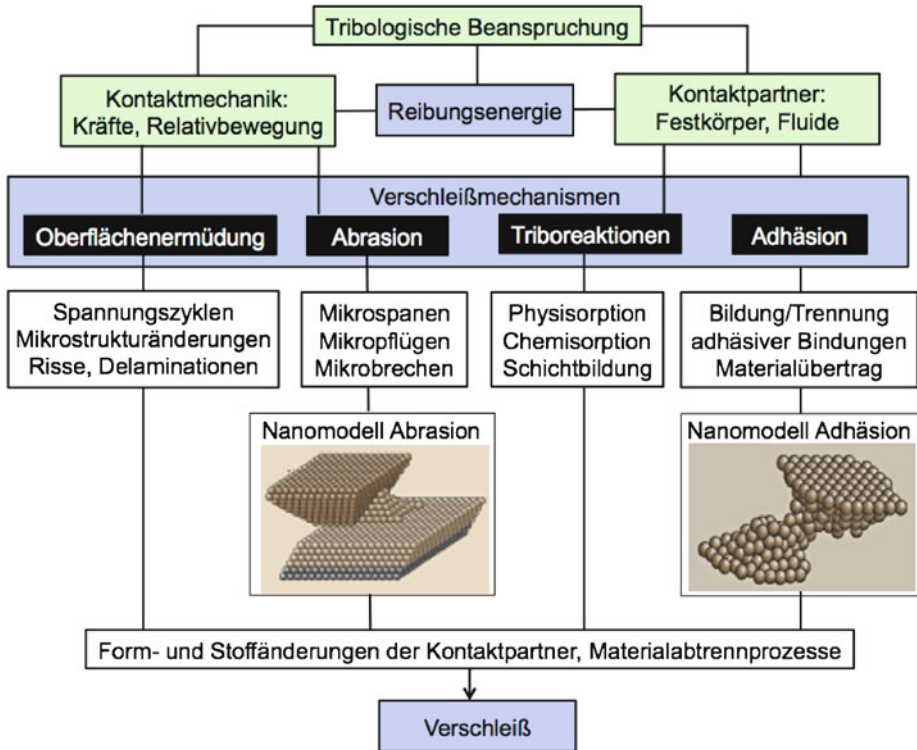
**Abb. 7.5** Übersicht über die Gleitreibung in tribologischen Systemen



**Abb. 7.6** Tribotechnische Kupplungen. a Reibungskupplung, b Visco-Kupplung

**Verschleiß** ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch tribologische Beanspruchungen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Er tritt in technischen Bewegungssystemen in Abhängigkeit von der tribologischen Beanspruchung in den Verschleißarten: *Gleitverschleiß*, *Wälzverschleiß*, *Stoßverschleiß*, *Schwingungsverschleiß*, *Furchungverschleiß*, *Strahlverschleiß*, *Erosion* auf. Die Elementarprozesse des Verschleißes – die meist in einer dynamischen Überlagerung auftreten – sind die Verschleißmechanismen *Oberflächenermüdung*, *Abrasion*, *Adhäsion* und *physikalisch-chemische Triboreaktionen*. Abbildung 7.7 gibt eine Übersicht über die Detailprozesse der Verschleißmechanismen und zeigt charakteristische Verschleißerscheinungsbilder.

Verschleiß kann in tribologischen Systemen die Strukturintegrität negativ verändern. Verschleißbeeinflussende Maßnahmen müssen in jedem Falle von einer individuellen Sys-



**Abb. 7.7** Die elementaren Verschleißmechanismen und ihr Erscheinungsbild

temanalyse des jeweiligen Problems ausgehen. Zunächst muss generell geprüft werden, ob der betreffende Tribokontakt „eliminiert“ werden kann, d. h., ob die „äußere Reibung“ durch „innere Reibung“ (z. B. Fluide, elastische Festkörper) ersetzt werden kann. Falls dies nicht möglich ist, ist entweder das Beanspruchungskollektiv zu variieren – z. B. Vermindern der Flächenpressung, Verbessern der Kinematik (Wälzen statt Gleiten) – oder die Struktur des tribologischen Systems ist durch geeignete Konstruktion, Werkstoffwahl, Schmierung zu modifizieren. Von besonderer Bedeutung ist die gezielte Beeinflussung der wirkenden Verschleißmechanismen:

- Beeinflussung der Abrasion: Für den Widerstand gegenüber der Abrasion ist die sogenannte Verschleiß-Tieflage-Hochlage-Charakteristik besonders wichtig. Danach ist der Verschleiß nur dann gering, wenn das tribologisch beanspruchte Bauteil mindestens um den Faktor 1,3 härter als das angreifende Material ist.
- Beeinflussung der Oberflächenzerrüttung: Werkstoffe mit hoher Härte und hoher Zähigkeit (Kompromiss), homogene Werkstoffe (z. B. Wälzlagerstähle), Druckeigenspannungen in den Oberflächenzonen.
- Beeinflussung der Adhäsion: Schmierung, Vermeiden von Überbeanspruchungen, durch die ein Schmierfilm und Adsorptions- und Reaktionsschichten von Werkstoffen durchbrochen werden können, Vermeidung der Paarung Metall/Metall, statt dessen Bauteilpaarungen von metallischen Werkstoffen mit Polymerwerkstoffen oder mit ingenieurkeramischen Werkstoffen.
- Beeinflussung tribochemischer Reaktionen: keine Metalle, statt dessen Kunststoffe und keramische Werkstoffe, formschlüssige anstelle von kraftschlüssigen Verbindungen, Zwischenstoffe und Umgebungsmedium ohne oxidierende Bestandteile.

### Modellierung tribologischer Systeme

Reibung und Verschleiß von Werkstoffen werden labormäßig oft mit geometrisch einfachen Tribosystemen untersucht, die auch für die tribologische Modell- und Simulationsprüftechnik verwendet werden, Abb. 7.8 zeigt zwei elementare Modell-Tribosysteme und erläutert die grundlegenden Reibungszustände.

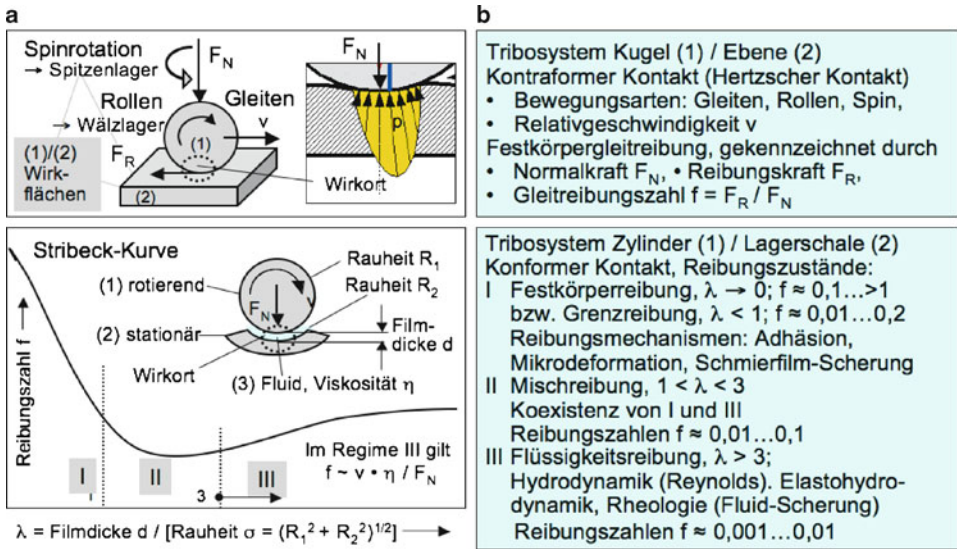
Kontraforme Kontakte haben einen „punkt- oder linienförmigen“ Wirkort mit Hertz'schen Kontaktmechanik-Spannungsverteilungen.

Bei konformem Kontakt (Gleitlagergeometrie) können im Regime III der Stribeck-Kurve durch geeignete Fluide als Zwischenstoff und die Wirkung von Hydrodynamik (z. B. Gleitlager) oder Aerodynamik (z. B. Computer-Festplattenlaufwerk) die Wirkflächen vollständig getrennt und eine praktisch verschleißfreie Funktion mit geringer Fluidreibung realisiert werden.

#### 7.3.1 Mechatronisches Magnetlager

Die klassischen Gleitlager des Maschinenbaus sind durch folgende Merkmale gekennzeichnet: Aufnahme, Übertragung und Begrenzung mechanischer Bewegungsenergie zwi-





**Abb. 7.8** Modell-Tribosysteme mit einfachen Kontaktgeometrien (a), kennzeichnende Parameter (b)

schen relativ zueinander bewegten Komponenten mit folgenden Spannweiten der Reibungszahlen:

Festkörper-Gleitreibung  $\mu = F_R / F_N \approx 0,1 \text{ bis } > 1$ ,

Mischreibung  $\mu = F_R / F_N \approx 0,01 \text{--} 0,1$ ,

Flüssigkeitsreibung  $\mu = F_R / F_N \approx 0,001 \text{--} 0,01$ .

Reibungsarme Lagerungen können durch die folgenden tribologischen Gestaltungsregeln realisiert werden, siehe Abb. 7.9:

- Ersatz von Festkörper-Gleitreibung durch Roll/Wälzreibung  
→ Reibungszahl  $\mu = F_R / F_N \approx 0,001 \text{--} 0,005$ ,
- Realisierung von Luftlagern und mechatronischen Lagern  
→ Reibungszahl  $\mu = F_R / F_N \approx 0,0001$ .

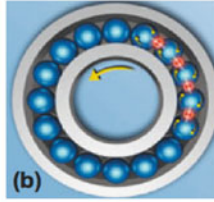
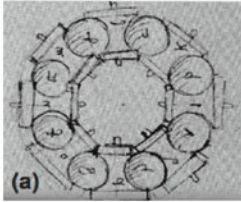
Das in Abb. 7.9 dargestellte Prinzip eines Luftlagers ermöglicht erst bei einer ausreichenden Relativbewegung zur Bildung eines aerodynamischen Luftfilms eine niedrige Reibung. Durch die Anwendung von Sensorik, Aktorik und Regelungstechnik können reibungsarme mechatronische Magnetlager entwickelt werden, die sowohl bei statischem als auch bei dynamischem Betrieb eine niedrige Reibung aufweisen. Abbildung 7.9 gibt dazu eine stichwortartige Übersicht.



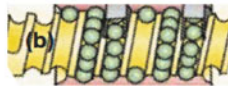
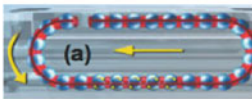
**Tribologische Systeme für reibungsarme Führungen und Lager:****Rotationsbewegung: Kugellager**

(a) Kugellager mit freien Rollbewegungen: Leonardo da Vinci (Codex Madrid, 1492)

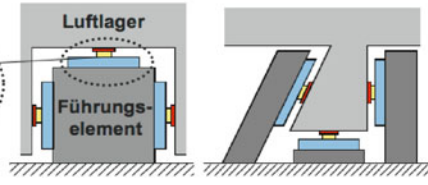
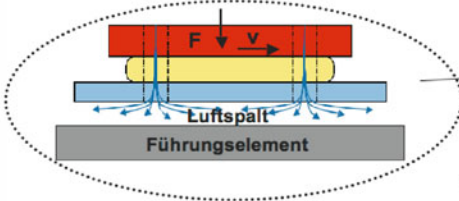
(b) Kugellager-Urform: direkter Kugel/Kugel-Kontakt behindert Rollbewegungen

(c) Kugellager mit Kugelkäfig: Stand der Technik, Reibungszahl  $\mu \approx 0,001 \dots 0,005$ **Translationsbewegung: Kugelumlaufspindel**

(a) Prinzip: geführte Kugel-Wälzbewegung zwischen Spindelnut und Spindelmutter

(b) Ausführungsbeispiele, Reibungszahl  $\mu \approx 0,01 \dots 0,02$ ; Wirkungsgrad  $0,95 \dots 0,99$ **Translationsbewegung: Luftlager**

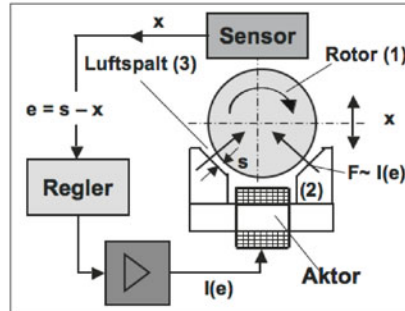
Das linear bewegte Gleitelement wird durch komprimierte ausströmende Luft getragen.

**Mechatronisches Magnetlager :****Funktionsprinzip:**

Trennung der rotierenden Welle (1) von den Tragflächen (2) durch einen Luftspalt (3), erzeugt durch magnetische Kräfte, die durch Aktor-Stellmagnete in Verbindung mit Positions-Sensoren geregelt werden:

*Active Magnetic Bearings, AMB.*

Anwendung z.B. in Werkzeugmaschinen-Spindeln mit optimaler Spanleistung,  $n > 20000$  Umdrehungen/min.

**Abb. 7.9** Tribologische Systeme für Translation und Rotation mit geringer Reibung

### 7.3.2 Automatisiertes Getriebe

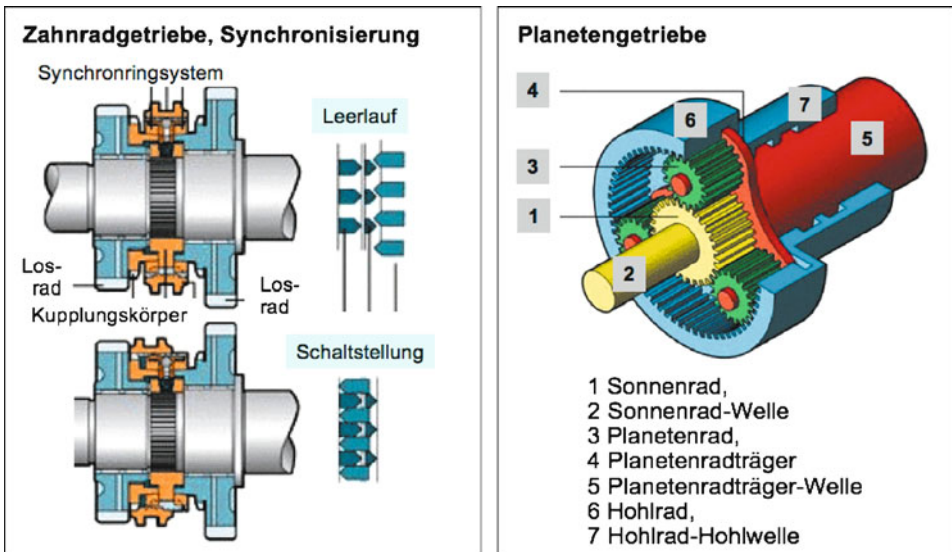
Aufgabe von Getrieben ist das Übertragen von Leistungen über Formschluss oder Reibschluss von Wirkflächenpaaren bei Änderung von Kräften, Momenten und Geschwindigkeiten. Wichtig für die mechanisch-dynamische Funktion von Getrieben sind insbesondere die folgenden Module, siehe Abb. 7.10:

- Zahnradgetriebe mit Schaltung dienen der Antrieb/Abtrieb-Synchronisierung,
- Planetengetriebe ermöglichen mit drei koaxialen Wellen in kompakter Bauweise eine Drehzahlwandlung ohne Trennung des Kraftflusses.

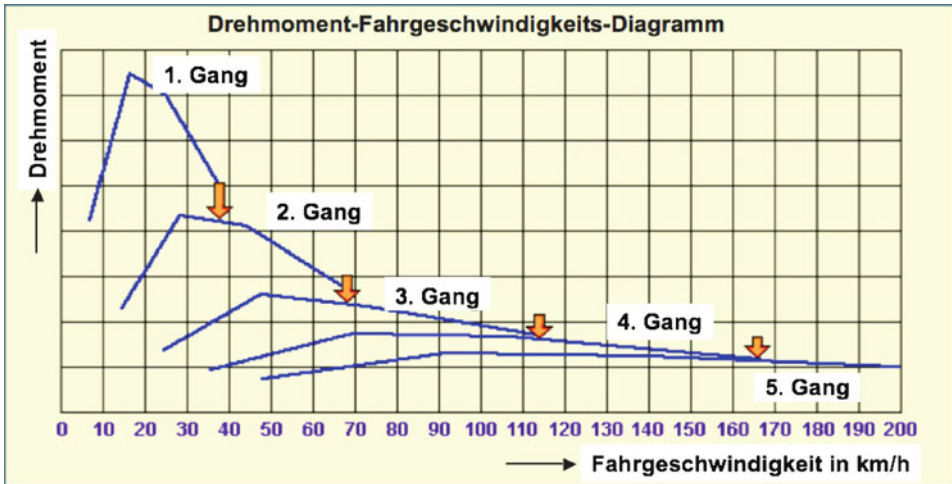
Durch Anwendung der Mechatronik können Kupplungs-Getriebe-Systeme automatisiert werden. Dies ist insbesondere für die Fahrzeugtechnik von Bedeutung, um in Automobilen den Drehmoment-Geschwindigkeitsbereich der einzelnen Getriebegänge optimal nutzen zu können, siehe Abb. 7.11.

Bei automatisierten Getrieben wird die Ausführung manuell eingeleiteter Schaltvorgänge von elektronisch gesteuerten Aktorsystemen übernommen. Das Funktionsprinzip automatisierter Getriebe ist in Abb. 7.12 stichwortartig erläutert.

Dem Funktionsablauf eines automatisierten Getriebes liegt der in Abb. 7.13a dargestellte Wirkplan zugrunde. Ein Schaltaktor als Stelleraktuator am Getriebe schaltet elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch die einzelnen Gänge und aktiviert die Kupplung. Die Signale für die Schaltung kommen von dem Getriebesteuergerät. Der Systemzusammenhang eines mechatronisch automatisierten Getriebes ist in Abb. 7.13b dargestellt.



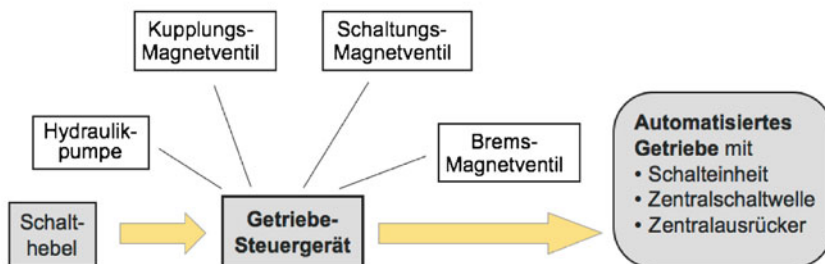
**Abb. 7.10** Module herkömmlicher Kupplungen und Getriebe



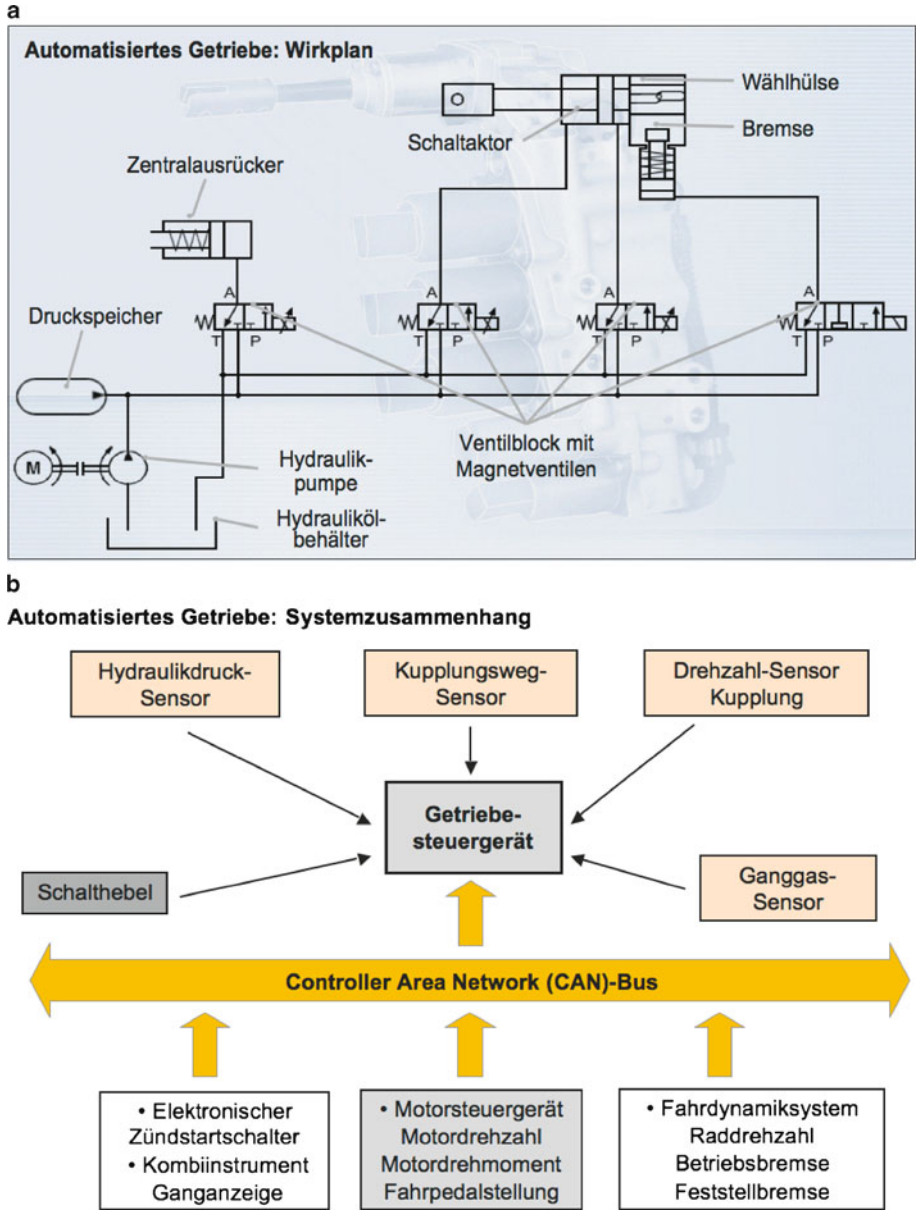
**Abb. 7.11** Drehmoment-Geschwindigkeits-Diagramme für die Getriebegänge eines Automobils

#### Automatisiertes Getriebe, Funktionsprinzip:

- Mechanisches Getriebe mit zusätzlicher Hydraulikeinheit, Steuergerät zur Prozessorenk von Magnetventilen und Zusatzaggregaten am Getriebegehäuse
- Schalthebel ohne mechanische Verbindung zum Getriebe, Kupplungspedal entfällt.
- Schaltvorgänge werden nicht mechanisch, sondern elektro-hydraulisch durchgeführt und durch Sensoren elektronisch gesteuert.
- Die Trennung von Motor und Getriebe erfolgt hydraulisch durch den Zentralausrücker.
- Die Schalteinheit (Schaltstangen und Schaltgabeln) bewirkt das Einlegen der angewählten Gänge.
- Die Zentralschaltwelle mit den Schaltfingern ist mit dem Schalt-Aktor verbunden. Der Aktor ist ein Hydraulikzylinder zur Längsbewegung der Zentralschaltwelle.



**Abb. 7.12** Funktionsprinzip und Module eines automatisierten Getriebes



**Abb. 7.13** Wirkzusammenhang (a) und Systemzusammenhang (b) eines automatisierten Getriebes





**Tab. 7.3** Systemparameter als Indikatoren für mögliche Veränderungen der Systemstruktur

Veränderungen der Struktur- integrität	Systemparameter						
	Betriebs- temperatur	Zylinder- druck	Treibstoff- fluss	Vibration	Ausgangs- leistung	Ölver- brauch	Öldebris Verschleiß- partikel
Luft Eintritts- blockade	★	★					
Einspritzdüsen- fehler	★	★	★	★	★	★	
Zündfehler	★	★	★	★	★	★	
Kühlerdefekt	★		★			★	★
Dichtungsleck						★	
Kolbenringdefekt		★			★	★	★
Getriebedefekt				★			★
Lagerschaden				★			★
★ Indikatoren für Veränderungen der Strukturintegrität							

Strukturintegrität technischer Systeme von Bedeutung. Tabelle 7.3 nennt charakteristische Systemparameter als Indikatoren für mögliche Veränderungen der Strukturintegrität.

Die wichtigsten Methoden der messtechnischen Erfassung der relevanten Systemparameter für die Zustandsüberwachung von Maschinen sind die *Sensorik* und die *Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)*.

### Sensorik zur Zustandsüberwachung

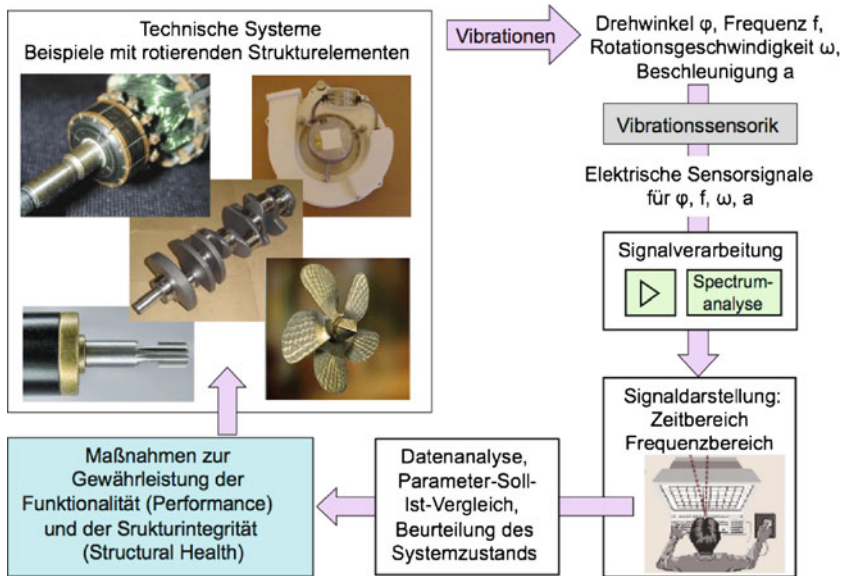
Die Methoden der Sensorik sind in Kap. 5 dargestellt. Die Anwendung der Sensorik zur Zustandüberwachung technischer Systeme lässt sich nach Funktionsgrößen der Technik gliedern:

- Sensorik geometrischer Größen → Abschn. 5.3,
  - Längenmesstechnik – Form- und Maßsensorik,
  - Dehnungssensorik mechanisch oder thermisch beanspruchter Bauteile,
- Sensorik kinematischer Größen → Abschn. 5.4,
  - Positionssensorik (Wege, Winkel) – Geschwindigkeitssensorik,
  - Drehzahlsensorik – Beschleunigungssensorik,
- Sensorik dynamischer Größen → Abschn. 5.5,
  - Kraftsensorik – Drehmomentsensorik – Drucksensorik,
- Sensorik von Einflussgrößen → Abschn. 5.6,
  - Temperatursensorik – Feuchtesensorik.

### Anwendungsbeispiel: Vibrationsanalyse

Eine wichtige Methode des Condition Monitoring von Maschinen und technischen Anlagen ist die Vibrationsanalyse, siehe Abb. 7.14.





**Abb. 7.14** Die Methodik der Vibrationsanalyse von Maschinen und technischen Anlagen

Wie am Beispiel von technischen Systemen mit rotierenden Strukturelementen illustriert, werden Vibrationen mit geeigneten Sensoren detektiert. Anhand der in elektrische Sensorsignale überführten Vibrationscharakteristik wird ein Parameter-Soll-Ist-Vergleich durchgeführt und der Systemzustand beurteilt. Dies bildet die Grundlage für Maßnahmen zur Gewährleistung der Funktionssicherheit und der Strukturintegrität.

### ZfP zur Zustandsüberwachung

Die Methoden der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) sind nichtinvasive Techniken zur Bestimmung geometrischer Kenngrößen von Bauteilen zur Schadensfrüherkennung. Die wichtigsten Methoden nutzen Ultraschall oder elektromagnetische Strahlung verschiedener Frequenz als Detektor:

- **Ultraschallsensorik**

Durch Luftschall- oder Körperschall-Analysen (Frequenzanalysen, Fourieranalysen) können mit geeigneten Messaufnehmern (Sensoren mit inversem piezoelektrischen Effekt, vgl. Abschn. 6.2) in Verbindung mit computerunterstützter Signalverarbeitung laufende Maschinenanlagen, wie Motoren oder Turbinen, überwacht und Hinweise auf eventuelle Betriebsstörungen gewonnen werden. Durch elektronisch gesteuerte Schallfelder mit Signal- und Bildverarbeitung können mittels Ultraschall-Echotomografie aufschlussreiche Schnittbilder erzeugt werden: von einem Prüfkopf werden Impulse einer geeigneten Frequenz (0,05 bis 25 MHz; Spezialanwendungen bis 120 MHz) in das Prüfobjekt gestrahlt und nach Reflexion an einer Wand oder an Fehlern von

demselben oder einem zweiten Prüfkopf empfangen, in ein elektrisches Signal umgewandelt, verstärkt und auf einem Bildschirm dargestellt (DIN EN 583). Schallrichtung und Laufzeit entsprechen der Weglänge zwischen Prüfkopf und Reflexionsstelle und geben Auskunft über die Lage der Reflexionsstelle im Prüfobjekt. Merkmale von US-Impulsechogeräten: Messbereich  $< 1\text{ mm}$  bis  $10\text{ m}$ ; Ableseunsicherheit  $< 0,1\text{ mm}$ ; Prüfobjekttemperatur:  $< 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mit Spezialprüfköpfen bis  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- **Elektrische und magnetische ZfP-Verfahren**

Sie dienen hauptsächlich zum Nachweis von Materialfehlern im Oberflächenbereich von Werkstoffen und Bauteilen. Das Wirbelstromverfahren (DIN EN 12 084) nutzt die durch den Skineneffekt an der Oberfläche konzentrierten, bei der Wechselwirkung eines elektromagnetischen Hochfrequenz-(HF-)Feldes mit einem leitenden Material induzierten Wirbelströme aus ( $f \approx 10\text{ kHz}$  bis  $5\text{ MHz}$ , für Sonderfälle auch tiefer, z. B.  $40\text{ Hz}$  bis  $5\text{ kHz}$ ). Inhomogenitäten in Bauteiloberflächen oder Gefügebereiche mit veränderter Leitfähigkeit (z. B. Anrisse, Härtingsfehler, Korngrenzenausscheidungen) verändern die Verteilung der Wirbelströme in der oberflächennahen Schicht und beeinflussen dadurch das Feld und die Impedanz einer von außen einwirkenden HF-Spule.

- **Radiographische Verfahren**

Sie basieren auf der Durchstrahlung von Prüfobjekten mit kurzweiliger elektromagnetischer Strahlung und vermitteln durch Registrierung der Intensitätsverteilung nach der Durchstrahlung eine schattenrissartige Abbildung der Dicken- und Dichteverteilung. Die Bildaufzeichnung hinter dem Prüfobjekt erfolgt überwiegend mit Röntgenfilmen, sowie zunehmend durch direkte Aufzeichnung der Intensitätsverteilung der Strahlung mit Gamma-Kamera, Bildverstärker, Fluoreszenzschirm und zugehöriger Fernsehkette (Radioskopie-System, DIN EN 13068).

Die Methoden der Sensorik und der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zur Zustandsüberwachung von Maschinen werden unter Einbeziehung weiterer messtechnisch-analytischer Methoden heute international unter dem Begriff „Technical Diagnostics“ zusammengefasst, siehe Abschn. 2.6.

Die Positionierungstechnik hat die Aufgabe, technische Objekte (Bauteile) mit Aktorik, Sensorik, Steuer/Regelungstechnik in definierten Koordinatensystemen zu bewegen, in Soll-Positionen zu bringen, Ist-Positionen zu bestimmen und das Positionierungsergebnis zu kontrollieren. Die *Seriell-Kinematik* operiert mit separaten Aktorfunktionen. Bei der *Parallel-Kinematik* erfolgt die Positionierung in allen Freiheitsgraden durch Simultansteuerung von sechs Aktoren. Hierzu sind die Eckpunkte zweier, um 60° horizontal gedrehter Dreiecke auf Basis und Effektor durch Aktoren mit zwei Eckpunkten des jeweils anderen Dreiecks verbunden. Abbildung 8.1 zeigt die Grundlagen und Abb. 8.2 das Zusammenwirken von Sensorik, Aktorik und Regelung in der Positionierungstechnik.

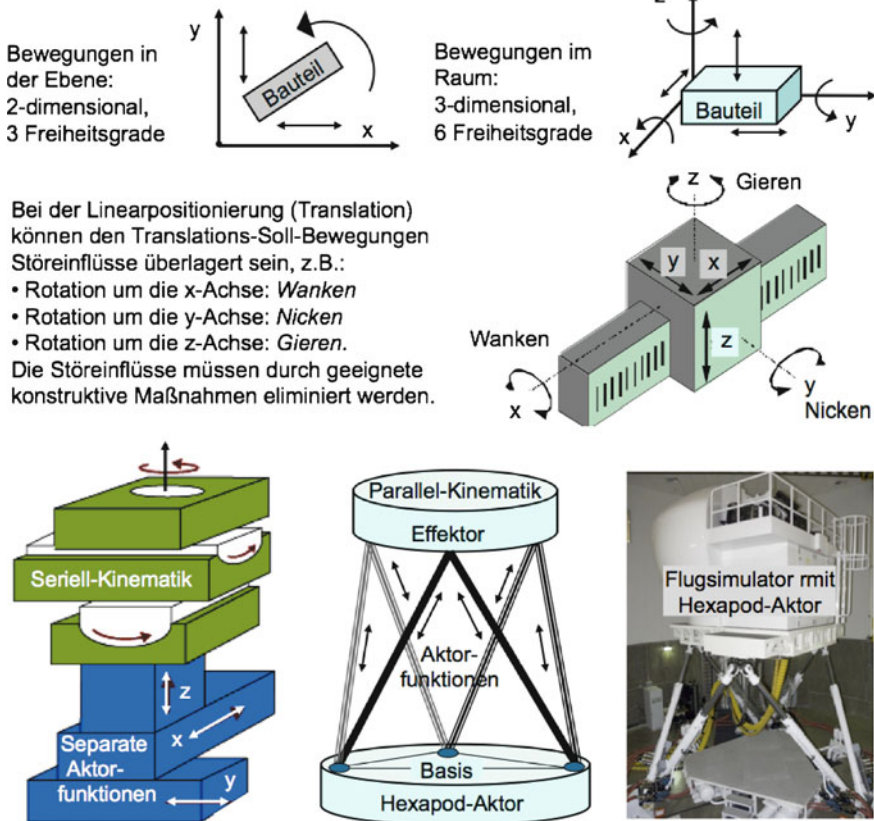
---

## 8.1 Mechatronische Positionierungstechnik

Die Aufgaben der Positionierungstechnik erstrecken sich über alle Dimensionen der Technik. Die **Makro-Positionierungstechnik** wird in Abb. 8.3 am Beispiel der zu regelnden Translationsbewegung eines Positioniertisches dargestellt.

Für die **Mikro-Positionierungstechnik** wurden neue mechatronische Systeme mit Hilfe der Mikrosystemtechnik entwickelt (siehe Abschn. 10.1). Die Mikrosystemtechnik nutzt Effekte, die erst durch Miniaturisierung möglich werden (z. B. geringere thermische Trägheit, veränderte Volumen/Oberflächen-Relationen) und integriert unterschiedliche Funktionsmodule zu kompletten technischen Systemen. Neben der Mikro-Positionierung mechanischer Funktionsmodule ist die Nutzung „informationstragender optischer Strahlung“ heute von großer Bedeutung. (Grundlagen siehe Abschn. 3.3). Wichtige Beispiele sind miniaturisierte Torsions- und Kippspiegel, die mittels elektrischer Anziehungskräfte (Elektro-Aktoren) eine Rotations- und Translationspositionierung optischer Strahlengänge möglich machen. Die wichtigsten Technologien für die Mikro-Positionierungstechnik sind *MEMS* und *MOEMS*, sie werden in Abb. 8.4 erläutert.

### Positionierungstechnik: Linear- und Drehbewegungen in Koordinatensystemen



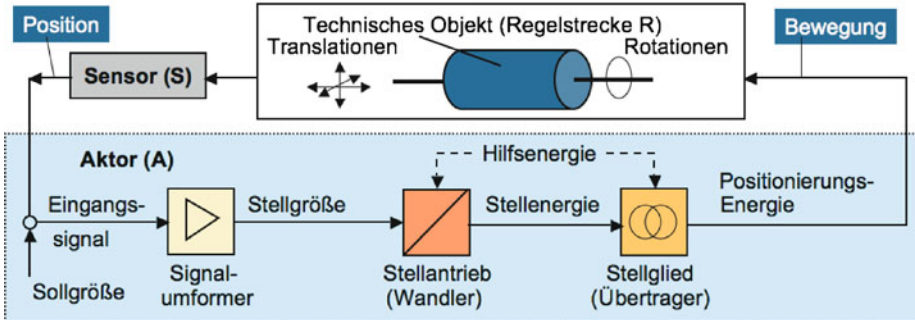
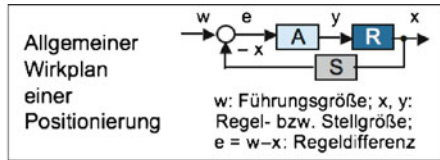
**Abb. 8.1** Kinematische und technische Grundlagen der Positionierungstechnik

Das bekannteste Anwendungsbeispiel der **Nano-Positionierungstechnik** ist das Rastertunnelmikroskop (Physik-Nobelpreis 1986, Binnig und Rohrer). Abbildung 8.5 illustriert das Prinzip in vereinfachter Weise in Seitenansicht und Aufsicht. Die mit dieser neuen Technik erreichbare Darstellung von Materialoberflächen im atomaren Maßstab wurde insbesondere durch die Entwicklung von Nanometer-Piezo-Aktoren möglich.

## 8.2 Handhabungs- und Robotertechnik

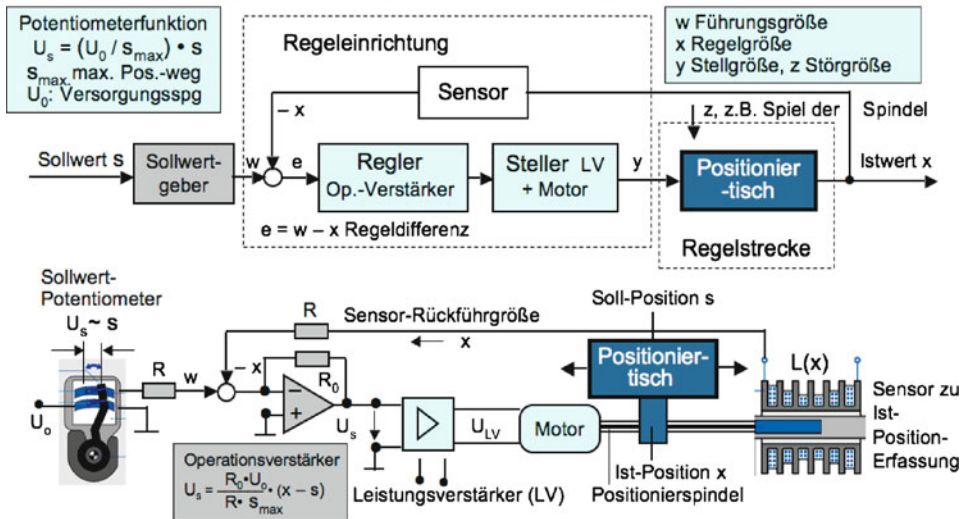
„Handhaben“ ist ein wichtiger Teil kinematischer Funktionalität und gemäß VDI-Richtlinie 2860 wie folgt definiert: *Handhaben ist das Schaffen, Verändern oder Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem; Teilfunktionen sind:*

In der mechatronischen Positionierungstechnik haben Aktoren im Zusammenwirken mit Sensoren (und einer Hilfsenergie) die regelungstechnische Aufgabe, Technische Objekte zu bewegen und zu positionieren.



**Abb. 8.2** Das Zusammenwirken von Aktorik, Sensorik, Regelung in der Positionierungstechnik

### Makro-Positionierungstechnik: Beispiel Translationsbewegung

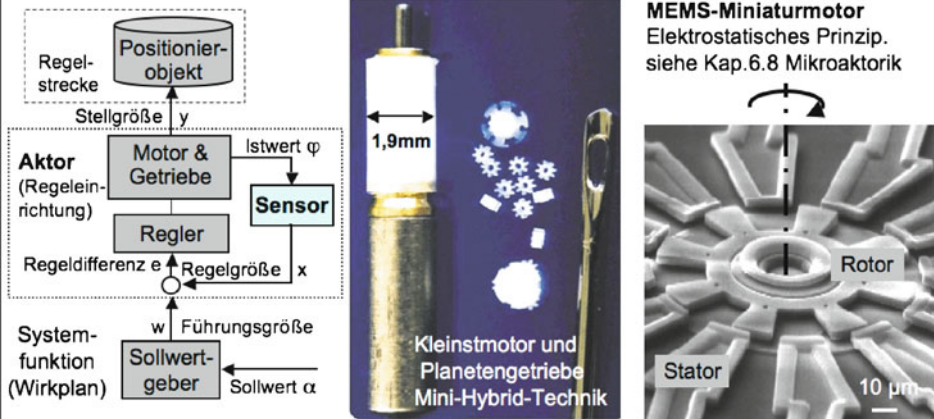


**Abb. 8.3** Makro-Positionierungstechnik mit Sensorik und Aktorik als Regelkreis

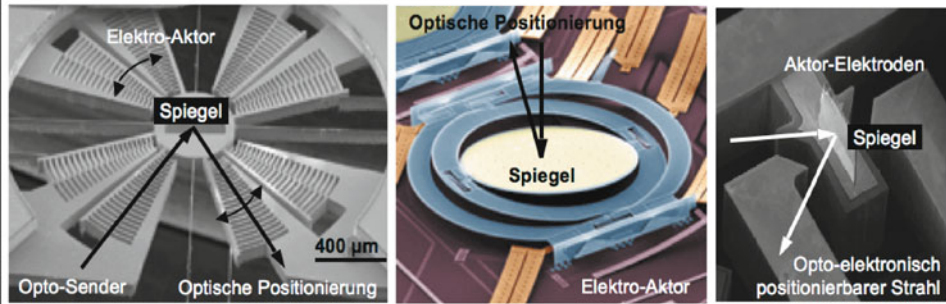
- *Speichern*: geordnet, teilgeordnet, ungeordnet,
- *Mengen verändern*: teilen, vereinigen, verzweigen, zusammenführen, sortieren,
- *Bewegen*: drehen, verschieben, orientieren, ordnen, führen, weitergeben,
- *Sichern*: halten, lösen, spannen, entspannen,
- *Kontrollieren*: prüfen, messen, zählen.



**Mikro-Positionierungstechnik, MEMS:** Micro Electro-Mechanical Systems für Positionierungsaufgaben in der Mikrotechnik sind miniaturisierte Sensor-Aktor-Systeme: Motore in Mini-Hybrid-Technik, z.B. saphirgelagerte Spule-Magnet-DC-Motore und Bauelemente in LIGA-Technik, siehe Kapitel 9.2 Mikroproduktionstechnologien. Technische Kennzeichen: Drehzahlen bis  $100\,000\text{ min}^{-1}$ , geringe Drehmomente.



**MOEMS, Micro Opto-Electrical-Mechanical Systems:** Kombinationen von MEMS mit optischen Mikroelementen. Sie operieren mit Electro-Aktoren und dienen zur Positionierung optischer Strahlengänge. Anwendungen: optische Schalter, optische Displays, Bar Codes, etc.



**Abb. 8.4** Mikro-Positionierungstechnik mit MEMS und MOEMS, Beispiele

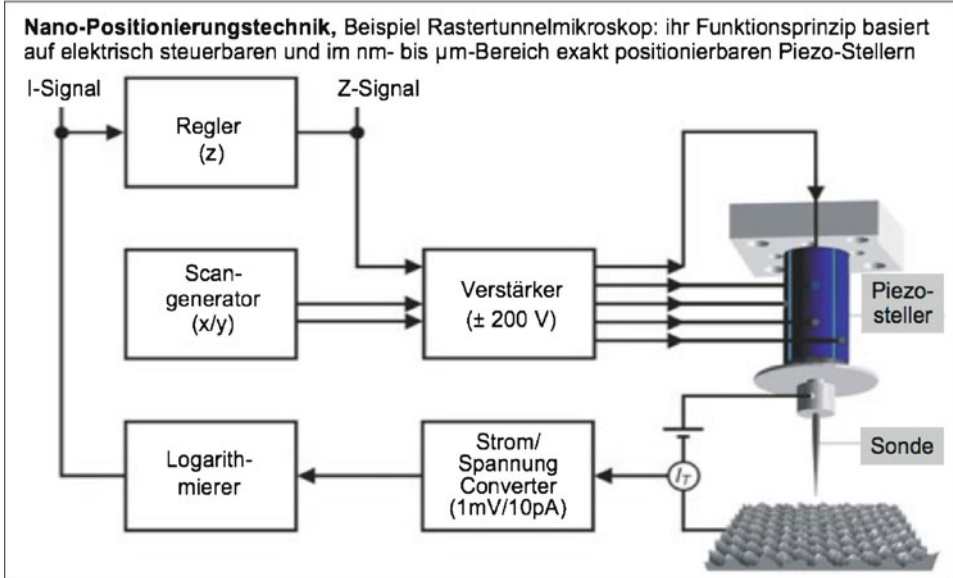
Die Aufgaben für Handhabungssysteme umfassen zwei große Bereiche:

- Bewegungsfunktionen von mit Greifern erfassten technischen Objekten, z. B. Beschriften/Wechseln von Fertigungszellen, Palettieren, Logistikprozesse.
- Positionierungs- und Fertigungsfunktionen von Werkzeug/Werkstück-Systemen, z. B. Punkt/Bahn-Schweißen, Lackieren, Beschichten, Fügen von Bauteilen, Führen von Montagewerkzeugen, Entgraten, Gussputzen, Kleben, Laserschneiden.

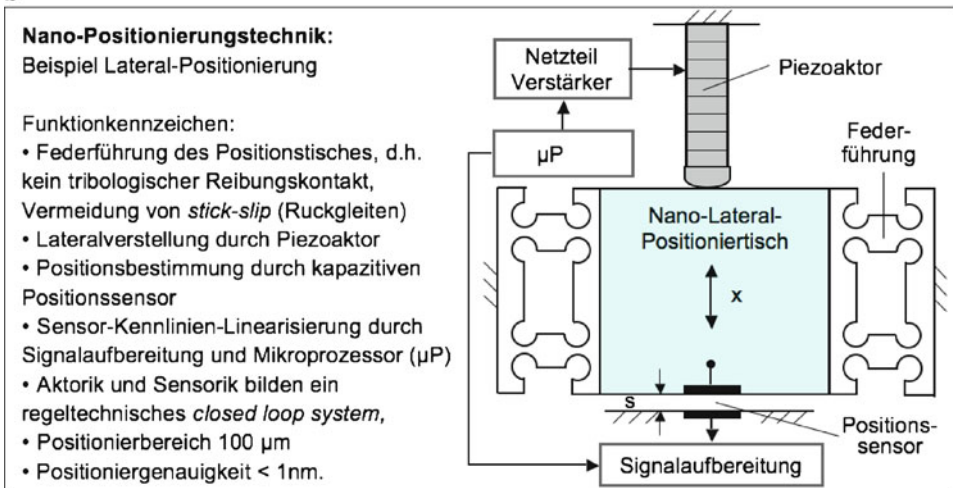
Die für Handhabungsaufgaben eingesetzten Handhabungssysteme unterscheiden sich durch die Art ihrer Steuerung und Programmierung, siehe Abb. 8.6.



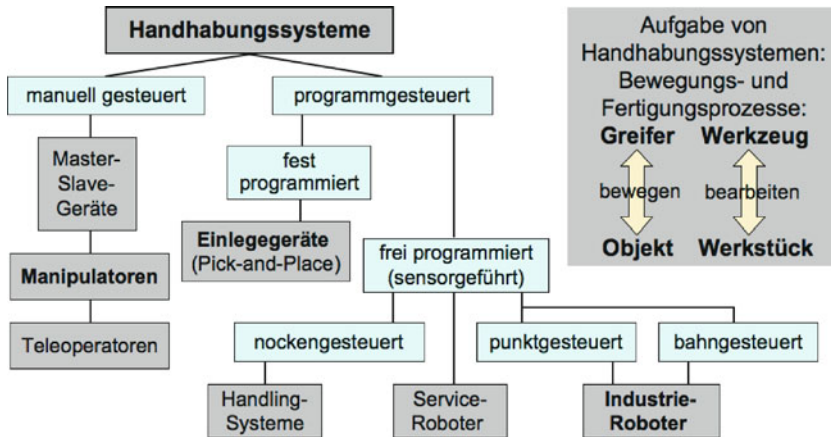
a



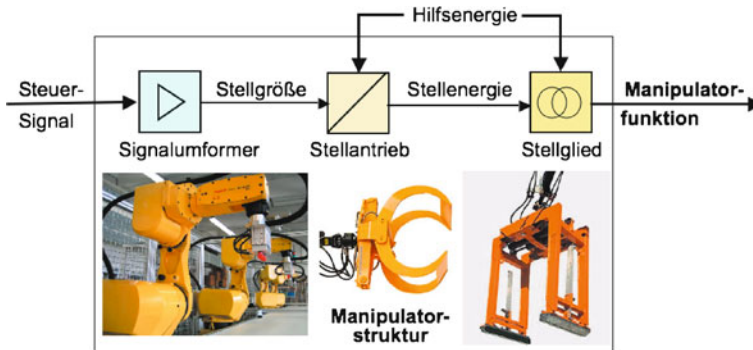
b



**Abb. 8.5** Nano-Positionierungstechnik des Rastertunnelmikroskops. **a** Blockschaltbild des Regelkreises für die Abtastung der Probenoberfläche bei konstantem „Tunnelstrom“ als Indikator des konstanten Abstands zwischen Sonde und Probenoberfläche, **b** Prinzip der Lateral-Positionierung im nm-Maßstab



**Abb. 8.6** Klassifikation von Handhabungssystemen nach Steuerungs- und Programmierungsart

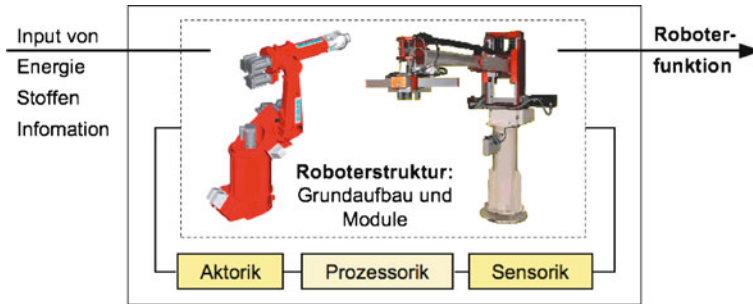


**Abb. 8.7** Manipulatoren und Pick-and-Place-Geräte: Darstellung als mechatronische Systeme

*Manipulatoren* sind manuell gesteuerte und Teleoperatoren ferngesteuerte Bewegungssysteme. *Einlegegeräte* oder *Pick-and-Place-Geräte* sind fest programmierte Bewegungsautomaten; sie werden häufig in der Großserienfertigung für Punkt-zu-Punkt-Bewegungen eingesetzt. Dabei ist eine koordinierte, gleichzeitige Bewegung mehrerer Achsen meist nicht vorgesehen.

Aus mechatronischer Sicht können Manipulatoren und Pick-and-Place-Geräte als „gesteuerte Aktoren“ angesehen werden. Sie stellen nach den Regeln der Steuerungstechnik (siehe Kap. 4) und den Prinzipien der Aktorik (siehe Kap. 6) offene Steuerketten dar und arbeiten – je nach der technisch zu erfüllenden Manipulatorfunktion – mit elektromechanischer, hydraulischer oder pneumatischer Hilfsenergie. Ihr Funktionsprinzip mit den grundlegenden Modulen ist in Abb. 8.7 dargestellt.

*Industrieroboter* sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Geometrie und Ablauf frei programmierbar und sen-



**Abb. 8.8** Industrieroboter: Darstellung als mechatronisches System

sorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln (Effektoren) ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen. Sie arbeiten mit „geregelten Aktoren“ (siehe Kap. 4 und 6) nach dem in Abb. 8.8 dargestellten Prinzip mechatronischer Systeme. Ihre grundlegenden Module – Roboterstruktur, Aktorik, Sensorik, Prozessorik – und der Systemzusammenhang der Roboterfunktion werden im Folgenden in knapper Form beschrieben.

### Roboterstruktur

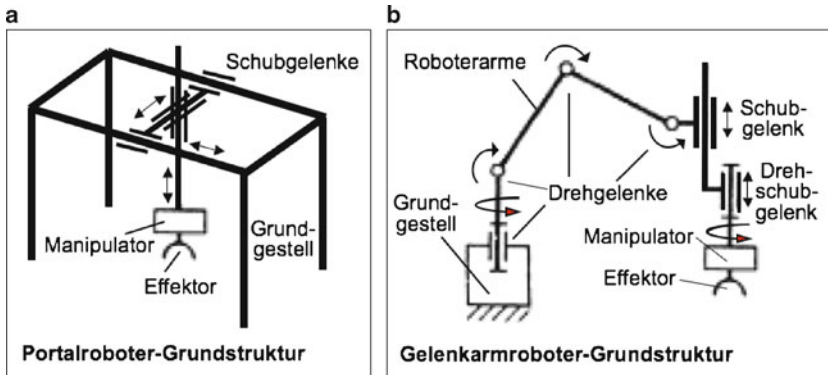
Die mechanische Grundstruktur von Robotern wird durch *Gestellbauarten* gekennzeichnet. Sie beschreiben die Lage und Verankerung (bzw. Beweglichkeit) eines Roboters im umgebenden Raum und gliedern sich wie folgt:

- *Standgeräte* besitzen eine Grundplatte, die fest auf ein Fundament montiert ist.
- *Konsol- oder Anbaugeräte* sind mit einer Arbeitseinheit (z. B. Werkzeugmaschine) fest verbunden.
- *Portale* werden eingesetzt, wenn spezielle Zugänge für den Arbeitsraum (z. B. für andere Maschinen) erhalten werden müssen.
- *Mobile Roboter* sind auf einem frei beweglichen Transportsystem montiert.

Weitere Strukturelemente von Robotern sind geführte, unabhängig voneinander angetriebene Translations- und Rotationsachsen (Roboterarme), Schub-, Dreh- und Dreh-schubgelenke. Ihre Aneinanderreihung wird als *kinematische Kette* bezeichnet und gibt die Bewegungsmöglichkeit des Roboters an. Am Ende der kinematischen Kette befindet sich der mit Greifern oder Fertigungsmitteln ausrüstbare Effektor. Die Bauarten der Industrieroboter werden nach der Roboter-Kinematik eingeteilt:

### Roboter mit Seriell-Kinematik

- Portalroboter mit Linearachsen, Bewegung in kartesischen Koordinaten,
- Gelenkarm-Roboter:



**Abb. 8.9** Struktur und elementare Elemente eines Portalroboters (a) und eines Gelenkarmroboters (b)

- SCARA-Roboter mit 3 parallelen Rotationsachsen und einer Linearachse,
- Palettier-Roboter mit 4 angetriebenen Rotationsachsen,
- 6-Achs-Roboter mit 6 Rotationsachsen.

### Roboter mit Parallel-Kinematik

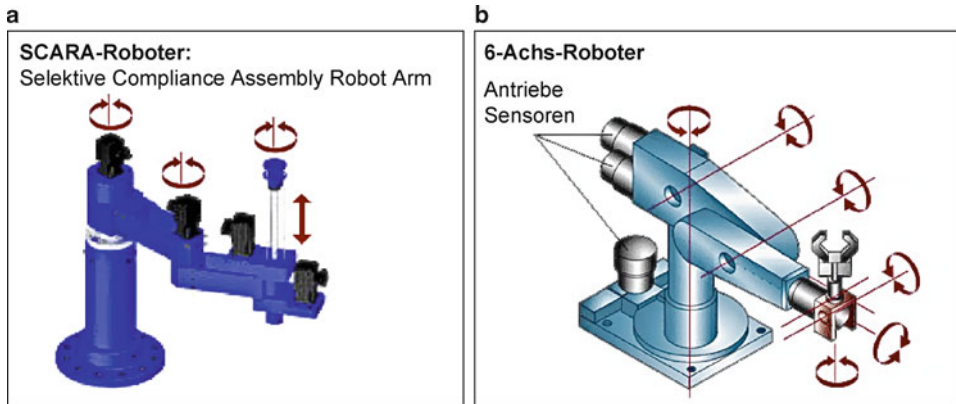
- Hexapod-Roboter, 6 Linearachsen in Winkelstellungen (siehe Abb. 8.1),
- Delta-Roboter, 3 Rotationsachsen und Arbeitsplattform-Parallelogrammführung.

Die elementaren Strukturen eines Portalroboters und eines Gelenkarmroboters sind in Abb. 8.9 in stark vereinfachter Form skizziert.

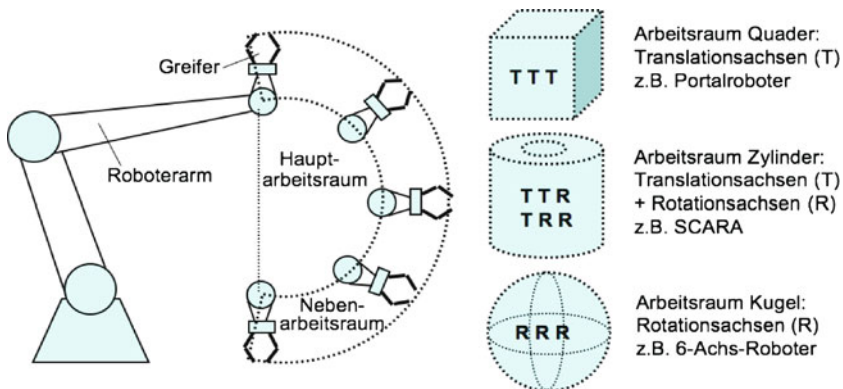
Technisch vielseitig anwendbar sind SCARA- und 6-Achs-Roboter, siehe Abb. 8.10.

- *SCARA-Roboter*: Schneller Gelenkarmroboter mit 4 Achsen (vertikal steif, horizontal nachgiebig) und 4 Freiheitsgraden. Arbeitet in nierenförmigen planparallelen Arbeitsebenen in serieller Kinematik d. h. der Koordinatenursprung der folgenden Achse ist abhängig von der Position der vorhergehenden. Geeignet für Pick-and-Place-Aufgaben z. B. Montage elektronischer Komponenten.
- *Sechsgelenkroboter (Knickarmroboter)*: Universalroboter mit sechs rotatorischen Gelenken. Geeignet für komplexe Bahnbewegungen, z. B. Bahnschweißaufgaben, Lackieren, etc.

Die Roboterstruktur definiert den geometrisch-operativen Funktionsbereich, den *Arbeitsraum* eines Roboters, siehe Abb. 8.11. Er wird gekennzeichnet durch die Freiheitsgrade  $f$  der Bewegung ( $f_{\max} = 6$ ; vgl. Abb. 8.1). Die drei Dimensionen des Raumes (Länge, Breite und Höhe) müssen durch die Hauptachsen erreicht werden, und um jede dieser Achsen muss eine Drehung (Nebenachsen) möglich sein.



**Abb. 8.10** Struktur eines SCARA- (a) und 6-Achs-Roboters (b) mit elementaren kinematischen Achsen

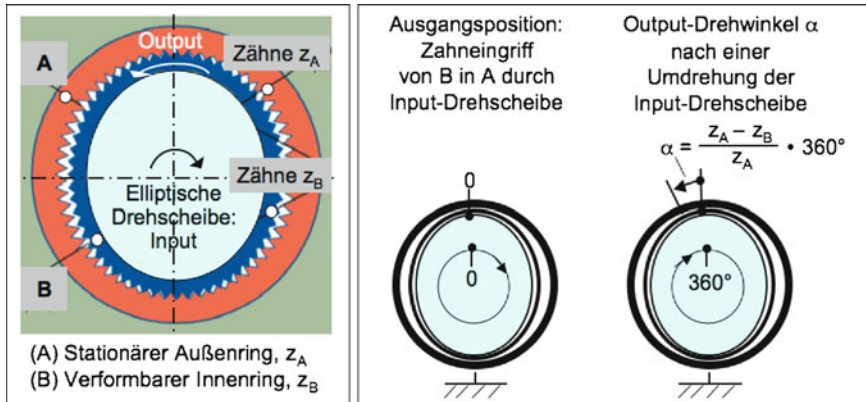


**Abb. 8.11** Arbeitsraum und Koordinatensysteme von Robotern

### Aktorik

Als Antriebsmodule für Industrieroboter werden Elektromotoren, Hydraulikmotoren und Hydraulikzylinder sowie für Robotergreifer auch pneumatische Systeme eingesetzt. Die Prinzipien elektromechanischer Aktoren wurden in Abschn. 6.1 und die von fluidmechanischen Aktoren in Abschn. 6.3 behandelt. Stellkraft-Stellweg-Diagramme für elektromotorische, elektromagnetische, hydraulische und pneumatische Aktoren sind in Abb. 6.19 zusammengestellt.

Ein charakteristischer Aspekt der Roboteraktuatorik ist, dass die Bewegung schnell drehender Elektromotoren in langsame Drehungen der Robotergetriebe (z. B. 1:300) überführt werden muss. Hierfür kommen *Planetengetriebe* (siehe Abb. 7.10), Bauart „Harmonic Drive“ zur Anwendung. Prinzip und Funktionsweise sind in Abb. 8.12 dargestellt. Grundelemente dieser Getriebeart sind eine elliptische Drehscheibe mit zentrischer Na-



**Abb. 8.12** Aufbau und Funktion eines Getriebes mit hoher Untersetzung: *Harmonic Drive*

be und aufgezogenem, elliptisch verformbaren Spezialkugellager, ein zylindrischer Ring (A) mit Innenverzahnung und ein leicht ellipsenförmiger, verformbarer Innenring (B) mit Außenverzahnung. Durch feine Verzahnungen mit hohen Zähnezahlen lassen sich große Untersetzungen erzielen, z. B. beträgt bei  $z_A = 200$  Zähnen und  $z_B = 198$  Zähnen die Untersetzung 100:1. Bei hundert Umdrehungen der elliptischen Scheibe dreht sich der Innenring als Output einmal.

Die *Greifertechnik* ist ein wichtiger Bestandteil der Roboteraktorik. Sie stellt mit der Kombination des *Erfassens-Haltens* von Objekten die Verbindung zwischen Roboter und Werkstück her und ist durch die Art der Wirkpaarung und die Anzahl der Kontaktebenen zu kennzeichnen. Greiferwirkungen können prinzipiell erzielt werden durch:

- Kraftschluss: Druckausübung durch den Greifer auf die Objektoberfläche, wobei Greifer und Objekt ein tribologisches Haftreibungssystem bilden (siehe Abschn. 7.3).
- Formschluss: Formgleiche Umschließung des Objekts durch den Greifer, wobei bei geometrisch sicherer Führung die übertragenen Klemmkräfte klein sein können.
- Stoffschluss: Realisierung der Erfassen/Halte-Funktion durch Adhäsion zwischen Greifer und Objekt, zunehmend angewendet bei der Mikromontage.

Elementare Aspekte der Greifertechnik und das Labormodell eines kraftschlüssigen Greifers mit Dehnungsmessstreifen (DMS, siehe Abschn. 5.4.3) zur Erfassung von Greifer-Haltekräften zeigt Abb. 8.13.

### Sensorik

Die Funktion von Robotern als mechatronische Systeme erfordert die Kombination von Aktorik und Sensorik. Neben den in Abb. 8.13 genannte Sensoraufgaben für die Greiferaktorik umfassen die allgemeinen Aufgaben der Sensorik in der Robotik folgende Schwerpunkte:





**Abb. 8.13** Kennzeichen der Roboter-Greifertechnik und ein Greifer-Labormodell

- Bewegungsführung von Robotern
  - Identifikation von Werkstücken
  - Positionierung von Werkzeugen
  - Kontrolle von Position und Orientierung von Werkstücken
  - Greifpunktbestimmung
- Steuerungsaufgaben in Roboterzellen
  - Anwesenheitskontrolle von Werkstücken
  - Palettenidentifikation
  - Erkennen von Ablaufstörungen
- Prozessüberwachung und -regelung
  - Überwachung von Kräften und Momenten (z. B. beim Schrauben)
  - Schweißstromregelung
  - Steuerung des Kleberauftrags
- Qualitätskontrolle
  - Vollständigkeitsprüfung bei Baugruppen
  - Oberflächenprüfung
  - Erkennen von Toleranz- und Lagefehlern
- Sicherheitsüberwachung von Roboterzellen
  - Arbeitsraumüberwachung (keine Menschen in der Zelle)
  - Kollisionskontrolle

Für die Aufgaben der Sensorik in der Robotik gibt es heute eine Vielfalt industriell anwendbarer Sensoren. Sie arbeiten „berührend“ oder „berührungslos“ und basieren auf den in Kap. 5 behandelten Sensorprinzipien. Daneben kommen vielfältige *Mustererkennungs- und Bildverarbeitungssysteme* für die externe Sensorik in der Robotik zum Einsatz.

Sensoren in der Robotik müssen im Allgemeinen über elektrische Signalausgänge für ihre Aufgaben als integrierte Funktionsmodule in mechatronischen Robotersystemen verfügen. Tabelle 8.1 gibt eine Übersicht über Sensorprinzipien für sensorisch zu erfassende

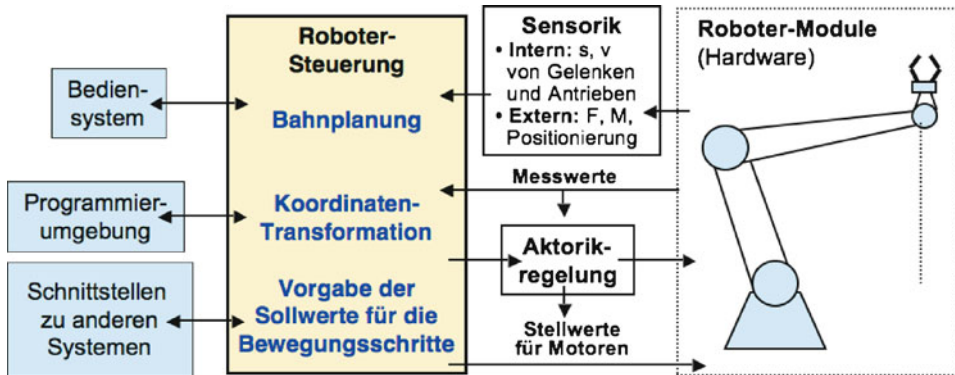
**Tab. 8.1** Übersicht über Sensorprinzipien für elementare Messgrößen in der Robotik

Messgröße	Sensorprinzipien mit elektrischem Sensor-Signalausgang				
	resistiv	induktiv	kapazitiv	Spannung	Strom
Position: Länge $l$ , Weg $s$ Winkel $\varphi$ (5.4.1, 5.5.1)	Potentiometer, Magnetoresistiver Sensor, Gauß-Feldplatte	Differenzial- Transformator, Tauchanker- Wegsensor	Kapazitiver Wegsensor	Hall-Sensor, Optoelektronischer Licht- schranken- Sensor	Wirbelstrom- Sensor
Dehnung $\varepsilon = \Delta l / l_0$ (5.4.3)	Dehnungs- messstreifen (DMS)				Faser- optische Sensoren
Geschwindigkeit $v = ds/dt$ (5.5.2)	Magnetoresist. Drehwinkel-S.	Indukt. Dreh- winkel-S.		Magnetpol- Drehzahl-S.	Optoelektron. Drehzahl-S.
Beschleunigung $a = dv/dt$ (5.5.4)	Seismische Masse-Dämpfer-Feder-Systeme, Rückführung auf Wegmessung: resistiv, induktiv, kapazitiv, optoelektronisch, piezoresistiv ; Hall/Gauß-Sensorik oder Dehnungsmessung (DMS)				
Kraft $F$ (5.6.1) Moment $F \cdot l$ (5.6.2)	Piezoresistiver Sensor, Dehnstoffe	Magneto- elastischer Sensor	Kraftkompen- sations- Sensor	Federelemente oder DMS, Rückführung auf $s$ -, $\varepsilon$ -Messung	
Druck $p = \text{Kraft}/\text{Fläche}$ (5.6.3)	Piezoresistiver Sensor Dehnstoff:	Magnetoelas- tischer Sensor	Kapazitiver Drucksensor	Federelemente oder DMS: Rückführung auf $s$ -, $\varepsilon$ - Messung	
Temperatur $T$ (5.7.1)	NTC/ PTC- Widerstände			Thermo- elemente	Optoelektron. Pyrometer

elementare Messgrößen der Robotik und nennt die Abschnitte des Kap. 5 *Sensorik*, in denen diese Prinzipien dargestellt sind. Für die vielfältigen und auch sehr unterschiedlichen Anwendungen von Robotern in der Technik müssen die benötigten Sensoren natürlich aufgabenspezifisch ausgewählt und ausgelegt werden.

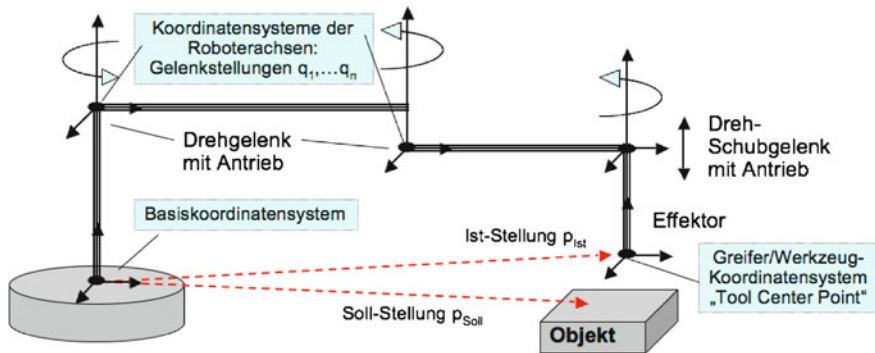
### Prozessorik

Die Prozessorik bezeichnet in der Mechatronik im engeren Sinne das funktionelle Zusammenwirken von Sensorik und Aktorik (siehe Abschn. 6.6) und im weiteren Sinne die für die Funktion mechatronischer Systeme erforderliche Steuerungs- oder Regelungstechnik (siehe Kap. 4). In der Robotik hat die Steuerungstechnik die für die Roboterfunktion zentral wichtigen Aufgaben der Bahnplanung, der Koordinatentransformationen und die Vorgaben für die Bewegungsschritte durchzuführen. Dabei dient die „externe Sensorik“ der Objekt-Positionsbestimmung und der Erfassung von Roboter-Funktionsgrößen und die „interne Sensorik“ der Steuerung und Regelung der Gelenk- und Antriebsmodule eines Roboters. Wie in Abb. 8.14 übersichtsmäßig dargestellt, sind Roboter-Steuerung und Roboter-Sensorik mit der Aktorik-Regelung für die Roboter-Module, dem Bediensystem, der Programmierungsumgebung und Schnittstellen zu anderen Systemen strukturell und funktionell verknüpft.



**Abb. 8.14** Module und Funktionszusammenhang der Prozessorik von Industrierobotern

**Roboterkinematik: Wirkzusammenhang und Modellbildung, Beispiel SCARA**



**Kinematische Aufgabe der Roboter-Steuerung:**

- Interne Sensorik misst Gelenk-Ist-Stellungen  $q_{ist} \rightarrow$  Vorwärtstransformation  $p = f(q)$
  - Ansteuerung der Zielposition  $p_{soll} \rightarrow$  Rückwärtstransformation  $q = f^{-1}(p)$
- On-line Programmierung: Bahnfestlegung durch empirische Bahnpunkte (Teachen)  
 Off-line Programmierung: Computersimulation, Modellierung, z.B. Lagrange-Gleichungen

**Abb. 8.15** Grundzüge der Steuerung von Industrierobotern

Die Steuerung von Industrierobotern kann durch „On-line-Programmierung“ oder „Off-line-Programmierung“ erfolgen. Die kinematischen Aufgaben der Roboter-Steuerung werden unterstützt durch die interne Sensorik. Sie bestimmt Ort  $s$  und Geschwindigkeit  $v$  der Gelenkstellungen als Grundlage für eine „Vorwärtstransformation“ von Bewegungsabläufen und die mögliche Ansteuerung der Zielposition durch eine „Rückwärtstransformation“, wobei folgende Methoden unterschieden werden:

- Zur textuellen Programmierung wird der Programmablauf durch Anweisungsbefehle für jede Achse in einer „Roboter-Programmiersprache“ geschrieben, was bei vielen Freiheitsgraden sehr aufwendig ist.

- Im Teach-in-Verfahren wird der Roboter von Hand an die Raumpunkte angefahren. Die Stellung der Achsen wird gespeichert und anschließend vom Roboter nachgefahren.
- Die Play-back-Programmierung wird bei besonders schwierigen Bahnen (z. B. beim Lackieren) eingesetzt. Hierbei wird die Roboterhand (oder eine entsprechende Messsensorik) manuell geführt und die jeweilige Position der Bahnbewegung in kurzen Intervallen (ca. alle 20 Millisekunden) gespeichert.
- Bei der Off-line-Programmierung werden Roboter-Bewegungsabläufe auf der Basis von Konstruktionszeichnungen, mathematischen Algorithmen oder Gleichungssystemen (z. B. Lagrange-Gleichungen) modelliert und der gesamte Bewegungsablauf in einer dreidimensionalen Bildschirmumgebung simuliert.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Programmierung der Roboterkinematik sind in Abb. 8.15 in knapper Form für das Beispiel eines SCARA-Roboters zusammengefasst.

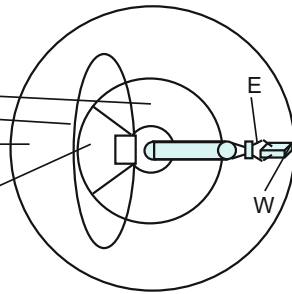
### Roboterfunktionalität: Kennzeichen und Systemzusammenhang

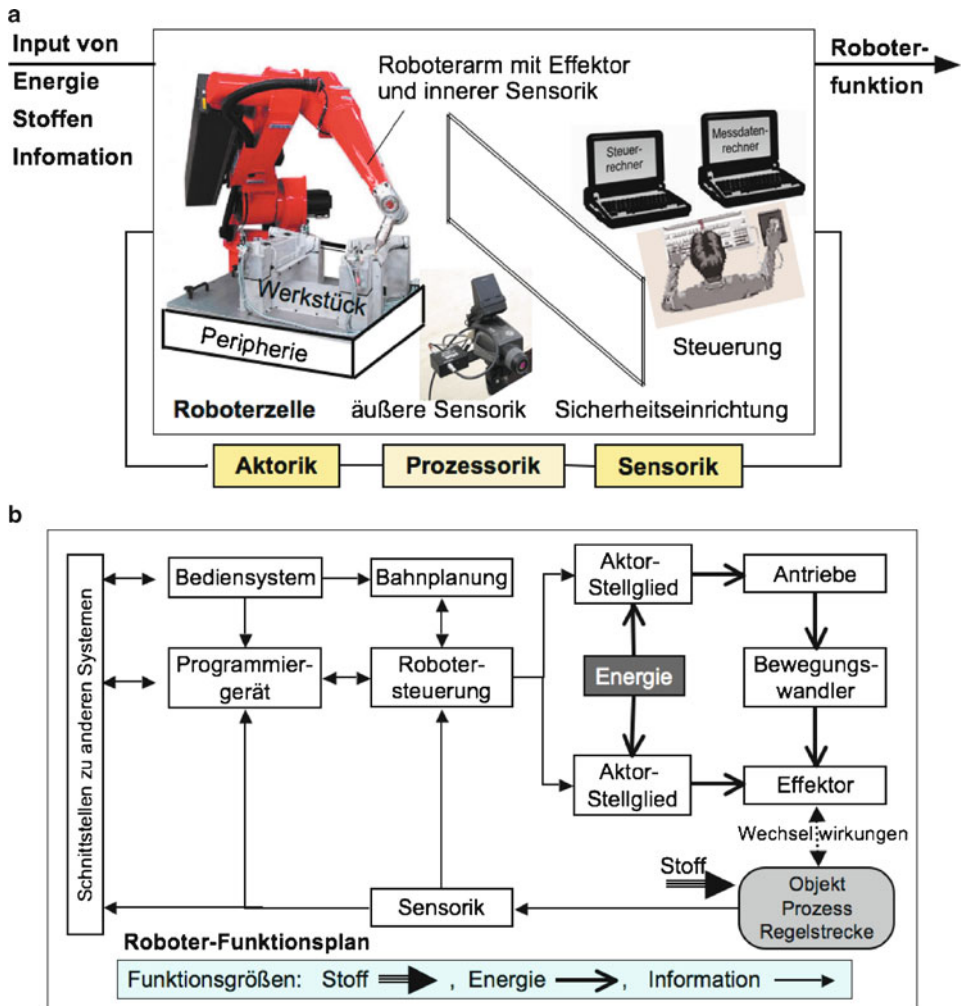
Die hauptsächlichsten Kategorien der Kennzeichnung der Roboterfunktionalität sind:

- **Geometrie:** Der *Arbeitsraum* (vgl. Bild 8.11) ist der erreichbare Positionsbereich des Roboters mittels Haupt- und Nebenachsen:
  - Hauptarbeitsraum (H)
  - Nebearbeitsraum (N)

*Sicherheitsraum (S):* An den Arbeitsraum nach außen anschließender Raum, in dem noch Bewegungen von Werkzeug oder Werkstück (W) stattfinden können.

*Nicht nutzbarer Raum:* innerhalb der Roboterreichweite liegender, aber durch den Endeffektor (E) nicht erreichbarer Bereich.
- **Tragvermögen:** Die *Traglast* eines Roboters kennzeichnet die vom Endeffektor maximal bewegbare Masse. Zu berücksichtigen sind ggfs. Drehmomente, die auftreten können wenn Traglastangriffspunkt und Endeffektor vertikal nicht fluchten. Traglast von Gelenkarmrobotern: 2...1000 Kilogramm je nach Roboterbauart.
- **Kinematik:** Die Roboter-Kinematik setzt sich aus aufgabenspezifisch zu programmierenden Teilbewegungen der einzelnen Roboterarme (*Weg s*, *Geschwindigkeit v*, *Beschleunigung a*, *Zykluszeit t<sub>z</sub>*) zusammen. Sie hat folgende Ablaufkette: Startpunkt → Beschleunigungsphase → Bahngeschwindigkeit ( $v_{\max}$  ist last- und wegabhängig) → Bremsphase →  $v = 0$  an „Knickpunkten“ ( $v \neq 0$  beim „Überschleifen“). Die Größen  $v_{\max}$  (bis zu mehreren m/s) und  $a_{\max}$  (bis zu mehr als 10 m/s<sup>2</sup>) sowie  $t_z$  kennzeichnen die einzelnen Arbeitszyklen und damit auch die Wirtschaftlichkeit eines Robotersystems.
- **Funktionsgenauigkeit:** Ein Gütekriterium für die Roboterfunktion bei der „Teach-in-Bahnprogrammierung“ ist die Wiederholgenauigkeit. Sie kennzeichnet die Zielpunktabweichung  $\Delta s$  bei wiederholtem Anfahren. Typische Werte liegen zwischen  $\Delta s < \pm 0,02$  mm bei 10 kg Nennlast und  $\Delta s < \pm 0,2$  mm bei 150 kg Nennlast. Die Bahngenauigkeit ist die Istbahn-Sollbahn-Abweichung. Sie liegt bei Industrierobotern zwischen  $\pm 0,1$  und  $\pm 2$  mm.





**Abb. 8.16** Systemzusammenhang von Industrierobotern

Der Systemzusammenhang von Industrierobotern ist in zusammenfassender Darstellung in Abb. 8.16 wiedergegeben. Abbildung 8.16a illustriert in vereinfachter Form den Aufbau einer Roboterzelle, Abb. 8.16b zeigt den generellen Funktionsplan.

Die schematische Darstellung einer Roboterzelle in Abb. 8.16a zeigt, dass sich zwischen dem Roboter und dem Mensch als Operator der Robotersteuerung eine Sicherheitseinrichtung befindet. Die Europäische Union hat dafür mit der neuen Maschinenrichtlinie 2006/42/EG allgemeine Sicherheitsanforderungen festgelegt. In der Roboterproduktnorm DIN EN ISO 10218 sind rechtliche Rahmenbedingungen für eine Mensch-Roboter-Kooperation gegeben. Die Norm legt Anforderungen und Anleitungen für die inhärent

sichere Konstruktion, für Schutzmaßnahmen und die Benutzerinformation für Industrieroboter fest. Sie beschreibt grundlegende Gefährdungen in Verbindung mit Robotern und stellt Anforderungen, um die mit diesen Gefährdungen verbundenen Risiken zu beseitigen oder hinreichend zu verringern.

Neuere Entwicklungen der Robotik gehen dahin, „Assistenzroboter“ in einer Mensch-Maschine-Kooperation in Handhabungs- und Fertigungsprozesse direkt einzubeziehen. Assistenzroboter besitzen integrierte Gelenksensoren, so dass der Roboter mittels Sensorik die Annäherung eines Fremdobjekts oder eines Menschen rechtzeitig erkennt und seine Bewegung verlangsamt, stoppt, oder selbsttätig zurückführt. Somit wird ein gemeinsames Zusammenarbeiten mit dem Roboter in seiner unmittelbaren Nähe möglich. Alle Steuerkreise mit Funktionen für die Personen-Sicherheit werden redundant ausgelegt und überwacht, so dass auch bei einem technischen Fehler, zum Beispiel durch einen elektrischen Kurzschluss, die Arbeitssicherheit des Assistenzroboters gewährleistet ist.

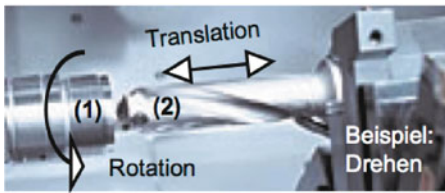


Produktion ist die Gesamtheit wirtschaftlicher, technologischer und organisatorischer Maßnahmen, die unmittelbar mit der Be- und Verarbeitung von Stoffen zusammenhängen. Hierbei verbindet die Güterproduktion Rohstoff-, Informations- und Energiemärkte miteinander und erzeugt daraus Produkte in lokalen, regionalen oder globalen Wertschöpfungsketten. Aufgabe der *Produktionstechnik* ist die Anwendung geeigneter Produktionsverfahren und Produktionsmittel zur Durchführung von Produktionsprozessen bei möglichst hoher Produktivität. Die Produktionstechnik gliedert sich in folgende Bereiche:

- Die *Produktionstechnologie* ist als Verfahrenskunde der Gütererzeugung die Lehre von der Umwandlung und Kombination von Produktionsfaktoren in Produktionsprozessen unter Nutzung materieller, energetischer und informationstechnischer Wirkflüsse.
- *Produktionsmittel* sind Anlagen, Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge und sonstige Produktionsgerätschaften. Für sie existiert eine spezielle Konstruktionslehre, gegliedert in den Entwurf von Universal-, Mehrzweck und Einzwecksystemen. Zur Produktionsmittelentwicklung gehört ferner die Erarbeitung geeigneter Programmiersysteme.
- Die *Produktionslogistik* umfasst alle Funktionen von Gütertransport und -lagerung im Wirkzusammenhang eines Produktionsbetriebes. Sie gliedert sich in die Bereiche Beschaffung, Produktion und Absatz.

Die Formgebung von Werkstoffen zu Bauteilen und ihre Kombination zu gebrauchsfertigen Gütern erfolgt durch *Fertigungstechnik* und *Montagetechnik*. Man kann abbildende, kinematische, fügende und beschichtende Formgebung sowie die Änderung von Stoffeigenschaften unterscheiden. Fertigungssysteme benötigen Relativbewegungen von Werkzeug und Werkstück und sind tribologische Systeme (siehe Abschn. 7.3). Eine stichwortartige Übersicht über die Fertigungsverfahren gibt Abb. 9.1.

Für die computerintegrierte Fertigung wurde die Bezeichnung CIM (computer-integrated manufacturing) geprägt: *CIM beschreibt den integrierten EDV-Einsatz in*



#### Fertigungsverfahren (DIN 8580, Beispiele)

- Urformen: Gießen, Pressformen
- Umformen: Walzen, Schmieden,
- Trennen: Drehen, Bohren, Fräsen, Schleifen,
- Fügen: Schweißen, Lötens, Kleben,
- Beschichten: Lackieren, Galvanisieren,
- Stoffeigenschaftsändern: Härten.

**Abb. 9.1** Übersicht über die Fertigungsverfahren

allen mit der Produktion zusammenhängenden Betriebsbereichen. Es umfasst das informationstechnische Zusammenwirken zwischen CAD (rechnergestützte Konstruktion), CAP (rechnergestützte Arbeitsplanung), CAM (rechnergestützte Fertigung), CAQ (rechnergestützte Qualitätssicherung) und PPS (Produktionsplanung und -steuerung) [AWF, Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung, 1985].

## 9.1 Mechatronik in Werkzeugmaschinen

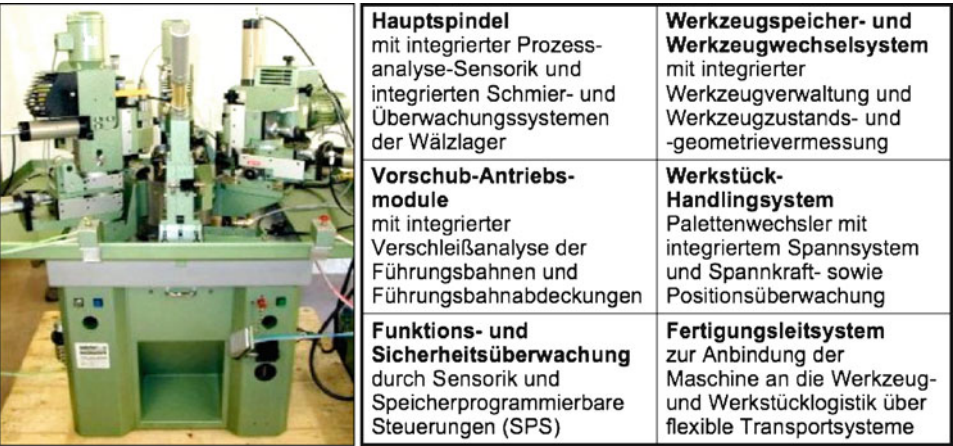
Die Formgebung in der Fertigungstechnik erfolgt mit Werkzeugmaschinen. Werkzeugmaschinen sind Arbeitsmaschinen zur spanenden oder spanlosen Formung von Gegenständen mittels Dreh-, Fräs-, Hobel-, Bohr-, Schleifmaschinen, Pressen, Scheren, Stanzen, Walzen, Maschinenhämmer. Man unterscheidet Einfachmaschinen oder Produktionsmaschinen für einen oder wenige Arbeitsgänge sowie Universalwerkzeugmaschinen für verschiedene Arbeitsgänge und Bearbeitungsarten. Bei Werkzeugmaschinen mit Programmsteuerung läuft eine Folge von Bearbeitungsvorgängen auch an verschiedenen Werkstücken selbsttätig ab. In Abb. 9.2 sind die Hauptbaugruppen von Werkzeugmaschinen zusammen mit typischen Werkzeugen dargestellt:

Werkzeugmaschinen sind mechatronische Systeme mit folgenden Haupt-Baugruppen:

- 1 Gestell/Fundament → Mechanik
- 2 Führungen → Mechanik/Tribologie/Robotik
- 3 Antrieb → Elektromechanik/Fluidik
- 4 Steuerung → Regelungstechnik/Informatik
- 5 Werkstückwechsler → Mechanik
- 6 Werkzeugwechsler → Aktorik
- 7 Messeinrichtungen → Sensorik
- 8 Ver- u. Entsorgung → Energetik/Schmierung
- 9 Sicherheitseinrichtungen → Sensorik/Aktorik

Man unterscheidet umformende, trennende, spanende, abtragende Werkzeugmaschinen.

**Abb. 9.2** Übersicht über die Baustruktur von Werkzeugmaschinen

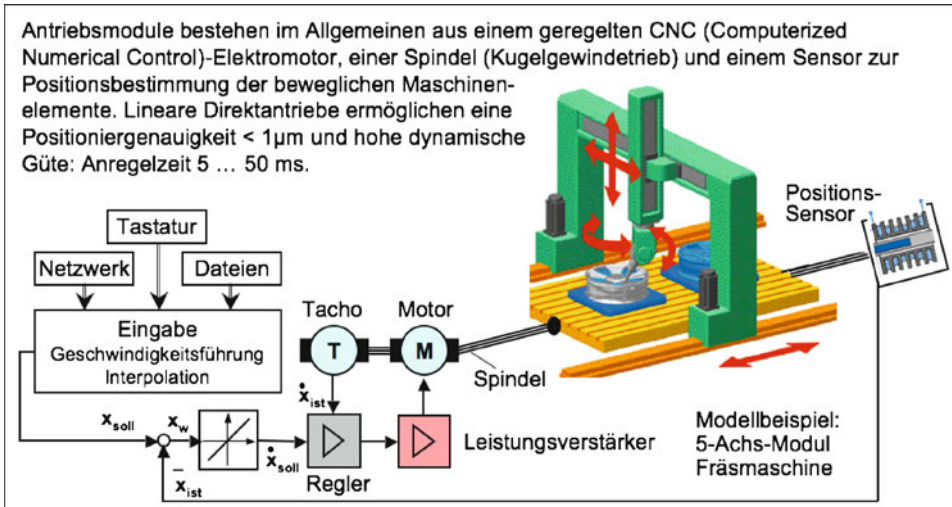


**Abb. 9.3**    Mechatronische Baugruppen von Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen sind heute mechatronische Systeme mit mechanischer Grundstruktur, elektro-mechanisch-fluidischen Antrieben, numerischer Steuerung, Sensorik, Aktorik, Prozessorik, Schmierstoff- und Energieversorgung sowie Sicherheitseinrichtungen. Werkzeugmaschinen haben viele mechatronische Module, teilweise in Form räumlich integrierter Sub-Systeme mit Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software. Einige in Werkzeugmaschinen übliche mechatronische Teilsysteme nennt Abb. 9.3.

Zur präzisen Werkstück-Formgebung dienen hochdynamische mechatronische Antriebsmodule, durch die Werkzeugmaschinenkomponenten, wie Tische, Schlitten oder Roboterarme angetrieben werden. Präzisionssensoren bestimmen die genaue Translations- oder Rotations-Position. Ist/Soll-Abweichungen werden in Echtzeit erfasst und einem Regelalgorithmus zugeführt, der geeignete Steuersignale für den Motor-Steller erzeugt. In Abb. 9.4 sind in vereinfachter Form für das mechatronische System eines Antriebsmoduls das Funktionsprinzip, der regelungstechnische Wirkplan und der prinzipielle Aufbau dargestellt.

Die Einführung der CNC-Technik (oder einfach NC-Technik) hat der Fertigungstechnik neue Möglichkeiten eröffnet. So lassen sich beispielsweise NC-Drehmaschinen in zwei Achsen frei programmieren: eine Achse für die Längenmaße (Koordinatenachse Z) und eine Achse für die Durchmessermaße (Koordinatenachse X). Dafür sind zwei Schlitten mit Kugelumlaufspindeln mit drehzahlgesteuerten Vorschubmotoren gekoppelt. Optoelektronische Sensorik ermittelt die Position der Schlitten für die Steuerung. Die Hauptspindel wird ebenfalls über einen drehzahlgesteuerten Antriebsmotor angetrieben, so dass für jeden Drehdurchmesser die optimale Schnittgeschwindigkeit am Drehmeißel vom CNC-Rechner eingeregelt werden kann. Die Kontur des Werkstücks wird in Koordinatentechnik programmiert. Jeder Punkt der Werkstückkontur des Drehteils wird im Koordinatensystem durch zwei Zahlen festgelegt: die X-Koordinate (Durchmesser) und



**Abb. 9.4** Mechatronischer Modul für Werkzeugmaschinen-Antriebe, Prinzipdarstellung

die Z-Koordinate (Länge). Mit den G-Befehlen ( $G = \text{go}$ ) wird die Art, wie das Werkzeug bewegt wird, festgesetzt, beispielsweise:  $G0$  – Werkzeugposition im Eilgang verändern,  $G1$  – Geradenverbindung,  $G2$  – Kreisverbindung im Uhrzeigersinn,  $G3$  – Kreisverbindung gegen den Uhrzeigersinn. Durch diese Kombination von NC-Steuermodulen mit mechatronischer Aktorik und Sensorik lassen sich komplizierte Bauteile, wie Dreh- oder Frästeile mittels Programmierung der geometrischen Informationen (Kontur des Werkstücks), der technologischen Informationen (z. B. Drehzahl, Vorschub) und der Werkzeuginformationen (z. B. Geometrie, Position) schnell und mit hoher Wiederholgenauigkeit fertigen.

## 9.2 Mikro-Produktionstechnologien

Neben der herkömmlichen Makro-Produktionstechnik mit Bauteilabmessungen vom mm- bis zum m-Bereich sind im Zuge der Miniaturisierung technischer Produkte neue Mikro-Produktionstechniken entwickelt worden. Die Mikrotechnik hat im Mikromaßstab mechanische, elektronische, fluidische und optische Funktionselemente herzustellen, zu integrieren und in großen Stückzahlen zu fertigen. Diese Strukturen sind in aller Regel aber nicht wie elektronische Schaltkreise planar aufgebaut, sondern wie auch im Makromaßstab dreidimensional – wie z. B. miniaturisierte Motoren, Mini-Schwingkörper, Mikro-Optik oder die in Kap. 8 behandelten MEMS- und MOEMS-Systeme. Die Mikro-Produktionstechnik muss dafür eine große Vielfalt von Materialien strukturieren: von Metallen und Legierungen über keramische Werkstoffe und Glas bis hin zu den Kunststoffen und den Partikel-, Faser- und Schichtverbundwerkstoffen. Für die Mikro-Produktionstechniken wird natürlich auch die Mechatronik eingesetzt –

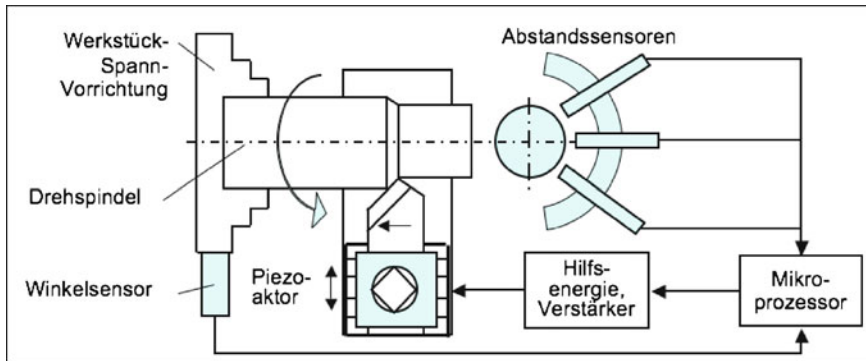
**Tab. 9.1** Übersicht über Fertigungstechnologien der Makro-, Mikro- und Nanotechnik

Fertigungs- verfahren	Makrotechnik	Mikrotechnik	Nanotechnik
<b>Trennen</b>	Formänderung fester Körper durch Zerteilen, Zerlegen, Abtragen oder Zerspanen, z.B. Bohren, Drehen, Fräsen, Schleifen	<b>Subtraktiv-Techniken</b> • Mikro-Zerspanen mit Formdiamanten • Ätztechniken • Funkenerosion • Laser-Mikroablation	<b>Additiv-Techniken</b> „Nano-Fertigen“ von Stoffen aus Atomen/ Molekülen unter Anwendung der Nano-Positionierungstechnik
<b>Urformen</b>	Fertigen fester Körper aus formlosem Stoff	<b>Mikro-Formtechniken</b> • Abformverfahren • Heißprägen • Spritzgussverfahren	
<b>Umformen</b>	Formänderung bei Erhaltung von Masse und Kohäsion		
<b>Fügen</b>	Dauerhaftes Zusammenbringen von Werkstücken oder mit formlosen Stoff	<b>Aufbau- und Verbindungstechniken</b> • Laserstrahlfügen • Elektronenstrahlschweißen • Bonden • Löten • Kleben	
<b>Beschichten</b>	Aufbringen von fest haftenden Schichten aus formlosem Stoff auf Werkstücke, z.B.Galvanik, Emaillieren	<b>Dünnschichttechniken</b> • Aufdampfen • Sputtern • Physical Vapor Deposition • Chemical Vapor Deposition	
<b>Stoffeigen- schafts- ändern</b>	Fertigen fester Körper durch Umlagem, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen	<b>Lithographie, LIGA-Technik:</b> • Lithographie + Galvanoformung + Abformung	

z. B. zur Positionierung von „Laser-Werkzeugen“, zur Prozessführung von PVD- und CVD-Dünnschichttechniken oder als „Stepper-Aktorik“ für die Lithographie. Die Anwendungen der Mechatronik richten sich dabei nach den jeweiligen Fertigungstechnologien, die in einer Analogiebetrachtung für die verschiedenen Dimensionsbereiche in Tab. 9.1 zusammengestellt sind.

**Subtraktiv-Techniken**

**Mikro-Zerspanen** mit Formdiamanten: Durch die Kombination konventioneller mechanischen Fertigungsverfahren mit Elektronik und Informatik sind heute computergesteuerte Fräs-, Bohr- und Drehmaschinen in der Lage Mikrostrukturen zu erzeugen. Diese Techniken sind in den letzten Jahren so stark verbessert und verfeinert worden, dass zum Beispiel Löcher mit 50 µm Durchmesser gebohrt werden können. Um mikroskopisch exakte Strukturen herzustellen, bedient man sich heute Formdiamanten, die von ultrapräzisen Führungen für Rotation und Vorschub positioniert werden. Besonders das Stirn-, Finger- und Umfangsfräsen sind Bearbeitungsformen aus der Feinmechanik, die auch in der Mikrotechnik angewendet werden können. Mit Mitteln der Mechatronik sind auch Hochpräzisionsdrehvorrichtungen entwickelt worden. Einen mechatronischen Präzisionsmodul für Werkzeugmaschinen, der zur dynamischen Rundlauf-Korrektur von Drehmaschinen eingesetzt werden kann, zeigt Abb. 9.5. Die mit Abstandssensoren erfassten Lageabweichungssignale werden über einen Mikroprozessor (µP) in Korrektur-Stellsignale eines Piezo-Aktors zu Verbesserung der Werkstückrundheit überführt.



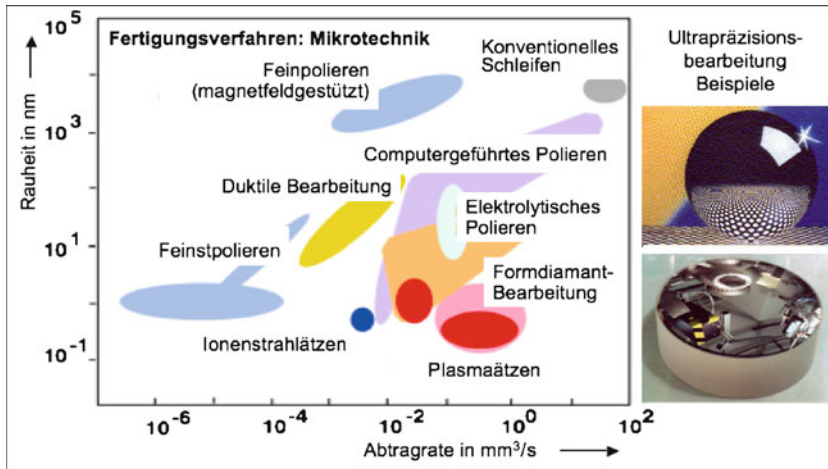
**Abb. 9.5** Mechatronischer Modul für eine Hochpräzisionsdrehvorrichtung

**Ätztechniken** Für die Mikro-Mechanik können durch Nass- oder Trockenätzprozesse Bauelemente, z. B. aus Silizium strukturiert werden. Die Form der geätzten Bereiche kann sehr unterschiedlich sein. So richten sich einige Ätzprozesse nach der Ausrichtung der Kristallstruktur relativ zur Oberfläche. Andere Prozesse ätzen das Siliziummaterial nicht nur in die Tiefe, sondern auch lateral. Dies ermöglicht beispielsweise die Realisierung von dünnen Brückenstrukturen für statische oder dynamische Biegebalken, wie z. B. in Beschleunigungs- oder Drucksensoren, siehe Abschn. 9.3.

**Funkenerosion** Hierbei wird zwischen einer Bearbeitungselektrode und dem Werkstück, die sich beide in einer elektrisch isolierenden Flüssigkeit befinden, eine Spannung angelegt. Nähert man die Elektrode dem Werkstück, so kommt es zu Funkenüberschlägen. Diese führen zu einem Materialabtrag am Werkstück. Die entstandene Vergrößerung des Abstandes wird durch den Vorschub der Elektrode ausgeglichen. Diese Senkerosion lässt sich vergleichen mit dem Eindringen eines heißen Stempels in einen Eisblock. Die Draht-erosion, bei der man einen dünnen Metalledraht (oft nur wenige 10 µm dünn) als Elektrode wählt, gleicht eher einem „Laubsägeprozess“. Auf diese Weise sind z. B. Stahlrohlinge sehr präzise mikrostrukturierbar.

**Laser-Mikroablation** Auch Laserstrahlung lässt sich zur Mikrostrukturierung nutzen. UV-Pulse hoher Energie, produziert von Excimerlasern, können z. B. dazu benutzt werden, Materie zu verdampfen. Dazu wählt man meist ein Direktschreibverfahren, das auf einer Bewegung des Werkstücks relativ zum Laserstrahl beruht. So können je nach Anzahl der deponierten Pulse flachere oder tiefere Abtragsmuster nebeneinander mit Mikrometerpräzision produziert werden. Mit Laserstrahlen anderer Wellenlänge können winzige Schweißpunkte und -nähte erzeugt werden, mit denen Mikrosysteme aufgebaut oder abgedichtet werden können. Bei Verwendung spezieller Gase in der Bearbeitungskammer kann mit fokussierten Laserstrahlen eine Materialabscheidung und damit der Aufbau filigraner Mikrostrukturen erreicht werden. Eine Übersicht über Subtraktivverfahren der





**Abb. 9.6** Kennfelder der Methoden der Mikro-Produktionstechnik (Subtraktivverfahren)

Mikro-Produktionstechnik mit den erzielbaren Oberflächengüten und zugehörigen Abtragsraten der einzelnen Verfahren gibt Abb. 9.6.

### Mikro-Formtechniken

**Abformverfahren** beruhen darauf, dass die Form eines Werkzeugs (Formwerkzeug, Master) einem weichen Material mechanisch eingepreßt wird. Industriell lassen sich am einfachsten Kunststoffe abformen, vor allem Thermoplaste, die beim Erwärmen schmelzen, dabei chemisch stabil bleiben und nach dem Abkühlen ihre vorherigen Eigenschaften beibehalten.

**Heißprägen** liefert ein getreues Formnegativ des Metall-Masters. Bekannte Anwendungen dieser Mikro-Formtechnik sind beispielsweise miniaturisierte Tripelspiegel als Reflexfolien für Fahrzeuge, Fahrbahnbegrenzungen und Sicherheitskleidung. Abformverfahren sind nicht auf Kunststoffe beschränkt. Keramische Mikrostrukturen können dadurch hergestellt werden, dass ein Schlicker, eine Aufschlämmung von feinem keramischen Pulver in Wasser, in eine Kunststoffmikrostruktur einfüllt, getrocknet und in einem Ofen erhitzt wird. Dabei verfestigt sich die Keramik, die Kunststoffform verbrennt und die entstandene keramische Mikrostruktur wird bei noch höheren Temperaturen gesintert und verfestigt.

**Spritzgussverfahren** sind bezüglich Formenvielfalt und Materialien sehr vielfältig. Die Ausgangsmaterialien (Kunststoffgranulat, Keramik/Metallpulver mit Kunststoff als Binder) werden in einer Spritzgussmaschine kontinuierlich aus einem Vorratsbehälter in eine Heizkammer transportiert, dort aufgeschmolzen und von einer Transportschnecke unter hohem Druck weiterbefördert. Bei Öffnung eines Düsenventils wird die heiße Schmelze

in einen Werkzeughohlraum (Formnest) hineingepresst, der das Negativ des gewünschten Formteils darstellt. In diesem Hohlraum erkaltet der Kunststoff, so dass der erstarrte Anguss entnommen werden kann (Entformen). Da für Mikrospritzgussteile dünnflüssige Schmelzen verwendet werden müssen, können in den Werkzeugen keine Luftauslassungen vorgesehen werden, und das Formnest wird vor dem Einspritzen leer gepumpt. Mikrostrukturen haben ein hohes Oberfläche-Volumen-Verhältnis. Der Schmelze/Formnest-Kontakt entzieht der heißen Schmelze rasch Wärme, so dass sie aktivem Heizen/Abkühlen gearbeitet wird. Die Anwendungen der Spritzgussverfahren sind außerordentlich vielfältig. Beispielsweise ermöglichen sie mit Taktraten von zehn Sekunden die effiziente Herstellung von Compact Discs (CDs) für die mechatronischen Systeme der CD/DVD-Player (siehe Kap. 11).

### **Aufbau- und Verbindungstechniken**

Die geringen Bauteilabmessungen der Mikrotechnik machen den Einsatz miniaturisierter Aufbau- und Verbindungstechniken durch Kraft-, Form- oder Stoffschluss erforderlich. Folgende Fügeverfahren werden in der Elektronik und Feinwerktechnik eingesetzt: *Laserstrahlfügen, Elektronenstrahlschweißen, Bonden, Löten, Kleben*.

**Laserstrahlfügen** befasst sich mit laserbasierten Technologien wie Schweißen und Löten zur Verbindung metallischer elektrotechnischer und feinwerktechnischer Komponenten. Durch die Einbeziehung neuer Werkstoffkombinationen, insbesondere von Verbindungen wie Glas/Kunststoff, Silizium/Metall, wird neuen Aufgabenstellungen in der Mikrotechnik Rechnung getragen. Durch die steigenden Anforderungen an Miniaturisierung der Fügestelle, Verringerung der thermomechanischen Belastung und Erhöhung der Sauberkeit des Fügeprozesses liegt der Schwerpunkt der Entwicklung auf neuen Strahlquellen mit höherer Strahlqualität und alternativen Prozessführungen. Dabei werden fasergekoppelte Nd:YAG-Laser, Faserlaser und Diodenlaser betrachtet, Grundlagen siehe Abschn. 3.3. Verfahrenstechnisch wichtige Aspekte sind die Strahlquellencharakterisierung und Methoden zur Prozessüberwachung zum Schweißen und Löten. Die Anwendungsfelder erstrecken sich von der Automobilzulieferindustrie bis zur Medizintechnik.

**Elektronenstrahlschweißen** Beim Elektronenstrahlschweißen wird die benötigte Energie von durch Hochspannung beschleunigten Elektronen in die Prozesszone eingebracht. Der Schweißvorgang wird zumeist im Vakuum ausgeführt, es gibt jedoch auch Systeme, die in der Atmosphäre arbeiten. Das Elektronenstrahlschweißen ermöglicht hohe Schweißgeschwindigkeiten, aber auch tiefe und schmale Schweißnähte. Es sind auch sehr kleine Schweißnähte möglich, da der Elektronenstrahl durch angelegte elektrische Felder exakt abgelenkt werden kann. Die hohe Energiedichte erlaubt das Verschweißen aller, auch höchstschmelzender Metalle sowie die Herstellung von Mischverbindungen durch das Verschweißen verschiedener Werkstoffe. Wichtig für die Verfahrenstechnik ist die Konstruktion der Elektronenstrahlquelle, die aufgrund ihres extrem feinen Strahles bei

mehreren hundert Watt Leistung neben der reinen Füge-technik auch Materialbearbeitung und -abtrag realisieren kann.

**Bonden** kennzeichnet Mikrotechnologien zum Verbinden von Halbleiterbauelementen (Dioden, Transistoren, integrierte Schaltungen, etc.) oder von Schaltkreisen in Hybridschaltungen durch Thermokompressionsschweißen (Thermokompressions-Bonden) oder Ultraschallschweißen (Ultraschall-Bonden). Das Waferbonden ist ein Verfahrensschritt in der Halbleitertechnologie und Mikrosystemtechnik, bei dem zwei Wafer oder Scheiben (Silizium, Quarz, Glas) miteinander verbunden werden. Weitere Bondverfahren sind das Silizium-Direkt-Bonden, das Anodische Bonden, das eutektische Bonden, das Glas-Frit-Bonden sowie adhäsive Bondverfahren. Die Verfahrenstechnologie erfordert das abgestimmte Zusammenwirken von Werkstoffen, Werkzeugen und Equipment. Eine wichtige Rolle spielen dabei die entsprechenden Prüfverfahren (visuelle und mechanische Tests) bis hin zur Werkstoffanalytik.

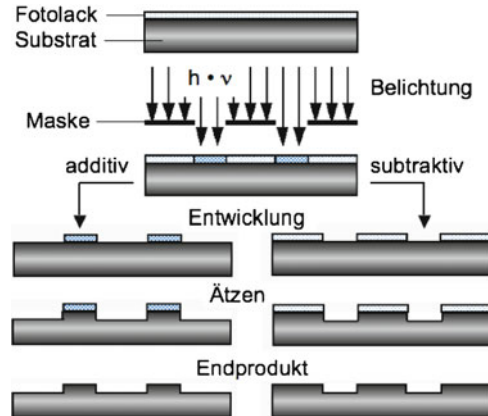
**Löten** gehört in der Industrie zu den am weitesten verbreiteten Aufbau- und Verbindungstechniken und wird zum Montieren von elektronischen Baugruppen auf Leiterplatten in allen erdenklichen Bereichen genutzt. Zum Löten werden die bestückten Leiterplatten über eine breite Lötwellen geführt (Wellenlöten) oder als ganzes in einem „Reflow-Prozess“ erwärmt. Der Reflow-Prozess bezeichnet ein in der Elektrotechnik gängiges Weichlötverfahren zum Löten von SMD-Bauteilen (*Surface Mounted Devices*). Bei der Herstellung von Dickschicht-Hybridschaltungen ist es das häufigste Lötverfahren. Das Laserstrahl-löten ist ein selektives Verfahren und wird in der Elektronikproduktion unter anderem zum Löten von Kontakten, Sensoren und Schaltern sowie zur Nachbestückung von Leiterplatten angewendet. Es zeichnet sich gegenüber konventionellen Lötverfahren durch einen berührungslos arbeitenden Prozess mit lokal begrenzter Wärmeeinbringung aus. Die genaue Dosierung der eingebrachten Energie und die gute Zugänglichkeit auch bei schwierigen Geometrien sind weitere Vorteile.

**Kleben** erlangt eine immer größere Bedeutung bei der Fertigung von hybriden Mikrosystemen. Gründe hierfür sind die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffpaarungen ohne thermischen Verzug mit ausreichender Festigkeit und guten dynamischen Eigenschaften zu verbinden. Weiterhin können Klebstoffe eine elektrische und thermische Leitfähigkeit, optische Transparenz oder eine entsprechende Isolation übernehmen. Gründe, die einen noch stärkeren Einsatz des Klebens in der Mikrosystemtechnik verhindern, liegen in den Eigenschaften derzeit eingesetzter viskoser Klebstoffe.

### **Dünnschichttechniken**

**Physikalische Gasphasenabscheidung (Physical Vapour Deposition, PVD)** Erzeugung gleichmäßig dünner Schichten eines Materials dadurch, dass dieses bis zum Verdampfen erhitzt und das zu beschichtende, kühlere Substrat in die Nähe der Dampfquelle gebracht wird. Auf dem Substrat schlägt sich dann eine dünne Schicht des Materials nieder.

**Abb. 9.7** Das Prinzip der Fotolithografie



**Sputtern** Kathodenzerstäubungs-PVD-Verfahren, bei dem das zu beschichtende Substrat als Anode und das Beschichtungsmaterial als Kathode in einem Prozessreaktor angeordnet sind. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung wird die Atmosphäre im Reaktor (z. B. Argon) teilweise ionisiert. Die entstandenen Ionen werden durch das Spannungsgefälle zur Kathode (Target) hin beschleunigt und schlagen kontinuierlich Atome des Targetmaterials heraus, welche dann auf die Substrate treffen und sich dort niederschlagen. Je nach Zusammensetzung des zu ionisierenden Gases wird dieses mit in die entstehende Schicht eingebaut oder dient nur als Energieüberträger.

**Chemische Gasphasenabscheidung (Chemical Vapour Deposition, CVD)** Chemische Reaktion des Prozessgases an der Substratoberfläche. Da dies in der Regel in einem Prozessgas geringen Drucks stattfindet, spricht man von LPCVD (Low Pressure CVD). Die Reaktion kann durch eine erhöhte Temperatur (einige hundert Grad Celsius) und eine gewisse katalytische Eigenschaft des Substrates selbst ausgelöst werden. Oft müssen solche Beschichtungen aber auch bei relativ niedrigen Temperaturen durchgeführt werden. Dann wird das Prozessgas durch eine Plasmaentladung teilweise ionisiert, wodurch sich auch reaktive Molekülbruchstücke bilden, die dann mit der Substratoberfläche reagieren können. In diesem Fall spricht man von Plasmaunterstützter CVD (Plasma Enhanced CVD, PECVD).

### Lithographie

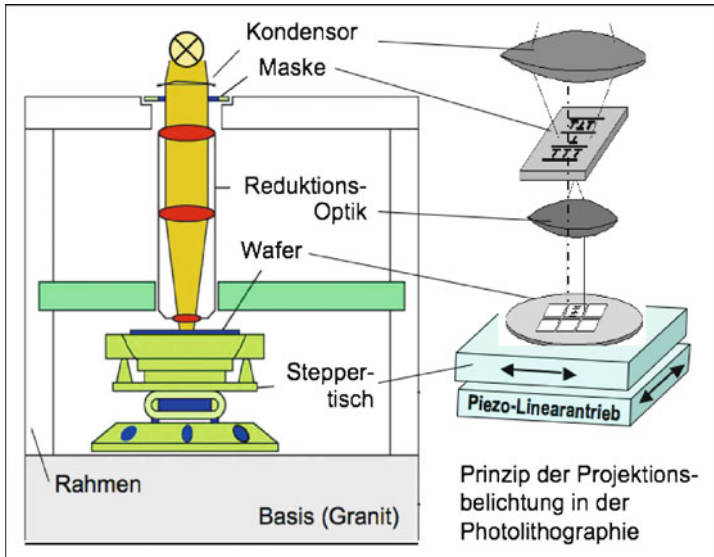
Die Fotolithografie ist eine Produktionstechnologie zur Herstellung dreidimensionaler Mikrostrukturen. Die Strukturinformation für das Bauteil wird durch Belichtung verkleinert (z. B. 5 : 1) von einer Fotomaske latent in ein mit einem Fotolack überzogenes Bauteil-Substrat übertragen. Nach Entwicklung des latenten Bildes können mittels Ätzen die Strukturinformationen in das Substrat eingeprägt und additive oder subtraktive Bauteilstrukturen erzeugt werden. Abbildung 9.7 illustriert das Prinzip der Fotolithografie und die Prozessschritte.

Für die Mikro-Elektronik und ihre funktionale Integration zu Schaltkreisen hoher Komplexität mittels Parallelfertigungsmethoden – bei denen viele Bauelemente auf demselben Träger gleichzeitig einem Herstellungsschritt unterworfen werden – müssen strukturierte Siliziumplättchen (Chips) in großen Stückzahlen hergestellt werden. Das Siliziumrohsubstrat (Wafer) wird mit einer dünnen Fotolackschicht bedeckt und diese durch eine Maske mit UV-Licht bestrahlt. Die Maske besteht aus einem UV-durchlässigen Träger (z. B. Quarzglas) und UV-undurchlässigen Strukturen (z. B. Chrom). Je nachdem, ob ein Positiv- oder Negativlack benutzt wird, werden die durch die Strahlung veränderten oder unveränderten Bereiche des Lackes chemisch entfernt. Sie können anschließend einem Ätz-, Aufdampf- oder Ionenimplantationsschritt ausgesetzt werden. So kann man die Materialeigenschaften der freigelegten Bereiche gezielt verändern: Leiterbahnen oder Isolationsschichten können erzeugt oder p- bzw. n-Dotierungen eingebracht werden. Für komplexere Schaltungen können sich diese Vorgänge mehrfach wiederholen. Die Maske selbst muss einmal mit mechatronischer Positionierung direkt geschrieben werden. Dazu dient ein Elektronenstrahlschreiber, der einen fein gebündelten Strahl von Elektronen erzeugt, mit dem eine sensitive Lackschicht beschrieben wird. Die mit dieser Maske durchgeführte UV-Lithographie wird im Auflösungsvermögen durch die UV-Wellenlänge beschränkt.

Da die Abbildung einer Maske nicht den ganzen Wafer abdecken kann, werden die Wafer mittels Präzisionsantriebe (z. B. Piezo-Linearantriebe) verfahren und so positioniert, dass die Maskenabbildungen auf einem Raster mit engen Toleranzen liegen (*Step-and-Repeat-Verfahren* mit *Wafer-Steppern*), siehe Abb. 9.8. Es lassen sich bei Verwendung von Optiken aus Quarz Auflösungen von etwa 100 nm mit Quecksilberhochdrucklampen ( $\lambda = 365$  nm, I-Linie) und mit Excimerlasern ( $\lambda = 193$  nm) auch darunter herstellen. Neuerdings können mit der *Extreme Ultra Violet Lithography EUVL* ( $\lambda = 13$  nm, Hochvakuum) unter Verwendung von Spiegeloptik, da Linsensysteme im EUVL-Wellenlängenbereich nicht mehr transparent sind, Strukturen im Dimensionsbereich von 30 nm erzeugt werden.

### LIGA-Technik

Das Verfahren besteht aus den Hauptschritten Lithographie, Galvanoformung und Abformung. Für eine dreidimensionale Struktur wird beim Lithographieschritt eine bis zu 1 mm dicke Fotolackschicht (Resist) ausgeformt. Um eine solche Schichtdicke durchstrahlen und chemisch verändern zu können, benutzt man vorzugsweise Synchrotronstrahlung (Röntgenlicht mit typischerweise 1 nm Wellenlänge) geringer Divergenz (Streuung) und hoher Intensität. Nach dem Entwickeln dient die elektrisch leitfähige Trägerplatte in einem Galvanikbad als Kathode. Dies führt dazu, dass die Zwischenräume des Fotolackreliefs sich mit Metall füllen und eine metallene Komplementärstruktur entsteht. Diese wird von den Lackresten befreit und kann nun in einem Prägewerkzeug oder einer Spritzgussmaschine als Urform (Master) zum massenhaften Übertragen der Präzisionsstrukturen in Kunststoffprodukte benutzt werden. Das Verfahren ist auf Massenprodukte aus Metallen, Legierungen und keramischen Werkstoffen erweiterbar.



**Abb. 9.8** Aufbau und Funktion der Gerätetechnik für die Lithographie

### Nanotechnik

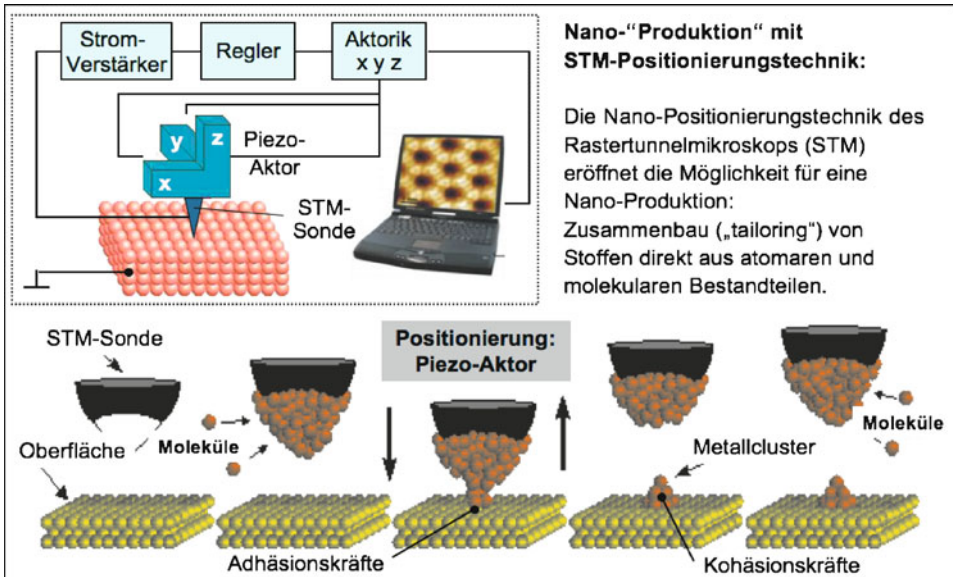
Ganz neue Möglichkeiten einer „Nano-Produktionstechnik“ eröffnen die Nano-Piezo-Steller der Rastertunnelmikroskopie (vgl. Abb. 8.5). Im Unterschied zu der stets aus „Vollmaterial“ arbeitenden spanenden Fertigung können in „Additiv-Technik“ Stoffe aus elementaren atomar/molekularen Bausteinen synthetisiert werden, siehe Abb. 9.9.

## 9.3 Mikrotechnologien für Sensoren und Aktoren

Von den dargestellten Mikrotechnologien haben für die Mechatronik die Herstellungstechnologien für Mikrosensoren (siehe Abschn. 5.9) und Mikroaktoren (siehe Abschn. 6.8) die größte Bedeutung. Die Herstellung von Mikrosensoren beruht weitgehend auf Techniken, die von der Mikroelektronik her bekannt sind, wobei allerdings Planartechniken häufig zu dreidimensionalen Herstellungstechnologien erweitert werden müssen. Grundlegende Prozessschritte sind: (a) Bereitstellung geeigneter Substrate: Keramiken, Halbleiter, Piezoelektrika, (b) Abscheidung von Schichten, (c) Strukturübertragung von computergestützten Entwurfsdateien auf Wafer (Lithographie), (d) Entfernung von Schichten: Nassätzen in Ätzlösungen, Trockenätzen durch Beschuss mit physikalisch oder chemisch ätzenden Teilchen, (e) Modifikation von Schichten, z. B. Oxidation, Dotieren.

Bei der *Dickschichttechnik* wird eine Paste durch ein Sieb auf das Substrat (häufig Aluminiumdioxid,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) gedrückt, getrocknet und eingebrannt. Die damit herstellbaren





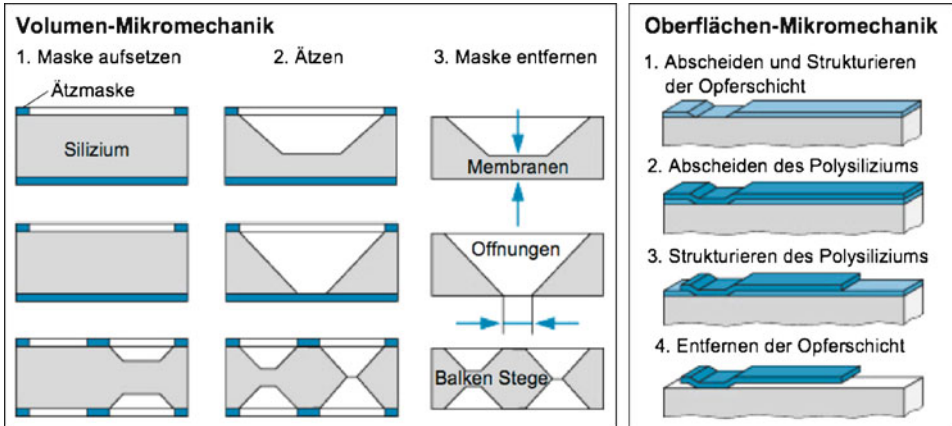
**Abb. 9.9** Prinzip einer Nano-Produktionstechnik

Strukturen sind typisch  $10\mu\text{m}$  dick und  $100\mu\text{m}$  breit. Damit können zahlreiche sensorische Funktionen im mikrotechnischen Maßstab realisiert werden, z. B.

- Piezoresistive Drucksensoren, verwirklicht mit  $\text{Bi}_2\text{Ru}_{20}$
- Widerstandsthermometer mit Pasten aus Pt oder Ni
- Thermoelemente aus Au/PtAu
- NTC-Tempersensoren aus  $\text{MnO}$  oder  $\text{RuO}_2$
- Gassensoren aus  $\text{SnO}_2$ .

Bei der *Dünnschichttechnik* werden Schichten mit Dicken  $< 1\mu\text{m}$  auf das Substrat aufgebracht und strukturiert. Das am häufigsten benutzte Substrat ist einkristallines Silizium (Si), das über zahlreiche Sensoreffekte verfügt, sowie Glas, Quarz und einkristallines Siliziumdioxid,  $\text{SiO}_2$ . Der elektrische Widerstand von Silizium ist als Sensor-Ausgangsgröße eine Funktion von mechanischer Beanspruchung (Piezowiderstandseffekt), Magnetfeld (Hall-Effekt), Lichteinstrahlung (innerer lichtelektrischer Effekt), Temperatur (Thermowiderstandseffekt). Alternativ werden häufig Dünnschicht-Materialien mit sensorischen Eigenschaften auf einem Substrat abgeschieden und damit beispielsweise folgende Mikrosensoren realisiert:

- mechanische Sensoren: Zinkoxid oder andere Piezoelektrika,
- Widerstandsthermometer: Pt oder Ni,
- Fotowiderstände: Cadmiumsulfid,



**Abb. 9.10** Technologien zur Herstellung mikromechanischer Bauelemente aus Halbleitern

- Magnetfeldsensoren: Ferromagnetika,
- Gassensoren: Metalloxide, wie  $\text{SnO}_2$ .

Das Schichtwachstum geht entweder auf physikalische Effekte wie Kondensation oder auf chemische Reaktionen zurück und wird in der Regel im Vakuum durchgeführt: physikalische bzw. chemische Dampfabcheidung (physical vapor deposition PVD bzw. chemical vapor deposition CVD).

Mikroaktoren für Mikro-Bewegungsvorgänge oder die Positionierung informationstragender optischer Strahlung erfordern miniaturisierte Bauelemente, die mechanisch beweglich sind. Mikromembranen, Mikrobiegebalken und ähnliche Elemente lassen sich durch die in Abb. 9.10 in vereinfachter Weise erläuterten Technologien herstellen.

Die Mikromechanik-Technologien haben folgende Verfahrensschritte und Resultate:

- Volumenmikromechanik: Strukturierendes Ätzen eines Siliziumsubstrates in den nicht durch eine Ätzmaske abgedeckten Bereichen zur Realisierung von Membranen, Öffnungen, Balken und Stegen mit Abmessungen von 5–50  $\mu\text{m}$ .
- Oberflächenmikromechanik: Realisierung von Mikrostrukturen durch Abscheiden und Strukturieren einer Opferschicht, Abscheiden und Strukturieren des Sensormaterials (Polysilizium), Entfernen der Opferschicht.

Anwendungsbeispiele dieser Technologien in der Mikrosensorik und in der Mikroaktuatorik sind in den Abschn. 5.9 und 6.8 mit charakteristischen Beispielen dargestellt.

Die mechatronische Gerätetechnik hat sich aus der *Feinwerktechnik* entwickelt, die im internationalen Sprachgebrauch als *Precision Engineering* bezeichnet wird und bereits vor Begründung der Mechatronik eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft mit der Kombination *Feinmechanik – Optik – Elektrik* war. Die mechatronische Gerätetechnik wird einleitend in Abb. 10.1 am Beispiel eines Fahrscheinautomaten – einem technischen System der Verkehrsinfrastruktur – illustriert, das sämtliche Merkmale mechatronischer Systeme gerätetechnisch konkretisiert: Mechanik – Elektronik – Informatik – Optik + Sensorik – Prozessorik – Aktorik + Information – Stoff – Energiefluss. Die Abb. 10.2 zeigt den Fahrscheinautomaten auf der U-Bahnstation bei der Beuth Hochschule für Technik in Berlin.

---

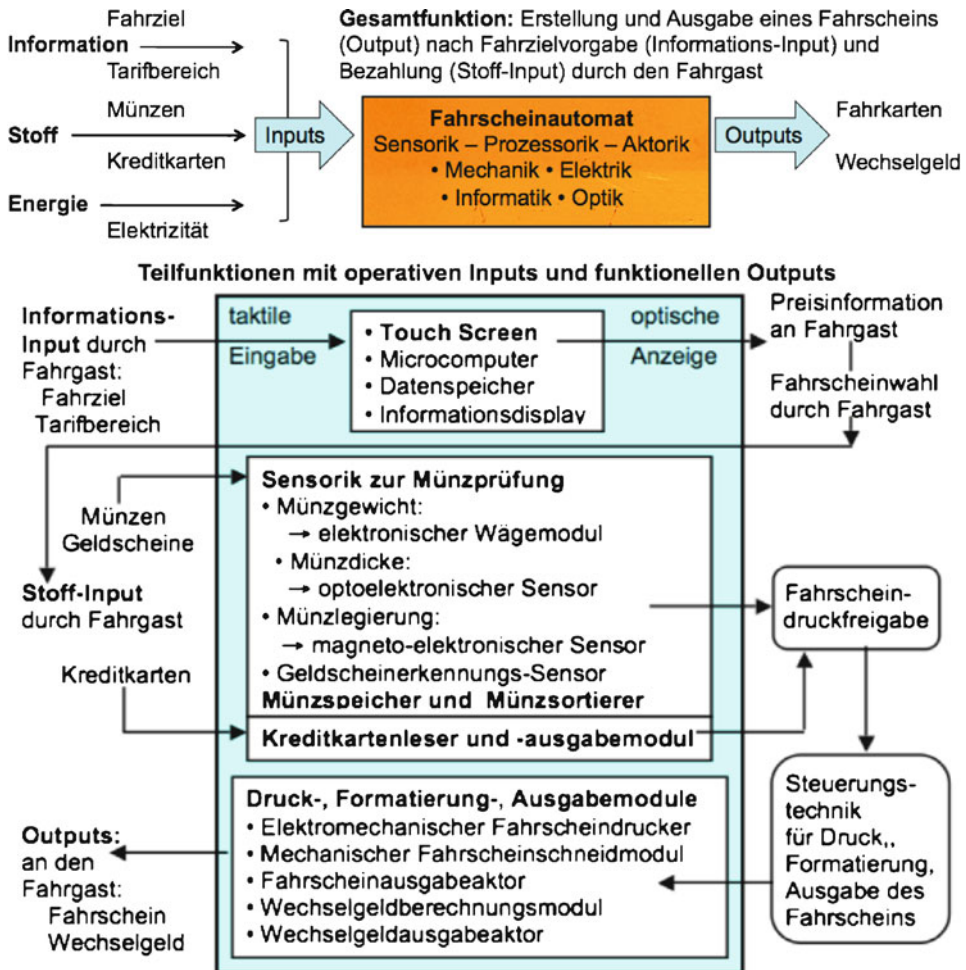
## 10.1 Mikrosystemtechnik

Mikrosysteme vereinen mit Bauteilabmessungen im mm/ $\mu$ m-Bereich Funktionalitäten aus Mikromechanik, Mikrofluidik, Mikrooptik, Mikromagnetik, Mikroelektronik mit Bauteilen und Modulen, die durch Mikro-Produktionstechnologien und miniaturisierte Aufbau- und Verbindungstechnik erstellt werden. Abbildung 10.3 zeigt eine Übersicht.

In Abb. 10.3a sind die für die Mikrosystemtechnik erforderlichen Mikro-Produktionstechnologien sowie die Aufbau- und Verbindungstechniken zusammengestellt. Die Abb. 10.3b nennt die grundlegenden Module mechatronischer Mikrosysteme:

- Struktur- und Funktionskomponenten,
- Mikroaktuatorik,
- Mikroprozessorik,
- Mikrosensorik.

Das Zusammenwirken von Sensorik, Aktorik und Prozessorik in mechatronischen Systemen wurde in Abschn. 6.6.1 behandelt und das Prinzip der Vernetzung von Sensorik und

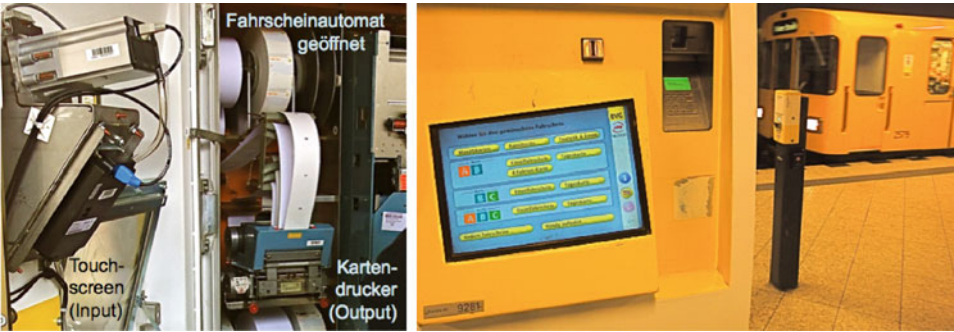


**Abb. 10.1** Fahrscheinautomat als charakteristisches mechatronisches Gerät

Aktorik in der Mikrosystemtechnik in Abb. 6.22 illustriert. Typische Beispiele miniaturisierter Systeme sind in Abb. 10.3c dargestellt:

- Miniaturmotor (MEMS, Micro Electro-Mechanical System),
- Lichtmodulator (MOEMS, Micro Opto-Electrical-Mechanical System),
- Computer-Festplatten-Magnetkopf (HDD, Hard Disc Drive).

Alle in Abb. 10.3 genannten Teilaspekte mechatronischer Systeme der Mikrosystemtechnik sind in den in Klammern genannten Kapiteln dieses Buches behandelt.



**Abb. 10.2** Fahrkarteautomat als Teil der Verkehrsinfrastruktur. Dieses mechatronische Gerät steht allein in Berlin mehr als 700-mal und liefert im Dialogbetrieb mit Fahrgästen von S-Bahn, U-Bahn und Bussen täglich viele Tausend fahrgastspezifisch ausgestellte Fahrkarten



**Abb. 10.3** Mechatronik in der Mikrosystemtechnik: die grundlegenden Module (**b**) und Technologien (**a**)



## 10.2 Mechatronisches Gerät Waage

Waagen sind klassische mechanische Systeme zur Bestimmung der Masse von Objekten aller Art. Die Wägetechnik hat dementsprechend eine große Bedeutung für Technik, Wirtschaft und die Erfordernisse des täglichen Lebens: von der Mengenbestimmung von Lebensmitteln und Konsumgütern über die Kennzeichnung des Gewichts von Transportbehältern und Postgut bis zur Dosierung von Arzneimitteln.



### Physik der Wägetechnik

- **Masse:** Die Masse  $m$  beschreibt die Eigenschaft eines Körpers, die sich sowohl in Trägheitswirkungen gegenüber der Änderung seines Bewegungszustands als auch in der Anziehung auf andere Körper äußert. Die Masse ist eine Basiseinheit des Internationalen Einheitensystems (SI).
- **Kraft:** Ein Newton (N) ist die Kraft, die notwendig ist, um einer Masse von 1 kg eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  zu erteilen.
- Die Schwerkraft (Gewichts-Kraft) ist abhängig von: Masse  $m$ , Erdbeschleunigung  $g_{\text{loc}}$ , Dichte von Luft  $\rho_L$  und Körper  $\rho_K$  am Ort des Körpers  $\rightarrow F = m \cdot g_{\text{loc}} \cdot (1 - \rho_L / \rho_K)$ . In der Metrologie wird durch diese Definition die Krafteinheit (N) auf die Einheiten Masse (kg), Länge (m), Zeit (s) des SI-Systems zurückgeführt.
- **Waage:** Messgerät, das die Masse eines Körpers durch die Einwirkung der Schwerkraft auf diesen Körper ermittelt. Der Wägewert ist der Messwert der Wägung.

Die klassischen feinmechanischen Prinzipien der *Neigungswaage* und der *Balkenwaage* zeigt Abb. 10.4. Durch Anwendung eines Laserinterferometers als Nullindikator konnte bei dem historischen Massekomparator der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) eine Anzeigegenauigkeit  $< 10$  Mikrogramm erreicht werden.

Mechatronische Waagen basieren auf verschiedenen Wirkprinzipien. Abbildung 10.5 zeigt dazu eine allgemeine Übersicht für die Funktionskette

*Masse  $\rightarrow$  Gewicht  $\rightarrow$  elektrische Größe  $\rightarrow$  Wägewert.*

### Dehnungsmessstreifen-Wägeprinzip

Das DMS-Wägeprinzip verwendet *Verformungskörper*, mit denen die Wägemasse in eine mit DMS durchzuführende *Kraft-Sensorik* (siehe Abschn. 5.6.1) überführt wird; es ist durch folgende Wirkprinzip-Messkette gekennzeichnet:

Wägemasse  $m \rightarrow$  Kraft  $F = m \cdot g \rightarrow$  DMS Kraft-Sensorik  $\rightarrow$  elektrischer Wägewert.

Eine mechatronische Waage nach dem DMS-Prinzip besteht gemäß Abb. 10.6 aus zwei grundlegenden Modulen, die sich wiederum aus verschiedenen Elementen zusammensetzen:

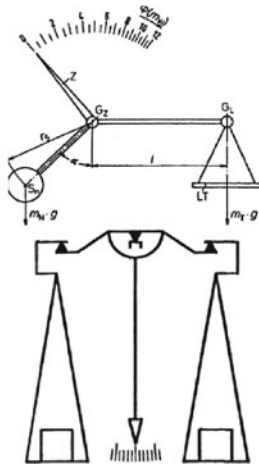
- Kraft-Sensor-Modul, bestehend aus Verformungskörper, Signalumformer, elektronische Auswerteschaltung,
- Messverstärker, bestehend aus Verstärkereinheit, Anzeigegerät, Hilfsenergie.



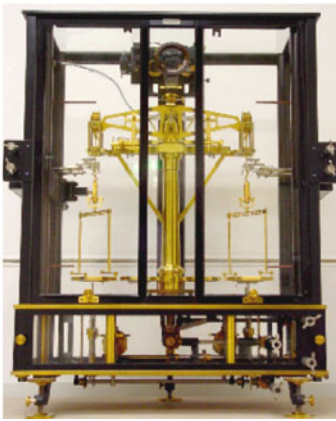
**Mechanisches System Waage:**  
Klassische Präzisions-Feinwerktechnik

**Neigungswaage:**  
mechanischer  
Kraftaufnehmer  
 $\sum M = 0$

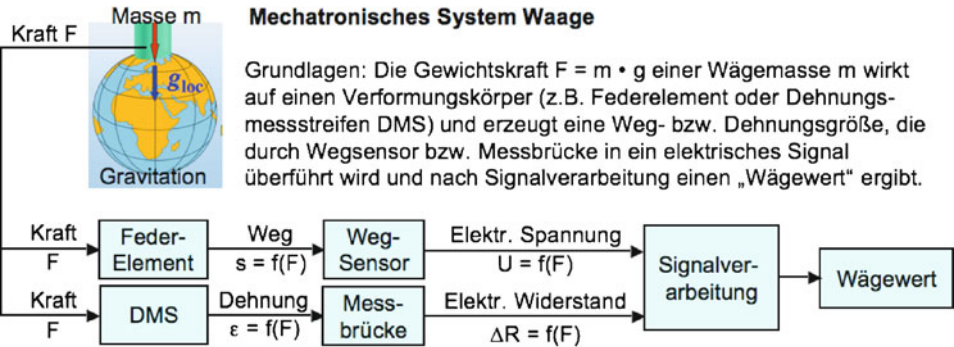
**Balkenwaage:**  
Kraft-  
kompensations-  
prinzip



**Gleicharmige Balkenwaage:**  
Historischer Massekomparator der  
PTB, Laserinterferometer als  
Positionsdetektor,  $\Delta m = 8 \mu g$



**Abb. 10.4** Die klassischen mechanischen Systeme der Wägetechnik



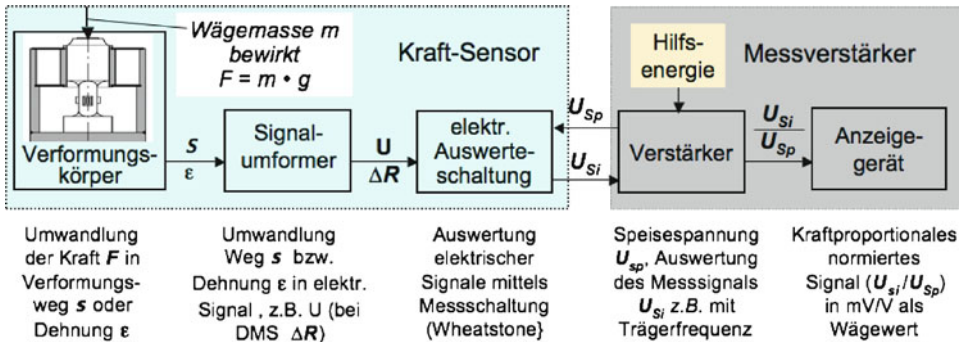
Mechatronische Waagen wandeln somit mechanische Gewichtskräfte mittels geeigneter Sensoren und Aktoren in elektronische Signale als „Wägewerte“ für die Masse um.

**Abb. 10.5** Die mechatronischen Prinzipien der Wägetechnik

Die technische Gestaltung einer mechatronischen Waage nach dem DMS-Prinzip mit ihren grundlegenden Modulen ist in Abb. 10.7 dargestellt.

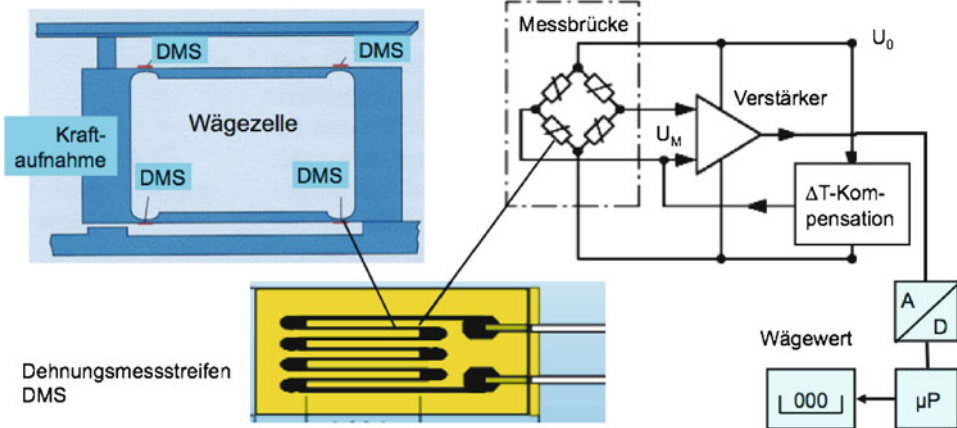
### Interferenzoptisches Wägeprinzip

Bei diesem Prinzip bewirkt die zu bestimmende Masse die elastische Auslenkung eines Wägearms, die interferenzoptisch gemessen wird (vgl. Abb. 5.52) und über eine Auswerteelektronik den Wägewert ergibt, siehe Abb. 10.8.



**Abb. 10.6** Messkette für die Kraft-Sensorik in Waagen mit dem DMS-Prinzip

### Mechatronische Waage: DMS-Prinzip



**Abb. 10.7** Mechatronische Waage nach dem DMS-Prinzip

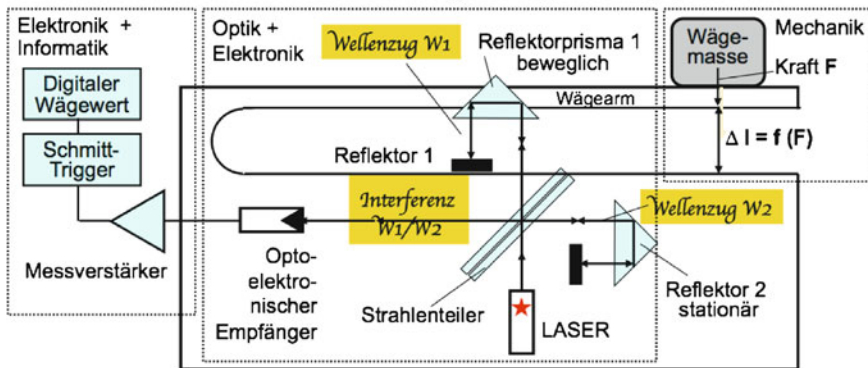
### EMKK-Wägeprinzip (Elektromagnetische Kraftkompensation)

Die Gewichtskraft der zu bestimmenden Wägemasse wird durch eine, von einem elektrodynamischen Aktor erzeugte und mittels Positionssensorik geregelte Gegenkraft kompensiert. Abbildung 10.9 zeigt den Funktionszusammenhang.

Der Systemzusammenhang der mechatronischen EMKK-Waage besteht gemäß Abb. 10.10 im Zusammenwirken von Hebelsystem, Positionssensor, Aktor und Regler (PID, vgl. Abb. 4.9), dargestellt sind auch der Wirk- und Bauzusammenhang.

In der technischen Anwendung werden Waagen – gemäß der Terminologie der International Organization of Legal Metrology (OIML) – eingeteilt in: Nicht-selbsttätige Waagen (NSW): Waagen, die das Eingreifen eines Bedieners während des Wägevorgangs erfordern, um ein korrektes Wägeresultat zu erhalten, siehe Abb. 10.11. Die europäische Zulassung von NSW erfolgt auf der Basis der Europäischen Norm EN 45501. *Selbsttätige*

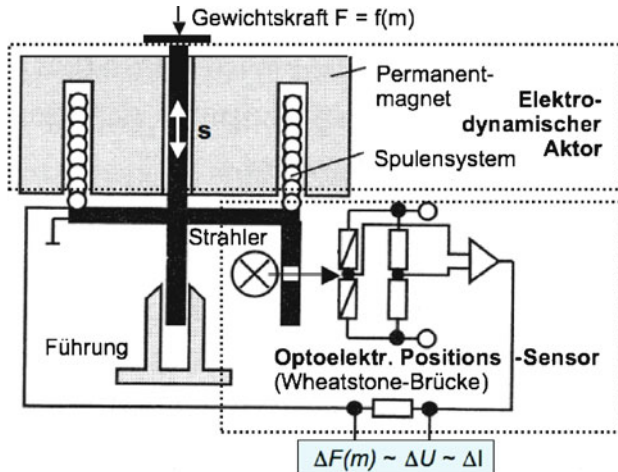
Funktion und Struktur: Systemtechnische Kombination von Mechanik + Optik + Elektronik + Informatik. Die Wägemasse  $m$  bewirkt über ihre Gewichtskraft  $F = m \cdot g$  eine kraftproportionale elastische Auslenkung des Wägearms  $\Delta l = f(F)$ , die interferenzoptisch bestimmt und mit einer Auswerteelektronik als digitaler Wägewert ausgegeben wird.



**Abb. 10.8** Das interferenzoptische Prinzip der mechatronischen Wägetechnik

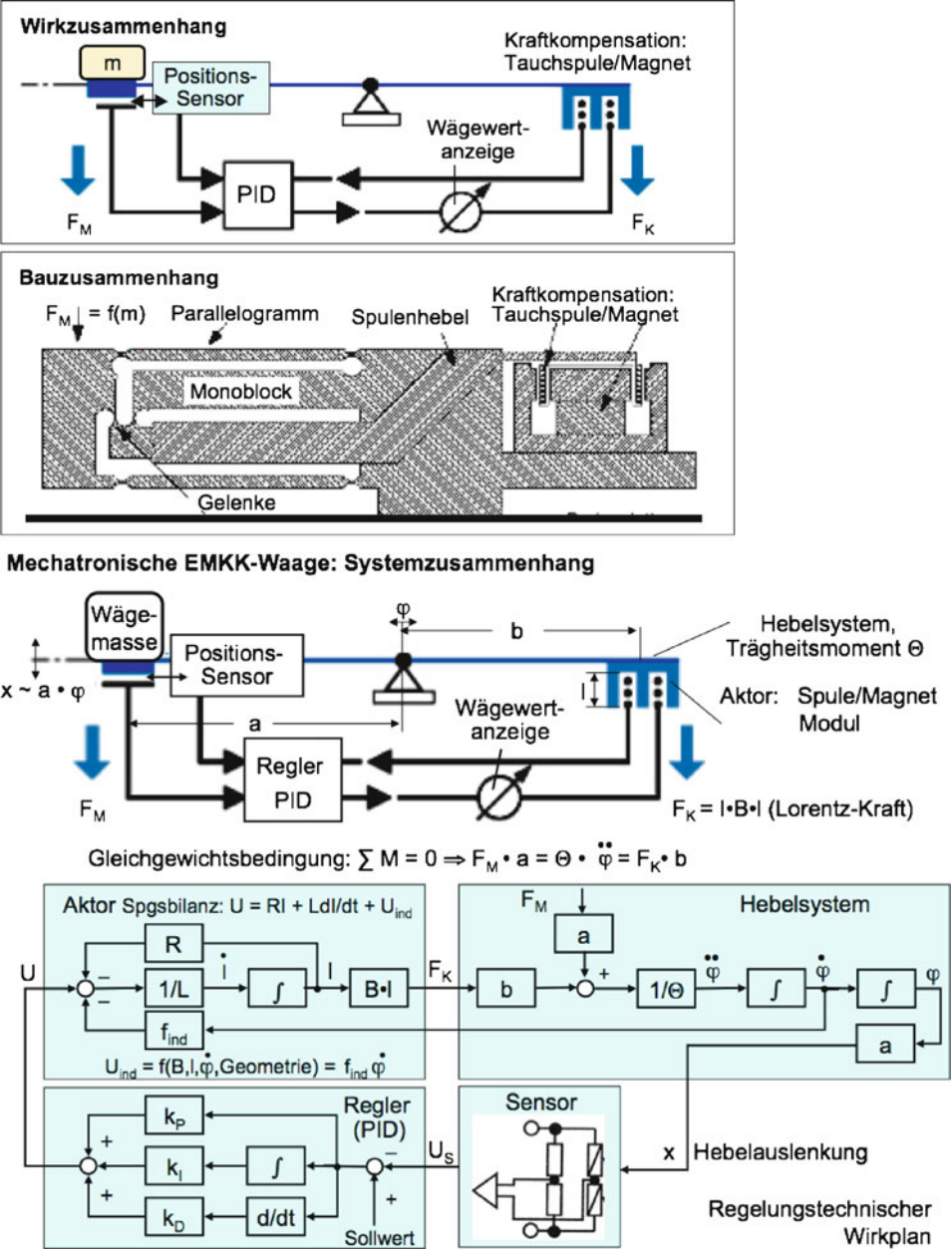
### Funktionszusammenhang

- Kompensation der zu messenden Gewichtskraft durch eine gleich große Lorentz-Kraft.
- Ein elektrodynamischer Aktor erzeugt durch ein Spulensystem im Feld eines Permanentmagneten, sowie mit Hilfe eines Positionssensors und eines Regelsystems, eine der Gewichtskraft  $F = f(m)$  entgegen gerichtete Lorentz-Kraft.
- Der zur Kompensation erforderliche elektrische Strom ist ein Maß für die Gewichtskraft und damit für die Wägemasse.



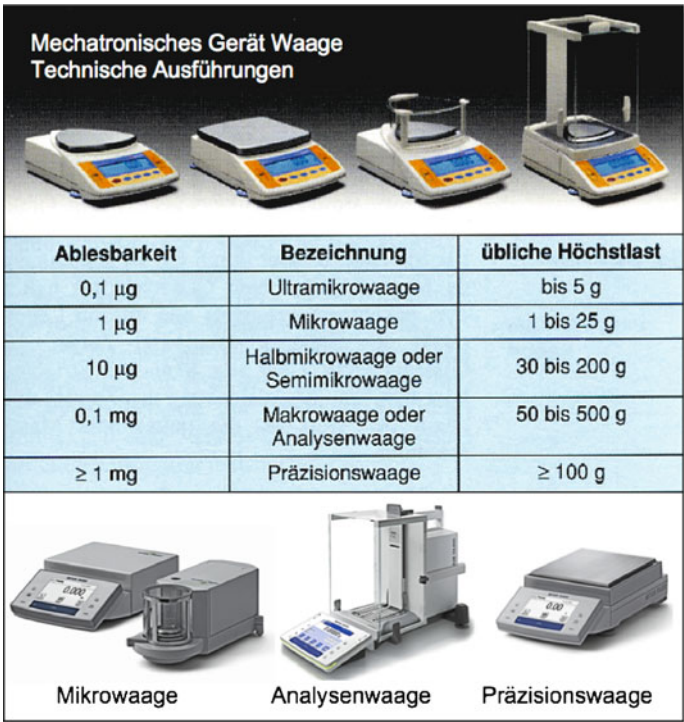
**Abb. 10.9** Funktionsprinzip einer EMKK-Waage und prinzipieller Aufbau

*Waagen (SW):* Waagen, die vorgegebenen Programmen charakteristischer Abläufe folgen und ohne Eingriff eines Bedieners korrekte Wägeresultate erzielen, siehe Abb. 10.12.

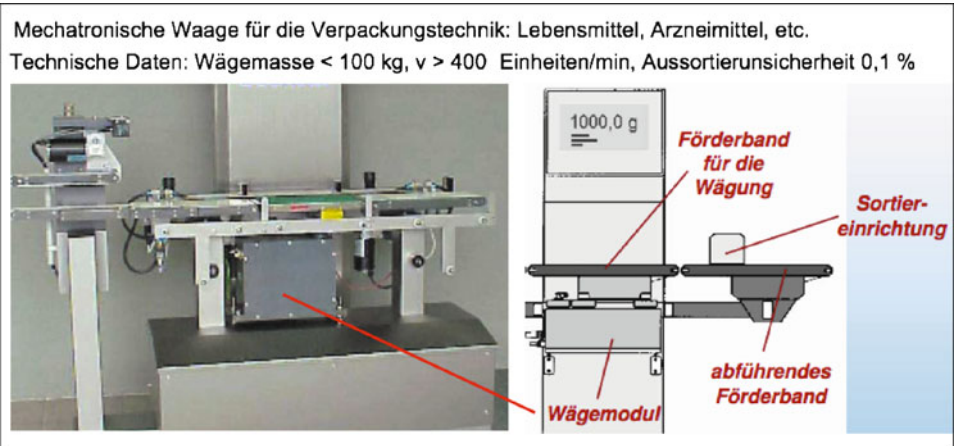


**Abb. 10.10** Mechatronische EMKK-Waage: Wirk-, Bau- und Systemzusammenhang





**Abb. 10.11** Technische Ausführung von Analysen- und Laborwaagen

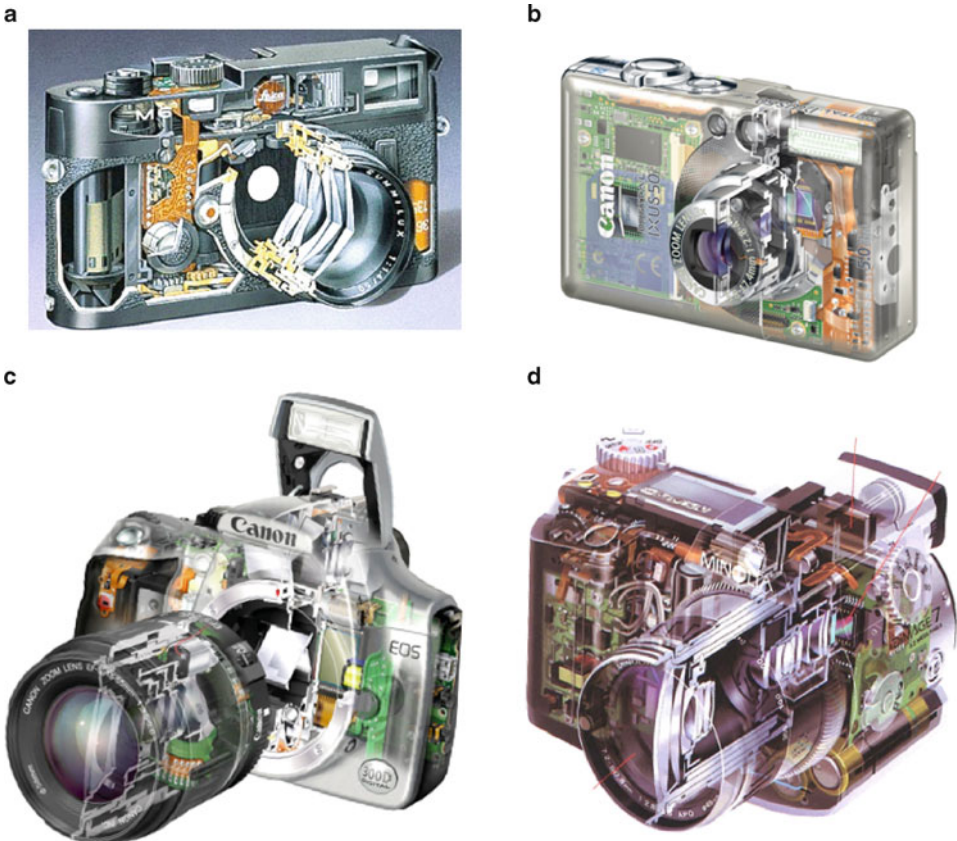


**Abb. 10.12** Technische Ausführung eines selbsttätigen Waagensystems

### 10.3 Mechatronisches Gerät Fotokamera

Fotokameras haben die Aufgabe, speicherbare Bilder eines Objektraumes herzustellen. Die fotografische Abbildung basiert darauf, dass durch Licht beleuchteten Objekte das Licht entsprechend Form und Farbe des Objektes zurückstrahlen und dadurch optisch als Bild dargestellt werden können. Die auf die Bildebene auftreffende Strahlungsenergie löst in Bildspeichermedien chemische oder physikalische Prozesse aus. Kameras sind heute mechatronische Systeme mit optischem Strahlengang, optisch-elektronisch-akustischen sowie taktilen Sensorfunktionen und elektro-mechanischen Aktorfunktionen. Abbildung 10.13 zeigt die hauptsächlichen technischen Ausführungen.

*Digitalkameras* wandeln durch Halbleitersensoren die Licht- und Farbinformation der Abbildung punktwise in elektrische Signale um. Die vom Sensor erzeugten Bildsignale werden ausgelesen und in einem separaten elektronischen Speicher abgelegt. Die Bild-



**Abb. 10.13** Kameratypen. Messsucherkamera (a), Digitalkamera (b), Spiegelreflexkamera (c), Bridge-Kamera All-in-One (d)



information ist damit jeder elektronischen Darstellungs- oder Weiterverarbeitungstechnik zugänglich. *Spiegelreflexkameras* besitzen im Strahlengang hinter dem Objektiv und vor der Filmebene einen mechanisch schwenkbarer Umlenkspiegel, der das Bild umlenkt. Mittels optischer Umkehrsysteme entsteht – auch bei der Verwendung unterschiedlicher Objektive – ein aufrechtes, seitenrichtiges und parallaxenfreies Bild im Sucher bzw. ein speicherfähiges Bild in der Abbildungsebene.

Die Gesamtfunktion einer Fotokamera, die „Erzeugung eines speicherbaren Bildes“, erfordert zahlreiche Teilfunktionen, die durch geeignete Wirkprinzipien und mechatronische Baugruppen technisch zu realisieren sind. Dabei sind unterschiedliche optische, mechanische, elektronische und informationstechnische Aufgaben zu erfüllen sowie steuer- und regelungstechnisch aufeinander abzustimmen. Abbildung 10.14 zeigt an Beispielen von Spiegelreflexkameras die grundlegenden mechanisch-taktilen und optisch-sensorischen Komponenten.

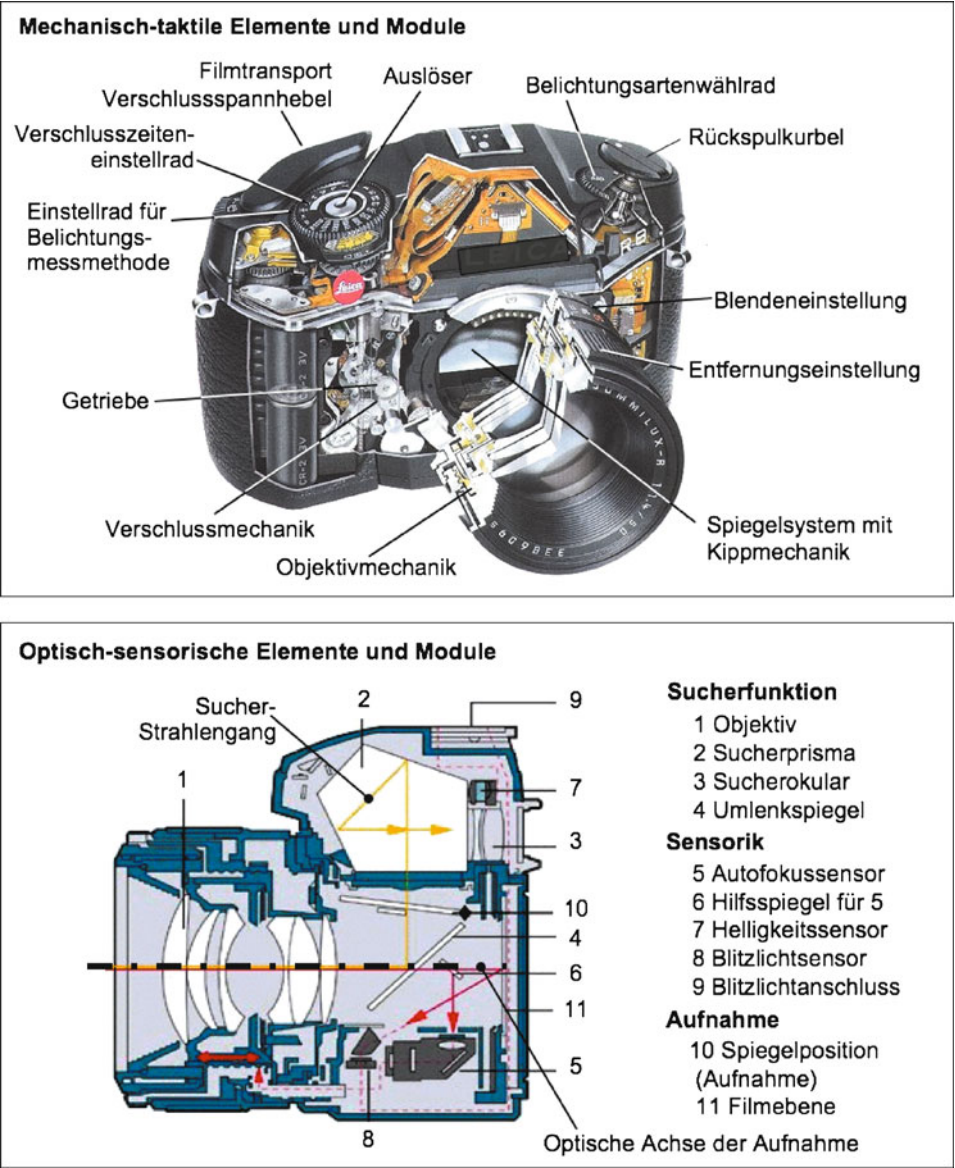
Digitalkameras basieren auf dem in Abb. 10.15 erläuterten Funktionsprinzip der „pixelhaften“ Bildspeichertechnik unter Anwendung von Halbleiterspeichern; die Funktionsprinzipien sind in Abschn. 3.3 und die Herstellungstechnik in Abschn. 9.2 dargestellt.

Die Struktur- und Funktionsmodule einer Kamera zeigt zusammenfassend Abb. 10.16.

Die Funktionsdarstellung einer Kamera macht darauf aufmerksam, dass der „Kamera-Output“, nämlich Bildspeicherung und Darstellung, durch Störeinflüsse, z. B. durch „Verwacklung“ der Kamera während der Aufnahme beeinflusst werden können. Diese Störeinflüsse lassen sich durch mechatronische Verfahren der *Bildstabilisierung* weitgehend eliminieren. Die Prinzipien basieren darauf, dass Verwacklungsbewegungen und die sie kennzeichnenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen durch (Gyro)-Sensoren erfasst und regelungstechnisch durch Aktoren kompensiert werden. Abbildung 10.17 zeigt das Prinzip der Anordnung des Sensor-Aktor-Systems der Bildstabilisierung in der Abbildungsoptik einer Kamera.

Neben der objektivseitigen Anordnung kann die Mechatronik der Bildstabilisierung auch im CCD-Empfängersystem angeordnet sein, siehe Abb. 10.18. Die Verwacklungsimpulse werden sensorisch erfasst und der CCD-Empfänger durch elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen den Permanentmagneten an der Frontplatte und den Aktorspulen an der CCD-Platte gegenläufig bewegt.

Das in Abb. 10.17 dargestellte mechatronische Prinzip wird heute auch zur Bildstabilisierung in **Ferngläsern** angewendet. Abbildung 10.19 zeigt ein geöffnetes Fernglasgehäuse mit den Optikfassungen, den Sensor- und Aktormodulen sowie den elektronischen Regler-Chipelementen. Die Funktion des Bildstabilisierungssystems wird durch den regelungstechnischen Wirkplan erläutert (Grundlagen siehe Kap. 4). Das Prinzip des Wirkplans gilt auch für die in Abb. 10.17 gezeigte Kamera-Bildstabilisierung.



**Abb. 10.14** Mechanisch-taktile und optisch-sensorische Elemente von Spiegelreflexkameras

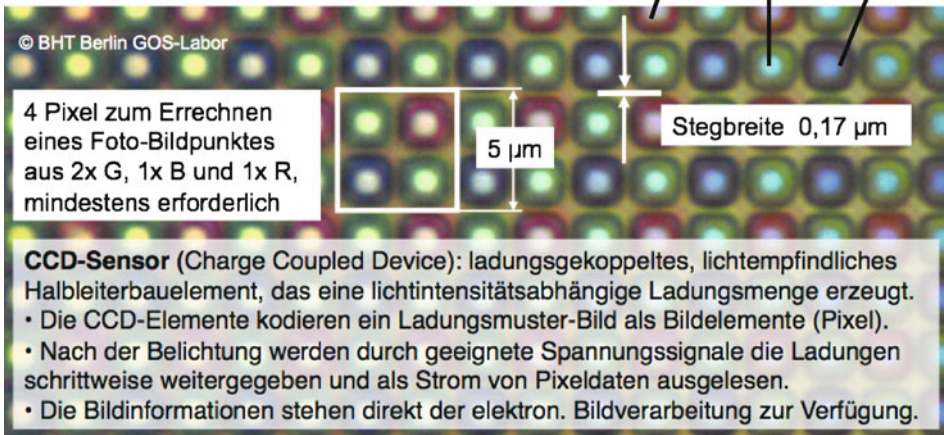
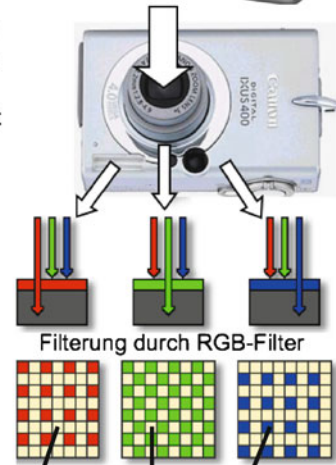
## Digitalkameras



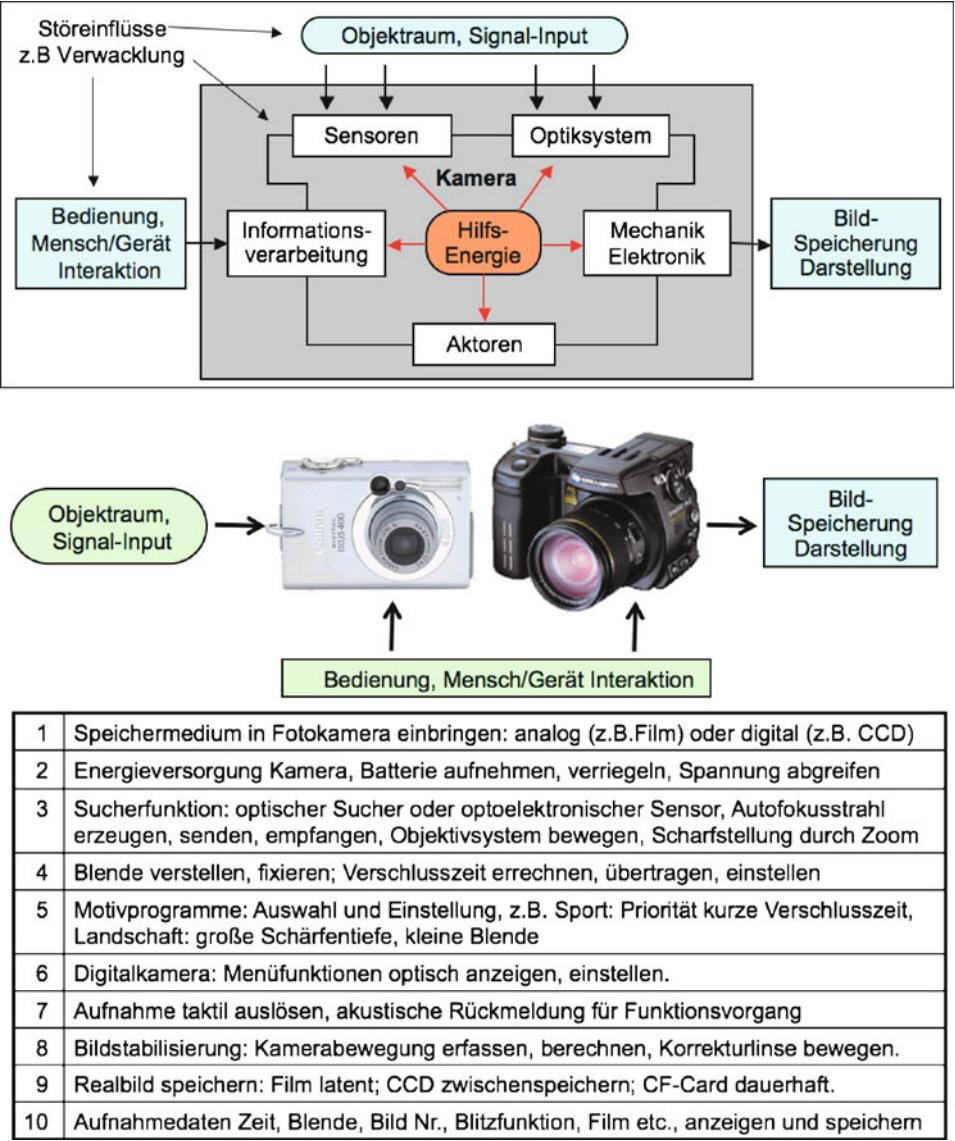
## Spiegelreflexprinzip

In einer Digitalkamera wird wie bei einer Analogkamera das einfallende Licht mit einem Objektiv gesammelt, hier jedoch auf einen CCD(charge-coupled device)-Sensor in der Empfängerebene abgebildet. Das fotografische Bild entsteht in folgenden Schritten:

1. optische Projektion durch das Kameraobjektiv;
2. optische Filterung durch Infrarot- und RGB-Filter;
3. Wandlung der Lichtintensitäten in analoge elektrische Signale in diskrete Elementen (Diskretisierung) in drei Grundfarben (Rot/Grün/Blau, RGB)
4. Digitalisierung der Signale durch Analog-Digital-Wandlung (Quantisierung);
5. Bildverarbeitung der Bilddatei: Farbinterpolation, Scharfzeichnung, Kontrast und Helligkeit;
6. Komprimierung und Speicherung der Bilddateien.

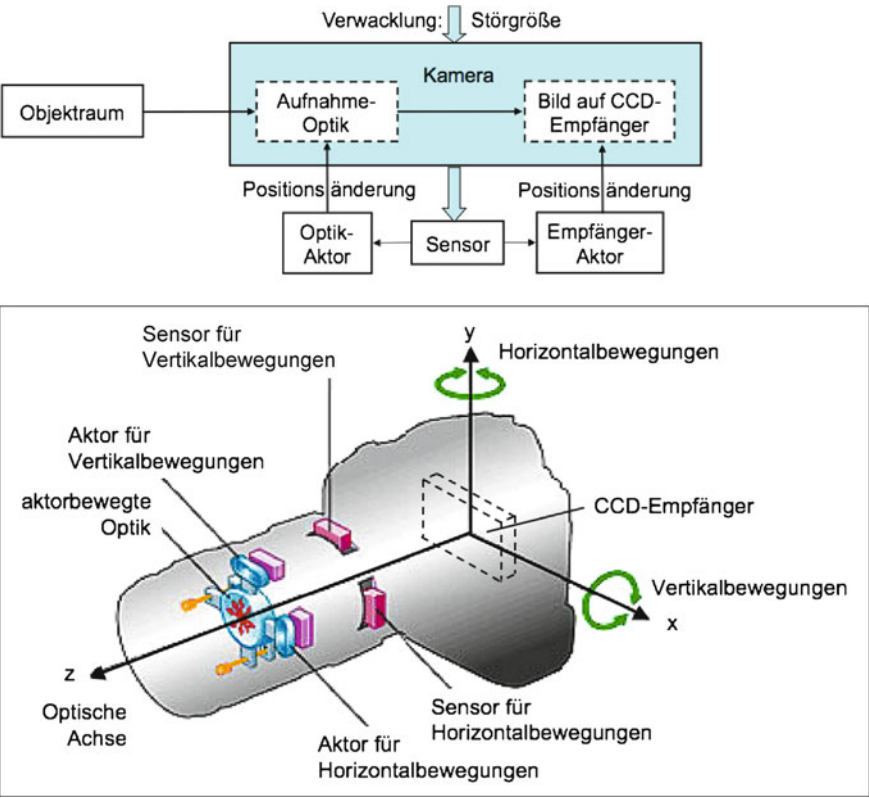


**Abb. 10.15** Funktionsprinzip und Speichermedium einer Digitalkamera

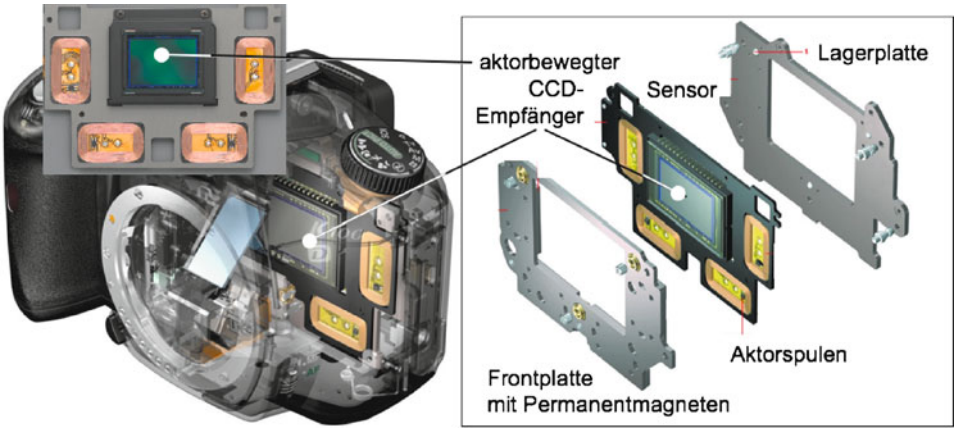


**Abb. 10.16** Blockschaltbild der Struktur- und Funktionsmodule einer Fotokamera

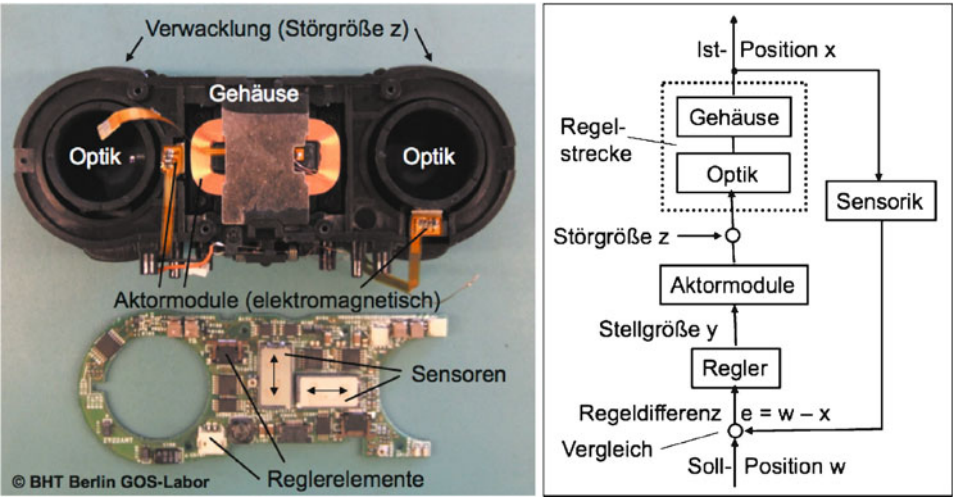




**Abb. 10.17** Mechatronisches Bildstabilisierungssystem in der Abbildungsoptik einer Fotokamera



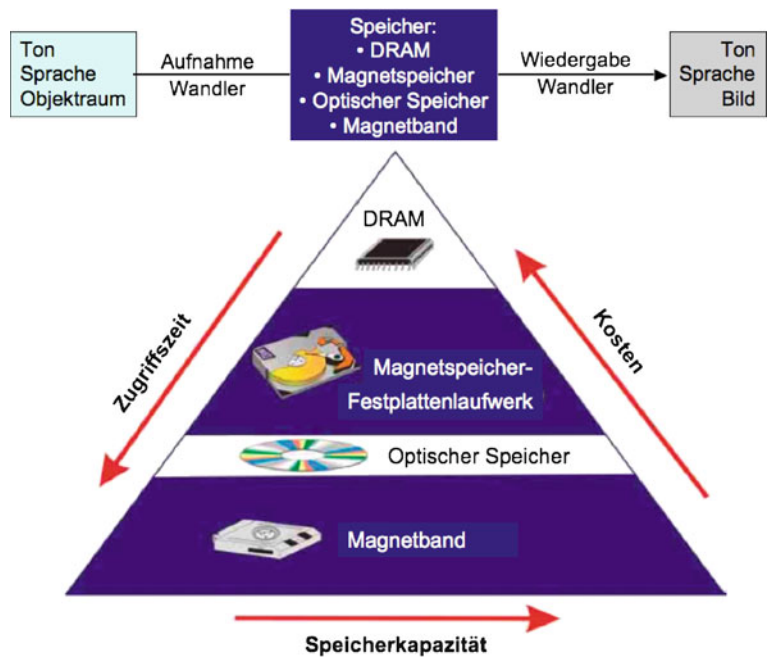
**Abb. 10.18** Mechatronisches Bildstabilisierungssystem im CCD-Empfänger einer Fotokamera



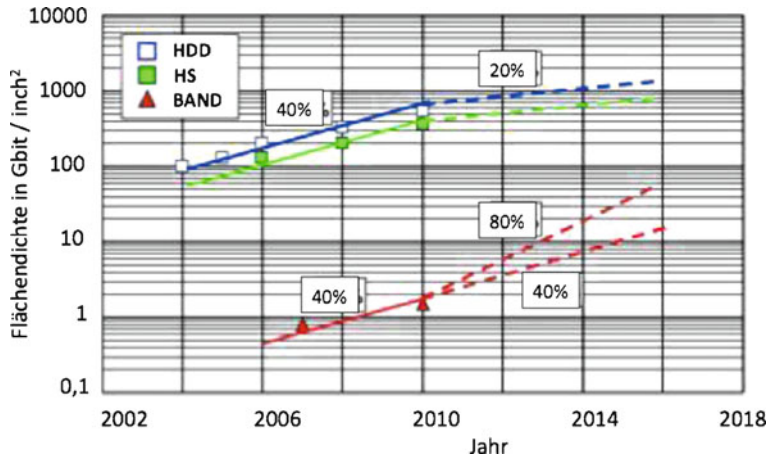
**Abb. 10.19** Fernrohr-Bildstabilisierung und regelungstechnischer Wirkplan



Als Audio-Video-Technik wird die Gesamtheit der Technologien und Verfahren bezeichnet, die es gestattet, Ton- und Bildsignale aufzunehmen, zu speichern und wiederzugeben. Das Prinzip der Audio-Video-Technik basiert auf der Kombination informationstechnischer mit optisch-mechanisch-magnetisch-elektronischen Aufnahme-, Speicher- und Wiedergabetechnologien. Abbildung 11.1 zeigt die elementare Aufnahme/



**Abb. 11.1** Übersicht über die Audio/Video-Technik und die hauptsächlichlichen Speichertechniken



**Abb. 11.2** Zeitliche Entwicklung der Speicherdichte der verschiedenen Speichertechniken: Festplattenlaufwerke (HDD), Halbleiterspeicher (HS) und Magnetbänder (BAND) (IEEE Transactions on Magnetics Vol. 48, May 2012)

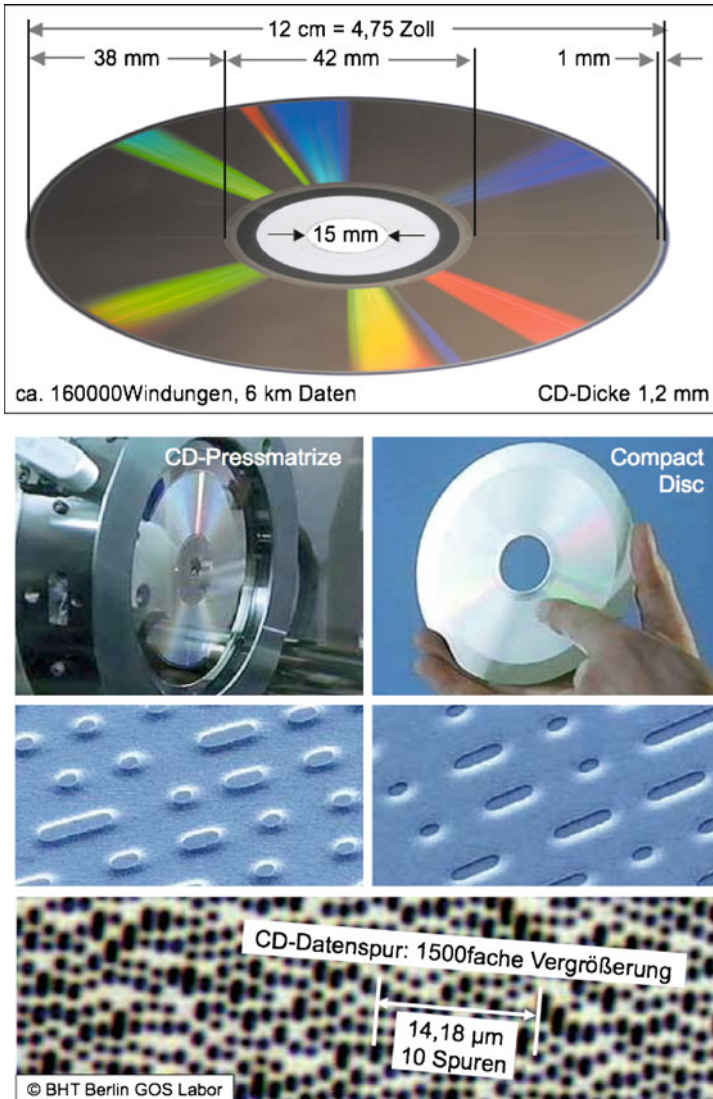
-Wiedergabe-Kette und nennt die gebräuchlichen Speichertechnologien in einer vergleichenden Speicherkapazität/Zugriffszeit/Kosten-Graphik.

Die Magnetbandtechnik hat eine breite Speicherkapazität und ist vergleichsweise preiswert, benötigt aber längere Zugriffszeiten. Magnetspeicher und so genannte optische Speicher haben eine für viele Anwendungen interessante Position im Kapazität/Zugriffszeit/Kosten-Diagramm. Halbleiter-Speicher (Dynamic Random Access Memory DRAM) zeichnen sich bei allerdings geringerer Speicherkapazität durch sehr kurze Zugriffszeiten aus, Prinzip und Kenndaten sind in Abschn. 3.3, Abb. 3.9, dargestellt.

Die zeitliche Entwicklung der Speicherdichte und ein Vergleich der Speicherdichte für Magnetspeicher-Festplattenlaufwerke (hard disk drives HDD), Bänder und Halbleiterspeicher zeigt Abb. 11.2. Es ist zu erkennen, dass in den letzten Jahren der Anstieg der Speicherdichte in Festplattenspeichern und Halbliterspeichern geringer geworden ist. Der Grund für diese Verlangsamung der Entwicklung ist, dass physikalische Grenzen bei beiden Arten der Speicherung nahezu erreicht sind, und es immer schwieriger wird, die Speichergröße eines Bits zu verringern.

## 11.1 Optische Datenspeicher

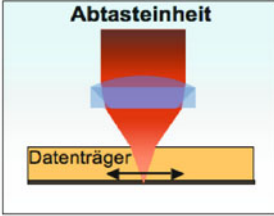
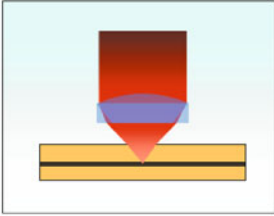
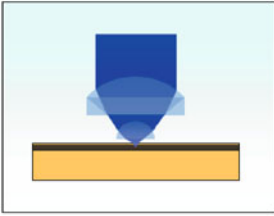
Bei „optischen Datenspeichern“ werden digitalisierte Informationen in mikrogeometrischer Form auf *Compact Discs (CD)* mittels Lasern „geschrieben“ und „gelesen“, wobei optische Reflexions- und Beugungseigenschaften des Speichermediums genutzt werden. Eine CD besteht aus einer Polycarbonat-Scheibe, die auf der Labelseite mit einer Schutz-



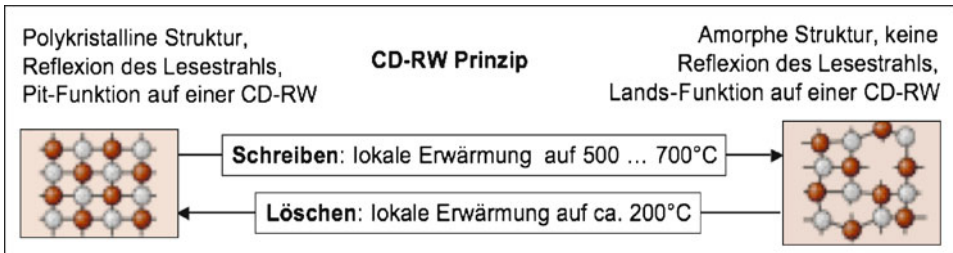
**Abb. 11.3** Die Compact Disc (CD) mit ihren standardisierten Abmessungen, die CD-Pressmatrize und die Datenspur einer CD

schicht und auf der Abspielseite mit einer spiegelnden Aluminium-Schicht versehen ist, siehe Abb. 11.3.

Die digitalisierten Ton- oder Bildinformationen sind – gesehen von der Abspielseite – in einer spiralförmigen Datenspur mikrogeometrisch als „Pits“ und „Lands“ gespeichert. Informationstechnisch entsprechen Pits oder Lands der binären 0 und Wechsel zwischen Pits und Lands der binären 1. Die optischen Datenträger der Audio-Video-Technik wer-

		
<b>CD: Audio</b> Kapazität: 0.7 GB Tastrate: 1.2 Mb/s Optik: $\lambda = 780 \text{ nm}$ Optik-Apertur 0.45 Schichtdicke: 1.2 mm	<b>DVD: Video</b> 4.7 GB 11 Mb/s 650 nm 0.60 0.6 mm	<b>DVR: Video</b> 25 GB 35 Mb/s 405 nm 0.85 0.1 mm

**Abb. 11.4** Datenträger der Audio-Video-Technik und ihre technischen Kenndaten



**Abb. 11.5** Funktionsprinzip und Struktur einer CD-RW (compact disc re-writeable)

den – ausgehend von einem mittels Lasertechnik gebrannten „CD-Master“ – durch die in Abschn. 9.2 beschriebene Spritzgusstechnik hergestellt. Abbildung 11.3 zeigt das Prägeprofil einer CD-Pressmatrize und die sich durch die Pressung ergebende Compact-Disc-Abformung sowie die digitalmikroskopisch aufgenommene Datenspur.

Optische Plattenspeichermedien mit einer gegenüber der CD-Technik höheren Speicherkapazität sind die Techniken der *DVD*, *Digital Versatile Disc* und der *DVR*, *Digital Video Recorder*. In Abb. 11.4 sind die technischen Kenndaten der verschiedenen Speichermedien zusammengestellt.

CD-R (compact disc recordable) sind beschreibbare CDs, die mit handelsüblichen Brennern, die heute meist integrale Bestandteile von Computern sind, beschrieben werden können. CD-RW (compact disc re-writeable) sind wiederbeschreibbare und löschrare CDs. Bei ihnen werden die 0-1-Bit-Informationen nicht mikro-geometrisch sondern mikro-strukturell „gebrannt“ und „gelesen“. Das Prinzip ist stichwortartig in Abb. 11.5 dargestellt. Die Anwendung von CD-R und DC-RW erfordert auch die Verwendung der technisch zugehörigen Schreib- und Lesetechniken.

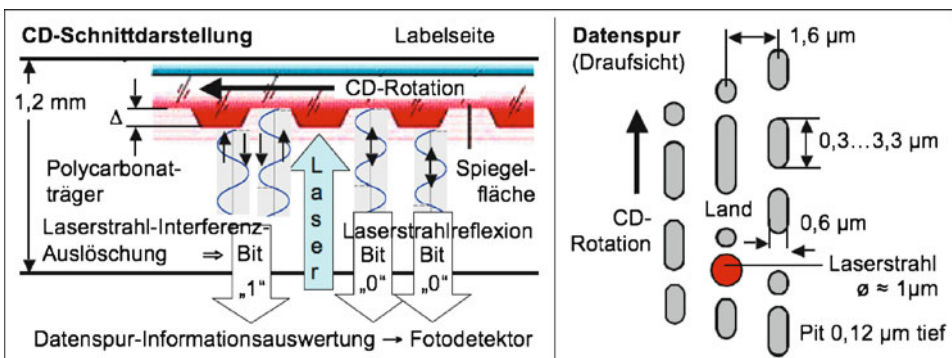
## 11.2 CD-Player und DVD-Player

Bei einem CD/DVD-Player werden die Datenspur-Informationen mechanisch berührungslos durch eine Laser-Abtasteinheit bei Rotation der CD/DVD und gleichzeitigem radialen Vorschub der Abtasteinheit mit einem Schlitten-Servo von innen nach außen abgetastet, siehe Abb. 11.6. Die optische Weglänge  $l$  in der CD-Polycarbonatscheibe (optische Brechzahl  $n = 1,585$ ) ist  $l = n \cdot s$ ;  $s$  bezeichnet die geometrische Weglänge.

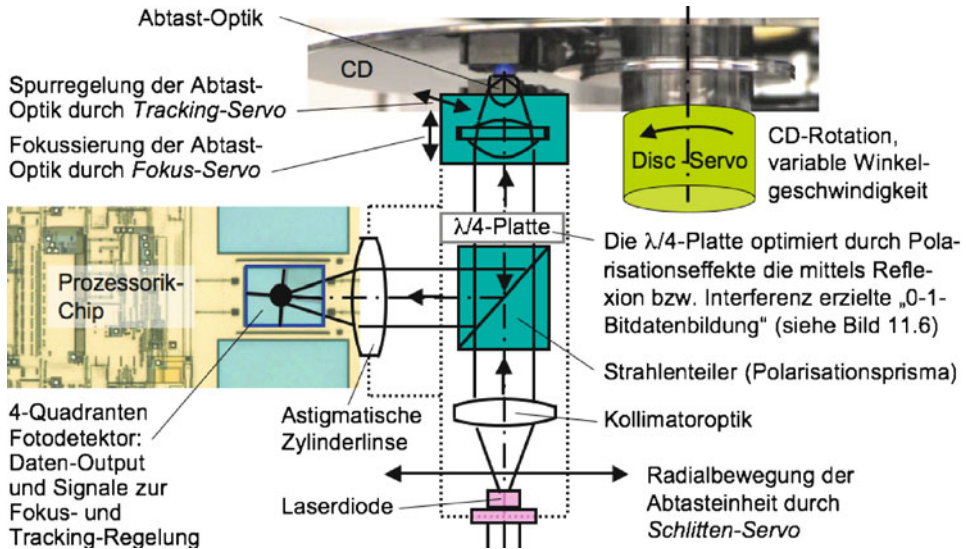
Zum Auslesen der Daten aus der CD fokussiert eine Abtastoptik den Laserstrahl ( $\lambda = 780 \text{ nm}$ ) auf die CD-Datenspur. Pits und Lands haben eine zur Laserstrahl-Interferenz-Auslöschung führende Höhendifferenz von  $\Delta = (\lambda / 4) / n = 0,12 \mu\text{m}$ . Der Wechsel von Pits und Lands wird somit im Fotodetektor als Dunkel/Hell-Wechsel (Bit „1“) detektiert. Die Laserstrahlreflexion an einzelnen Pits oder Lands liefert Bits „0“. Es resultiert ein serieller 1-0-Datenstrom (Daten-Output), der einem Fotodetektor zugeleitet wird. Um bei gleicher Pit-Länge eine konstante Taktgeschwindigkeit  $v$  zu erzielen, muss gemäß  $v = \omega \times r$  die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der CD entsprechend der Laserposition  $r$  geregelt oder eine informationstechnische Datenegalisierung vorgenommen werden. Den Aufbau eines CD-Players zeigt Abb. 11.7.

Zur vertikalen Fokussierung und lateralen Ausrichtung des abtastenden Laserstrahls auf der Datenspur ist die Abtast-Optik in einem dynamischen Zwei-Achsen-Fokus/Tracking-Servo geführt. Er erhält seine regelungstechnischen Korrektursignale von einem 4-Segment-Fotodetektor. Das Funktionsprinzip erläutert Abb. 11.8.

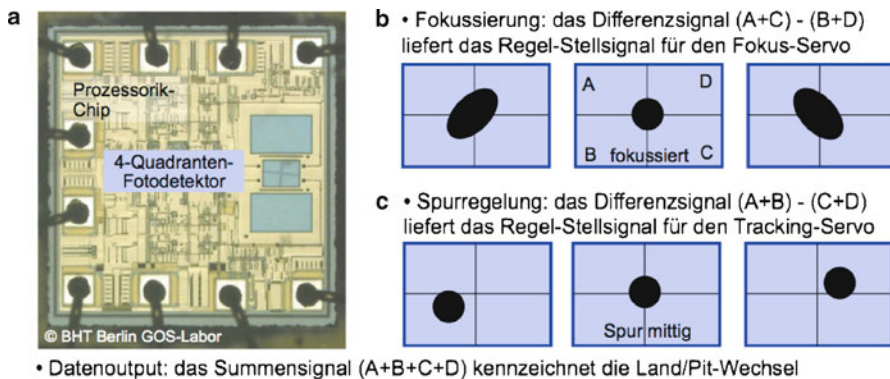
- Fokussierung (Abb. 11.8b): Bei vertikaler Defokussierung liefert die astigmatische Zylinderlinse (siehe Abb. 11.7) ein elliptisches Signal für die Fokusregelung.
- Spurregelung (Abb. 11.8c): Der spurabtastende Laserstrahl wird an einem optischen Gitter in der Linse gebeugt und die bei nicht „mittiger Lage“ des Laserstrahls in der Datenspur auftretende Signalunsymmetrie mit dem 4-Quadranten-Fotodetektor erfasst und als regelungstechnisches Signal einem Aktor zugeführt.



**Abb. 11.6** Querschnitt und Datenspur einer CD



**Abb. 11.7** Funktionsprinzip, Strahlengang und Module eines CD-Players



**Abb. 11.8** Prinzip des Fotodetektors eines CD-Players

Wie in Abb. 11.8 erläutert, liefert der 4-Quadranten-Fotodetektor die regelungstechnischen Signale für Fokussierung und Spurregelung der Abtast-Optik. Mit dem Summensignal  $A + B + C + D$  des Auslesens der in der Pit/Land-Struktur gespeicherten Daten gibt er gleichzeitig den Datenoutput für den Ton/Bild-Ausgang des CD/DVD-Players. Der prinzipielle Funktionsablauf ist in Abb. 11.9 wiedergegeben.

Die konstruktive Gestaltung der CD-Player-Module *Abtast-Optik*, *Fokussierung* und *Spurregelung* zeigt Abb. 11.10. Die unterhalb der CD oder DVD angeordnete Abtast-Optik ist in einer elastischen Drahtführung (Prinzip der kinematischen Parallelkurbel) gehalten und kann durch die aktorische Wirkung der Magnet/Spulen-Systeme (magne-



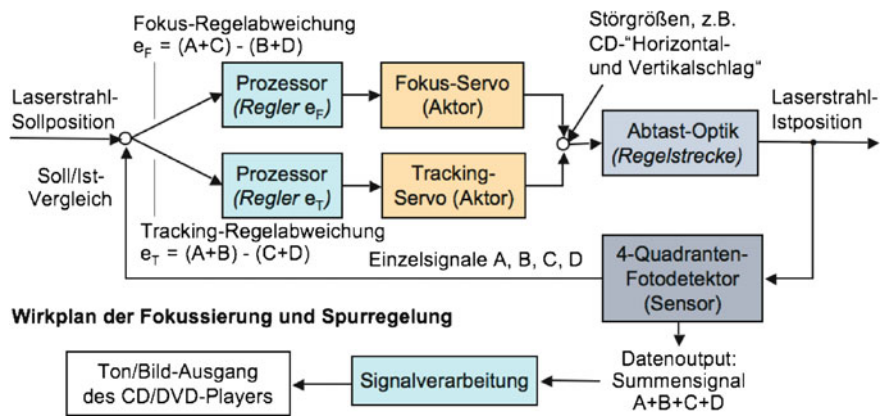


Abb. 11.9 Blockschaltbilddarstellung der Funktionsabläufe in einem CD-Player

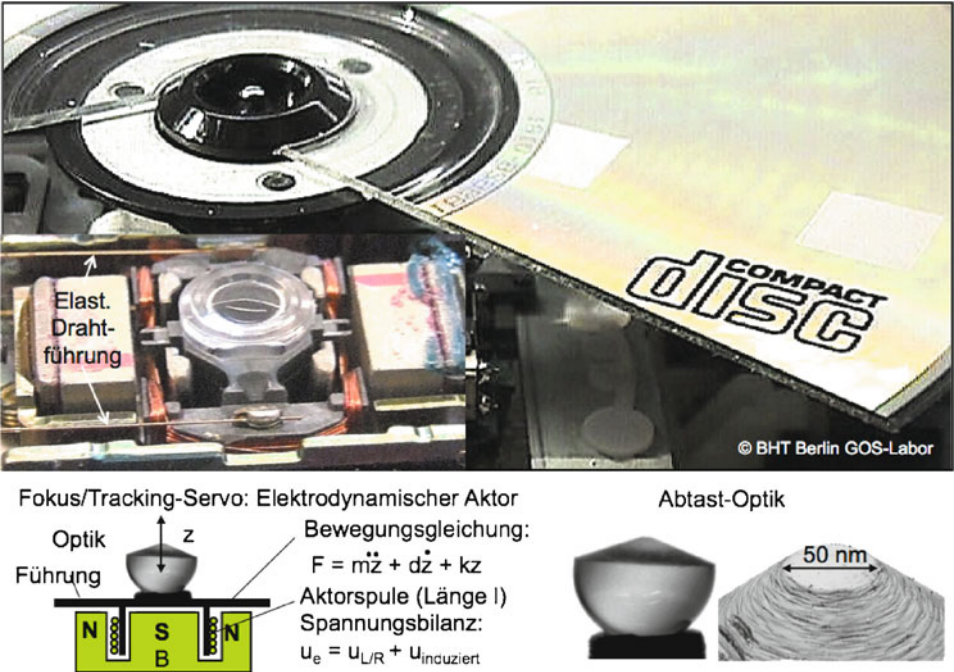
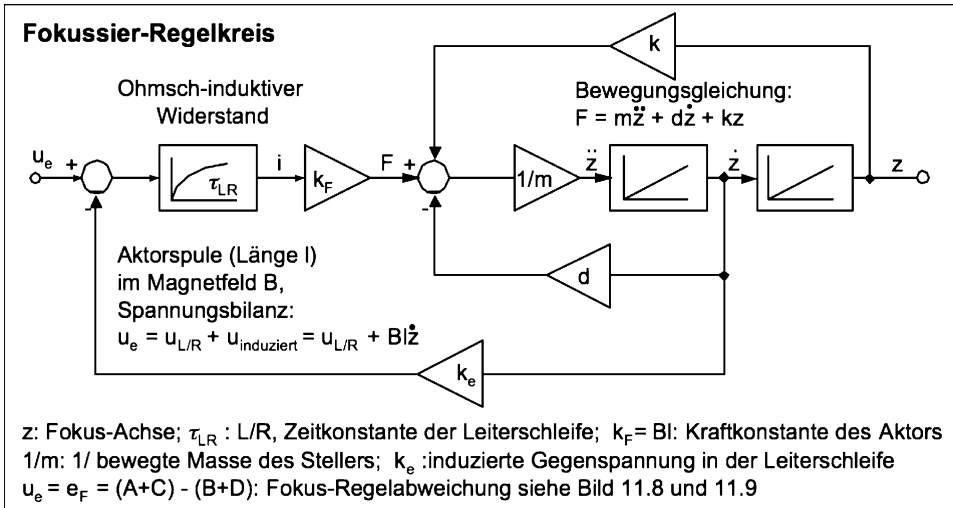


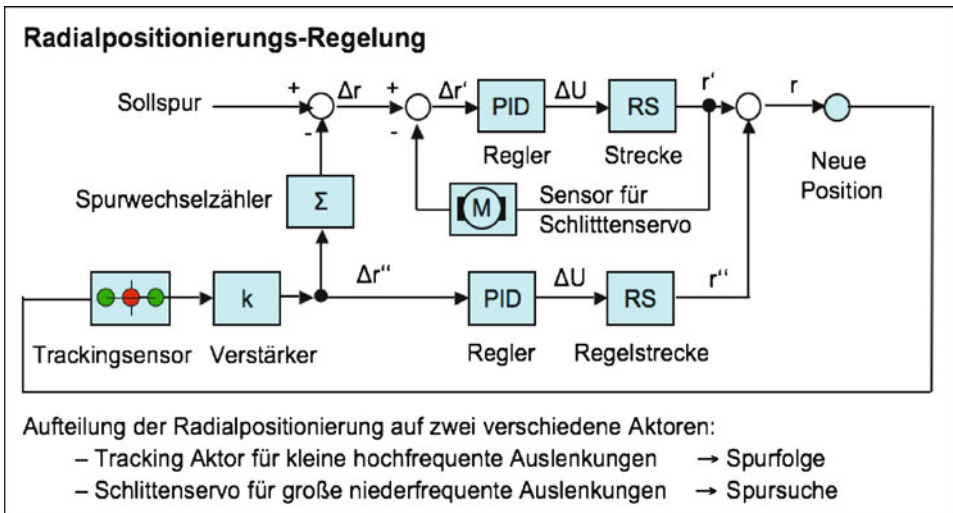
Abb. 11.10 Die CD-Player-Module der Abtast-Optik, Fokussierung und Spurregelung

tische Flussdichte B) des Fokus/Tracking-Servos sowohl horizontal (Tracking) als auch vertikal (Fokussierung) regelungstechnisch bewegt werden.

Die automatische Fokussierung der Laserstrahlabtastung der CD/DVD-Datenspur basiert auf dem in Kap. 6 (vgl. Abb. 6.4) beschriebenen elektrodynamischen Aktorprinzip



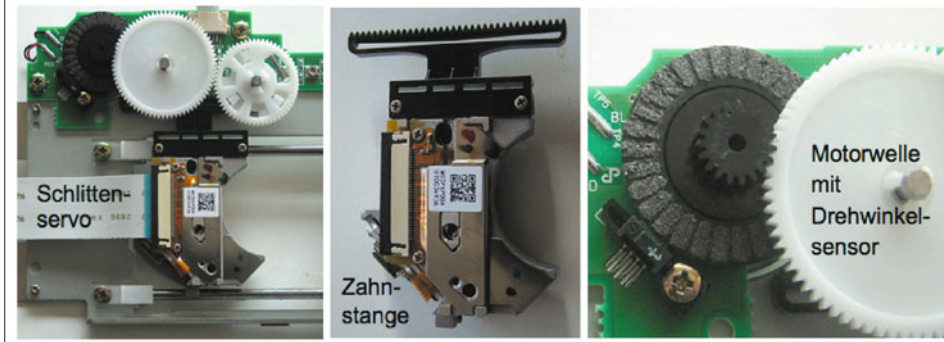
**Abb. 11.11** Der elektromechanische Wirkplan für die Fokussierung eines CD-Players



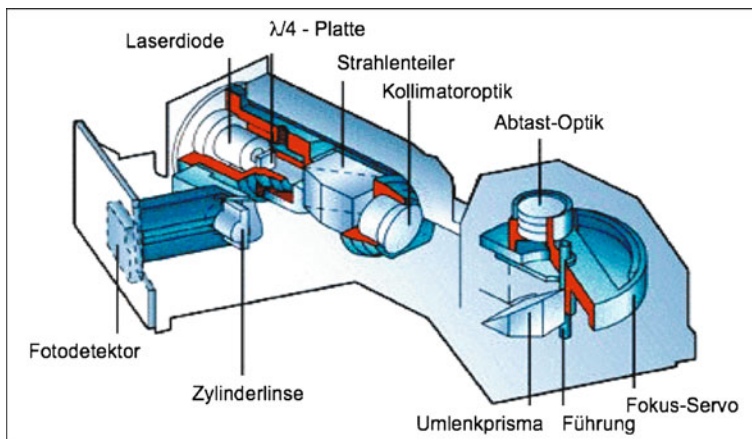
**Abb. 11.12** Der elektromechanische Wirkplan für die Radialpositionierung eines CD-Players

der *mechatronischen Elementarmaschine*. Der aus diesem Prinzip ableitbare Wirkplan für den Fokussier-Regelkreis eines CD-Players ist Abb. 11.11 dargestellt. Eingangssignal  $U_e$  für den **Fokussier-Regelkreis** ist die von dem 4-Quadranten-Fotodetektor (Abb. 11.8) gelieferte Fokus-Regelabweichung  $e_F = (A + C) - (B + D)$ , siehe Abb. 11.9. Sie bewirkt mittels des in Abb. 11.10 abgebildeten Fokus-Servo gemäß Wirkplan von Abb. 11.11 die korrekte Position der Datenspur-Abtasteinheit in der Fokus-Achse  $z$ .

- Ein Elektromotor treibt über ein Getriebe eine am Schlitten befestigte Zahnstange an.
- An der Elektromotorwelle befindet sich ein magnetischer Inkremental-Drehwinkelsensor.
- Getriebe und Zahnstange müssen vorgespannt sein, um Getriebeispiel zu vermeiden.



**Abb. 11.13** Der Schlitten-Servo eines CD-Players zur Radialbewegung der Laser-Abtasteinheit

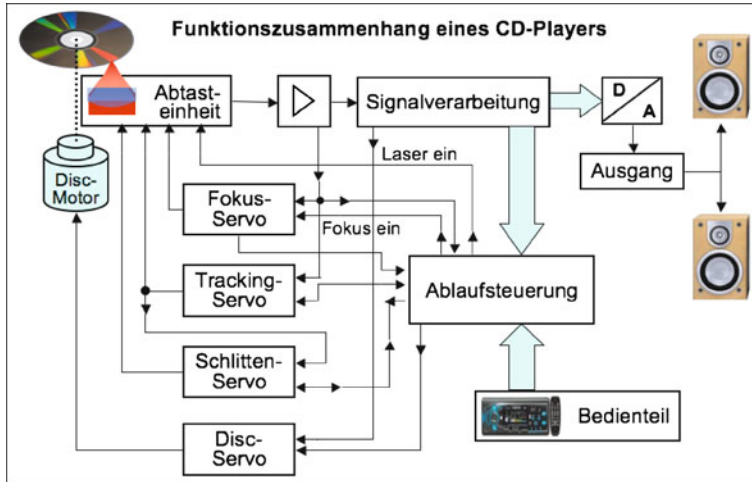


**Abb. 11.14** Abtasteinheit eines CD-Players in FOP-Bauweise

Der Wirkplan für die **Radialpositionierung** – die durch einen Tracking-Aktor für kleine Auslenkungen und durch den Schlitten-Servo für große Auslenkungen über mehrere Datenspuren hinweg durchgeführt wird – ist in Abb. 11.12 dargestellt.

Die konstruktive Ausführung des Tracking-Aktors zeigt Abb. 11.10 und die Modulelemente des Schlitten-Servos sind in Abb. 11.13 abgebildet.

Kompakte Geräte verwenden als Abtasteinheit eine so genannte FOP-Optik (Flat Optical Pick-up), siehe Abb. 11.14. Bei der FOP-Technik wird durch ein Umlenkprisma (Abb. 11.14 unten rechts) der in Abb. 11.7 dargestellte Strahlengang „horizontal geklappt“ und dadurch eine raumsparende konstruktive Gestaltung erreicht.

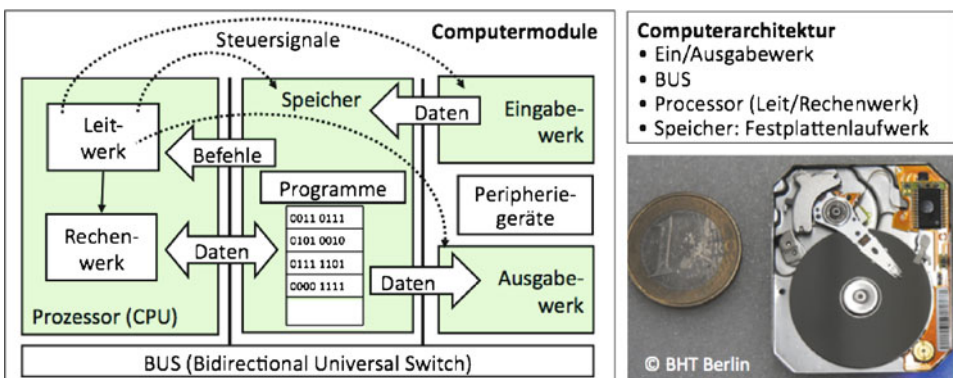


**Abb. 11.15** Aufbaumodule und Funktionszusammenhang eines CD/DVD-Players

Ergänzend zu dem in Abb. 11.7 dargestellten Funktionsprinzip des mechatronischen Systems CD/DVD-Player ist der Funktionszusammenhang zusammenfassend als Blockschaltbild in Abb. 11.15 dargestellt.

Computer sind als „programmierbare Rechenggeräte“ (lat. *computare* berechnen) heute von zentraler Bedeutung für die Informationsverarbeitung und Informationsdarstellung in Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft. Beispiele reichen von den vielfältigen Personal Computern bis hin zu Supercomputern für die Verkehrstechnik, die Klimaforschung und die Medizintechnik.

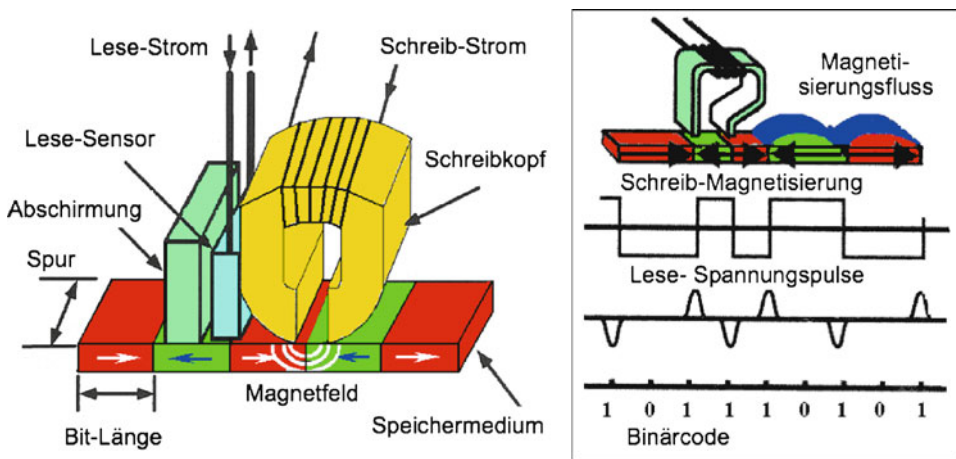
Die Funktion von Computern basiert auf dem Zusammenwirken geeigneter Programme (Software) und gerätetechnischer „Hardware“ nach der „Von-Neumann-Architektur“. In der Computertechnik, die heute magnetische Speichermedien verwendet, sind für die Datenaufzeichnung und Datenwiedergabe mechanische Bewegungsvorgänge zwischen dem Speichermedium und der Schreib/Leseeinheit erforderlich. Damit hat das mechatronische System *Festplattenlaufwerk* (*hard disc drive, HDD*) eine bedeutende Funktion in der Computerarchitektur, siehe Abb. 12.1.



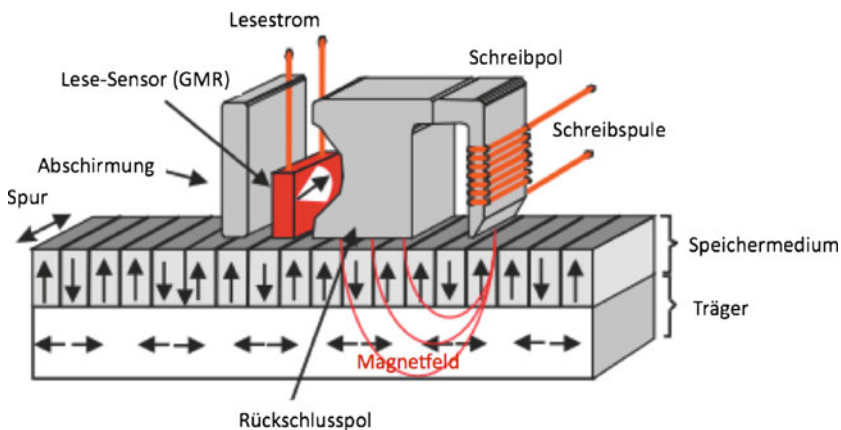
**Abb. 12.1** Prinzipdarstellung eines Computers

## 12.1 Magnetische Datenspeicher

Die magneto-mechanische Datenspeichertechnik basiert physikalisch auf der „0-1-Magnetisierung“ von Mikrodomänen. Technisch erforderlich sind Datenkodierung und Partitionierung des Speichermediums sowie eine Relativbewegung von Schreib/Lesekopf und Speichermedium. Eine schematische Darstellung des Schreib- und Lesevorgangs zeigt Abb. 12.2. Beim Schreibvorgang wirkt der Schreibkopf als Elektromagnet. Der Schreibkopf magnetisiert im Rhythmus der 0-1-Informationssequenz das feinkörnige Speichermedium in Form kleiner Permanentmagnete mit unterschiedlicher Orientierung. Beim Lesen bewirken die kleinen Permanentmagnete des rotierenden Speichermediums



**Abb. 12.2** Funktionsprinzip der magneto-mechanischen Datenspeichertechnik



**Abb. 12.3** Funktionsprinzip der vertikalen magnetischen Datenaufzeichnung



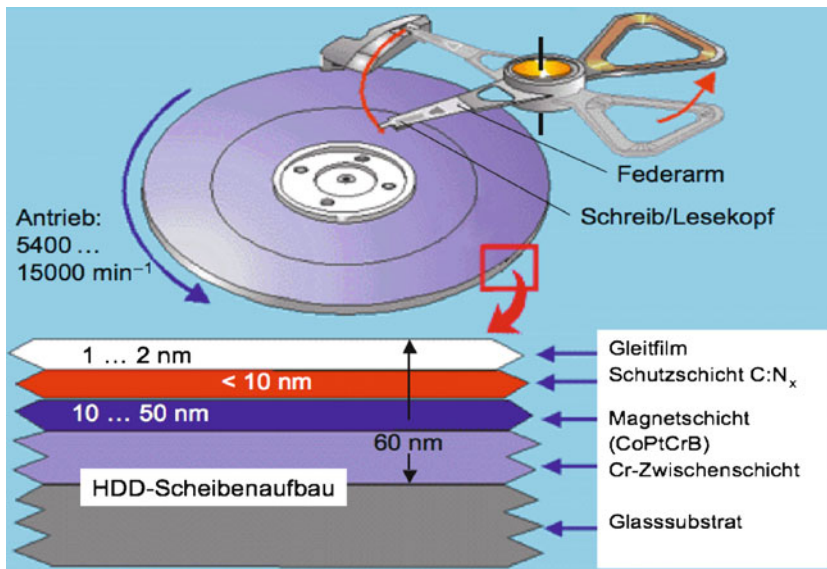
im stationären Lese-Sensor die Induktion von Lese-Spannungsimpulsen, die als Lese-Strom im Binärcode ausgegeben werden. Bei einem erneuten Schreibvorgang wird das Speichermedium „überschrieben“, d. h. die kleinen Speicher-Permanentmagnete werden entsprechend der neuen 0-1-Sequenz neu ausgerichtet.

Das in Abb. 12.2 gezeigte Prinzip der Magnetspeicherung ist seit 2005 vom „in-plane“ oder „horizontalem“ Recording zum out-of-plane oder „perpendicular“ Recording (PMR) übergegangen. Abbildung 12.3 zeigt das Funktionsprinzip der vertikalen magnetischen Datenaufzeichnung. Der Lese-Sensor basiert auf dem quantenmechanischen GMR (Giant Magneto Resistance)-Effekt (Physik-Nobelpreis 2007, siehe Abb. 3.10). Mit einem GMR-Sensor kann die unterschiedliche Orientierung der Magnetisierung mit hoher Empfindlichkeit als Widerstandsänderung detektiert werden.

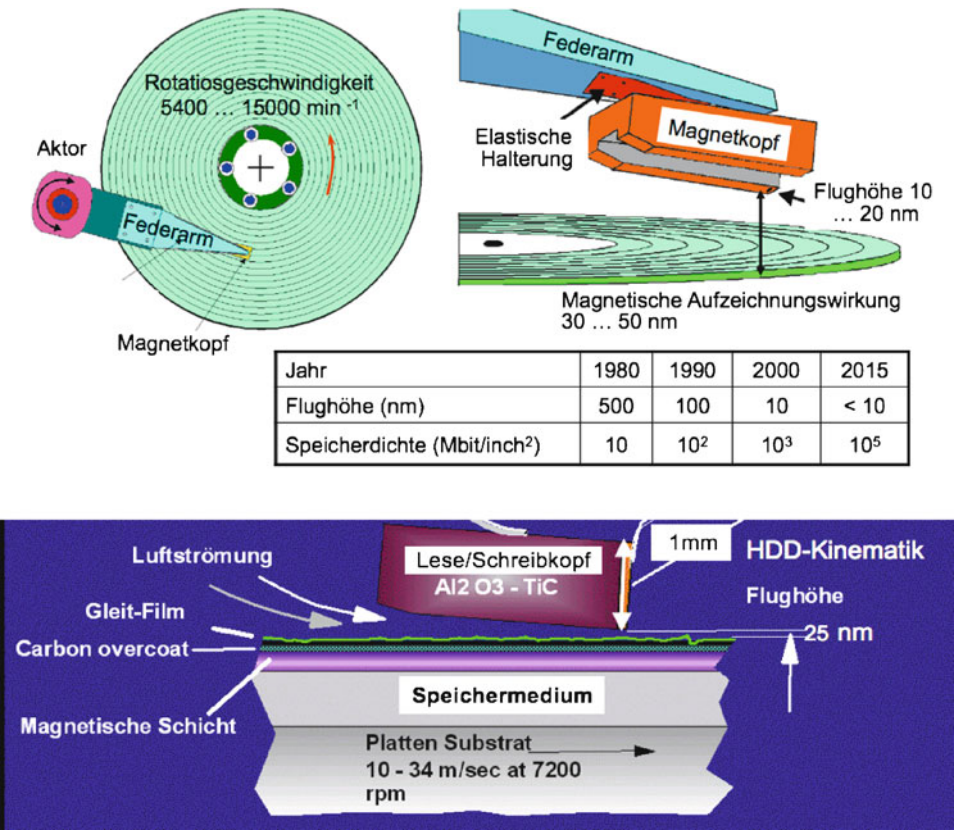
## 12.2 Mechatronisches System Festplattenlaufwerk

Ein typisches Festplattenlaufwerk besteht aus einer Anzahl von Platten, dem Magnetkopf am freien Ende der Aufhängefeder (suspension) und dem Schwingarm-Aktor, der den Kopf über die Festplatte bewegt. In Festplattenspeichern ist der Magnetkopf aerodynamisch über der Festplatte gelagert. Der Aufbau eines Festplattenlaufwerks mit Federarm, Schreib/Lesekopf, Antrieb und die Schichtstruktur einer magnetischen Speicherscheibe sind in Abb. 12.4 dargestellt.

Das Substrat der Festplatte besteht aus Aluminium oder Glas. Auf einer dünnen Zwischenschicht wird die Magnetschicht (Co, Pt, Cr, etc.) durch Kathodenzerstäubung (sput-



**Abb. 12.4** Aufbau eines Festplattenlaufwerks



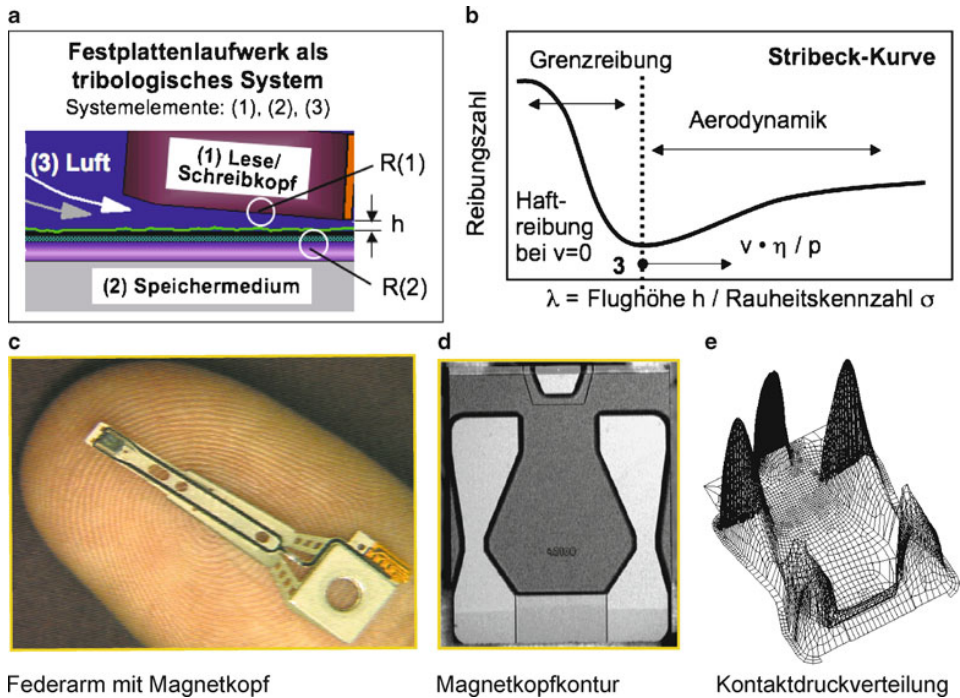
**Abb. 12.5** Funktionsprinzip, Kenndaten und Kinematik eines Festplattenlaufwerks

tering) aufgetragen. Eine dünne, Abnutzung verhindernde Kohlenstoffschicht schützt die Magnetschicht. Auf der Kohlenstoffschicht ist ein dünner Ölfilm aus perfluoriniertem Polyether aufgetragen, welcher die Kohlenstoffschicht und die Magnetschicht schützt.

Für eine hohe Speicherdichte muss der Schreib/Lese-Kopf möglichst dicht – aber durch einen Luftspalt aerodynamisch getrennt – über die Festplatte geführt werden. Die erforderliche „HDD-Aerodynamik“ ist durch geeignete konstruktive Gestaltung des Systems und passende operative Variable zu realisieren, siehe Abb. 12.5.

### 12.3 Mikromechanik und Tribologie in Festplattenlaufwerken

In systemtechnischer Betrachtung ist ein Festplattenlaufwerk ein tribologisches System (vgl. Abschn. 7.3). Es besteht aus den Komponenten (1) Lese/Schreibkopf, auch kurz Magnetkopf genannt; (2) Speichermedium; (3) Luftfilm, siehe Abb. 12.6.



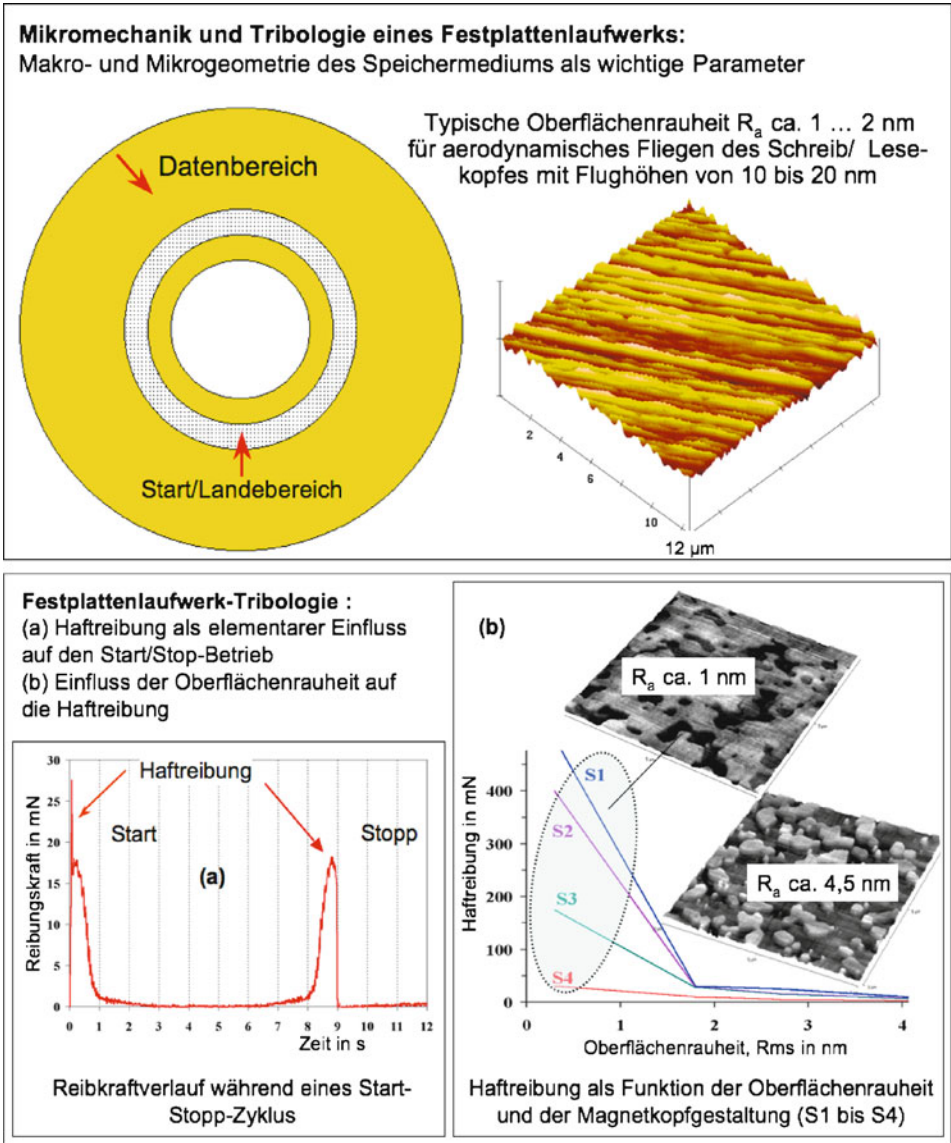
**Abb. 12.6** Die tribologischen Komponenten eines Festplattenlaufwerks und die Stribeck-Kurve

Der Ruhezustand des HDD-Systems ist gekennzeichnet durch die Mikro-Kontaktmechanik. Aufgrund der Magnetkopfkontur ergibt sich eine Kontaktdruckverteilung (siehe Abb. 12.6e) über dem Magnetkopf mit einer resultierenden Gesamtkraft, die mit der Vorspannkraft der Aufhängefeder im Gleichgewicht ist.

Im Betriebszustand hat das tribologische System diese Kennzeichen:

- Bei jedem Start-Lande-Zyklus durchläuft das System die „Stribeck-Kurve“.
- Bei niedriger Rotationsgeschwindigkeit  $v$  ist der Lese/Schreibkopf (1) in Kontakt mit dem Platten-Speichermedium (2); es liegt Grenzreibung vor.
- Bei höherer Rotationsgeschwindigkeit trennt die Aerodynamik (1) von (2).
- Die Flughöhe  $h$  des aerodynamischen Fliegens wird bestimmt durch die Reynolds-Gleichung für kompressible Strömungen. Parameter: Auflagedruck  $p$ , Längs- und Quergeschwindigkeit, Viskosität  $\eta$ , Knudsenzahl.
- Die berührungslose Funktion eines Festplattenlaufwerks erfordert, dass gilt:  $\lambda = (\text{Flughöhe } h / \text{Rauheitskennzahl } \sigma) > 3$ ; die Rauheitskennzahl  $\sigma = f[R(1), R(2)]$  ist durch geeignete Rauheiten  $R(1)$  und  $R(2)$  dementsprechend zu optimieren.

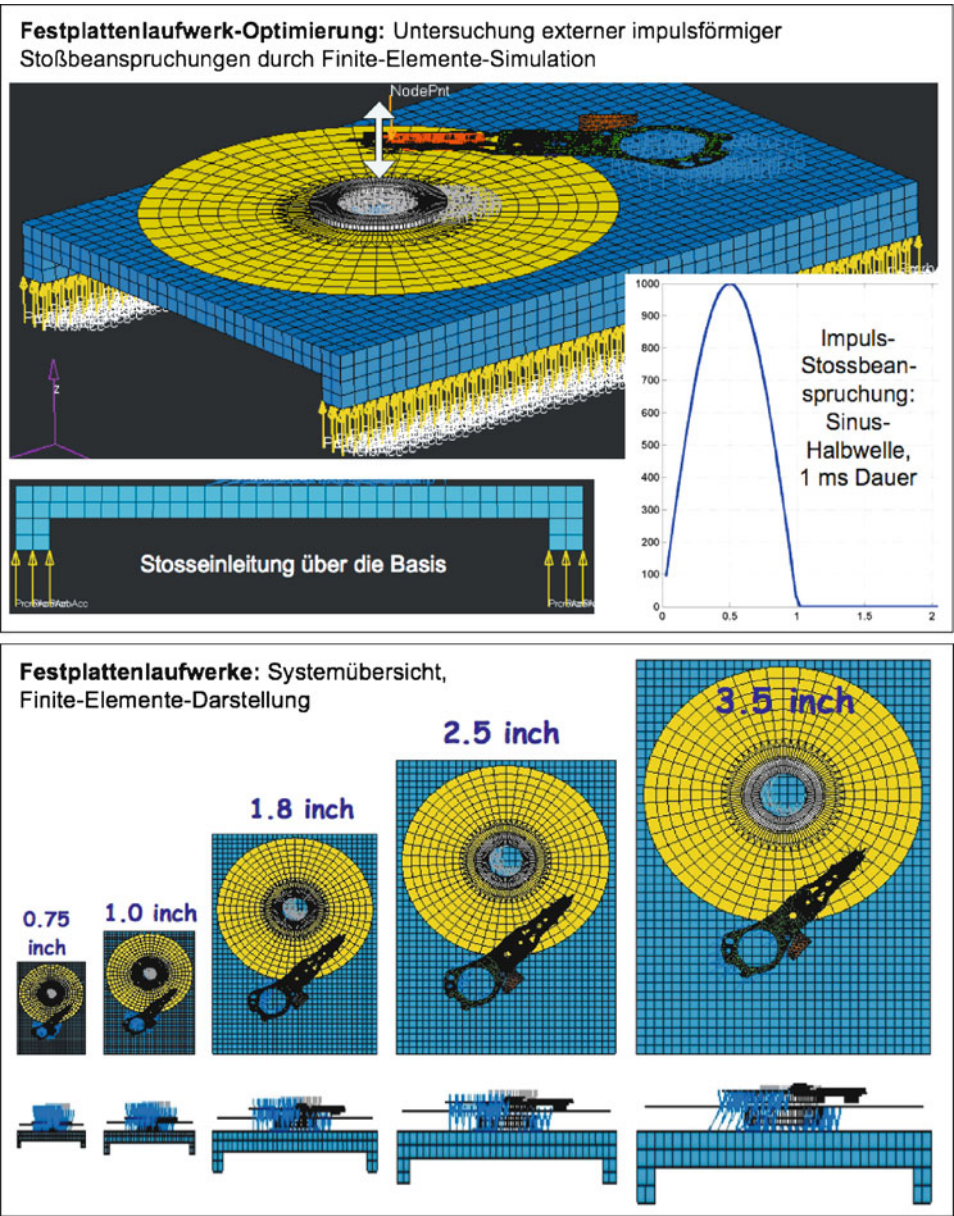
Während der Schreib- und Leseoperation eines Festplattenspeichers fliegt der Magnetkopf über die Festplatte ohne die Platte zu berühren. Wird der Computer ein- oder



**Abb. 12.7** Optimierung von Festplattenlaufwerken durch Makro- und Mikrogestaltung

ausgeschaltet, läuft der Kopf entweder auf der Platte an oder aus und hat Kontakt mit der Festplatte (Kontakt Start-Stop), oder es wird ein besonderer Start/Landebereich vorgesehen. Der Reibungskoeffizient zeigt beim Start- und Stoppbetrieb „Haftreibungs-Peaks“, sie können durch Optimierung der Magnetkopfgestaltung und der Oberflächenrauheit beeinflusst werden, siehe Abb. 12.7.





**Abb. 12.8** Optimierung der HDD-Systemgestaltung durch Finite-Elemente-Methoden

Zur Funktionsoptimierung von Festplattenlaufwerken werden auch Finite-Elemente-Methoden eingesetzt. Abbildung 12.8 illustriert dies für Beispiele der Untersuchung von Computer-Störeinflüssen und der HDD-Systemgestaltung.

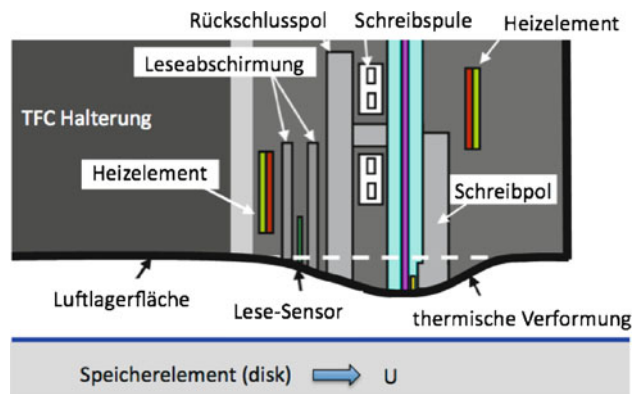
## 12.4 Nano-Interface-Technologie in Festplattenlaufwerken

Die Festplattentechnologie hat in den letzten Jahren weitere große Fortschritte in Bezug auf Kapazität und Speicherdichte gemacht, die noch vor wenigen Jahren als unvorstellbar angesehen wurden. Gegenwärtig ist eine Speicherdichte von fast 1 Terabit/inch<sup>2</sup> erreicht, mit einem Kopf-Plattenabstand von 1–2 nm und einer Spurenbreite von etwa 50 nm (500.000 Spuren pro inch). Die Implementierung dieser winzigen Abmessungen beruht auf einer engen Verbindung von Materialwissenschaft, Mechatronik und Tribologie und ist ein hervorragendes Beispiel für die Nanotechnologie.

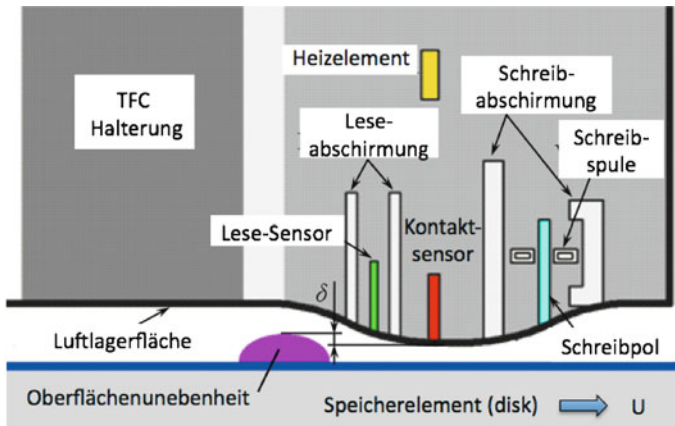
Um einen Kopf-Plattenabstand von 1–2 nm zu erreichen, ist in den letzten Jahren eine „thermo-mechanische Flughöhen-Regelungstechnik“ die sogenannte „Thermal Flying Height Control“ Technik (TFC Technik) eingeführt worden. Diese Technik benutzt die thermische Verformung des Schreib/Lesekopfes durch lokale Erhitzung, und erlaubt den Schreib/Lesekopf dichter an die Speicherplatte heranzubringen, wenn ein Schreib- oder Lesevorgang vorgenommen werden soll. Abbildung 12.9 zeigt das Aufbauschema eines typischen TFC Schreib/Lesekopfes.

Wie in Abb. 12.9 schematisch vereinfacht dargestellt, besteht der Schreib/Lese-Kopf, unter dem sich mit der Geschwindigkeit  $U$  das Speicherelement (disk) bewegt, aus dem Lese-Sensor mit Abschirmungen und dem Schreibkopf mit Schreibpol und Schreibspule (vgl. Abb. 12.2). Zusätzlich zum Schreib- und Leseelement sind eingebettete Heizelemente zu sehen, die in unmittelbarer Nähe des Schreib/Leseelements positioniert sind. Wenn der Kopf zur Datenaufzeichnung oder zum Datenabruf eingesetzt werden soll, wird ein elektrischer Strom am Heizstreifen angelegt, der zu einer thermisch induzierten lokalen Verformung (thermal protrusion) der Luftlageroberfläche des Schreib/Lese-Kopfes führt. Die lokale Verformung bewirkt, dass der Abstand zwischen Kopf und Speicherelement in der Nähe des Schreib/Leseelements verringert wird. Mit einer Erhöhung des Stromes wird die thermische Verformung am Schreibe/Leseelement größer und der Kopf-Plattenabstand kleiner. Je nach der Größe des angelegten Stromes kann ein Kopf-Plattenabstand von 1–

**Abb. 12.9** Das Prinzip der Thermal-Flying-Height-Control-Technik







**Abb. 12.10** Typischer Schreib/Lesekopf mit Kontaktsensor

2 nm erreicht werden. Erfolgt kein Schreib- oder Lesevorgang auf der Platte, wird kein Strom am Heizstreifen angelegt und es tritt auch keine thermische Verformung auf. In diesem Zustand fliegt der Kopf mit einem Abstand von etwa 10–12 nm über die Platte.

### Kontaktsensor

Da direkte Kontakte zwischen Speicherplatte und Schreib/Lesekopf zu Störeffekten und zur Abnutzung führen können, ist es wichtig, dass der Strom am Heizelement so angelegt wird, dass keine Berührung von Kopf und Platte auftritt. Gleichzeitig ist erforderlich, dass der Kopf-Plattenabstand minimiert wird, d. h., dass der Kopf-Plattenabstand so gering wie möglich ist, um ein optimales Lesesignal zu erhalten.

Um den Kopf-Plattenabstand zu optimieren, wird in neueren Magnetköpfen ein zusätzlicher Sensor eingebaut, der sogenannte „Kontaktsensor“, welcher Kontakte zwischen Kopf und Platte misst. Ein Kontaktsensor besteht aus einem dünnen Streifen eines magnetoresistiven Materials positioniert zwischen Schreib- und Lesekopf. Das Aufbauschema eines typischen Schreib/Lesekopfes mit Kontaktsensor ist in Abb. 12.10 dargestellt. Falls eine Oberflächenunebenheit (asperity) auf der mit der Geschwindigkeit  $V$  rotierenden Platte mit dem Kopf in Berührung kommt, findet eine lokale Erhitzung des Sensors am Kontaktpunkt statt, was zur Änderung des elektrischen Widerstands und dadurch zu einer Spannungsänderung des Kontaktsensors führt, die zur Abstandsregelung des Kopf-Plattenabstands genutzt wird.

Bei Anwendungen der Mechatronik in der Fahrzeugtechnik muss die mechatronische Technik im Zusammenwirken mit Mensch und Umwelt gesehen werden. Dementsprechend ist in der Fahrdynamik das Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs allgemein als das Gesamtverhalten des Systems *Fahrer – Fahrzeug – Umwelt* definiert. Der Fahrer als Operator dieses „virtuellen Regelkreises“ beurteilt aufgrund der Summe seiner subjektiven Eindrücke die Güte des Fahrverhaltens. Die elementaren Funktionen des mechatronischen Systems Kraftfahrzeug als Teil dieses virtuellen Regelkreises sind nach der plakativen Darstellung von Abb. 13.1:

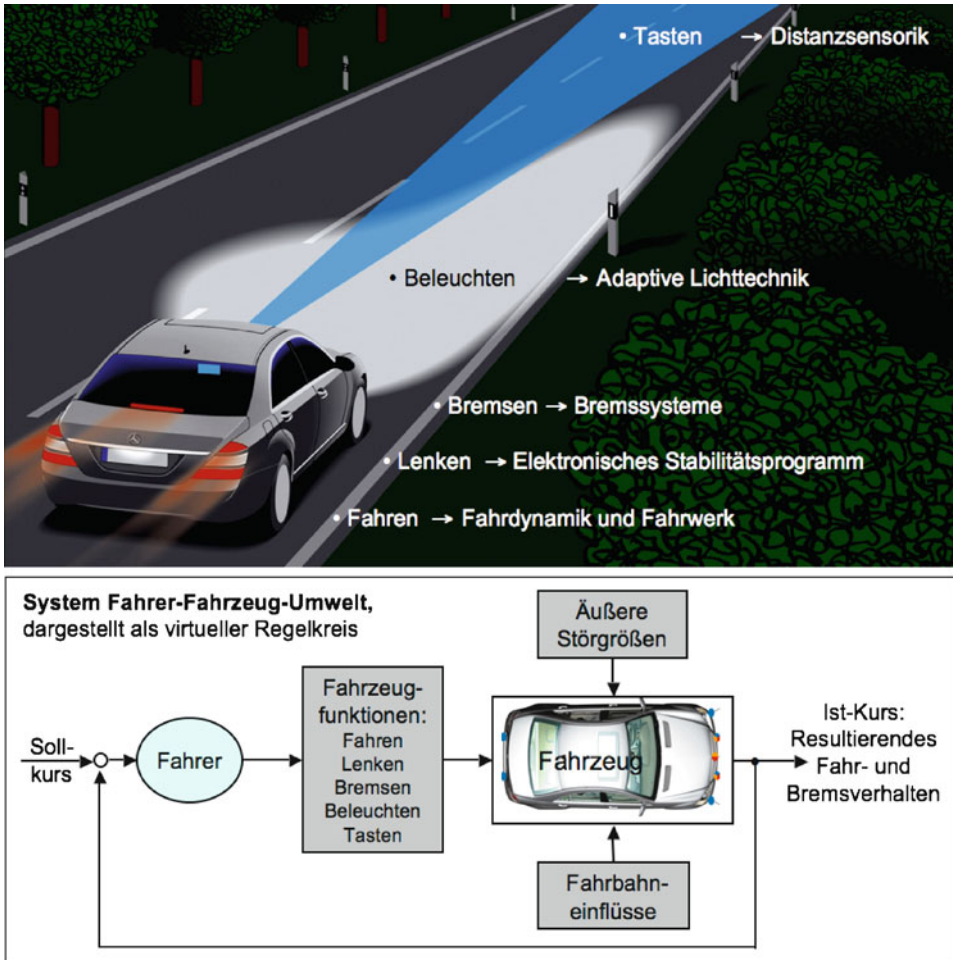
• Fahren • Lenken • Bremsen • Beleuchten • Tasten.

---

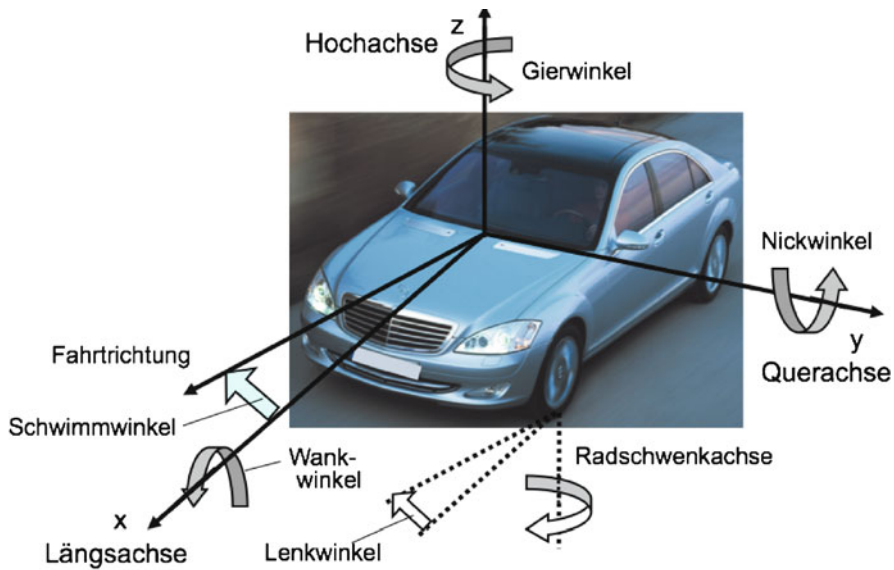
### 13.1 Funktion Fahren: Fahrdynamik und Fahrwerk

Wie jeder Bewegungsvorgang in der Technik muss auch die Fahrfunktion eines Kraftfahrzeugs auf ein Bewegungs-Koordinatensystem bezogen sein. In Abb. 13.2 sind die in der Kraftfahrtechnik verwendeten Bezugsgrößen dargestellt.

Die vom Fahrer vorgegebene Soll-Bewegungsfunktion muss das Fahrzeug technisch umsetzen. Es muss die dafür erforderliche *Fahrdynamik* ermöglichen, die sich aus dem Zusammenwirken von Massen, Federung und Dämpfung des Fahrzeugs ergibt. Zur Optimierung der Fahrdynamik werden heute computerunterstützte Modellierungs- und Simulationsmethoden eingesetzt. In diesem Zusammenhang ist ein retrospektiver Blick auf Feynmans *Analogies in Physics* interessant:

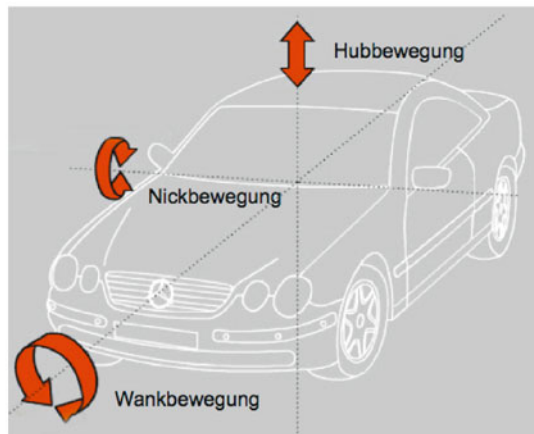


**Abb. 13.1** Das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt und seine elementaren Funktionen



**Fahrdynamik: Bewegungsarten**  
 Den vom Fahrer vorgegebenen  
**Soll-Bewegungsfunktionen**  
 • Geradeausfahrt • Kurvenfahrt  
 können folgende Fahrzeugbewegungen  
 überlagert sein:

- **Hubbewegungen** durch
  - ◆ Beladung und Entladung
  - ◆ Überfahren einer Bodenwelle
  - ◆ Durchfahren eines Schlaglochs
- **Nickbewegungen** beim
  - ◆ Anfahren
  - ◆ Bremsen
- **Wankbewegungen** bei
  - ◆ Kurvenfahrten



**Abb. 13.2** Fahrdynamik: Bezugssystem, Bewegungsarten, Bewegungskenngrößen

**Exkurs:  
Analog in Physics → Analog in Technology**

**Feynman Lectures on Physics, 1963**

Die Modellierung mechanischer Systeme durch elektrische Systemanalogien wurde von Richard Feynman am Beispiel der Fahrdynamik des Systems Automobil wie folgt dargestellt:

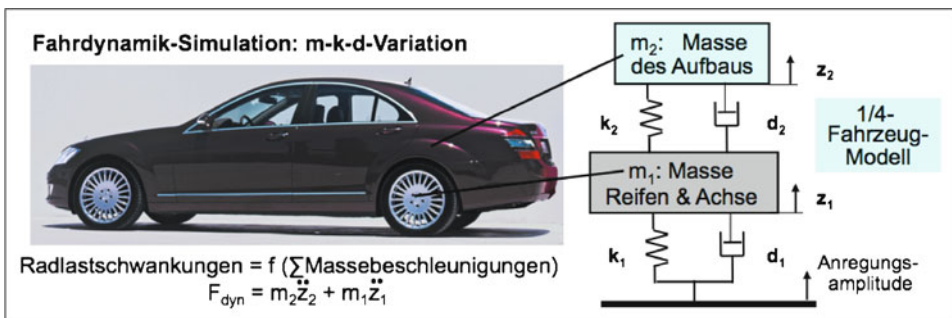
*Suppose we design an automobile, and we want to know its behavior when it goes over a bumpy road. We build an electrical circuit with*

- *inductances to represent the inertia of the wheels,*
- *spring constants as capacitances to represent the springs of the wheels,*
- *resistors to represent the shock absorbers.*

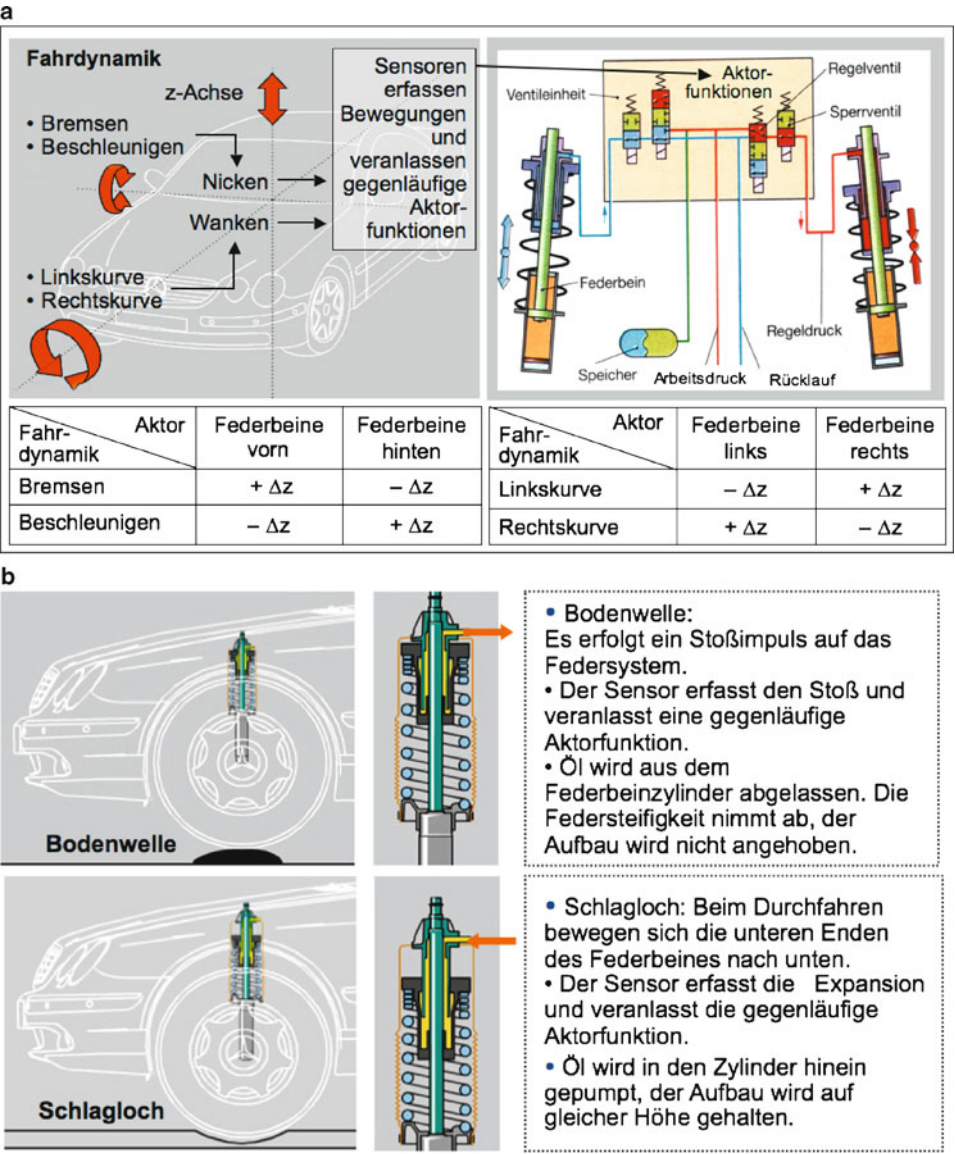
*Then we need a bumpy road. We apply a voltage from a generator which represents this electrically, and then we look at the response. We can adjust all these things electrically. This imitates the problem that we want to solve by making another problem, which has the same equation but is easier to build, to measure, and to adjust. This is an analog computation.*

### Aktive Fahrwerke

Die heutige Fahrzeugtechnik verwendet *Aktive Fahrwerke* (Active Body Control, ABC). Sie optimieren Federung und Dämpfung des mechatronischen Systems Automobil durch Regelsysteme mit Sensoren und Aktoren sowie fahrdynamisch aktiven Bauelementen variabler Federsteifigkeit  $k$  und Dämpferkonstante  $d$ . Abbildung 13.3 zeigt ein 1/4-Fahrzeug-Modell und Abb. 13.4 erläutert die Funktion des aktiven Fahrwerks. Die Federbein-Regelung erfolgt mit vertikal verstellbaren Hydraulikzylindern (Plunger) bei Drücken bis 200 bar. Federkraft und Federsteifigkeit der Federbein-Aktoren werden durch den Öldruck im Hydraulikzylinder eingestellt und einzeln geregelt. Ein Wegsensor am Hydraulikzylinder erfasst die Kolbenstangenstellung und gibt eine Rückmeldung an das ABC-Steuergerät. Regel- und Sperrventile steuern den Ölfluss zum Hydraulikzylinder oder zum Rücklauf. Die Regelventile werden elektromagnetisch betätigt und sind als Ventileinheiten an den Achsen angeordnet. Die Sperrventile schließen bei stehendem Motor oder Fehlern das Regelsystem.



**Abb. 13.3** Fahrdynamik-Modellierung und technische Komponenten



**Abb. 13.4** Funktionsweise des Aktiven Fahrwerks ABC

Bei Fahrzeugen mit ABC wird in Abhängigkeit der sensordetektierten Fahrsituation durch Aktoren die Ölmenge in den Federbeinzylindern je nach Bedarf erhöht (+  $\Delta z$ ) oder reduziert (-  $\Delta z$ ), um die Spannung der Schraubenfeder fahrsituationsunabhängig konstant zu halten. In Abb. 13.4b sind die Aktorwirkungen in Abhängigkeit der einzelnen Fahrdynamiksituationen zusammengestellt. Die Reaktionszeit des mechatronischen Sys-



tems beträgt wenige Millisekunden. Die Räder behalten Kontakt mit der Fahrbahn. Die Lage des Aufbaus bleibt stabil, und er schwingt erheblich weniger als ohne ABC. Niederfrequente Schwingungen bis zu 5 Hz werden von ABC, höherfrequente Schwingungen von den Stoßdämpfern gedämpft.

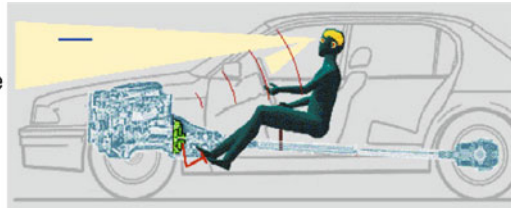
## 13.2 Funktion Lenken: Elektronisches Stabilitätsprogramm

Die Funktion Lenken erfordert das gezielte Zusammenwirken von Mensch und Technik unter Berücksichtigung der Einflüsse von Straßen- und Wetterverhältnissen.

### Funktion Fahren und Lenken

#### Fahrdynamik-Situation:

- Auge und Ohr des Fahrers nehmen die Fahrsituation wahr.
- Durch subjektive Auswertung der Fahrsituation im Gehirn entsteht der Fahrerwunsch des Sollverhaltens.



Der durch den Fahrer über das Lenkrad eingebrachte Lenkwinkel und das Lenkmoment werden sensorisch erfasst und bilden den Input für die mechatronische Fahrdynamikregelung, siehe Abb. 13.5.

Die Fahrstabilität wird durch den Schwimmwinkel gekennzeichnet, siehe Abb. 13.6, Fahrdynamik-Instabilitäten sind durch Seitenwind, Übersteuern, Untersteuern illustriert Abb. 13.7.

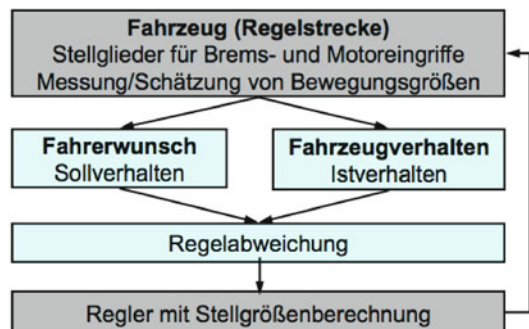
Das **Elektronische Stabilitätsprogramm ESP** soll Fahrdynamik-Instabilitäten entgegenwirken. Das Gesamtsystem wird gebildet durch das Fahrzeug (Regelstrecke), Sensoren, Aktoren und das ESP-Steuergerät, siehe Abb. 13.8.

Die Sensorik des ESP-Systems besteht aus fünf Sensoren zur Fahrdynamikregelung:

#### Fahrdynamikregelung:

Das Elektronische Stabilitätsprogramm **ESP** hat die Aufgabe, durch **Sensorik**, d.h. durch Messungen und Schätzungen von Bewegungsgrößen und **Aktorik**, d.h. gezielte Bremseneingriffe die drei Freiheitsgrade der Fahrzeuggeschwindigkeit in der Ebene in beherrschbaren Grenzen zu halten:

- Längsgeschwindigkeit
- Quergeschwindigkeit und
- Giergeschwindigkeit



**Abb. 13.5** Fahrdynamik-Situation und Fahrdynamikregelung

- Der **Schwimmwinkel** ist der Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und der tatsächlichen momentanen Fahrrichtung.
- Durch Ermittlung des Schwimmwinkels stellt man fest, ob eine stabile oder instabile Fahrsituation vorliegt.
- Solange die Fahrzeuglängsachse in die Richtung zeigt, in die sich das Fahrzeug bewegt, ist der Schwimmwinkel gleich null.
- Bei instabilen Fahrsituationen ist der Schwimmwinkel von null verschieden, dies kennzeichnet „Übersteuern“ oder „Untersteuern“.



**Abb. 13.6** Der Schwimmwinkel als Indikator der Fahrstabilität

1. Lenkrad-Winkel-Sensor,
2. Gier-Drehmoment-Sensor,
3. Beschleunigungs-Sensor,
4. Rad-Drehzahl-Sensor,
5. Bremskreis-Druck-Sensor.

Die Sensorprinzipien sind in Abb. 13.9 dargestellt und stichwortartig beschrieben.

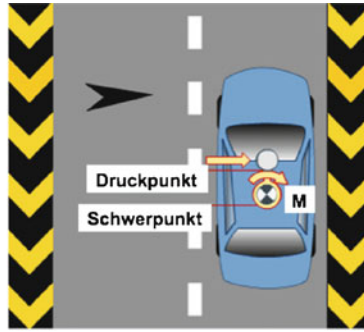
### ESP-Systemzusammenhang

Das ESP-System regelt die Zustandsgrößen der Fahrdynamik-Stabilität Gierrate und Schwimmwinkel zu null. Dem Regelprogramm liegen die maximal mögliche Querbesehleunigung und andere fahrdynamisch wichtige Größen zugrunde. Diese werden in praktischen Fahrversuchen mit einer „stationären Kreisfahrt“ bestimmt (Road Vehicles: Steady State Circular Test Procedure. ISO 4138/82). Dabei wird neben der maximal erzielbaren Querbesehleunigung auch deren Einfluss auf die anderen fahrdynamisch wichtigen Größen ermittelt. Der Zusammenhang zwischen Lenkwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit und Gierrate bildet sowohl bei gleichförmiger Fahrt als auch beim Bremsen und Besehleunigen die Grundlage für die fahrdynamisch stabile Fahrzeug-Sollbewegung. Die zuverlässige Funktion von ESP erfordert auch eine lückenlose Überwachungsmethodik aller Systemkomponenten. Die Sensoren werden während des ganzen Fahrbetriebs durch „out-of-range-checks“ und „analytische Redundanz“ überwacht.

Das System *Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP* erfüllt damit die Aufgabe, durch Sensorik, d. h. durch Messungen und Schätzungen von Bewegungsgrößen und durch Aktorik, d. h. durch gezielte Bremseingriffe Fahrdynamik-Instabilitäten in beherrschbaren Grenzen zu halten. Abbildung 13.10 illustriert dies für die Beispiele der Korrektur des Übersteuerns oder Untersteuerns.

### Fahrdynamik-Instabilität durch Seitenwind

- Der Seitenwind greift nicht am Schwerpunkt des Fahrzeugs sondern am Druckpunkt an.
  - Die Lage des Druckpunkts hängt von der Form der Karosserie ab.
  - Der Abstand zwischen Schwerpunkt und Druckpunkt bildet einen Hebelarm.
  - Der Winddruck erzeugt eine Kraft.
  - Es resultiert ein Drehmoment um die Gierachse, das **Giermoment**
- $$M = \text{Kraft} \times \text{Hebelarm.}$$



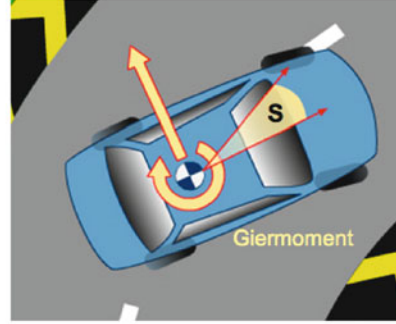
### Instabile Fahrdynamik: Übersteuern

- Das Auswandern der Vorderachse ist kleiner als das der Hinterachse.
- Der Kurvenradius ist kleiner als es dem Lenkeinschlag entspricht.
- Zu starke Drehung des Fahrzeugs.



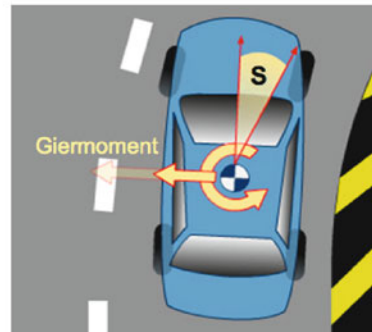
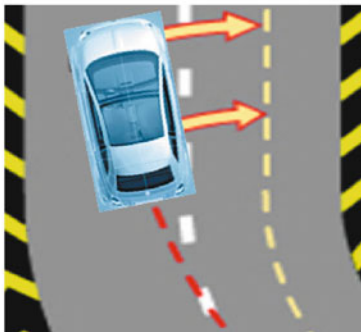
### Merkmale des Übersteuerns:

- Hohe Querbeschleunigung.
- Erhöhter Schlupf an den Hinterrädern.
- Der Schwimmwinkel  $S$  übersteigt den vorgegebenen Grenzwert.
- Es resultiert ein Giermoment  $M$ .

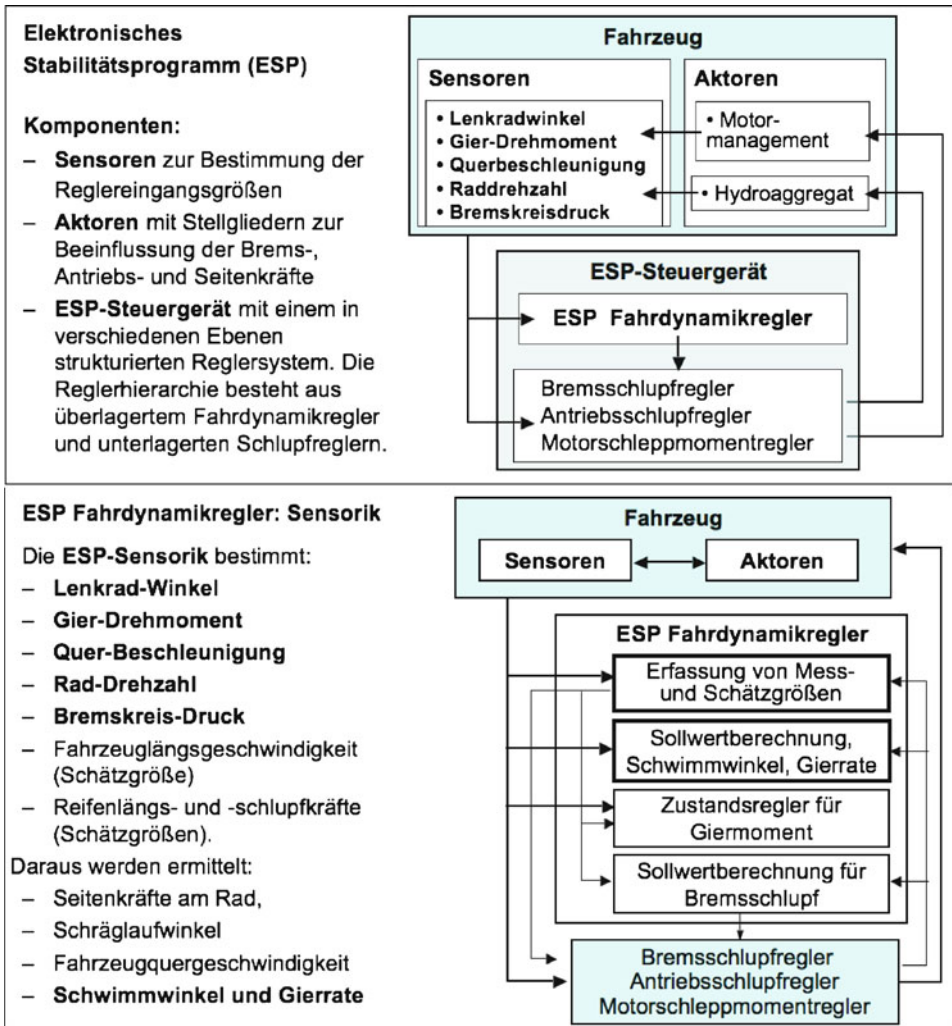


### Instabile Fahrdynamik: Untersteuern

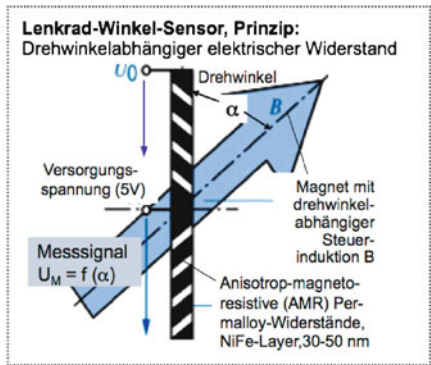
- Die Merkmale sind denen des Übersteuerns entgegengesetzt.



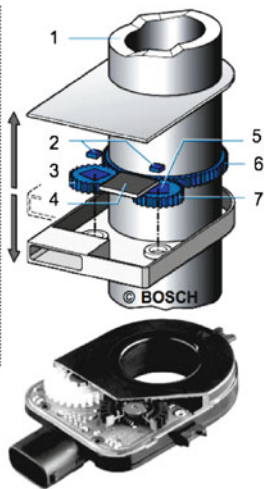
**Abb. 13.7** Instabile Fahrdynamik durch Seitenwind, Übersteuern, Untersteuern



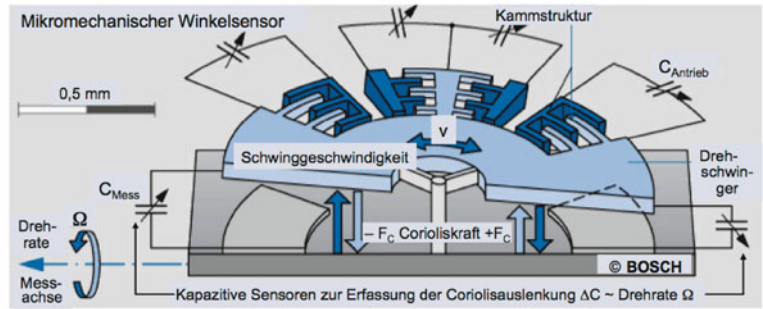
**Abb. 13.8** Das Elektronische Stabilitätsprogramm: Aufbau und Funktion



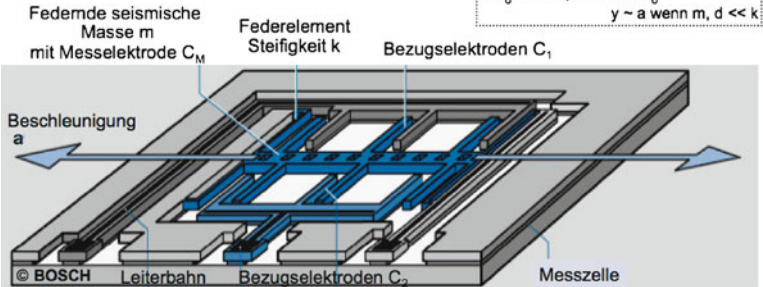
- 1 Lenkwelle, 2 Magnetoresistive Messzellen, 3 Zahnrad mit  $m$  Zähnen, 4 Auswertelektronik, 5 Magnete, 6 Zahnrad mit  $n > m$  Zähnen, 7 Zahnrad mit  $m + 1$  Zähnen  $\rightarrow$  Winkelinformation über vier volle Umdrehungen des Lenkrades



**Gier-Drehmoment-Sensor, Prinzip:** Drehratesensoren (Gyrometer) erfassen zur ESP-Fahrzeugdynamik-Regelung die Drehbewegungen eines Fahrzeugs um seine Hochachse. Corioliskräfte erzwingen an einem elektrostatisch angetriebenen Drehschwinger ( $C_{Antrieb}$ ) eine drehratenproportionale Kippbewegung, detektiert mit kapazitiven Sensoren  $C_{Mess}$ .

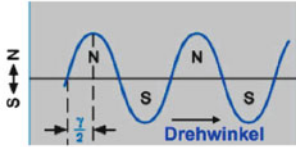


**Beschleunigungs-Sensor, Prinzip:** Die zu messende Beschleunigung  $a$  bewirkt eine Auslenkung der federnd aufgehängten seismischen Masse und damit eine Kapazitätsänderung zwischen Messelektrode  $C_M$  und den beiden stationären Bezugselektroden  $C_1$  und  $C_2$ .

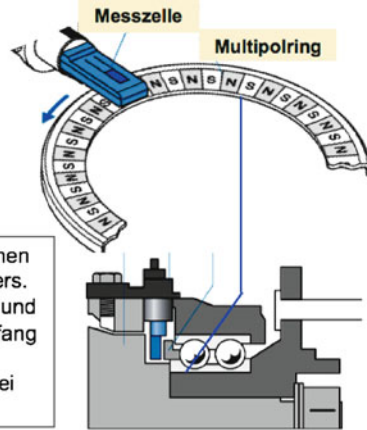




**Drehzahlsensor, Prinzip:**

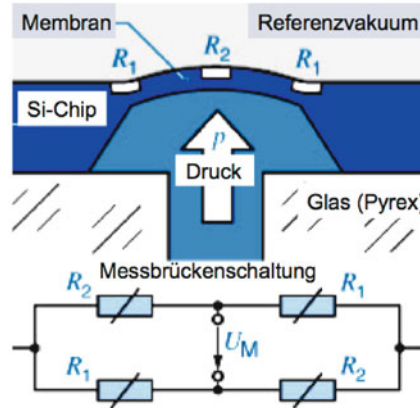


Bei einem aktiven Drehzahlsensor übernehmen Magnete die Funktion eines Impulsratengebers. Die Magnete sind in einem Multipol integriert und in ihrer Polarität wechselseitig auf deren Umfang angeordnet. Die Messzelle detektiert die harmonische Variation des Magnetfeldes bei Rotation des Multipolrings.



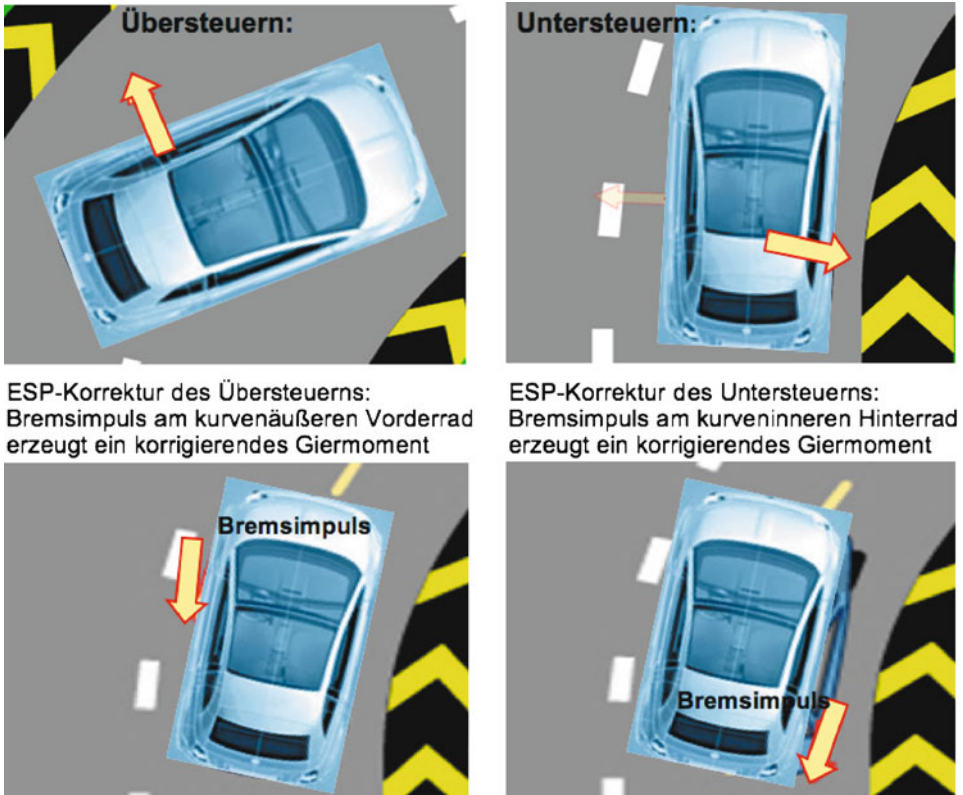
**Drucksensor, Prinzip:**

- Der zu messende Druck bewirkt die Durchbiegung ( $10 \dots 1000 \mu\text{m}$ ) einer Membran, die mikromechanisch in einen Silizium-Chip eingetätzt ist.
- Auf der Membran sind vier Dehnwiderstände eindiffundiert, deren elektrischer Widerstand sich unter mechanischer Spannung ändert (piezoresistiver Effekt).
- Die vier Dehnwiderstände bilden eine Wheatstone-Messbrücke.
- Die dehnbedingten Widerstandsänderungen ergeben eine Messspannung  $U_M$  als Maß für den zu messenden Druck  $p$ .



**Abb. 13.9** Die Sensorprinzipien zur Fahrdynamikregelung





**Abb. 13.10** Wirkungsweise von ESP: Korrektur des Übersteuerns oder Untersteuerns durch gezielte Bremseingriffe

### 13.3 Funktion Bremsen: Bremssysteme

Bremseingriffe mittels ESP, wie auch ganz allgemein die Bremsfunktion von Kraftfahrzeugen – die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges kontrolliert zu verringern oder es im Stillstand zu halten – werden in zweifacher Weise durch die Tribologie beeinflusst:

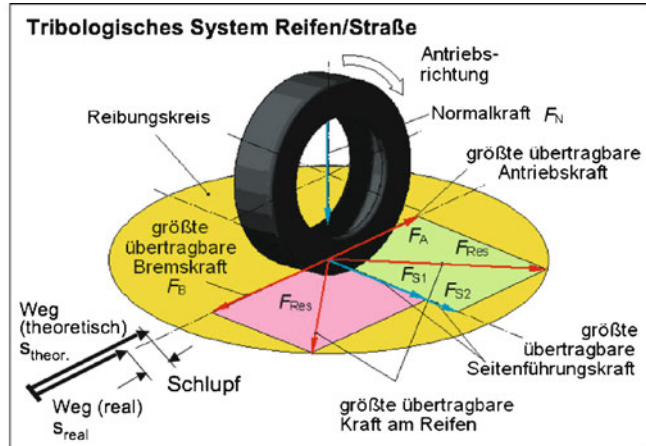
1. Die Aufgabe von Bremssystemen wird technisch über tribologische „Wirkflächenpaare“ in Scheiben- oder Trommelbremsen realisiert.
2. Die Bremsfunktion betrifft das Gesamtverhalten des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt und muss damit die Tribophysik des Systems Reifen/Straße berücksichtigen, siehe Abb. 13.11.

## Tribophysik

- Die größte übertragbare Kraft  $F_{Res}$  am Reifen ist begrenzt durch den Reibungskreis
- Definition: Schlupf  $S$   

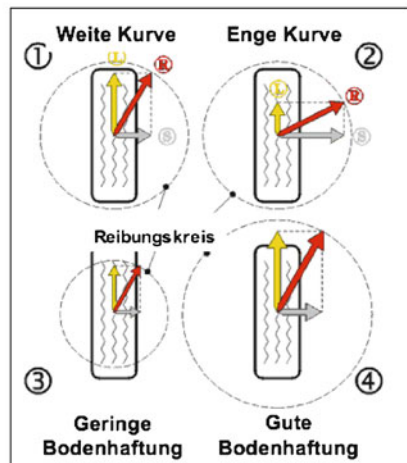
$$S = (s_{theor.} - s_{real}) / s_{theor.}$$
- Maximale Kraftübertragung bei ca. 10 % Schlupf
- Beim Bremsen gilt:  

$$F_{Res} = F_B + F_{S1}$$
- Wenn  $F_{Res} \approx F_B \rightarrow F_s \approx 0$ , d.h. es kann keine Seitenführungskraft übertragen werden: ein blockierendes Rad ist nicht lenkbar.



### System Reifen/Straße: Fahrsituationen, Bodenhaftung und Bremsverhalten

- 1. Weite Kurve: Große Längskräfte ermöglichen gutes Beschleunigungs- und Bremsverhalten.
- 2. Enge Kurve: Die Seitenkräfte nehmen zu und für Antriebskräfte bleibt weniger Potential; das Fahrzeug kann nicht mehr so stark beschleunigt oder gebremst werden.
- 3. Geringe Bodenhaftung (z.B. auf nasser Straße): Die Möglichkeit, enge Kurven zu fahren und die maximal möglichen Antriebs- und Bremskräfte sind eingeschränkt.
- 4. Gute Bodenhaftung (z.B. warmer Asphalt in der Mittagssonne): Kurven können schneller gefahren werden und das Fahrzeug lässt sich stärker bremsen.



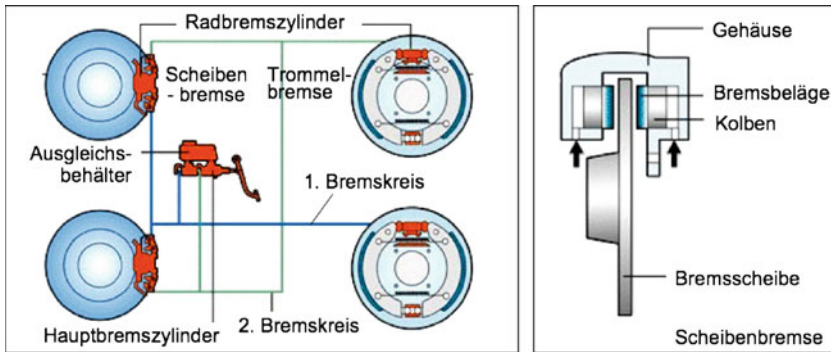
**Abb. 13.11** Tribophysik des Systems Reifen/Straße

## Konventionelles Bremssystem

Die Bremskraft des Fahrers wird mittels Bremspedal-Hebelübersetzung mechanisch-hydraulisch auf Bremskraftverstärker und Hauptbremszylinder übertragen und die Bremskraftwirkung  $F$  an den einzelnen Radbremsen erzielt. Zweikreis-Bremsanlagen bestehen aus zwei getrennten Druckräumen, so dass bei Defekt eines Bremskreises die Bremsfunktion trotzdem erhalten bleibt, siehe Abb. 13.12.

Die konventionellen Bremssysteme der Fahrzeugtechnik sind durch Anwendungen der Mechatronik um folgende Systeme erweitert worden:

- Bremskraftverstärker oder Brems-Assistent (BAS),
- Antiblockiersystem (ABS),



**Abb. 13.12** Aufbau eines konventionellen Zweikreis-Bremssystems

- Antischlupfregelung (ASR),
- Elektrohydraulisches Bremssystem, Sensotronic Brake Control (SBC).

Ein *Brems-Assistent* ist ein Bremskraftverstärker mit einer pedalseitigen Arbeitskammer, die durch eine Membran von der Unterdruckkammer getrennt ist. Der Unterdruck (maximal 0,8 bar) stellt sich bei Ottomotoren bei geschlossener Drosselklappe im Saugrohr ein. Die aus der Druckdifferenz resultierende Kraft auf die Arbeitsmembran bewirkt einen die Fußkraft unterstützenden Kraftanteil. Abbildung 13.13 bezeichnet die hauptsächlichen Module und erläutert ihre Funktion.

*Antiblockiersysteme, ABS* sind Regeleinrichtungen, die als mechatronisch geregelte „Stotterbremsen“ das Blockieren der Räder beim Bremsen verhindern, Abb. 13.14.

♦ **Wegsensor:** Das Mess-Potentiometer erfasst Pedalstellung  $s$  und -geschwindigkeit  $v$ .

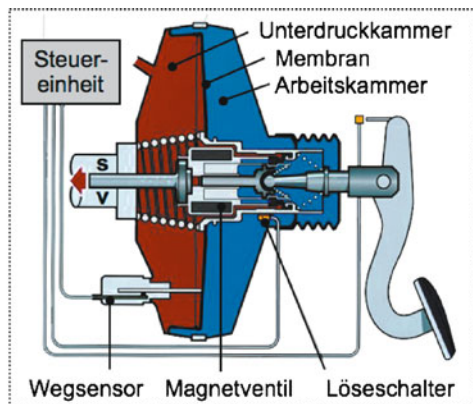
♦ **Steuereinheit:** Das BAS-Steuergerät bewertet die Sensorsignale von  $s$  und  $v$  in einem Soll-/Ist-Wert-Datenvergleich.

#### ♦ Magnetventil

Bei hoher Betätigungsgeschwindigkeit (Notbremsung) wird der Schaltmagnet-Aktor angesteuert, die Arbeitskammer wird belüftet und die volle Verstärkungskraft kann wirken.

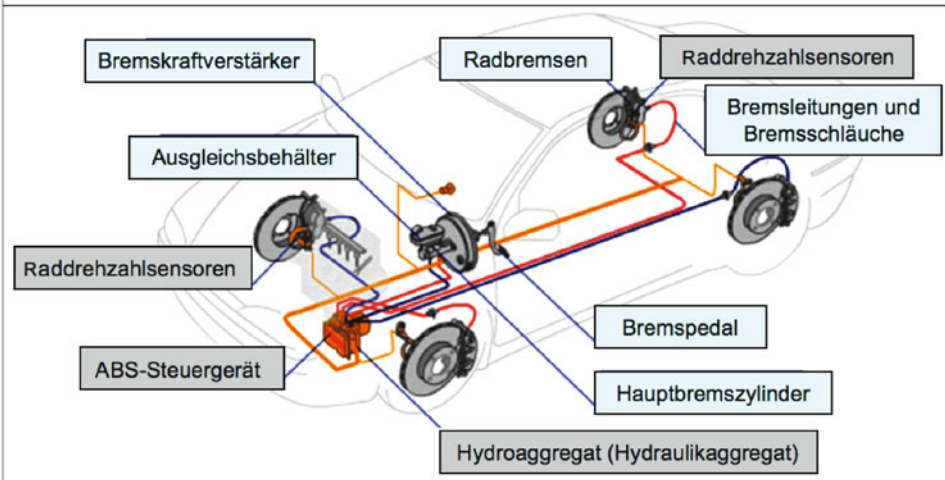
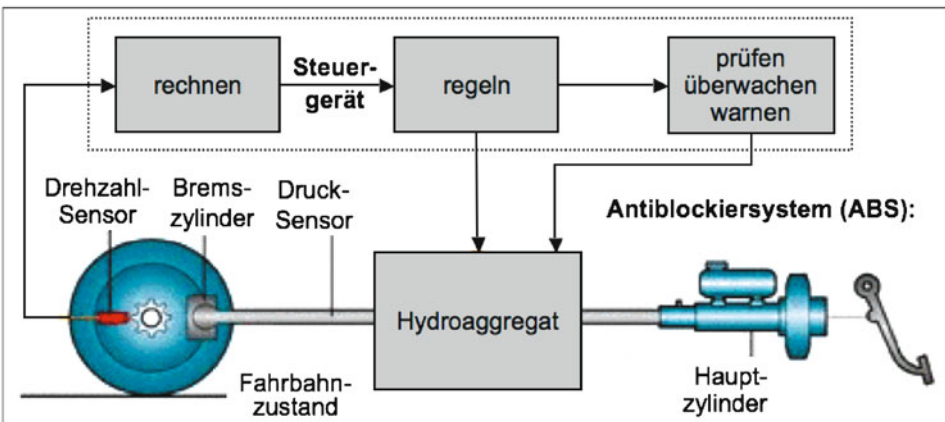
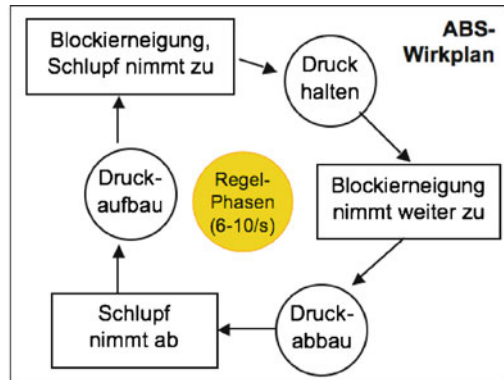
#### ♦ Löseschalter

Der Löseschalter schaltet nach vollständigem Lösen des Bremspedals den Schaltmagneten ab. Die Bremskraftverstärkung ist beendet.



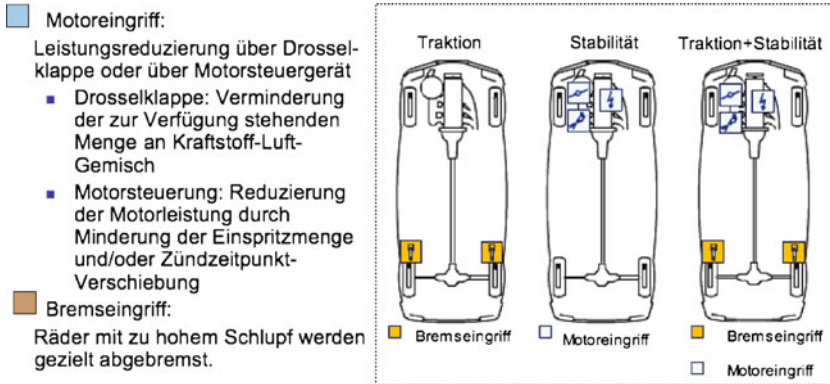
**Abb. 13.13** Bremskraftverstärker

- Die Drehgeschwindigkeiten der Räder werden von Drehzahlsensoren erfasst und dem Steuergerät gemeldet.
- Das Steuergerät berechnet ständig Drehgeschwindigkeit und Schlupf.
- Bei einer Rad-Blockiertendenz erfolgen Stellbefehle an die Magnetventile.
- Der Bremsdruck wird gesenkt, dadurch die Bremswirkung reduziert und das Rad wieder beschleunigt. Wenn es zu schwach gebremst wird, wird es durch eine Druckerhöhung wieder verzögert.
- ABS führt diesen Regelvorgang für jedes Rad einzeln durch.

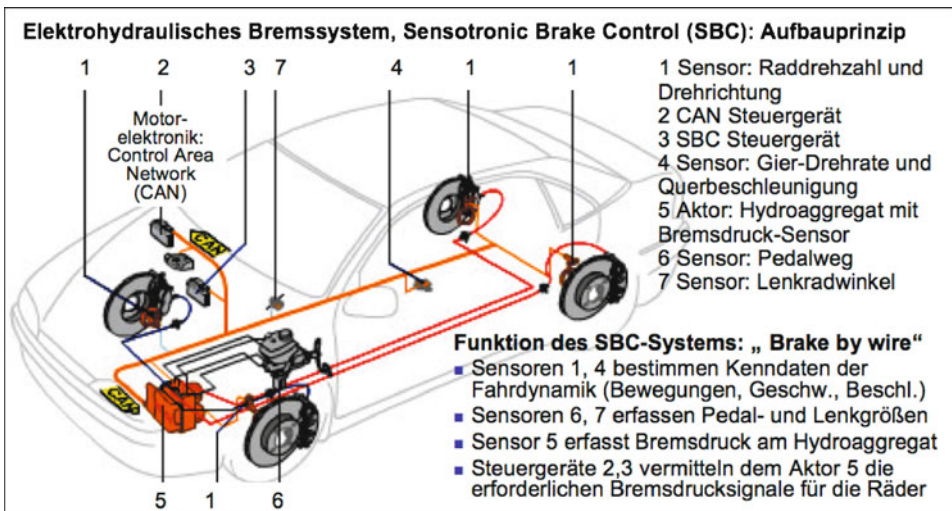


**Abb. 13.14** Antiblockiersystem: Funktionsweise und Aufbau





**Abb. 13.15** Prinzip der Antuschlupfregelung

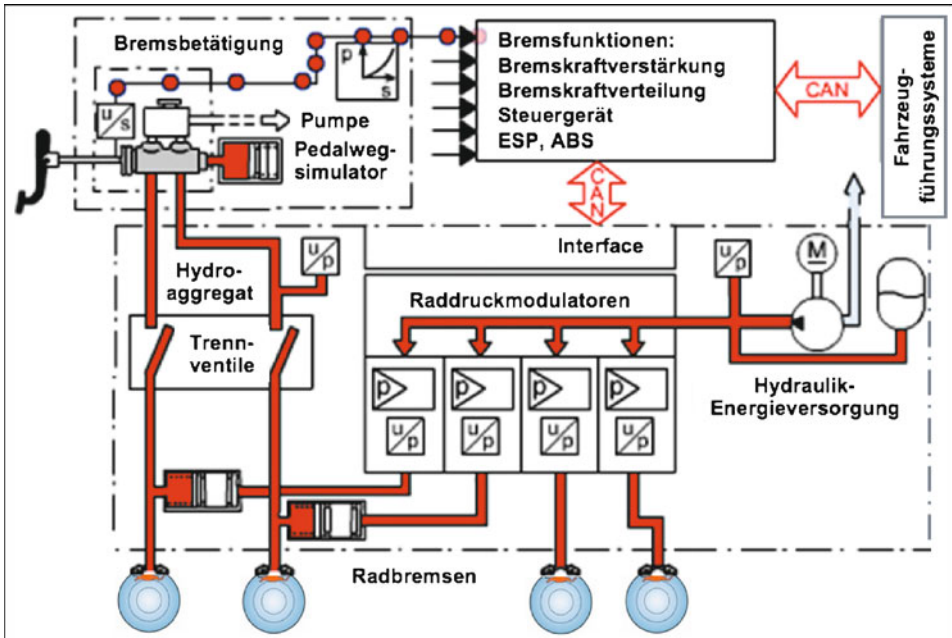


**Abb. 13.16** Das Elektrohydraulische Bremssystem wird englisch als „brake-by-wire“ bezeichnet

Die *Anti-Schlupfregelung*, ASR dient der Optimierung von Traktion und Fahrzeugstabilität, siehe Abb. 13.15, sie arbeitet nach folgendem Prinzip:

- Drehzahlsensoren melden dem Steuergerät die Ist-Räderdrehzahlen.
- Das Steuergerät vergleicht diese Ist-Werte mit den hinterlegten Soll-Werten.
- Bei einer Soll-Ist-Differenz erfolgt Schlupfregelung durch Motor- oder Bremseneingriff.

Das *Elektrohydraulische Bremssystem*, SBC vereint als ein mechatronisches Bremsregelsystem mit elektronischer Sensorik und hydraulischer Aktorik die Funktionen von Bremskraftverstärker, Antiblockiersystem und Elektronischem Stabilitätsprogramm. Die mechanische Betätigung des Bremspedals wird mit Sensoren redundant erfasst und über



**Abb. 13.17** Elektrohydraulisches Bremssystem: Funktion, Wirkzusammenhang und Module

das Steuergerät mittels geeigneter Algorithmen in radindividuelle Steuerbefehle für die hydraulische Bremsdruckmodulation umgewandelt. Abbildungen 13.16 und 13.17 erläutern Aufbau, Funktion, Wirkzusammenhang und Module.

## 13.4 Funktion Tasten: Distanzsensorik

Unter der Funktion „Tasten“ wird die dynamische Abstandsbestimmung bei Vorwärts- oder Rückwärtsfahrt gemäß Abb. 13.18 verstanden:

- *Tastfunktion Rückwärts:* Sensorik-Einparksysteme mit Ultraschall (20–150 cm) oder Radar (bis 11 m) Reichweite.
- *Tastfunktion Vorwärts:* Sensorik zur Abstandserfassung und Erkennung von Hindernissen: Nahbereichsradar (24 GHz) 0,2–30 m; Fernradar (77 GHz) bis 150 m.



Für die Rückwärts-Tastfunktion können mit Ultraschallsensoren Hindernisse erkannt und durch optische oder akustische Mittel zur Anzeige gebracht werden. Abbildung 13.19 erläutert das Funktionsprinzip mit der zweidimensionalen Richtcharakteristik und zeigt das Blockschaltbild des Sensorsystems.

Für die Vorwärts-Tastfunktion werden Radar-Sensoren in dem *Adaptive Cruise Control System*, ACC verwendet. Mit diesen weit reichenden Distanzsensoren ist die automatische Erkennung von Fahrzeugen, die in der Fahrspur voraus fahren und eventuell ein Abbremsen erfordern, möglich, siehe Abb. 13.20.

### 13.5 Funktion Beleuchten: Adaptive Lichttechnik

Für die Funktion Beleuchten des mechatronischen Systems Automobil ist eine fahrdynamisch orientierte Regelung der Lichttechnik in zwei Dimensionen zu realisieren:

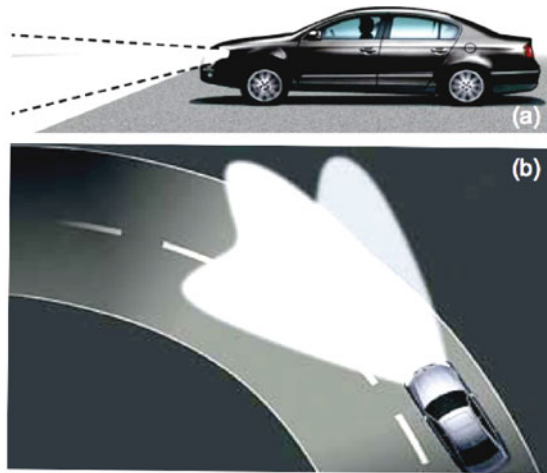
**(a) Leuchtweitenregelung (LWR)**

→ **Statische LWR:** Vertikale Scheinwerferlicht-Höheneinstellung in Abhängigkeit vom Beladungszustand des Fahrzeugs.

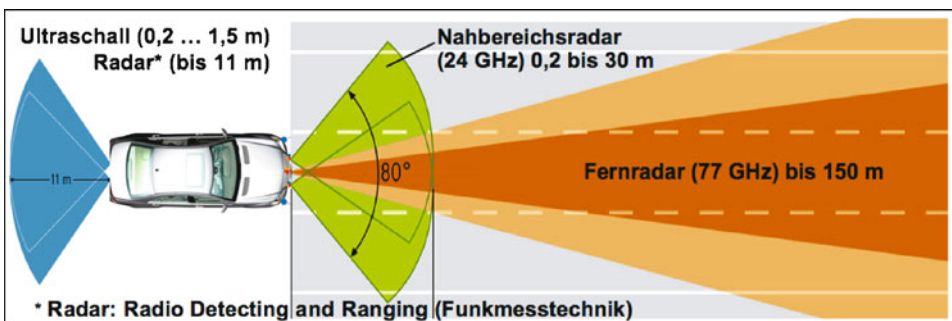
→ **Dynamische LWR:** Ausregelung von Fahrzeugnickbewegungen, z.B. beim Bremsen und Beschleunigen.

**(b) Adaptives Kurvenlicht:**

Fahrtrichtungsgeregelte Horizontalbewegung der Beleuchtung bei Kurvenfahrten.



Zur dynamischen Leuchtweitenregelung müssen Kraftfahrzeug-Scheinwerfer entsprechend der Fahrzeugbewegungen „geometrisch geführt“ werden. Achssensoren erfassen dazu den Neigungswinkel der Karosserie. Das Funktionsprinzip ist in Abb. 13.21 darge-



**Abb. 13.18** Distanzsensorik für die Fahrzeugtechnik

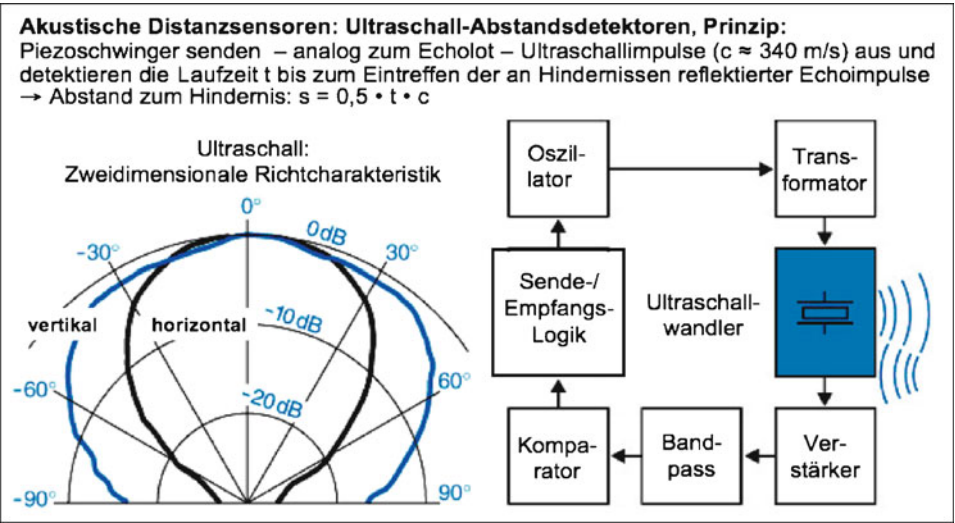


Abb. 13.19 Funktionsprinzip und Blockschaltbild von Ultraschall-Distanzsensoren

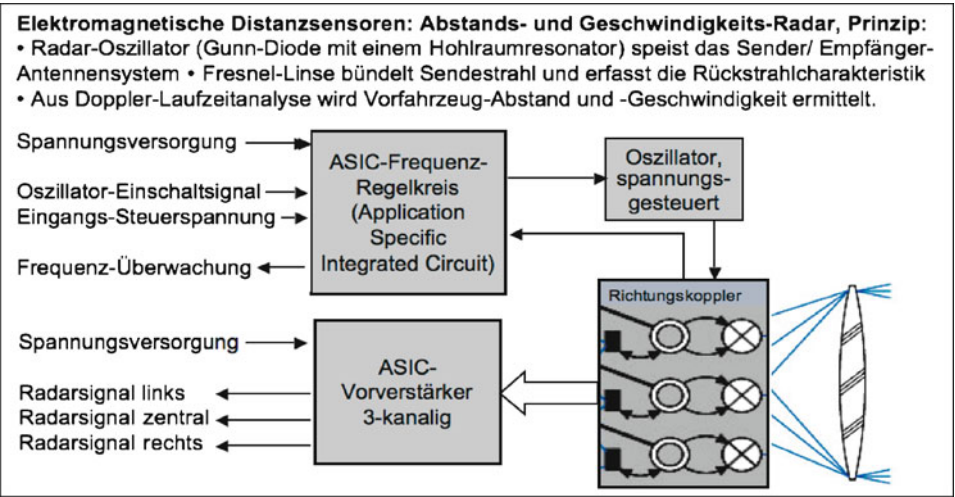
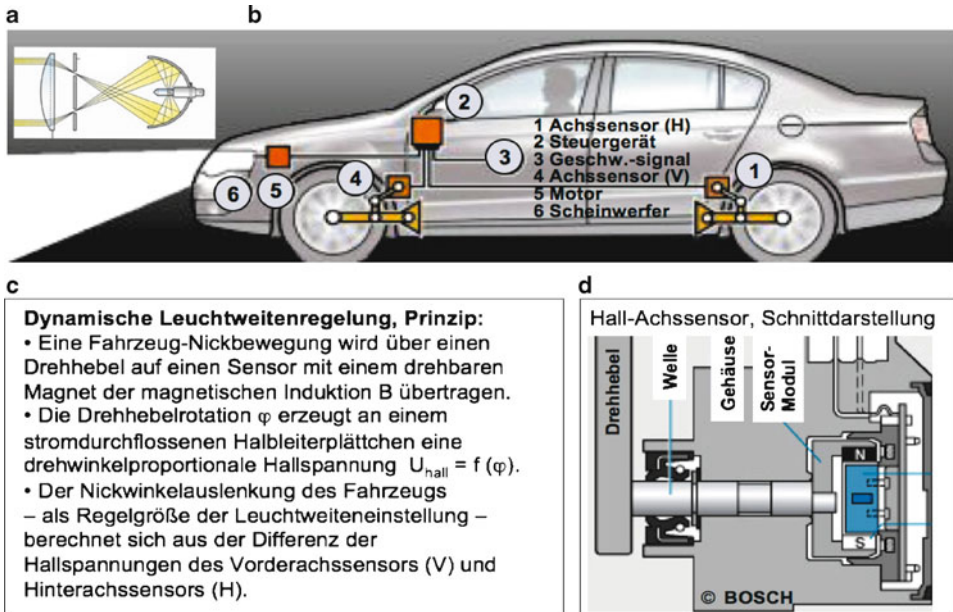


Abb. 13.20 Funktionsprinzip und Blockschaltbild elektromagnetischer Distanzsensoren

stellt. Die dynamische LWR korrigiert somit durch Mechatronik fahrdynamisch bedingte Nickbewegungen bei Brems- oder Beschleunigungsvorgängen.

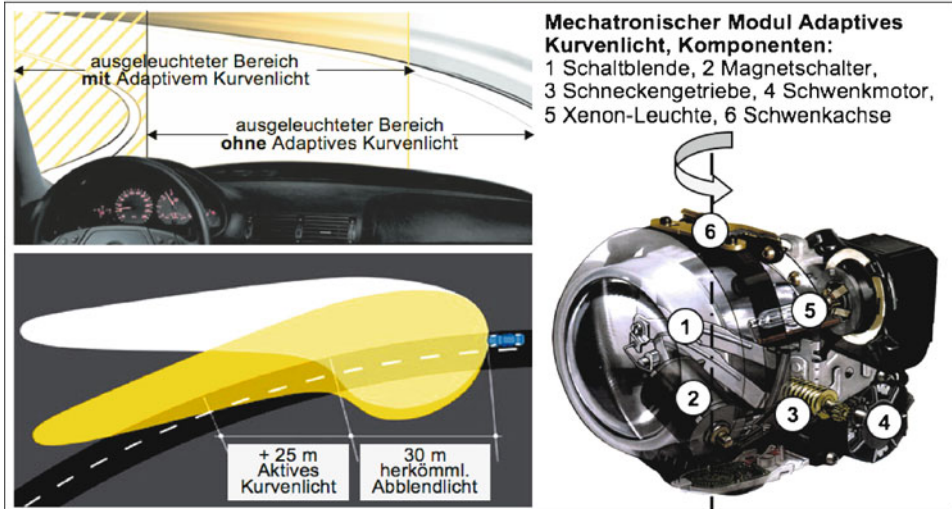
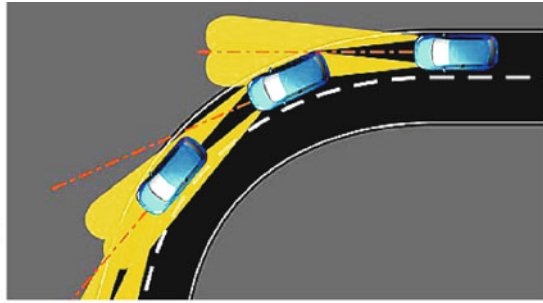
Das Prinzip der adaptiven Lichttechnik in der Fahrzeugtechnik erläutert Abb. 13.22



**Abb. 13.21** Funktionsprinzip und Komponenten der dynamischen Leuchtweitenregelung. **a** Poly-Ellipsoid-System mit Abbildungsoptik für definierte Hell-Dunkel-Grenze

**Adaptives Kuvenlicht: Prinzip**

- Aktorische Regelung eines horizontal schwenkbaren Scheinwerfermoduls, basierend auf der Sensorik von Lenkradeinschlag und Fahrzeuggeschwindigkeit.
- Bei Kurvenfahrten schwenken die Scheinwerfer um  $\pm 15$  Grad. (maximal bis zur Fahrbahnmittellinie in ca. 70 m Entfernung, gesetzliche Vorschrift).

**Abb. 13.22** Adaptive Lichttechnik in der Fahrzeugtechnik

Der Begriff *bauliche Infrastruktur* bezeichnet die Gesamtheit aller Bauwerke, die Aufgaben der technischen Infrastruktur dienen. Die European Construction Technology Platform, ([www.ECTP.org](http://www.ECTP.org)) gibt folgenden Überblick über die spezifischen technischen Funktionen der baulichen Infrastruktur:

- Öffentliche Nutzung (Verwaltung, Krankenhäuser, Theater, Kirchen),  
→ gesellschaftlich-soziale Infrastruktur,
- Wohnen (Wohngebäude), Arbeiten (Industriegebäude), Handel (Märkte, Kaufhäuser),  
→ ökonomische Infrastruktur,
- Transport von Menschen und Gütern (Brücken, Verkehrswege),  
→ Verkehrsinfrastruktur.

Die bauliche Infrastruktur kann in *Infrastrukturbauwerke* und die zugehörige *bautechnische Infrastruktur* untergliedert werden.

**Infrastrukturbauten** sind *Gebäude* im Sinne der Muster-Bauordnung: *Gebäude sind selbstständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen. Sie müssen folgende gesetzliche Anforderungen erfüllen: Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Brandschutz, Wärme-, Schall- und Erschütterungsschutz sowie Schutz gegen schädliche Einflüsse durch Wasser, Feuchtigkeit, pflanzliche und tierische Schädlinge oder andere chemische, physikalische oder biologische Beeinträchtigungen.*

Die **bautechnische Infrastruktur** umfasst alle technischen Netzwerke, d. h. die Gebäudeausrüstungen und Versorgungsnetzwerke. Zur technischen Gebäudeausrüstung gehören Heizungstechnik, Lüftungstechnik und Sanitärtechnik. Weitere Versorgungsnetzwerke sind Energieversorgung, Telekommunikation und Sicherheitsausrüstungen.

## 14.1 Zustandsüberwachung der baulichen Infrastruktur

Infrastrukturbauwerke haben eine vorgegebene Funktion aus den genannten Bereichen der gesellschaftlich-sozialen, der ökonomischen oder der Verkehrsinfrastruktur zu erfüllen. Dem Widerstand des Bauwerkes  $R$  in Form des Zusammenwirkens von Baumaterial und statischem System steht die Einwirkung  $S$  infolge der äußeren Lasten aus der spezifischer Nutzung und der Umwelt gegenüber. Zu jedem Zeitpunkt der Nutzung muss der Widerstand der Bauwerkssubstanz mit ausreichender Sicherheit  $\gamma$  größer sein als die äußere Einwirkung, d. h. es muss gelten:  $R > \gamma S$ . Die Standsicherheit und die Dauerhaftigkeit der baulichen Infrastruktur sind individuell abhängig vom Zustand des verwendeten Baumaterials und der Einhaltung der geplanten Materialparameter, von der Funktionalität des Systems, d. h. der Richtigkeit des Modells für die geplante Nutzung und der Übereinstimmung der Ausführung mit dem Modell sowie den äußeren Lasten während der Nutzung einschließlich der Umweltbeanspruchungen.

Um den Zustand von Infrastrukturbauwerken während der Nutzung beurteilen zu können, kommen bei Inspektionen, periodischer oder Langzeitüberwachung die Elemente der Mechatronik zur Anwendung. Sie sind geeignet, die Strukturintegrität (Structural Health) und die Funktionalität (performance) im Hinblick auf den Alterungszustand von Materialien, Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit unter den gegebenen lokalen Beanspruchungen erfassen zu können.

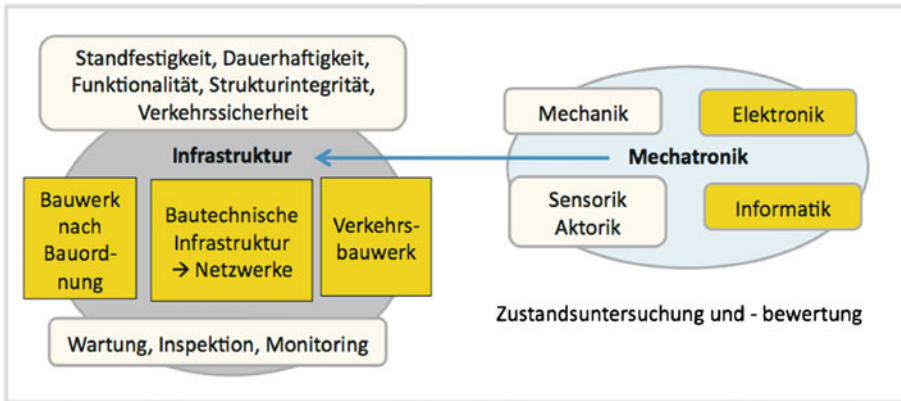
Durch gezielte Anwendung von zerstörungsfreier, quasistatischer oder dynamischer Prüfung mit speziell entwickelter Sensorik und Aktorik können der Zustand des Materials lokal im Bereich vermuteter Schädigungen oder das globale Systemverhalten untersucht werden. Sensoren detektieren Fehlzustände (faults). Die verarbeiteten Sensordaten und ein Soll-Ist-Vergleich ermöglichen die realistische Einschätzung der verbleibenden Bauwerkssicherheit. Nach Auswerten der erfassten Daten und Einfügen in ein Modell kann der Grad der Sicherheit zum Zeitpunkt der Untersuchung abgeschätzt werden. Periodische oder Langzeitmessungen erlauben das Erkennen von Schädigungsmechanismen und das Ableiten von Modellen zur Prognose der Standsicherheit in der Zukunft.

Abbildung 14.1 gibt eine allgemeine Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten der Mechatronik für Infrastrukturbauwerke.

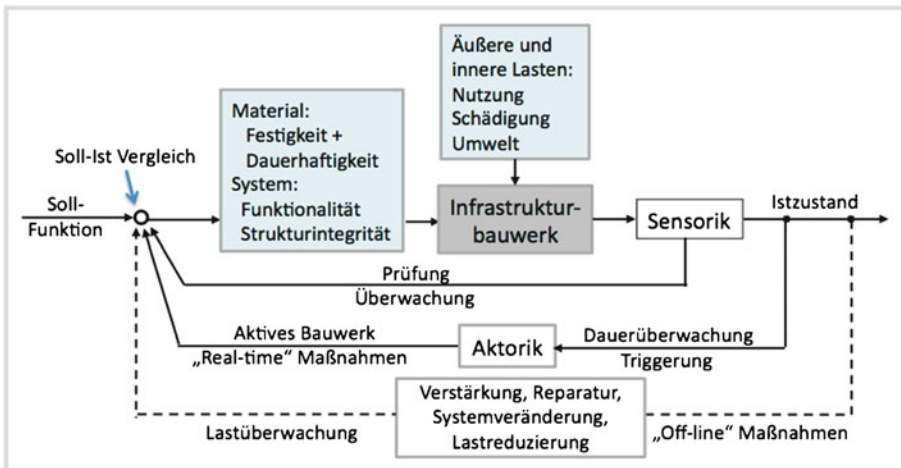
Betrachtet man Infrastrukturbauwerke in Analogie zu anderen Technikfeldern als Technische Systeme mit einer „Soll-Funktion“ und einem zu regelnden „Istzustand“, so können sie gemäß Abb. 14.2 abstrakt dargestellt werden.

Aus dieser Darstellung werden die Aufgaben der Sensorik und Aktorik bei der Prüfung und Überwachung von Infrastrukturbauwerken deutlich. Die Sensorik wird bei lokaler und globaler Prüfung und Überwachung eingesetzt. Bei Überschreitung von Triggerwerten kann Aktorik in Realzeit aktiviert werden, um in das System direkt einzugreifen. Alternativ können Off-line-Maßnahmen wie Reparatur, Verstärkung oder Verringerung der äußeren Lasten (z. B. Korrosionsschutzanstriche, Reduzierung von Achslasten an Brücken oder Schutz vor Hochwasser) eingeleitet werden.





**Abb. 14.1** Anwendungsmöglichkeiten der Mechatronik zur Zustandsüberwachung der baulichen Infrastruktur



**Abb. 14.2** Infrastrukturbauwerke als technische Systeme

Werden zulässige, mittels Sensorik gemessene Grenzwerte überschritten, so können durch geeignete Aktorik auch Maßnahmen in Realtime eingeleitet werden, die die Bauwerksdynamik beeinflussen. Dies kann z. B. durch Bauteile die Schwingungsdämpfungen bewirken und damit auf äußere Störungen, wie z. B. extreme verkehrsinduzierte Schwingungen oder Erdstöße infolge von Erdbeben im Sinne eines mechatronischen Regelkreises reagieren, siehe Abschn. 14.3.3 *Aktive Bauwerke*.

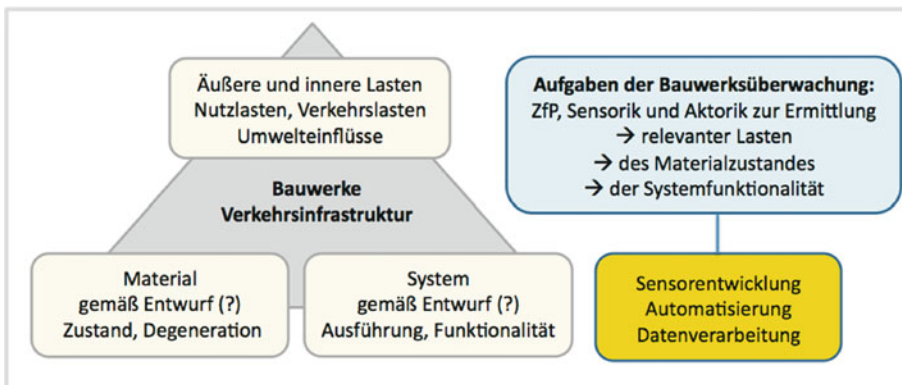
## 14.2 Bauwerksüberwachung mit zerstörungsfreier Prüfung, Sensorik und Aktorik

Die Aufgaben der Zustandsüberwachung von Bauwerken nennt Abb. 14.3 in einer kurzen Übersicht. Die Elemente der Mechatronik wie Elektronik und Informatik sind auch hier eng mit Sensorik, Aktorik, Zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) verbunden und dienen dem Bauwerksmonitoring. Elektromagnetische, akustische oder optische Infrarotstrahlung wird Punkt für Punkt, Linie für Linie entlang von Bauteiloberflächen in direktem Kontakt oder luftgekoppelt in das Bauteil eingeleitet. Ergebnis ist ein dreidimensionaler Datensatz. Die entweder auf der gleichen Seite oder auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils empfangenen und durch Reflexion und Transmission am oder im Bauteil veränderten Signale geben Informationen über die innere Struktur des Bauteils.

Die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen dient in der Regel der Untersuchung von Bauelementen mit folgender Zielstellung:

- Verifizierung der Bauteilgeometrie und der Bauteildicke,
- Verifizierung und Lokalisierung von Stahlbewehrungslagen in Betonbauteilen,
- Bestimmung der Lage von Spannkänen,
- Untersuchung des Verpressungszustands von Spannkänen mit Mörtel zur Reduzierung der Korrosionsempfindlichkeit der Spannstähle,
- Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls,
- Untersuchen der Bauausführung,
- Qualitätskontrolle von Bauteil-Verstärkungsmaßnahmen,
- Detektieren von vorhandenen Rissen (Materialtrennungen),
- Detektieren von akutem Risswachstum.

Die verschiedenen Wellenspektren elektromagnetischer, akustischer oder Infrarotstrahlung sind in Tab. 14.1 dargestellt.



**Abb. 14.3** Aufgaben der Bauwerksüberwachung

**Tab. 14.1** Wellenspektrum

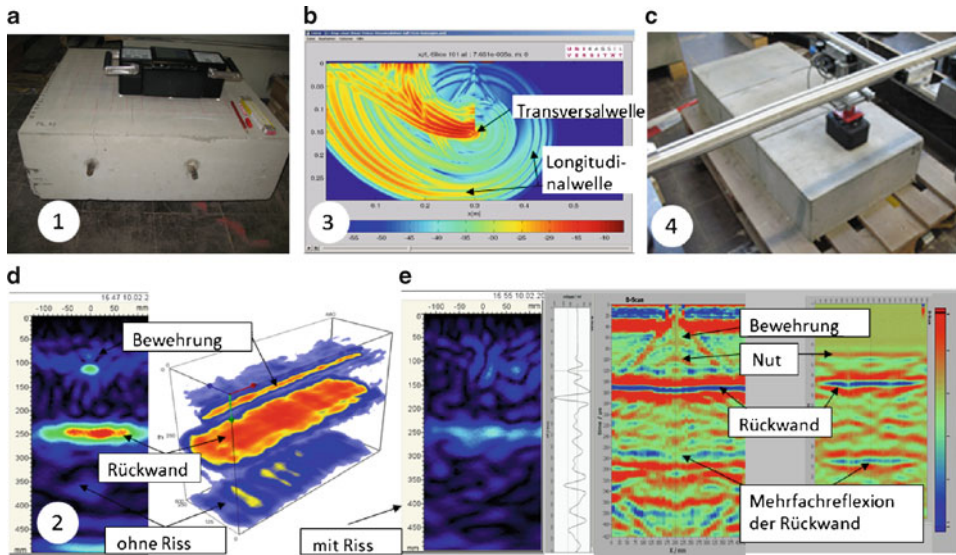
Spektrum	Frequenz	Wellenlänge	Anwendung
Elektromagnetische Wellen	10–100 Hz	$10^3$ – $10^4$ km	Wechselspannung
Hertz-Wellen	$10^2$ – $10^4$ Hz	10–1000 km	Telefon
Schallwellen	< 20 kHz	> 300 m/s	Hörbarer Schall
Langwellen	10 kHz–1 MHz	0,5–10 km	Radio, Radioastronomie Ultraschall
Mittelwellen	~ 1 MHz	~ 500 m	Radio, Radioastronomie
Kurzwellen	1–50 MHz	10–100 m	(Stereo-) Radio
Ultrakurzwellen	~ 100 MHz	~ 1 m	Radioastronomie, TV
Mikrowellen	1 GHz–THz $10^9$ – $10^{12}$	0,1 mm–10 cm	Geführte Radiowellen, Radar, Mikrowellenofen, Hochfrequenztechnik
Infrarotlicht	$10^{12}$ – $4 \cdot 10^{14}$ Hz	1 mm–800 nm	Nachtsichtgeräte Infrarotlampe, Infrarot- thermografie
Sichtbares Licht	$4$ – $8 \cdot 10^{14}$ Hz	800–400 nm	Beleuchtung, Astronomie
Ultraviolettes Licht (UV)	$10^{15}$ – $10^{17}$ Hz	400–10 nm	Sterilisation von Me- dizinischen Geräten, Fotochemie
Weiche Röntgenstrahlung	$10^{17}$ – $10^{21}$ Hz	10 nm–1 pm	Radiografie, Element Identifizierung
Harte Röntgenstrahlung	> $10^{21}$ Hz	< 1 pm	Nuklearphysik, Elementarphysik

Beton setzt sich aus einer Zementmatrix und Gesteinskörnungen zusammen, die durch unterschiedliche Materialparameter akustische oder elektromagnetische Wellen an den Materialgrenzen teilweise absorbieren oder reflektieren können.

Die Wahl der Frequenzen und Wellenlängen für die Anwendungen von zerstörungsfreien an Konstruktionen aus Beton oder Mauerwerk muss die Heterogenität des Baustoffes bzw. der Mauerwerksstruktur berücksichtigen. Im Gegensatz zum homogenen Stahl erfordern inhomogene Baustoffe niedrigere Frequenzen mit größeren Wellenamplituden.

### 14.2.1 Techniken zur Bauwerksüberwachung

**Akustische Verfahren** (Reflexion, Tomografie) basieren auf der Messung von an Grenzschichten reflektierten Ultraschallpulsen (50–300 kHz) zur Untersuchung des Inneren von Bauteilen. Die für Untersuchungen von Betonkonstruktionen am besten geeignete Frequenz akustischer Transversal- und Longitudinalwellen liegt zwischen 50 kHz und 100 kHz (Ultraschall). Aktuelle Forschungen verwenden strukturintegrierte Ultraschallsensoren (embedded sensors) zur Messung von Signalen, die auf Strukturveränderungen hindeuten,

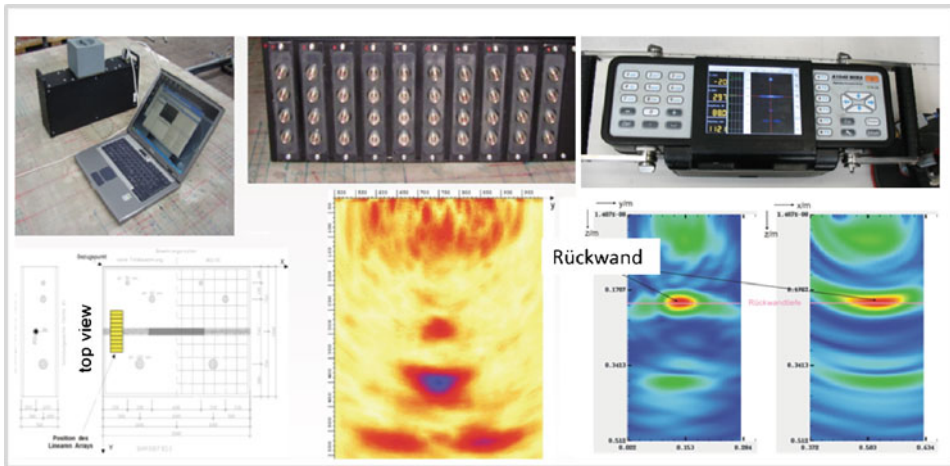


**Abb. 14.4** Risstiefenuntersuchung mit Ultraschallverfahren an dickwandigen Betonprobekörpern. **a** Messung mit Lineararray MIRA, **b** Modellierung der Wellenausbreitung am Riss (Universität Kassel), **c** Automatisierte Messung an einem Probekörper mit definierter Nut mit einem trocken ankoppelnden Transversalwellenarray (A1220, Acsys Moskau), **d** Ultraschallbild des Lineararrays mit und ohne Riss in 2D und 3D, **e** Ultraschallbild in Nutrichtung und senkrecht zur Nut

um große Sensordurchmesser zu vermeiden. Im Abb. 14.4 sind verschiedene Ultraschallverfahren dargestellt, die zur Untersuchung von Rissen senkrecht zur Oberfläche dicker Betonprobekörper eingesetzt worden. Ultraschalldatensätze, die mittels automatisch abgescannter Oberflächen erfasst wurden, ermöglichen die Lokalisierung von Nuten oder Rissen. Die Ermittlung der Nut- oder Risstiefe erfordert die Weiterentwicklung der Datenverarbeitung und die Kommerzialisierung geeigneter Softwarekomponenten.

Die lineare Ultraschall-Gruppenstrahlertechnik mit dem neuentwickelten Linear-Array MIRA arbeitet mit  $10 \times 4$  piezokeramischen niederfrequenten Punktkontakt-Ultraschallsensoren. Dabei werden 90 Ultraschalldatensätze zu einem annähernd in Realzeit dargestellten Ultraschallbild fusioniert, das noch direkt an der Messstelle auf dem Display des Gerätes dargestellt wird. Abbildung 14.5 zeigt im oberen Teil die Gerätetechnik und im unteren Teil die Visualisierung eines Hüllrohres der Spannbewehrung in einem Betonprobekörper.

**Schallemissionsanalyse** bezeichnet ein Verfahren, das die bei aktivem Risswachstum, Korrosion oder tribologisch-verursachten Veränderungen entstehenden Geräusche auch in einem Abstand von der Geräuschquelle erfasst und analysiert. Mit entsprechenden Auswertalgorithmen kann die Schallquelle (z. B. die Rissspitze oder Korrosionsaktivität) lokalisiert werden. Häufig wird nur die Anzahl der Ereignisse (hits) erfasst, die eine bestimmte Triggergröße überschreiten. Der Entstehungsort der Hits wird über die Laufzeit



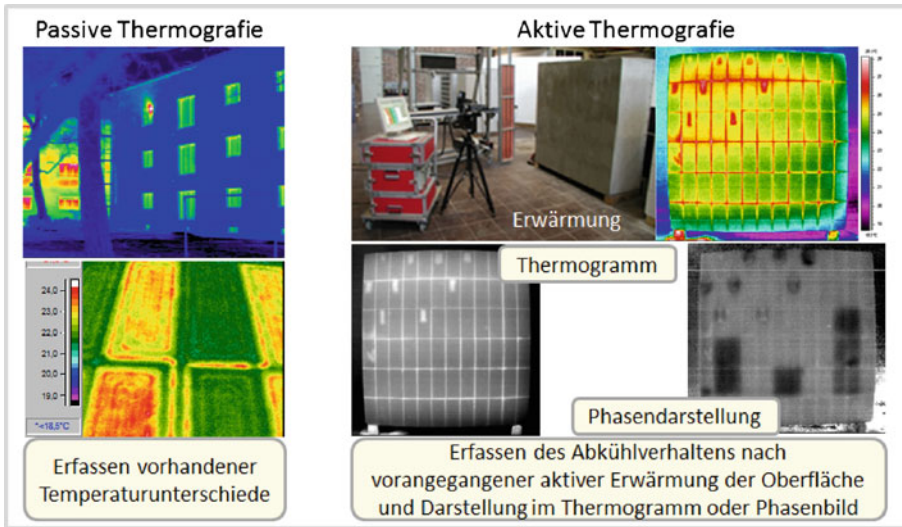
**Abb. 14.5** Gerätetechnik der Ultraschall-Gruppensensorik und Visualisierung eines Spannkannals in einem Betonprobekörper

zurückverfolgt und die Anzahl der Ereignisse Signale kann grafisch geometrisch zugeordnet und visualisiert werden.

**Mikrowellenverfahren** (z. B. Impuls- oder Georadar) sind schnelle, bildgebende Ortungsverfahren unter Verwendung von elektromagnetischen Wellen. Messgrößen sind zu- meist die Laufzeit des Impulses zwischen der Sende- und Empfangsantenne und dem reflektierenden Objekt sowie die Reflexionsamplitude des Impulses. Für die Anwendung an Betonbauwerken werden Antennen mit Frequenzen zwischen 400 MHz und 2,6 GHz verwendet. Elektromagnetische Wellen mit höheren Frequenzen dringen nicht sehr tief in das Bauteil ein, ermöglichen aber hochaufgelöste Darstellung der oberflächennahen Struktur. Sind die Frequenzen niedriger, so kann man geringer aufgelöste Informationen aus größeren Tiefen (bis ca. 80 cm) darstellen.

**Thermografie** ist ein bildgebendes Verfahren zur Messung der von der Oberfläche eines Körpers ausgehenden Infrarotstrahlung, die Strahlungsleistung korreliert mit der Oberflächentemperatur (optoelektronische Pyrometrie, vgl. Abb. 5.79). Bei aktiver Thermografie erhitzt ein Wärmeimpuls eine Oberfläche. Das Abkühlverhalten der Oberfläche ist beeinflusst von Wärmeströmen im Innern des Bauteils und ist ein Maß für im Inneren vorhandene Inhomogenitäten.

Abbildung 14.6 zeigt Beispiele für die Anwendung der passiven und aktiven Thermografie. Die passive Thermografie nutzt Temperaturunterschiede am Bauwerk, die Hinweise auf Wärmebrücken infolge entweichender Wärme aus Bauwerken oder Technischen Infrastruktursystemen wie Fußbodenheizungen gibt. Bei der aktiven Thermografie wird die Oberfläche eines Bauteils erwärmt und der Abkühlungsprozess wird aufgezeichnet. Zur Erhöhung der Aussagekraft von Thermogrammen erfolgt eine Auswertung der Abkühlungskurve in jedem einzelnen Pixel der Aufnahme mit einer Thermokamera. Die



**Abb. 14.6** Aktive und passive Thermografie im Bauwesen

Daten können dann als Thermogramm als Amplitudendarstellung oder als Phasendarstellung visualisiert werden.

### 14.2.2 Automatisierung der Infrastrukturüberwachung

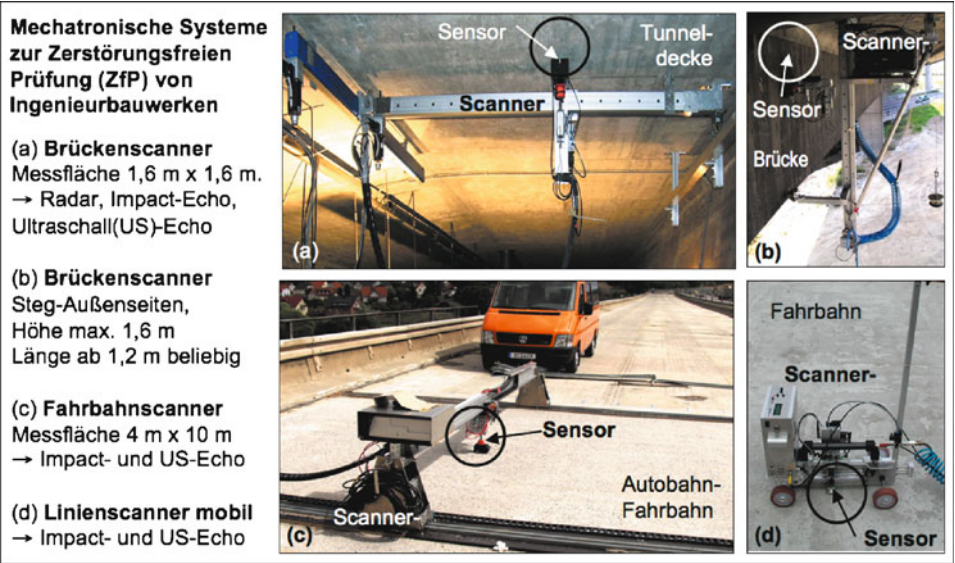
In den letzten Jahren ist die Automatisierung der Infrastrukturüberwachung stetig mit hohem Tempo vorangeschritten. Sensoren, automatisierte Datenerfassung und Datenauswertung werden heute mit integrierten elektronischen Komponenten und automatisierten Abläufen verwendet. Beispiele zeigen die Abb. 14.7 und 14.8.

Die selbstnavigierende Plattform, Betoscan, wurde für die gleichzeitige Erfassung von Zustandsdaten von horizontalen Flächen, z. B. in Parkhäusern entwickelt. Gleichzeitig können in einer Messfahrt Ultraschalldaten, Potenzialfeldmessungen, Radar mit verschiedener Polarisierung und eine fotografische Dokumentation durchgeführt werden. Nach Eingabe des Messrasters und der Messflächengröße navigiert sich die Plattform selbst über Laserabstandsmessungen, Abb. 14.9.

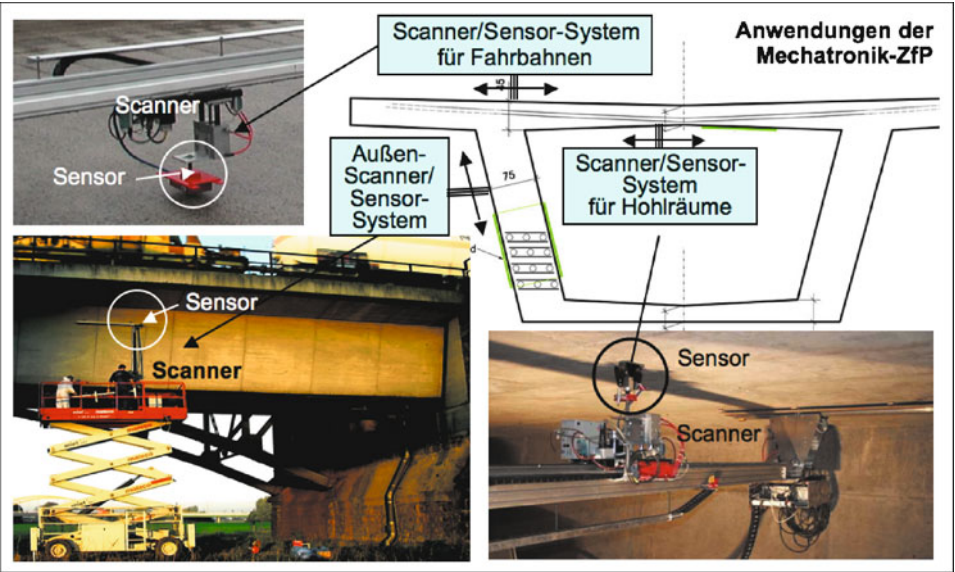
Das Prinzip der Messablaufsteuerung für gleichzeitige mechatronische Bauwerksuntersuchungen mit Ultraschall- und Impactecho-Sensoren ist in Abb. 14.10 dargestellt. Die Messelektronik ist zusammen mit einem Rechner in einem kompakten Gehäuse integriert und über eine Netzwerkverbindung steuerbar. Die Messdaten werden auf einem externen Rechner gespeichert und weiterverarbeitet. Die parallele Messdatenaufnahme mit verschiedenen Sensoren ermöglicht eine *Datenfusion* und erhöht die Aussagegesicherheit.

Durch die Kombination von Scanner/Sensor-Modulen mit der elektronischen Messablaufsteuerung und Daten/Bildverarbeitung ergibt sich eine aussagekräftige mechatroni-

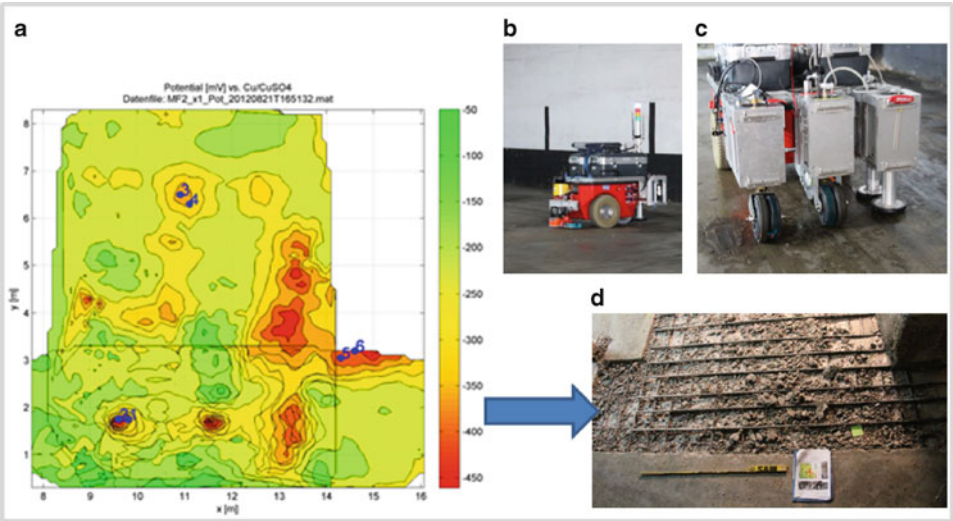




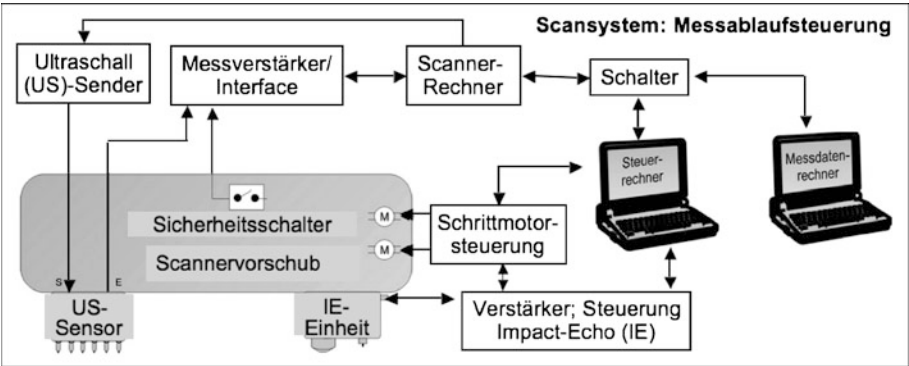
**Abb. 14.7** Zerstörungsfreie Prüfung von Ingenieurbauwerken der Verkehrsinfrastruktur



**Abb. 14.8** Automatisierung der zerstörungsfreien Brückenuntersuchung mittels automatisierter Scannersysteme



**Abb. 14.9** Automatisierung der Datenerfassung mittels selbstnavigierender Plattform Betoscan zum parallelen zerstörungsfreien Erfassen von Zustandsdaten z. B. der Korrosionswahrscheinlichkeit in Parkhäusern, Schädigungsnachweis durch Öffnen der untersuchten Fläche (d)

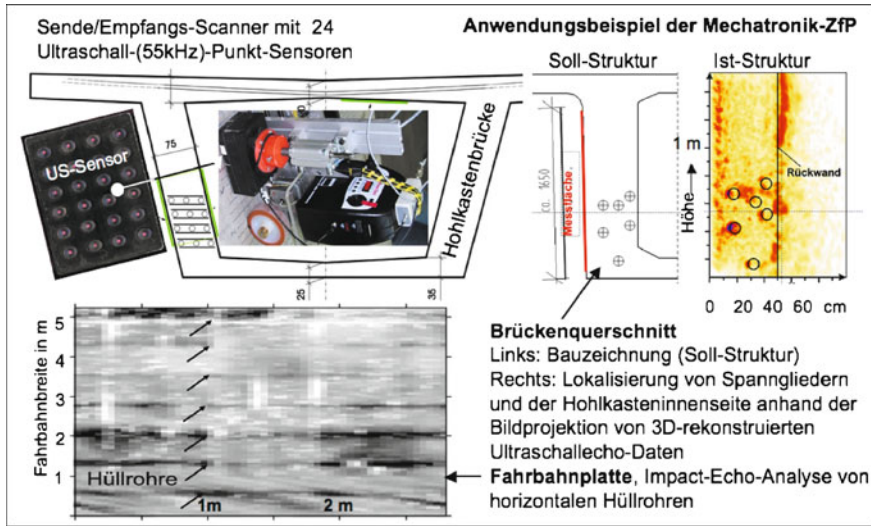


**Abb. 14.10** Messablaufsteuerung für mechatronische Bauwerksuntersuchungen

sche Mess-, Prüf- und Überwachungstechnik für bauliche Anlagen. Abbildung 14.11 illustriert dies für das Beispiel von Brückenbauwerken.

### 14.2.3 Anwendungsbeispiel Hauptbahnhof Berlin

Die Bauwerksüberwachung mit zerstörungsfreier Prüfung, Sensorik und Aktorik ist in neuartiger Weise in den Hauptbahnhof Berlins integriert worden, siehe Abb. 14.12. Auf-




**Abb. 14.11** Ergebnisse der Sensorik baulicher Anlagen: Beispiel Brückenbauwerke

grund der großen allgemeinen Bedeutung des neuen Hauptbahnhofs Berlin informierte das Fernsehen (3sat, 9/11/01) die Öffentlichkeit über diese Innovation der Zustandsüberwachung der baulichen Infrastruktur unter folgendem Titel:

*Ingenieure konstruieren ein System zur Kontrolle von Bauwerken* An allen statisch relevanten Stellen des Bahnhofs – eines der kompliziertesten und komplexesten Bauwerke Europas – wurden von den Experten der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) insgesamt über 200 verschiedenartige Sensoren angebracht. Diese Sensoren beruhen auf ganz verschiedenen Prinzipien. Sie messen Dehnungen, Verformungen und Setzungen und verwenden dabei ganz verschiedene physikalische Prinzipien wie elektrische, optische und mechanische Aufnehmer. So stellen sie sicher, dass saubere Messsignale vorliegen. Die Dehnungssensoren beispielsweise werden direkt am Baukörper angebracht, wo sie jede noch so feine Verformung durch Änderung ihres elektrischen Widerstandes registrieren. Zum Schutz vor Witterungseinflüssen werden sie mit einer Kunststoffschicht bestrichen. Anschließend müssen alle Sensoren verkabelt werden. Über 3000 m Kabel werden in Kabelschächte und durch Hohlräume verlegt, um die Messergebnisse aller Sensoren zusammenzuführen und das Online-Monitoring der gesamten Konstruktion möglich zu machen. Monitoring bedeutet in diesem Zusammenhang, dass man ein Bauwerk von Baubeginn an mit Sensoren bestückt und dann verfolgt, wie sich die Konstruktion verhält. Man kann aber auch andere Größen wie die Temperaturentwicklung eruieren. Am neuen Bahnhof misst jeder Sensor irreguläre Kräfte und liefert Informationen über den Zustand des Bauwerks in Form elektrischer Signale. Die gemeldeten Signale werden in physikalische Einheiten umgerechnet und weiter verarbeitet.

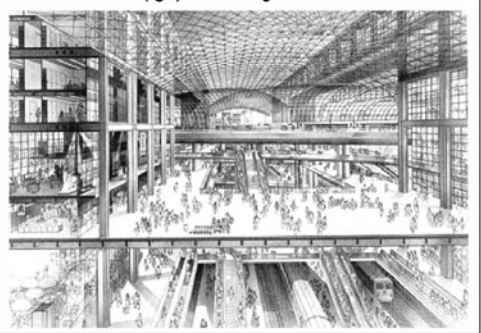


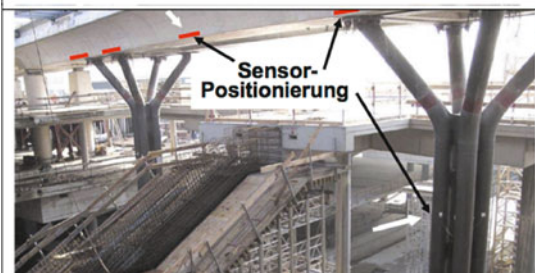


**Hauptbahnhof Berlin:** Größter Kreuzungsbahnhof Europas, eröffnet Mai 2006


**Technikdaten:** 164 000 m<sup>2</sup> Fläche • 4 300 m Zugtrasse • 0,5 Mio m<sup>3</sup> Beton • 85 000 t Stahl • Bahnhofshalle 27 m Höhe, Glasdächerlänge 321 m (O-W), 160 m (N-S) • 5 Verkehrsebenen • 34 Aufzüge • 54 Rolltreppen

**Verkehrsdaten** (tgl.): 1100 Züge • 300 000 Reisende



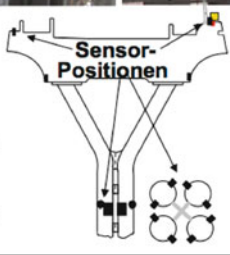


**Sensor-Positionierung**

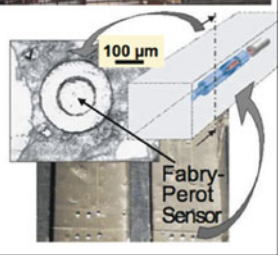


**Sensor-Applikation**

**Hauptbahnhof Berlin**  
Mechatronik zur Bauwerksüberwachung:  
**Sensorik:** mehr als 200 Sensoren (z.T. „embedded“) + 3000 m Kabel + On-line Signal-Monitoring,  
**Aktorik:** „Nivellierungs-Regelkreis“ durch hydraulische Anhebung/Absenkung der dafür konstruktiv speziell ausgebildeten Gabelstützen und Zufügen/Entfernen von Distanzplatten möglich.



**Sensor-Positionen**



100 µm  
Fabry-Perot Sensor



**Abb. 14.12** Der Hauptbahnhof Berlin als Beispiel der Bauwerksüberwachung

Die Visualisierung erfolgt auf dem Gelände der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Ein speziell entwickeltes Computerprogramm wertet die Zustandsdaten aus. So ist ein aktuelles Zustandsbild des Bahnhofs an besonders belasteten Stellen jederzeit abrufbar. Diese neue Dimension in der Tragwerkssicherheit kommt am neuen Hauptbahnhof Berlins zum ersten Mal zum „Tragen“.

9/11/2001



## 14.3 Bauwerksmonitoring

Langzeitüberwachung von Infrastrukturbauwerken mit der wiederholten Erfassung ein und derselben ausgewählten Parameter am Bauwerk wird international als Bauwerksmonitoring bezeichnet. Die Langzeitüberwachung kann entweder lokal in ausgewählten kritischen Bereichen oder global am Bauwerk zum Bestimmen bauwerksspezifischer Parameter erfolgen. Lokal überwachte Parameter sind Dehnungen, Durchbiegungen, Rissöffnungen oder Risswachstum, aber auch von außen auf das Bauwerk einwirkende Faktoren wie Umweltfaktoren (Feuchtigkeit, Temperatur, Windgeschwindigkeiten) oder

Betriebsbeanspruchungen (Verkehrslasten, statische Lasten, Lastkollektive). Zerstörungsfreie Prüfmethoden erfassen in der Regel lokale Inhomogenitäten oder die lokale innere Struktur von Baukonstruktionen. Für dynamisch belastete Konstruktionen ist sicherzustellen, dass durch im Nutzungszustand auftretende Schwingungen nicht die Eigenfrequenz des Bauwerks angeregt wird. Daher ist es von besonderer Bedeutung die modalen Parameter eines Bauwerks zu kennen und im Entwurfsprozess mit Hilfe numerischer dynamischer Modelle zu berücksichtigen.

Kennzeichnend für dynamisch beanspruchte Bauwerke ist häufig ein System von lokalen Beschleunigungen. Sie sind in der Auswirkung beschreibbar durch dynamische Parameter wie Eigenschwingungen, Eigenformen, bauwerkstypische Frequenzen. Die Eigenformen von Bauwerken sind sehr empfindlich auf Veränderungen der Steifigkeit und können zur Identifizierung von Schädigungen herangezogen werden. Dynamische Beschleunigungsmessungen am Bauwerk können sowohl am unbelasteten Bauwerk infolge ambienter Belastung durch Umweltgeräusche oder experimentell mit Impuls-Anregung mittels Impulshammer, servohydraulischer oder elektrodynamischer Anregung bzw. auch durch eine angehängte und abgekoppelte Entlastung durchgeführt werden.

### 14.3.1 Verkehrsbauwerke

Bei Verkehrsbauwerken von besonderer Bedeutung sind Schwingungsbeanspruchungen mit ihren Einflüssen auf die gesetzlich geforderte Standsicherheit und die Bauwerksdynamik. Einige Anwendungsbeispiele des Monitoring von Verkehrsbauwerken zeigt Abb. 14.13.



**Abb. 14.13** Anwendungsbeispiele des Monitoring von Verkehrsbauwerken



**Stichworte zur Methodik:**

Baudynamik – Monitoring – Bauwerksbewegung  
 - Verformungsmessung – Schwingungsmessung  
 - Dynamische Methoden – FFT: Fast Fourier Transformation – Frequenzanalyse – Geophon  
 - Piezoelektrische Folie – Seismische Sensorik.

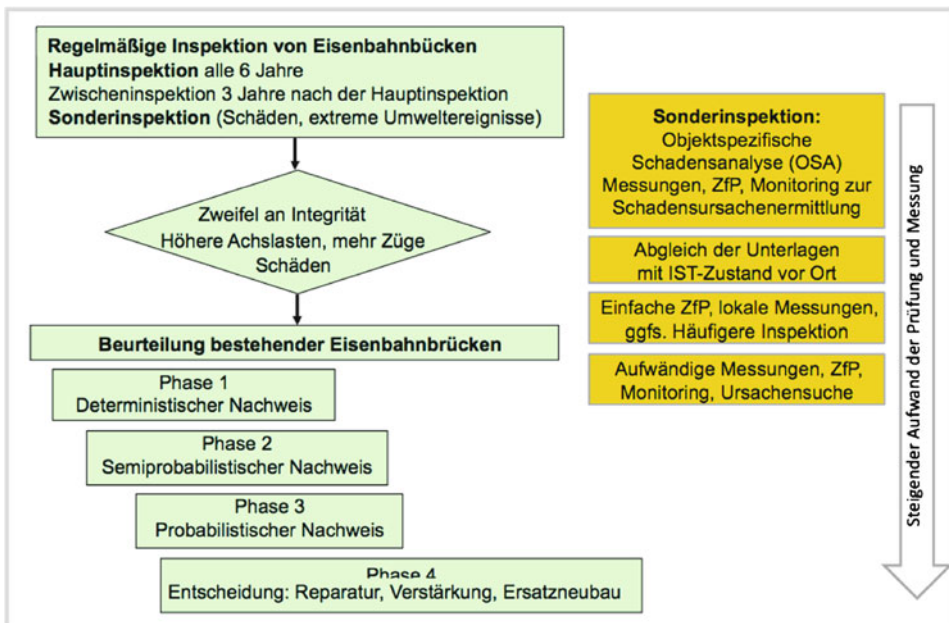
**Schwingungsanalyse am Bauwerk:**

Schwingungsanalysen zur Zustandskontrolle, Schadensdetektion, Tragfähigkeitsbewertung, Langzeitüberwachung, Nutzungsdauer.

**Abb. 14.14** Methodik bauwerksdynamischer Untersuchungen

Das Instrumentarium für bauwerksdynamische Untersuchungen ist im *ZfPBau-Kompendium* ([www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm](http://www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm)) zusammengestellt, Stichworte nennt Abb. 14.14.

Die Inspektion und Überwachung der Verkehrsinfrastruktur basiert in Deutschland im Allgemeinen auf den technischen Regelwerken der Bauwerkseigner. Die Inspektionen von Straßen und Wegen sind allgemein in der DIN 1076 festgelegt. Vielfach werden die Regelwerke der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für das Netzwerk der Bundesautobahnen oder auch von Städten und Gemeinden für lokale Verkehrsbauwerke übernommen.



**Abb. 14.15** Neubewertung bestehender Eisenbahnbrücken (Sustainable Bridges, EU FP6 2003–2007)

Die Deutsche Bahn regelt ihre Bauwerksüberwachung traditionell in der Richtlinie 803 und weiteren bahnspezifischen Regelwerken. Für die Nachweisführung von bestehender Eisenbahninfrastruktur steht die Richtlinie 805 der Deutschen Bahn AG zur Verfügung. Regeln für die Inspektion von Eisenbahnbrücken nennt Abb. 14.15.

### 14.3.2 Windenergieanlagen

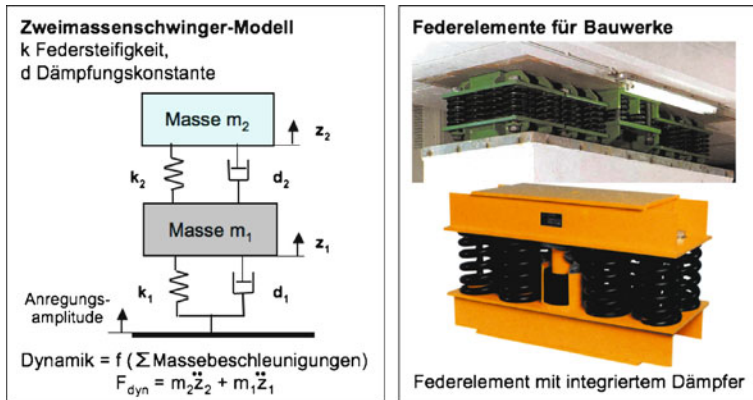
Eine Windenergieanlage ist ein mechatronisches System mit Mechanik-Komponenten (ca. 50 % Kostenanteil) und Elektrik-Komponenten (ca. 25 % Kostenanteil). Es ist aus drei hauptsächlich Baugruppen aufgebaut:

- (1) Rotor mit zwei, drei oder vier Blättern aus faserverstärkten Kunststoffen. Die Rotoren müssen strömungstechnisch so gestaltet sein, dass möglichst eine laminare Umströmung möglich wird, da durch sie mehr Windenergie auf die Rotorblätter übertragen wird als bei turbulenter Umströmung.
- (2) Maschinenhaus mit Generator und einem Getriebe, das die Drehzahl des Rotors so weit heraufgesetzt, dass der Generator die benötigte Drehzahl erhält.
- (3) Turm, dessen erste Biegeeigenfrequenz bei kurzer Bauform oberhalb der Rotordrehzahl („unterkritischer Turm“) oder bei langer Bauform („überkritischer Turm“) unterhalb der Rotordrehzahl liegt, wobei Resonanzfrequenzen zu vermeiden sind.

Turm, Rotor und Rotorblätter sind sehr hohen dynamischen Kräften, die Bauteile und Gesamtkonstruktion zu Bewegungen anregen, ausgesetzt. Erforderlich sind daher sensor-



**Abb. 14.16** Mechatronisches System Windenergieanlage



**Abb. 14.17** Dynamikmodell und industrielle Federelemente für bauliche Anlagen

gestützte Überwachungssysteme für alle wesentlichen Komponenten (Turm, Rotorblätter, Antriebsstrang) insbesondere bei Offshore-Windenergieanlagen. Dabei sind numerische und experimentelle Untersuchungen an baulichen Komponenten zu kombinieren mit Verfahren zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit von Rotorblättern und der Erprobung strukturintegrierbarer Sensorik für die On-line-Bewertung der Anlagenkomponenten. Ein Beispiel für die Anwendung faseroptischer Sensorik (vgl. Abschn. 5.4.2) zeigt Abb. 14.16.

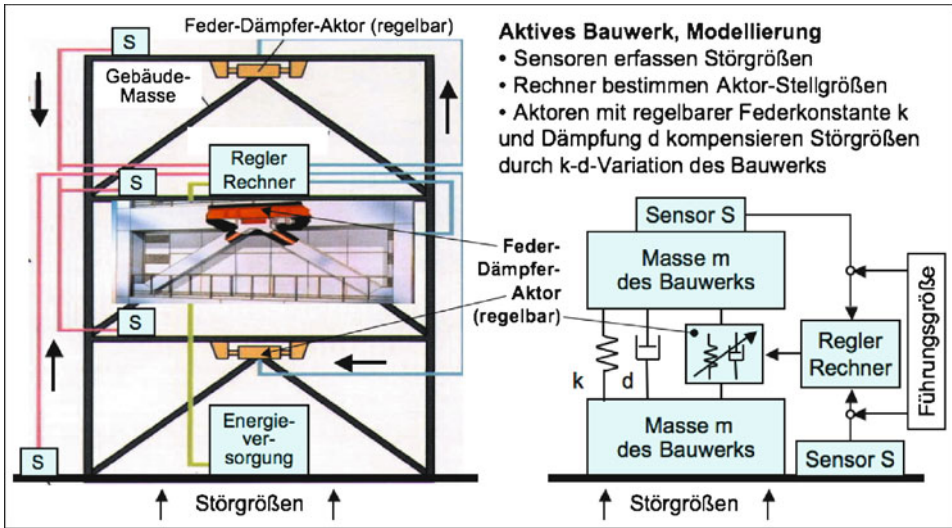
### 14.3.3 Aktive Bauwerke

In Analogie zu den im vorhergehenden Kapitel behandelten „aktiven Fahrwerken“ können durch die Kombination von Sensorik und Aktorik bauliche Anlagen als „aktive Bauwerke“ modelliert werden. In Abb. 14.17 ist das bekannte allgemeine „Zweimassenschwinger-Modell“ zusammen Federelementen, die als „Schwingungstilger“ eingesetzt werden können, dargestellt.

Die Anwendbarkeit derartiger Modelle auf „immobile“ bauliche Anlagen ist natürlich unter Berücksichtigung der bauwerksspezifischen Definitionen der Masse-Feder-Dämpfer-Komponenten und ihrer relevanten Parameter genau zu prüfen. Die Modellierung einer baulichen Anlage als mechatronisches System zeigt Abb. 14.18.

## 14.4 Sensorik historischer Baustrukturen

Die Methoden der Sensorik und der *Zerstörungsfreien Prüfung ZfP* (*Non-Destructive Testing, NDT*) können natürlich auch auf historische Bauwerke angewandt werden. Die Europäische Union (EU) fördert diese Technologien im EU-Forschungsprogramm *Die Stadt von Morgen und das Kulturelle Erbe* mit folgendem Projekt:



**Abb. 14.18** Mechatronik baulicher Anlagen: Modellierungsmodell eines aktiven Bauwerks

### On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings

- The research project will provide improved methodologies for the evaluation of the structure of historic masonry Cultural Heritages.
- The approach will be to mature a diagnostic methodology based on Non-Destructive Testing (NDT) techniques.
- The technological goals are to develop:
  - positioning sensors for effective data acquisition,
  - software for combined data analysis and reconstruction, and
  - to improve existing and to develop new models for structural evaluation.

Die Weiterentwicklung der Sensorik zur Diagnostik historischer Baustrukturen des europäischen Kulturerbes wurde 2001–2004 in einer interdisziplinären Kooperation von Institutionen aus Deutschland, Italien, Schweden, Slowenien, Spanien und Tschechien unter Federführung der BAM, Berlin, mit Fallstudien an ausgewählten Bauwerken durchgeführt, siehe Abb. 14.19.

Bei dem europäischen Sensorik-Projekt wurden neben Akustischen Verfahren, Mikrowellenverfahren und der Thermografie auch Methoden der Mikroseismik und der Geoelektrischen Sensorik weiterentwickelt, siehe Abb. 14.20.

### Sensorik von Bauwerken des Weltkulturerbes

Beim Alten Museum auf der Museumsinsel in Berlin konnten mittels Ultraschall-Tomografie, Radar und Thermografie detaillierte Analysen für die historische Rekonstruk-





Abb. 14.19 Bauwerke des kulturellen Erbes in Europa, untersucht mit Sensorik und ZiP

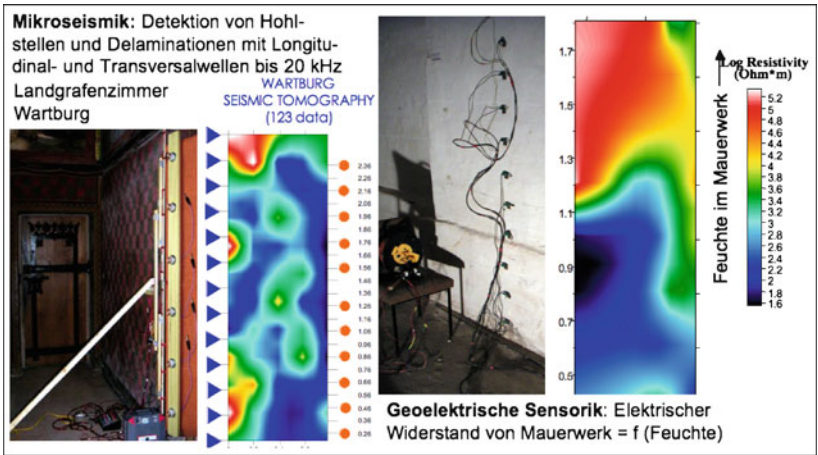


Abb. 14.20 Übersicht über die Methoden der Mikroseismik und der Geoelektrischen Sensorik

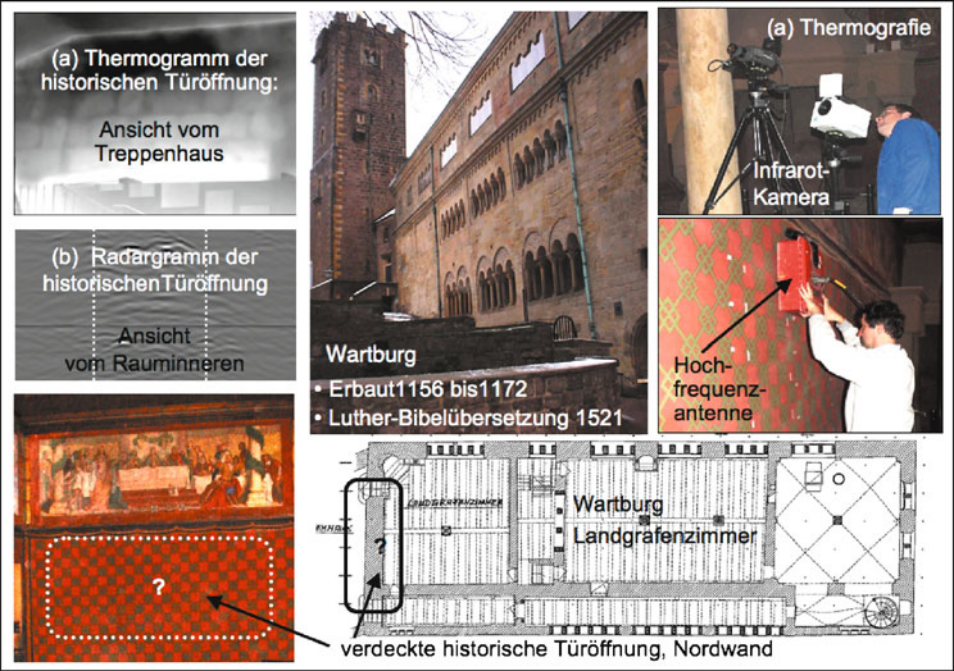


**Abb. 14.21** Anwendung der Sensorik auf historische Bauwerke: Schinkels Altes Museum, Berlin

tion der weltberühmten Säulenstrukturen der Außenfassade und der Rotunde durchgeführt werden, siehe Abb. 14.21.

Durch die Kombination von Thermografie, Radar und Mikroseismik ließen sich bei der Wartburg in Eisenach – ältestes Burg-Wohngebäude in Deutschland und Weltkulturerbe der UNESCO – historische Baustrukturen exakt bestimmen, siehe Abb. 14.22.



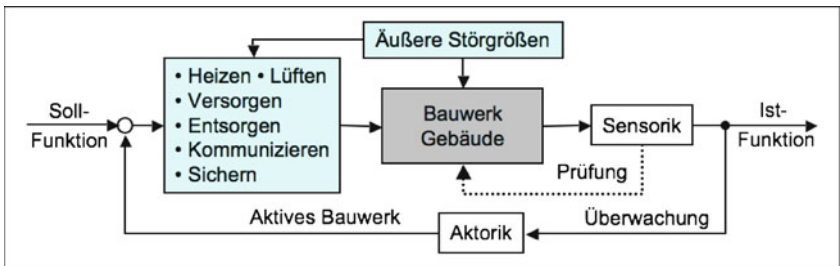


**Abb. 14.22** Anwendung der Sensorik auf historische Bauwerke: Wartburg, Eisenach

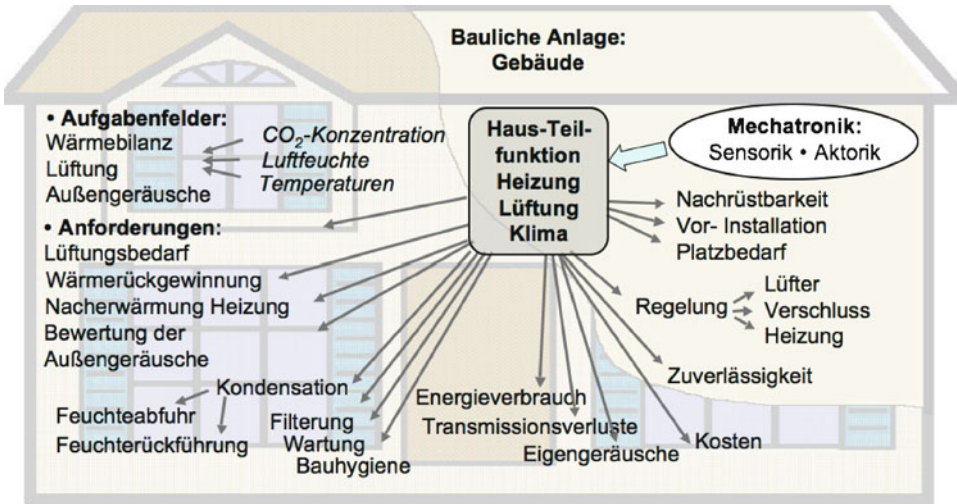
## 14.5 Mechatronik in der Gebäudetechnik

Die heutige Gebäudetechnik hat eine Vielzahl technischer Funktionen zu erfüllen, die von der Heizungs-, Lüftungs- und Versorgungstechnik bis zur Sicherheitstechnik reichen. Eine systemtechnische Übersicht über die Gebäudetechnik zeigt Abb. 14.23.

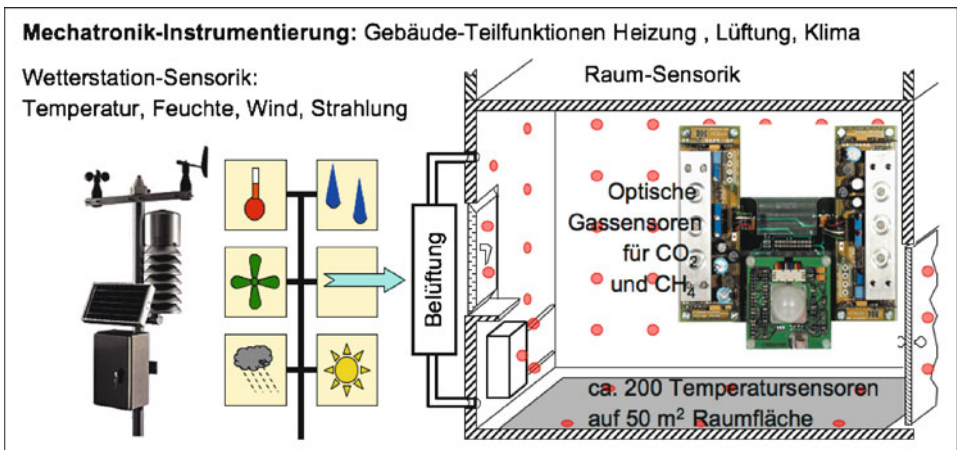
Da die Mechatronik in der Gebäudetechnik auf „Immobilien“ anzuwenden ist, sind „lokale Systemlösungen“ – bezogen auf die Eigenschaften und Kenndaten des jeweiligen



**Abb. 14.23** Abstrakte Systemdarstellung der Gebäudetechnik



**Abb. 14.24** Charakteristika der Haus-Teilfunktionen Heizung, Lüftung, Klima



**Abb. 14.25** „Outdoor- und Indoor-Sensorik“ für haustechnische Untersuchungen

Gebäudes und seiner Umwelt – erforderlich. Abbildung 14.24 zeigt eine Übersicht allein über die vielfältigen Aspekte der Haus-Teilfunktionen *Heizung, Lüftung, Klima*.

Zur systematischen Erforschung und Weiterentwicklung der Sensorik und Aktorik für die Gebäudetechnik wurde ein „Versuchslabor für das Intelligente Haus“ mit über 250 Sensoren und 80 Aktoren entwickelt, siehe [www.smarthome.unibw-muenchen.de](http://www.smarthome.unibw-muenchen.de). Abbildung 14.25 gibt eine Übersicht über die Instrumentierung zur Untersuchung von Heizung, Lüftung und Klima, einschließlich einer „Outdoor-Wetterstation“ für die sensor-

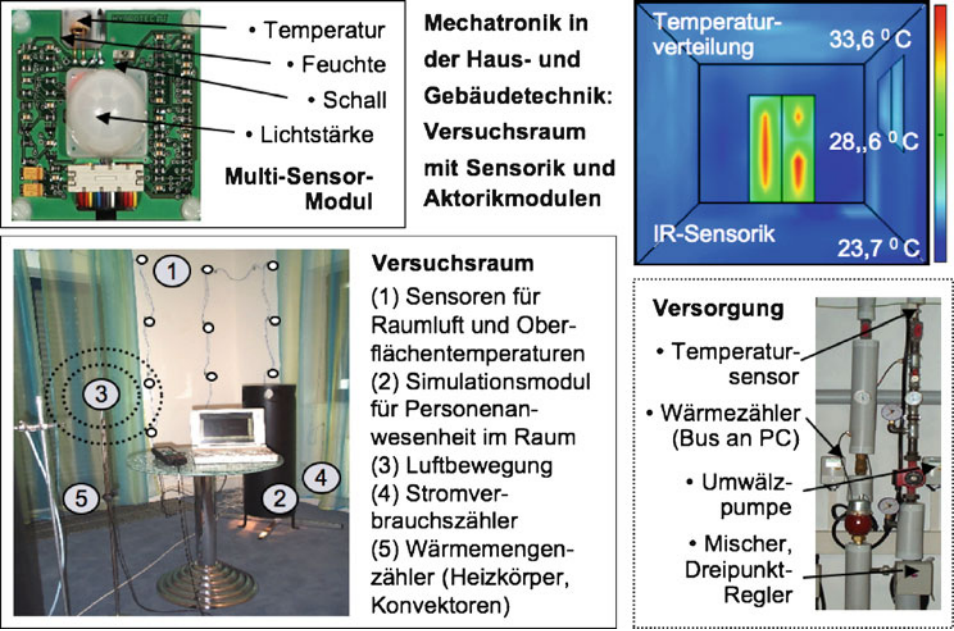


Abb. 14.26 Versuchsraum und Instrumentierung für haustechnische Untersuchungen

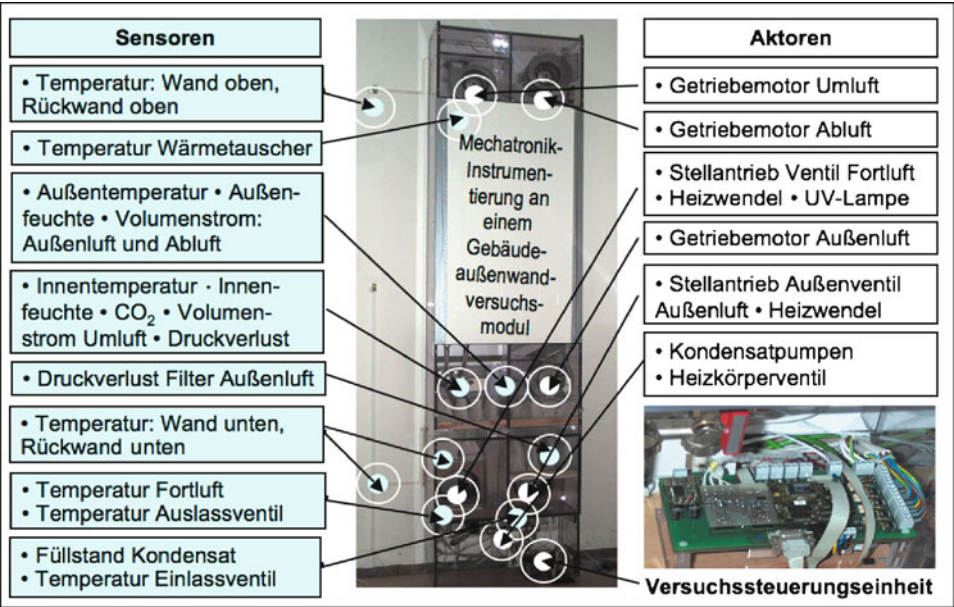
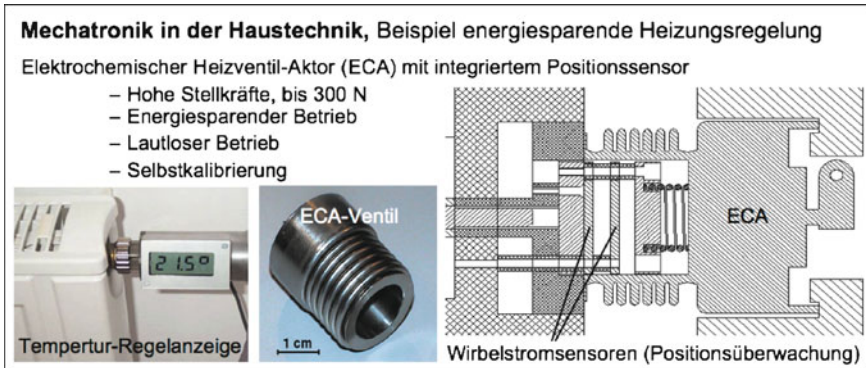
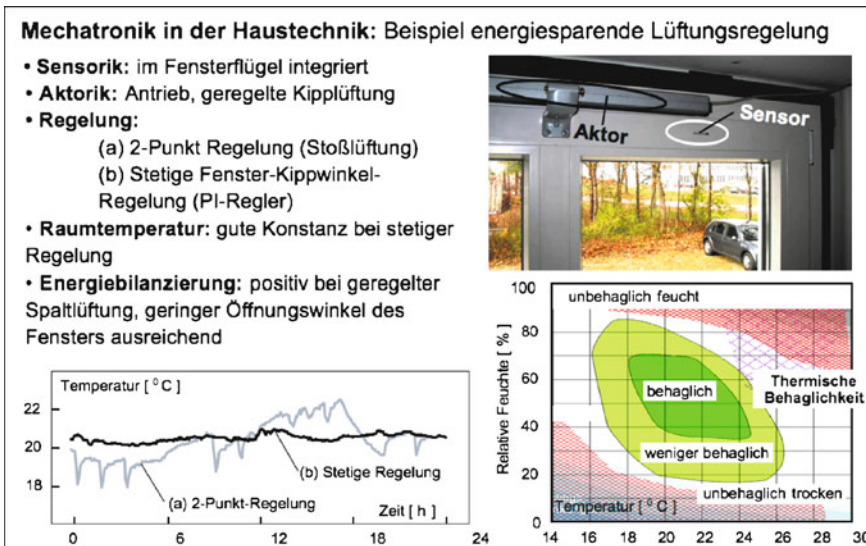


Abb. 14.27 Sensoren und Aktoren für Gebäudeaußenwand-Untersuchungen





**Abb. 14.28** Aktormodul für die Heizungsregelung in der Gebäudetechnik

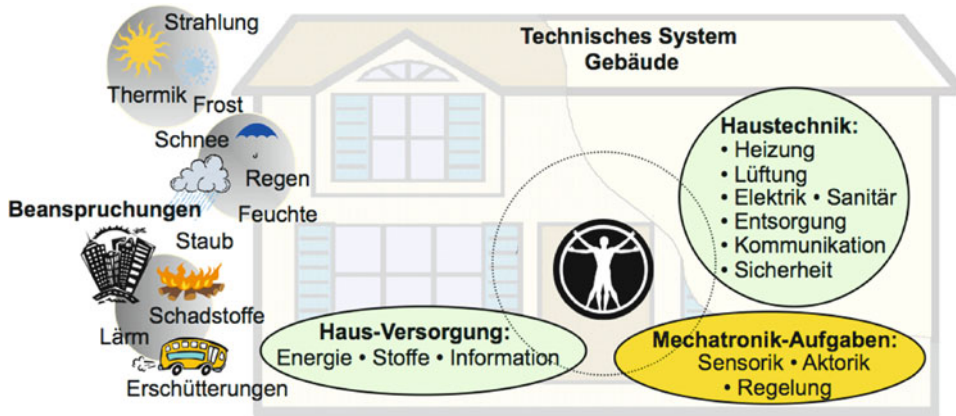


**Abb. 14.29** Mechatronik-Anwendungen in der Haus- und Gebäudetechnik

technische Erfassung von Temperatur und Feuchte (Sensorprinzipien siehe Abschn. 5.6) sowie von Wind und Strahlung.

Abbildung 14.26 zeigt einen Versuchsraum mit Sensorik und Aktormodulen sowie Versorgungsaggregaten. In Abb. 14.27 ist die Mechatronik-Instrumentierung an einem Gebäudeaußenwand-Versuchsmodul dargestellt.

Die Anwendung mechatronischer Systeme ermöglicht neue technische Lösungen für die Gebäudfunktionen Heizung und Lüftung. Für ein mechatronisches Regelsystem der Raumtemperierung (Prinzipdarstellung siehe Abb. 4.4) muss der Temperatur-Fühler (meist ein PTC- oder NTC-Sensor, vgl. Abschn. 5.6.1) mit einer Regeleinrichtung, d. h.



**Abb. 14.30** Mechatronik im Gesamtsystem Mensch – Gebäude – Umwelt

einem Aktor kombiniert werden. Ein neuartiges mechatronisches System der energiesparenden Heizungsregelung mit einem ECA-Heizventil-Aktor zeigt Abb. 14.28.

Durch ein abgestimmtes Zusammenwirken von Sensorik, Aktorik und Regelung können die operativen Variablen für Heizung und Lüftung geregelt und die Temperatur-Feuchte-Werte der *Thermischen Behaglichkeit* eingestellt werden, siehe Abb. 14.29.

Abbildung 14.30 zeigt abschließend – mit der symbolischen Darstellung des Menschen als Nutzer – die schematische Darstellung eines Gebäudes als technisches System. Stichwortartig genannt sind die äußeren Beanspruchungen, die erforderliche Hausversorgung und die Haustechnik sowie die generellen Aufgaben der Mechatronik in der Gebäudetechnik.

Medizintechnik ist die Anwendung der Prinzipien, Methoden und Verfahren der Ingenieurwissenschaften auf die Medizin. Der technische Gegenstand der Medizintechnik sind *Medizinprodukte*. Sie sind nach der für die Medizintechnik geltenden *Europäischen Medizinprodukte-richtlinie* (93/42/EWG, April 1993) wie folgt definiert:

Medizinprodukte: Instrumente, Apparate, Vorrichtungen, Stoffe oder andere Gegenstände, die zur Erkennung (Diagnostik), Verhütung (Prävention), Überwachung (Monitoring) und Behandlung (Therapie) von Erkrankungen beim Menschen oder zur Wiederherstellung der Gesundheit (Rehabilitation) bestimmt sind.

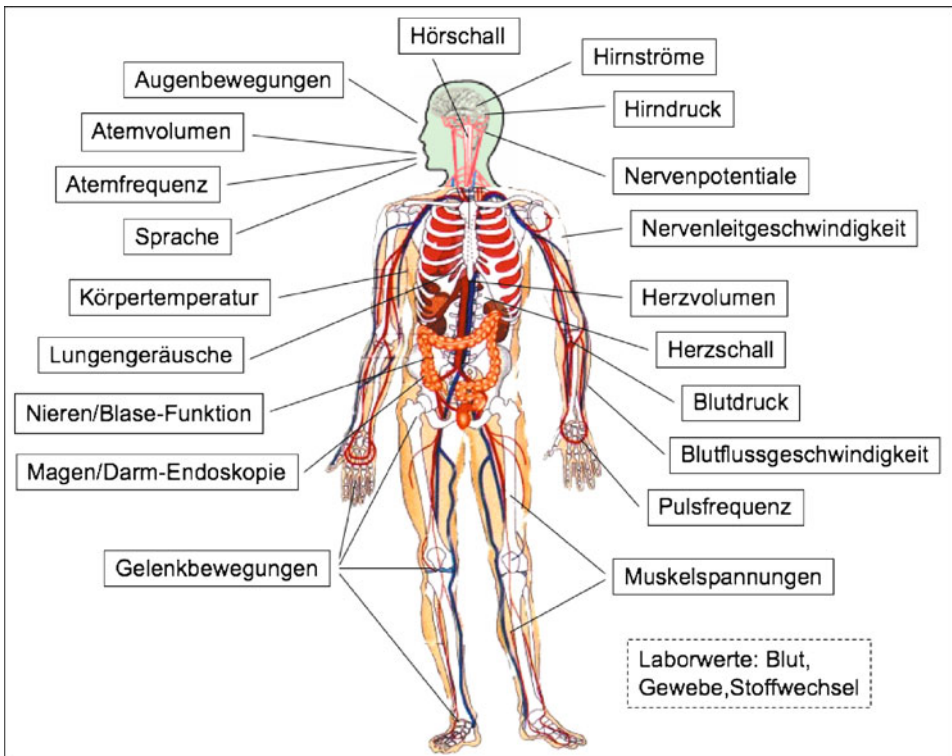
Medizinprodukte sind *Mechatronische Systeme*, wenn sie aus Mechanik/Elektronik/Informatik-Komponenten bestehen und mit Sensorik/Prozessorik/Aktorik-Funktionselementen arbeiten. In ihren medizintechnischen Anwendungen durch den Arzt stehen sie in Wechselwirkung mit dem Mensch als Patient – insbesondere bei Diagnostik, Monitoring und Rehabilitation. Grundlage für die Anwendungen der Mechatronik in der Medizintechnik sind die sensortechnisch erfassbaren und ggf. aktorisch zu beeinflussenden *Körperfunktionen* und *Biosignale des Menschen*. Sie sind in Abb. 15.1 in einer Übersicht mit charakteristischen Beispielen dargestellt.

---

## 15.1 Biosignale und Biosensorik

Biosignale sind allgemein als Phänomene zur Beschreibung eines lebenden Organismus oder seiner Teile definiert und werden mit Methoden der Biosensorik bestimmt. Sie kennzeichnen, wie in Abb. 15.1 in exemplarischer Form dargestellt, medizintechnisch relevante Körperfunktionen des Menschen und können in systemtechnischer Betrachtung in *Funktionsgrößen* (wie z. B. Druck, Strömungsgeschwindigkeit, akustische Geräusche, Temperatur, elektrische Potentiale) und *Strukturgrößen* (wie z. B. Organabmaße, Volumina, Elastizität, Viskosität) eingeteilt werden, Beispiele nennt Tab. 15.1.





**Abb. 15.1** Körperfunktionen des Menschen und die sie kennzeichnenden Biosignale, Beispiele

Biosignale werden beschrieben – wie auch allgemein die Signalfunktionen in Physik und Technik – durch Signalform, Frequenz, Amplitude und den Zeitpunkt ihres Auftretens. Ihr Zeitverhalten kann stationär, dynamisch, periodisch, diskret oder stochastisch sein. Je nach betrachteter Körperfunktion unterscheidet man unterschiedliche Kategorien von Biosignalen. Die folgende Zusammenstellung gibt dazu eine Übersicht und nennt sensortechnische Möglichkeiten ihrer Erfassung.

- *Biomechanische Signale* kennzeichnen die mechanischen Eigenschaften des biologischen Systems in den folgenden wesentlichen Aspekten.
  - *Bewegung (Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung)*: Bewegungsabläufe des menschlichen Bewegungsapparates (oder von Prothetik) können mit Leuchtpunkten markiert und mit Videokameras dargestellt werden. Augenbewegungen lassen sich optoelektronisch erfassen und daraus Geschwindigkeit und Beschleunigung ableiten (vgl. die Messkettendarstellung, Abb. 5.20). Nervenleitgeschwindigkeiten werden durch Nervenstimulation an zwei Orten und Laufzeitanalysen bestimmt.
  - *Volumenstrom*: Atemflüsse können indirekt mittels Thermistoren (siehe Abschn. 5.6.1) aus Temperaturdifferenzmessungen zwischen Ein- und Ausatem-

luftbestimmt werden. Für Blutstrommessungen kommt die magnetisch-induktive Durchflussmethode und das Ultraschall-Dopplerverfahren (vgl. Abschn. 5.2.1) zur medizintechnischen Anwendung.

- *Kraft*: dynamische Muskelkontraktionen werden beispielsweise mit piezoelektrischen Kraftsensoren verfolgt (siehe Abb. 5.61).
- *Druck*: medizintechnisch relevante Druckkenngrößen (siehe Abschn. 5.5.3) werden z. B. als Augeninnendruck, Hirndruck, Wehendruck gemessen. Die sehr häufig angewendete Blutdrucksensorik wird im nächsten Abschnitt beschrieben.
- *Bioakustische Signale*, wie beispielsweise Herzschall, Lungengeräusche oder Atemweggeräusche (Sprache, Schnarchen) können aus Oszillationen von Gefäßwänden mit Stethoskop und Mikrophonsensorik bestimmt werden.
- *Bioelektrische Signale* resultieren aus Differenzen der Ruhe- und Aktionspotentiale (Erregungen) von Nerven und Muskelzellen und lassen sich mittels Elektroden ableiten: Elektoretinografie, ERG (Auge); Elektrokardiogramm, EKG (Herz); Elektroencephalografie, EEG (Hirn); Elektrogastrografie, EGG (Magen); Elektromyografie, EMG (Muskel).
- *Biomagnetische Signale* resultieren aus Magnetfeldern, die elektrische Biosignale begleiten und können mittels hochempfindlicher SQUID-Sensoren (Superconducting Quantum Interference Device) detektiert werden.
- *Biothermische Signale* kennzeichnen die mit Thermoelementen, Thermistoren, Infrarotthermometern und -kameras (siehe Abschn. 5.6.1) bestimmbare Körpertemperatur und -verteilungen; sie geben auch Auskünfte über andere (gestörte) Körperfunktionen, wie z. B. Durchblutungsstörungen oder Tumoraktivitäten.
- *Biooptische Signale* ermöglichen mittels optischer Spektralphotometer (Optoden-Sensoren) und bioaktiver Farb-/Fluoreszenz-Indikatoren die Bestimmung körperfunktioneller pH-Werte, die Erfassung der O<sub>2</sub>-Sättigung im Blut-Hämoglobin und die Unterscheidung von gesundem Gewebe und Tumorgewebe während einer Operation.
- *Biochemische Signale* lassen sich im Körperinneren (*in vivo*) und im Labor (*in vitro*) direkt oder durch Reaktion mit Enzymen, Antikörpern oder Zellen bestimmen. Chemoelektrische Wandler sind z. B. potentiometrische Sensoren (Messung der Zellspannung) und amperometrische Sensoren (Messung des Zellenstroms). Zur chemischen Analyse von Biostrukturen (Körperflüssigkeiten, Knochen, Gewebe) kann prinzipiell das gesamte Instrumentarium der Analytischen Chemie (z. B. Infrarotspektrometrie, Massenspektroskopie, Gaschromatographie) und der Oberflächenanalytik (z. B. Auger-Elektronenspektroskopie) eingesetzt werden.

### Biosensoren

Sie wenden vielfach die in Kap. 5 beschriebenen physikalischen Prinzipien der *Sensorik* auf Biosignale an, insbesondere auf nichtelektrische Größen:

**Tab. 15.1** Beispiele charakteristischer Biosignale des Menschen (K.-P. Hoffmann: Biosignale erfassen und verarbeiten. In: Medizintechnik, R. Kramme (Hrsg.), Springer, 2006)

	Biosignalart	Frequenz	Amplitude
Biomechanische Signale	Atmung	5–60 min <sup>-1</sup>	
	Atmungsströmungsgeschw.		20–120 cm/s
	Atemzugvolumen		200–2000 ml
	Augennendruck		0–7 kPa
	Blutdruck, arteriell, Systole		8–33 kPa
	Blutdruck, arteriell, Diastole		5–20 kPa
	Blutdruck, venös		0–4 kPa
	Blutfluss		0,05–5 l/min
	Blutströmungsgeschwindigkeit		0,05–40 cm/s
	Blutvolumen		7000 ml
	Harnmenge		1500 ml/Tag
	Muskelleistung		10–500 W
	Nervenleitgeschwindigkeit		50–60 m/s
Bioakustische Signale	Puls	20–200 min <sup>-1</sup>	
	Herzschall	15–1000 Hz	
	Lungengeräusche	0,2–10 Hz	
Bioelektrische Signale	Auge: Elektoretinografie ERG	0,2–200 Hz	0,005–10 mV
	Herz: Elektrokardiogramm EKG	0,2–200 Hz	0,1–10 mV
	Hirn: Elektroencephalografie EEG	0,5–100 Hz	2–100 µV
	Magen: Elektrogastrografie EGG	0,02–0,2 Hz	0,2–1 mV
	Muskel: Elektromyografie EMG	0,01–10 kHz	0,05–1 mV

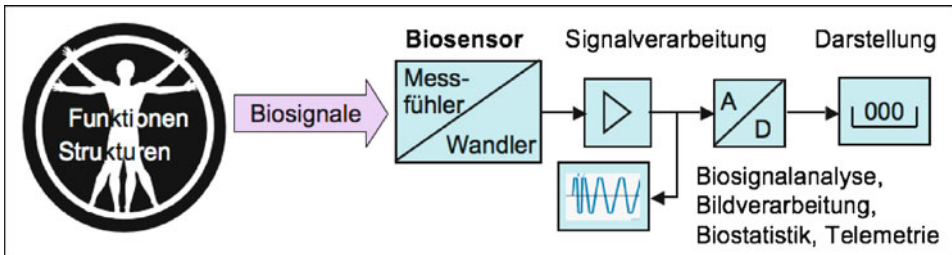
- *Sensorik geometrischer Größen*: Längen, Dehnungen, Abschn. 5.4,
- *Sensorik kinematischer Größen*: Position (Weg, Winkel), Translation, Rotation, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Abschn. 5.5,
- *Sensorik dynamischer Größen*: Kraft, Drehmoment, Druck, Abschn. 5.6,
- *Sensorik von Einflussgrößen*. Abschn. 5.7.

Für die medizintechnische Sensortechnik sind auch *Embedded Sensors* (siehe Abschn. 5.8) und die Mikrosensorik (siehe Abschn. 5.9) von Bedeutung.

In medizintechnischen Anwendungen werden Biosensoren mit messtechnischen Komponenten der Signalverarbeitung zusammengeschaltet – wie in allen sensortechnischen Anwendungen (vgl. Abschn. 5.3) – sie bilden damit eine *biologische Messkette*, siehe Abb. 15.2.

Bei der Signalverarbeitung und Darstellung der elektrischen Ausgangssignale von Biosensoren werden in der Medizintechnik neben den allgemeinen Methoden der Sensorsignal-Processorik (siehe Abschn. 6.6) insbesondere folgende Methoden eingesetzt:

- *Biosignalanalyse*: Die Biosignalanalyse im *Zeitbereich* (Originalbereich, vgl. Abschn. 3.5.2) umfasst im Wesentlichen die Signalverbesserung zur Funktionsdiagnostik,



**Abb. 15.2** Prinzipdarstellung eines Biosensors in einer biologischen Messkette

die Mustererkennung, die Signalvermessung, die Ähnlichkeitsanalyse (Kreuzkorrelation) und das Signalmapping. Die Biosignalanalyse im *Frequenzbereich* (vgl. Abschn. 3.5.3) dient der Ermittlung der in Biosignalen enthaltenen Frequenzen (Amplitudenspektren, Leistungsspektren).

- *Bildverarbeitung* dient der Erkennung, Verbesserung, Aufbereitung, Segmentierung zweidimensionaler Biosignale von bildgebenden Verfahren der Medizintechnik. Sie soll mit Methoden der Filterung, Faltung, Drehung oder Transformation Bildschärfe, Kontrast und Rauschen verbessern.
- Biostatistik verwendet Methoden der Diskriminanz-, Multivarianz-, Clusteranalyse.

## 15.2 Medizinische Gerätetechnik

Die Bedeutung der Medizintechnik wird im Technologieführer (Springer 2006) wie folgt gekennzeichnet: *Die medizinische Gerätetechnik spielt im heutigen Gesundheitswesen eine zentrale Rolle. Dies gilt sowohl bei der Diagnose und Therapie von Krankheiten als auch bei der Überwachung des Krankheits- bzw. Behandlungsverlaufes. Der eigentliche diagnostische Befund wird zwar immer noch vom verantwortlichen Arzt gestellt, doch dabei unterstützt ihn eine Vielzahl technologischer Verfahren und Geräte.*

Technologisch ist die medizinische Gerätetechnik außerordentlich vielfältig. Nach der Gliederung medizintechnischer Produkte in der Produktionsstatistik (GP) des Statistischen Bundesamtes lassen sich die folgenden Hauptgruppen unterscheiden:

- **Medizintechnische Geräte allgemein** (Wirtschaftszweig(WZ)-Nr. 33.10.2):
  - Katheter,
  - Endoskope,
  - Anästhesiegeräte,
  - Künstliche Nieren,
  - Chirurgische Instrumente,
  - Infusions- und Transfusionsgeräte,
  - Augenärztliche (ophthalmologische) Geräte,

- Zahnärztliche Dental- und Modellierinstrumente,
- Geräte für Mechanotherapie und Psychotechnik,
- Geräte zur Atmungstherapie, Beatmungs-/Wiederbelebungs-Apparate.
- **Elektromedizinische Geräte** (Wirtschaftszweig(WZ)-Nr. 33.10.1):
  - Elektronische Blutdruckmessgeräte,
  - Ultraschallgeräte: Diagnose/Therapie-Geräte (z. B. Nierensteinzertrümmerer),
  - Röntgengeräte, Computertomografen,
  - Elektrodiagnosegeräte, z. B. Kernspintomografie, Magnetresonanzgeräte,
  - Elektrokardiographen (EKG),
  - Nuklearmedizinische Geräte mit Alpha-, Beta- oder Gammastrahlen,
  - Ultraviolett/Infrarot-Bestrahlungsgeräte (Wellenlängenbereiche, siehe Abb. 3.11),
  - Elektrische Vibrations-/Massage-Geräte,
  - Dentalbohrmaschinen,
  - Schwerhörigengeräte,
  - Herzschrittmacher.

Die Vielfalt der medizinischen Gerätetechnik lässt sich gemäß Technologieführer in zwei große Bereiche gliedern:

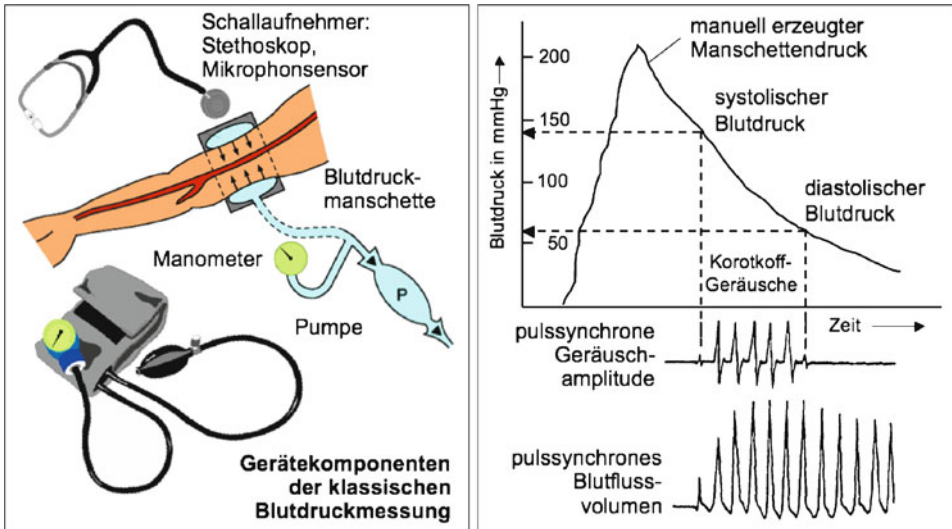
- *Körpersensorik* für die in Abb. 15.1 exemplarisch dargestellten Körperfunktionen, z. B. elektrophysikalische Messungen von Herz- oder Hirnfunktionen, EKG, Blutdrucksensorik,
- *Bildgebende Verfahren*, z. B. Röntgendiagnostik, Kernspintomografie, Ultraschall Diagnostik (Sonografie), Computertomografie.

Die Mechatronik wird heute – häufig in Weiterentwicklung der feinwerktechnischen elektromedizinischen Gerätetechnik – in vielfältiger Weise in der Medizintechnik angewendet. Dies wird im Folgenden für mechatronische Systeme aus dem Bereich der Körpersensorik (Beispiel *Blutdrucksensorik*) und dem Bereich der Bildgebenden Verfahren (Beispiele *Sonografie*, *Tomografie*) illustriert.

### 15.2.1 Blutdrucksensorik

Blutdruck ist der durch die Herztätigkeit erzeugte, durch Gehirn, Nieren, Rückenmark und Adernelastizität geregelte Druck des strömenden Blutes im Blutgefäßsystem – traditionell angegeben in Millimeter Quecksilbersäule (1 mmHg = 133,322 Pa). Der Blutkreislauf des Menschen in drei Bereiche eingeteilt werden:

- *Körperkreislauf*: Im „Hochdrucksystem“ gehen vom Herz über die Aorta die Arterien (Schlagadern) in den Körper, wo sie sich in Kapillaren (feinste Haargefäße) aufspalten und im „Niederdrucksystem“ wieder zu größeren Gefäßen (Venen) sammeln, die das



**Abb. 15.3** Das klassische Verfahren der nichtinvasiven Blutdruckmesstechnik

Blut zum Herzen zurückleiten. Durch die Haargefäßwände vollzieht sich der Stoff- und Gasaustausch mit Gewebezellen und Gewebeflüssigkeit.

- **Lungenkreislauf:** Vom rechten Vorhof strömt das Blut in die rechte Kammer, die das Blut durch die Lungenflügel treibt. In der Lunge wird das Blut von Kohlendioxid befreit und mit Sauerstoff neu beladen.
- **Pfortaderkreislauf:** Venöses Blut aus dem Magen-Darm-Kanal und benachbarten Organen fließt durch die Pfortader der Leber zu, durchströmt dort ein weiteres Kapillargebiet und mündet dann in die untere Hohlvene.

Das Herz arbeitet nach dem physikalischen Prinzip einer Druck- und Saugpumpe mit folgenden Kenndaten für gesunde Menschen im Ruhezustand:

- Blutmenge pro Herzschlag (Schlagvolumen): ca. 70 ml,
- Herzfrequenz (Ruhepuls  $f_H$ ) ca. 70 Schläge je Minute,
- Herz-Zeit-Volumen =  $f_H \cdot$  Schlagvolumen: ca. 5 l/min, steigerbar auf ca. 30 l/min,
- Blutströmungsgeschwindigkeit (m/s): 0,4 (Aorta), 0,06 (Arterie), 0,02 (Vene),
- Blutdruck: erz-Kontraktion (Systole) 120 mmHg, -Dilatation (Diastole) 80 mmHg.

Grundlage der nichtinvasiven Blutdrucksensorik ist das mit Blutdruckmanschette und Pumpe sowie Stethoskop und Manometer arbeitende Blutdruckmessverfahren nach Riva-Rocci-Korotkoff. Abbildung 15.3 veranschaulicht das Prinzip des Verfahrens.

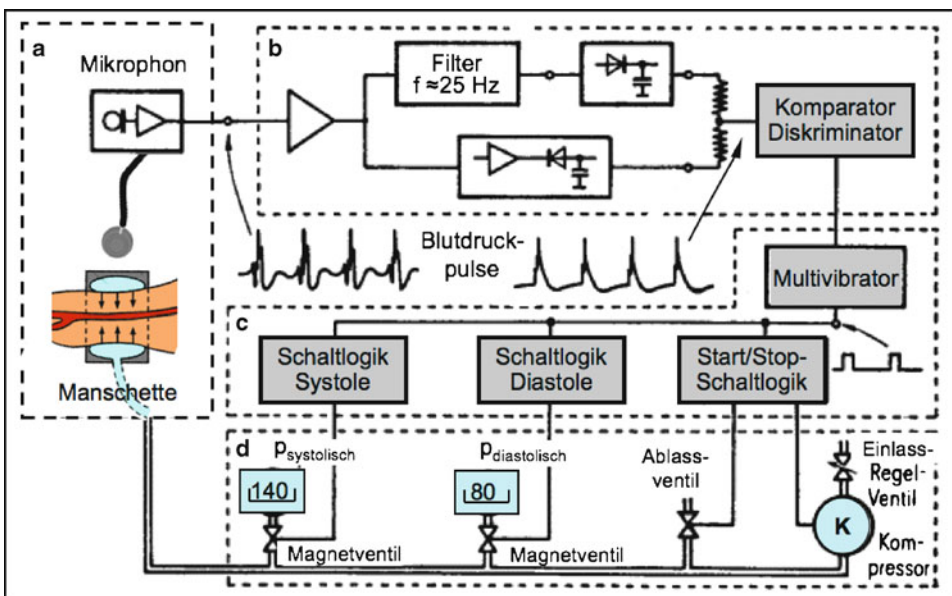
Durch einen manuell erzeugten Manschettendruck wird der Blutstrom in einer Arterie abgedrosselt, bis der Pulsschlag durch ein Stethoskop nicht mehr wahrnehmbar ist. Durch



langsame Reduzierung des mit einem Manometer erfassten Manschettendrucks wird der Blutstrom wieder freigegeben. Das Auftreten der ersten, mit dem Schallaufnehmer detektierten Blutströmungsgeräusche (Korotkoff-Geräusche) indiziert den systolischen Blutdruck und das Verschwinden des pulssynchronen Geräusches den diastolischen Blutdruck.

Das klassische manuell-akustische Verfahren von Riva-Rocci-Korotkoff ist durch Anwendung von Modulen der Fluidtronik, Elektronik und Datenverarbeitung automatisiert worden. Es gibt heute sowohl halbautomatische, anwenderkontrollierte Geräte mit Blutdruckanzeige als auch Vollautomaten mit komplett automatischer Blutdruckmessung und Display-Anzeige.

Abbildung 15.4 skizziert die Prinzipschaltung eines vollautomatischen Blutdruckmessgerätes, das auf dem Verfahren von Riva-Rocci-Korotkoff aufbaut. Ein in die Blutdruckmanschette integriertes Mikrophon wandelt die akustischen Blutdruckpulse in elektrische Signale. Diese werden verstärkt und durch eine Hoch/Tiefpass-Filterschaltung für die weitere Verarbeitung konditioniert. Die Signale werden dann durch einen monostabilen Multivibrator in zeitlich konstante digitale Pulse umgeformt, welche nun als Messgröße verwendet werden. Durch die jeweilige Schaltlogik können systolischer und diastolischer Blutdruckwert ermittelt werden. Ebenso besitzt jede Schaltlogik noch eine Steuerleitung zu den Steuerungsventilen des Manschettendrucks. Damit wird es bei ermittelten Messfehlern möglich, bestimmte Messschritte automatisch zu wiederholen. Die Datenausgabe erfolgt mit den heute üblichen Methoden der digitalen Speicher- und Displaytechnik.



**Abb. 15.4** Blockschaltbild eines Blutdruckmessgerätes mit mechatronischen Modulen. **a** Blutdruckmanschette mit integriertem Mikrophon, **b** elektronische Filtermodule, **c** Mess- und Regelungseinheit, **d** Steuerungsmodul für Manschettendruck, Messwertausgabe und Displays

## 15.2.2 Bildgebende Verfahren: Sonografie, Tomografie

### Sonografie

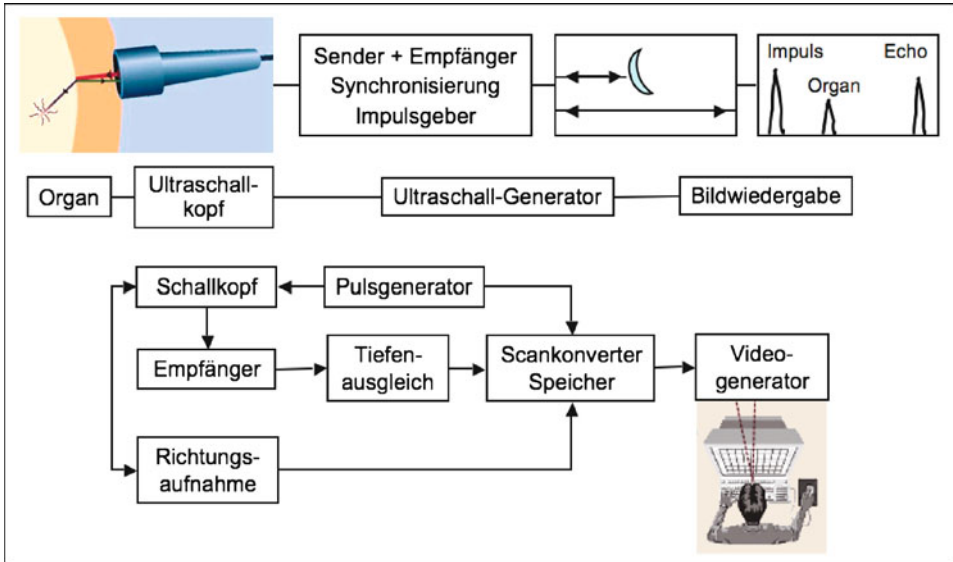
Die Sonografie ist ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung morphologischer Verhältnisse des menschlichen Körpers; sie hat ihren technischen Ursprung in der zerstörungsfreien Materialprüfung (ZfP) mit Ultraschall. Ultraschallwellen sind an Materie gebunden, ihre Ausbreitung ist durch eine intermittierende periodische Kompression und Dekompression charakterisiert. Der Frequenzbereich des Ultraschalls liegt oberhalb der vom Menschen wahrnehmbaren Frequenzen von einigen Hertz (Hz) bis maximal 20 kHz.

In der Sonografie erhält man medizinisch relevante Informationen durch Absorption, Reflexion und Brechung sowie durch den *Doppler-Effekt* von Ultraschallwellen, die durch Ultraschallsender (*Piezoschwinger*, siehe Abschn. 6.2) in den Körper eingestrahlt werden. Die Piezoelemente dienen als Schallquellen und Schallwellenempfänger. Ein Ultraschallwandler, der auch als Schallkopf bezeichnet wird, wirkt wie ein hin- und herschwingender Kolben. Er komprimiert und dilatiert abwechselnd das angekoppelte Medium. Die so entstehenden Dichteänderungen setzen sich als longitudinale Wellen im Medium fort. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit in den einzelnen Organbestandteilen, z. B. Fett (1450 m/s), Muskeln (1585 m/s), Knochen (4080 m/s), kann nach dem Echolot-Prinzip die Tiefe reflektierender Grenzflächen detektiert werden.

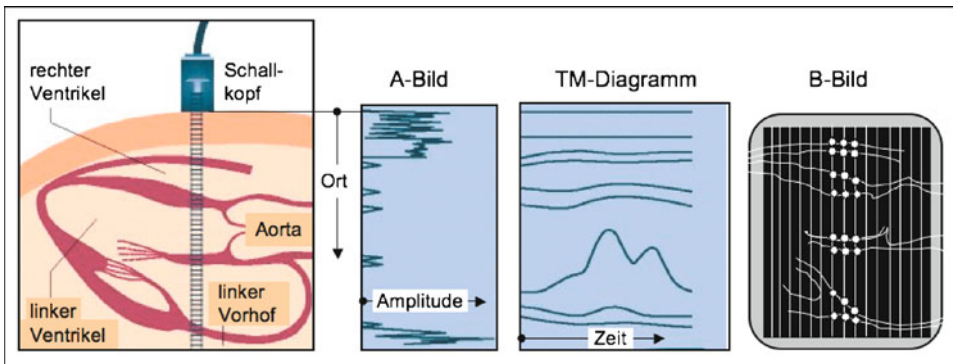
Über Elektronikmodule wird die Zeit zwischen Aussendung und Rückkehr des Schalls als Maß für die Tiefenlage von Grenzflächen im Körper gemessen. Durch Richtungsänderung des ausgesendeten Schallstrahls und Aneinanderreihen der „Echolot-Punkte“ zu Linien können auf diese Weise Schnittbilder erstellt werden. An menschlichen Organen lassen sich so Größe, Form, Lage und Strukturen darstellen, ebenso ihre Bewegungen und die Blutströmung, ohne dass biologische Schädigungen durch Ultraschall hervorgerufen werden. Abbildung 15.5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines mit Ultraschalltechnik arbeitenden Sonografen.

Die in Abb. 15.5 dargestellten Module eines Sonografen haben folgende Aufgaben:

- *Pulsgenerator*: Er erzeugt elektrische Pulse einer vorgegebenen Sendefrequenz und gibt sie an den Schallkopf weiter.
- *Schallkopf*: Der Schallkopf enthält Sender/Empfänger-Piezoelement-Arrays zur Wandlung elektrischer Signale in akustische Impulse und Rückwandlung akustischer Echo-Impulse in elektrische Empfangssignale.
- *Empfänger*: Die elektrischen Signale werden im Empfänger lauffzeitabhängig verstärkt, da die Schallintensität exponentiell abnimmt (bei Weichteilen ca. 1 dB je 1 MHz und je 1 cm Eindringtiefe).
- *Tiefenausgleich*: Die „Echo-Tiefen-Werte“ werden aus den Zeitdifferenzen zwischen Senden und Echoempfang bestimmt, digitalisiert und den Speicheradressen des Scanconverters zugeführt, wo eine Bildtransformation vorgenommen wird.
- *Scanconverter*: Er verknüpft Informationen über die geometrischen Verhältnisse von Sendeimpuls und Echo mit den Bildkoordinaten der Bildpunkte. Die Bildinformationen werden digitalisiert und in den dazugehörenden Bildspeicheradressen abgelegt.



**Abb. 15.5** Blockschaltbilddarstellung eines Sonografen mit Ultraschalltechnik



**Abb. 15.6** Die grundlegenden Verfahren der Sonografie, dargestellt am Beispiel der Ultraschalldiagnostik des Herzens mit einem auf die Brust aufgesetzten Schallkopf

- **Videogenerator:** Im Videogenerator werden die Bildinformationen analogisiert und in ein Videosignal umgewandelt sowie an den Monitor weitergeleitet.

Die medizintechnischen Anwendungen der Ultraschalldiagnostik verwenden im Wesentlichen die in Abb. 15.6 illustrierten Verfahren.

Für die medizinische Sonografie kommen im Wesentlichen folgende Techniken zum Einsatz:

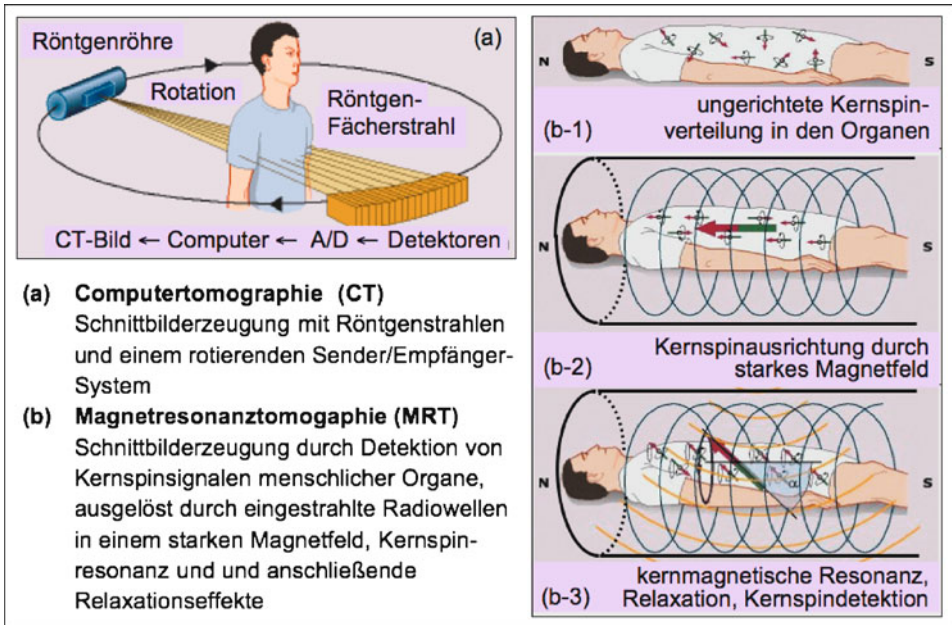
- *A-Bildverfahren:* Die Amplitude der Echosignale wird als Funktion der Tiefe dargestellt. Sich bewegende Grenzflächen im Körper erkennt man im A-Bild an der Hin- und Herbewegung der entsprechenden Echoamplitude.
- *TM(Time Motion)-Bildverfahren:* Das TM-Bild wird wie das A-Bild mit ortsfestem Ultraschallwandler gewonnen. Durch Aneinanderreihen zeitlich aufeinander folgender Echozeilen wird der zeitliche Verlauf von Bewegungen im durchschallten Objekt erkennbar. Die Zeit-Positions-Kurven zeigen beispielsweise das Verhalten von Bewegungsabläufen im Herzen an.
- *B(Brightness)-Bildverfahren:* Im zweidimensionalen B-Verfahren wird der Körper zeilenweise abgetastet. Die gewonnenen Echosignale werden als zweidimensionales Schnittbild sichtbar gemacht. Bei parallelem und sektorförmigem Abtasten werden häufig Ultraschallbilder in Echtzeit (Real-Time-Bilder) mit Bildfolgefrequenzen zwischen 10 und 50 Hz gewonnen. Dagegen ist der Compound-Scan ein statisches Verfahren, das für den Bildaufbau mehrere Sekunden benötigt.

Die Ultraschalldiagnostik hat heute in der Medizin eine sehr große Anwendungsbreite. So wird das A-Bildverfahren beispielsweise zum Feststellen raumverändernder Prozesse im Bereich der Gehirnsphären eingesetzt. Es ermöglicht die Diagnose von Hirntumoren, Schädel-Hirn-Verletzungen, Hämatomen etc. Ebenfalls mit dem A-Bildverfahren können Augenkrankheiten wie Netzhautablösungen, Tumore, Glaskörpertrübungen erkannt und die Geometrie von Augenabschnitten (Tiefe der Vorkammer, Dicke der Linse, Länge der optischen Achse) vermessen werden. Aufgrund der kleinen Untersuchungsbereiche kann eine hohe axiale und laterale Auflösung erzielt werden.

Die Sonografie findet Anwendung in der Geburtshilfe und Gynäkologie, z. B. zur Lagebestimmung des Kindes, zum Ausmessen des kindlichen Schädels und des mütterlichen Beckendurchmessers. In der Inneren Medizin und Chirurgie dient die Ultraschalltechnik zur Schilddrüsendiagnostik, zur Herzdiagnostik, zur Lagebestimmung von Tumoren für die Bestrahlungslokalisation, zur Untersuchung der Bauchorgane Leber, Milz, Gallenblase, Bauchspeicheldrüse. In der Urologie hilft die Sonografie bei der Untersuchung von Nieren, Harnblase, Prostata und in der Orthopädie bei Untersuchungen des Gelenk- und Bewegungsapparates.

### Tomografie in der Medizintechnik

Tomografie ist die Technik der Erzeugung von Schnittbildern. In der medizinischen Diagnostik werden verschiedene physikalische Erscheinungen herangezogen, um das Körperinnere ohne operativen Eingriff mit bildgebenden Verfahren darzustellen. Während die Sonografie-Bilder mit Hilfe von longitudinalen Ultraschallwellen erzeugt werden, verwendet die Röntgen-Computertomografie (CT) dazu Röntgenstrahlen. Die Grundlagen der technischen CT wurden in Abschn. 5.3.1 behandelt (vgl. Abb. 5.28). Ein weiteres bildgebendes Verfahren der medizinischen Diagnostik ist die Magnetresonanztomografie (MRT) – auch Kernspintomographie oder Nuclear Magnetic Resonance (NMR) genannt –



**Abb. 15.7** Physikalische Prinzipien von Tomografieverfahren medizintechnischer Geräte

bei der zur Bilderzeugung elektromagnetische Radiowellen eingesetzt werden. Die elementaren physikalischen Grundlagen von CT und MRT sind in Abb. 15.7 illustriert.

### Computertomografie

Die Gerätetechnik eines Computertomografen (Nobelpreis 1979) erweitert die klassische Röntgenstrahlentechnik durch Mechanik, Elektronik und Informatik zu einem mechatronischen System. Wie in Abb. 15.7a dargestellt, besteht ein Computertomograf aus einer Röntgenquelle, die um die Achse des Patienten rotiert. Deren Strahl ist durch Blenden bis auf eine dünne Schicht, in der das Schnittbild erstellt wird, ausgeblendet. Der Röhre gegenüber befindet sich – montiert auf dem gleichen rotierenden Rahmen (*Gantry*) – eine Zeile von Röntgendetektoren. Diese registrieren die durch den Körper nicht absorbierte Strahlung. Während der Rotation werden die Messdaten jeder Projektion digitalisiert (A/D-Wandler) und von einem Computer gespeichert. Für eine Schicht werden bei einem 360-Grad-Umlauf der Röhre etwa 1000 Projektionen aufgenommen. Aus den Projektionsdaten wird dann im Computer das Schnittbild berechnet. Es entspricht in jedem Graustufen-Bildpunkt der Stärke der Röntgenabsorption. Hohe Absorption wird hell, geringe Absorption dunkel dargestellt.

Ein CT-Bild stellt damit die Graustufenverteilung der Gewebe- bzw. Körperteildichte des Probanden dar. Da die Computertomografie Schnittbilder des menschlichen Körpers aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften des Gewebes für Röntgenstrahlung, dar-

stellt, lassen sich Knochen mit diesem Verfahren sehr gut darstellen. Verschiedene Weichteilgewebe können dagegen schwer unterschieden werden, da sie alle etwa die gleiche Dichte haben. Ein weiterer Nachteil ist die mögliche Strahlenbelastung des Patienten.

### Magnetresonanztomografie

Die Magnetresonanztomographie (MRT) nutzt die Kernspinresonanz von Atomen zur Darstellung von Organen im menschlichen Körper. Die MRT ergibt einen sehr guten „Weichteilkontrast“ und verwendet im Unterschied zur Röntgendiagnostik keine ionisierende Strahlung. Abbildung 15.7b zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der komplexen Vorgänge bei der Magnetresonanztomografie. Die wichtigsten Module eines Magnetresonanztomografen sind

- ein kräftiger Magnet, der ein homogenes (gleichförmiges), zeitlich konstantes magnetisches Grundfeld (bis zu etwa 3 Tesla, etwa  $30.000 \cdot \text{Erdfeld}$ ) erzeugt,
- ein schaltbares Magnetfeld mit Radiowellenfrequenzen, die so variiert werden können, dass ein Resonanzeffekt mit der Eigenfrequenz (Larmor-Frequenz) des Spindrehimpulses von Atomen im menschlichen Körper erzeugt werden kann,
- ein Empfängerspulensystem für die Detektion der Körpersignale.

Bei der MRT wird der Proband in den Hohlraum ( $\varnothing$  ca. 55 cm, Länge ca. 2 m) des Magneten eingebracht, (Abb. 15.7b-1). In dem starken Magnetfeld orientieren sich die meisten Kernspins der Atome des menschlichen Körper in Richtung des Grundfeldes (Abb. 15.7b-2). Bei Einschalten des zusätzlichen magnetischen Wechselfelds wird die Ausrichtung des Kernspins unter Aufnahme der eingestrahnten Energie verändert (Abb. 15.7b-3). Wenn das Wechselfeld wieder ausgeschaltet wird, kehren die Kernspins in ihre Ausgangslage zurück (Relaxation), wobei sie die aufgenommene Energie wieder abstrahlen. Diese Signale werden von der Empfangsspule detektiert, wobei Wasserstoffkerne für die MRT die stärksten Signale erzeugen. Da die Verteilung der Wasserstoffkernanteile in den Organen des menschlichen Körpers unterschiedlich ist, lassen sich mit mathematischen Verfahren aus den detektierten MTR-Signalen Organ-Schnittbilder errechnen und mit Methoden der Bildverarbeitung darstellen.

Die Anwendungsgebiete der Magnetresonanztomografie in der Medizin sind breit und erweitern sich noch ständig. Neben der reinen Darstellung der Gefäße und Organe gewinnt die *funktionelle MRT*, die Untersuchung der Funktionsweise von Organen, durch die Entwicklung „schneller Biosensoren“ zunehmend an Bedeutung. So können mit MRT beispielsweise in den kapillaren Blutgefäßen (vgl. Abb. 15.3) Blutflussgeschwindigkeit und Organdurchblutung (Blutmenge pro Zeit und Volumen) gemessen und die Gefährlichkeit einer Gefäßverengung bestimmt werden. Durch MRT kann auch die Diffusion des Wassers in den Organen verfolgt und Veränderungen, z. B. infolge Tumorwachstum oder Minderdurchblutung, zum Aufspüren von Krankheitszeichen verwendet werden. Mittels MRT-Aufnahmen können auch die Gehirnareale sichtbar gemacht werden, die bei be-



**Tab. 15.2** Charakteristika der behandelten bildgebenden Verfahren der Medizintechnik

Verfahren	Prinzip	Typische Parameter	Technische Trends
Sonografie	Reflexion, Absorption, Transmission, Doppler-Effekt von Ultraschallwellen	Auflösung 0,1–1 mm, Aufnahmezeiten $\approx$ sec	Echtzeit, 3D + Zeit, miniaturisierte Systeme für intravaskuläre Bildgebung
Röntgen-Computer-Tomografie (CT)	Radiale Messung von Röntgenprojektionen und Rückprojektionen zu 2D-Schnittbildern	Auflösung 0,5–1 mm, Aufnahmezeiten $< 30$ s (Ganzkörperscan)	Multi-Schichtsysteme, Fotodioden/Verstärker-Integration
Magnetresonanztomografie (MRT)	Messung der Kernspinresonanz von Wasserstoffatomen, Organen und Gewebe, Rekonstruktion von 2D-Schnittbildern. Keine Strahlungsdosis für Patienten	Auflösung $250\text{ }\mu\text{m}$ –1 mm, Aufnahmezeiten $\approx$ Minuten	Offene Magnetsysteme, schnelle Aufnahmetechniken und Bewegungskompensation

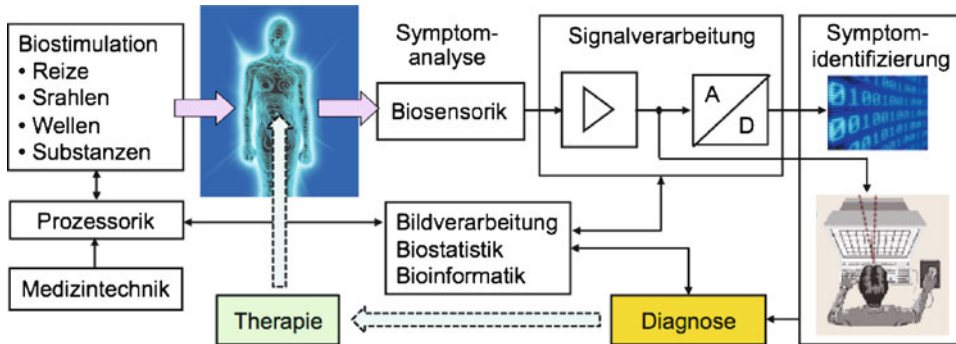
stimmten geistigen Tätigkeiten wie Lesen, Rechnen oder Musikhören besonders aktiv sind.

Eine kurze zusammenfassende Übersicht über die behandelten bildgebenden Verfahren der medizinischen Gerätetechnik gibt Tab. 15.2.

### 15.3 Bioaktorik

Die Anwendung der Medizintechnik durch den Arzt ist häufig mit einer *Bioaktorik*, d. h. der Applikation von Reizen, Strahlen, Wellen oder medizinischen Substanzen auf menschliche Probanden und der Bestimmung der dadurch ausgelösten Biosignale in einer biosensorischen Symptomanalyse verbunden. Diese *Biostimulation* dient dazu, die Funktionsfähigkeit menschlicher Sinnesorgane aus der Reaktion auf mechanische, akustische, elektrische, magnetische oder optische Reize zu beurteilen. Die Kombination von Bioaktorik und Biosensorik eröffnet z. B. folgende Möglichkeiten:

- Die Sonografie ermöglicht die Analyse von Ultraschall-Reflexen im menschlichen Körper, die Darstellung von Bewegungsabläufen von Herzklappen sowie die Messung der Blutflussgeschwindigkeit.
- Röntgenstrahlabsorptionsmessungen erlauben die Vermessung anatomischer Strukturen.



**Abb. 15.8** Die Kombination von Bioaktori und Biosensorik in der Medizintechnik

- Mittels radioaktiv markierter Substanzen lassen sich Stoffwechselphänomene sowie die Transportgeschwindigkeit, der Anreicherungsort und die Dynamik von Ausscheidungsprozessen bestimmen.
- Aus ergonomischen Messungen kann auf die physische Belastbarkeit geschlossen werden.

Die Kombination von Bioaktori und Biosensorik als Grundlage für die medizinische Diagnose und Therapie ist in Abb. 15.8 in Form einer biologischen Messkette dargestellt.

---

## Bildnachweis

Die Abbildungen dieses Buches wurden gemäß der im Vorwort dargestellten Konzeption meist als „Wort-Bild-Graphik-Kombinationen“ gestaltet. Dabei wurden Vorlagen aus folgenden Quellen, sowie bei Collagen partiell auch aus dem Internet, verwendet.

- Apple: [1.3](#), [5.44](#)
- BAM: [5.29](#), [5.30](#), [5.31](#), [5.35](#), [5.83](#), [5.84](#), [5.85](#), [5.91](#), [5.92](#), [6.10](#), [7.7](#), [14.4–14.24](#)
- Beuth Hochschule für Technik Berlin, Labor für Gerätetechnik, Optik und Sensorik: [6.18](#), [8.13](#), [10.15](#), [11.3](#), [11.8](#), [11.10](#), [11.13](#), [12.1](#)
- BOSCH: [5.43](#), [5.47–5.51](#), [5.56](#), [5.58](#), [5.59](#), [5.62](#), [5.63](#), [5.64](#), [5.69](#), [5.71](#), [5.74](#), [5.76](#), [5.77](#), [5.79](#), [5.86](#), [5.87](#), [5.88](#), [5.89](#), [6.23](#), [6.24](#), [9.10](#), [13.9](#), [13.10](#), [13.12](#), [13.13](#), [13.14](#), [13.19](#), [13.20](#), [13.21](#)
- Brockhaus Office-Bibliothek 2004: [1.2](#), [6.32](#), [7.6](#), [7.10](#), [8.10](#), [10.14](#), [13.12](#), [13.13](#), [13.14](#), [15.5](#), [15.6](#), [15.7](#)
- Canon: [10.13](#), [10.15](#), [10.18](#)
- Center for Magnetic Recording Research, University of California, San Diego: [12.2–12.10](#)
- DaimlerChrysler: [7.11](#), [7.12](#), [7.13](#), [13.1–13.5](#), [13.11](#), [13.18](#)
- Institut für Mess- u. Automatisierungstechnik, UniBW München: [14.1](#), [14.27](#), [14.28](#), [14.29](#), [14.30](#)
- Leitz: [10.13](#), [10.14](#)
- Mettler-Toledo: [1.3](#), [10.11](#)
- Minolta: [10.13](#)
- Opel: [13.22](#)
- Pentax: [10.19](#)
- PTB: [5.23](#), [5.24](#), [5.25](#), [5.26](#), [5.35](#), [5.68](#), [5.5.10.3 ... 10.8.12](#), [5.73](#)
- Reiss: [1.3](#), [8.7](#), [8.8](#), [8.16](#)
- Sandia: [1.3](#), [7.2](#), [8.4](#)
- Sartorius: [10.11](#)
- VDI-TZ, Präsentation *Reise in den Nanokosmos*: [1.3](#), [5.68](#), [9.6](#)

---

## Anmerkungen zur Literatur

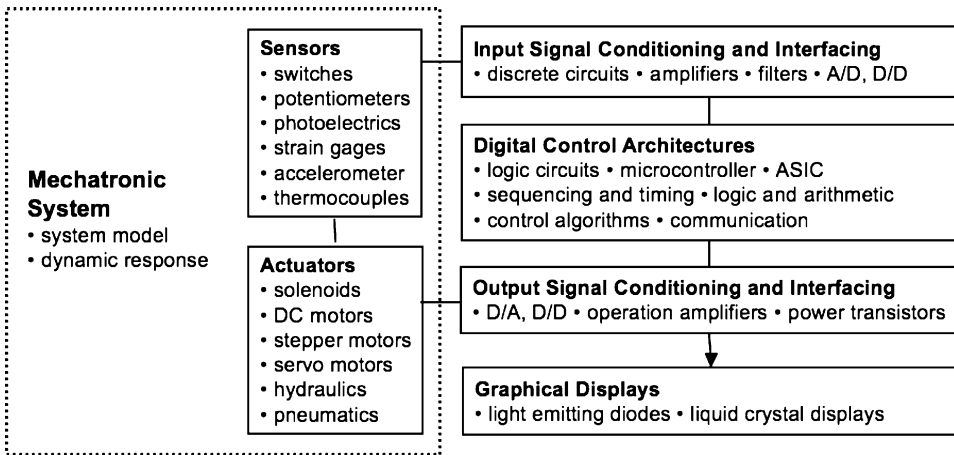
Die Literatur zur Mechatronik ist infolge ihrer interdisziplinären fachlichen Struktur sehr vielfältig und breit gestreut. Eine allgemeine *Informationsplattform* zum Thema Mechatronik und eine Literaturübersicht mit Kurzreferaten zu einzelnen Mechatronikbüchern vermittelt das Internet unter der Adresse [www.mechatronik-portal.de](http://www.mechatronik-portal.de). Auch fachspezifische Details, die in einem Kompendium naturgemäß nicht vertiefend behandelt werden können, lassen sich mittels fachlicher Stichworte über das Internet erschließen.

Eine gute Darstellung der Elemente der Mechatronik aus den Bereichen Mechanik, Elektronik und Informatik gibt das folgende englischsprachige Lehrbuch

- Alciatore, D. G.; Histan, M. B.: *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*. New York: McGraw-Hill, 2003.

Die Zielsetzung dieses Buches kennzeichnen die Autoren wie folgt: *The purpose of this course in mechatronics is to provide a focused interdisciplinary experience for undergraduates. The interdisciplinary approach is valuable to students because virtually every newly designed engineering product is a mechatronic system.*

Das Werk behandelt die Mechatronik anhand der folgenden Übersichtsdarstellung mechatronischer Systeme, die jedem der Buchkapitel zur Einordnung der einzelnen Kapitelthemen in den Systemzusammenhang vorangestellt ist.



Für das vorliegende Buch diente die *HÜTTE, Das Ingenieurwissen* (Springer, 2012) als Literaturquelle für die in der Mechatronik zusammenfließenden Disziplinen, die sämtlich mit ihren Grundlagen in der HÜTTE dargestellt sind.

- *Technische Mechanik*
- *Elektrotechnik*
- *Technische Informatik Messtechnik*
- *Regelungstechnik*
- *Steuerungstechnik*
- *Konstruktion*
- *Produktion*

Neben diesen Grundlagen und den im Vorwort genannten Unterlagen wurden in den Buchtext zahlreiche Fachdetails ohne punktuell-fachspezifischen Literaturhinweise integriert, um gemäß der im Vorwort erläuterten Konzeption eine „ganzheitliche Textgestaltung“ zu erzielen. Die bei der Erarbeitung dieses Kompendiums insgesamt verwendeten Bücher sind in der folgenden Übersicht zusammengestellt.

---

# Literatur

## A Mechatronik-Bücher

- Bertsche, B., Göhner, P., Jensen, U., Schinköthe, W., Wunderlich, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Springer, Berlin (2009)
- Bolton, W.: Bausteine mechatronischer Systeme. Pearson, München (2004)
- Heimann, B., Gerth, W., Popp, K.: Mechatronik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München (2003)
- Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Springer, Berlin (2002)
- Janschek, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme. Springer, Berlin (2010)
- Nordmann, R., Birkhofer, H.: Maschinenelemente und Mechatronik. Shaker-Verlag, Aachen (2002)
- Roddeck, W.: Einführung in die Mechatronik. Vieweg +Teubner Verlag, Wiesbaden (2012)
- Schiessle, E. (Hrsg.): Mechatronik 1 und 2. Vogel, Würzburg (2002)
- Wagner, F.E., Bähncck, F. (Hrsg.): European Workshop on Education in Mechatronics. FH Kiel, Kiel (2001)

## B Fachbücher

- Breuer, B., Bill, K.H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden (2013)
- Bhushan, B. (Hrsg.): Springer Handbook of Nanotechnology. Springer, Berlin (2004)
- Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Technologieführer. Springer, Heidelberg (2007)
- Czichos, H. (Hrsg.): Handbook of Technical Diagnostics. Springer, Berlin (2011)
- Czichos, H., Daum, W.: Messtechnik und Sensorik. In: Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Hrsg.) DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Aufl. Springer, Berlin (2014)
- Czichos, H., Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch, 4. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden (2015)
- Czichos, H., Hennecke, M. (Hrsg.): HÜTTE Das Ingenieurwissen, 34. Aufl. Springer, Berlin (2012)
- Czichos, H., Saito, T., Smith, L. (Hrsg.): Springer Handbook of Metrology and Testing. Springer, Berlin (2011)
- Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M.: The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley, Reading (1963)
- Findeisen, D.: System Dynamics and Mechanical Vibrations. Springer, Berlin (2000)
- Gevatter, H.J., Grünhaupt, U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. Springer, Berlin (2006)



- Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Hrsg.): DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Aufl. Springer, Berlin (2014)
- Helmerich, R.: Alte Stähle und Stahlkonstruktionen. Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückenträgern und Messungen von 1990 bis 2003 BAM Forschungsbericht, Bd. 271. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2005)
- Hoffmann, J. (Hrsg.): Handbuch der Messtechnik. Hanser, München (1999)
- Howarth, P., Redgrave, F.: Metrology – in short. EU Metrotrade Project, Brussels (2003)
- Kramme, R. (Hrsg.): Medizintechnik. Springer, Heidelberg (2007)
- Niedrig, H. (Hrsg.): Optik, Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Bd. 3. Walter de Gruyter, Berlin (2004)
- Nordmann, R., Birkhofer, H.: Maschinenelemente und Mechatronik. Shaker-Verlag, Aachen (2002)
- Reti, L. (Hrsg.): The Unknown Leonardo. McGraw-Hill, London (1974)
- Richard, H.A., Sander, M.: Technische Mechanik. Festigkeitslehre. Vieweg, Wiesbaden (2006)
- Bosch, R. (Hrsg.): Autoelektrik Autoelektronik. Vieweg, Wiesbaden (2007)
- Bosch, R. (Hrsg.): Fahrstabilisierungssysteme. Stuttgart (2004)
- Bosch, R. (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden (2014)
- Bosch, R. (Hrsg.): Sensoren im Kraftfahrzeug. Stuttgart (2001)
- VDI-Technologiezentrum: Nanotechnologie, Präsentationsfolien. Düsseldorf (2005)
- Völklein, F., Zetterer, T.: Praxiswissen Mikrosystemtechnik. Vieweg, Wiesbaden (2006)
- Weck, M.: Werkzeugmaschinen. Springer, Berlin (2001)
- Wolf, A., Steinmann, R.: Greifer in Bewegung. Hanser, München (2004)
- Zacher, S.: Übungsbuch Regelungstechnik. Vieweg, Wiesbaden (2007)

---

# Sachverzeichnis

6-Achs-Roboter, 214

## A

Abbesches Komparatorprinzip, 102  
Abfallverwertung, 22  
Ablaufsteuerung, 73  
Abrasion, 197  
Abstandserfassung, 289  
Abtasteinheit, 257  
Active Body Control, ABC, 276  
Adaptive Cruise Control System, ACC, 290  
Adaptive Lärmunterdrückung (Active Structural Acoustic Control), 179  
Adaptive Lichttechnik, 290, 291  
Adaptronik, 179  
Adhäsion, 197  
Adhäsionskräfte, 181  
Aerodynamik, 267  
AFM, atomic force microscope, 133  
Aktive Bauwerke, 311  
Aktive Fahrwerk, 276  
Aktorik, 157  
Algebraisierung, 46  
Algorithmus, 40  
Altes Museum, Berlin, 314  
Ampere, 80  
AMR (Anisotrop Magneto Resistive), 146  
Analog-Digital(AD)-Wandler, 178  
Analog-Digital-Umsetzer, 175  
Analog in Physics, 43, 273  
Analysen- und Laborwaage, 245  
Änderung von Stoffeigenschaften, 223  
Anforderungsbeschreibung, 62  
Anthropotechnik, 58  
Antiblockiersystem (ABS), 4, 285  
Antischlupfregelung (ASR), 4, 286

Antriebsmodul, 225  
Anwendungsbeispiel Hauptbahnhof Berlin, 304  
Apparat, 11  
Arbeitsraum, 213  
Arithmetic Logic Unit, ALU, 40  
ASICs (Application Specific Integrated Circuits), 35, 178  
ASI – Aktor-Sensor-Interface, 177  
Assembleranweisung, 42  
Assistenzroboter, 222  
Ätztechnik, 228  
Audio-Video-Technik, 253  
Aufbau- und Verbindungstechniken, 230  
Ausgangsgröße, 12, 15  
Auslegungskonzeption, 59  
Austenit-Kristallgitterstruktur in Martensit, 170  
Automatisiertes Getriebe, 200  
Automobilindustrie, 4

## B

Balkenwaage, 240  
Bauliche Anlagen, 311  
Bauordnung, 295  
Bautechnische Infrastruktur, 295  
Bauwerke, 295  
Bauwerksdynamik, 297  
Bauwerksmonitoring, 298, 307  
Bauwerksüberwachung, 298  
Bauzusammenhang, 62  
Beanspruchung, 31  
Beanspruchungsanalyse, 112  
Beleuchten, 290  
Bernoulli-Gleichung, 72  
Beschleunigungssensor, 147, 279  
Beschleunigungssensorik, 114  
Bewegungsreibung, 194

Bidirectional Universal Switch, BUS, 41  
 Bilanzgleichung, 30  
 Bildbereich, 44  
 Bildgebende Verfahren, 326  
 Bildstabilisierung, 247  
 Bildverarbeitung, 325  
 Bimorphe Piezo-Biegewandler, 183  
 Binäre Steuerungstechnik, 73  
 Bioaktoren, 334  
 Biologische Messkette, 324  
 Biosensor, 323  
 Biosensorik, 334  
 Biosignal, 321  
 Biosignalanalyse, 324  
 Biosignale des Menschen, 321  
 Biostatistik, 325  
 Biot's law, 95  
 Bipolartransistor, 35  
 Bit (Binary Digit), 36  
 Blutdrucksensorik, 326  
 Bohr'sches Atommodell, 38  
 Bonden, 230  
 Bondgraph, 18  
 Bourdonrohr, 138  
 Brake-by-wire, 4  
 Brandschutz, 295  
 Brems-Assistent (BAS), 285  
 Bremsengriff, 279, 288  
 Bremsen, 284  
 Bremskraftverstärker, 285  
 Bremskreldrucksensor, 138  
 Bremssysteme, 285  
 Bridge-Kamera, 246  
 Brückenbauwerk, 304  
 Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM), 80  
 Bustopologie, 173  
 Byte, 36

## C

C++, 42  
 CAD-Werkzeuge, 63  
 Candela, 80  
 CAN – Controller Area Network, 176  
 CCD-Empfänger, 247  
 CD-Player, 257  
 CD-Pressmatrize, 255, 256  
 CD-R (compact disc recordable), 256  
 CD-RW (compact disc re-writeable), 256

Central Processing Unit, CPU, 41  
 Chemical vapor deposition CVD, 236  
 Chemische Gasphasenabscheidung (Chemical Vapour Deposition, CVD), 232  
 CMOS-Technologie (Complementary Metal Oxide Semiconductor), 36  
 CNC-Technik, 225  
 Compact Discs (CD), 254  
 Computerarchitektur, 263  
 Computertechnik, 9, 263  
 Computertomografie, 104, 326  
 Condition Monitoring, 25, 203  
 Conformity assessment, 22  
 Coriolis effect, 94  
 Coulomb'sche Gesetze, 182  
 CPU (Central Processing Unit), 176  
 Cyber-physische Systeme, 152

## D

Dämpfer, 30  
 Dämpfung, 44  
 Datenfusion, 302  
 Dehnstoff-Aktor, 169, 170  
 Dehnungsmessstreifen (DMS), 111  
 Dehnungsmessstreifen-Wägeprinzip, 240  
 Delta-Roboter, 214  
 Design, 22  
 Determiniertheit, 21  
 Diastole, 327  
 Dickschichttechnik, 234  
 Digital-Analog-Umsetzern (DAU), 175  
 Digitalkamera, 246, 247  
 Diode, 35  
 Display, 184  
 Display-System, 184  
 Dissipationseffekt, 14  
 Distanzsensorik, 290  
 DMS-Kraftsensor, 128  
 DMS-Mikrosensorik, 138  
 DMS-Rosetten, 112  
 Domänenspezifischer Entwurf, 61  
 Doppler effect, 94  
 DRAM, 41  
 Drehmoment-Geschwindigkeits-Diagramm, 201  
 Drehmoment-Kalibriereinrichtungen, 137  
 Drehmomentsensor, 136  
 Drehmomentsensorik, 135  
 Drehstrommotor, 160

- Drehzahlsensorik, 123  
Drucksensorik, 137  
Dünnschichttechnik, 235  
Durchfluss-Sensor, 72  
DVD, Digital Versatile Disc, 256  
DVD-Player, 257  
DVR, Digital Video Recorder, 256  
Dynamik, 21, 33, 54
- E**  
Echtzeit, 173  
Effektor, 221  
Effort, 15  
Eichen, 83  
Einflussgrößen, 139  
Eingangsgröße, 12, 15, 17  
Eingebettete Systeme, 41  
Einheitensystem, 80  
Einparksysteme, 289  
Elektrischer Modul, 44  
Elektrodynamischer Wegsensor, 123  
Elektrodynamisches Prinzip, 158  
Elektrohydraulisches Bremssystem, 286  
Elektromagnetisches Prinzip, 159  
Elektromagnetismus, 9  
Elektromechanische Aktoren, 158  
Elektromotor, 159  
Elektronenstrahlschweißen, 230  
Elektronik, 6, 9, 29  
Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP), 4, 278  
Elektrostatische Aktor, 182  
Elektrotechnik, 9  
Elektrothermischer Fluidaktor, 169  
Elementarmaschine, 160  
Embedded Sensor, 149  
Emission, 22  
EMKK-Wägeprinzip (Elektromagnetische Kraftkompensation), 242  
Energie, 11  
Entropiebilanzgleichung, 30  
Entwicklungsmethodik Mechatronik, 58  
Entwicklungswerkzeug, 62  
EPTIS, European Information System on Proficiency Testing Systems, 93  
Erschütterungsschutz, 295  
ESD-Schutz (Electro Static Discharge), 181  
Europäisches Sensorik-Projekt, 312  
European Construction Technology Platform, 295  
European Train Control System, ETCS, 5  
Excimerlaser, 228
- F**  
Fabry-Perot, 108  
Fahrdynamik, 273  
Fahren, 273  
Fahrscheinautomat, 237  
Fahrwerk, 273  
Fahrzeugtechnik, 276  
Faseroptischer Sensor, 151  
Feder, 30, 33, 189  
Federbein, 276  
Feed-back, 65  
Fehlerfortpflanzungsgesetz, 90  
Feinmechanik, 9, 237  
Feinwerktechnik, 6, 237  
Feldplatten-Sensor, 118  
Fenrgläs, 247  
Fernradar, 289  
Fertigungsstraße, 5  
Fertigungstechnik, 11, 223  
Festkörperreibung, 194  
Festplatte, 265  
Festplattenlaufwerk, 263  
Festplattenspeicher, 265  
Feuchtesensor, 144  
Feuchtesensorik, 145  
Finite Elemente Methode (FEM), 63, 269  
Flow, 15  
Fluidik-Aktoren, 167  
Fluidik-Regelsystem, 72  
Fluidmechanischer Aktor, 167  
Flüssigkeits-Druckmessgerät, 138  
Flüssigkeitsreibung, 194  
Fly-by-wire, 4  
Fokus-Servo, 260  
Fokussierung, 257  
FOP-Optik (Flat Optical Pick-up), 261  
Formdiamant, 227  
Formgebung, 223  
Formgedächtnis-Aktor, 169, 170  
Formschluss, 216  
Fotografische Abbildung, 246  
Fotokamera, 246  
Fourier-Transformation, 46  
Freiheitsgrad, 219

Frequenzgang, 17, 46  
 Fügen, 223  
 Führungsgröße, 74  
 Funkenerosion, 228  
 Funktion technischer Systeme, 21  
 Funktionalität, 21  
 Funktionsgröße, 51  
 Funktionsmodellierung, 63  
 Funktionsorientierte Methodik, 30  
 Funktionssicherheit, 22  
 Funktionszusammenhang, 52

## G

Galvanomagnetische Sensoren, 118  
 Ganzheit, 9  
 Gasreibung, 194  
 Gauss effect, 94  
 Gebäude, 295  
 Gebäudetechnik, 315  
 Gebrauchsdauer, 23  
 Gelenkarmroboter, 221  
 Generator, 11  
 Geoelektrische Sensorik, 312  
 Gerät, 11  
 Geschwindigkeit, 31  
 Geschwindigkeitssensorik, 122  
 Gestaltungsmethodik, 50  
 Getriebe, 12, 20, 189  
 Getriebegänge, 200  
 Gewichtskraft, 242  
 Gier-Drehmoment-Sensor, 279  
 Gleichstrommotor, 160  
 Gleichstrommotor-Aktor, 162  
 GMR (Giant Magneto Resistance), 37, 265  
 GMR (Giant Magneto Resistive), 146  
 Greifer, 210  
 Greifertechnik, 216  
 Grenzreibung, 194  
 Grenzschichtreibung, 194

## H

Halbleiterspeicher, 36  
 Hall effect, 94  
 Hall-Beschleunigungssensor, 127  
 Hall-Rotationssensor, 123  
 Hall-Winkelsensor, 119  
 Handhabungssystem, 210  
 Hard disc drive, HDD, 263  
 Harmonic Drive, 215

Hauptschluss, 161  
 Heißleiter, 142  
 Heißprägen, 229  
 Heizungsregelung, 319  
 Heizungstechnik, 295  
 HeNe-Laser, 120  
 Hertz'scher Kontakt, 197  
 Hexapod-Roboter, 214  
 Hochpräzisionsdrehvorrichtung, 227  
 Hubmagnet-Aktor, 162  
 Hydraulik-Zylinder, 191  
 Hydraulische Aktor, 168  
 Hydrodynamik, 197

## I

Idealer Strahler, 142  
 Immission, 22  
 Impuls, 30  
 Induktive Kraftmessdose, 131  
 Induktiver Drehzahlsensor, 123  
 Induktiver Wegsensor, 122  
 Induktivität, 35  
 Industrieroboter, 212  
 Informatik, 40  
 Information, 11  
 Infrarot, 38  
 Infrarot-Kamera, 148  
 Infrastrukturbauten, 295  
 Innere Reibung, 194  
 Inputs, 12  
 Integrierte Schaltkreise, 35  
 Intensiometrischer Sensor, 108  
 Intercomparisons, 93  
 Interferenzmikroskop, 107  
 Interferenzoptisches Wägeprinzip, 241  
 Interferometrischer Sensor, 108  
 International Guide to the Expression of  
     Uncertainty in Measurement GUM, 84  
 Inverser piezoelektrische Effekt, 164

## J

Java, 42  
 Joule's law, 95  
 Justieren, 83

## K

Kalibrieren, 83  
 Kalibrierung, 150  
 Kamera, 246

Kamm-Aktor, 182  
Kapazität, 35  
Kapazitiver Feuchtesensor, 144  
Kapazitiver Positionssensor, 116  
Kelvin, 80  
Kilogramm, 81  
Kinematik, 54, 197, 221  
Kinetik, 54  
Kirchhoff'sche Regeln, 20  
Kleben, 230  
Klemmenpaare, 15  
Kohlenstoffschiicht, 266  
Kommutator, 160  
Kompatibilitätsgleichungen, 20  
Komplexität, 21  
Konformität, 22  
Konstruktionselement, 189  
Kontaktsensor, 271  
Kontinuitätsgleichung, 20  
Konturmessgerät, 102  
Koordinatenmessgerät, 103  
Körperfunktionen, 321  
Körpersensorik, 326  
Kraft, 31  
Kraftschluss, 216  
Kraftsensorik, 127  
Kraftwirkung, 182  
Kupplung, 195

## L

Lagerung, 198  
Lands, 255  
Länge, 80  
Längenmesstechnik, 102, 103  
Laplace-Transformation, 46  
Laser, 38  
Laser-Mikroablation, 228  
Laserstrahlfügen, 230  
Leistung, 41  
Leittechnik, 58  
Leitwerk, 40  
Lenken, 273  
Lenkrad-Winkel-Sensor, 278  
Lenkwinkel, 279  
Leuchtweitenregelung, 290  
Lichtquanten, 38  
Lichtquantentheorie, 38  
LIGA-Technik, 233  
Linearmotor, 160

Linientopologie, 173  
Logarithmenrechnen, 44  
Longitudinaleffekt, 164  
Lorentz's law, 94  
Löten, 230  
Luftlager, 198  
Lüftungstechnik, 295

## M

Magnetbandtechnik, 254  
Magnetische Datenspeicher, 264  
Magnetkopf, 265  
Magnetlager, 198  
Magnetoresistiver Drehwinkelsensor, 118  
Magnetoresistiver Mikrosensor, 146  
Magnetoresistiver Positionssensor, 117  
Magnetresonanztomografie (MRT), 331  
Magnetspeicher, 254  
Makro-Positionierungstechnik, 207  
Makrotechnik, 6, 8  
Manipulator, 212  
Maschinen, 25  
Maschinenelement, 189  
Maschinensprachen, 42  
Masse, 30, 31, 80, 240  
Massekomparator, 240  
Materialverlust, 195  
Mealy-Automat, 73  
Mechanik, 9, 31  
Mechanische Module, 31  
Mechatronik, 3  
Mechatronische Bauwerksuntersuchung, 302  
Mechatronische Gerätetechnik, 237  
Mechatronische Systeme, 29  
Mechatronische Waage, 240  
Mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul, 191  
Mechatronisches Magnetlager, 197  
Medizinische Gerätetechnik, 325  
Medizinprodukt, 321  
Medizintechnik, 321  
Mehrgrößen-Regelung, 72  
Memory, 41  
MEMS (Micro Electro-Mechanical System),  
184, 207, 238  
Messgerät, 82  
Messkette, 97  
Messprinzip, 82  
Messschaltungen für DMS, 111  
Messschieber, 102



- Messschraube, 102  
 Messsucherkamera, 246  
 Messtechnik, 85  
 Messunsicherheit, 84, 85  
 Messunsicherheitsbudget, 90  
 Messverfahren, 82  
 Messwert, 82  
 Meter, 81  
 Meterkonvention, 80  
 Metrologie, 78  
 Michelson-Interferometer, 120  
 Microcontroller, 175  
 Mikroaktorik, 180  
 Mikrobiegebalken, 236  
 Mikrocomputer, 176  
 Mikrocontroller, 176  
 Mikroelektronik, 6  
 Mikrofluidik, 6  
 Mikro-Formtechniken/Abformverfahren, 229  
 Mikromagnetik, 6  
 Mikromechanik, 6  
 Mikromechanischer Beschleunigungssensor, 126  
 Mikromembran, 236  
 Mikrooptik, 6  
 Mikro-Positionierungstechnik, 207  
 Mikro-Produktionstechnologien, 226  
 Mikroprozessor, 176  
 Mikropumpe, 184  
 Mikrorechner, 41  
 Mikroseismik, 312  
 Mikrosensorik, 145  
 Mikrosystemtechnik, 6, 178, 237  
 Mikrotechnik, 6  
 Mikrowellenverfahren, 301  
 Mischreibung, 194  
 MKS, 63  
 Mnemonics, 42  
 Modellbildung, 30, 48  
 Modellierungsgrundlagen, 43  
 MOEMS (Micro Opto-Electrical-Mechanical System), 207, 238  
 Mol, 80  
 Monitoring, 149  
 Montagetechnik, 223  
 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), 36  
 Motor, 161  
 Multifunktionswerkstoff, 179  
 Multivariable Regelstrecke, 72  
 Mustererkennungs- und Bildverarbeitungssysteme, 217  
**N**  
 Nahbereichsradar, 289  
 Nanometer-Piezo-Aktor, 208  
 Nano-Positionierungstechnik, 208  
 Nano-Produktionstechnik, 234  
 Nanoskalige Positionierung, 183  
 Nanotechnik, 6, 234  
 NC-Technik, 225  
 Nebenflüsse, 53  
 Nebenschluss, 161  
 Neigungswaage, 240  
 Nicht-selbsttätige Waagen (NSW), 242  
 Normal, 83  
 NTC, 142  
 Nuclear Magnetic Resonance (NMR), 331  
**O**  
 Oberflächen, 102  
 Oberflächenermüdung, 195  
 Oberflächenmikromechanik, 236  
 Oberflächenrauheit, 268  
 Oberflächenunebenheit, 271  
 Oberflächenzerrüttung, 197  
 Off-line-Programmierung, 220  
 Offshore-Windenergieanlagen, 311  
 On-line-Programmierung, 219  
 Operationsverstärker, 35  
 Optik, 6, 9, 237  
 Optische Datenspeicher, 254  
 Optische Informations- und Kommunikationssysteme, 181  
 Optoelektronik, 38  
 Optoelektronische Bewegungssensoren, 120  
 Organization of Legal Metrology (OIML), 242  
 Originalbereich, 44  
 Ortskurve, 17  
 Ortskurvendarstellung, 46  
 Outputs, 12  
**P**  
 Parallaxe, 102  
 Parallel-Kinematik, 207  
 Perfluorinierter Polyether, 266  
 Pflichtenheft, 51  
 Phänomenologische Gleichungen, 30  
 Photolithografie, 232

Photon, 38  
Physical vapor deposition PVD, 236  
Physikalische Gasphasenabscheidung (Physical Vapour Deposition, PVD), 231  
Pick-and-Place-Gerät, 212  
PID-Regler, 69  
Piezoelectric effect, 95  
Piezoelektrische Mikroaktoren, 183  
Piezoelektrische Sensor, 128  
Piezoelektrischer Drucksensor, 124  
Piezo-Injektortechnik, 165  
Piezokeramik, 183  
Piezoresistive Drucksensor, 235  
Piezoresistiver Sensor, 131  
Pits, 255  
Pixelhafte Bildspeichertechnik, 247  
Planck'sches Strahlungsgesetz, 142  
Planetengetriebe, 200  
Play-back-Programmierung, 220  
Pneumatischer Aktor, 168  
Pneumatischer Stellmotor, 169  
Poisson effect, 94  
Portalroboter, 213  
Positionierungstechnik, 207  
Positionssensorik, 114  
Precision Engineering, 237  
P-Regler, 69  
Probennahme, 84  
Produktionstechnik, 223  
Programmiersprachen, 41  
Prototyping-Modell, 42  
Prozessor, 42  
Prüfen, 82  
PTC-Temperatursensor, 142  
Punkt-zu-Punkt-Bewegung, 212  
Pyrometersensor, 142  
Pyrometrische Temperatursensorik, 142, 148

## Q

Qualität, 22  
Qualitätsmanagement, 91  
Quellen, 18

## R

Radar, 289  
Radialpositionierung, 261  
Raoult's effect, 94  
Rasterkraftmikroskop, 134  
Rastertunnelmikroskop, 6, 208

Rauheitsmessgröße, 105  
Rechenwerk, 40  
Recycling, 22  
Referenzmaterial, 91  
Referenzverfahren, 91  
Regeldifferenz, 69  
Regelfunktion, 69  
Regelkreis, 72  
Regelstrecke, 65, 72  
Regelung, 74  
Regler-Modul, 69  
Reibung, 14, 193  
Reibungskupplung, 195  
Reihenschaltung, 20  
Reluktanzmotor, 161  
Resistive Positionssensoren, 114  
Resistiver Feuchtesensor, 144, 145  
Resonanzeffekt, 37  
RFID-Technologie (radio-frequency identification), 152  
Richtigkeit von Messungen, 87  
Risiko, 23  
Roboteraktori, 215  
Roboterkinematik, 220  
Roboterzelle, 221  
Robotik, 222  
Roll/Wälzreibung, 198  
Rotationsmotor, 160  
Rotorblätter, 311  
Rückführbarkeit, 89  
Rückkopplung, 66  
Ruhreibung, 193

## S

Sampling, 84  
Sanitärtechnik, 295  
Scanner/Sensor-Modul, 302  
SCARA-Roboter, 214  
Schallemissionsanalyse, 300  
Schallschutz, 295  
Schlitten-Servo, 257, 261  
Schreib/Lesekopf, 264  
Schreib/Lese-Speicher (RAM), 41  
Schwarzer Körper, 142  
Schwimmwinkel, 278  
Schwingung, 62  
Schwingungsanalyse, 309  
Schwingungstilger, 311  
Seebeck effect, 95

Sekunde, 80  
 Selbsttätige Waagen (SW), 243  
 Senken, 18, 30  
 Sensor-Aktor Prozessorik, 173  
 Sensor-Aktor-Signalverarbeitung, 175  
 Sensorik, 91, 139  
 Sensotronic Brake Control (SBC), 286  
 Seriell-Kinematik, 207  
 Shannon'sches Theorem, 175  
 Sicherheit, 22  
 Sicherheitsraum, 220  
 Signalaufbereitung, 178  
 Signal-Kommunikationsstruktur, 173  
 Signalübertragungsverhalten, 17  
 Signalverarbeitung, 173  
 SI-Systems, 81  
 Snell's law, 94  
 Software Engineering, 42  
 Softwaretechnik, 41  
 Sonografie, 326, 329  
 Speicher, 18, 30  
 Speicherdichte, 266  
 Speicherprogrammierbare Steuerungen, 73  
 Speicherscheibe, 265  
 Speicherwerk, 41  
 Spektrometrischer Sensor, 108  
 Spiegelreflexkamera, 246  
 Spiralmodell, 42  
 Spritzgussverfahren, 229  
 Sprungantwort, 17  
 Sprungfunktion, 17  
 Sputtern, 232  
 SRAM, 41  
 SSI (Small Scale Integration), 36  
 Stabilität, 21, 75  
 Standsicherheit, 295, 296  
 Statik, 58  
 Statische Reibung, 194  
 Steifheit, 44  
 Stellgröße, 68  
 Steuerung, 73  
 Stoffmenge, 72  
 Stoffschluss, 216  
 Störgröße, 21, 65, 67, 75  
 Stotterbremse, 286  
 Strahlungsquelle, 38  
 Stribeck-Kurve, 194, 267  
 Struktur technischer Systeme, 18  
 Strukturdynamik, 63

Strukturelement, 33  
 Strukturintegrierte Sensorik, 149  
 Strukturintegrierte Ultraschallsensoren  
 (embedded sensors), 299  
 Strukturintegrität, 296  
 Substraktiv-TechnikenMikro-Zerspanen, 227  
 Synchron, 161  
 Synchronisierung, 200  
 Systemanalyse, 197  
 Systematische Messabweichung, 85  
 Systemaufbau, 59  
 Systembegriffe, 12  
 Systemeigenschaften, 20  
 Systementwurf, 61  
 Systemgrenze, 11  
 Systemoptimierung, 60  
 Systems Reifen/Straße, 284  
 Systemstruktur, 11, 13  
 Systemzusammenhang, 61  
 Système International d' Unités (SI), 80  
 Systole, 324, 327

## T

Tasten, 289  
 Taupunkt, 143  
 Teach-in-Verfahren, 220  
 Technische Diagnostik, 25  
 Technische Zuverlässigkeit, 23  
 Telematikanwendung, 153  
 Temperatur-Feuchte-Diagramm, 144  
 Temperaturregelung, 66  
 Temperatursensorik, 140  
 Temperatursteuerung, 66  
 Testfunktionen, 17  
 Thermal-Flying-Height-Control-Technik, 270  
 Thermische Behaglichkeit, 319  
 Thermistor, 142  
 Thermobimetall-Aktor, 169, 170  
 Thermoelement, 143  
 Thermografie, 301  
 Thermo-mechanische  
 Flughöhen-Regelungstechnik, 270  
 Thermomechanischer Aktor, 169  
 Thyristoren, 35  
 Time-domain-Sensor, 108  
 Tintenstrahldrucker, 166, 169, 172  
 Tomografie, 326  
 Traceability, 83  
 Tracking-Servo, 257

Tragfähigkeitsbewertung, 309

Trägheit, 44

Tragvermögen, 221

Transformator, 12

Transistor, 35

Translation, 31

Transversal, 164

Tribochemische Reaktionen, 197

Tribologie, 193

Tribologische Systeme, 193

Tribophysik, 284

Triboreaktion, 195

Turbinenschaufeln, 105

## U

Übergangsfunktion, 17

Übersteuern, 278

Übertrager, 18, 30

Übertragungsfunktion, 47

Ultraschalldiagnostik, 330

Ultraschall-Distanzsensor, 291

Ultraviolett, 38

Umwandlung, 170

Umweltverträglichkeit, 22

Untersteuern, 278

## V

Verbindungsprogrammierbare Steuerung, 73

Verfahrenstechnik, 11

Verknüpfungsgleichung, 30

Verknüpfungssteuerung, 73

Verschleiß, 14

Verschleißmechanismen, 195

Versorgungstechnik, 315

Versuchslabor für das Intelligente Haus, 316

Vierpolddarstellung, 15

Visco-Kupplung, 195

Viskosität, 194

VLSI (Very Large Scale Integration), 36

V-Modell, 60

Volumenmikromechanik, 236

Von-Neumann-Rechnerarchitektur, 40

## W

Waage, 240

Wägetechnik, 240

Wägewert, 240

Wanderfeldmotor, 160

Wandler, 18, 30

Wärmelehre, 9

Wärmetechnik, 9

Wartburg, 314

Wasserdampfmenge, 143

Wasserfall-Modell, 42

Wechselstrom, 161

Wechselwirkung, 11, 21

Werkzeugmaschine, 224

Widerstand, 30

Widerstandskraft, 193

Widerstandsthermometer, 142

Windenergieanlage, 310

Winkelsensoren, 117

Wirbelstrom-Positionssensor, 117

Wirkprinzipien, 52

Wirkzusammenhang, 54

Wirtschaftlichkeit, 22

## Z

Zahnradgetriebe, 200

Zeit, 80

Zeitbereich, 44

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP), 27, 311

Zielscheibenmodell, 85

Zusammenschalten von Systemmodulen, 47

Zustandsraum, 48

Zustandsüberwachung, 27, 203, 296

Zuverlässigkeit, 23, 26, 41