

Horst Czichos

Mechatronik

Horst Czichos

Mechatronik

Grundlagen und Anwendungen
technischer Systeme

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 296 Abbildungen und 12 Tabellen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 2006
- 2., aktualisierte und erweiterte Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Thomas Zipsner | Imke Zander

Der Vieweg+Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0373-3

Vorwort

Die Mechatronik ist mit der systemtechnischen Kombination von Mechanik, Elektronik und Informatik heute die grundlegende interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft für die Entwicklung und Anwendung technischer Systeme.

Die erste Auflage dieses Mechatronik-Buches fand erhebliches Interesse, so dass bereits im Folgejahr die zweite Auflage erforderlich wurde. Hierfür wurden die Grundlagen vertieft, die Zahl der Anwendungsbeispiele erhöht und weitere für mechatronische Systeme relevante Themen prägnant in Text und Bild integriert. Die folgenden Stichworte geben dazu eine Übersicht:

- Grundlagen: • Mikrosensorik • Mikroaktork • Informatik in mechatronischen Systemen • Halbleiterspeicher • Magnetelektronik • Optoelektronik • Softwaretechnik • Eingebettete Systeme • Entwicklungsmethodik Mechatronik.
- Anwendungen: • Mikrosystemtechnik • Aufbau- und Verbindungstechnik • Elektrophysikalische Aktork in Tintenstrahldruckern • Feinwerktechnisch-mechatronischer Fahrscheinautomat • Bildstabilisierung in Fotokameras und Ferngläsern • Fokussierung und Spursicherung in CD/DVD-Playern • Roboterfunktionalität.

Außerdem wurde das Kapitel *Mechatronik in der Medizintechnik* neu aufgenommen, so dass der Inhalt der zweiten Auflage um ca. 50 Seiten zum Umfang der ersten Auflage angewachsen ist.

Das Buch ist ein *Mechatronik-Kompendium* 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 zur ersten Auflage (Seite VI) sowie bei den Literatur- und Quellenhinweisen (Seite 255) erläutert.

Das Kompendium 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.

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 meiner Kollegin Frau Prof. Christiane Mirow (*Entwicklungsmethodik Mechatronik*) und meinem Kollegen Prof. Dr. Peter Hussels (*Elektromechanische Aktoren*) sowie Prof. Dr. Peter Hess, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg (*Robotik*). Ebenso herzlich gilt mein Dank Herrn Thomas Zipsner und dem Technik-Lektorat des Vieweg-Verlages für die wiederum ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Berlin, Januar 2008

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 *Kompendium* – 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. Goebels, 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. Wiggerhauser, 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.

Inhaltsverzeichnis

Teil A Grundlagen

1 Übersicht	1
1.1 Definition und Beispiele der Mechatronik	1
1.2 Mechatronik in der Makro/Mikro/Nano-Technik	5
1.3 Mechatronik als Wissenschafts- und Technikgebiet	8
2 Einführung in die systemtechnische Methodik	9
2.1 Klassifikation technischer Systeme	11
2.2 Funktion technischer Systeme	13
2.3 Struktur technischer Systeme	15
2.4 Kombination von Systemelementen zu System-Modulen	16
2.5 Systemeigenschaften	18
2.5.1 Technische Systemeigenschaften	18
2.5.2 Allgemeine Systemeigenschaften	19
3 Modellbildung mechatronischer Systeme	21
3.1 Modellierungsmethodik	21
3.2 Mechanik in mechatronischen Systemen	23
3.3 Elektronik in mechatronischen Systemen	26
3.4 Informatik in mechatronischen Systemen	30
3.5 Beschreibung mechatronischer Systeme:	34
3.5.1 Modellierungsgrundlagen aus der Physik	34
3.5.2 Zeitbereich	34
3.5.3 Bildbereich	36
3.5.4 Zustandsraum	38
3.6 Gestaltung mechatronischer Systeme	39
3.6.1 Systemtechnische Gestaltungsgrundlagen	40
3.6.2 Entwicklungsmethodik Mechatronik	47
4 Regelung und Steuerung	51
4.1 Prinzipien der Regelung und Steuerung	52
4.2 Regelfunktionen und Regler-Module	54

4.3	Mehrgrößen-Regelung	56
4.4	Binäre Steuerungstechnik	57
4.5	Steuerung und Regelung in der Mechatronik.....	59
5	Sensorik	61
5.1	Messtechnische Grundlagen	62
5.1.1	Metrologie: Fachgebiete und Standards	62
5.1.2	Metrologische Begriffe	64
5.1.3	Messunsicherheit und Messunsicherheitsbudget	65
5.1.4	Grenzwert-Beurteilungen von Messwerten	66
5.1.5	Präzision und Richtigkeit von Messungen; Messstrategie	67
5.1.6	Qualitätsmanagement im Mess- und Prüfwesen	68
5.2	Sensortechnisch-physikalische Grundlagen	69
5.2.1	Physikalische Sensoreffekte.....	70
5.2.2	Funktion und Kennzeichen technischer Sensoren	72
5.3	Messkette	73
5.4	Sensorik geometrischer Größen	74
5.4.1	Längenmesstechnik, Form- und Maßsensorik	74
5.4.2	Faseroptische Sensorik	78
5.4.3	Dehnungsmessstreifen (DMS)-Technik	81
5.5	Sensorik kinematischer Größen	84
5.5.1	Positionssensorik (Wege, Winkel)	84
5.5.2	Geschwindigkeitssensorik	91
5.5.3	Drehzahlsensorik	92
5.5.4	Beschleunigungssensorik	94
5.6	Sensorik dynamischer Größen	96
5.6.1	Kraftsensorik	96
5.6.2	Drehmomentsensorik	101
5.6.3	Drucksensorik	102
5.7	Sensorik von Einflussgrößen	104
5.7.1	Temperatursensorik	105
5.7.2	Feuchtesensorik	107
5.8	Strukturintegrierte Sensorik: Embedded Sensors	109
5.9	Mikrosensorik	113
5.10	Sensorsignalausgabe	117

6 Aktorik	119
6.1 Elektromechanische Aktoren	120
6.1.1 Funktionsprinzipien elektromechanischer Aktoren	120
6.1.2 Elektromotoren als Aktoren	122
6.2 Piezoelektrische Aktoren	125
6.3 Fluidmechanische Aktoren	128
6.4 Thermomechanische Aktoren	130
6.5 Aktoreigenschaften und Kenndaten: Übersicht	133
6.6 Sensor-Aktor Prozessorik	134
6.6.1 Sensor-Aktor-Signalverarbeitung	135
6.6.2 Anwendungsspezifische Signalverarbeitung	137
6.7 Adaptronik	139
6.8 Mikroaktorik	140

Teil B Anwendungen

7 Maschinenbau	145
7.1 Maschinenelemente	145
7.2 Mechatronische Maschinenelemente	146
7.2.1 Mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul	147
7.2.2 Automatisiertes Getriebe	148
7.3 Tribologische Systeme	152
8 Positionierungstechnik und Robotik	157
8.1 Mechatronische Positionierungstechnik	158
8.2 Handhabungs- und Robotertechnik	161
9 Produktionstechnik	171
9.1 Mechatronik in Werkzeugmaschinen	172
9.2 Mikroproduktionstechnologien	174
9.3 Mikrotechnologien für Sensoren und Aktoren	181
10 Feinwerktechnik	183
10.1 Mikrosystemtechnik	184
10.2 Mechatronisches System Waage	185
10.3 Mechatronisches System Fotokamera	191

11 Audio-Video-Technik	197
11.1 Optische Datenspeicher	198
11.2 Mechatronisches System CD/DVD-Player	199
12 Computertechnik	205
12.1 Magnetische Datenspeicher	206
12.2 Mechatronisches System Festplattenlaufwerk	206
13 Fahrzeugtechnik	211
13.1 Funktion Fahren: Fahrdynamik und Fahrwerk	212
13.2 Funktion Lenken: Elektronisches Stabilitätsprogramm	214
13.3 Funktion Bremsen: Bremssysteme	219
13.4 Funktion Tasten: Distanzsensorik	223
13.5 Funktion Beleuchten: Adaptive Lichttechnik	225
14 Bauliche Anlagen	227
14.1 Bauwerksüberwachung mit ZfP, Sensorik und Aktorik	228
14.2 Sensorik historischer Baustrukturen	233
14.3 Mechatronik in der Gebäudetechnik	236
14.4 Bauwerksdynamik	240
15 Medizintechnik	243
15.1 Biosignale und Biosensorik	244
15.2 Mechatronik in der medizinischen Gerätetechnik	247
Literatur und Quellen	257
Sachwortverzeichnis	261

1 Übersicht

1.1 Definition und Beispiele der Mechatronik

Der Ende der 1960er Jahre in Japan geprägte Begriff *Mechatronik* hat sich in den letzten Jahren in der Technik weltweit eingeführt. Er steht aufgrund seiner allgemeinen Bedeutung heute mit folgender Definition im Brockhaus:

Mechatronik: Interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Im Vordergrund steht die Ergänzung und Erweiterung mechanischer Systeme durch Sensoren und Mikrorechner zur Realisierung teilintelligenter Produkte und Systeme.

Technische Systeme sind allgemein durch die Funktion gekennzeichnet, Stoffe (Materie), Energie und/oder Information umzuwandeln, zu transportieren und/oder zu speichern. Mechatronische Systeme basieren auf dem systemtechnischen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Informatik. 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 *Processorik* und *Informatik* zur Informationsverarbeitung bestehen, siehe Bild 1.1.

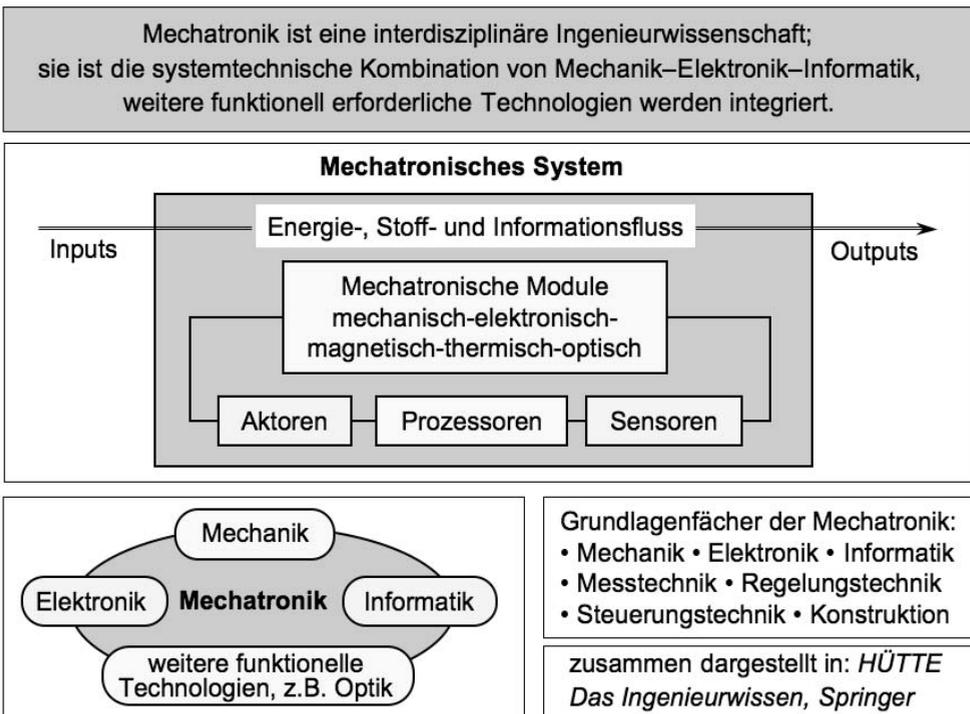


Bild 1.1 Stichwortartige Übersicht über die Mechatronik

Die Mechatronik ist eine in der Technik allgemein anwendbare Ingenieurwissenschaft. Zur einführenden Darstellung der Vielfalt der Mechatronik sind im Folgenden einige typische mechatronische Systeme mit Beispielen aus den Technikbereichen

- Feinwerktechnik-Optik-Elektronik
- Fahrzeugtechnik
- Robotertechnik
- Computertechnik

in einer exemplarischen Zusammenstellung in den Bildern 1.2 bis 1.5 wiedergegeben.

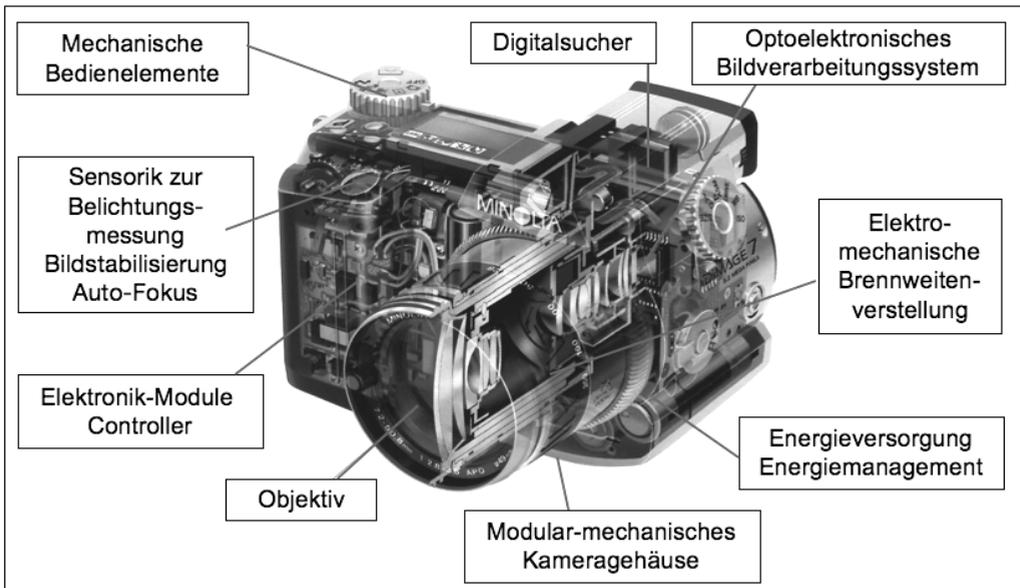


Bild 1.2 Mechatronisches System Fotokamera

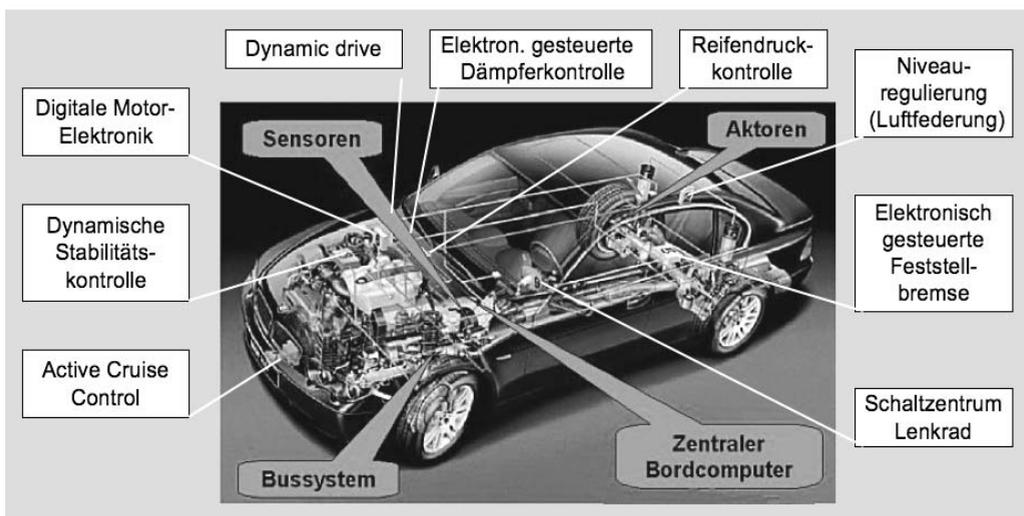


Bild 1.3 Mechatronisches System Automobil

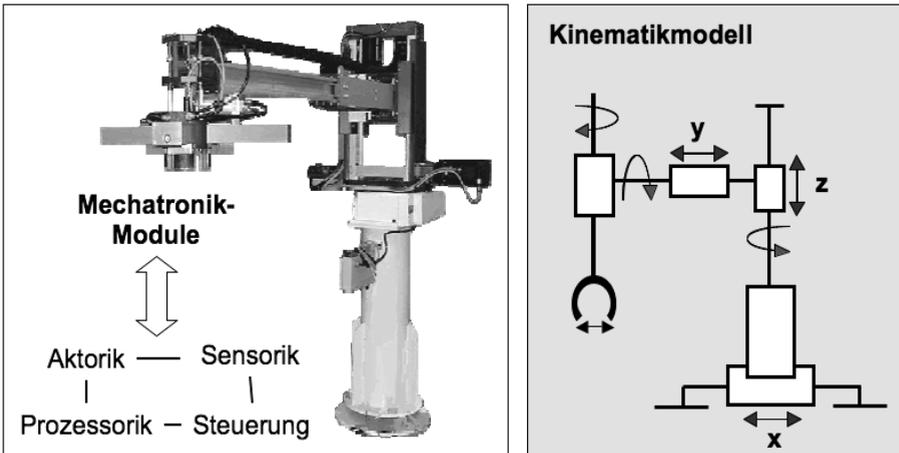


Bild 1.4 Mechatronisches System Roboter

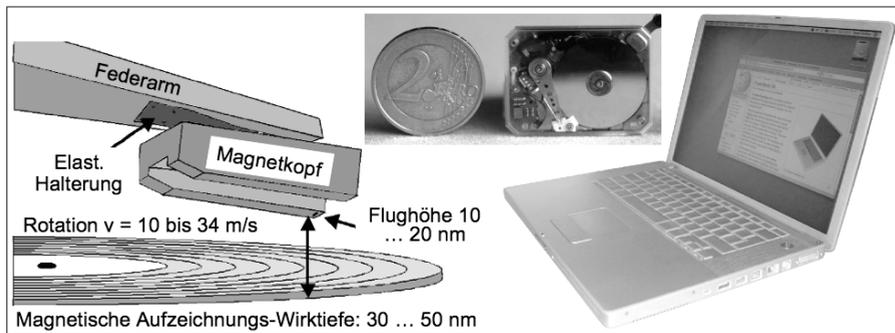


Bild 1.5 Mechatronisches System Computer-Festplattenlaufwerk

Die stille Revolution der Mechatronik

Unter dieser Überschrift erläuterte ein Wissenschaftsmagazin die Entwicklung der Mechatronik zur *Zukunftswissenschaft* 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 Prozent 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 Millisekunden schneller als der Fahrer. Mechatronik ist die Triebfeder in der Automobilindustrie: 30 Prozent der Herstellungskosten und 90 Prozent 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 ein-

gebaut, 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 "Schienentaxi". 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 sechsachsige 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 Prozent 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.

1.2 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 Bild 1.6 illustriert – ausgehend vom klassischen Urmeter – dass das Größenverhältnis Meter/Nanometer vergleichbar ist mit dem Größenverhältnis des Erddurchmessers zum Durchmesser einer Haselnuss.

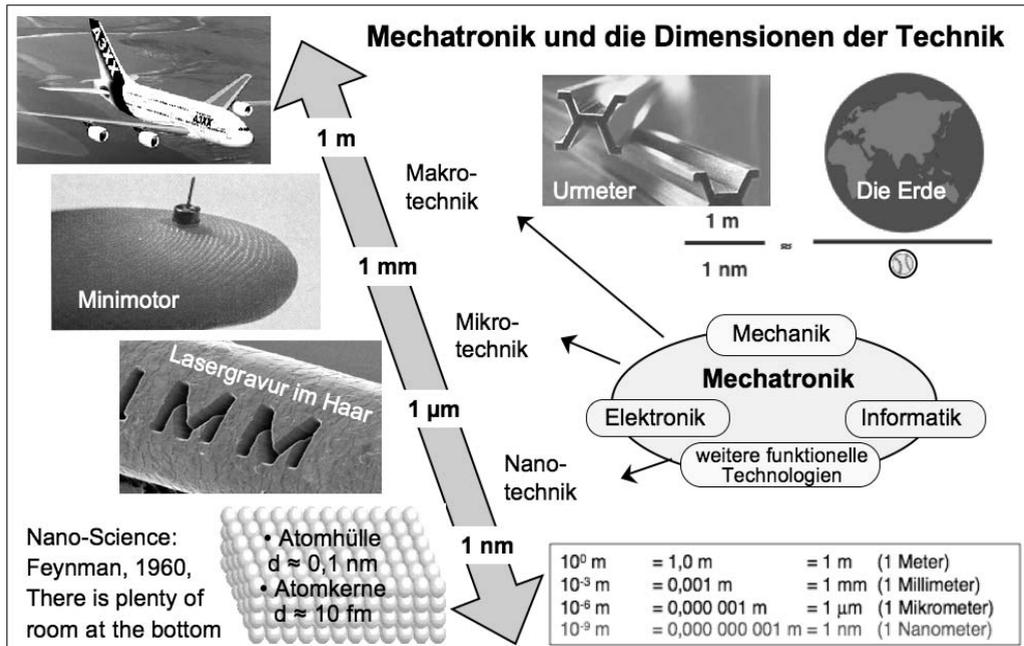


Bild 1.6 Dimensionsbereiche der heutigen Technik: Makrotechnik, Mikrotechnik, Nanotechnik

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/µm-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.

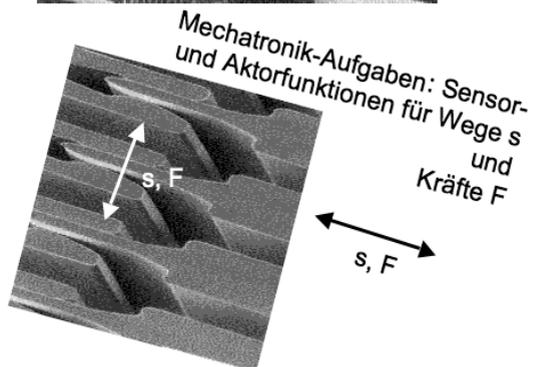
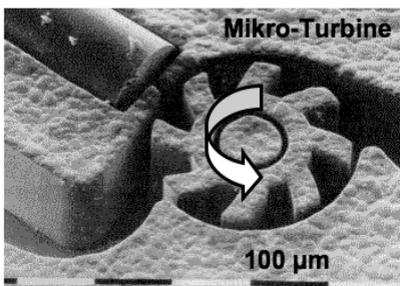
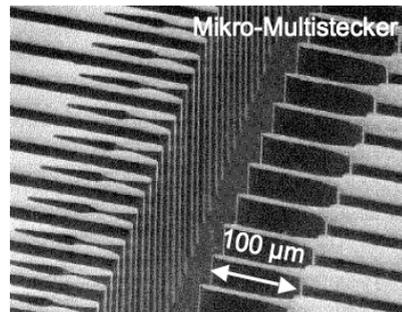
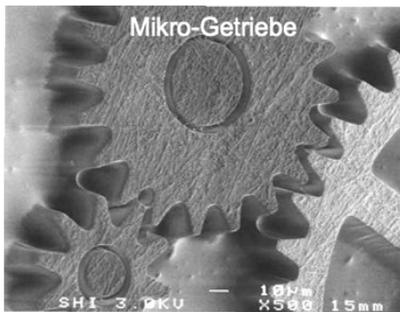
Nanotechnik nutzt nanoskalige Effekte der Physik, Chemie und Biologie. Die Nanowissenschaft wurde 1960 durch Feynman (Physik-Nobelpreisträger 1965) begründet. Beispiele der nano-mechatronischen Gerätetechnik sind das Rastertunnelmikroskop (siehe Bild 1.7) und das Rasterkraftmikroskop (siehe Bild 5.44 und 5.45). 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 Makro-, Mikro- und Nanotechnik in der Mechatronik zeigt Bild 1.7.

Mechatronik in der Makrotechnik

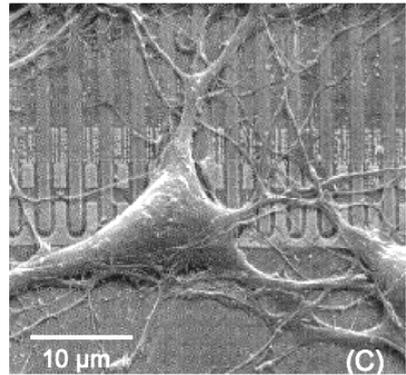
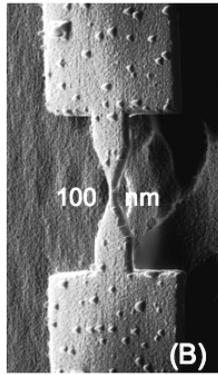
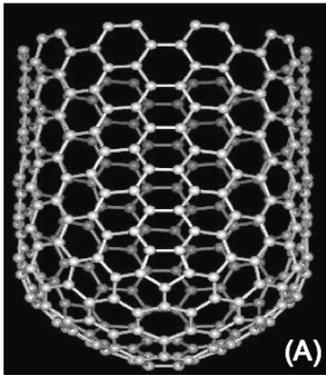


Mechatronik in der Mikrotechnik



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



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 nachgeregelt und konstant gehalten
 - Spitze folgt dem Höhenprofil

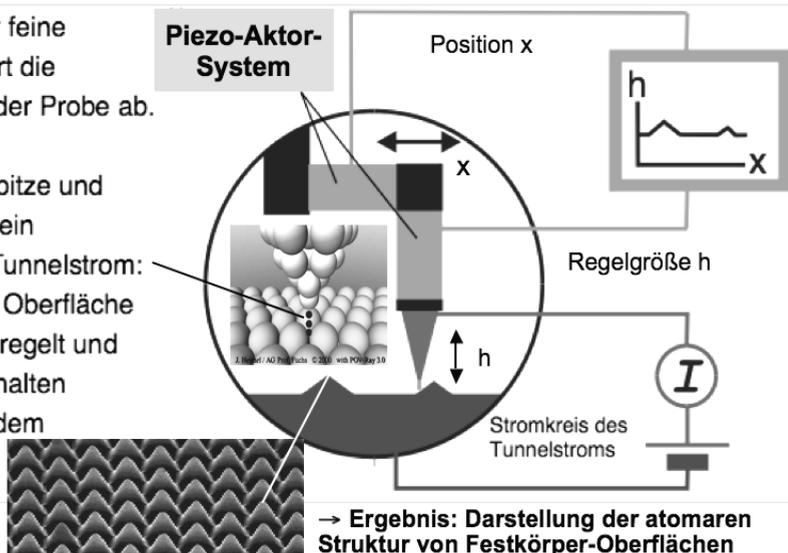


Bild 1.7 Mechatronische Systeme der Makrotechnik, Mikrotechnik und Nanotechnik, Beispiele

1.3 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 gefüghaften 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 – Akustik – Optik – Wärmelehre – Elektromagnetismus – Atomphysik – Quantenphysik – Elementarteilchen. Mit einer neuartigen ganzheitlichen Physik-Didaktik hatte Richard P. Feynman Anfang der 1960er Jahre eine integrale Betrachtung physikalischer Teilbereiche in seinen *Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley, 1963) entwickelt. Mit der Konzeption „Analogies in Physics“ behandelte er beispielsweise gleichzeitig das physikalische Verhalten mechanischer Systeme und elektromagnetischer Systeme, die durch vergleichbare mathematische Zusammenhänge beschrieben werden können (siehe Kapitel 3). Er illustrierte auch die Methode des „Computational Modeling“ in einfacher Weise am Beispiel der Fahrdynamik eines Automobils (siehe Kapitel 13.1). Diese interdisziplinäre Konzeption, die in der Technik als „Analogies in Technology“ bezeichnet werden kann, ist heute eine für die Modellierung dynamischer technischer Systeme wichtige Methodik der Mechatronik.

Der Vergleich der ganzheitlichen Betrachtung von Physik und Technik gemäß Bild 1.8 illustriert, dass in der integralen Konzeption Einzeldisziplinen als Teilgebiete übergeordneter *Systeme* verstanden werden.

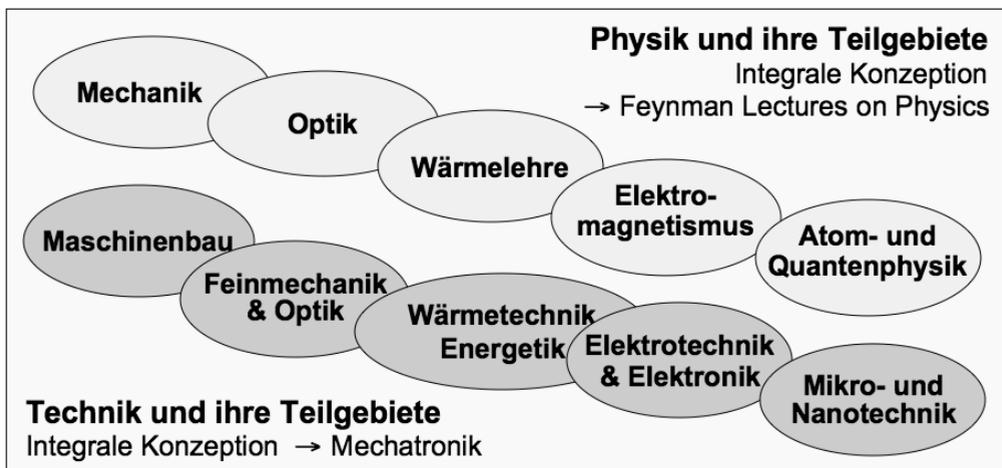


Bild 1.8 Gegenüberstellung von Teilbereichen der Physik und der Technik und Prinzipien ihrer integralen Betrachtung und Anwendung

2 Einführung in die systemtechnische Methodik

Der fachliche Gegenstand der Mechatronik sind *technische Systeme*:

- Maschinen als primär energieumsetzende technische Gebilde
- Apparate als primär stoff- oder materieumsetzende technische Gebilde
- Geräte als primär signalumsetzende technische Gebilde.

Die systemtechnische Methodik kombiniert Methoden aus Biologie, Kybernetik und Informationstheorie (begründet von Ludwig von Bertalanffy, Norbert Wiener und Claude Shannon) und wendet sie auf die Technik an, Die Kennzeichen technischer Systeme können in vereinfachender Weise wie folgt beschrieben werden, siehe Bild 2.1:

- Jedes System besteht aus interaktiven Elementen (Komponenten).
- Die Systemelemente lassen sich durch eine zweckmäßig definierte virtuelle Systemgrenze von der Umgebung (oder anderen Systemen) abgrenzen, um sie modellhaft isoliert betrachten zu können.
- Die in das System eintretenden Eingangsgrößen (*Inputs*) werden über die Systemelemente in Ausgangsgrößen (*Outputs*) überführt.
- Die Funktion eines Systems wird beschrieben durch Input/Output-Beziehungen zwischen operativen Eingangsgrößen und funktionellen Ausgangsgrößen; sie kann beeinflusst werden durch Störgrößen und Dissipationseffekte.
- Jeder Input und Output kann den kybernetischen Grundkategorien *Stoffe (Materie)*, *Energie*, *Information* zugeordnet werden.
- Die bestimmungsgemäße Systemfunktion bildet die Rahmenbedingung für die zu gestaltende Systemstruktur mit ihren Elementen, Eigenschaften und Wechselwirkungen. Es gilt die Regel *structure follows function* (Peter Drucker).

- 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

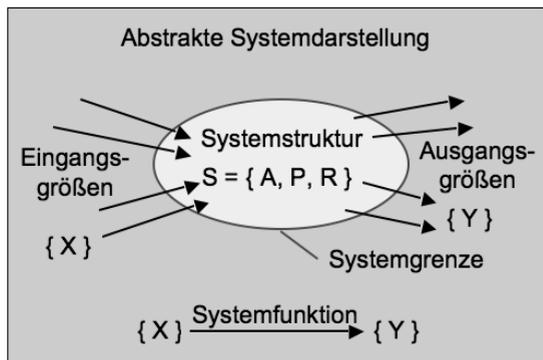


Bild 2.1 Die systemtechnische Methodik in Stichworten

In Bild 2.2 ist die Anwendung der systemtechnischen Beschreibung technischer Gebilde auf einfache mechanische und elektrische *Zwei-Körper-Systeme* der Technischen Mechanik und der Elektrotechnik illustriert. Dargestellt sind die Elementarformen eines Getriebes und eines Transformators mit ihren grundsätzlichen Systemkennzeichen: • System-Piktogramm • Systemstruktur • Systemfunktion.

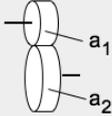
System-Charakteristika	Mechanisches System: Getriebe	Elektrisches System: Transformator
System-Piktogramm		 Spulensystem Sp ₁ , Sp ₂
Systemstruktur A Elemente	a ₁ Antriebsrad a ₂ Abtriebsrad	Sp ₁ Primärspule Sp ₂ Sekundärspule
P Eigenschaften P(a ₁), P(a ₂)	Verzahnungsarten Teilkreise, Module, etc	Spulenarten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

Bild 2.2 Beispiele einfacher technischer Systeme

Bei den vereinfachenden Darstellungen von Bild 2.1 und 2.2 sind wichtige Aspekte, welche die Parameter und das Verhalten technischer Systeme entscheidend beeinflussen können, noch nicht berücksichtigt:

- Störeinflüsse und Störgrößen, wie beispielsweise
 - mechanische Vibrationen, impulsförmige Stoß- oder Prallvorgänge,
 - elektromagnetische Störfelder, Einstreuungen, Spannungs- oder 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. Formänderungen und Materialverluste von Systemelementen,
 - Signal-Informationsverluste bei Analog-Digital-Umwandlungen.

Diese komplizierten Einflüsse müssen bei Gestaltung, Auslegung und Betrieb konkreter technischer Systeme natürlich system- und anwendungsspezifisch berücksichtigt werden, Bild 2.3 zeigt dazu eine allgemeine Übersicht.

Beispiele der systemtechnischen Behandlung von Stoff- und Energiedissipationen gibt Kapitel 7.3. Die Frage der Vermeidung von Informationsverlusten bei der Signalübertragung wird in Kapitel 6.6 behandelt.

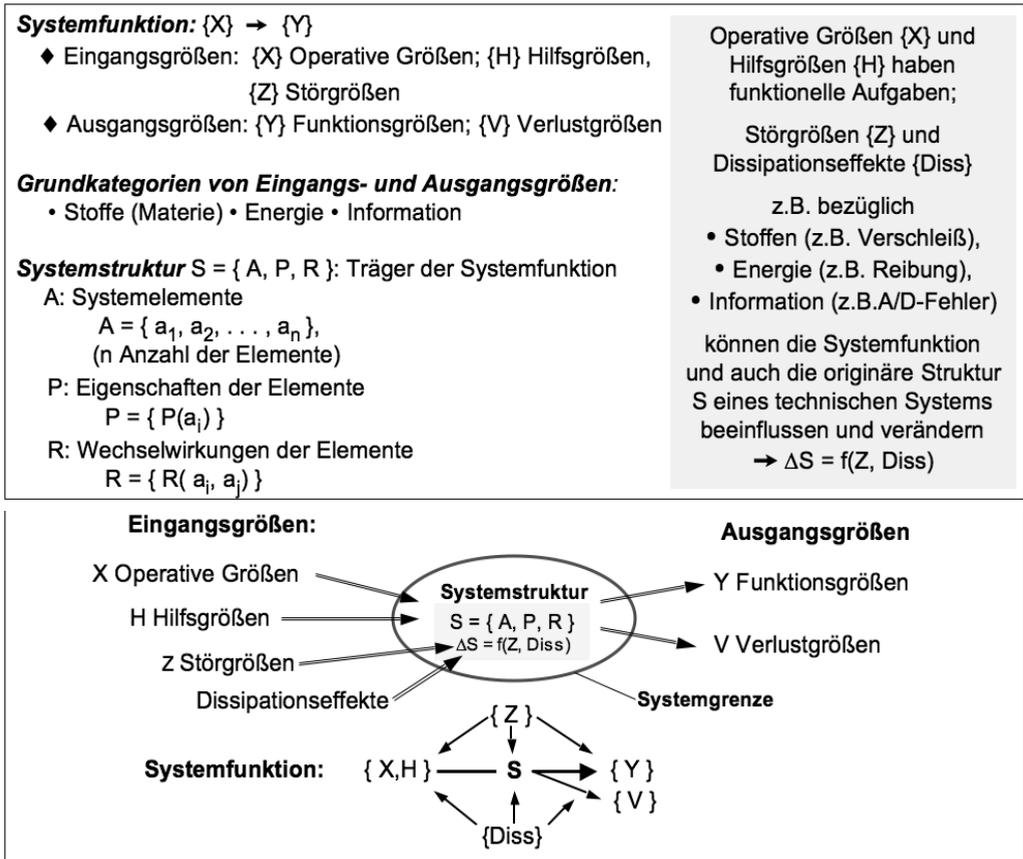


Bild 2.3 Die systemtechnische Methodik – unter Berücksichtigung von Störeinflüssen und Dissipationseffekten – in Stichworten

2.1 Klassifikation technischer Systeme

Technische Systeme können nach kybernetischen Kategorien eingeteilt werden:

System	Stoffbestimmt	Energiebestimmt	Informationsbestimmt
Aufgabe	Stoffe gewinnen, bearbeiten, transportieren, etc.	Energie umwandeln, verteilen, nutzen, etc.	Informationen aufnehmen, verteilen, darstellen, etc.
Beispiel	Chemieanlage Produktionsanlage Logistiksystem	Kraftwerk Stromversorgung Antriebssystem	Computer Audio/Video-System Internet

Als Prozess wird die Gesamtheit der systeminternen Vorgänge bezeichnet, durch die Stoffe, Energie und Information umgeformt, transportiert oder gespeichert werden.

Technische Systeme gliedern sich – je nach dominierender Technologie und den Prozesstypen der Erzeugung, Verteilung oder Aufbewahrung in vielfältige Ausführungsarten auf. Eine Übersicht über die grundlegenden Kategorien technischer Systeme mit den Prozessgegenständen *Materie*, *Energie* und *Information* gemäß DIN 19222, *Leittechnik*, gibt Bild 2.4.



Prozesstyp		Erzeugung	Verteilung	Aufbewahrung
Dominierende Technologie		Umformung	Transport	Speicherung
Verfahrenstechnik	gasförmig	Erdgasförderung Chemischer Reaktor	Gasnetz, Tankwagen	Gasbehälter
	flüssig	Raffinerie	Pipeline, Tankwagen	Tank
Fertigungstechnik	fest	Bergbau, Kunststoffherstellung	Förderband	Bunker
	• körnig	Hochofen, Stahlwerk	Kokillen-Wagen	Kokillen
	• geschmolzen	Formguss, Walzwerk	Rollgang	Zwischenlager
	• geformt	Dreherei, Lackiererei	Fertigungsstrasse	Umlaufspeicher
	• bearbeitet	Schweißerei, Montage	Montagestrasse	Fertig-Lager
	• gefügt		Logistik, Verkehr	Container



Prozesstyp		Erzeugung	Verteilung	Aufbewahrung
Dominierende Technologie		Umformung	Transport	Speicherung
Energie-technik	Potentiell:	Getriebe	Führungen, Gelenke	Massenpotential
	• mechanisch	Pumpe	Druckölnetz	Pumpspeicherwerk
	• hydraulisch	Kompressor	Druckluftnetz	Druckluftspeicher
	• pneumatisch	Motor, Turbine	Handhabungssysteme	Schwungrad
	Kinetisch:	Kreiselpumpe	Druckölnetz	Flüssigkeitsstrom
	• mechanisch	Gebälse	Druckluftnetz	Gasstrom
	• hydraulisch	Verbrennung, Heizung	Fernheizanlage	Nachtspeicherofen
	• pneumatisch	Generator, Kraftwerk	Energieverteilung	Akkumulator
	thermisch	Elektromagnet	Magnetischer Fluss	Supraleitender Stromkreis
	elektrisch	Elektrolyse	Wasserstofftransport	Brennstofflagerung
magnetisch	Kernreaktor	Brennstofftransport	Kernbrennstofflagerung	
chemisch				
atomar				



Prozesstyp		Erzeugung	Verteilung	Aufbewahrung
Dominierende Technologie		Umformung	Transport	Speicherung
Informations- technik	mechanisch	Nocken, Hebel	Rohrpost	Lochstreifen
	hydraulisch	Steuerschieber	Druckölnetz	Reservoir
	pneumatisch	Düse-Prallplatte	Druckluftnetz	Reservoir
	akustisch	Lautsprecher	Sonorik	Schallplatte
	optisch	Lichtschranke	Lichtleiter	Fotografie
	elektrisch	Signalcodierung	Datenübertragung, TV	Halbleiter-Chip
	magnetisch	Elektromagnetische Partionierung	Magnet-Stick	Magnetplatte

Bild 2.4 Klassifikation technischer Systeme nach DIN 19222

2.2 Funktion technischer Systeme

Die Funktion technischer Systeme besteht in der Überführung von Eingangsgrößen in aufgabenspezifisch erforderliche Ausgangsgrößen. Bild 2.5 stellt die Systemfunktion am Modell eines technischen Systems mit Energieflüssen dar.

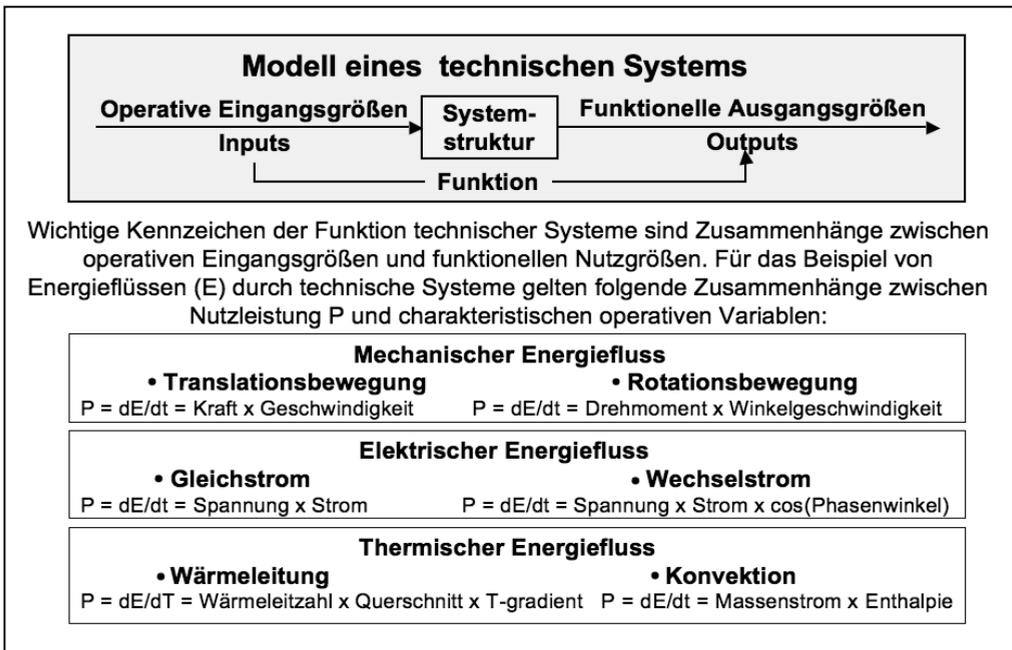


Bild 2.5 Beispiel der Darstellung von Systemfunktionen

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 Bezeichnungsweise als *effort* $\varepsilon(t)$ und *flow* $\phi(t)$ bezeichnet werden. Für Systemelemente mit Energieflüssen E ist die übertragene Leistung $P = dE/dt = \text{Potentialdifferenz } \varepsilon(t) \cdot \text{Strom } \phi(t)$. Bild 2.6 zeigt diese Zusammenhänge für mechanische, elektrische, magnetische, hydraulische und thermische Systemelemente.

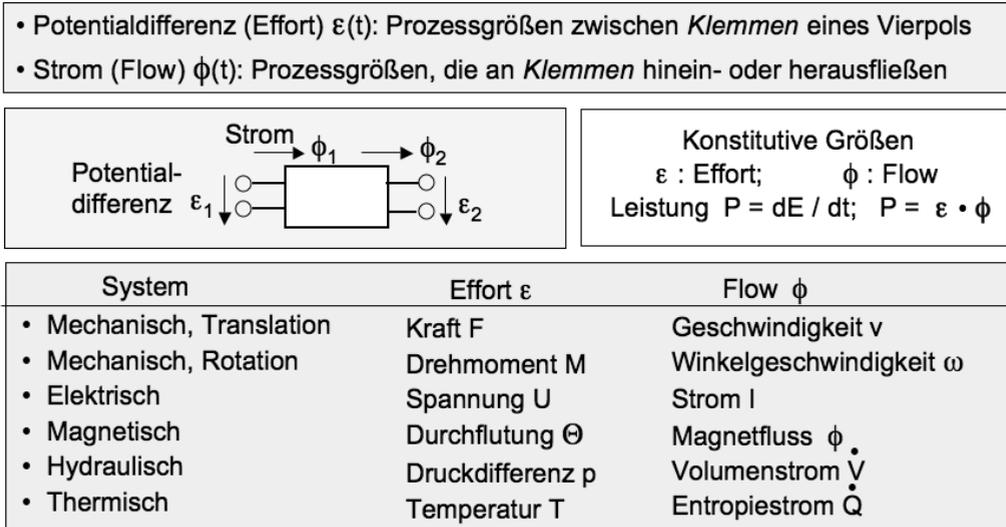


Bild 2.6 Funktionsgrößen technischer Systeme: effort und flow

Signalübertragungsverhalten

Ein wichtiges Charakteristikum zur Kennzeichnung der Funktion der Elemente technischer Systeme ist das Signalübertragungsverhalten. Im stationären Zustand wird der Zusammenhang zwischen der Ausgangsgröße eines Systemelements und seiner Eingangsgröße, bzw. seine graphische Darstellung als *statische Kennlinie* bezeichnet. Um im dynamischen Zustand das Zeitverhalten von Systemelementen beschreiben zu können, verwendet man als Eingangssignale bestimmte *Testfunktionen*, die sich einfach realisieren lassen, beobachtet das sich ergebende Ausgangssignal und kennzeichnet es durch *Übergangsfunktionen*. Die am häufigsten verwendeten Testfunktionen sind:

- Sprungfunktion
- Rampenfunktion
- δ -Impulsfunktion.

Als Testfunktionen eignen sich auch Sinus- oder Kosinusfunktionen veränderlicher Frequenz. Die am häufigsten verwendete Kennzeichnungsmöglichkeit des dynamischen Signalübertragungsverhaltens durch eine Sprungfunktion illustriert Bild 2.7.

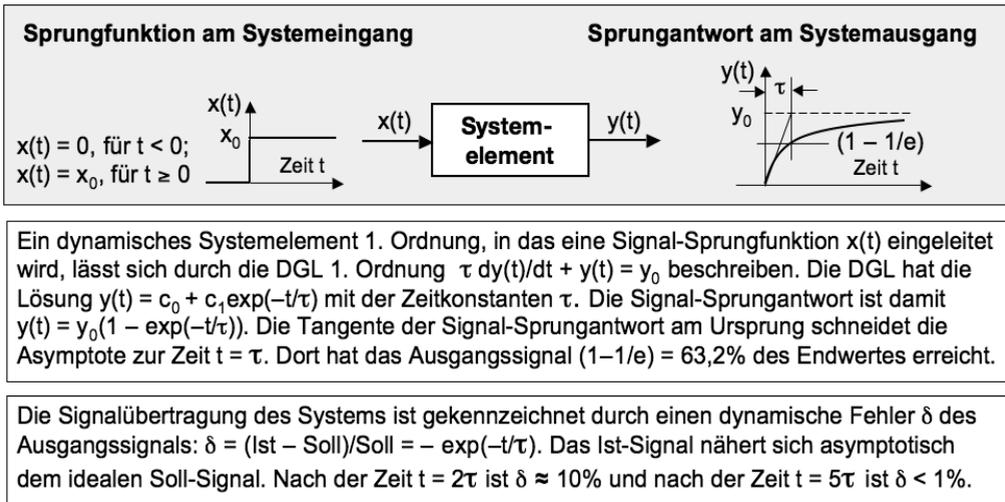


Bild 2.7 Signalübertragungsverhalten von Systemelementen

2.3 Struktur technischer Systeme

Die elementaren Strukturen technischer Systeme lassen sich in abstrakter, vereinfachender Darstellung gemäß Bild 2.8 in die Kategorien • *Quellen* • *Speicher* • *Übertrager* • *Wandler* • *Senken* einteilen. Neben der *Mehrpole-Darstellung* der Strukturelemente als Blockschaltbilder ist im unteren Teil von Bild 2.8 die *Bondgraph-Darstellung* wiedergegeben. Sie ist eine graphische Kennzeichnung von Mehrpol-Strukturelementen mit Energieübertragung und beschreibt durch einen *Energie-Bond* in Form eines Halbpeils mit Nennung des jeweiligen effort/flow-Paares die Richtung des Energiestromes. Ein Beispiel der Bondgraphdarstellung zeigt Bild 2.10.

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
Mehrpole-Darstellung ϕ flow; ϵ effort					
Bondgraphdarstellung	<p>effort ϵ (in) \ / \ flow ϕ (in) effort ϵ (out) \ / \ flow ϕ (out)</p>				

Bild 2.8 Klassifikation der elementaren Strukturelemente technischer Systeme

Die konkrete Gestaltung der in Bild 2.8 in abstrakter Form dargestellten Elementarstrukturen führt zu sehr vielfältigen technischen Ausführungen, wie auch aus der Klassifikation von Bild 2.4 ersichtlich ist. Beispiele der elementaren Strukturelemente technischer Systeme mit unterschiedlichen Energieformen gibt Bild 2.9.

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

Bild 2.9 Elementare Strukturelemente technischer Systeme: Beispiele mit unterschiedlichen Energieformen

2.4 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) mit einem Wandler (Motor) und einem Übertrager (Getriebe) zeigt Bild 2.10. Der untere Teil illustriert die Bondgraph-Darstellung des Wandlers.

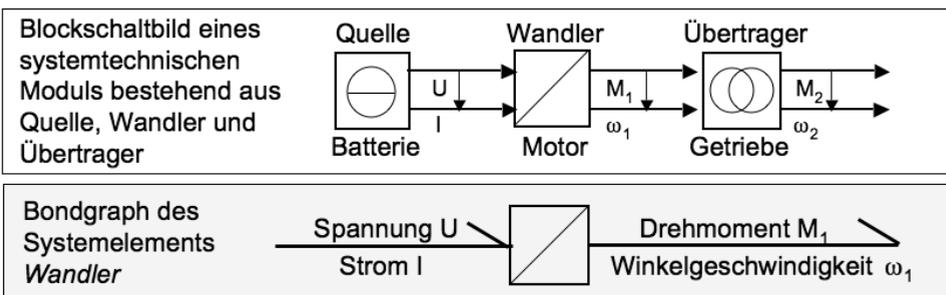


Bild 2.10 Beispiel der Kombination von Strukturelementen zu einem System-Modul

Die elementaren Möglichkeiten des Zusammenfügens von Systemelementen zu Modulen sind die in Bild 2.11 dargestellten, aus der Elektrotechnik bekannten Parallel- und Reihenschaltungen.

Technische Systeme entstehen durch die Kopplung von Prozesselementen. Betrachtet werden Prozesselemente, durch deren Verbindungsstelle ein Energiestrom $P = dE/dt = \text{effort} \cdot \text{flow} = \varepsilon \cdot \phi$ strömt. Verbindungsstellen zwischen Anschlüssen (Polen) werden *Knoten* genannt, Verbindungen zwischen zwei Knoten bilden einen *Zweig*.

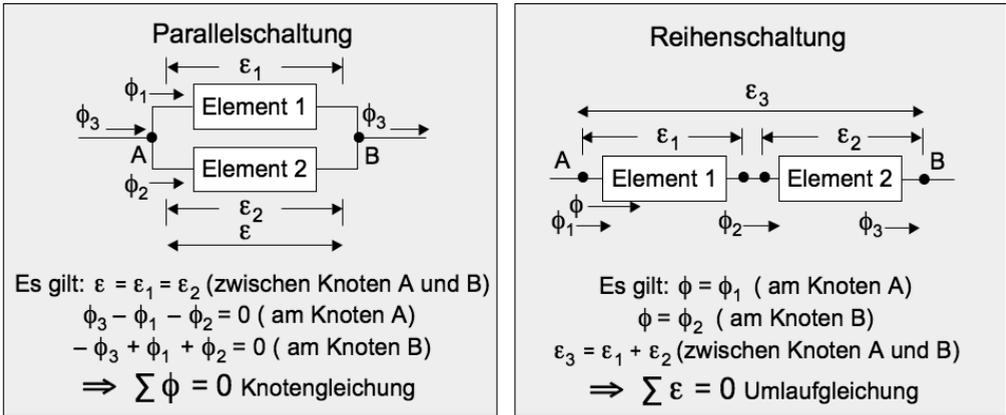
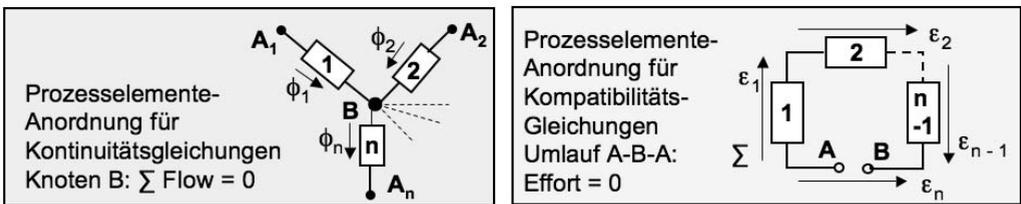


Bild 2.11 Elementare Verschaltungsarten von System- oder Prozesselementen

Die grundlegenden Regeln der Zusammenschaltung elektrischer Prozesselemente sind die Kirchhoffschen Regeln. In Verallgemeinerung dieser Gleichungen können für technische Systeme allgemeine Bilanzgleichungen in Form von Kontinuitätsgleichungen und Kompatibilitätsgleichungen aufgestellt werden, siehe Bild 2.12.



System	Kontinuitätsgleichung	Kompatibilitätsgleichung
Elektrisch	$\sum I = 0$ Knoten-Gleichung	$\sum U = 0$ Umlauf-Gleichung
Magnetisch	$\sum \Phi = 0$ Magnetflussbilanz	$\sum \Theta = 0$ Durchflutungskompatibilität
Hydraulisch	$\sum \dot{V} = 0$ Volumenstrombilanz	$\sum p = 0$ Druckkompatibilität
Thermisch	$\sum \dot{Q} = 0$ Wärmestrombilanz	$\sum T = 0$ Temperaturkompatibilität

Bild 2.12 Kontinuitätsgleichungen (Knoten) und Kompatibilitätsgleichungen (Umlauf) für verschiedene technische Systeme

2.5 Systemeigenschaften

Die Eigenschaften technischer Systeme werden durch ihre Funktion und die sie tragende Systemstruktur bestimmt. Wie in der allgemeinen Systembeschreibung von Bild 2.3 zusammenfassend dargestellt, sind dabei sowohl die Nutzfunktion als auch Störgrößen und Dissipationseffekte zu beachten.

Die allgemeinen *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 Systemumfeld: 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.

Die konkrete Ausprägung der in allgemeiner Form genannten Systemeigenschaften hängt natürlich von dem jeweils betrachteten System ab. Das regelungs- und steuerungstechnische Systemverhalten wird in Kapitel 4 behandelt.

2.5.1 Technische Systemeigenschaften

Zu den wichtigsten funktionellen Eigenschaften eines technischen Systems gehören die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen, die *Input/Output-Relationen*. Sie werden im stationären (zeitunabhängigen) Zustand durch *Kennlinien* gekennzeichnet. Das dynamische (zeitabhängige) Verhalten wird beschrieben durch:

- *Übergangsfunktion*: Reaktion eines Systems auf ein *Sprungsignal*, siehe Bild 2.7.
- *Frequenzgang* und *Ortskurve*: Kennzeichnung der bei Übertragung eines Eingangssignals $u(t) = u_0 \cos \omega t$ (u_0 Anfangsamplitude, ω Kreisfrequenz) sich ergebenden Ausgangsamplitude v und der Phasenverschiebung φ im eingeschwungenen Zustand. Die Ortskurvendarstellung erfolgt häufig in der komplexen Ebene mit kartesischen Real(Re)-Imaginärteil(Im)-Koordinaten bzw. Polarkoordinaten mit der Zeigerlänge $A = v(\varphi)/u$ und dem Winkel φ (Quadrantenvorzeichen beachten).
- *Bode-Diagramm*: Frequenzkennlinien in logarithmischer Darstellung.

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 Bild 2.13.

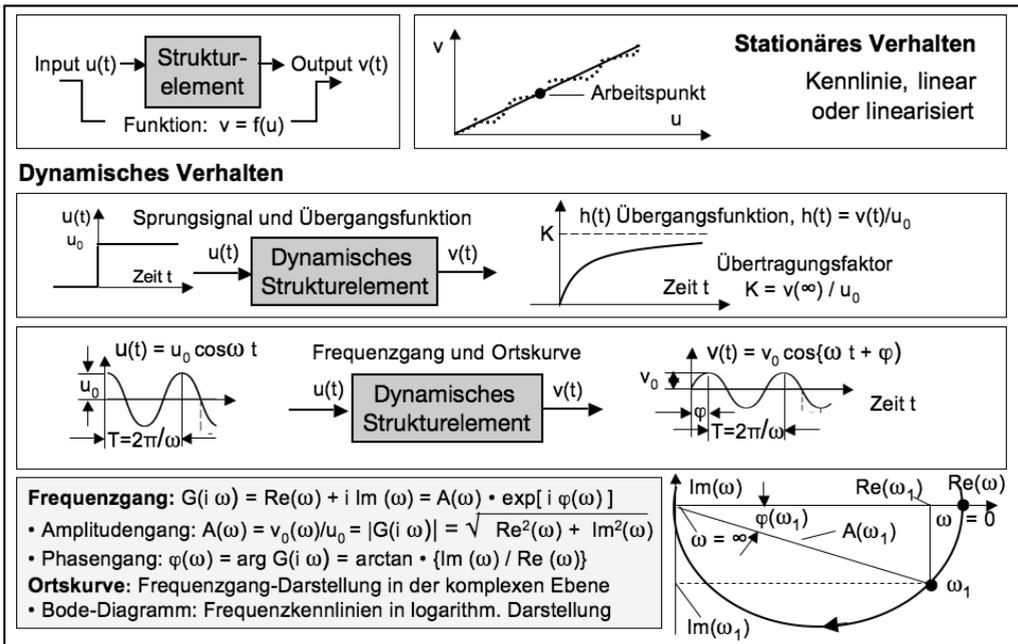


Bild 2.13 Kennzeichnung stationärer und dynamischer Eigenschaften technischer Systeme

2.5.2 Allgemeine Systemeigenschaften

Technische Systeme werden für Aufgaben aus Technik, Wirtschaft, Gesellschaft geschaffen und müssen dafür allgemein wichtige Systemeigenschaften aufweisen, z.B.:

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 und Design 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. Die Qualität technischer Systeme ist durch ein *Total Quality Management* zu gewährleisten; Qualitätsaspekte können nicht nachträglich in technische Produkte „hineingeprüft“ werden.
- Konformität ist die Übereinstimmung mit vorgegebenen Normen und Beschaffenheitsregeln. Sie ist für bestimmte Produkte gemäß *EU-Richtlinien zur Technik und zum Warenverkehr* durch die Konformitätserklärung des Herstellers oder die Konformitätsbescheinigung einer unabhängigen Prüfstelle (*conformity assessment*) nachzuweisen.

Sicherheit

- Sicherheit bei der Entwicklung und Nutzung technischer Systeme bedeutet die Abwesenheit von Gefahren für Leben oder Gesundheit.
- Wegen der Fehlbarkeit der Menschen, der Möglichkeit technischen Versagens und der begrenzten Beherrschbarkeit von Naturvorgängen gibt es keine absolute Sicherheit.
- Sicherheit – definiert als reziproker Wert des Risikos – ist die Wahrscheinlichkeit, dass von einer Betrachtungseinheit während einer bestimmten Zeitspanne keine Gefahr ausgeht.
- Sicherheit bedeutet, dass das Risiko – gekennzeichnet durch Schadenswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß – unter einem vertretbaren Grenzkrisiko bleibt.

Zuverlässigkeit

- Zuverlässigkeit ist die Eigenschaft eines Bauteils oder eines technischen Systems für eine bestimmte Gebrauchsdauer („Lebensdauer“) funktionstüchtig zu bleiben.
- Die Gebrauchsdauer ist eine stochastische Größe, sie kann nur mit statistischen Methoden charakterisiert werden.
- 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.
- Statistische Zuverlässigkeitsdaten technischer Systeme hängen sowohl von der inneren Systemstruktur als auch von den äußeren Funktions- und Beanspruchungsbedingungen und deren statistischer Streuung ab.

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.

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.

3 Modellbildung mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme haben die Aufgabe, mit Sensorik, Prozessoren, Aktorik und Elementen der Mechanik, Elektronik und Informatik (sowie anderer funktionell erforderlichen Technologien) Energie, Stoff und/oder Information umzuwandeln, zu transportieren und/oder zu speichern. Ihre allgemeinen Systemmerkmale sind in Bild 3.1 dargestellt.

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. Sensoren ermitteln funktionsrelevante Messgrößen und führen sie, umgewandelt in elektrische Führungsgrößen, Prozessoren zu. Die Prozessoren erzeugen zusammen mit Aktoren daraus Stellgrößen zur Optimierung der Funktionalität des Systems.

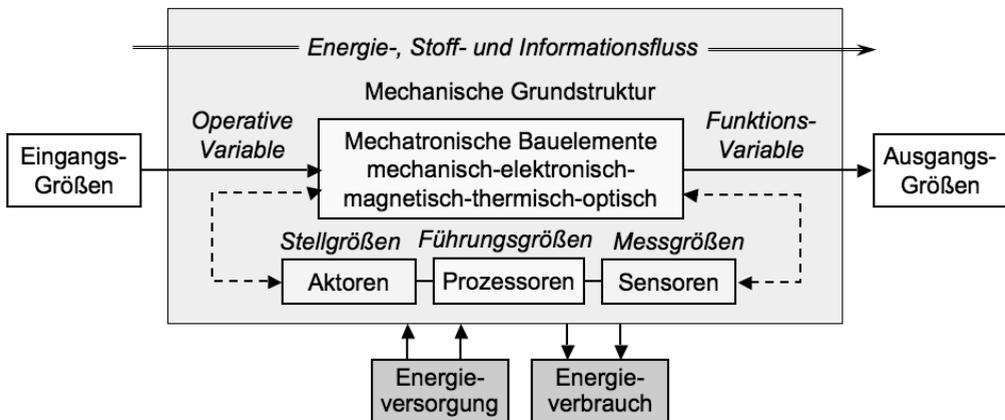


Bild 3.1 Übersicht über den grundsätzlichen Aufbau mechatronischer Systeme

3.1 Modellierungsmethodik

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 Bild 3.2 erläuterten Begriffe

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

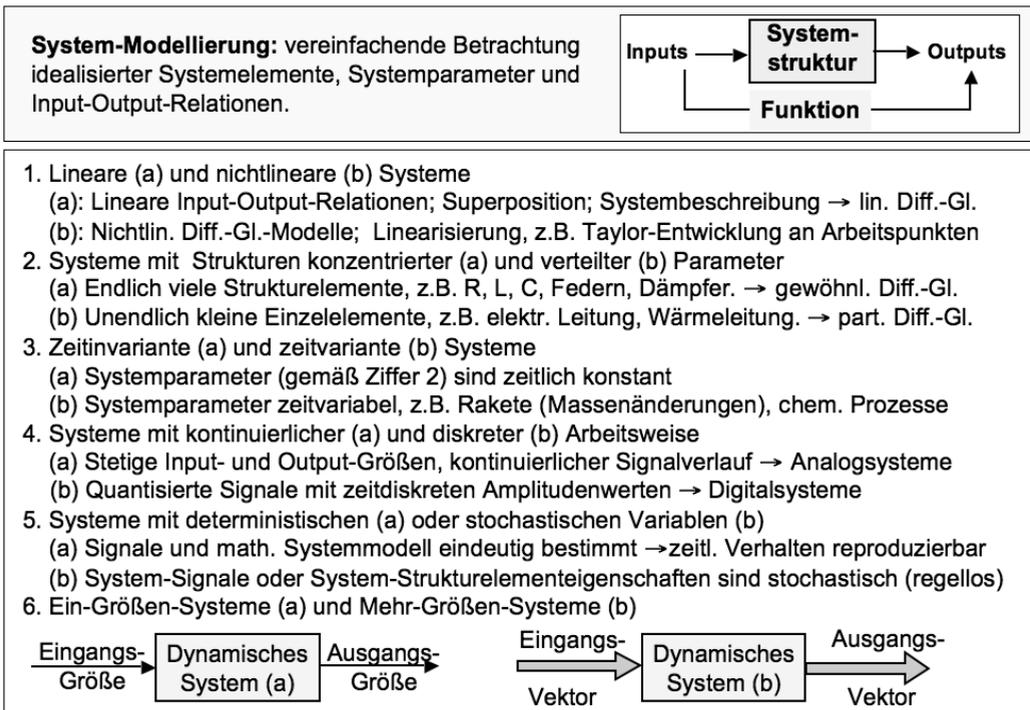
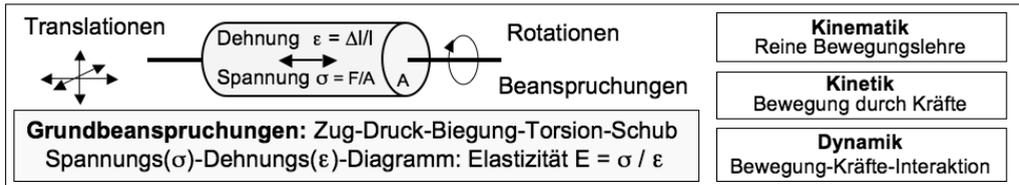


Bild 3.2 Modellierungsklassen mechatronischer Systeme

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 strukturmechanische 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 System gibt Bild 3.3 eine elementare Zusammenstellung in knappster Form.



Grundregeln der Kinematik

- Zur Beschreibung von Bewegungen benötigt man ein geometrisches Bezugssystem
- Bewegungen bestehen aus Translationen (Linear-Wege s) und Rotationen (Drehwinkel φ)
- 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

The flowchart shows 'Beanspruchung' and 'Form, Maße' leading to 'wirksame Spannung σ_w '. 'Werkstoffkennwerte' and 'Sicherheitsfaktoren' lead to 'zulässige Spannung σ_{zul} '. Both stress values are compared in the 'Festigkeitsbedingung: $\sigma_w < \sigma_{zul}$ '.

Translation		Rotation	
s	Weg	φ	Drehwinkel
$v = ds/dt$	Geschwindigkeit	$\omega = d\varphi/dt$	Winkelgeschwindigkeit
$a = dv/dt$	Beschleunigung	$\Omega = d\omega/dt$	Winkelbeschleunigung
m	Masse	Θ	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

Bild 3.3 Grundlagen für die Modellbildung der Mechanik in mechatronischen Systemen

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 Bild 3.4.

Feder k	Dämpfer d	Masse m
Elastizität, <i>Speicher</i>	Widerstand, <i>Senke</i>	Trägheit, <i>Speicher</i>
 $\rightarrow \begin{matrix} F_k \\ x \end{matrix}$	 $\rightarrow \begin{matrix} F_d \\ dx/dt = v \end{matrix}$	 $\rightarrow \begin{matrix} F_m \\ d^2x/dt^2 \end{matrix}$
$F_k = k \cdot x = k \int v dt$	$F_d = d \cdot v$	$F_m = m \cdot dv/dt$
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 $E = \frac{1}{2} (m \cdot v^2)$

Bild 3.4 Feder, Dämpfer, Masse: wichtige mechanische Modellelemente in der Mechatronik

Schwingungen

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

Schwingungen sind zeitperiodische Vorgänge

• Signalarten

determinierte Signale: (a) periodisch \rightarrow harmonisch (Sinus) oder \rightarrow allgemein periodisch
(b) nicht periodisch \rightarrow z.B. Sprungfunktion oder \rightarrow Stoßfunktion
stochastische Signale \rightarrow statistische Zufallsvariable

• **Kinematik:** *Freie Schwingungen:* Translation oder Rotation, ein oder mehrere Freiheitsgrade,
 \rightarrow lineare oder nichtlineare homogene, gewöhnliche Differentialgleichungen (DGL)

• **Kinetik:** *Erzwungene Schwingungen:* Externe Anregung eines schwingungsfähigen Systems,
 \rightarrow 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.

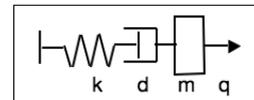


Bild 3.5 Die grundlegenden Kennzeichen von Schwingungen

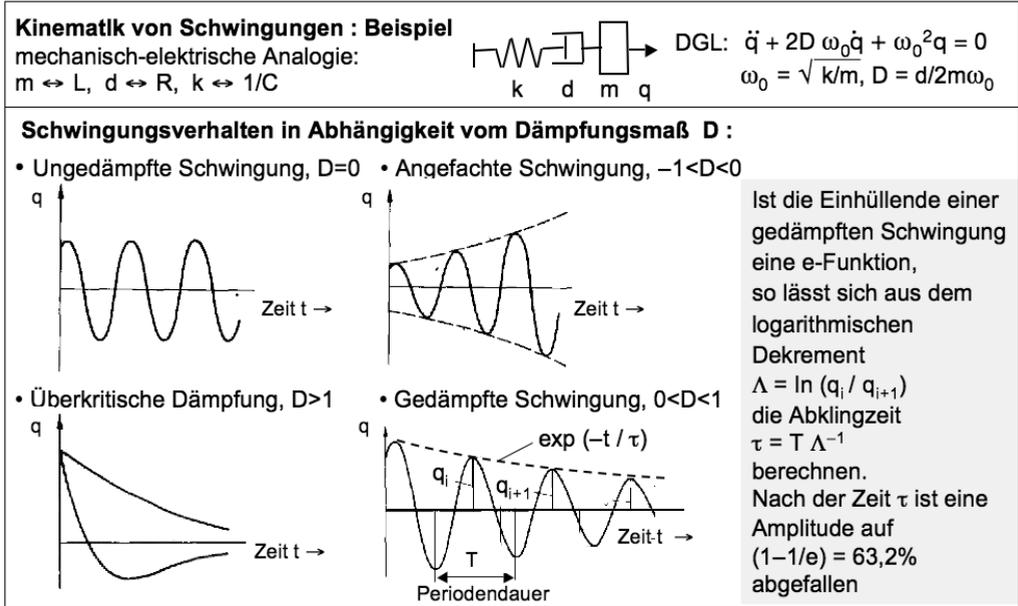


Bild 3.6 Kinematik von Schwingungen

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 Bild 3.7.

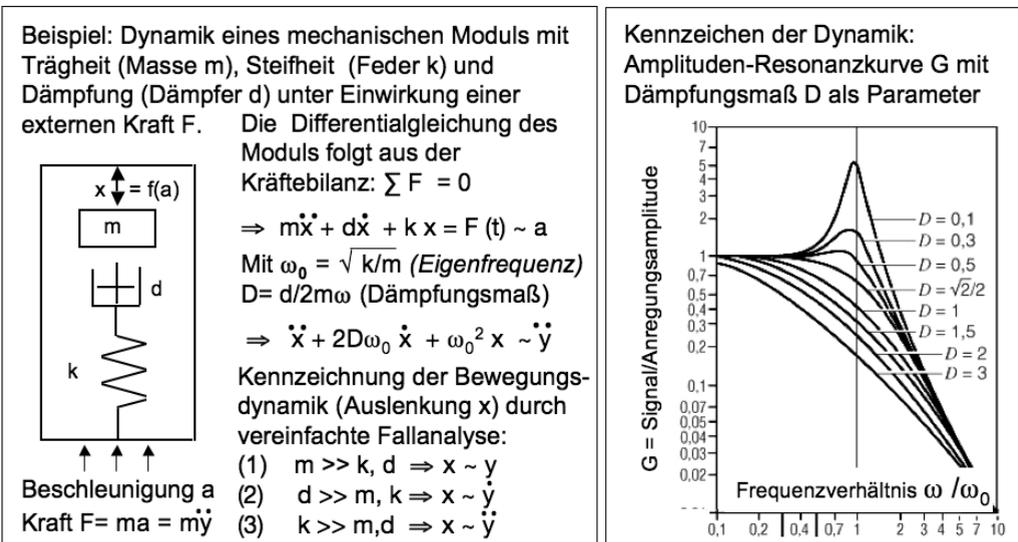


Bild 3.7 Kennzeichen der Dynamik eines einfachen mechanischen Moduls, Beispiel

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 zusammengesetzt sind. Für die Mechatronik werden auch anwendungsspezifische Chips, die ASICs (Application Specific Integrated Circuits) entwickelt, siehe Kapitel 6.6. Die für die Mechatronik wichtigsten Kategorien der Elektronik und elementare Modellierungselemente sind im Folgenden 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 Φ 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.

Bild 3.8 Grundlagen für die Modellbildung der Elektronik in mechatronischen Systemen

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 mm² Fläche) bis zu VLSI (Very Large Scale Integration) mit bis zu 1 Mio. Funktionselemente pro Chip (ca 30 mm² 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 Bild 3.9 dargestellt.

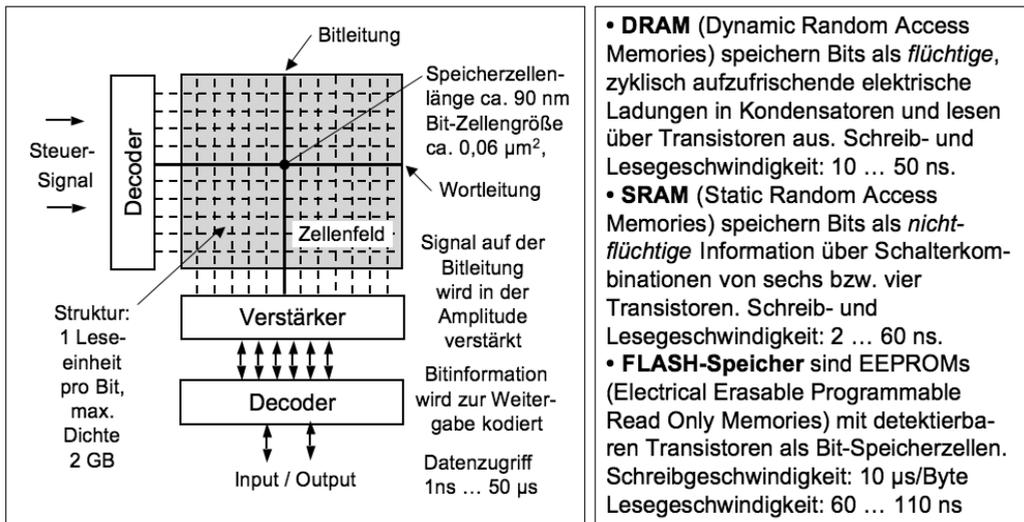
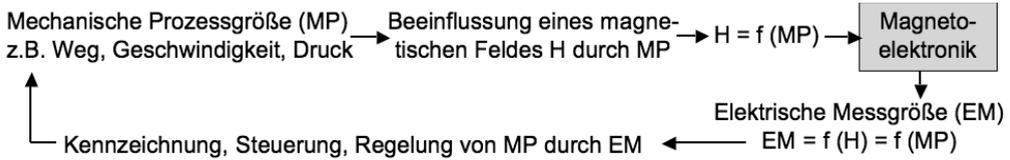


Bild 3.9 Aufbauprinzip und typische Ausführungsarten von Halbleiterspeichern

Magnetelektronik

Als Magnetelektronik wird die Änderung elektrischer Materialeigenschaften durch magnetische Felder bezeichnet. Magnetelektronische Materialien, Bauelemente und Sensoren werden heute in mechatronischen Systemen eingesetzt, die von Computer-Schreib/Leseköpfen (vgl. Kapitel 12, Bild 12.2) bis zur berührungslos arbeitenden

Automobilsensorik reichen (vgl. Kapitel 13, Bild 13.5). 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 Kap. 5.5, Bild 5.28
- *AMR, Anisotropic Magnetic Resistance* → Sensorik, siehe. Kap. 5.5, Bild 5.27
- *GMR (Giant Magneto Resistance) Effekt* → Sensorik, siehe. Kap. 5.9, Bild 5.62.

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 Bild 3.10. Durch Anwendung der GMR-Magnetoelektronik konnte ab 1998 die Leistungsfähigkeit des mechatronischen Systems *Computer-Festplattenlaufwerk* (siehe Kapitel 12) erheblich gesteigert und die Speicherdichte auf ca. 17 Gbit/cm² erhöht werden.

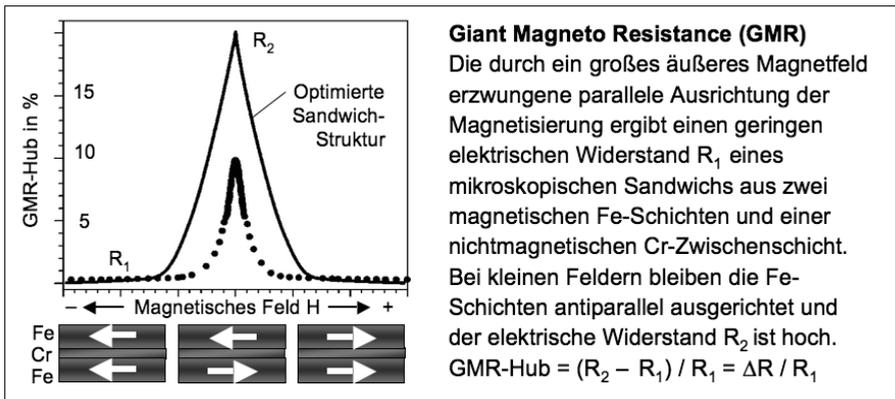
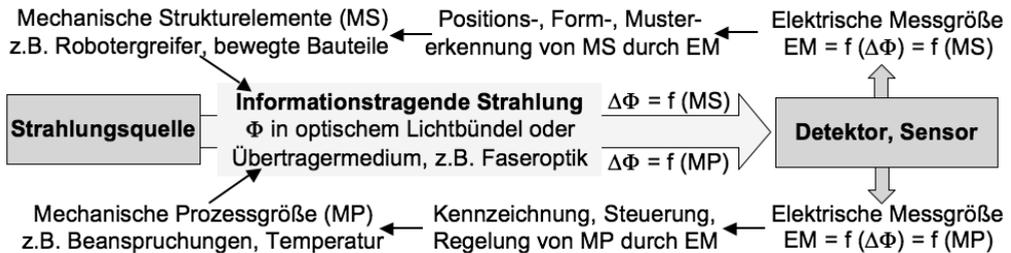


Bild 3.10 Prinzipdarstellung des Riesenmagnetowiderstandseffektes GMR

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 optoelektronischen 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 Bild 3.11.

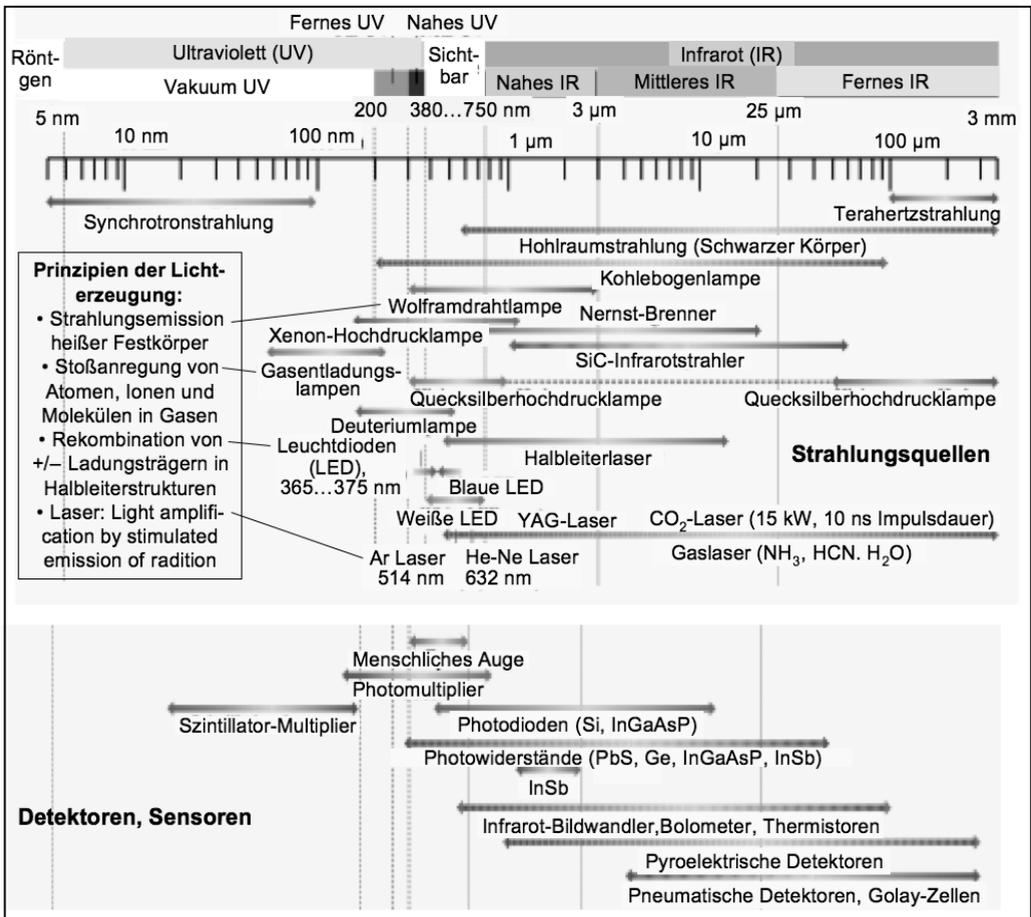


Bild 3.11 Übersicht über Strahlungsquellen, Sensoren und Detektoren der Optoelektronik

Von den in Bild 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 Bohrschen Atommodell und der Lichtquantentheorie von Einstein. Physikalische Voraussetzung für die Lichtausstrahlung aus Materie ist, dass durch Zufuhr von Energie ΔE , z. B. durch thermische, elektrische oder optische Anregung, ein Elektron von einem Grundniveau im Bohrschen Atommodell auf ein energetisch höheres Niveau übergeht. Beim Rückgang auf das Elektronen-Grundniveau wird ein Photon gemäß $\Delta E = h \cdot \nu$ ausgestrahlt (h : Plancksches Wirkungsquantum, ν : Frequenz). Das physikalische Laserprinzip in der einfachsten Art und den elementaren Aufbau eines Lasers zeigt Bild 3.12.

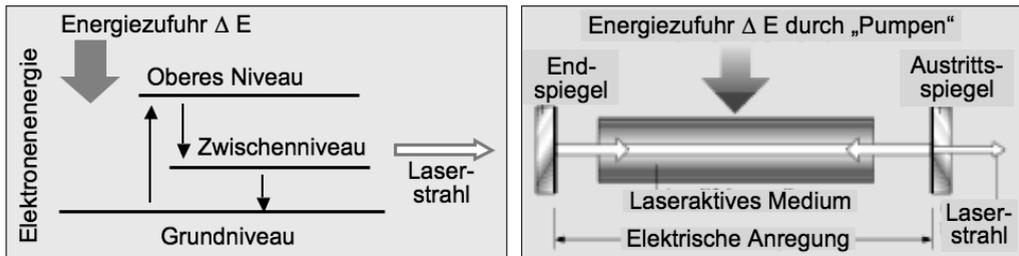


Bild 3.12 Prinzip eines Lasers (Light amplification by stimulated emission of radiation)

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/cm², lokale Temperaturen von mehreren 1000 Grad Celsius 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 (Kap. 8.1), bis hin zu Strahltechniken für die Mikro/Nano-Produktion und die Lithographie (Kap. 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 sind technische Gebilde, die Informationen mit Hilfe einer programmierbaren Rechenvorschrift (Algorithmus) verarbeiten können. Mikrorechner stehen gemäß der Definition der Mechatronik neben der Sensorik (siehe Kapitel 5) im Vordergrund bei der Erweiterung und Ergänzung mechanischer Systeme zu teilintelligenten Produkten und Systemen. Von universeller Anwendbarkeit sind Rechner 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, 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.

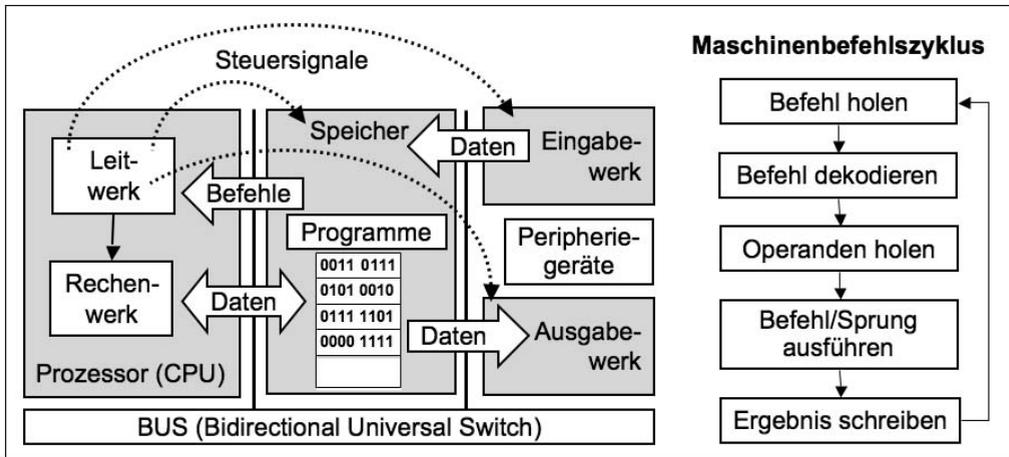


Bild 3.13 Aufbau eines Rechners mit Von-Neumann-Architektur

Mikrorechner, die mit der Von-Neumann-Architektur in der Mechatronik vielfältig eingesetzt werden, haben gemäß Bild 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 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. Bild 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. Bild 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 Sensordaten und steuern Aktoren. Die für die Mechatronik besonders wichtige *Sensor-Aktor-Prozessorik* wird in Kapitel 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 Sortieralgorithmen, Suchalgorithmen, rekursive Algorithmen, Graphenalgorithmen, kryptographische, genetische und numerische Algorithmen. Die Ausführung von Algorithmen mit einem Computer erfolgt mittels *Programmiersprachen*:

- *Maschinensprachen* sind die direkt auf einem Prozessor ausführbaren binären Zahlencodes, sie werden in binärer 0-1-Form eingegeben.
- *Assembleranweisungen* ersetzen Zahlencodes durch einprägsame Abkürzungen (Mnemonics) und setzen sie in sequentielle Maschinenbefehle um.
- *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* vereinigt 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*. 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 fünf grundlegende Vorgehensschritte und wird am Beispiel des mechatronischen Systems Fahrzeug/Fahrer/Umwelt (vgl. Kapitel 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.

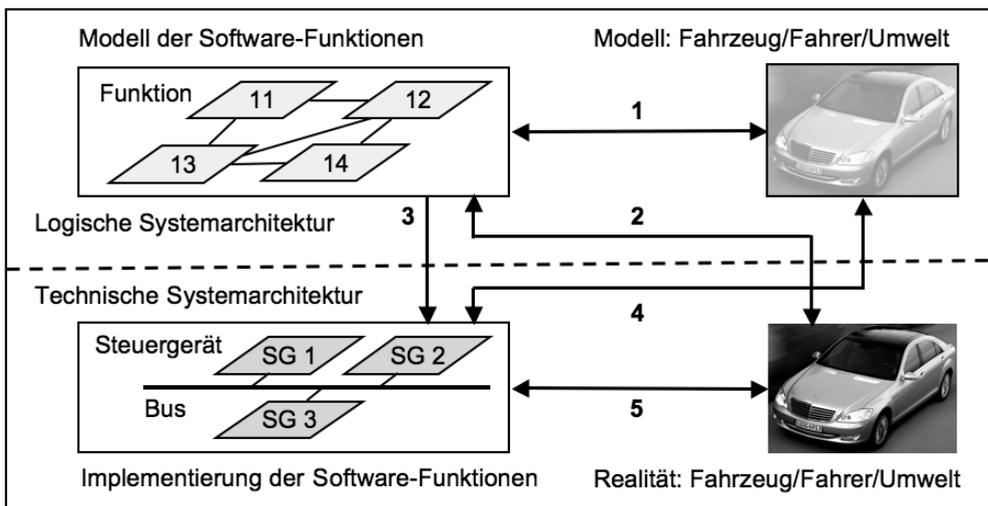


Bild 3.14 Die Methodik der modellbasierten Entwicklung von Software-Funktionen, illustriert am Beispiel des mechatronischen Systems Kraftfahrzeug

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 *Analogies in Physics* aufbauen. Feynman hatte die vereinheitlichende Beschreibung elektrischer und mechanischer Systeme physikalisch wie folgt begründet, Bild 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 , 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.*

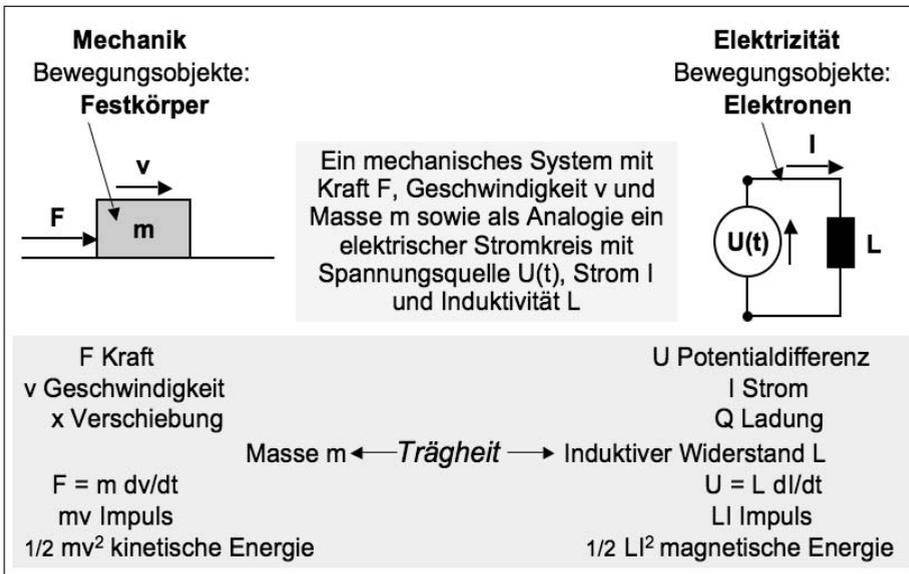
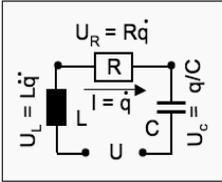
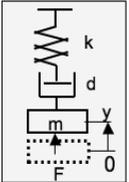


Bild 3.15 Analogien zwischen einfachen physikalischen Systemen

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 Bild 3.16 am Beispiel eines verallgemeinerten Systemmoduls mit den Elementen *Trägheit*, *Dämpfung*, *Steifheit*, der aus einer Analogiebetrachtung einfacher mechanischer und elektrischer Module resultiert, dargestellt.

<p>Elektrischer Modul Kirchhoffsche Maschenregel: $\sum U = 0$ $\Rightarrow L \ddot{q} + R \dot{q} + q/C = U(t)$ Resonanzfrequenz $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$</p>	
<p>Mechanischer Modul Bilanzgleichung $\sum F = 0$ $\Rightarrow m \ddot{y} + d \dot{y} + ky = F(t)$ Resonanzfrequenz $\omega_0 = \sqrt{k/m}$</p>	

Kenngrößen	Elektrischer Modul	Mechanischer Modul
Input (effort E)	Spannung U	Kraft F
Output (Wirkung)	Ladung q	Position y
Trägheit (inertia I)	Induktivität L	Masse m
Dämpfung (Δ)	Widerstand R	Dämpfungs-konstante d
Steifheit	(Kapazität) ⁻¹ 1/C	Federkonstante k
Resonanzfrequenz	$\omega_0^2 = 1/LC$	$\omega_0^2 = k/m$
Periode	$t_0 = 2 \pi \sqrt{LC}$	$t_0 = 2 \pi \sqrt{m/k}$
Trägheitsmaß	$\gamma = R/L$	$\gamma = d/m$
Dämpfungsmaß	$D = R / 2 L \omega_0$	$D = d / 2 m \omega_0$

Aus der Analogiebetrachtung ergibt sich mit der Systemausgangsgröße q folgende DGL zur Beschreibung einfacher mechatronischer Module:

$$\ddot{q} + \gamma \dot{q} + \omega_0^2 q = U/L = E / I$$

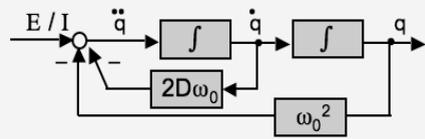
$$\ddot{q} + 2D\omega_0 \dot{q} + \omega_0^2 q = F/m = E / I$$

In verallgemeinerter Form:

$$\ddot{q} = E / I - \gamma \dot{q} - \omega_0^2 q$$

$$\ddot{q} = E / I - 2D\omega_0 \dot{q} - \omega_0^2 q$$

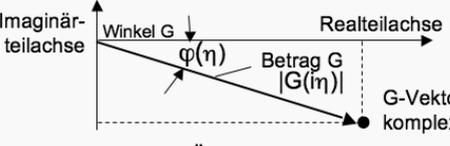
Signalfuss- oder Blockschaltbilddarstellung
 Der Zusammenhang zwischen der Systemausgangsgröße q und den Systemparametern Effort/Trägheit sowie Dämpfung und Eigenfrequenz kann als Signalfuss- oder Blockschaltbild dargestellt werden



Systemmodul
 ω_0 Resonanzfrequenz,
 $\gamma = \Delta / I$ Trägheitsmaß
 $D = \gamma / 2\omega_0$: Dämpfungsmaß

Input *effort* E → Output q

Modellierungs-DGL: $\ddot{q} + 2D\omega_0 \dot{q} + \omega_0^2 q = E / I$
 Bei harmonischer Anregung $E = E_0 \exp(i\omega t)$ resultiert die Input-Output-Übertragungsfunktion $G(\eta, D)$ in komplexer Form mit den Parametern Frequenzverhältnis $\eta = \omega / \omega_0$ und Dämpfungsmaß D:
 $G(\eta) = q(\eta) / E(\eta) = [I \omega_0^2 (1 - \eta^2 + 2iD\eta)]^{-1} = A(\eta) \cdot \exp[i\varphi(\eta)]$
 Darstellung in der komplexen Ebene:



Imaginärteilachse

Realtailachse

Winkel G

Betrag G

G-Vektor in der komplexen Ebene

Das dynamische Übertragungsverhalten wird vom Dämpfungsmaß D bestimmt. Für $D > 1/\sqrt{2} = 0,707$ tritt keine Resonanzüberhöhung bei periodischer Anregung auf; für $D > 1$ verschwindet auch ein oszillierendes Einschwingen bei einer Sprunganregung. Günstiger Wert: $D = 0.5 \dots 0,7$.

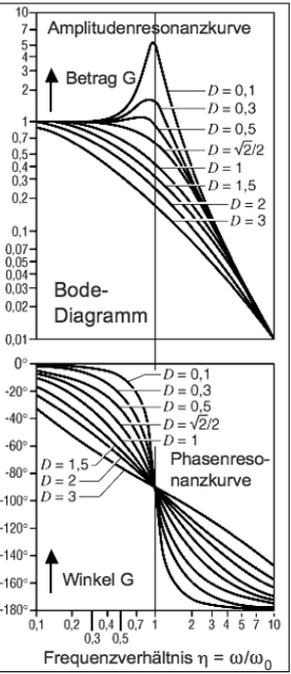
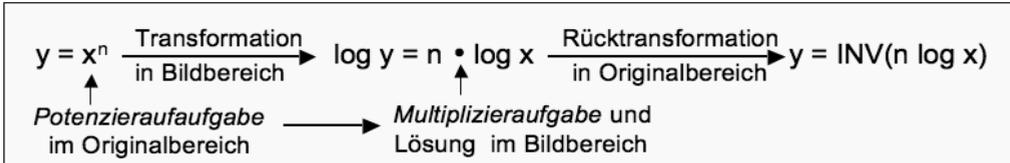


Bild 3.16 Modellierung von Modulen mit den Komponenten *Trägheit*, *Dämpfung*, *Steifheit*.
 Oben: Beschreibung im Zeitbereich; unten: Übertragungsverhalten

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



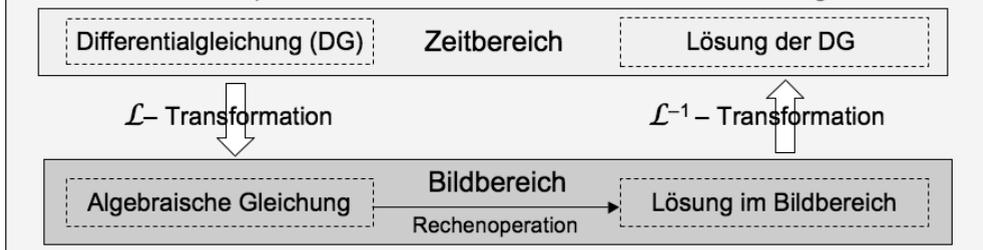
Für mechatronische Systeme, die durch Differentialgleichungen modelliert werden können, benötigt man Funktionaltransformationen zwischen dem Originalbereich (Zeitbereich) und einem für die Lösung günstigen Bildbereich. Hierfür ist eine Modifizierung der Fourier-Transformation, die Laplace-Transformation, geeignet. Sie überführt gemäß der Methodik von Bild 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 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 ∞ .

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

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

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.

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

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 Kapitel 2.5.1 erwähnten Methoden der Kennzeichnung des Systemverhaltens durch den *Frequenzgang* und die *Ortskurvendarstellung* bekannt, siehe Bild 3.18.

Übertragungsfunktion: Systembeschreibung im Bildbereich

Ausgangspunkt: Allgemeine DGL für lineare, kontinuierliche Systeme mit konzentrierten Parametern:

Originalbereich: $\sum_{i=0}^n a_i d^i x_a(t)/dt^i = \sum_{j=0}^m b_j d^j x_e(t)/dt^j, m \leq n$

Laplace-Transformation

Durch eine Laplace-Transformation ergibt sich die Übertragungsfunktion $G(s)$, als Modell der Übertragung der Eingangsgrößen im Bildbereich $X_e(s)$ in Ausgangsgrößen $X_a(s)$ mit der komplexen Bild/Frequenzvariablen $s = i\omega$

Bildbereich: $G(s) = X_a(s)/X_e(s) = (b_0 + \dots + b_m s^m)/(a_0 + \dots + a_n s^n)$

Frequenzgang, Ortskurve: Beispiel

Für den bekannten einfachen elektrischen Modul gilt die DGL:

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + q/C = U(t) \Rightarrow LC\ddot{q} + RC\dot{q} + q = U^*(t)$$

Anwendung der Laplace-Transformation ergibt die Übertragungsfunktion:

$$G(s) = 1/(LCs^2 + RCs + 1)$$

Ersetzt man s durch $i\omega$, so erhält man den Frequenzgang:

$$G(i\omega) = 1/[LC(\omega)^2 + RC(i\omega) + 1]$$

Frequenzgang: $G(i\omega) = \text{Re}(\omega) + i \text{Im}(\omega) = A(\omega) \cdot \exp[i \varphi(\omega)]$

- Amplitudengang: $A(\omega) = X_a(\omega)/X_e = |G(i\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}$
- Phasengang: $\varphi(\omega) = \arg G(i\omega) = \arctan \{ \text{Im}(\omega) / \text{Re}(\omega) \}$

Ortskurve: Frequenzgang-Darstellung in der komplexen Ebene

• Bode-Diagramm: Frequenzkennlinien in logarithm. Darstellung

Bild 3.18 Beschreibungsmöglichkeiten für mechatronische Systeme im Bildbereich

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 Bild 3.19.

Verschaltung von Modulen zu Reihen-, Parallel- und Kreisstrukturen:

Beschreibung durch die Kombination von Übertragungsfunktionen

Reihenschaltung:

$$G = y/u = G_1 \cdot G_2 \Rightarrow G = \prod G_i$$

Parallelschaltung:

$$G = G_1 + G_2 \Rightarrow G = \sum G_i$$

Kreisschaltung (Rückkopplung)

$$G = \frac{G_1}{1 \pm G_1 \cdot G_2}$$

Bild 3.19 Modulverschaltungen unter Anwendung von Übertragungsfunktionen

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, Signalfussplänen,
- *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, Bild 3.20.

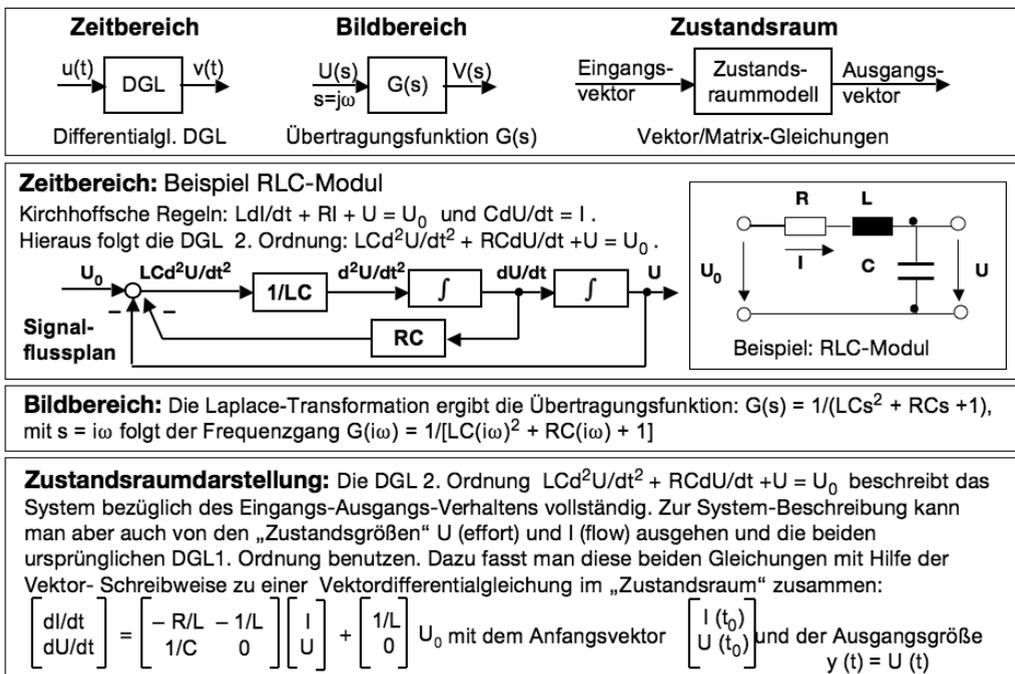


Bild 3.20 Beschreibungsmöglichkeiten mechatronischer Module, Beispiel

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 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.*

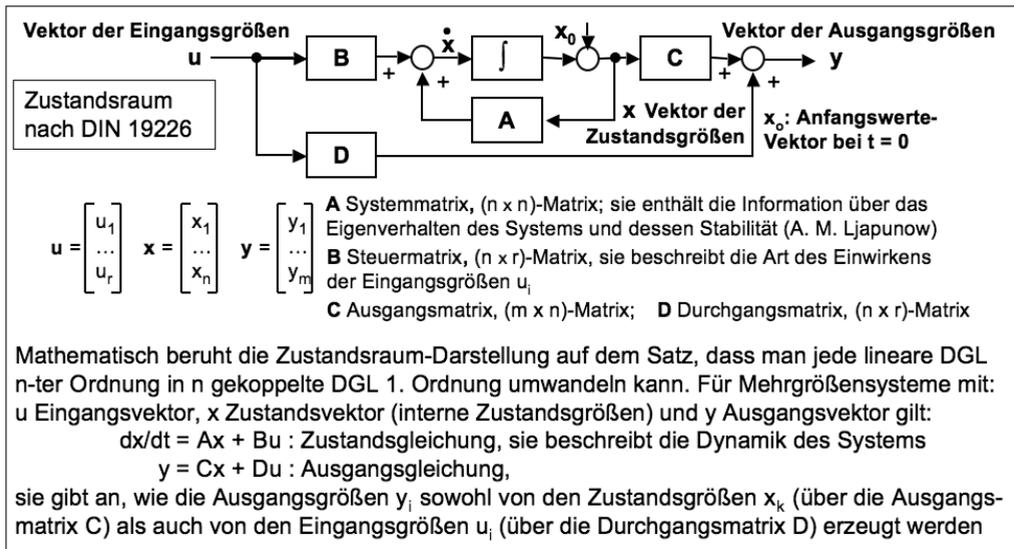


Bild 3.21 Modellbildung mechatronischer Systeme: Zustandsraumdarstellung

Der **Zustandsraum** ist ein mathematischer Raum, der von den zeitlich veränderlichen Variablen eines dynamischen Systems und ihren zeitlichen Ableitungen aufgespannt wird, siehe Bild 3.21. Bei der Zustandsraumdarstellung werden die Einzelzustände eines Systems zu einem Zustandsvektor zusammengefasst und als Ortsvektor im (zwei- oder mehrdimensionalem) 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 Bild 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 innere 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 Kapitel 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.

3.6.1 Systemtechnische Gestaltungsgrundlagen

Wie in der Übersicht über den grundsätzlichen Aufbau mechatronischer Systeme in Bild 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 Bild 3.22.

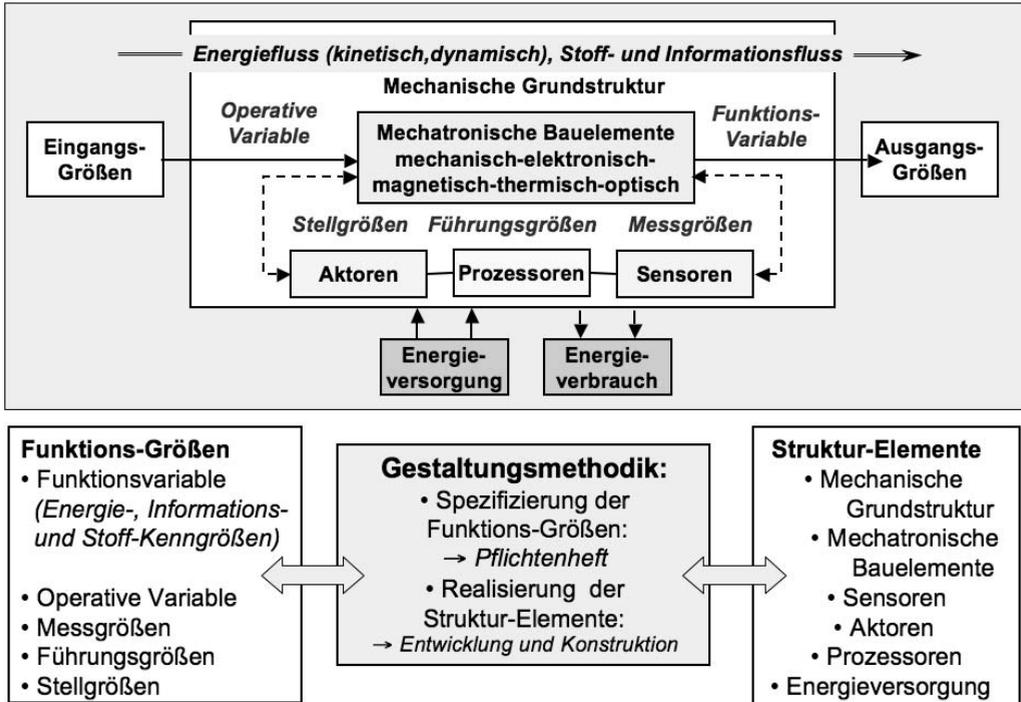


Bild 3.22 Prinzipdarstellung eines mechatronischen Systems: Ausgangspunkt zur Gestaltung

In Bild 3.22 sind die allgemeinen Merkmale mechatronischer Systeme vereinfachend in die folgenden elementaren Gruppen eingeteilt:

- Funktions-Größen
- Strukturelemente.

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.

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

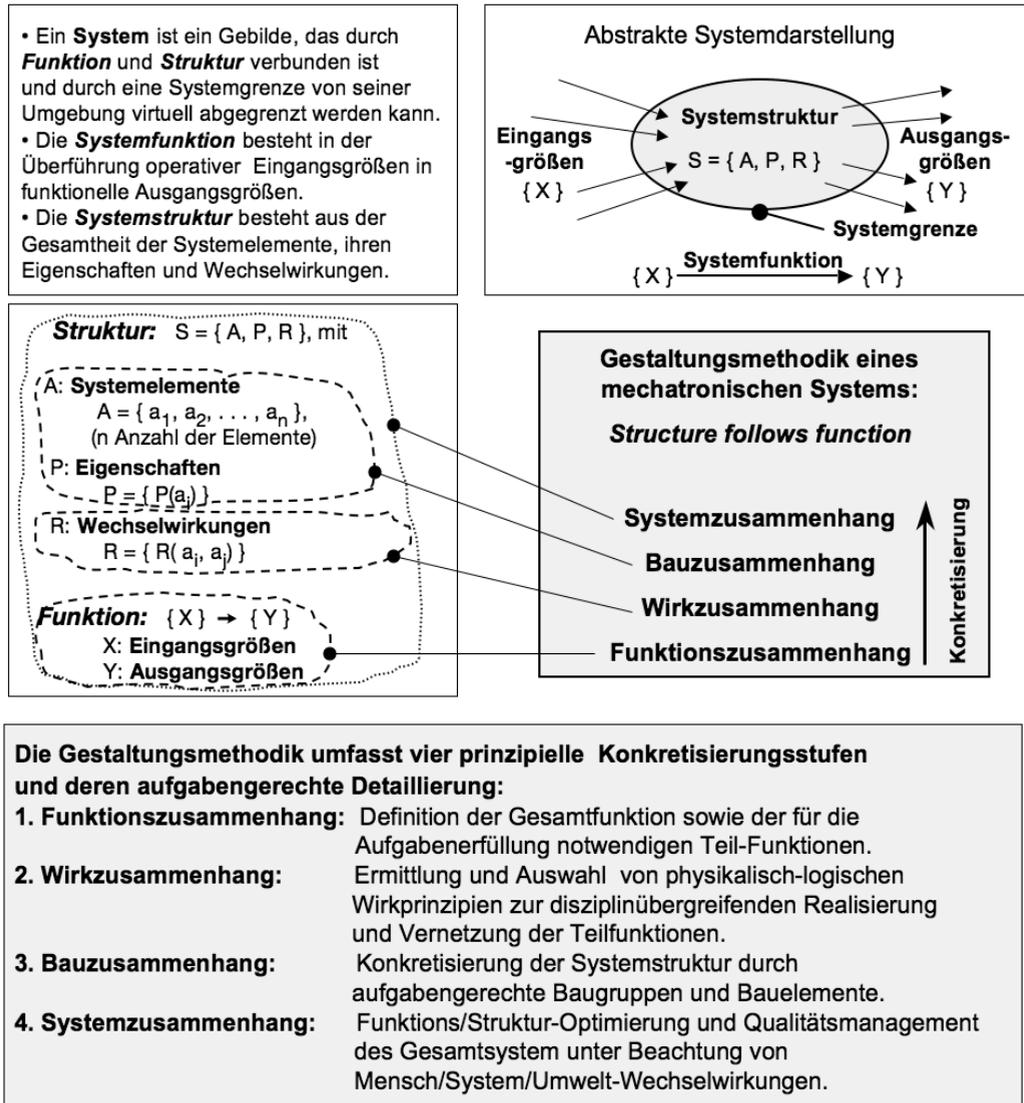


Bild 3.23 Gestaltung mechatronischer Systeme: die allgemeine Systemdefinition und die abstrakte Systemdarstellung sowie die daraus entwickelte Gestaltungsmethodik unter Verwendung von Begriffen aus der Konstruktionssystematik

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. Bild 3.24 illustriert die grundlegenden Aspekte des Funktionszusammenhangs in allgemeiner Form.

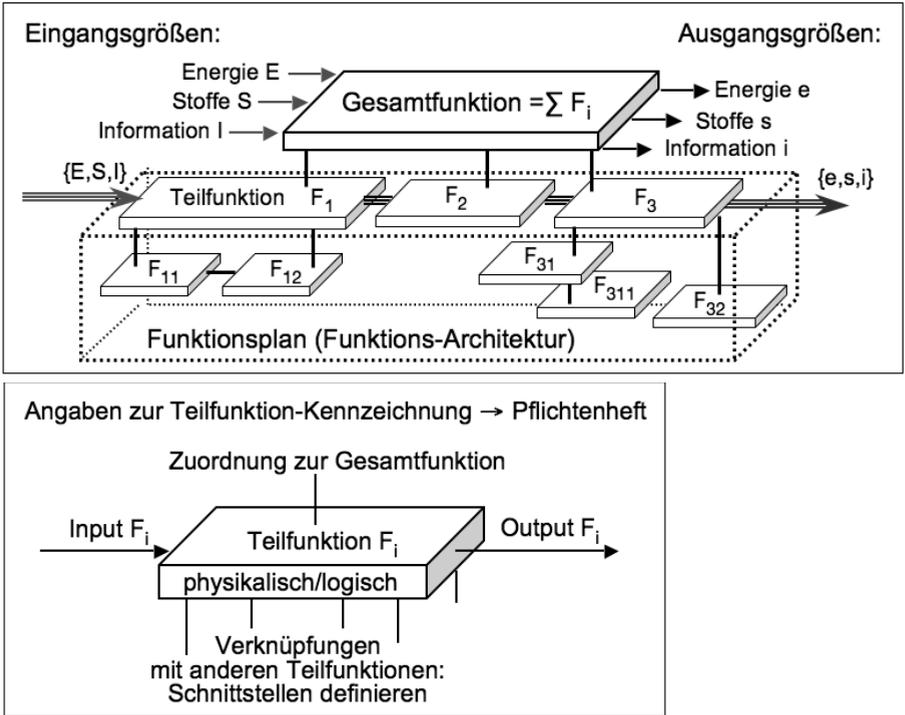


Bild 3.24 Funktionszusammenhang: Funktionsplan der Gesamtfunktion (oben) und Angaben zur Kennzeichnung von Teilfunktionen (unten)

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

Tabelle 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 $\left\{ \begin{array}{l} \text{Vergrößern} \\ \text{Verkleinern} \end{array} \right.$		$A > E$	Hebel, Getriebe Transformator Kompressor
			$A < E$	
Anzahl	Verknüpfen $\left\{ \begin{array}{l} \text{Bündeln} \\ \text{Verzweigen} \end{array} \right.$		Anzahl (A) < Anzahl (E)	Mehrweggetriebe Elektr. Kabelbaum Fluid-Ventil
			Anzahl (A) > Anzahl (E)	
Ort	Leiten $\left\{ \begin{array}{l} \text{Führen} \\ \text{Sperren} \end{array} \right.$		Ort von A \neq Ort von E	Führung, Gelenk Lichtleiter, Rohrleiter Schaltkreis, Bremse
			Ort von A = Ort von E	
Zeit	Speichern		Zeitpunkt von A \neq Zeitpunkt von E	Schwungrad, Elektr. Batterie, CD, DVD

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

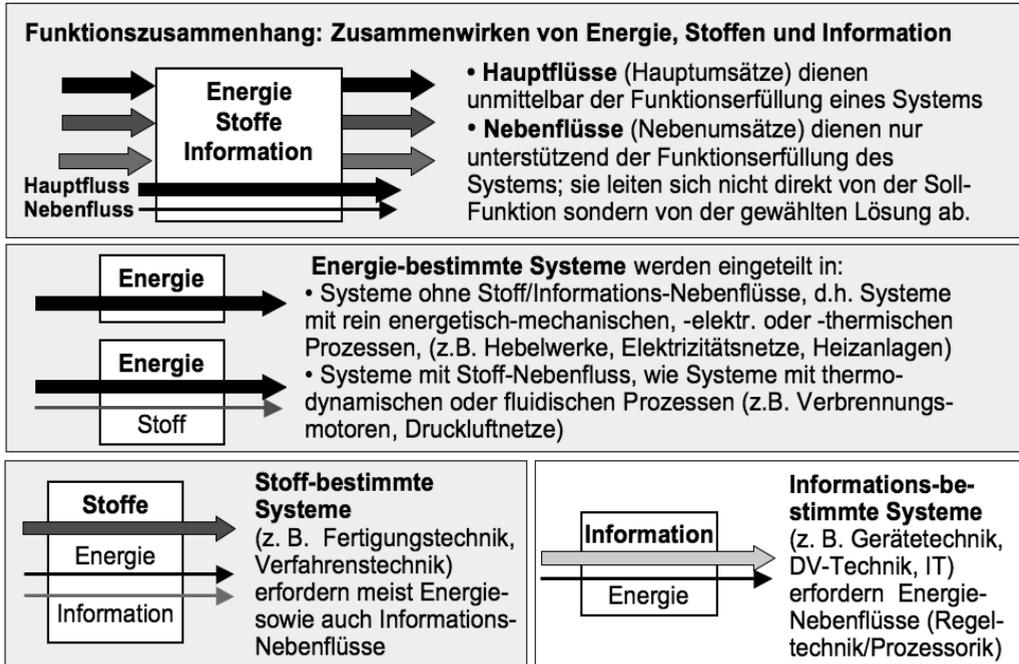


Bild 3.25 Funktionszusammenhang: Haupt- und Nebenflüsse nach kybernetischen Kategorien

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. Bild 3.26 nennt Beispiele von Wirkprinzipien.

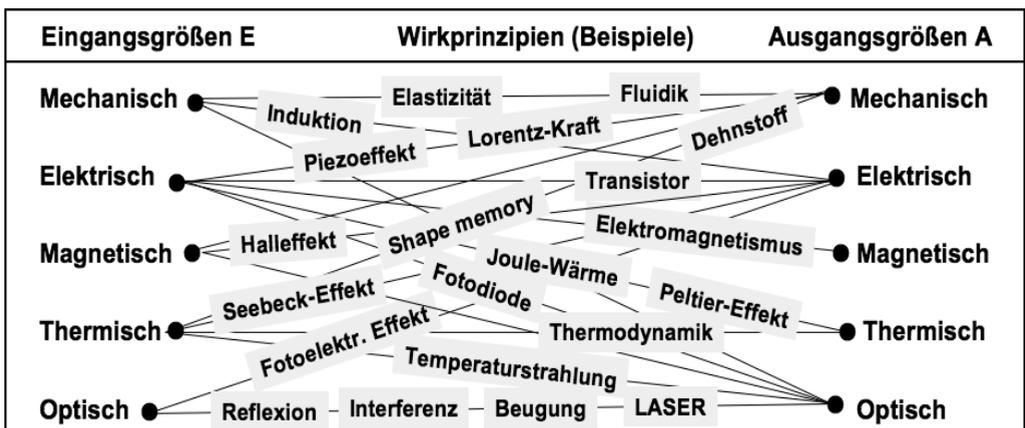


Bild 3.26 Wirkprinzipien für die Umwandlung von Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen

Wirkprinzipien können gemäß Bild 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).

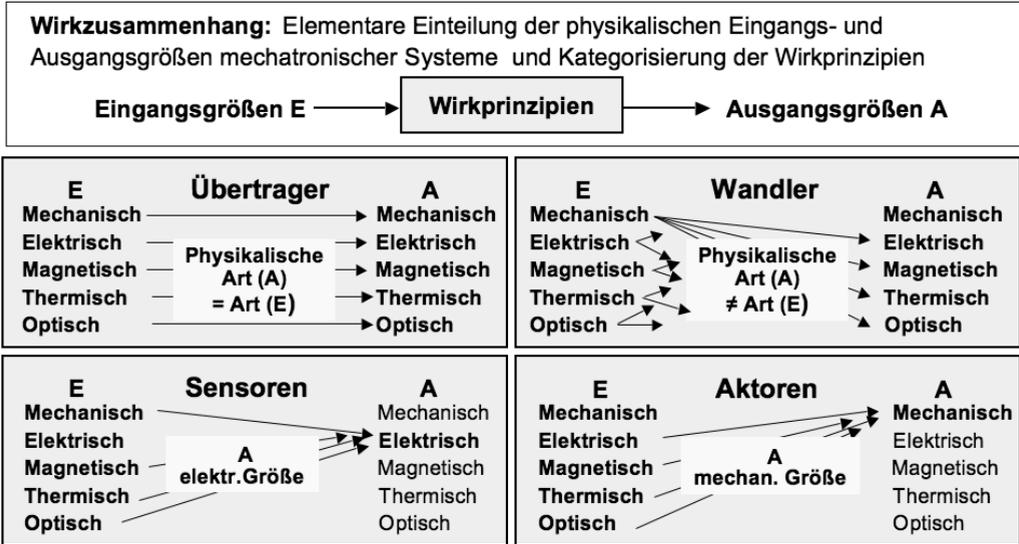


Bild 3.27 Übersicht über die Klassifikation von Wirkprinzipien und ihre technische Realisierung

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

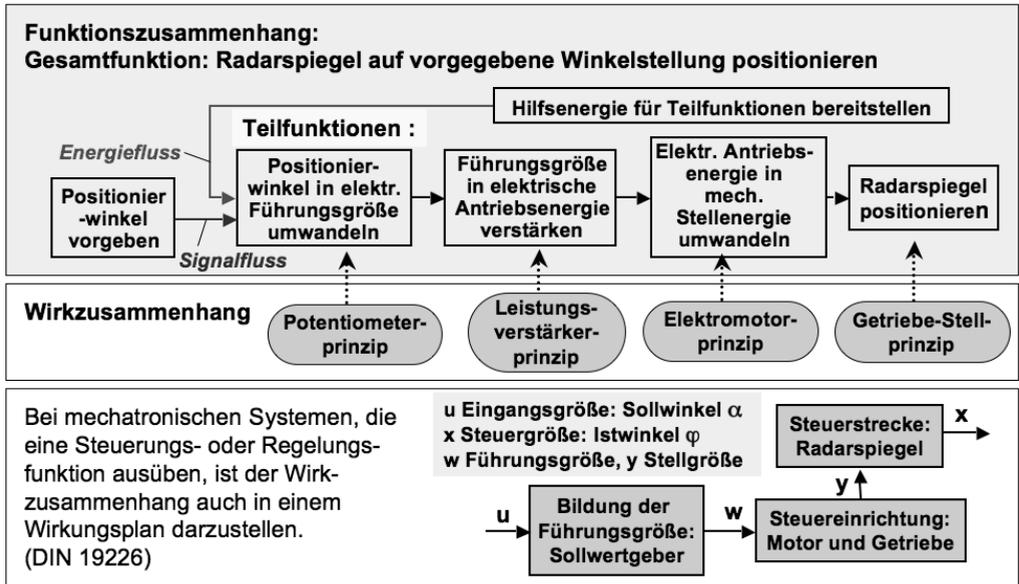
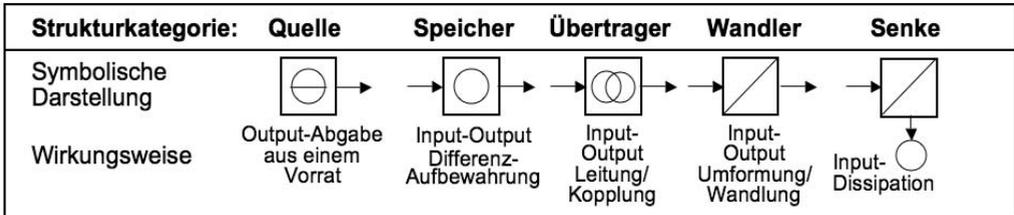


Bild 3.28 Funktionszusammenhang und Wirkzusammenhang: technisches Beispiel

Bauzusammenhang

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



Übertrager und Wandler
 Die Elemente in der Diagonalen sind *Übertrager* mit Input- und Output-Größen derselben physikalischen Natur. Alle anderen Gruppen sind *Wandler*.
 • **Sensoren** sind Wandler *nichtelektrisch* → *elektrisch*
 • **Aktoren** sind Wandler *elektr/nichtelektr* → *mechanisch*

	In	Out	Mechan.	Elektr.	Magn.	Therm.	Opt.
Mechan. Größen			Mechan. Elemente				
Elektr. Größen				Elektron. Elemente			
Magn. Größen					Magn. Elemente		
Therm. Größen						Therm. Elemente	
Opt. Größen							Opt. Elemente

Mechanische Elemente

- Strukturelemente (Festigkeit, Elastizität)
- Verbindungen (Stoff/Kraft/Formschluss)
- Stäbe • Platten • Wellen • Federn
- Dämpfer • Anschläge • Gesperre
- Dichtungen • Gelenke • Lagerungen
- Führungen • Getriebe • Kupplungen
- Bremsen • Schaltwerke • Regler
- Fluidik-Führungs-Regelungs-Elemente

Elektronische Elemente

- Widerstände • Kapazitäten • Induktivitäten
- Dioden • Transistoren • Thyristoren
- Messbrücken • Operationsverstärker
- Integrated Circuits • Prozessoren

Magnetische Elemente

- Weich- u. Hartmagnete • Elektromagnete
- Magneto-mechanisch-optische Elemente

Thermische Elemente

- Wärmeleiter • Wärmeübertrager
- Wärmetauscher • Heiz-Kühl-Elemente
- Kraft/Wärme-Koppler

Optische Elemente

- Optische Strahlungsquellen • LASER
- Spiegel • Prismen • Linsen • Opt. Gitter
- Objektive • Kondensoren • Okulare
- Faseropt. Elemente • Optoelekt. Elemente

Bild 3.29 Module und Elemente für die Gestaltung des Bauzusammenhangs

Für die Gestaltung des Bauzusammenhangs gelten die bekannten konstruktiven Grundregeln *Eindeutigkeit, Einfachheit, Sicherheit* mit den Stichworten: • *beanspruchungsgerecht (Spannungen, Dehnungen, Schwingungen, 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 Bild 3.30.

Funktionszusammenhang: Messung und Anzeige der Zeit in einer Armbanduhr

<ul style="list-style-type: none"> • Wirkzusammenhang mechanisch • Bauzusammenhang Unruh-Spiralschwinger, Anker, Gang-Räderwerk, Zeigerwerk 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkzusammenhang mechatronisch • Bauzusammenhang Quarz-Schwinger, LED- oder Flüssigkristall-Anzeige 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkzusammenhang mechano/mechatronisch • Bauzusammenhang Hybrid-Struktur mit analoger und digitaler Anzeige 
---	--	---

Bild 3.30 Funktionszusammenhang und unterschiedliche Wirkzusammenhänge, Beispiel

Systemzusammenhang

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

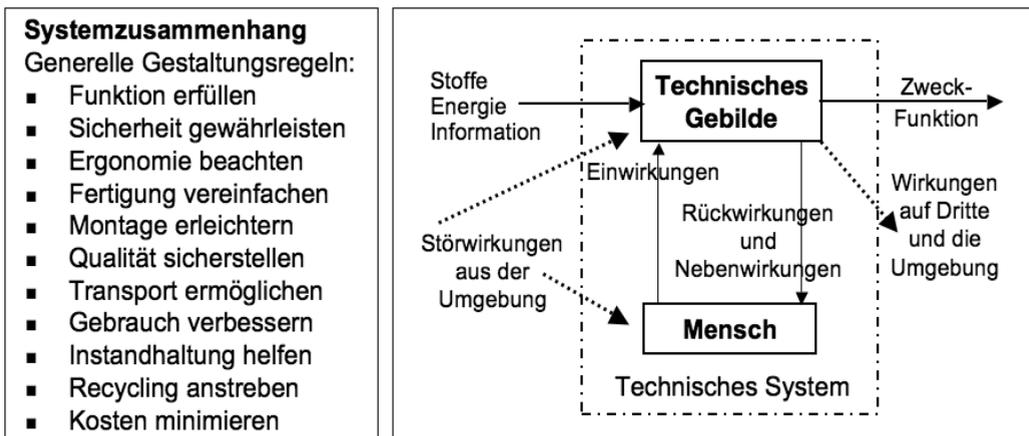


Bild 3.31 Generelle Aspekte der Gestaltung des Systemzusammenhangs

Die Kennzeichnung des Systemzusammenhangs nach Bild 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. Bild 3.32 gibt dazu eine allgemeine Übersicht.

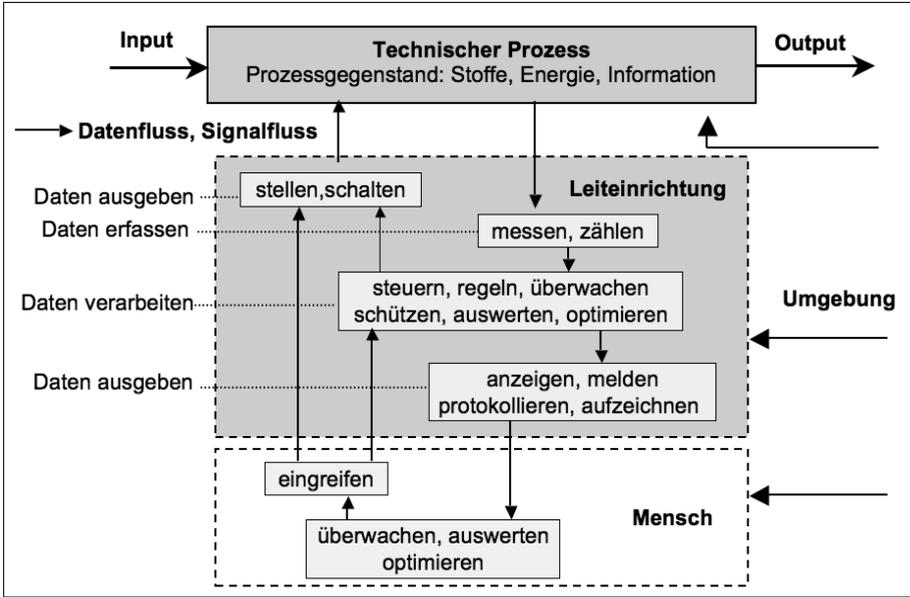


Bild 3.32 Leittechnik: Prozessführung technischer Systeme durch den Menschen

3.6.2 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:

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

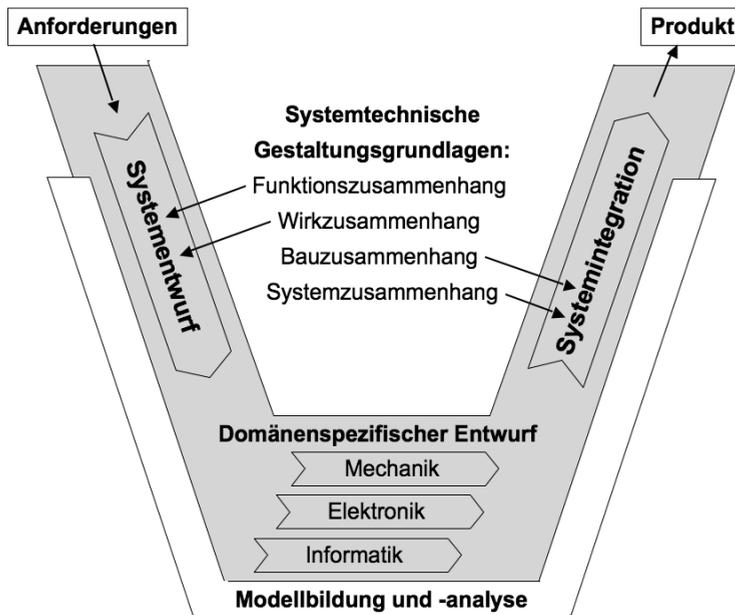


Bild 3.33 Modell der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (V-Modell)

Die in Bild 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 Bild 3.24 und 3.25). Diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zugeordnet (siehe Bild 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 Mechanik, 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 Bild 3.29) und des Systemzusammenhangs (siehe Bild 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 Kap. 6.6 *Sensor-Aktor-Prozessorik*.
 - *Räumliche Integration*: Die Komponenten werden räumlich integriert und bilden eine komplexe Funktionseinheit, z. B. Integration der Elemente eines Positioniersystems in einem Gehäuse (Sollwertgeber, Regler, Leistungsverstärker, Motor, Getriebe, Winkelsensor, Stellachse, siehe das Beispiel in Bild 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 Bild 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 Bild 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 Anforderungsliste 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 Bild 3.24 und Bild 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 Strukturodynamik, 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.

4 Regelung und Steuerung

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:

Regelungstechnik

- Die Regelungstechnik hat die Aufgabe, in technischen Systemen physikalische Größen (Regelgrößen) trotz des Einflusses äußerer Störungen (Störgrößen) konstant zu halten oder den zeitlichen Verlauf vorgegebener Größen (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.

Steuerungstechnik

- 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 Bild 4.1 in einer vergleichenden Übersicht dargestellt.

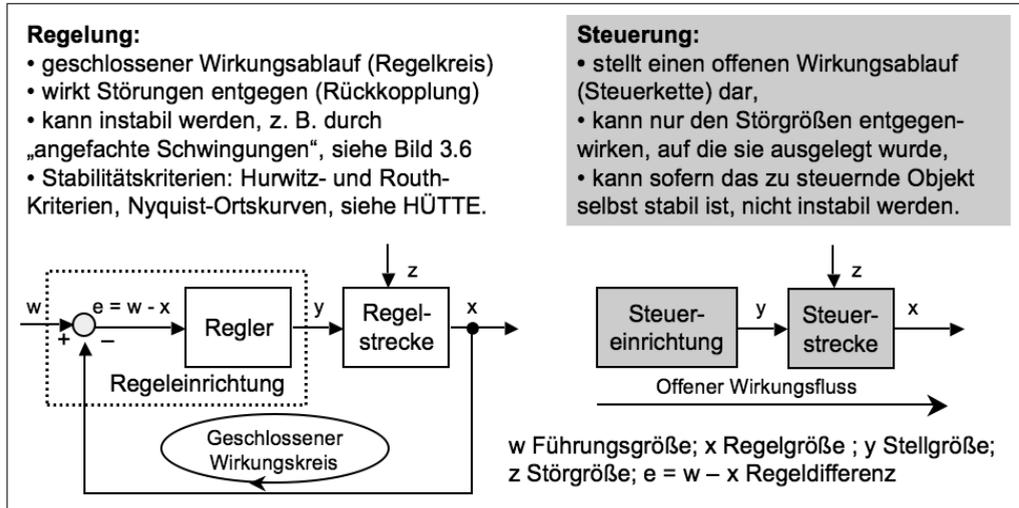


Bild 4.1 Die elementaren Merkmale und Unterschiede der Regelung und Steuerung

Die Grundlagen der Regelungs- und Steuerungstechnik sind in DIN 19 226 genormt, Bild 4.2 zeigt die *Wirkungspläne* und Bild 4.3 gibt eine Übersicht über die in Blockschaltbildern verwendeten Symbole.

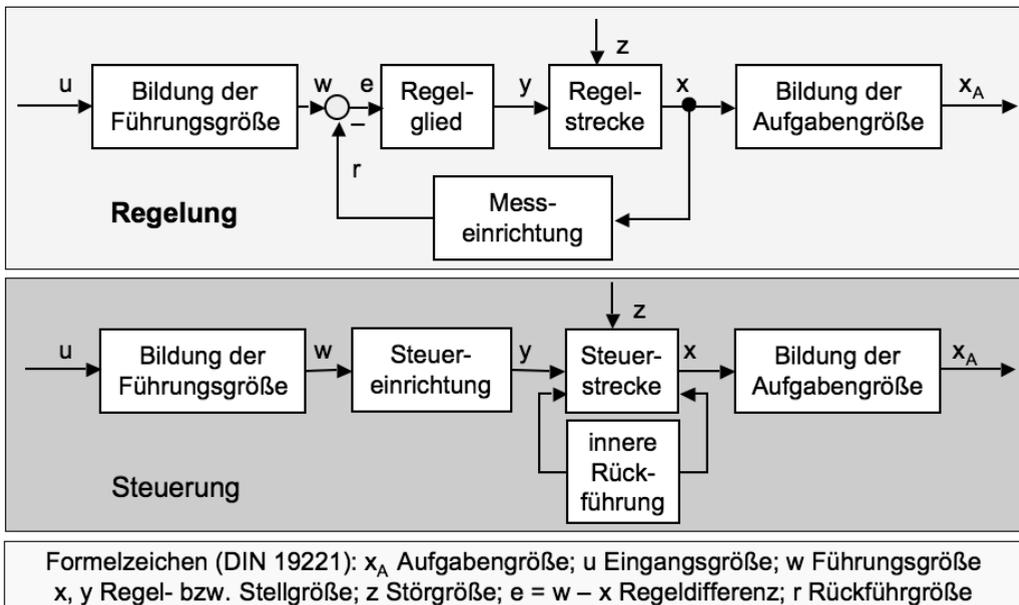


Bild 4.2 Wirkungspläne der Regelung und Steuerung technischer Systeme

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		$X_2 = N(X_1)$

Bild 4.3 Signalverknüpfungen und Symbole in Blockschaltbilddarstellungen

Die Prinzipien der Regelungstechnik und der Steuerungstechnik sind in Bild 4.4 am einfachen Beispiel einer Regelstrecke und einer Steuerstrecke illustriert.

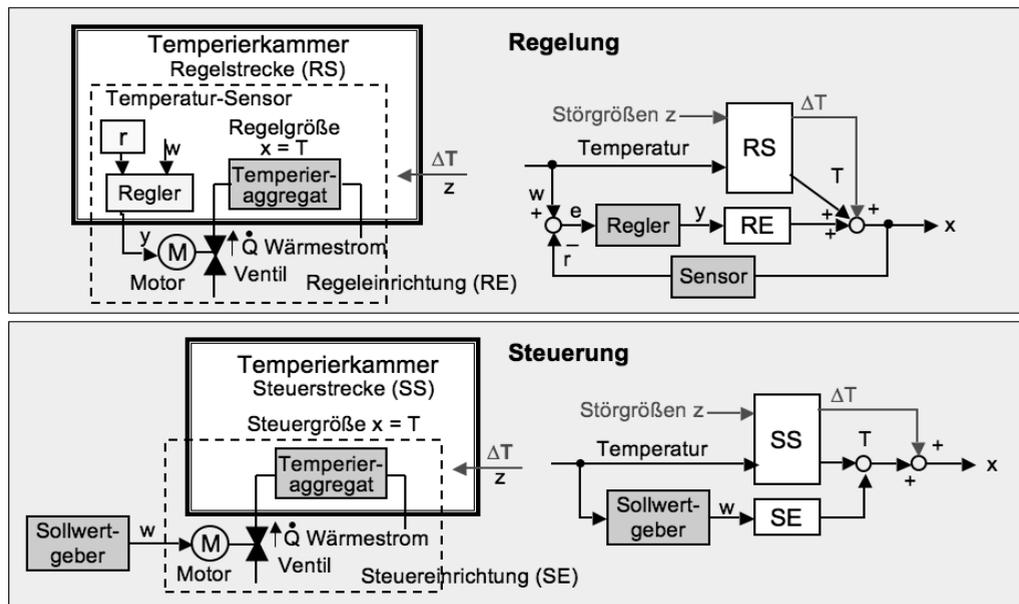


Bild 4.4 Regelung und Steuerung: Anwendungsbeispiel

Regelung und Steuerung sind für die Funktionalität mechatronischer Systeme von zentraler Bedeutung. Wichtige Beispiele aus der Handhabungs- und Robotertechnik (Kapitel 8.2) sind *Pick-and-Place-Geräte* (Steuerung, siehe Bild 8.7) und *Industrieroboter* (Regelung, siehe Bild 8.8).

Regeltechnische Systeme können mit analogen und diskreten Signalflüssen arbeiten. Die elementaren Kennzeichen analoger und zeitdiskreter Systeme zeigt Bild 4.5. 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.

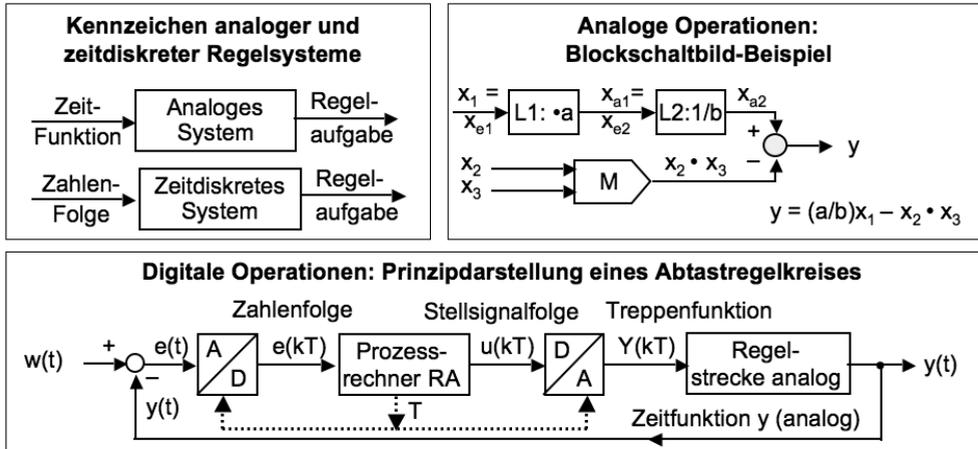


Bild 4.5 Beispiele regeltechnischer analoger und digitaler Operationen

4.2 Regelfunktionen und Regler-Module

Die elementaren Regelfunktionen und Regler-Module zeigen die folgenden Bilder:

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

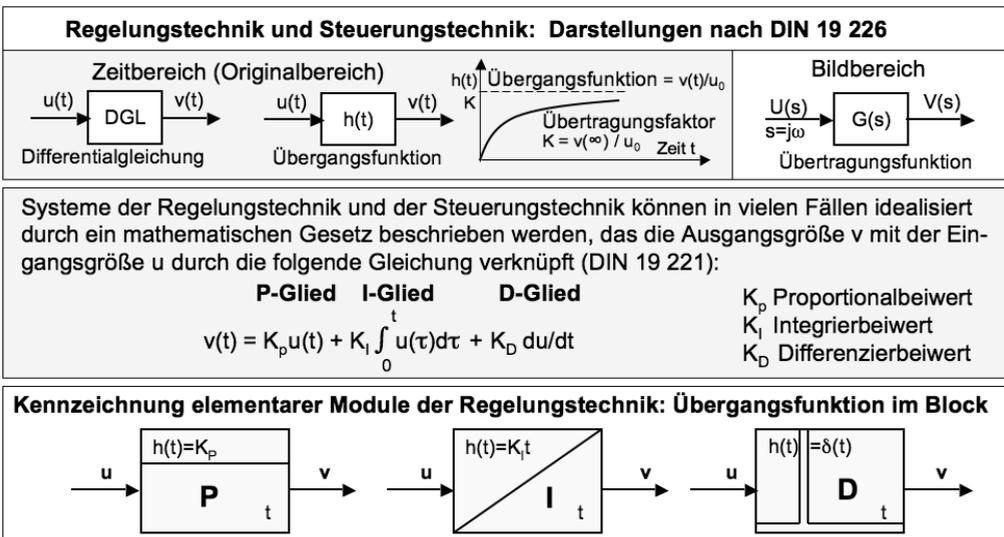


Bild 4.6 Regelungstechnische Funktionen und Regler-Grundmodule

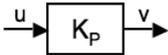
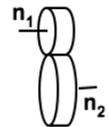
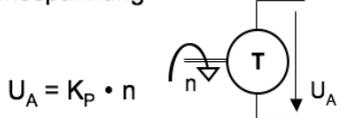
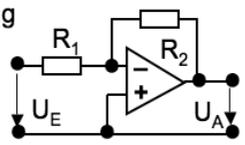
<p>Das P-Glied der Regelungstechnik und einfachste Ausführungsbeispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Darstellung im Zeitbereich: $v(t) = K_p u(t)$ K_p Verstärkungsfaktor (Übertragungsbeiwert)  • Übertragungsfunktion: $G(s) = K_p$ • Frequenzgang: $G(j\omega) = K_p$: Die Ortskurve von $G(j\omega)$ stellt für sämtliche Frequenzen einen Punkt auf der reellen Achse mit dem Abstand K_p vom Nullpunkt dar, d.h., der Phasengang $\varphi(\omega)$ ist null für $K_p > 0$ oder -180° für $K_p < 0$. 	
<p>Feder: Kraft bewirkt Auslenkung</p> 	<p>Getriebe (spielfrei): Antriebszahl bewirkt Abtriebszahl</p> 
<p>Tachogenerator: Drehzahl erzeugt Tachospaltung</p> 	<p>Verstärker: Eingangsspannung bewirkt Ausgangsspannung</p> 

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

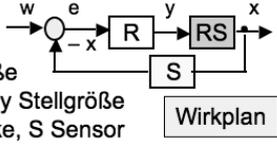
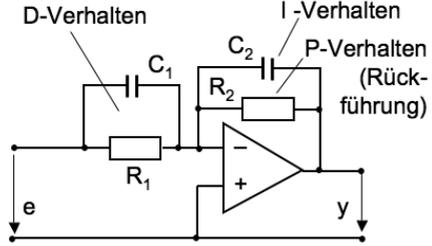
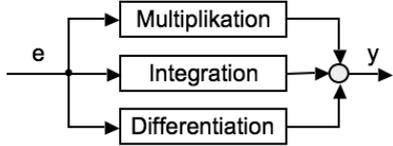
<p>Reglertypen</p>  <p>w Führungs-, x Regelgröße $e = w - x$ Regeldifferenz, y Stellgröße R Regler, RS Regelstrecke, S Sensor</p> <p style="text-align: right;">Wirkplan</p>	<p>PID-Regler, realisiert mit Operationsverstärker und RCs</p>
<p>P-Regler: Stellgröße $y = K_p \cdot e$ proportional zur Regeldifferenz $e = w - x$. Da eine Stellgröße $y \neq 0$ jedoch auch $e \neq 0$ erfordert, können Störungen nicht voll ausgeglichen werden.</p>	<p>Ersatzschaltbild</p>  <p>D-Verhalten I-Verhalten P-Verhalten (Rückführung)</p>
<p>I-Regler: Stellgröße $y = K_I \cdot \int e \, dt$ proportional zum Zeitintegral von e. I-Regler können Störungen voll ausregeln, sind jedoch durch Integralbildung langsam.</p>	<p>Verstärkung: $K = -(R_1 C_1 + R_2 C_2) / R_1 C_2$</p>
<p>D-Regler: Stellgröße $y = K_D \cdot de/dt$ proportional zur zeitlichen Ableitung der Regeldifferenz e. Schneller Regler, jedoch keine Regelfunktion für $e = \text{konst.}$, d.h. nur in Kombination mit P- oder PI-Regler verwendbar.</p>	<p>Funktionsschema</p> 
<p>PID-Regler: P-I-D-Parallelstruktur, d.h. Überlagerung ihrer Eigenschaften und Wirkungen. Funktion bei hohen Frequenzen wie PD-Regler, bei tiefen Frequenzen wie PI-Regler; umfassender klassischer Regler.</p>	

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

Der anwendungstechnisch wichtigste Regler ist der PID-Regler. Sein prinzipieller Aufbau ist in der Blockschaltbilddarstellung von Bild 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 .

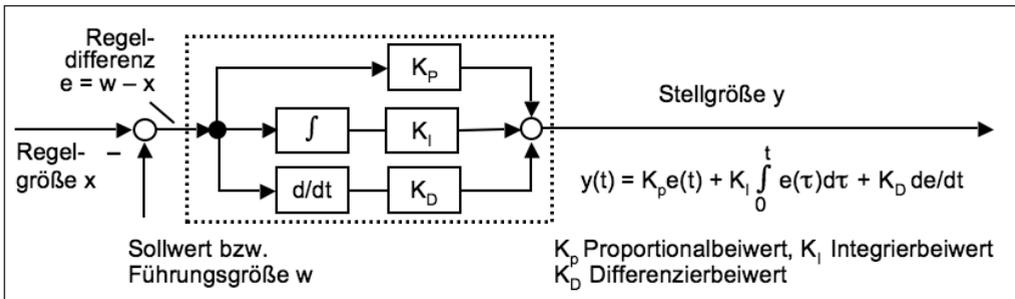


Bild 4.9 Blockschaltbilddarstellung eines PID-Reglers

Für technische Anwendungen gibt es derzeit etwa 250 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.
- *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 sind hier 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. Bild 4.10 zeigt ein Zweigrößen-Regelsystem (Durchfluss- und Druckregelung) und das

Funktionsprinzip eines Bernoulli-Durchfluss-Sensors. Man erkennt dabei zwei Regelkreise, die durch die gekoppelten Regelstrecken miteinander verbunden sind.

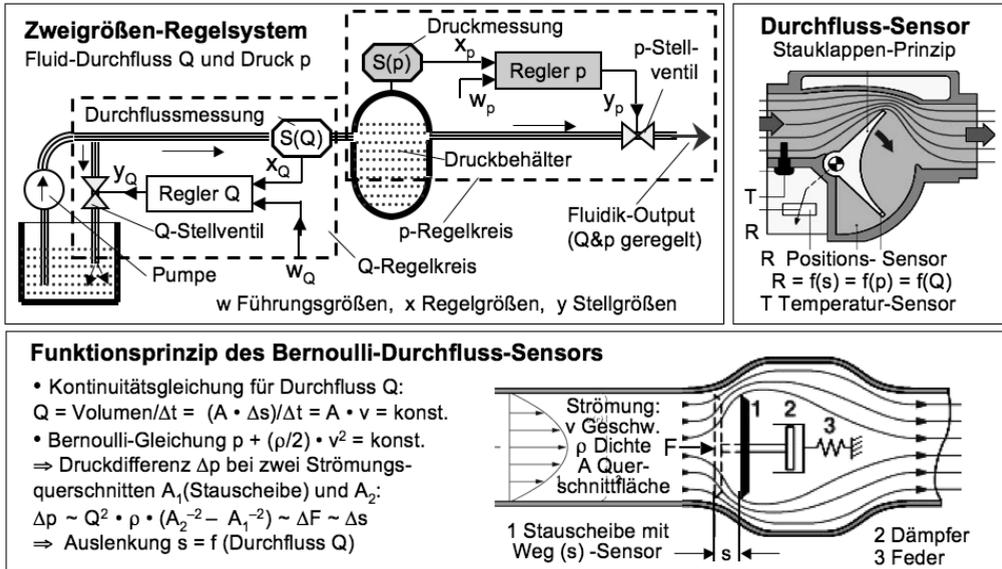


Bild 4.10 Fluidik-Regelsystem: Beispiel einer Zwei-Größen-Regelung für Durchfluss und Druck

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, Bild 4.11 links.

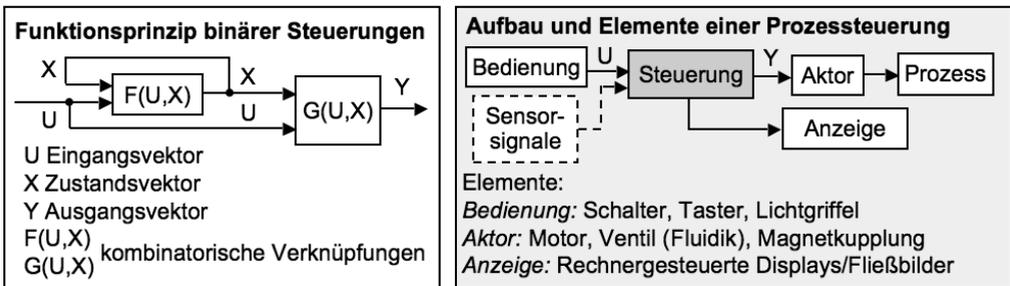


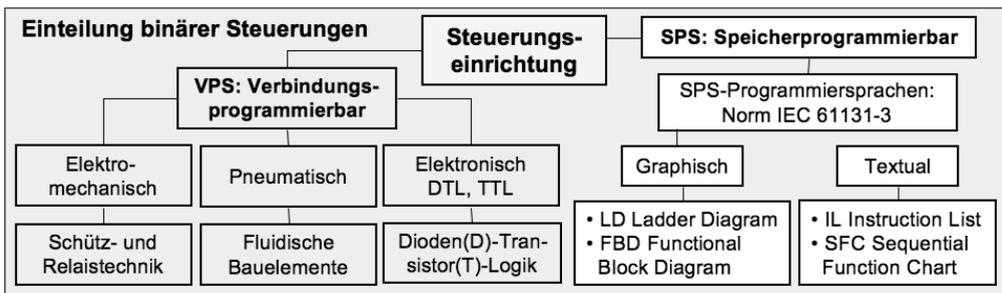
Bild 4.11 Binäre Steuerungen: Funktionsprinzip und Anwendungskonfiguration

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. Bild 4.11 rechts 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 Anzeigelemente und die Aktoren (Stellglieder) mit deren Hilfe der Prozess gesteuert wird.

Bild 4.12 gibt eine 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.



Ablaufsteuerung: Ablaufkette	Verknüpfungssteuerung: Boolesche Algebra																	
	Verknüpfung UND $E_1 \wedge E_2 = A$ Schaltfunktion: $A = E_1 \cdot E_2$	Schalttabelle <table border="1"> <tr><th>E_1</th><th>E_2</th><th>A</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	E_1	E_2	A	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	Zeichen DIN 19239
E_1	E_2	A																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
	ODER $E_1 \vee E_2 = A$ Schaltfunktion: $A = E_1 + E_2$	<table border="1"> <tr><th>E_1</th><th>E_2</th><th>A</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	E_1	E_2	A	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	
E_1	E_2	A																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
	Negation „NICHT“ (\bar{E}) bzw. (\bar{A}); NAND: $\bar{\wedge}$; NOR: $\bar{\vee}$																	

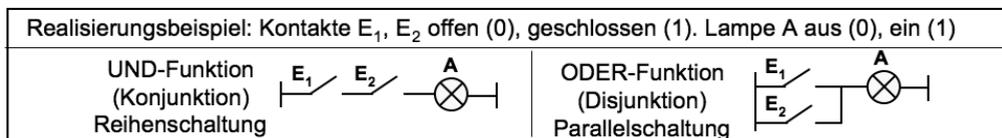
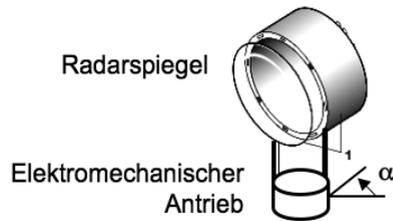


Bild 4.12 Binäre Steuerungen: Einteilung und Funktionsarten

4.5 Steuerung und Regelung in der Mechatronik

Die Prinzipien der Steuerung und Regelung finden vielfältige Anwendungen in der Mechatronik: Funktionsgrößen werden gemessen, mit operativen Führungsgrößen verglichen und mittels geeigneter mechatronischer Module beeinflusst. Der Wirkungsablauf in mechatronischen Systemen kann sowohl in Steuerketten als auch in Regelkreisen erfolgen, Die Anwendung steuerungs- und regelungstechnischer Prinzipien in der Mechatronik wird am Beispiel der Positionierung eines Radarspiegels erläutert.

Aufgabenstellung:
 Gestaltung eines mechatronischen Systems zur Positionierung eines Radarspiegels mit
 (a) Steuerungstechnik,
 (b) Regelungstechnik.
 Darstellung der Systemfunktionen, der Systemstrukturen und der Wirkungspläne.



Die steuerungstechnische Realisierung des mechatronischen System zur Radarspiegelpositionierung zeigt Bild 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.

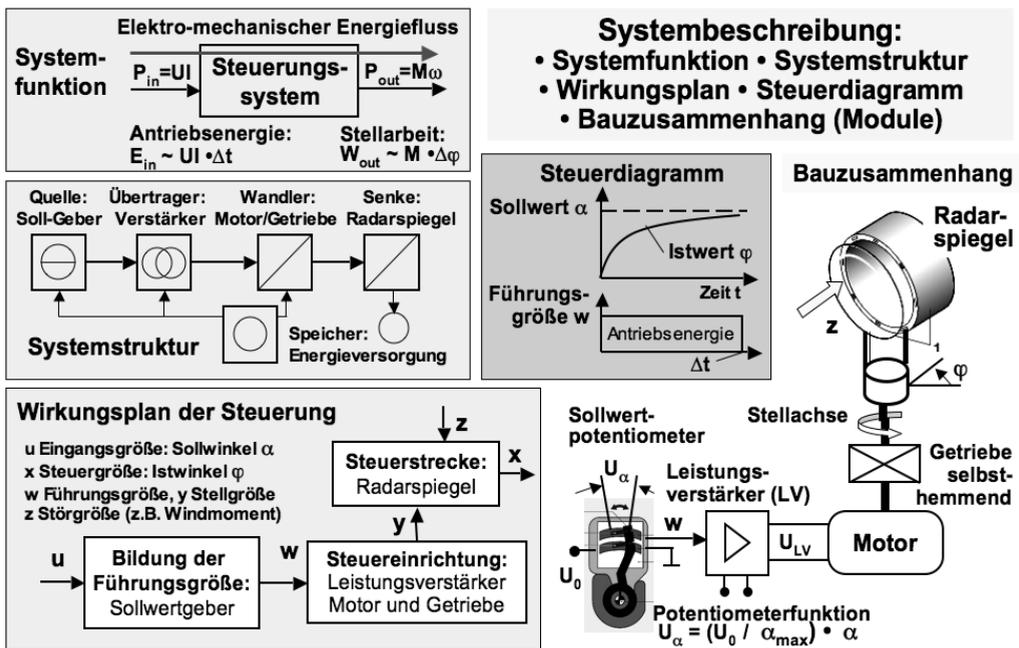


Bild 4.13 Mechatronisches Steuerungs-System zur Radarspiegel-Positionierung

Die regelungstechnische Lösung der Radarwinkelpositionierung ist in Bild 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/ Sollpositionen abgeglichen und Störgrößen „ausgeregelt“ werden. Der Vergleich von Steuerung und Regelung lässt die im Fall der Regelung aufwändigere Systemstruktur und den erweiterten Wirkungsplan erkennen.

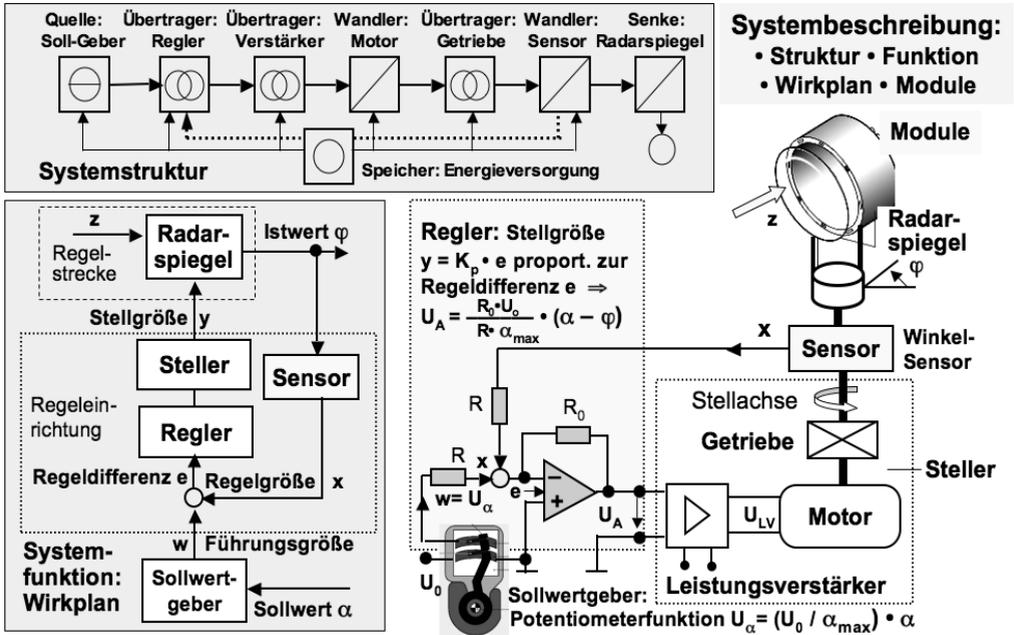


Bild 4.14 Mechatronisches Regelungs-System zur Radarspiegel-Positionierung

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 Bild 4.15.

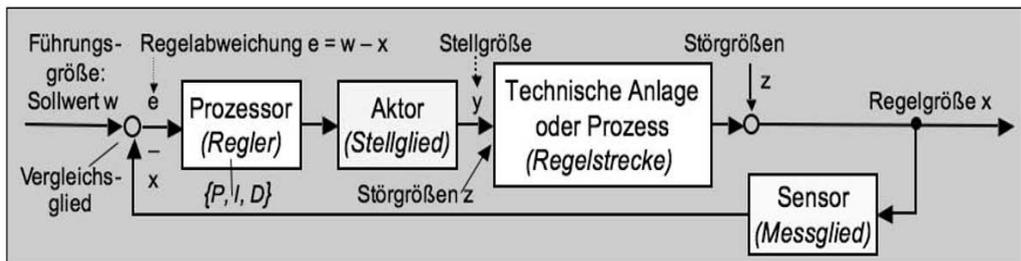


Bild 4.15 Regelkreis-Wirkplan der Mechatronik mit Sensorik und Aktorik

5 Sensorik

Die Sensorik steht gemäß der Definition der Mechatronik im Vordergrund bei der Erweiterung mechanischer Systeme zu mechatronischen Systemen. Sensoren sind als *Wandler* von zentraler Bedeutung für die gesamte Mechatronik. Sie haben die Aufgabe, auf ihrer Eingangsseite nichtelektrische Funktionsgrößen aufzunehmen und sie auf der Ausgangsseite als elektrische Größen auszugeben, ggf. auch unter Nutzung magnetischer, optischer oder anderer Wandlereffekte. Die Sensorik für die Mechatronik lässt sich nach technischen Input-Funktionsklassen 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 folgende Tabelle nennt in einer Matrixdarstellung Sensoren, die den Zusammenhang zwischen Input- und Outputgrößen technisch realisieren. Sie werden im Folgenden – nach einer Einführung in die messtechnischen und physikalischen Grundlagen – mit ihren Prinzipien und technischen Eigenschaften systematisch dargestellt.

Tabelle 5.1 Sensorik-Übersicht: Matrixdarstellung der Input- und Outputgrößen von Sensoren

In \ Out	Elektrischer Widerstand:			Spannung U	Strom I	Ladung Q
	resistiv R	induktiv L	kapazitiv C			
Position: Länge l, Weg s Winkel φ	Potentiometer, Magnetoresistiver Sensor, Gauß-Feldplatte	Differenzial- Transformator, Tauchanker- Wegsensor	Kapazitiver Wegsensor	Hall-Sensor, Optoelektronischer Licht- schranken- Sensor	Wirbelstrom- Sensor	
Dehnung $\varepsilon = \Delta l / l_0$	Dehnungs- messstreifen				Faseroptische Sensoren	
Geschwindigkeit $v = ds/dt$	Magnetoresist. Drehwinkel-S.	Indukt. Dreh- winkel-S.		Magnetpol- Drehzahl-S.	Optoelektron. Drehzahl-S.	Gyrometer/Piezo- 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	Magneto- elastischer Sensor	Kraftkompensations- Sensor	Federelemente oder DMS, Rückführung auf s-, ε -Messung		Piezoelektrischer Sensor
Druck $p = \text{Kraft}/\text{Fläche}$	Piezoresistiv Dehnstoff-S	Magnetoelas- tischer S.	Kapazitiver Drucksensor	Federelemente oder DMS: Rückführung auf s-, ε - Messung		Piezoelektrischer Sensor
Temperatur T	NTC/ PTC- Widerstände			Thermo- elemente	Optoelektron. Pyrometer	
Feuchte $f_{\text{abs}}, f_{\text{rel}}$	Resistives Hygrometer		Kondensator Hygrometer			

5.1 Messtechnische Grundlagen

Mit dem Begriff *Messtechnik* wird die *Gesamtheit der Verfahren und Geräte zur experimentellen Bestimmung und Verarbeitung zahlenmäßig erfassbarer Größen in der Technik* bezeichnet (DIN 1319). Messtechnik und Sensorik sind gemäß Bild 5.1 für alle technischen Systemfelder von Bedeutung, von der Entwicklung bis zum Qualitätsmanagement, wobei folgende Akzentuierung besteht:

- Die Messtechnik liefert *Daten* zur exakten Kennzeichnung technischer Objekte.
- Die Sensorik wandelt *Funktionsvariable* in elektrische Größen 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 computerunterstützten Prozesssteuerung.

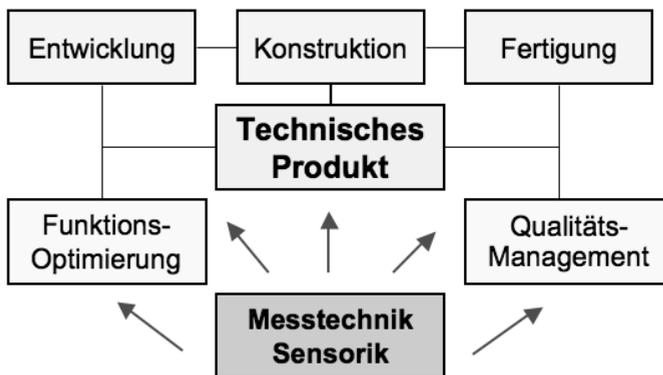


Bild 5.1 Messtechnik und Sensorik in der Technik

5.1.1 Metrologie: Fachgebiete und Standards

Die *Metrologie* ist die Wissenschaft des Messens. Das SI-System der metrologischen Einheiten, das *Systeme International d' Unites*, wird durch den Staatsvertrag der *Meterkonvention* von 1875 und die Generalkonferenz für Maß und Gewicht (Bureau International des Poids et Measure, BIPM, Sevres bei Paris) festgelegt. Die Metrologie unterteilt sich gemäß BIPM-Konvention in neun Gebiete: *Masse, Länge, Elektrizität, Zeit und Frequenz, Thermometrie, Ionisierende Strahlung und Radioaktivität, Photometrie und Radiometrie, Akustik, Stoffmenge*. Die in diesen Metrologie-Fachgebieten verwendeten Referenzverfahren und Referenzmaterialien (*Measurement Standards, Etalons*) sind in Folgenden mit englischsprachigen Fachbegriffen – die in international einheitlicher Terminologie in der Metrologie gebräuchlich sind – zusammengestellt.

Masse und verwandte Größen: Mass and related quantities

- *Mass measurements:* Mass standards, standard balances, mass comparators.
- *Force and pressure:* Load cells, dead-weight testers, moment and torque converters, pressure balances with oil/gas-lubricated piston cylinder assemblies, force-testing machines.
- *Volume, density, viscosity:* Glass areometers, laboratory glassware, vibration densimeters, glass capillary viscometers, rotation viscometers, viscometry scale.

Länge: Length

- *Wavelength and interferometry:* Stabilized lasers, interferometers, laser interferometric measurement systems, interferometric comparators.
- *Dimensional metrology:* Gauge blocks, line scales, step gauges, setting rings, plugs, high masters, dial gauges, measuring microscopes, optical flat standards, coordinate measuring machines, laser scan micrometers, depth micrometers.
- *Angular measurements:* Autocolimators, rotary tables, angle gauges, polygons, levels.
- *Forms:* Straightness, flatness, parallelism, squares, roundness standards, cylinder standards.
- *Surface quality:* Step height and groove standards, roughness standards, roughness measurement equipment.

Elektrizität und Magnetismus: Electricity and Magnetism

- *DC electricity:* Cryogenic current comparators, Josephson and Quantum Hall effect, Zener diode references, potentiometric methods, comparator bridges.
- *AC electricity:* AC/DC converters, standard capacitors, air capacitors, standard inductances, compensators, wattmeters.
- *HF electricity:* Thermal converters, calorimeters, bolometers.
- *High current and high voltage:* Measurement transformers of current and voltage, reference high voltage sources.

Zeit und Frequenz: Time and Frequency

- *Time measurement:* Caesium atomic clock, time interval equipment.
- *Frequency:* Atomic clock and fountain, quartz oscillators, lasers, electronic counters and synthesisers.

Thermometrie: Thermometry

- *Temperature measurement by contact:* Gas thermometers, International Temperature Scale ITS90 fixed points, resistance thermometers, thermocouples.
- *Non-contact temperature measurement:* High-temperature black bodies, cryogenic radiometers, pyrometers, Si photodiodes.
- *Humidity:* Mirror dew point meters or electronic hygrometers, double pressure/temperature humidity generators.

Ionisierende Strahlung und Radioaktivität: Ionising Radiation and Radioactivity

- *Absorbed dose – High level industrial products:* Calorimeters, calibrated high dose rate cavities, dichromatic dosimeters.
- *Absorbed dose – Medical products:* Calorimeters, ionisation chambers.
- *Radiation protection:* Ionisation chambers, reference radiation beams/fields, proportional and other counters, neutron spectrometers.
- *Radioactivity:* Well-type ionising chambers, certified radioactivity sources, gamma and alpha spectroscopy.

Photometrie und Radiometrie: Photometry and Radiometry

- *Optical radiometry:* Cryogenic radiometer, detectors, stabilised laser reference sources, reference materials fibres.
- *Photometry:* Visible region detection, Si photodiodes, quantum efficiency detectors.
- *Colorimetry:* Spectrophotometer.

Akustik: Acoustics, Ultrasound and Vibration

- *Acoustical measurements in gases:* Standard microphones, piston phones, condenser microphones, sound calibrators.
- *Accelerometry:* Accelerometers, force transducers, vibrators, laser interferometer.
- *Acoustical measurements in liquids:* Hydrophones.
- *Ultrasound:* Ultrasonic power meters, radiation force balance.

Stoffmenge: Amount of Substance

- *Environmental and clinical chemistry:* Certified reference materials, mass spectrometers, chromatographs.
- *Materials chemistry:* Pure materials, certified reference materials.
- *Food chemistry:* Certified reference materials.

5.1.2 Metrologische Begriffe

Messen ist der experimentelle Vorgang, durch den ein spezieller Wert (Messwert) einer physikalischen Größe (Messgröße) als Vielfaches eines Bezugswertes (Einheit) ermittelt wird. Präzisionsmessungen physikalischer Größen müssen durch eine ununterbrochene Kette – bezeichnet als *traceability* – auf das *SI-System* rückführbar sein. Die sieben Basisgrößen und Basiseinheiten des SI-Einheitensystems sind:

- Länge: Meter (m), definiert über Lichtgeschwindigkeit (Naturkonstante) und Zeit
- Masse: Kilogramm (kg), Internationaler Pt-Ir-Prototyp, aufbewahrt beim BIPM
- Zeit: Sekunde (s), Periodendauer einer Strahlung (Nuklid ^{133}Cs)
- Stromstärke: Ampere (A), definiert über Kraftwirkung zwischen elektrischen Leitern
- Temperatur: Kelvin (K), Tripelpunkt des Wassers (0 K entspricht $-273,15\text{ °C}$)
- Stoffmenge: Mol (mol), definiert über Atomzahl (^{12}C in 12 Gramm)
- Lichtstärke: Candela (cd), definiert über die Strahlung des Schwarzen Körpers.

Um eine physikalische Größe messen zu können, sind eine *Vergleichsgröße* (Bezugswert), ein *Messprinzip*, ein *Messverfahren* und ein *Messgerät* erforderlich.

- *Messprinzip* heißt die charakteristische physikalische Erscheinung, die der Messung zugrunde liegt. Beispiel: Messung der Induktivitätsänderung einer Drosselspule bei Bewegung eines Eisenkerns zur Bestimmung des Verschiebewegs.
- Ein *Messverfahren* ist die praktische Realisierung eines Messprinzips.
- Ein *Messgerät* liefert oder verkörpert Messwerte, auch die Verknüpfung mehrerer unabhängiger Messwerte.
 - *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.
- *Prüfen* heißt feststellen, ob ein technisches Objekt vorgeschriebene, vereinbarte oder erwartete Anforderungen erfüllt (*conformity assessment*).

Beim Messen, Prüfen, Kalibrieren und Justieren sind gegebenenfalls einwirkende Einfluss- und Störgrößen (z.B. Temperatureinflüsse, Erschütterungen, elektromagnetische Felder) zu beachten und vorgegebene Messbedingungen einzuhalten.

5.1.3 Messunsicherheit und Messunsicherheitsbudget

Ein Messergebnis ist nur dann vollständig, wenn es eine Angabe der Messunsicherheit enthält. 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 internationale *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*.

Die Messunsicherheit setzt sich aus *zufälligen* und *systematischen* Messabweichungen zusammen. Zufällige Messabweichungen werden durch die Standardabweichung als Maß der Streuung der Einzelwerte um den arithmetischen Mittelwert einer – durch eine definierte Probennahme (*sampling*) genau zu kennzeichnenden – Stichprobe von Einzelmessungen gekennzeichnet. Bild 5.2 nennt die Grundlagen.

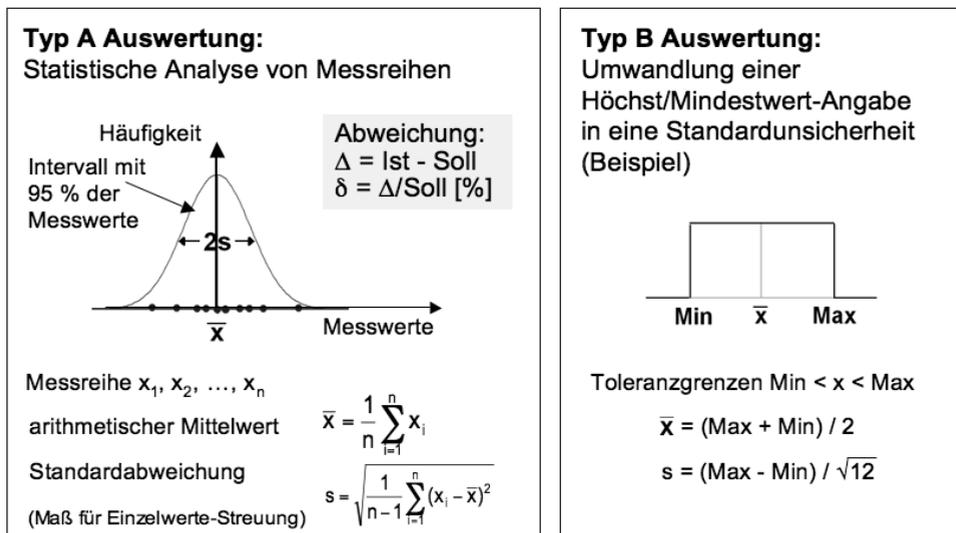
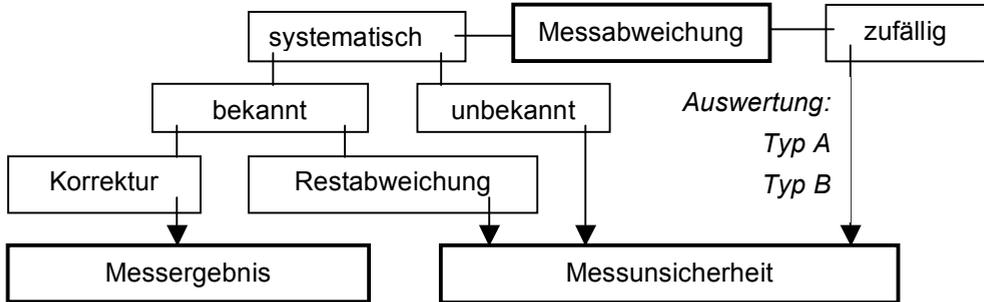


Bild 5.2 Methodik zur Bestimmung zufälliger Messabweichungen

Systematische Messabweichungen sind häufig vorzeichenbehaftet und können dann korrigiert werden. (Klassisches Beispiel: Korrektur der elastischen Kontaktdeformation bei der taktilen Längenmessung.) Die folgende Übersicht zeigt schematisch vereinfacht die verschiedenen möglichen Komponenten von Messabweichungen.



Resultiert das Messergebnis aus einer mathematischen oder methodischen Verknüpfung von Einzelmessgrößen, ist ein *Messunsicherheitsbudget* zu ermitteln. Dies ist auch zur Kennzeichnung der Gesamt-Messunsicherheit einer *Messkette*, die das Zusammenschalten mehrerer Messgeräte kennzeichnet erforderlich. Die Grundzüge der Ermittlung eines Messunsicherheitsbudgets vermittelt Bild 5.3.

Messunsicherheitsbudget: Gaußsches Fehlerfortpflanzungsgesetz

In technischen Aufgabenstellungen ist vielfach das anzugebende Messergebnis $y = f(A, B, C)$ eine Funktion mehrerer unabhängiger Messgrößen A, B, C , z. B.:

- Mechanische Spannung = Kraft/Fläche
- Elektrischer Widerstand = Spannung/Strom

Bei Kenntnis der Messunsicherheiten Δ bzw. $\delta(\%)$ der Messgrößen A, B, C ergibt sich für die gesamte Funktion y das folgende Messunsicherheitsbudget:

$$\Delta y = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial y}{\partial A}\right)(\Delta A)\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial y}{\partial B}\right)(\Delta B)\right]^2 + \dots}$$

mit folgenden Spezialfällen:

- Summen/Differenzfunktion $y = A + B$; $y = A - B \Rightarrow \Delta y = \sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2}$
- Produkt/Quotientenfunktion $y = A \cdot B$; $y = A/B \Rightarrow \Delta y/y = \delta y = \sqrt{(\delta A)^2 + (\delta B)^2}$
- Potenzfunktion $y = A^p \Rightarrow \Delta y/y = \delta y = |p|(\Delta A)/A = |p|\delta A$

Die bei der Auswertung von Messungen erhaltenen Messergebnisse

- Messwerte
 - Messunsicherheiten
 - Messunsicherheitsbudget
- sind unter Zusammenstellung aller zu einer Reproduzierung der betreffenden Messung erforderlichen Angaben in einem Messprotokoll zusammenzufassen.

Bild 5.3 Methodik zur Bestimmung von Messunsicherheit und Messunsicherheitsbudget

5.1.4 Grenzwert-Beurteilungen von Messwerten

Die Messunsicherheit ist von großer Bedeutung für die Anwendung von Messungen in allen Bereichen der Technik. Das Beispiel von Bild 5.4 illustriert, dass die Beurteilung der Aussagefähigkeit von Messungen in Bezug auf einen vorgegebenen *Grenzwert* (z.B. zulässiger Festigkeitsgrenzwert eines Bauteils, zulässiger Schadstoff-Emissionsgrenzwert, etc.) nur bei Kenntnis der Messunsicherheiten möglich ist.

Beispiel: Für die in Bild 5.4 wiedergegebenen Messergebnisse ist zu entscheiden, welche Messwerte einen zulässigen Grenzwert über- oder unterschreiten

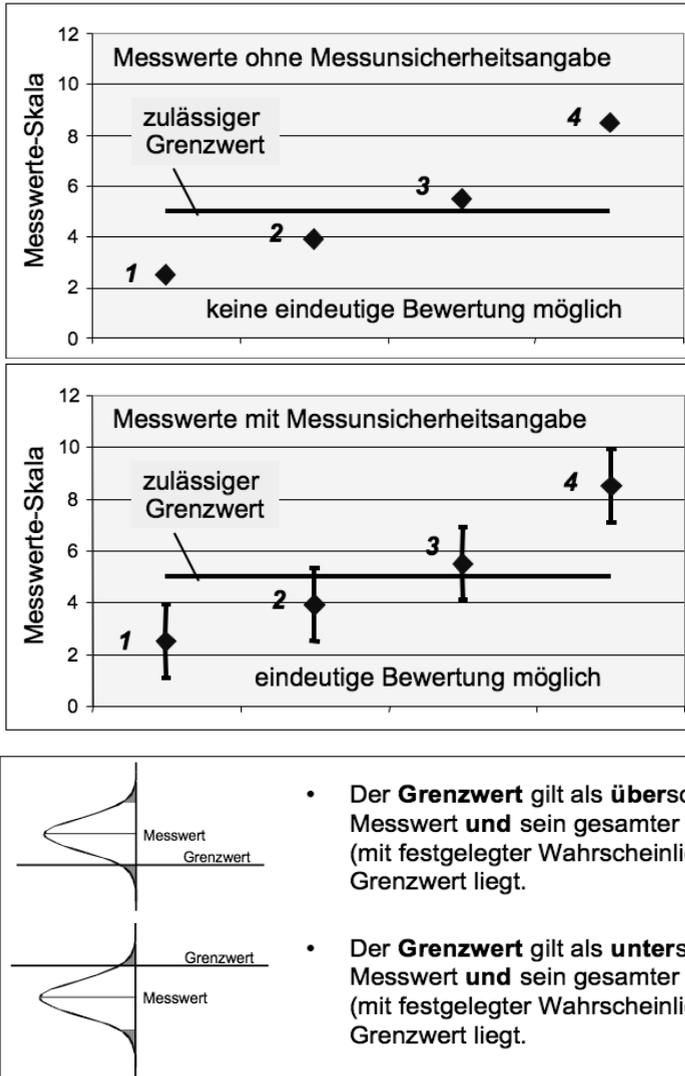


Bild 5.4 Die Bedeutung von Messunsicherheiten für Grenzwert-Beurteilungen

5.1.5 Präzision und Richtigkeit von Messungen; Messstrategie

Zur zusammenfassenden Beurteilung, ob die Messungen einer Messreihe *präzise* und *richtig* sind, dient das anschauliche *Schießscheibenmodell* von Bild 5.5:

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

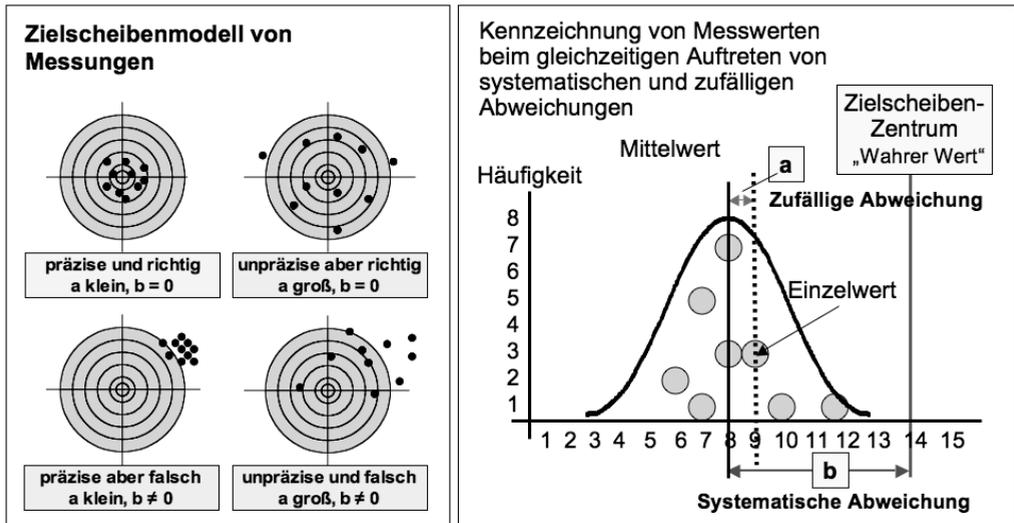


Bild 5.5 Kennzeichnung der Messgenauigkeit an Hand eines „Zielscheibenmodells“

Als **Messstrategie** wird die methodische Vorgehensweise bei der Planung, Durchführung und Auswertung von Messungen bezeichnet, sie umfasst folgende Hauptschritte:

- I. Analyse und Definition der aufgabenbezogenen richtig spezifizierten Messgröße
- II. Festlegung von Messprinzip, Messverfahren und (kalibrierten) Messgeräten
- III. Strukturierung und Realisierung der Messkette (siehe Abschnitt 5.3)
- IV. Durchführung der Messung, Festlegung der Arbeitsschritte in einer Check-Liste
- V. Datenerfassung, Messunsicherheitsermittlung, Dokumentation

Messergebnisse sind nach DIN EN ISO 17025 stets in folgender Form anzugeben:

Messergebnis = Messwert + Messunsicherheit

5.1.6 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 von Messgeräten, zur Beurteilung von Messverfahren oder zur 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,
 - 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 Akzeptanz 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.

5.2 Sensortechnisch-physikalische Grundlagen

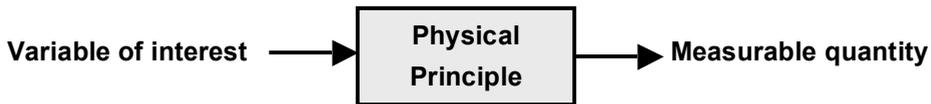
Sensoren nutzen vielfältige Wandlereffekte zur Umwandlung interessierender Funktions- und Prozessvariablen mechatronischer Systeme (Sensor-Eingangsgroßen) in messbare Größen (Sensor-Ausgangsgroßen). Wandlereffekte für die elementaren Kategorien physikalischer Größen sind in der Tabelle 5.2 zusammengestellt. Von besonderer Bedeutung sind Wandlerprinzipien nichtelektrischer in elektrische Größen.

Tabelle 5.2 Physikalische Wandlerprinzipien für Sensoren

Eingangsgroße	Ausgangsgroße			magnetisch	optisch
	mechanisch	thermisch	elektrisch		
mechanisch	Hebel, Pendel, Schiefe Ebene, Elastische Deformation, Fluidik	Wärmepumpe, Kältepumpe, Reibung	Geometrieabhängigkeit von R, L, C, Induktion, Piezoeffekte	Magneto-elastische Effekte, Magneto-hydrodynamik	Interferometrie, Spannungsoptik, Tribolumineszenz
thermisch	Thermoelastizität, Dampfdruck, Explosionsdruck	Thermische Kreisprozesse	Temperaturabhängigkeit von R, L, C, Thermo-Elektrizität, Pyroelektrizität	Thermomagnetische Effekte	Wärmestrahlung, Thermolumineszenz
elektrisch	Induktion, Lorentz-Kraft, Piezoeffekte, Elektrostriktion	Joulesche Wärme, Peltier-Effekt, Thomsonseneffekt	Transformator, Transistor, Influenz	Elektromagnetismus, Magnetoel. Effekte	Elektro-opt. Kerr-Effekt, Elektrolumineszenz
magnetisch	Magneto-mechanische Effekte	Magneto-kalorische Effekte	Magneto-elektrische Effekte, Hall-Effekt	Magn. Suszeptibilität, magn. Hysterese	Magneto-optische Effekte
optisch	Strahlungsdruck	Absorption	Photoeffekt, Optoelektronik	Magneto-opt. Speicher	Interferenz, Bildwandler, LASER

5.2.1 Physikalische Sensoreffekte

Die in Tabelle 5.2 kategorisierten Wandlerprinzipien der Sensorik basieren auf physikalischen Effekten, die in der englischsprachigen Literatur als *Physical Principles for Sensors* häufig nach ihrem Entdecker benannt werden. Die folgende Zusammenstellung gibt dazu eine alphabetische Übersicht in den originalen Definitionen (Quelle: *MECHATRONICS, Alciatore and Histan, McGraw-Hill, Boston, 2003*). Die sensor-technisch relevanten *Variables of interest* und *Measurable quantities* sind durch Fettdruck hervorgehoben und können so den Eingangs/Ausgangs-Kategorien von Tabelle 5.2 zugeordnet werden; technische Anwendungen sind durch Pfeile gekennzeichnet.



- *Ampere's law*: A **current**-carrying conductor in a **magnetic field** experiences a **force**. → Based on this law, a galvanometer measures current by measuring the deflection of a pivoted coil in a permanent magnetic field.
- *Archimedes' principle*: The buoyant **force** exerted on a submerged or floating object is equal to the weight of the fluid displaced. The **volume** displaced depends on the fluid **density**. → A ball submersion hydrometer uses this effect to measure the density of a fluid (e.g., automotive coolant).
- *Bernoulli's equation*: Conservation of energy in a fluid predicts a relationship between **pressure and velocity** of the fluid. → A Pitot tube uses this effect to measure air speed of an aircraft.
- *Biot-Savart law*: A conductor carrying a **current** is surrounded by a **magnetic field**. → A magnetic pickup sensor uses this effect as a non intrusive method of measuring current in a conductor.
- *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.
- *Bragg's law*: The intensity of an X-ray beam diffracted by a **crystal lattice** is related to the crystal plane separation and the **wavelength** of the beam. → An X-ray diffraction system uses this effect to measure the crystal lattice geometry of a crystalline specimen, the law is also used in fibre-optical sensors.
- *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.
- *Edison effect*: When metal is heated in a vacuum, it emits charged particles (i.e. **thermionic emission**) at a rate dependent on **temperature**. → A vacuum tube amplifier is based on this effect, where electrons are emitted and controlled to produce amplification of current.

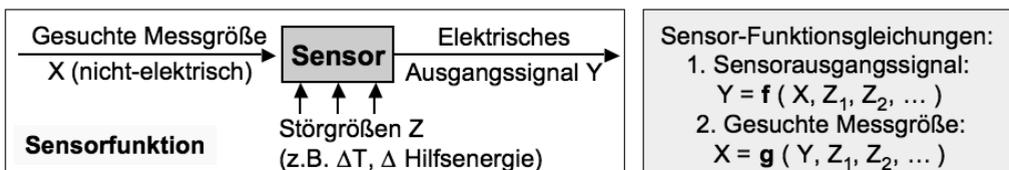
- *Faraday's law of induction:* A coil resists a change in **magnetic field** linkage with an **electromotive force**. → The induced voltages in the secondary coils of a linear variable differential transformer are a result of this effect.
- *Gauss effect:* The **resistance** of a conductor increases when **magnetized**. → This effect is used to determine lateral or rotational motions of moving components in machines or in automobiles.
- *Gyroscopic effect:* A **body rotating** about one axis **resists rotation about other axes**. → A navigation gyroscope uses this effect to track the orientation of a body with the aid of a gimbal-mounted flywheel that maintains constant orientation in space.
- *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.
- *Joule's law:* **Heat** is produced **by current** flowing through a **resistor**. → The design of a hot-wire anemometer is based on this principle.
- *Kerr effect:* Applying a **voltage** across a substance can cause **optical polarization**. → Liquid crystal displays function as a result of this principle.
- *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.
- *Nernst effect:* **Heat flow** across **magnetic field** lines produces a **voltage**. → This effect is used in air pollution sensors.
- *Newton's law:* **Acceleration** of an object is proportional to **force** acting on the object. → This law is essential for acceleration sensors.
- *Ohm's law:* **Current** through a **resistor** is proportional to the voltage drop across the resistor. → This law is used in sensors in which a measurand influences electrical resistance.
- *Peltier effect:* When **current** flows through the junction between two metals, **heat** is absorbed or liberated at the junction. → Thermocouple measurements can be adversely affected by this principle.
- *Photoconductive effect:* When **light** strikes certain semiconductor materials, the **resistance** of the material decreases. → A photodiode, which is used extensively in photodetector pairs, function based on this effect.
- *Photoelectric effect:* When **light** strikes a metal cathode, electrons are emitted and attracted to an anode, resulting in **current** flow. → The operation of a photomultiplier tube is based on this effect.
- *Photovoltaic effect:* When **light** strikes a semiconductor in contact with a metal base, a **voltage** is produced. → The operation of a solar cell is based on this effect.
- *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 the inertia of a mass. → A piezoelectric

microphone's ability to convert sound pressure waves to a voltage signal is a result of this principle.

- *Piezoresistive effect*: **Resistance** is proportional to an applied **stress**. → This effect is partially responsible for the response of a strain gage.
- *Poisson effect*: A **material deforms** in a direction **perpendicular** to an applied **stress**. → This effect is partially responsible for the response of a strain gage.
- *Raoult's effect*: **Resistance** of a conductor changes when its **length** is changed. → This effect is partially responsible for the response of a strain gage.
- *Seebeck effect*: Dissimilar metals in contact result in a **voltage** difference across the junction that depends on **temperature**. → Principle of a thermocouple.
- *Shape memory effect*: A **deformed metal**, when **heated**, returns to its **original shape**. → This effect is used in temperature-dependent actuators.
- *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.
- *Stefan-Boltzmann law*: The **heat** radiated from a black body is proportional to the fourth power of its **temperature**. → Principle for the design of a pyrometer.

5.2.2 Funktion und Kennzeichen technischer Sensoren

Sensoren basieren auf den im vorigen Abschnitt exemplarisch beschriebenen physikalischen *Wandlerprinzipien*. Die in der Mechatronik verwendeten Sensoren haben die Aufgabe, nichtelektrische Funktions- und Prozessvariable in elektrische Größen zu überführen; ihre Kennzeichen sind in den Bildern 5.6 und 5.7 zusammengefasst.



Korrekturmodule für die Sensorik: Treten bei der Sensorik Störgrößen auf, so können Korrekturmodule eingesetzt werden. Hierzu werden korrekte Modellparameter (Sollgrößen) in einem PROM gespeichert. Unter Verwendung eines Mikrorechners (μC) lassen sich durch Soll/Ist-Vergleiche und Korrekturen „fehlerfreie“ Messsignale gewinnen.

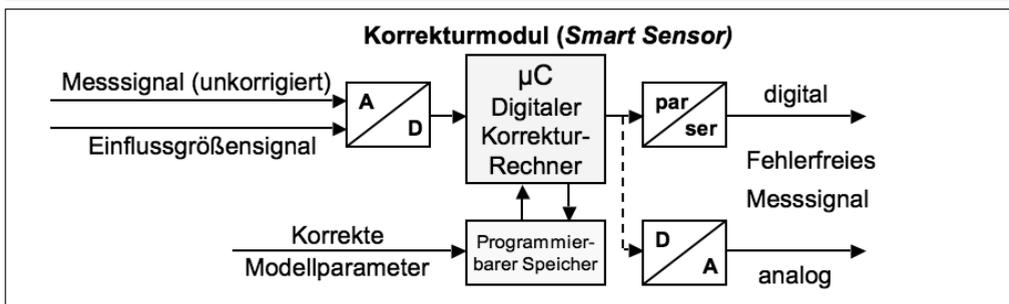


Bild 5.6 Die Funktion von Sensoren

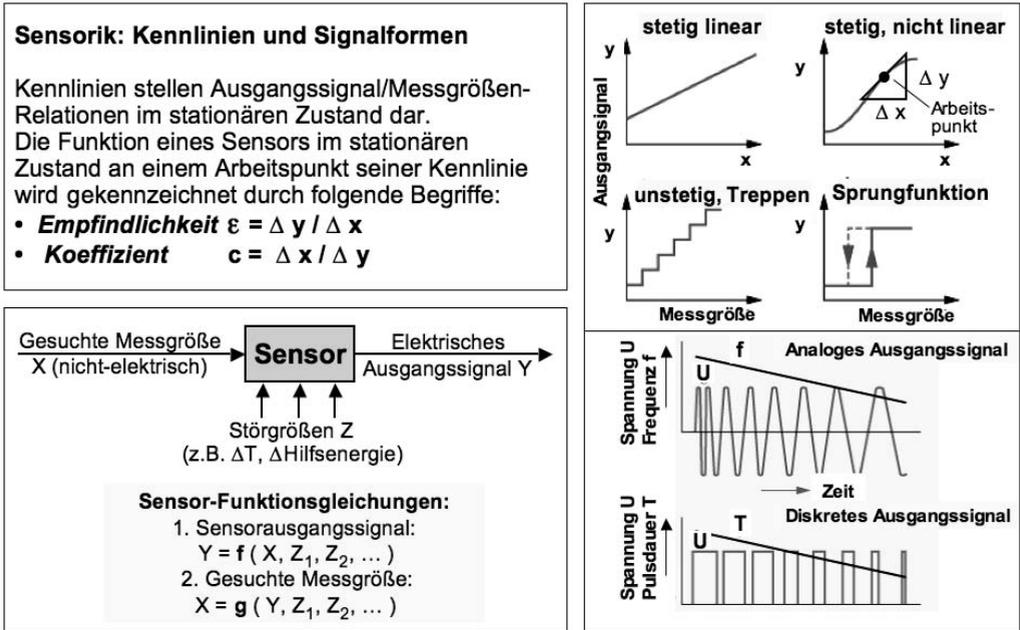


Bild 5.7 Elementare Sensor-Signalfunktionen

5.3 Messkette

Unter dem Begriff Messkette versteht man die Blockschaltbild-Darstellung der für eine sensorteknische Aufgabe erforderlichen Elemente. Bild 5.8 zeigt den Aufbau.

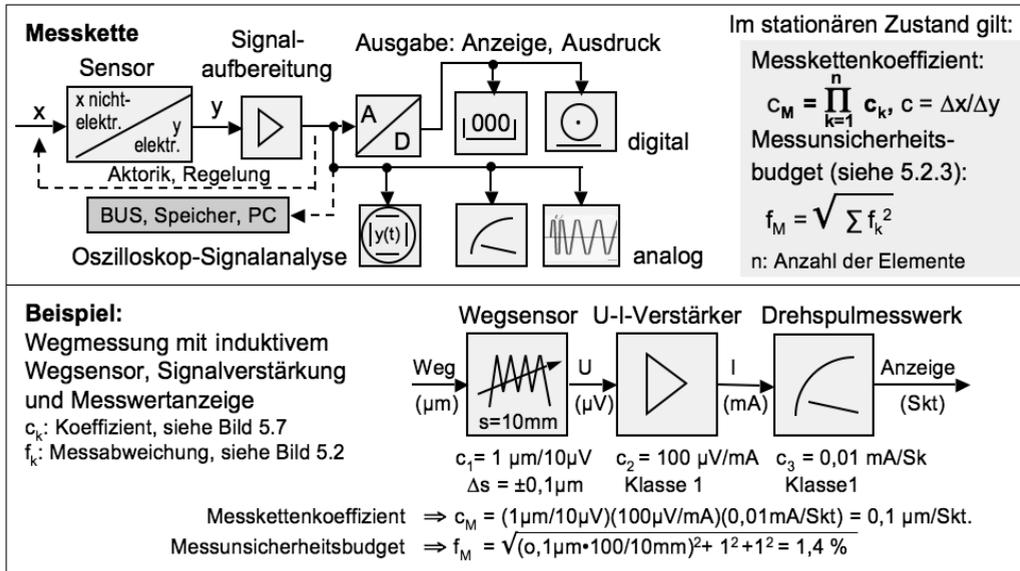


Bild 5.8 Messkette: Aufbau und Funktion

Für ihre Wandlertaufgaben in Messketten müssen Sensoren geeignete Eigenschaften haben. Klassifikationsmerkmale für Sensoreigenschaften sind:

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

Von besonderer Bedeutung für Sensoren ist das Signalübertragungsverhalten, vgl. Kapitel 2.2, Bild 2.7. Die Sensorsignalausgabe wird in Kapitel 5.10 behandelt.

5.4 Sensorik geometrischer Größen

Die Sensorik geometrischer Größen der Strukturkomponenten mechatronischer Systeme bezieht sich sowohl auf die Kennzeichnung der Geometrie der Bauteile (→ Längenmesstechnik) als auch auf die Erfassung von Veränderungen durch mechanische oder thermische Beanspruchungen (→ Dehnungsmesstechnik).

5.4.1 Längenmesstechnik, Form- und Maßsensorik

Längenmesstechnik ist die traditionelle Bezeichnung für die Methoden der Bestimmung der geometrischen Kennzeichen technischer Bauteile gemäß Bild 5.9.

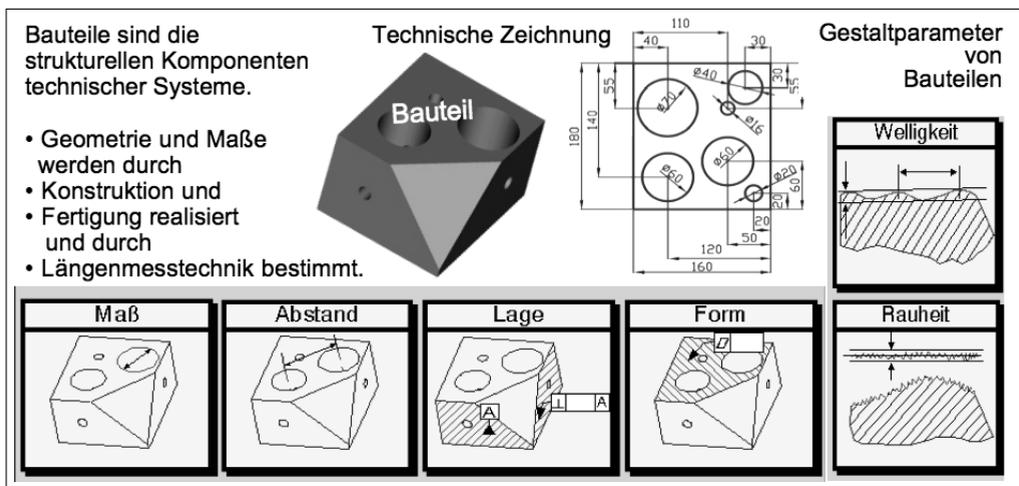


Bild 5.9 Geometrische Bauteilkenngrößen, die durch Längenmesstechnik zu bestimmen sind

Klassische Längenmessgeräte zur Bestimmung der Gestaltparameter *Maß*, *Abstand*, *Länge* sind Messschieber, Messschrauben und Messuhren; die Ermittlung von *Form*, *Welligkeit*, *Rauheit* erfolgt traditionell mit Oberflächen- und Konturmessgeräten (Tastschnittgeräte, Lichtschnittmikroskope), siehe Bild 5.10.

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 Δ proportional zum Winkel α einer möglichen Parallaxe, siehe Bild 5.10, links unten – zu vermeiden.

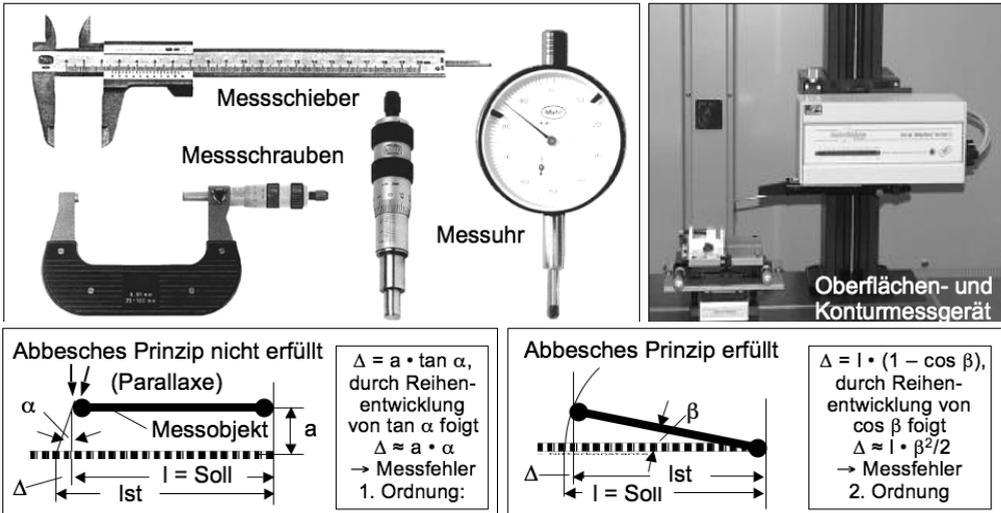


Bild 5.10 Messgeräte der Längenmesstechnik und das Abbesche Komparatorprinzip

In der Mechatronik wird Längenmesstechnik an stationären Bauteilen oder bewegten Komponenten dynamischer Systeme mit *taktile (berührender) Sensorik*, siehe Bild 5.11, oder *berührungsloser Sensorik*, siehe Bild 5.12, durchgeführt.

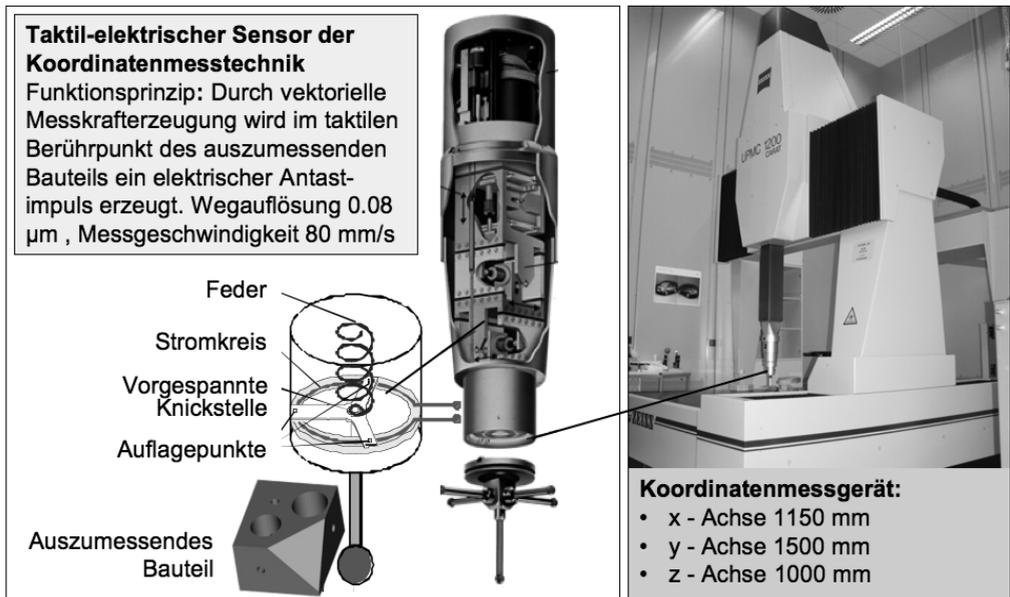


Bild 5.11 Sensorik in der Koordinatenmesstechnik

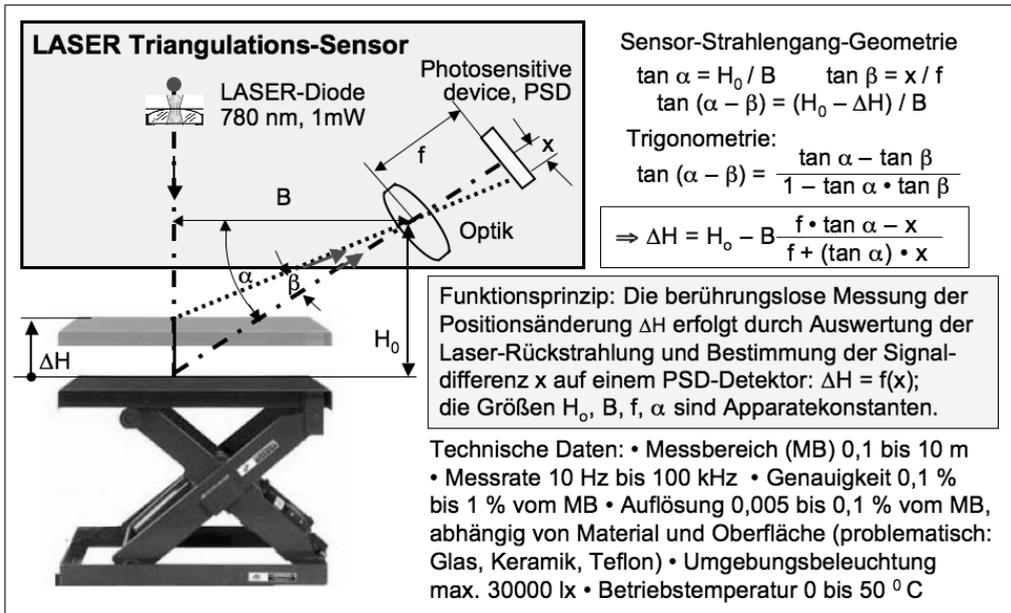


Bild 5.12 LASER-Triangulation: Sensorik zur berührungslosen Positionsbestimmung

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP): Zu den berührungslosen Sensortechniken zur Bestimmung geometrischer Kenngrößen von Bauteilen gehört auch die ZfP; sie nutzt Ultraschall oder elektromagnetische Strahlung verschiedener Frequenz als Detektor. Die folgende Übersicht erläutert die Prinzipien, Anwendungen gibt Kapitel 14.

Ultraschall (US)-Sensorik: Durch Luft/Körperschall-Analysen (Frequenzanalysen, Fourieranalysen) können mit geeigneten Messaufnehmern (Sensoren mit inversem piezoelektrischen Effekt, vgl. Kapitel 6.2) in Verbindung mit computerunterstützter Signalverarbeitung laufende Maschinenanlagen, wie Motoren oder Turbinen, überwacht und Hinweise auf eventuelle Betriebsstörungen gewonnen werden (*machinery condition monitoring*). Durch elektronisch gesteuerte Schallfelder mit Signal- und Bildverarbeitung können mittels *US-Echotomographie* aufschlussreiche Schnittbilder erzeugt werden: von einem Prüfkopf werden US-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 mm bis 10 m; Ableseunsicherheit < 0,1 mm; Prüfobjekttemperatur: < 80°C, mit Spezialprüfköpfen bis 600°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 ($f \approx 10$ kHz bis 5 MHz, für Sonderfälle auch tiefer, z. B. 40 Hz bis 5 kHz).

Inhomogenitäten in Bauteiloberflächen oder Gefügebereiche mit veränderter Leitfähigkeit (z. B. Anrisse, Härtingsfehler, Korngrenzenausscheidungen) verändern die Verteilung der Wirbelströme in der Oberflächenschicht und beeinflussen dadurch das Feld und die Impedanz einer von außen einwirkenden HF-Spule.

Radiographische Verfahren: Sie basieren auf der Durchstrahlung von Prüfobjekten mit kurzwelliger 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).

Computertographie: Die Durchstrahlung von Bauteilen ermöglicht mit dieser Methode die Längenmessungen auch an mechanisch unzugänglichen Stellen, siehe Bild 5.13.

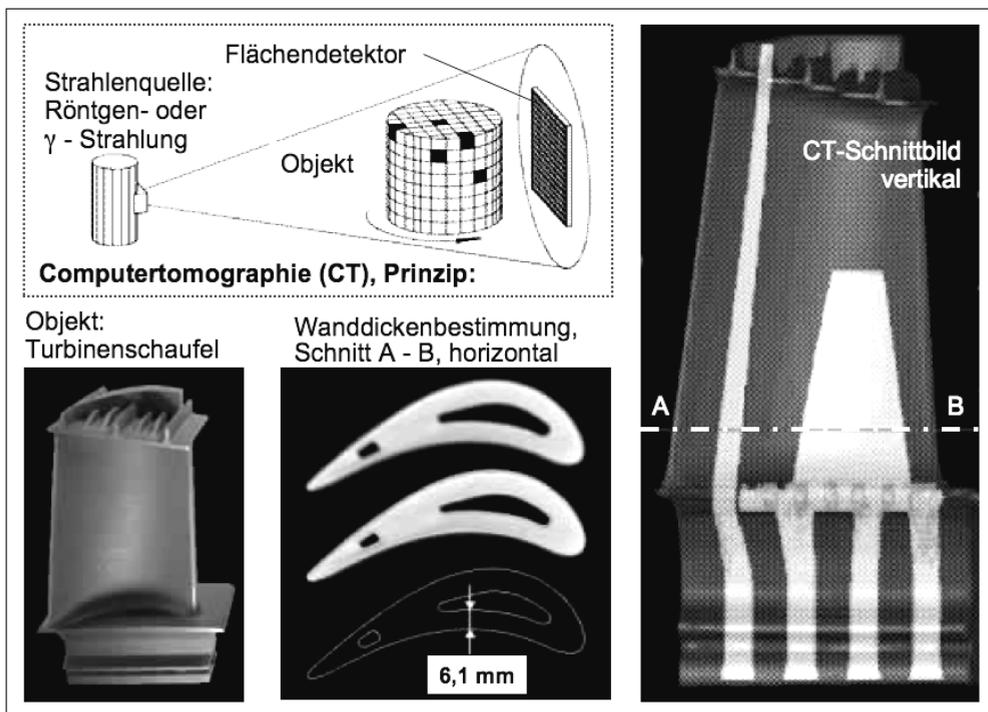
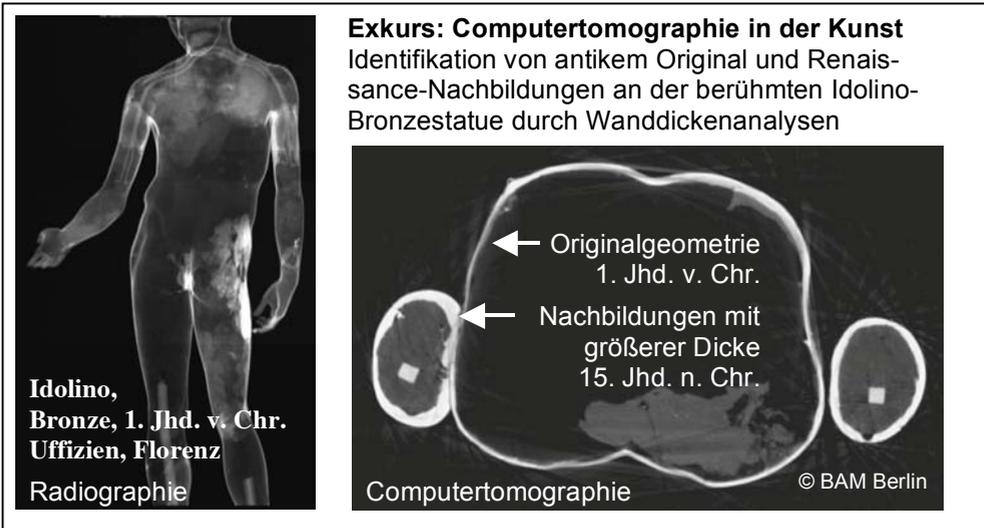
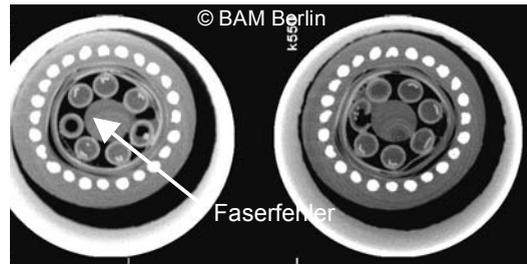


Bild 5.13 Computertomographie: Anwendung zur Vermessung einer Turbinenschaufel

Bei der Computertomographie 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) durchstrahlt. 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 ausgegeben. Die CT wird in vielen Bereichen der Technik angewendet, z. B. im Turbinenbau, Bild 5.13, oder in der Qualitätssicherung bei

Kommunikationstechnologien. Die CT-Sensorik kann für Bauteile und für geschlossene Systeme bei Ortsauflösungen bis zu $1\mu\text{m}$ (Mikro-CT) eingesetzt werden. Die nebenstehenden CT-Diagramme zeigen die Fehleridentifikation in Glasfaserkabeln (Faser $\varnothing 125\ \mu\text{m}$).



Exkurs: Computertomographie in der Kunst
Identifikation von antikem Original und Renaissance-Nachbildungen an der berühmten Idolino-Bronzestatuette durch Wanddickenanalysen

**Idolino,
Bronze, 1. Jhd. v. Chr.
Uffizien, Florenz
Radiographie**

← Originalgeometrie
1. Jhd. v. Chr.
← Nachbildungen mit
größerer Dicke
15. Jhd. n. Chr.

Computertomographie

© BAM Berlin

5.4.2 Faseroptische Sensorik

Faseroptische Sensoren basieren auf der Beeinflussung lichtleitergeführter optischer Strahlung (Totalreflexion) durch eine mechanische Beanspruchung (Zug, Druck). Die Beanspruchung bewirkt eine Dehnung ϵ des Lichtleiters und verändert in messbarer Weise (a) die Intensität Φ , (b) die Phase Δ , (c) die Wellenlänge λ oder (d) die Flugdauer t der optischen Inputsignale. Aus der Veränderung der optischen Parameter im Outputsignal kann (unter der Voraussetzung einer mechanisch-optischen Kalibrierung) auf die mechanische Beanspruchung geschlossen werden, siehe Bild 5.14.

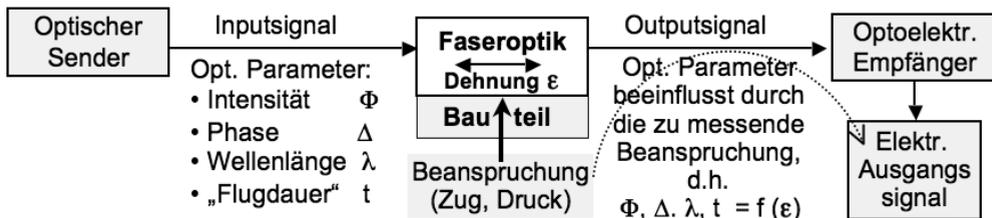


Bild 5.14: Funktionsprinzip faseroptischer Sensoren

Zur Untersuchung beanspruchter Bauteile werden die Sensoren mit ihnen verbunden oder in sie eingebettet (*embedded sensors*); es muss gelten:

- Bauteilbeanspruchung = Sensorbeanspruchung, siehe dazu Kapitel 5.8.

Die faseroptischen Sensoren können je nach beeinflussbarem Parameter der lichtleitergeführten optischen Strahlung wie folgt eingeteilt werden:

Durch die zu bestimmende Beanspruchung beeinflusster optischer Parameter:

Sensortyp

- Intensität der Strahlung ⇒ **Intensimetrischer Sensor**
- Phase der Strahlung ⇒ **Interferometrischer Sensor (Fabry-Perot)**
- Wellenlänge ⇒ **Spektrometrischer Sensor (Bragg)**
- Flugdauer eines Laser-Pulses ⇒ **Time domain Sensor (OTDR-Sensor)**

Die Funktionsprinzipien, Eigenschaften und technische Daten dieser Sensortypen sind in Bild 5.15 und 5.16 zusammenfassend dargestellt.

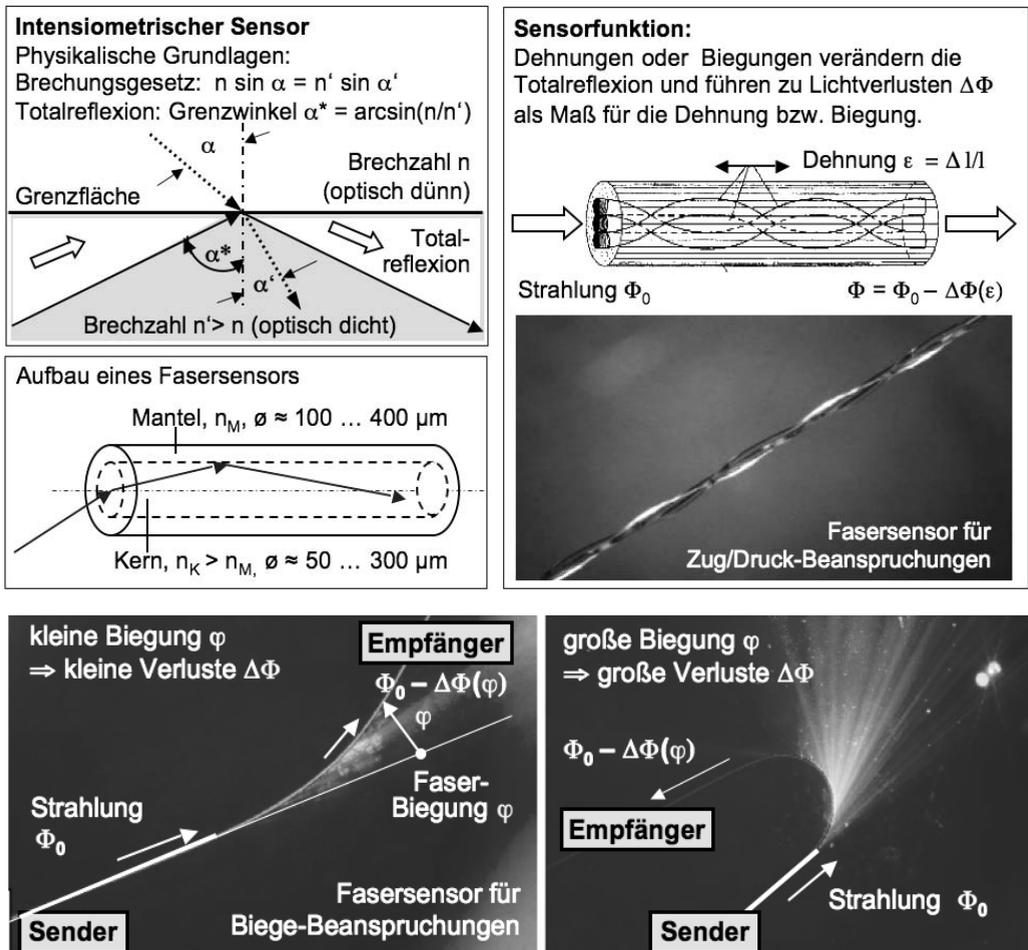
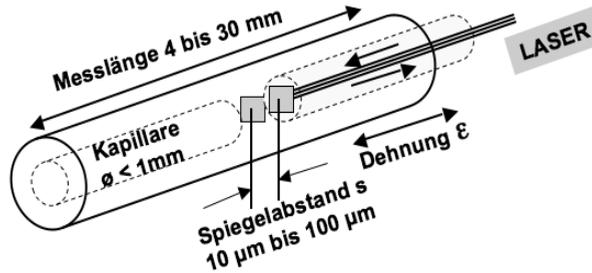


Bild 5.15 Faseroptischer Sensor (Intensimeter): Funktionsprinzip (oben links) und Anwendungsbeispiele: Zug/Druck-Sensorik (oben rechts), Biegesensorik (unten)

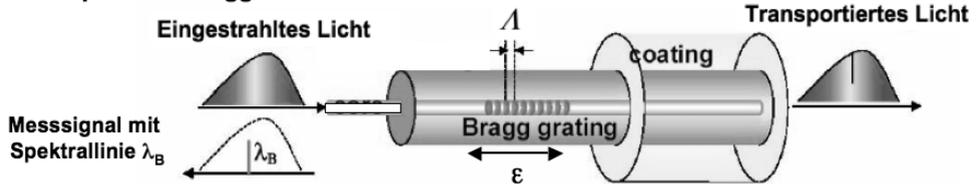
Fabry-Perot-Sensor



Funktionsprinzip:

- Ein Laserstrahl wird partiell am ersten Spiegel und partiell am zweiten Spiegel reflektiert
- Durch Interferenz beider Teilstrahlen ergibt sich das Mess-Ausgangssignal $\Phi = f(s)$
- Ein Dehnung ϵ des Sensors verändert den Spiegelabstand $\Delta s = \epsilon$
- Es resultiert ein dehnungsabhängiges Messsignal $\Phi = f(\Delta s) = f(\epsilon)$

Faseroptischer Bragg-Gitter-Sensor



Funktionsprinzip:

- In ein Faserstück (20 bis 40 mm Länge) sind Bereiche unterschiedlicher Brechzahl (sog. Gitter) "eingeschrieben"
- Der Abstand der Gitter Λ definiert eine Reflexionsbedingung für eine Spektrallinie λ_B im Antwort-Messsignal
- Bei Verformung des Gitters $\Delta \Lambda$ (mechanisch oder thermisch) verschiebt sich die Spektrallinie.
- Diese Verschiebung $\Delta \lambda_B$ wird mit Spektrometern gemessen und daraus die Dehnung $\epsilon \sim \Delta \Lambda \sim \Delta \lambda_B$ des Faserabschnitts berechnet

"Time of flight"- Dehnungssensor

OTDR: Optical time domain reflection

Funktionsprinzip:

- Messung der Hin- und Rück-Laufzeit eines Laserpulses
- Berechnung der Entfernung zwischen den Reflektoren
- Bestimmung der Dehnungsänderungen Δ zwischen Messintervallen

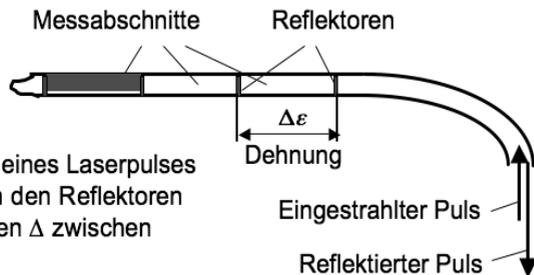


Bild 5.16 Faseroptische Sensoren, Übersicht über die Funktionsprinzipien

Eigenschaften und technische Daten von optischen Fasersensoren:

Die für die Anwendung faseroptischer Sensoren wichtigsten Eigenschaften sind:

- geringe Abmessungen der Sensorelemente (Durchmesser < 0,5 mm), Verwendung als *Embedded Sensors* für die strukturintegrierte Sensorik möglich, vgl. 5.8
- keine elektrischen bzw. elektronischen Komponenten am Messort, chemisch inert, energie- bzw. verlustarm, temperaturstabil, daher einsetzbar
 - in elektromagnetischen Feldern
 - in Hochspannungs- und Kernstrahlungsbereichen
 - im Umfeld explosiver und aggressiver Medien
 - bei hohen Temperaturen (> 1000 °C)
- hohe statische und dynamische Auflösung bei Dehnungsmessungen (in einigen Fällen < 0,1 $\mu\text{m}/\text{m}$, d. h. besser als 10^{-4}‰) und bis zu einigen MHz
- Sensorfaser kann in mehrere Messabschnitte eingeteilt werden, dadurch (on-line)-Abfrage der Messgröße nach Ort und Größe
- Gestaltung räumlich verteilter Fasersensor-Netzwerke
- Kompatibilität zu elektronischen Bild- und Datenverarbeitungssystemen.

5.4.3 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 Bauteil deformierungen in elektrische Signale um. Die Bilder 5.17 und 5.18 erläutern Funktionsprinzip und Ausführungsarten.

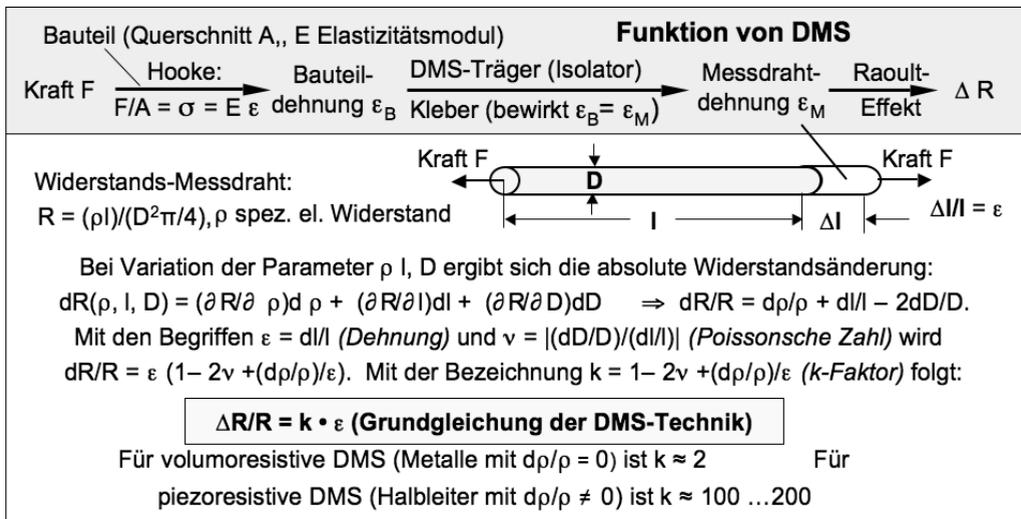


Bild 5.17 Funktion von DMS und die Grundgleichung der DMS-Technik

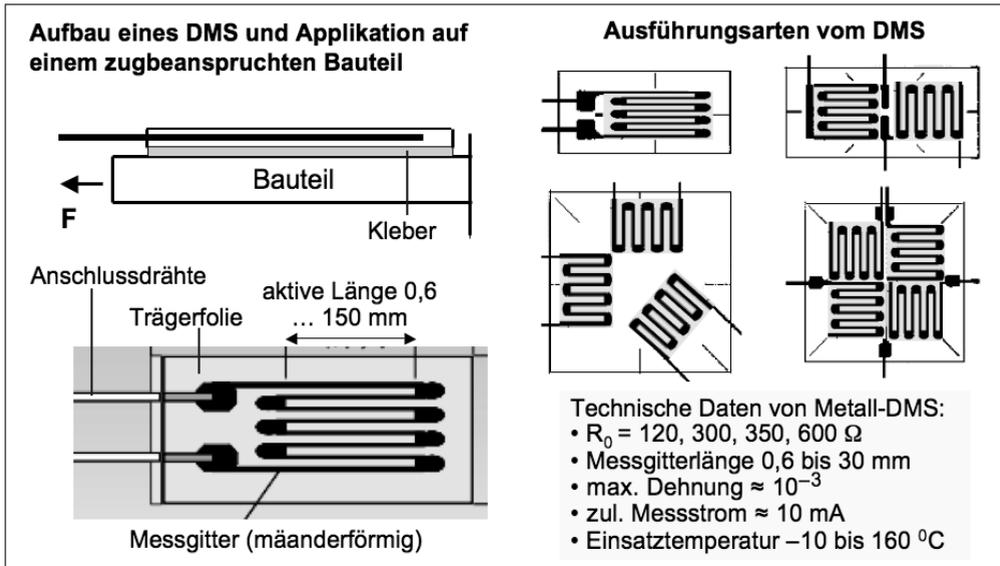


Bild 5.18 DMS-Leiterbahnen sind mäanderförmig gestaltet, um große elektrische Widerstandslängen zu erzielen. DMS-Rosetten (rechts) dienen zur flächenhaften Beanspruchungsanalyse

Als Messschaltungen für DMS werden Wheatstone-Brücken in Form von Viertel-, Halb- und Vollbrücken (1, 2 oder 4 aktive DMS) eingesetzt, siehe Bild 5.19.

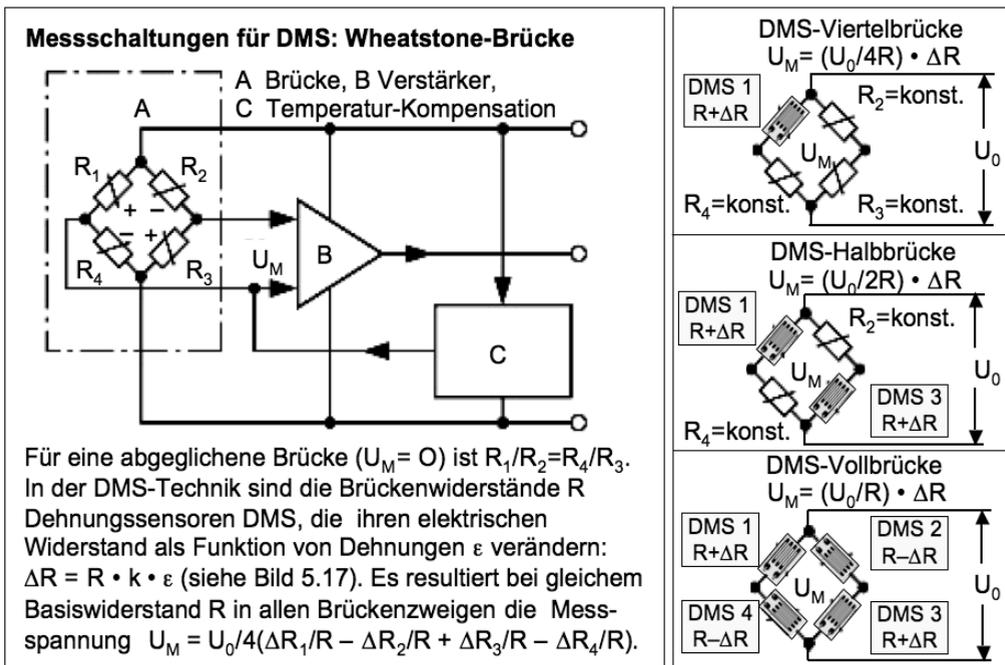


Bild 5.19 Blockschaltbild für DMS-Messschaltungen mit Brückenweispolaritäten

Die in Bild 5.19 dargestellte Eigenschaft einer Wheatstone-Brücke, dass sich gleichsinnige ΔR in nicht benachbarten Brückenzeigen 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. Durch einflussgrößenbedingte Dehnungen, z.B. $\varepsilon = f(\Delta T)$ können den Messwiderständen ΔR -Störsignale überlagert sein; sie können durch vorzeichengerechtes Einbringen von „Störgrößen-Kompensations-Widerständen“ mit $\Delta R = -\Delta R$ (Störung) in einzelne Brückenzeige zur Kompensation von Störgrößen genutzt werden.

Die Applikation von DMS zur Bestimmung der grundlegenden einaxialen mechanischen Beanspruchungen von Bauteilen – Zug, Druck, Biegung, Torsion – ist übersichtsmäßig in Bild 5.20 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 $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ – oder $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ – Anordnung verwendet, vgl. Bild 5.18.

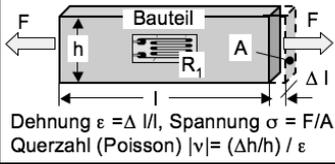
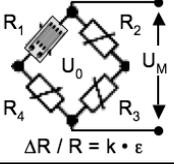
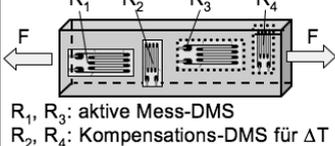
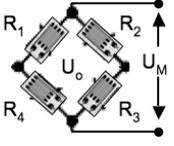
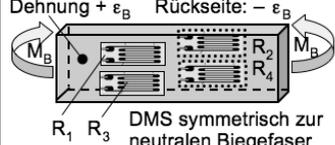
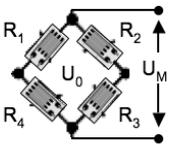
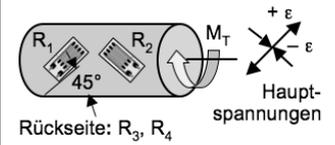
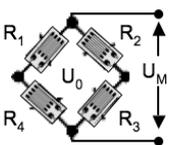
	Applikation der DMS	Messschaltung	Messgleichung
Zug, Druck Kraft F	 <p>Dehnung $\varepsilon = \Delta l / l$, Spannung $\sigma = F / A$ Querszahl (Poisson) $\nu = (\Delta h / h) / \varepsilon$</p>	 <p>$\Delta R / R = k \cdot \varepsilon$</p>	$U_M = (U_0 / 4R) \cdot \Delta R_1$ Bei elastischer Deformation gilt $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (Hooke) mit $\varepsilon < 10^{-3}$, E : Elastizitätsmodul. Es folgt $U_M = [(U_0 k) / (4AE)] \cdot F$ $\Rightarrow F = [(4AE) / (U_0 k)] \cdot U_M$
Zug, Druck Kraft F	 <p>R_1, R_3: aktive Mess-DMS R_2, R_4: Kompensations-DMS für ΔT</p>		$U_M = (U_0 / 4R) \cdot (\Delta R_1 + \Delta R_3) + \nu [(U_0 / 4R) \cdot (\Delta R_2 + \Delta R_4)]$ $\Rightarrow U_M = [(U_0 k) / (2AE)] (1 + \nu) \cdot F$ Kompensierte Einflussgrößen: $\varepsilon (\Delta T)$, ε (Biegung), ε (Torsion), Begründung: siehe Text
Biegung Biegemoment M_B	 <p>Dehnung $+\varepsilon_B$ Rückseite: $-\varepsilon_B$ DMS symmetrisch zur neutralen Biegefaser</p>		$U_M = U_0 / 4R (\Delta R_1 + \Delta R_3 - U_0 / 4 (\Delta R_2 + \Delta R_4))$ Da $+\varepsilon_B$ für R_1, R_3 ; $-\varepsilon_B$ für R_2, R_4 $\Rightarrow U_M = U_0 \cdot k \cdot \varepsilon (M_B)$ Kompensierte Einflussgrößen: $\varepsilon (\Delta T)$, ε (Zug/Druck), ε (Torsion)
Torsion Torsionsmoment M_T	 <p>45° Rückseite: R_3, R_4 Hauptspannungen</p>		$U_M = U_0 / 4 (\Delta R_1 / R - \Delta R_2 / R + \Delta R_3 / R - \Delta R_4 / R)$. 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: $\varepsilon (\Delta T)$, ε (Zug/Druck), ε (Biegung)

Bild 5.20 Dehnungsmessstreifentechnik: Applikation zur Bestimmung der statischen oder dynamischen mechanischen Grundbeanspruchungen Zug, Druck, Biegung, Torsion

Dehnungsmessstreifen können in der Mechatronik überall dort eingesetzt werden, wo mechanisch-funktionelle Beanspruchungen zu erfassen und sensortechnisch in elektrische Größen umzusetzen sind. Die DMS-Technik ist das wichtigste Prinzip zur Realisierung von Kraftsensoren aller Art unter Verwendung geeigneter Elastizitätskörper (siehe 5.6.1); bedeutende Anwendungsbereiche sind auch die mechatronische Wägetechnik (Kap. 10.2) und die Bauwerksüberwachung (Kap. 14.1).

5.5 Sensorik kinematischer Größen

Für die Funktion zahlreicher technischer Systeme sind Bewegungsvorgänge ihrer Bauteile erforderlich. Alle mechanischen Bewegungsvorgänge basieren auf den Grundformen der Translation und Rotation und werden durch die kinematischen Größen *Weg oder Winkel*, *Geschwindigkeit*, *Beschleunigung* gekennzeichnet. In der Mechatronik werden kinematische Größen mit geeigneten Sensoren messtechnisch erfasst und in elektrische Größen umgesetzt. Die Sensorik kinematischer Größen ermöglicht damit die Analyse und Funktionsoptimierung technischer Bewegungsvorgänge und liefert Signale zur Ansteuerung von Aktoren (vgl. Kapitel 6) für mechatronische Steuer- und Regelungssysteme. Die Mikrosensorik kinematischer Größen wird in Abschnitt 5.9 behandelt.

5.5.1 Positionssensorik (Wege, Winkel)

Für die Positionsmesstechnik gibt es heute eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren mit elektrischem Signalausgang. Sie sind zur Übersicht in Bild 5.21 nach physikalischen Prinzipien mit unterschiedlichen Symbol-Piktogrammen gegliedert, ihre Funktionsprinzipien und technischen Ausführungsarten werden im Folgenden erläutert.

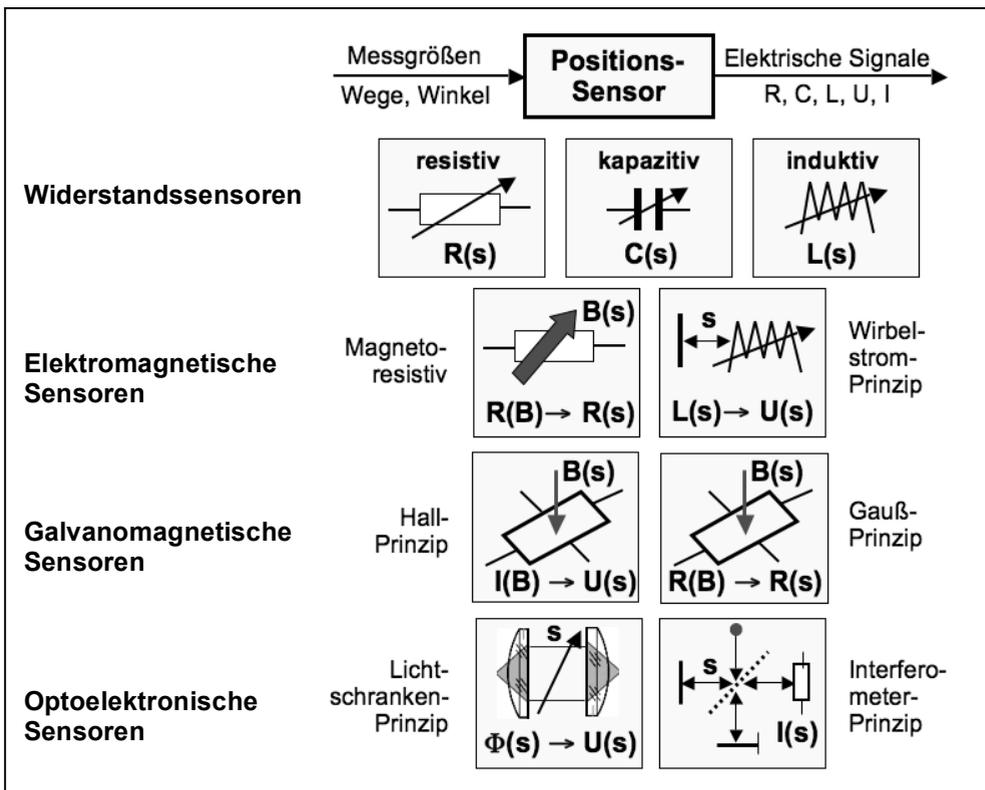


Bild 5.21 Übersicht über Positionssensoren für Wege und Winkel

Widerstandssensoren

Die Funktionen der in Bild 5.21 durch den Begriff *Widerstandssensoren* gekennzeichneten Kategorie von Positionssensoren beruhen auf der „Geometrieabhängigkeit“ von ohmschen, kapazitiven oder induktiven elektrischen Widerständen.

Resistive Positionssensoren nutzen das aus der Elektrotechnik bekannte Potentiometerprinzip zur Bestimmung von Wegen oder Winkeln und stellen bei geeigneter technischer Ausführung einen linearen Zusammenhang zwischen mechanischer Eingangsgröße und elektrischer Ausgangsgröße her, siehe Bild 5.22.

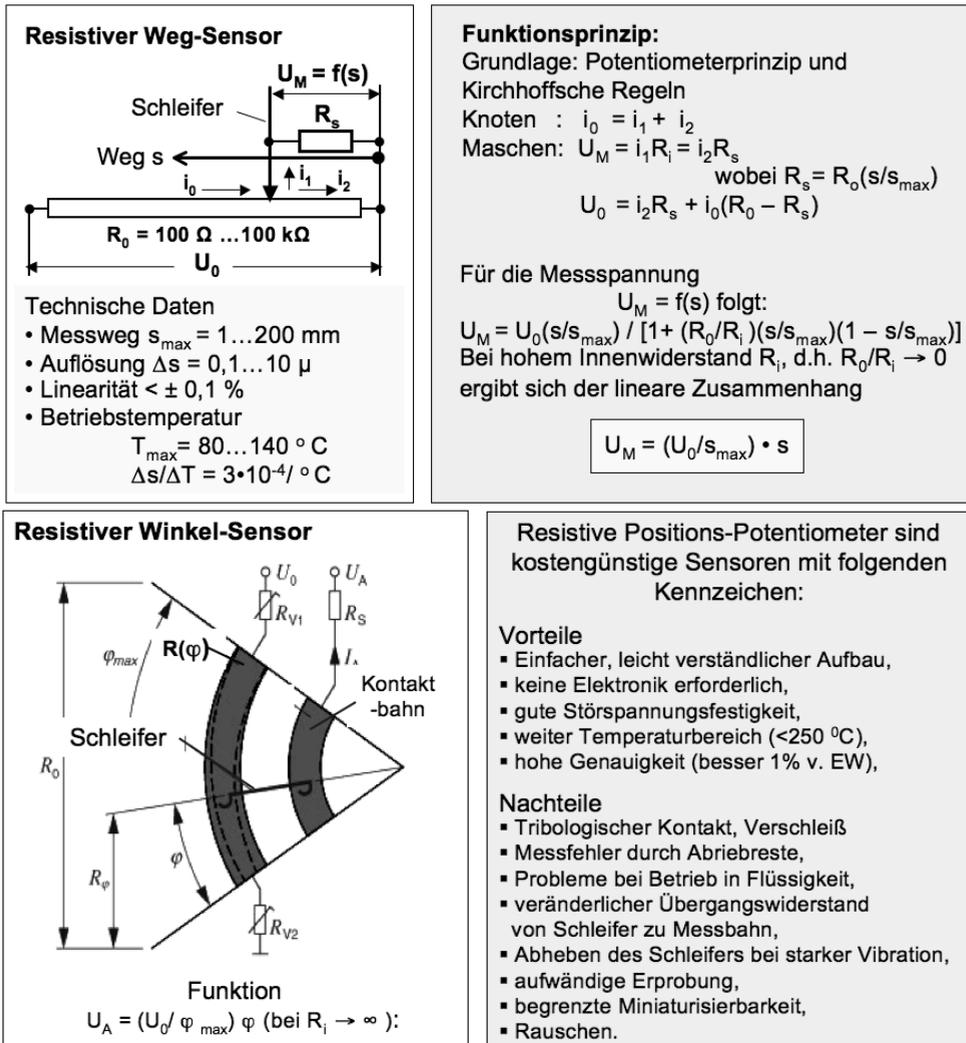


Bild 5.22 Funktionsprinzip und Eigenschaften resistiver Weg- und Winkelsensoren

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

Bei **kapazitiven Positionssensoren** wird durch den Messweg s die elektrische Kapazität C eines Platten- oder eines Zylinderkondensators (Plattenfläche A) gesteuert. Da $C \sim A/s$, ist bei einem Vertikal-Sensor die Kapazität näherungsweise umgekehrt proportional zum Messweg s . Bei einem Horizontal-Sensor besteht näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen Messweg und Kapazität. Die Messspannung ergibt sich gemäß $U_M = Q/C = 1/C \int I \cdot dt$. Das Funktionsprinzip zeigt Bild 5.23. Kapazitive Positionssensoren benötigen wegen der Problematik von Störkapazitäten bei den Anschlussleitungen spezielle Messschaltungen und im Fall von Vertikalsensoren eine elektronische Signalverarbeitung zur Linearisierung ihrer durch das physikalische Prinzip bedingte nichtlinearen Kennlinien.

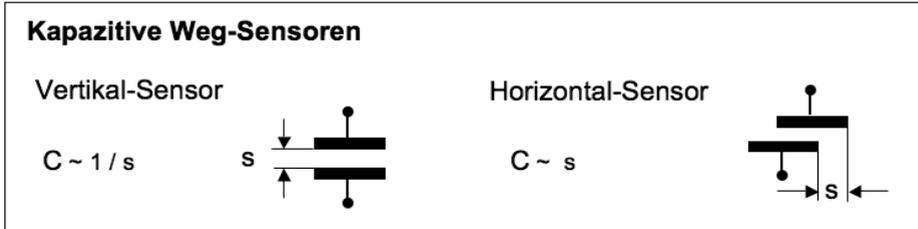


Bild 5.23 Funktionsprinzip kapazitiver Positionssensoren

Induktive Positionssensoren nutzen die weg- oder winkelabhängige Beeinflussung der Induktion von wechselfeldgespeisten Spulensystemen durch Verschiebung von Eisenkernen. Bild 5.24 illustriert die gängigen Tauchkern- und Differentialtransformatorprinzipien. Typische technische Daten sind:

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

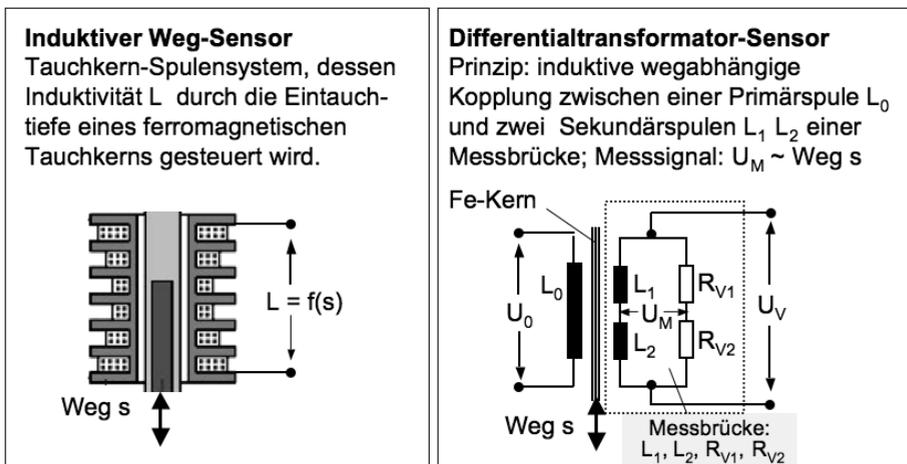


Bild 5.24 Funktionsprinzipien induktiver Positionssensoren

Im klassischen Anwendungsbereich induktiver Wegsensoren, dem Werkzeugmaschinenbau, wurde als Trägermaterial der Maßstäbe Stahl verwendet. Die Maßstäbe wurden direkt an der Maschine befestigt, so dass sich ein mechanisch sehr einfaches und robustes System ergab. Aufgrund der gestiegenen Genauigkeitsanforderungen werden heute als Sensoriksysteme für die Werkzeugmaschinenachsen opto-elektronische Sensoren verwendet, siehe unten.

Zur Erhöhung der Induktivität und zur Erzielung eines möglichst linearen Feldlinienverlaufs werden induktive Weg- und Winkelsensoren oft mit einem weichmagnetischen Kern in U-Form und einem *Kurzschlussring* (Cu, Al) ausgelegt. Sie werden auch als Wirbelstromsensoren gestaltet, siehe Bild 5.25 und 5.26.

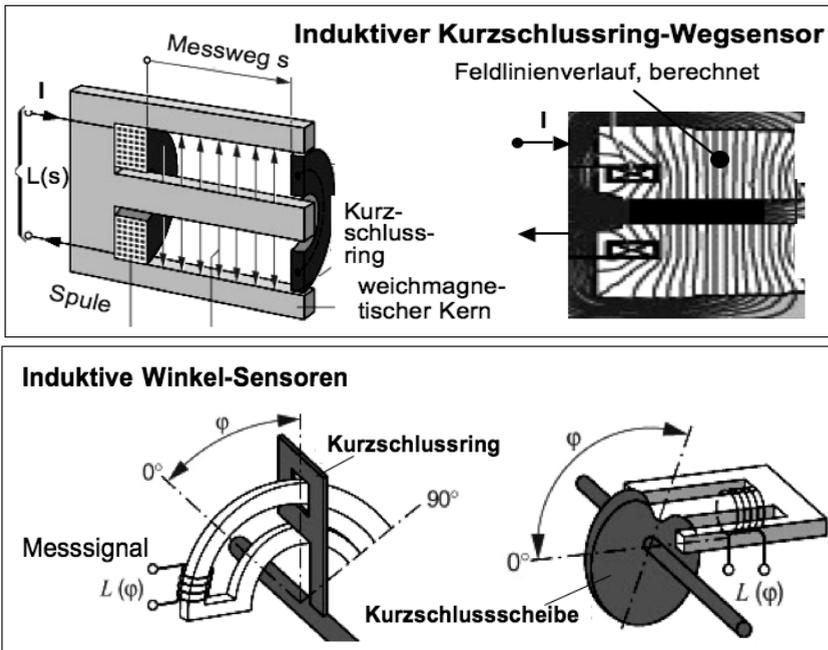


Bild 5.25 Induktive Sensoren: Ausführung als Kurzschlussringsensoren

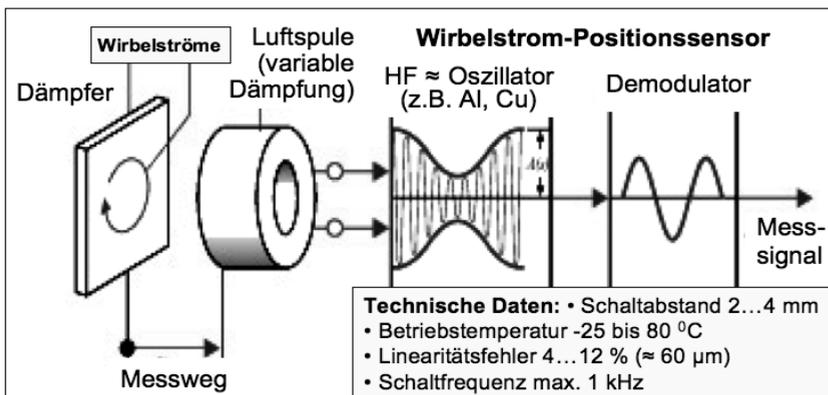


Bild 5.26 Funktionsprinzip und technische Daten eines Wirbelstromwegensors

Magneto-resistive Positionssensoren sind Winkelsensoren, deren elektrischer Widerstand durch einen Magnetisierungsvektor beeinflussbar ist, siehe Bild 5.27. 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 Kapitel 13.2.

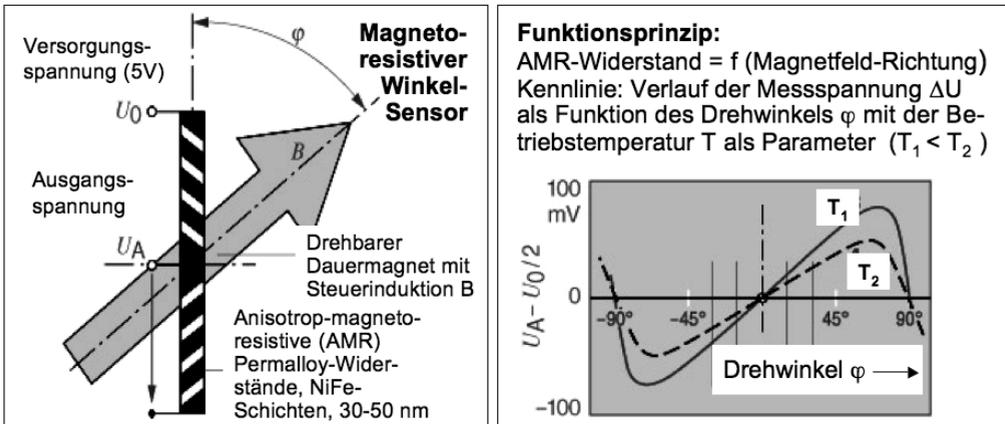


Bild 5.27 Funktionsprinzip eines magneto-resistiven Sensors

Galvanomagnetische Sensoren erfassen die Bewegung eines magnetischen Induktionsfeldes B , das auf eine stromdurchflossene Sensor-Feldplatte (SFP) wirkt, durch den Hall- oder Gauß-Effekt. Bild 5.28 zeigt das physikalische Prinzip: Eine Hall-Spannung U_H quer zum Feldplattenstrom I entsteht durch Elektronenablenkung, wenn eine SFP senkrecht von einer magnetischen Induktion B durchsetzt wird. Dabei vergrößert sich gleichzeitig der SFP-Widerstand nach einer etwa parabelförmigen Kennlinie (Gauß-Effekt).

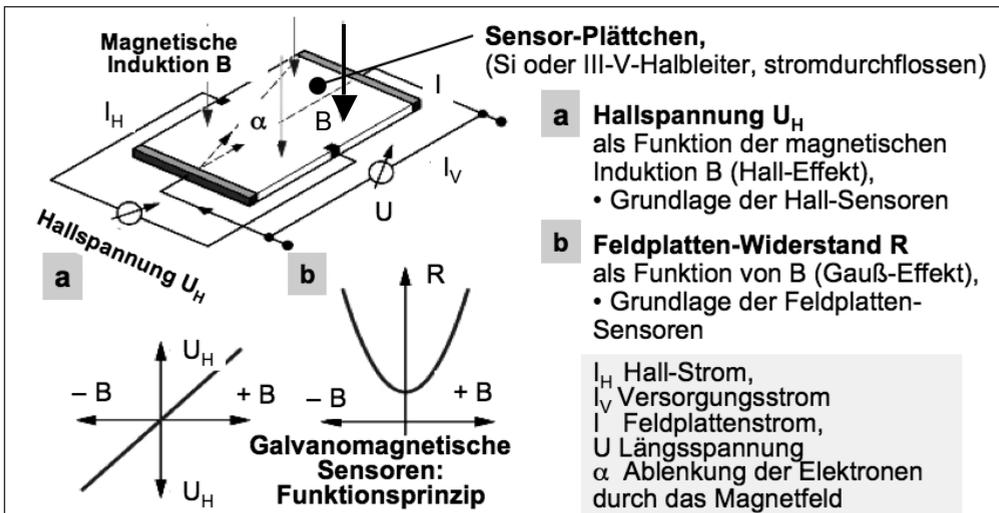


Bild 5.28 Galvanomagnetisches Prinzip: Grundlage der Hall- und Feldplatten-Sensoren

Galvanomagnetische Sensoren können als Rotations- oder Translations-Sensoren gestaltet werden. Bild 5.29 zeigt die technische Ausführung eines Hall-Winkelsensors (*moveable magnet*), bestehend aus einem drehbaren Magnetring und halbkreisförmigen Leiterstücken, die den Stator bilden.

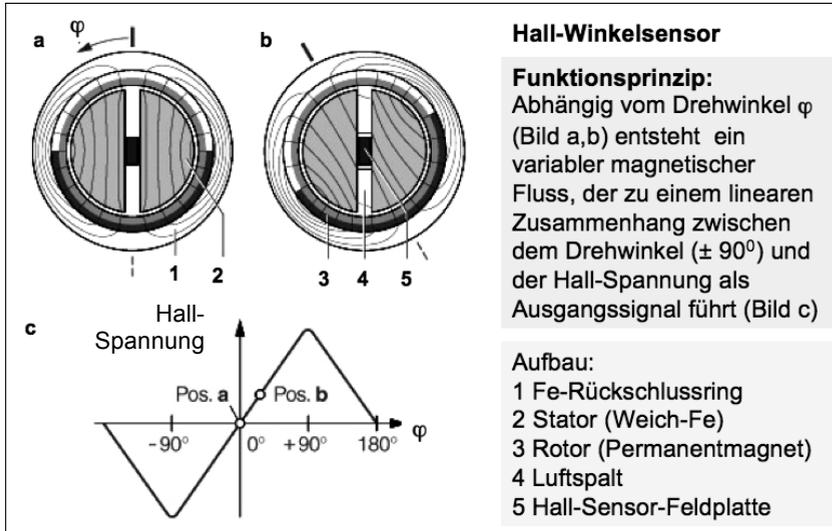


Bild 5.29 Technische Ausführung eines Hall-Winkelsensors

Die technische Ausführung eines Feldplattensensors für Translationsbewegungen ist in Bild 5.30 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 mechatronische Bewegungssysteme geeignet.

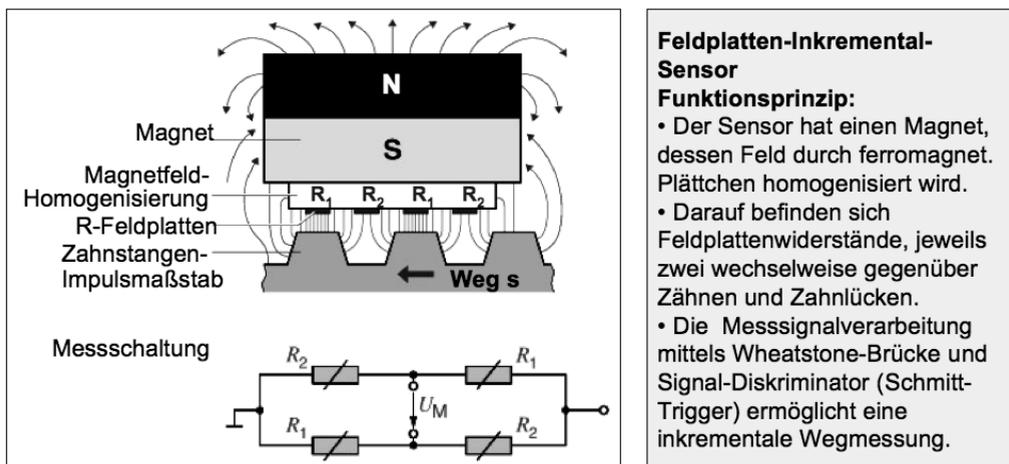


Bild 5.30 Technische Ausführung eines Feldplattensensors zur Erfassung von Translationen

Optoelektronische Bewegungssensoren bestimmen Wege oder Winkel durch eine messtechnisch auszuwertende Beeinflussung optoelektronischer Strahlengänge. Beim *Michelson-Interferometer*, Bild 5.31, 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, Mikrolithographiegeräte.

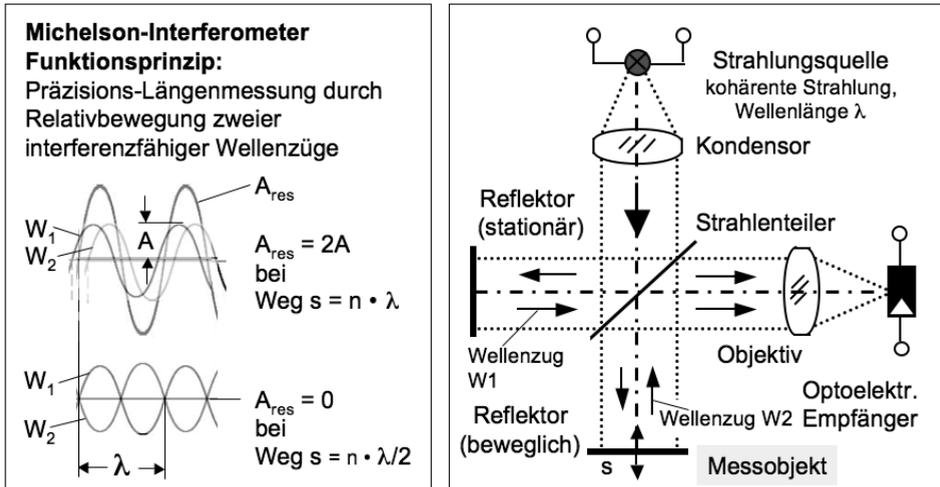


Bild 5.31 Optoelektronischer Wegsensor: Interferometerprinzip

Lichtschranken-Wegsensoren, Bild 5.32, haben inkrementale oder codierte Maßstabteilungen auf Glas, Glaskeramik oder Stahl mit Teilungsperioden bis 512 nm. In gekapselter Ausführung sind sie das Standardmesssystem für Werkzeugmaschinen.

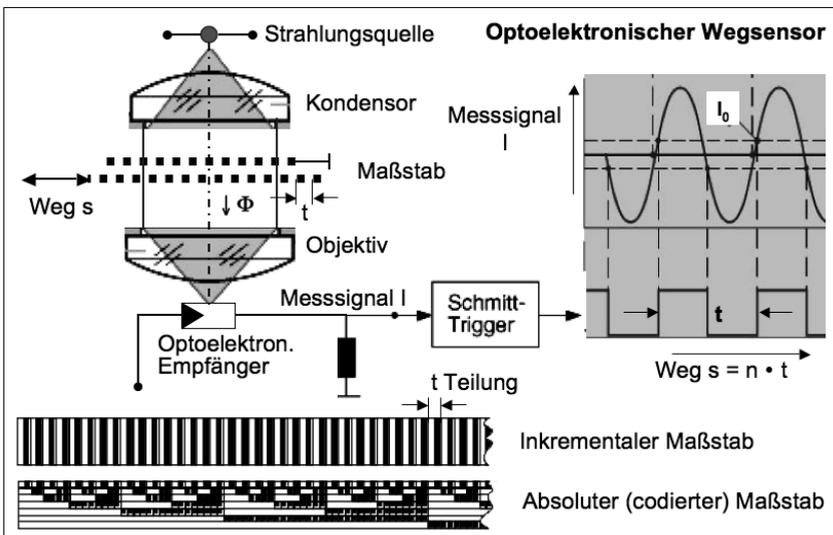


Bild 5.32 Optoelektronischer Wegsensor: Lichtschrankenprinzip

5.5.2 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, Bild 5.33. Störsignale, die gegebenenfalls ebenfalls differenziert werden, müssen durch gute Abschirmung und Filterung eliminiert werden.

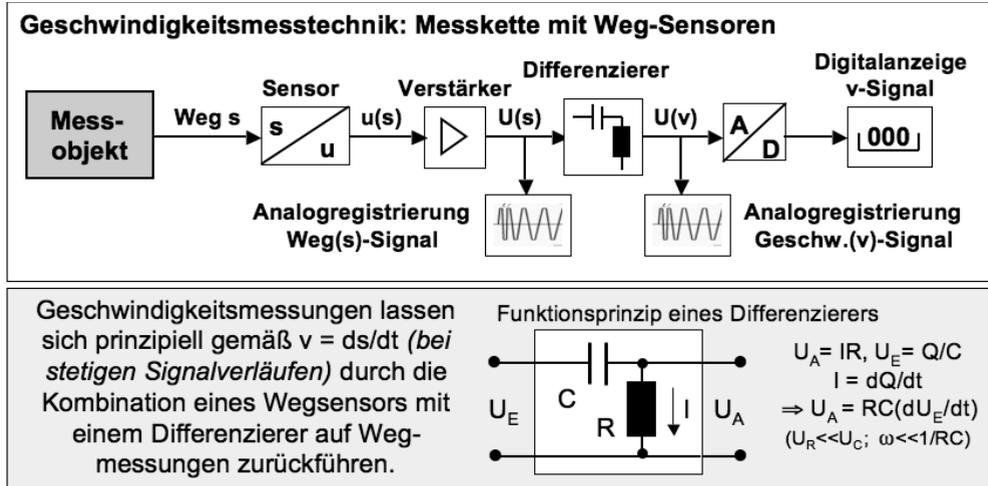


Bild 5.33 Messkette zur Geschwindigkeitsmessung mit Wegsensoren

Eine direkte Messung von Rotations-Geschwindigkeiten kann mit Coriolis-Sensoren durchgeführt werden, siehe Bild 5.34. Ein wichtiges Anwendungsgebiet dieser Sensoren ist das Elektronische Stabilitätsprogramm der Fahrzeugtechnik, (vgl. Kap. 13.2).

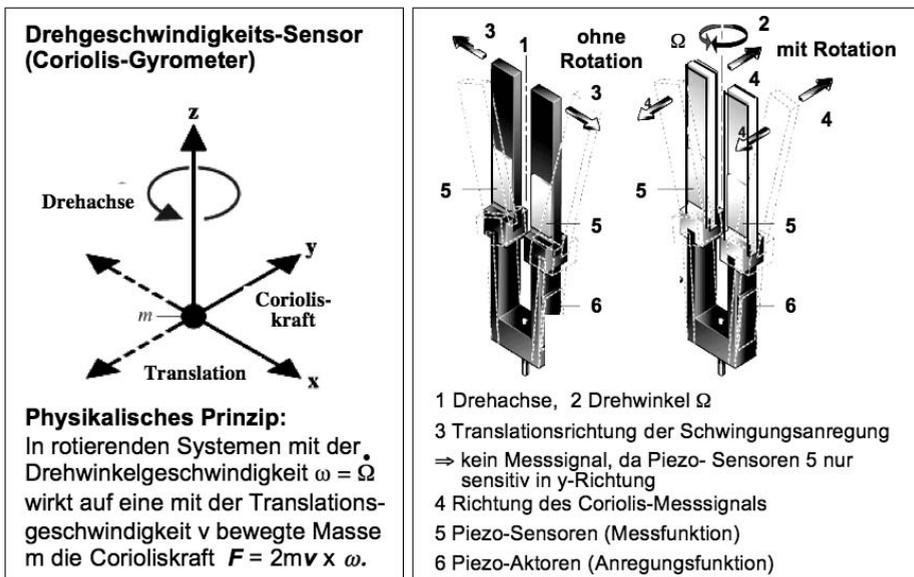
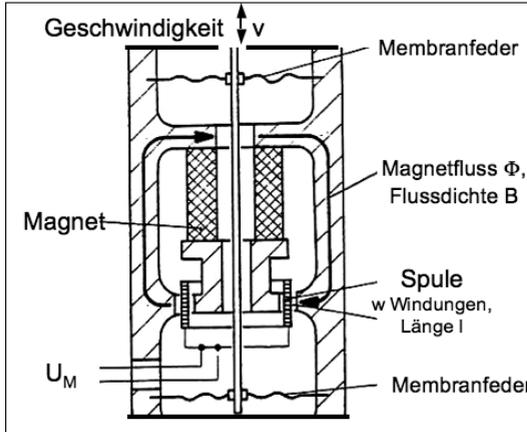


Bild 5.34 Prinzip eines Coriolis-Gyrometers als direkter Drehgeschwindigkeitssensor

Für die direkte Messung von Linear-Geschwindigkeiten kann das elektrodynamische Prinzip angewendet werden, siehe Bild 5.35.



Lineargeschwindigkeits-Sensor Funktionsprinzip:

Der zu messende Geschwindigkeitsvektor v bewirkt die Linearbewegung einer Spule in einem zylinderförmigen Magnetsystem. Die magnetischen Feldlinien verlaufen senkrecht zur Bewegungsrichtung. Die an den Spulenenden induzierte Spannung U_M ist der Flussänderung und damit der Geschwindigkeit direkt proportional, es folgt:

$$U_M = - w \frac{d\Phi}{dt} = w \cdot B \cdot l \cdot v$$

Bild 5.35 Elektrodynamischer Wegsensor für Lineargeschwindigkeiten

5.5.3 Drehzahlsensorik

Die Drehzahlmessstechnik kann die für mechatronische Bewegungsfunktionen wichtigen Rotationsbewegungen mit Impuls-Sensortechniken ermitteln, Bild 5.36 und 5.37:

- magnetische Multipoltechnik
- induktive, Hall- und Feldplatten-Sensorik.

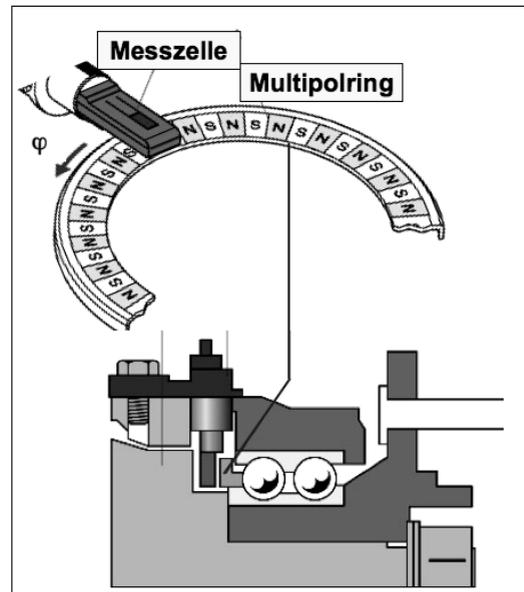
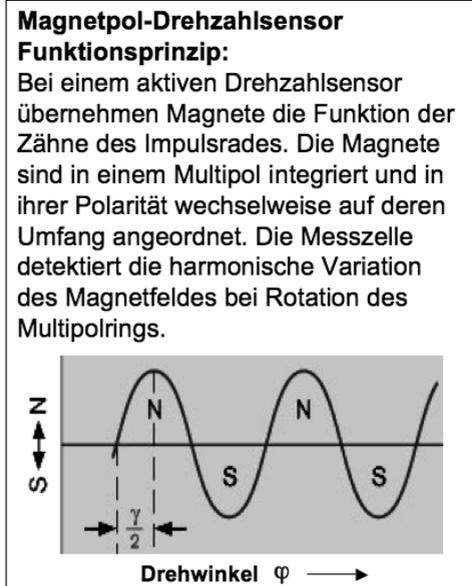


Bild 5.36 Drehzahlmessstechnik mit Multipolsensorik

Induktiver Drehzahlsensor

Die induktive Drehzahlmessung nutzt das Induktionsgesetz zur Messung der (Dreh-) Geschwindigkeit v . Bei Bewegung bzw. Rotation eines weich/hart-magnetischen Bauteils ist die Mess-Spannung U_M der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses Φ und der Windungszahl w proportional: $U_M = U_{\text{induziert}} = w \cdot d\Phi/dt$, wobei $\Phi = \Phi(\text{Position } x, \text{ Luftspalt } l) \Rightarrow U_M = w \cdot \partial\Phi/\partial x \cdot dx/dt$; $dx/dt = v$. Die Signalamplitude hängt somit vom Luftspalt l und der Zahnteilung t ab. Für einwandfreie Messungen muss gelten: $l < t/(2 \dots 3)$

Hall-Rotations-Sensor

Der Sensor wird vom Rotor nur um den magnetischen Nullpunkt herum mit wechselnder Polarität angesteuert. Luftspaltschwankungen können in dieser Anordnung keine Fehlimpulse hervorrufen.

- 1 Inkrement-Rotor
- 2 Hall-IC
- 3 Permanentmagnet
- 4 Polrad
- 5 Gehäuse

Feldplatten-Drehwinkelsensor

Gauß-Feldplatten-Sensoren messen den Feldstärkeunterschied an zwei in Umfangsrichtung eng benachbarten Punkten. Das Ausgangssignal entspricht etwa der Ableitung der Feldstärke nach dem Umfangswinkel und ist damit unabhängig vom Luftspalt.

- 1 Gauß-Widerstände R_1, R_2 (oder Hall-Elemente)
- 2 Weichmagnetschicht
- 3 Dauermagnet
- 4 Zahnrad (oder Nuten-Welle)

Bild 5.37 Drehzahl-Sensorprinzipien: Induktiver Sensor (oben), Hall-Sensor (Mitte), Feldplatten-Sensor (unten)

5.5.4 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 Bild 5.38 beschrieben.

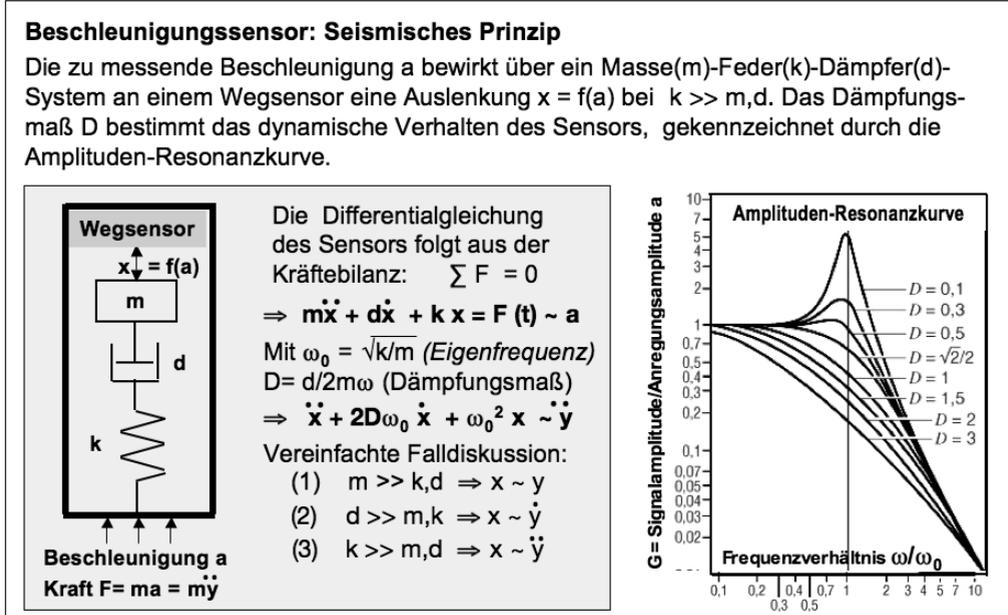


Bild 5.38 Das seismische Prinzip: physikalische Grundlage für Beschleunigungssensoren

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 Bild 5.39.

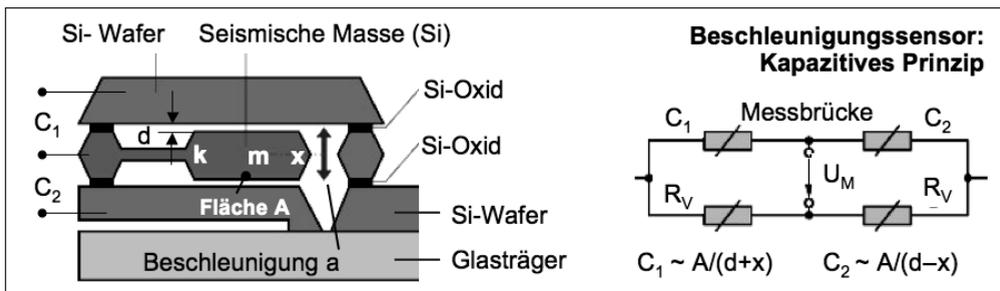


Bild 5.39 Mikromechanischer Beschleunigungssensor, kapazitives Prinzip

Das erforderliche Feder-Masse-System der Sensoren ist mit anisotroper und selektiver Ätztechnik aus einem Silizium-Wafer herausgearbeitet. Wird die durch dünne elastische Federstege k gehaltene mittlere Kondensatorplatte (seismische Masse m)

durch eine einwirkende Beschleunigung ausgelenkt, so entstehen an dem Doppel-Kondensatorsystem Kapazitätsänderungen: $C_1 \sim A/(d+x)$ und $C_2 \sim A/(d-x)$. In einer Messbrückenschaltung mit Vergleichswiderständen R_V folgt $U_M = \text{konst.} \cdot a$.

Eine weitere Ausführungsart von Beschleunigungssensoren mit vielfältigen mechatronischen Anwendungsmöglichkeiten nutzt den Hall-Effekt (vgl. Bild 5.28) zur internen Messung der Auslenkung der seismischen Masse als Funktion der zu bestimmenden Beschleunigung. Bild 5.40 illustriert das Funktionsprinzip und den Aufbau.

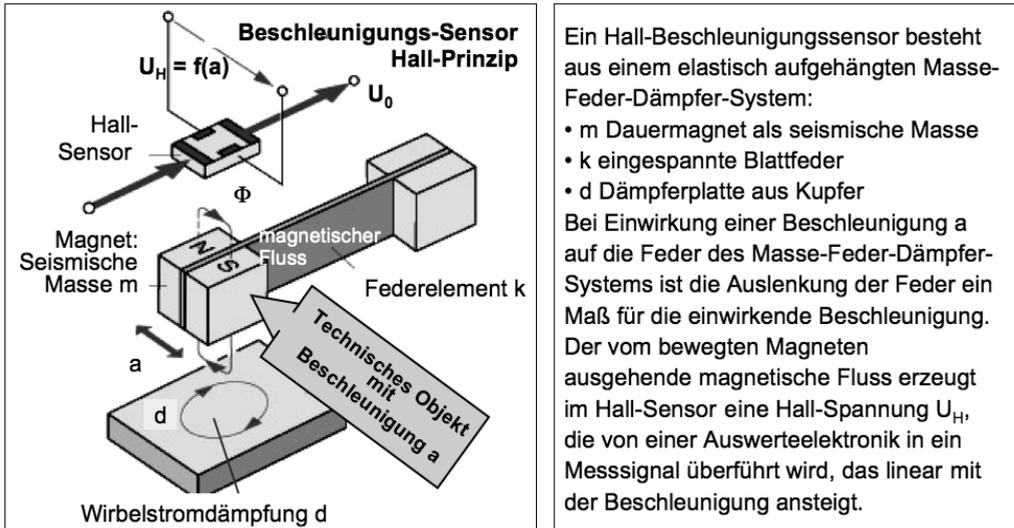


Bild 5.40 Hall-Beschleunigungssensor, Aufbau und Funktion

Beschleunigungssensoren haben einen außerordentlich breiten Anwendungsbereich in der Mechatronik. In der folgenden Übersicht sind charakteristische Anwendungsbereiche in der Fahrzeugtechnik (vgl. Kapitel 13) mit ihren typischen Messbereichen – bezogen auf die Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – zusammengestellt. Beschleunigungssensoren werden häufig als *Mikro-Sensoren* in *eingebetteten Systemen* (siehe Kapitel 5.8) eingesetzt. Die Mikrosensorik wird in Kapitel 5.9 behandelt.

Anwendung	Messbereich
• Motor-Klopffregelung (siehe Bild 6.24)	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

5.6 Sensorik dynamischer Größen

Kinetik und Dynamik sind die grundlegenden Begriffe zur Kennzeichnung von Bewegungen durch Kräfte und zur Charakterisierung der Wechselwirkungen von Kräften und Bewegungen. Die zugehörige Sensorik ist dementsprechend von Bedeutung für technische Systeme mit mechanisch beanspruchten Bauteilen. Die *Mikrosensorik* dynamischer Größen wird in Abschnitt 5.9 behandelt.

5.6.1 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. Bild 5.41 nennt die grundlegenden Kraft-Sensorprinzipien.

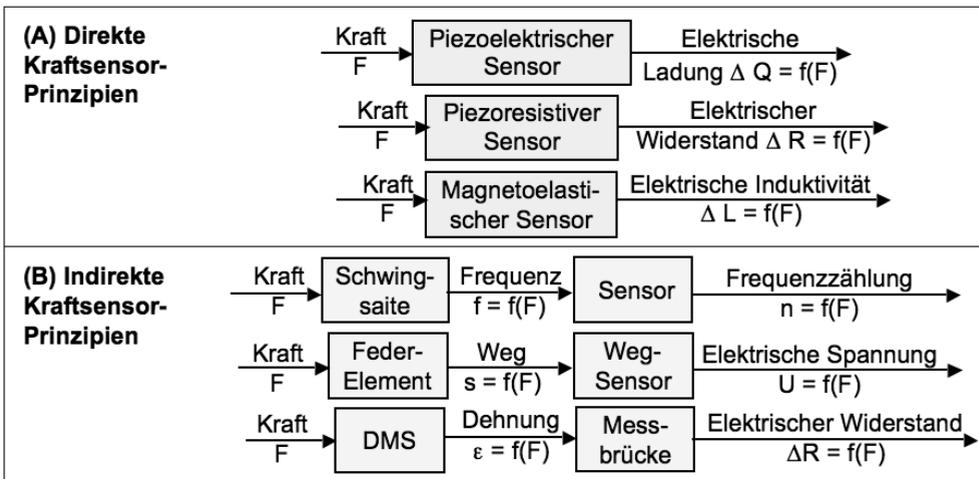


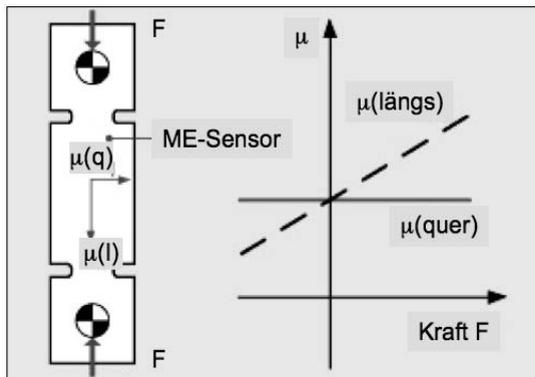
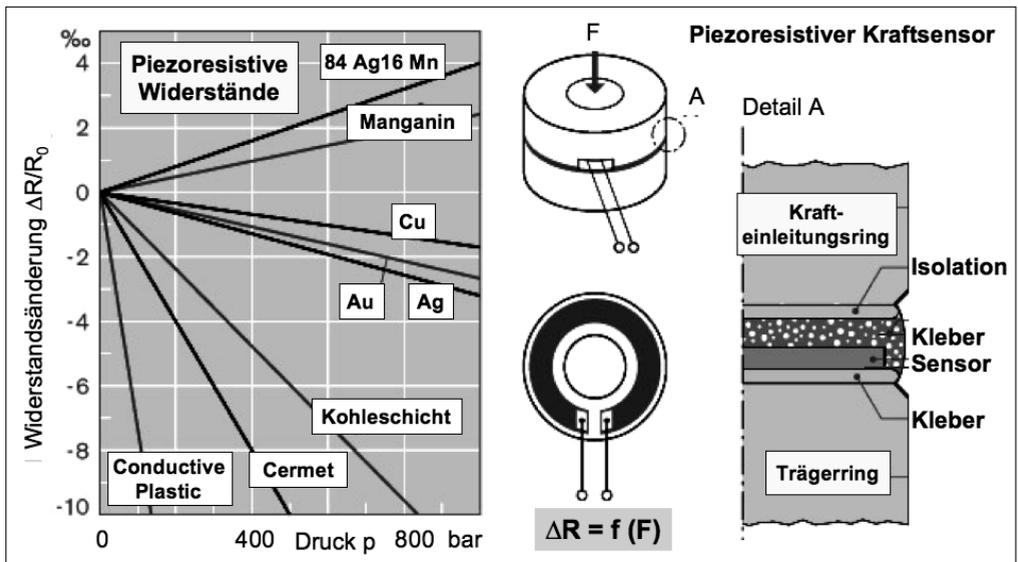
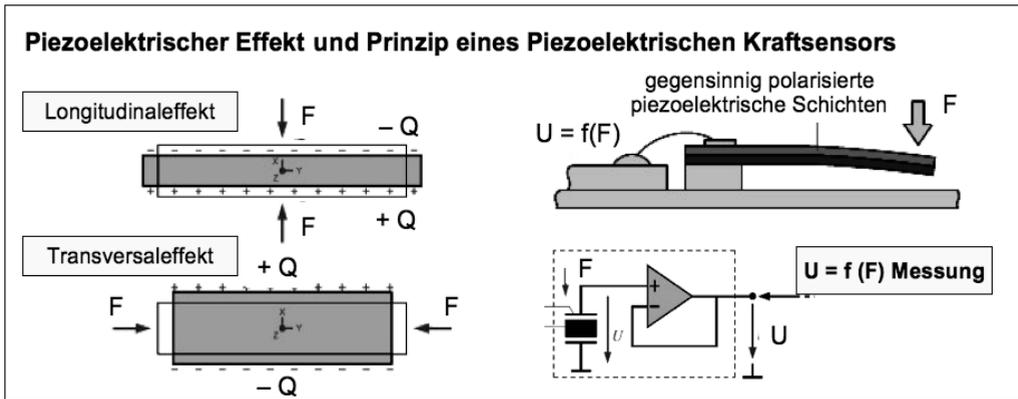
Bild 5.41 Übersicht über Sensorprinzipien zur Kraftmessung

(A) *Direkte Kraftsensoren* basieren auf intrinsischen mechano-elektrischen Effekten: Piezoelektrische, piezoresistive und magnetoelastische Sensoren bestehen aus Stoffen, deren Ladungsgleichgewicht, elektrischer Widerstand oder elektrische Induktivität sich in Abhängigkeit auf sie einwirkender Kräfte oder mechanischer Spannungen in mess- und kalibrierbarer Weise verändert. Der inverse piezoelektrische Effekt, d.h. $F = f(Q)$, wird für Piezo-Aktoren genutzt (vgl. Kap. 6.2).

(B) *Indirekte Kraftsensoren* nutzen „Zwischengrößen“ zur Kraftdetektion:

- Induktive Kraftsensoren führen die Kraftmessung über einen Federdiagramm-zusammenhang auf eine Wegmessung mit induktiven Wegsensoren zurück.
- Schwingensaiten-Kraftsensoren nutzen die Frequenzveränderung einer eingespannten Saite mit einem induktiv-kapazitiven „Pick-up“ zur Kraftmessung.
- DMS-Kraftsensoren bewirken über elastische Dehnungen ε (Hookesches Gesetz) von DMS elektrische Widerstandsänderungen gemäß $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$.

Technische Ausführungen der Kraftsensoren zeigen die Bilder 5.42 und 5.43.



Magnetoelastischer Kraftsensor Funktionsprinzip:

Der magnetoelastische Effekt (ME) ferromagnetischer Legierungen beruht auf einem anisotropen Verhalten der relativen magnetischen Permeabilität μ (Verhältnis Induktion B zu Feldstärke H). Bei $F = 0$ ist μ isotrop. Bei $F \neq 0$ wird der ME-Sensor anisotrop, d.h. $\mu(\text{l\"angs}) \neq \mu(\text{quer})$. Die μ - F -Funktion kann für Aufgaben eines Kraftsensors kalibriert werden.

Bild 5.42 Prinzipien und technische Ausführungsarten direkter Kraftsensoren

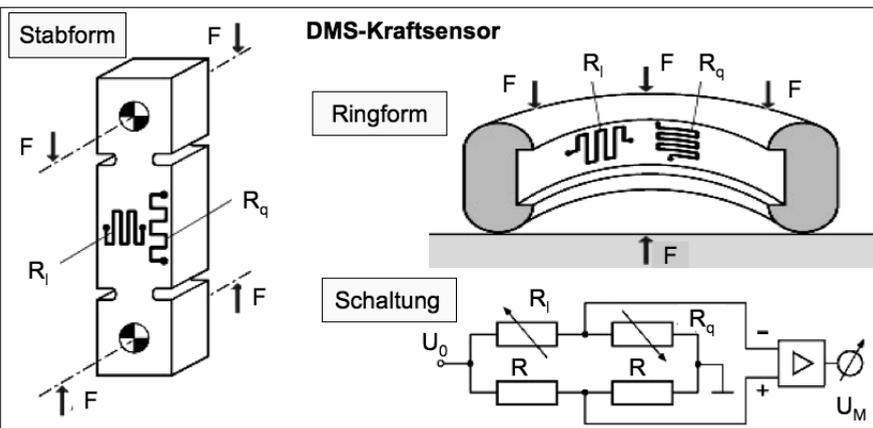
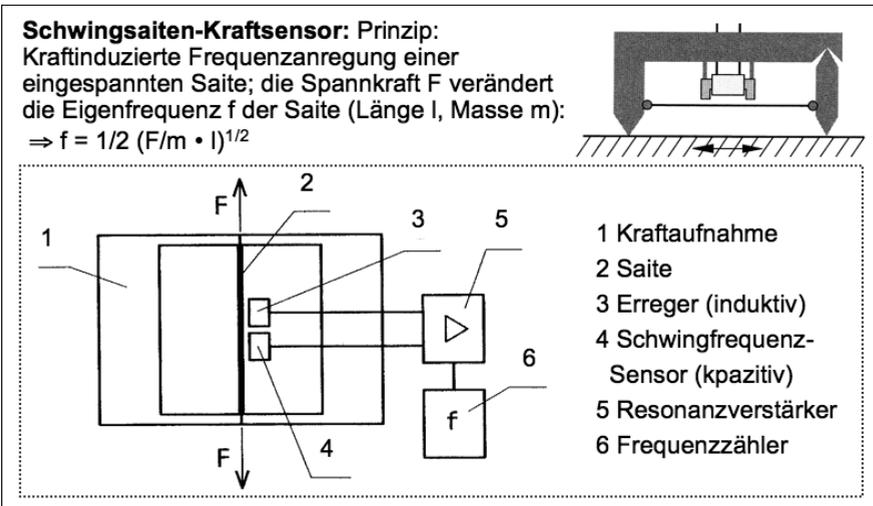
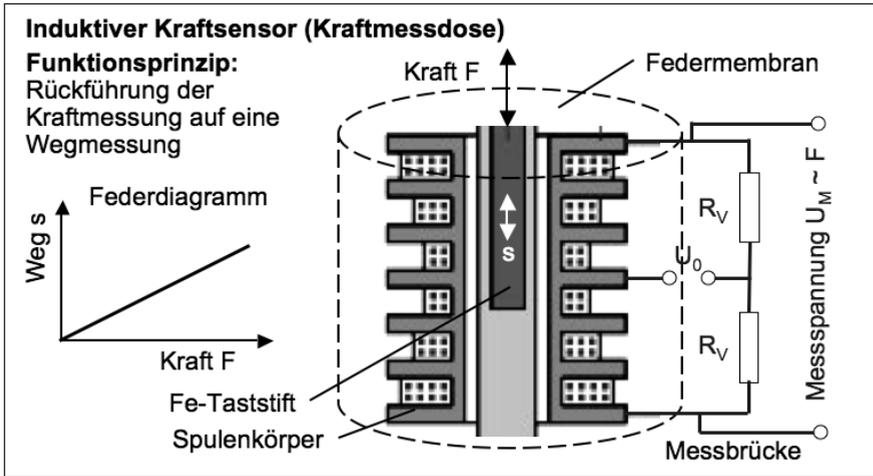
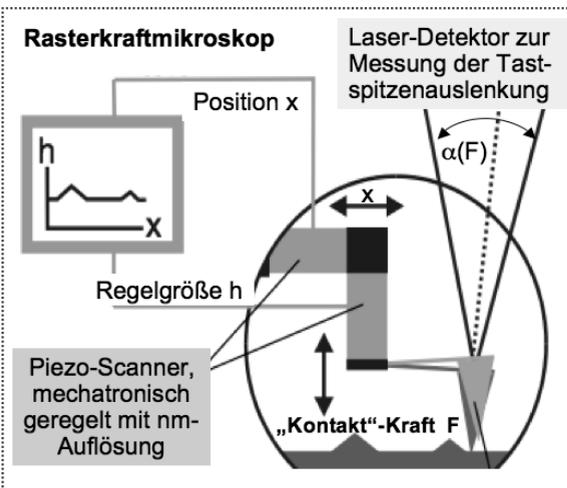
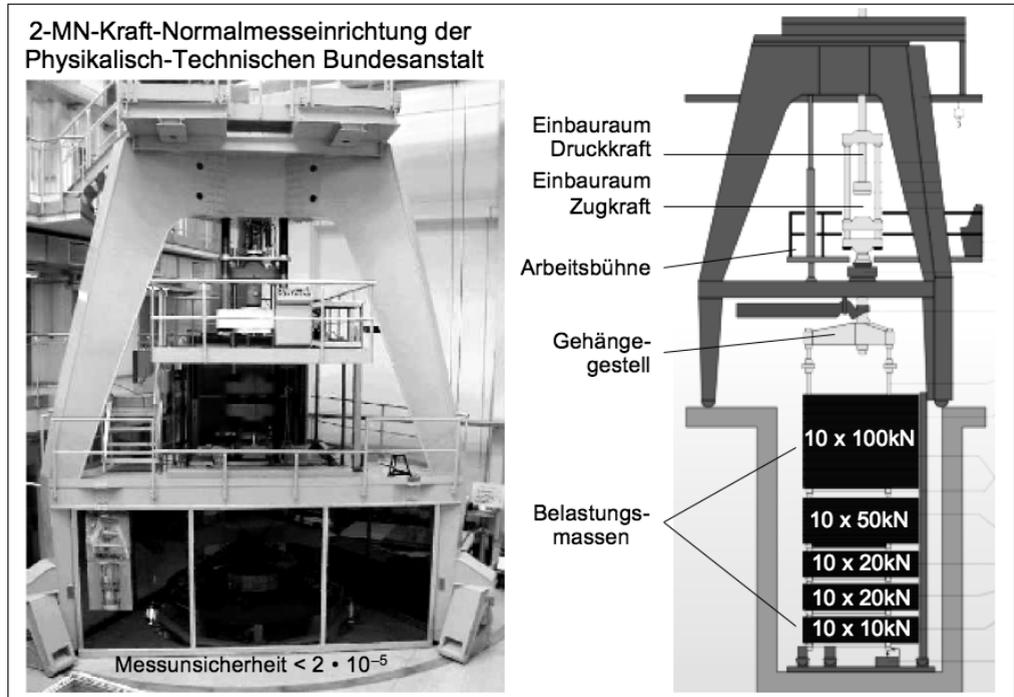


Bild 5.43 Prinzipien und technische Ausführungsarten indirekter Kraftsensoren

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 Bild 5.44.



Anwendungsbeispiele:

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

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

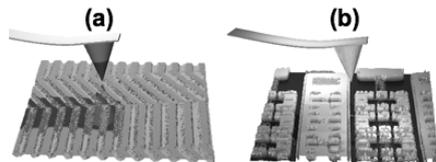


Bild 5.44 Dimensionen der Kraftmesstechnik. Oben: Darstellung der Kräfteinheit im MN-Bereich; unten: Prinzip des Rasterkraftmikroskops zur Detektion von Kräften $< \mu\text{N}$; Oberflächen-Scanbereich $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$, laterale Auflösung $0,1$ bis 10 nm

Die Anwendungsmöglichkeiten des in dem Prinzipbild von 5.45 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 Bild 5.45 dargestellt.

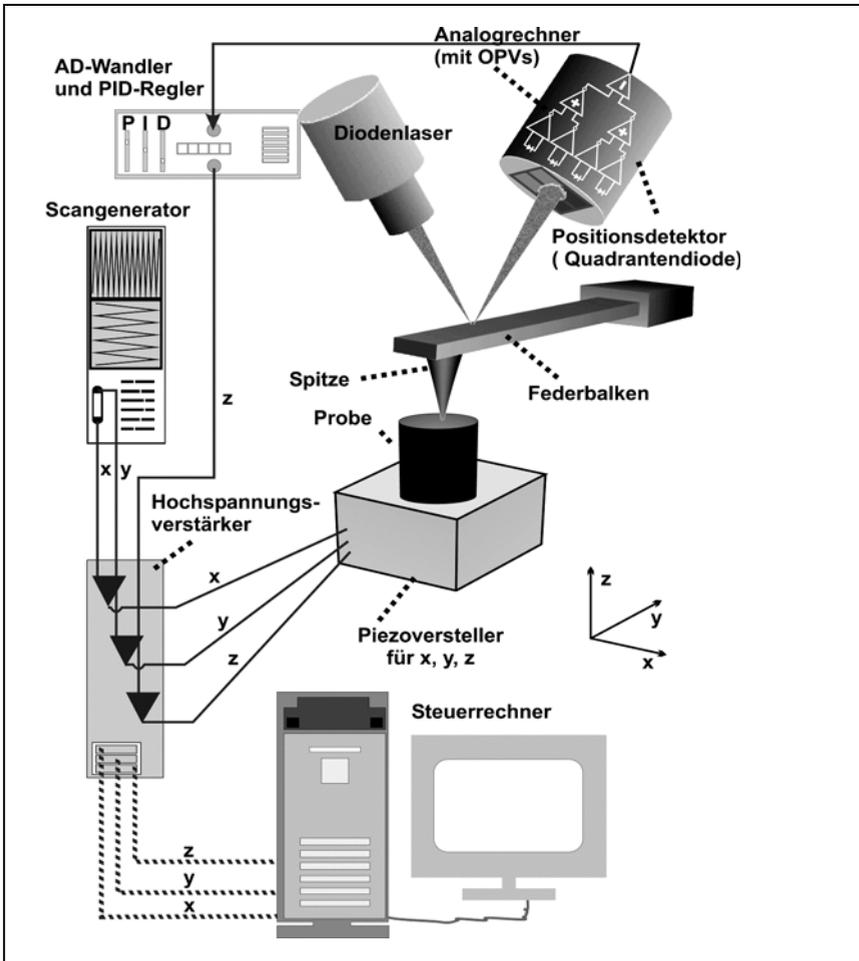


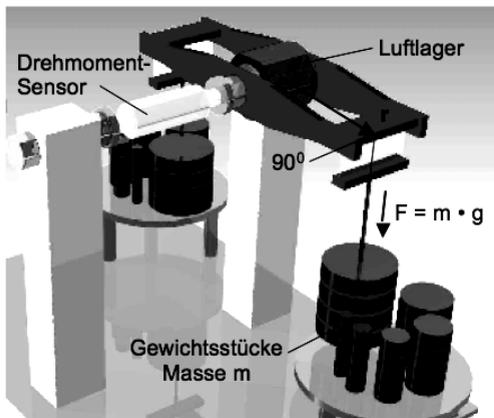
Bild 5.45 Prinzip des mechatronischen Systems eines Rasterkraftmikroskops

Bild 5.45 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 Position (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.

5.6.2 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 Einheit Drehmoment und das Prinzip einer Drehmoment-Normal-Messeinrichtung sind in Bild 5.46 dargestellt. Drehmomentsensoren werden in der technischen Ausführung meist mit Dehnungsmessstreifen realisiert, wobei die DMS gemäß DMS-Applikationsregeln (vgl. Bild 5.20) in Richtung der Torsions-Hauptspannungen anzuordnen sind, siehe Bild 5.47.



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

Bild 5.46 Definition und metrologische Darstellung der Einheit Drehmoment

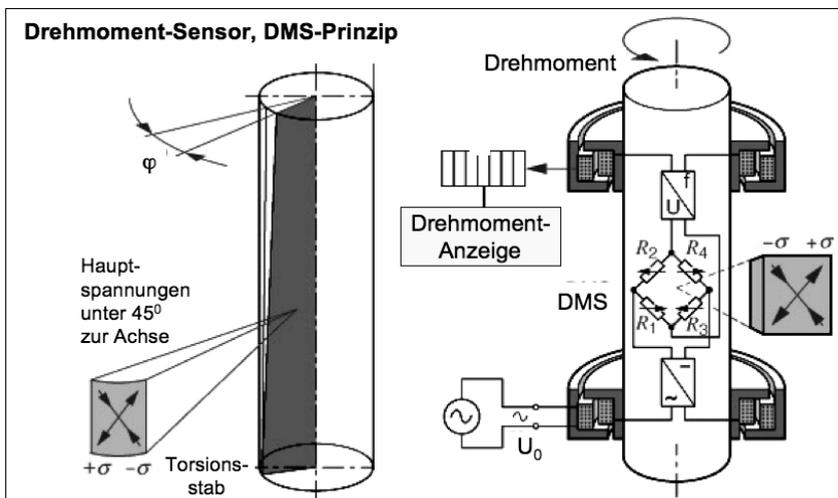


Bild 5.47 Gestaltung von Drehmoment-Sensoren mit Dehnungsmessstreifen

Drehmomentsensoren müssen – wie alle Messwertaufnehmer – zum metrologischen Anschluss (*traceability*) an Mess-Normale, zur Kennlinienfestlegung und zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens kalibriert werden. Bild 5.48 zeigt Drehmoment-Kalibriereinrichtungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mit Referenzdrehmomentaufnehmern.

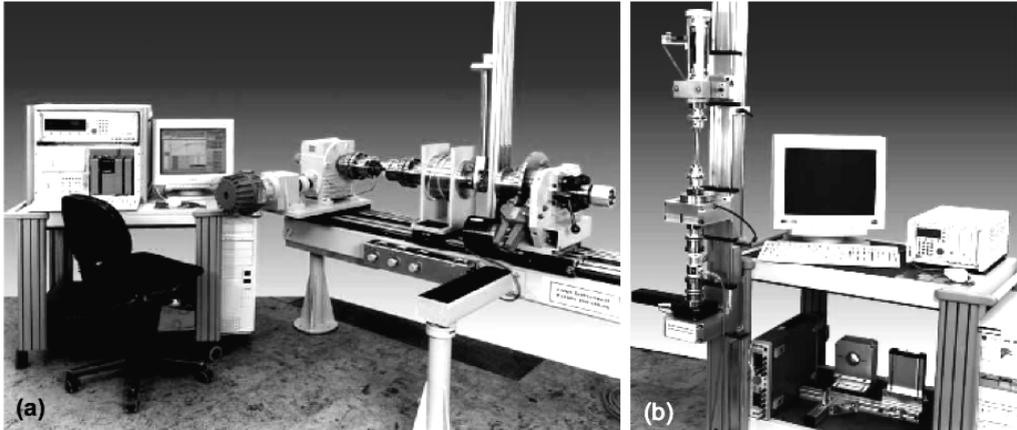


Bild 5.48 Drehmoment-Kalibriereinrichtungen: (a) Horizontalbauweise, 2000 Newtonmeter; (b) Vertikalbauweise 20 Newtonmeter

5.6.3 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 m^2 erzeugt wird. Für die Druckmesstechnik gelten folgende Begriffe:

- Absolutdruck p_{abs} : Druck, bezogen auf den Bezugsdruck $p = 0 \text{ Pa}$ (Vakuum).
- Atmosphärischer Luftdruck p_{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:

Unmittelbare Druckmessverfahren:

- Flüssigkeits-Druckmessgeräte: Der zu messende Druck p wird durch Vergleich mit der Gewichtskraft einer Flüssigkeitssäule (Höhe h , Dichte ρ) 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: $p = F/A = m g / A$, Bild 5.49.

Mittelbare Druckmessverfahren:

- Mechanische Druckmessgeräte: Druckmessgeräte mit federelastischem Messglied (Bourdonrohr), dessen Wände sich proportional zum Druck verformen.
- Elektronische Drucksensoren unter Anwendung der oben behandelten Effekte: piezoresistiv, resistiv, kapazitiv, DMS-Mikrosensorik, siehe Bild 5.49 unten.
- Faseroptisch-interferometrische Drucksensoren, siehe Bild 5.50

Druckmessung mit Kolbenmanometer:
Rückführung des "Pascal" auf die SI - Basiseinheiten kg, s, m im Druckbereich von <10 kPa bis 1 GPa:

Druck = Kraft/Fläche:
 $p = F / A_p$
1 Pascal = 1 N/m²

m - Masse
g - Fallbeschleunigung
A_p - wirksame Querschnittsfläche p
- Messdruck

≤ 350 kPa ≤ 400 MPa
Kolben-Zylinder-Messsysteme

Piezoresistiver Drucksensor

$R = f(p)$

Resistiver Drucksensor

$R = f(p)$

Kapazitiver Drucksensor

$C = f(p)$

Drucksensoren

DMS-Drucksensor

Membran mit eindiffundierten R

Si-Chip

Glas (Pyrex)

Messbrückenschaltung

Bild 5.49 Drucksensorik: oben unmittelbare, unten mittelbare Druckmessverfahren

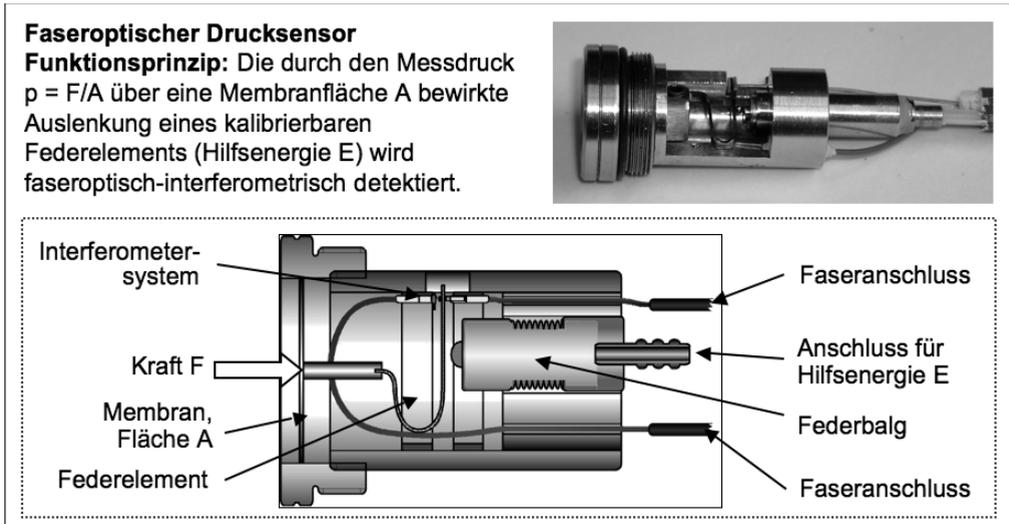
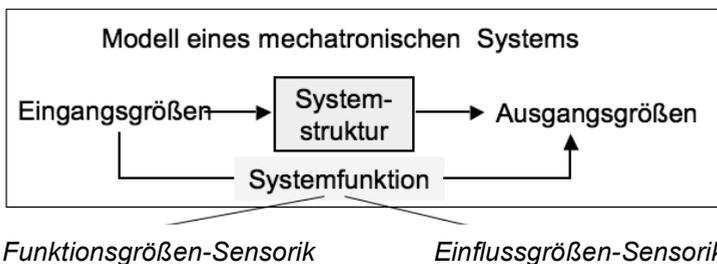


Bild 5.50 Prinzip eines faseroptisch-interferometrischen Drucksensors

5.7 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 der folgenden Übersicht dargestellt, gehören zu den wichtigsten Einflussgrößen die *Temperatur* und die *Feuchte*. Daneben können zahlreiche weitere Einflussgrößen auftreten, z.B. Strahlung unterschiedlicher physikalischer Natur, Gase und chemische Substanzen, die mit speziellen Sensoren zu detektieren sind.



Die aus der Sensorik von Einflussgrößen gewonnenen Signale können sowohl zu erweiterten Systembeschreibungen als auch zur Korrektur von Sensor-Messsignalen verwendet werden. Wie in Kapitel 5.2.2 unter dem Stichwort *Smart Sensor* beschrieben (siehe Bild 5.6), werden korrekte Modellparameter (Sollgrößen) in einem PROM gespeichert. Unter Verwendung eines Mikrorechners (μC) 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.

5.7.1 Temperatursensorik

Physikalisch gesehen ist die Temperatur T 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 Temperatur-Sensorik ist für mechatronische Systeme in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung, beispielsweise zur Bestimmung der Temperatur als:

- Zustandsgröße des thermischen Zustands eines 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. Für die Mechatronik von Bedeutung sind Temperatursensoren, mit denen Bauteil- oder Prozesstemperaturen in elektrische Größen für die Steuerung und Regelung mechatronischer Systeme umgesetzt werden können. Die *Mikrosensorik* der Temperaturmessung wird in Abschnitt 5.9 behandelt.

Thermoelemente basieren auf dem Seebeck-Effekt: In einem Leiterkreis mit zwei verschiedenen Metallen, an deren Verbindungspunkten unterschiedliche Temperaturen vorliegen, gilt $U = b \cdot \Delta T + c \Delta T^2$, b und c sind Materialkonstanten. Thermoelemente weisen nahezu lineare Kennlinien auf, Bild 5.51; für nicht zu große Temperaturbereiche ΔT 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°C), Messbereich $-270 \dots 1300^\circ\text{C}$.

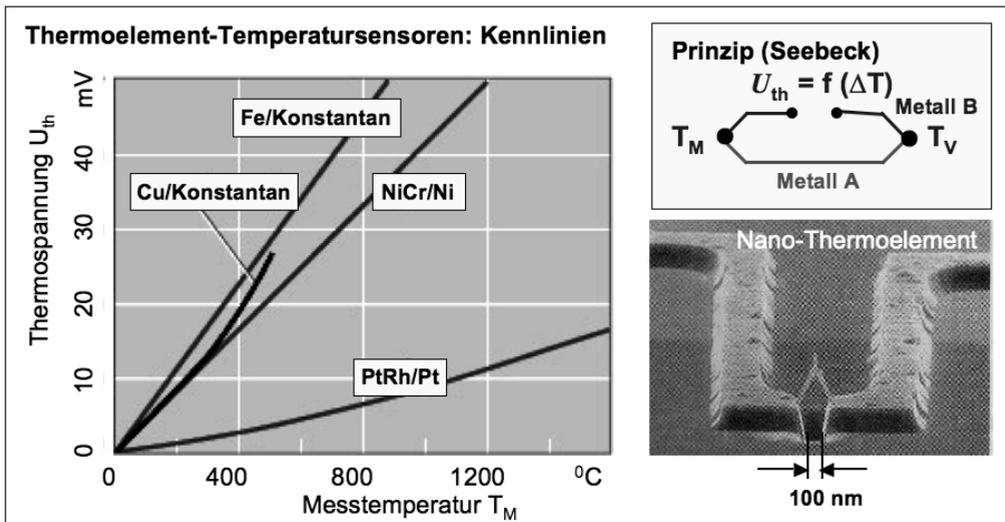


Bild 5.51 Thermoelement-Temperatursensoren: Prinzip, Kennlinien und Beispiel eines Nano-Thermoelements zur Temperaturanalyse von Mikrochips (FAZ, 31/1/2001)

Widerstandsthermometer basieren auf der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes. Die Sensoren haben je nach elektrischem Leitungsmechanismus Kennlinien mit negativem Temperaturkoeffizienten, NTC (*Heißleiter*, *Thermistoren*) oder positivem Temperaturkoeffizienten, PTC (Metalle), siehe Bild 5.52.

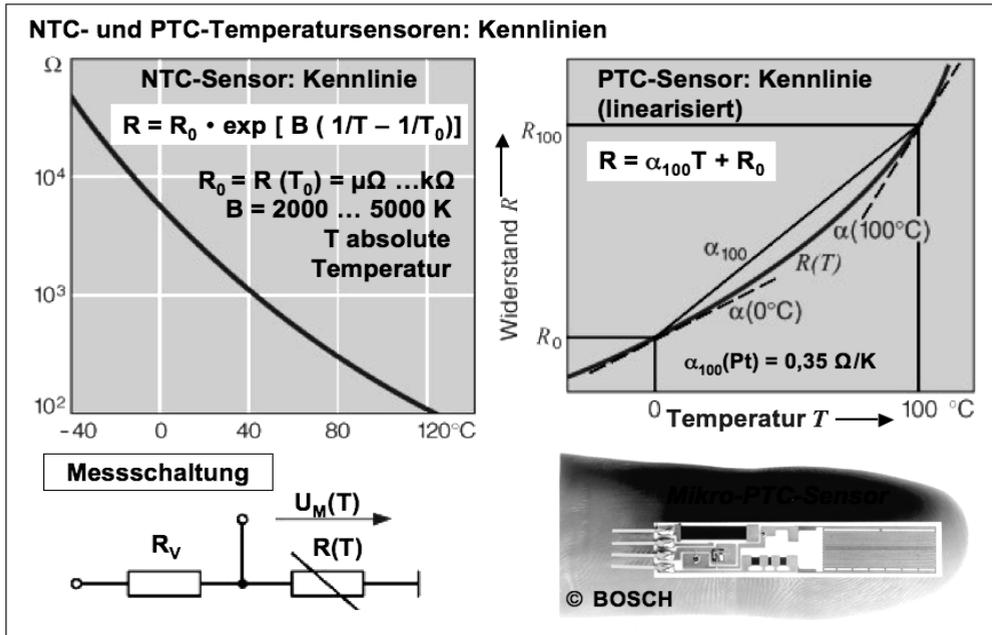


Bild 5.52 Kennzeichen von NTC- und PTC-Temperatursensoren: Kennlinien, Messschaltung, Beispiel: Mikrotechnik-Temperatur-Sensor mit integrierter Signal-Prozessorik

Pyrometersensoren bestimmen Temperaturen berührungslos aus der Messung der Temperaturstrahlung. Grundlage ist das Plancksches 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 λ 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 Bild 5.53 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.

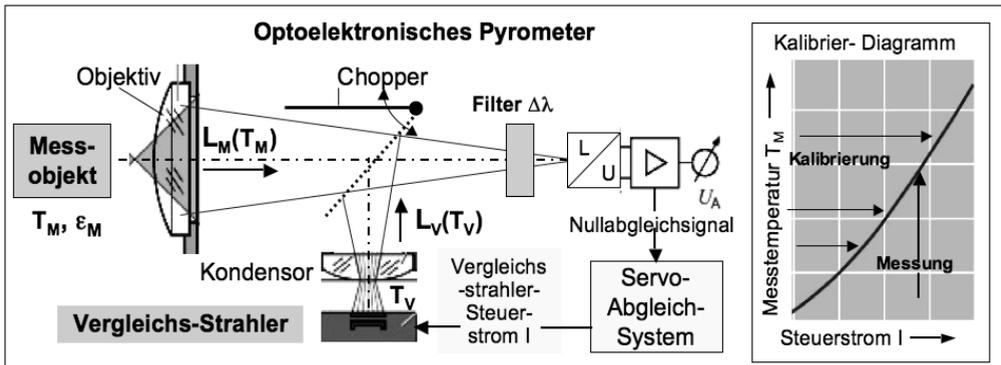


Bild 5.53 Darstellung des Prinzips eines berührungslosen Temperatursensors

5.7.2 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_{abs} ist die in dem Gasvolumen V von einem Kubikmeter enthaltene Wasserdampfmenge m in g/m^3 : $f_{\text{abs}} = m/V$.
- Die *maximale Feuchte* (Sättigungskonzentration) f_{max} ist die bei einer bestimmten Temperatur in dem Gasvolumen V von einem Kubikmeter maximal mögliche Wasserdampfmenge m_{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 Bild 5.54 sind die für die Feuchte-Sensorik wichtigen Zusammenhänge dargestellt.

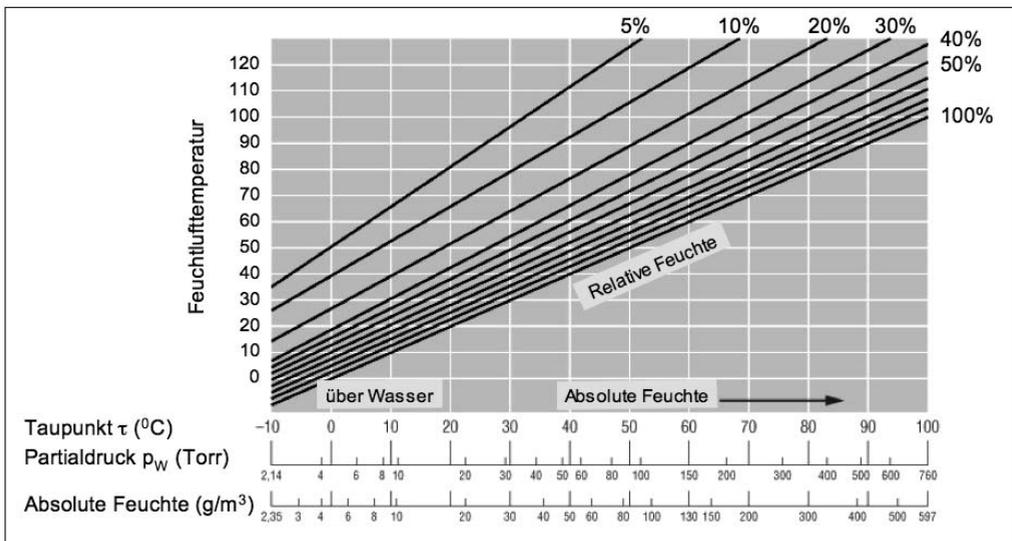


Bild 5.54 Temperatur-Feuchte-Diagramm für Luft

Als Feuchte-Sensoren 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_2O_3 , Kunststoff), als Dielektrikum eines Kondensators.

Das nebenstehende Bild 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 Bild 5.55. Eine gesamte Methodenübersicht zur Feuchtesensorik gibt Tabelle 5.3.

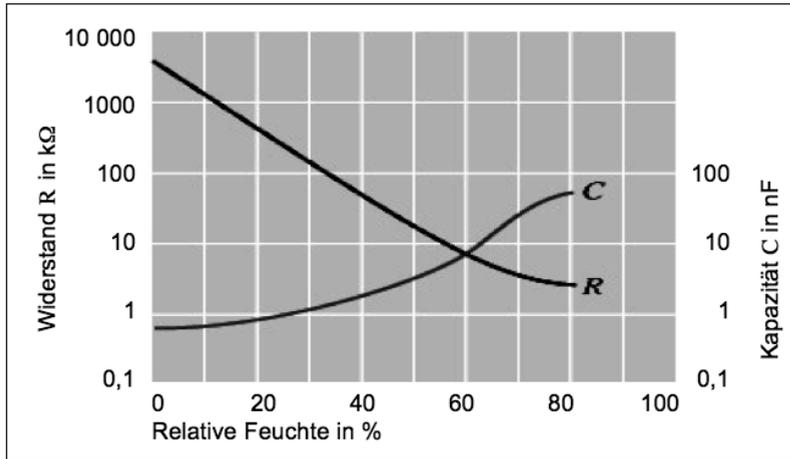
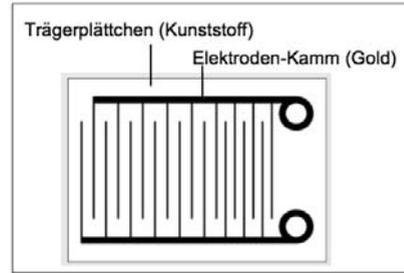


Bild 5.55 Typische Kennlinien resistiver (R) und kapazitiver (C) Feuchtesensoren

Tabelle 5.3 Übersicht über direkte und indirekte Methoden der Feuchtesensorik

Methoden	Verfahren	Sensor
Direkte Methoden 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
Indirekte Methoden Messung der relativen Feuchte	Hygroskopische Verfahren	Elektr. Leitfilm-Hygrometer Kondensator-Hygrometer Haar-Hygrometer Bistreifen-Hygrometer Farb-Hygrometer Quarz-Hygrometer Gravimetrisches Hygrometer

5.8 Strukturintegrierte Sensorik: Embedded Sensors

Bei der Behandlung der Sensorik stand bisher die sensorische und messtechnische Erfassung mechatronischer *Funktionsgrößen* im Vordergrund.

Jede System-*Funktion* erfordert aber eine sie ermöglichende und tragende System-*Struktur*. Wie in Kapitel 2 dargestellt, kann sich die Struktur technischer Systeme unter der Einwirkung der Eingangsgrößen – und insbesondere durch den Einfluss von Störgrößen und Dissipationseffekten – 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 lassen sich ebenfalls die Methoden der Sensorik anwenden. Von besonderer Bedeutung sind dabei Sensoren, die direkt in strukturelle Bauteile integriert werden können. Im internationalen Sprachgebrauch wird dies als „Embedded Sensors for Structural Health Monitoring“ bezeichnet. Das Prinzip ist in abstrakter Form in Bild 5.56 dargestellt.

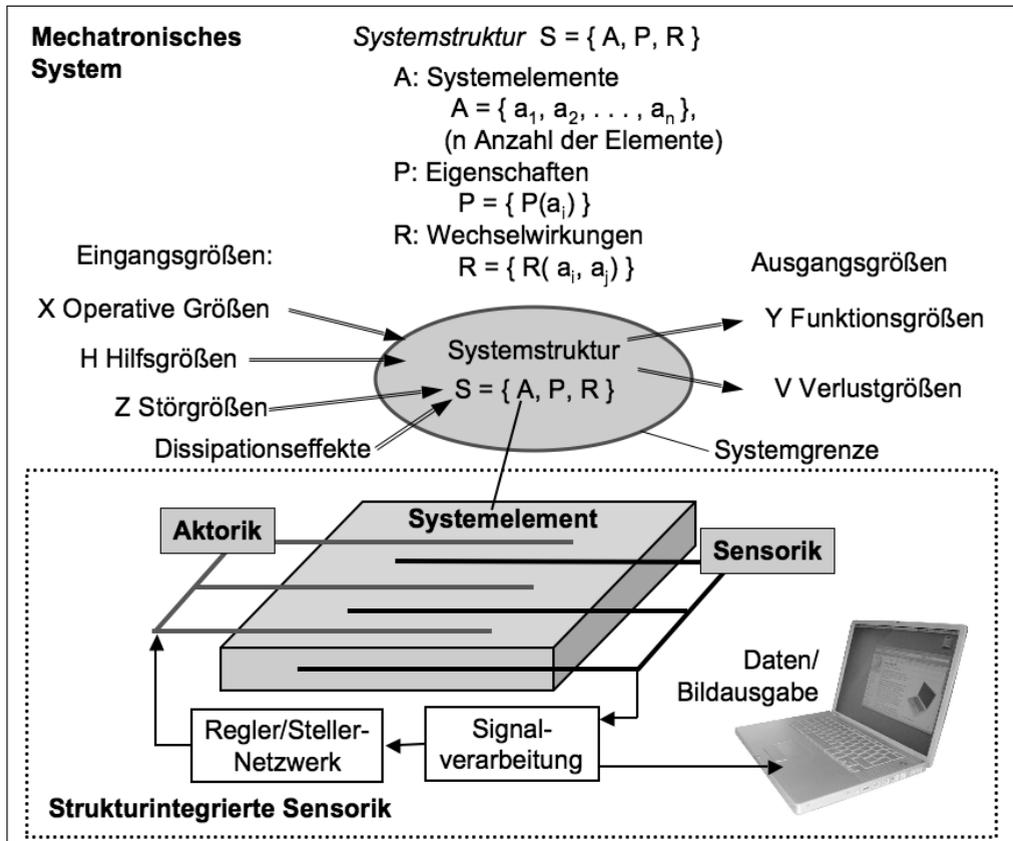


Bild 5.56 Modell eines mechatronischen Systems mit strukturintegrierter Sensorik

Der obere Teil von Bild 5.56 zeigt die bekannte Modelldarstellung eines mechatronischen Systems (vgl. Bild 2.3). Im unteren Teil ist ein Strukturelement mit eingebette-

tem Sensor dargestellt. Der Sensorausgang kann nach Signalverarbeitung über ein Regler/Steller-Netzwerk einem Aktor zugeführt werden, der im Sinne einer Adaptronik (vgl. Kap 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 Kapiteln 10 und 14 mit Beispielen aus der Feinwerktechnik und dem Technikbereich Baulicher Anlagen dargestellt.

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

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

Kenn/Messgrößen von Strukturelementen und Sensoreffekte mit elektrischen oder optischen Signalen sind in Tabelle 5.4 zusammengestellt.

Tabelle 5.4 Sensoreffekte für die werkstoff-, bauteil- und strukturintegrierte Sensorik

Kenn/Messgrößen von Strukturelementen	Sensoreffekte	
	elektrisches Signal	optisches Signal
mechanisch <ul style="list-style-type: none"> • Dehnung • Schwingung • Beschleunigung • Kraft • Druck 	<ul style="list-style-type: none"> • piezoelektrischer Effekt • piezoresistiver Effekt • Widerstandsänderung 	<ul style="list-style-type: none"> • Änderung der <ul style="list-style-type: none"> – Transmission – Wellenlänge – Phase – Laufzeit
chemisch-physikalisch <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Wärmefluss • Feuchte • O₂-Konzentration • ph-Wert 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermowiderstand • Thermoelektrischer Effekt • Elektrische Leitfähigkeit • Chemowiderstand 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluoreszenz • Änderung der <ul style="list-style-type: none"> – Transmission – Reflexion – Phase – Raman-Streuung – Brillouin-Streuung

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 Abschnitt 5.4.2 behandelt. Bild 5.57 nennt für optischen Si-Fasern die bei der Verwendung als Embedded Sensors wichtigen Kenndaten.

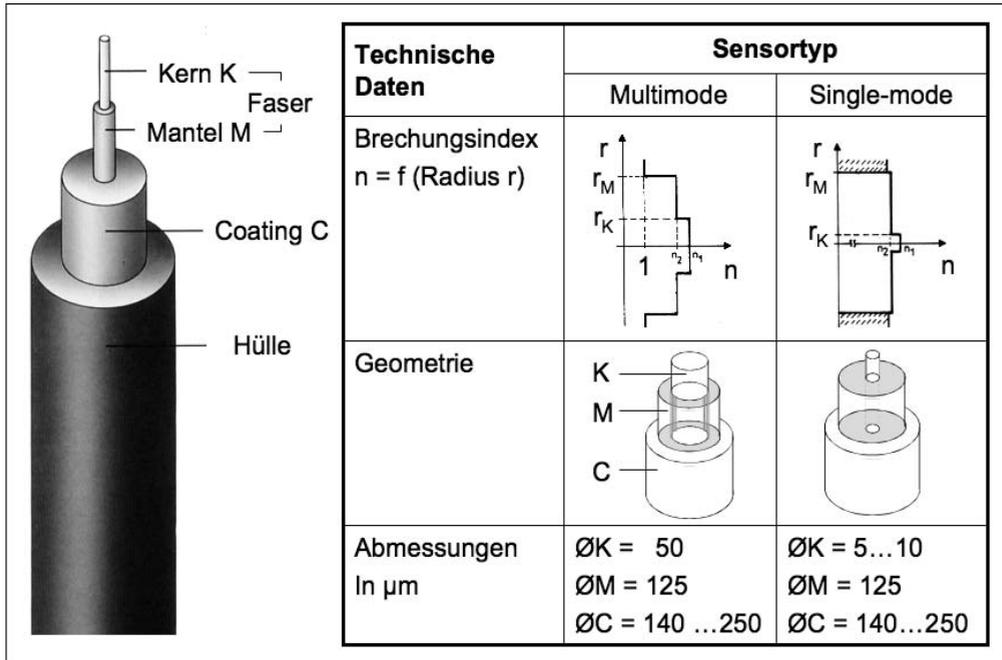


Bild 5.57 Kenndaten faseroptischer Sensoren, die als Embedded Sensors verwendet werden

Die technische Anwendung faseroptischer Detektoren in der strukturintegrierten Sensorik erfordert natürlich, dass sie in eine Messkette eingebunden werden, die jeweils aufgabenspezifisch auszulegen ist. Bild 5.58 zeigt dazu ein einfaches Prinzip.

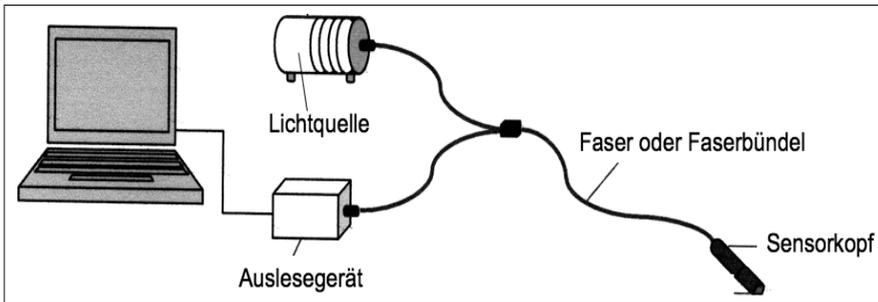


Bild 5.58 Prinzip einer faseroptischen Anordnung für die strukturintegrierte Sensorik

Ein wichtiger Anwendungsbereich von *embedded sensors* ist die Strukturmechanik. Mit eingebetteten Sensoren kann die strukturmechanische Funktionsfähigkeit technischer Systeme – die erfordert, dass die Festigkeit bzw. Tragfähigkeit eines Bauteils in allen Belastungssituationen größer sein muss als die äußere Beanspruchung – überwacht werden. Beispiele für die Integration von Sensoren in Bauteile unterschiedlicher Werkstoffklassen illustriert Bild 5.59. Die Anwendung der strukturintegrierten Sensorik zur sicherheitstechnischen Überwachung baulicher Anlagen ist in Bild 5.60 am Beispiel einer Deichanlage illustriert.

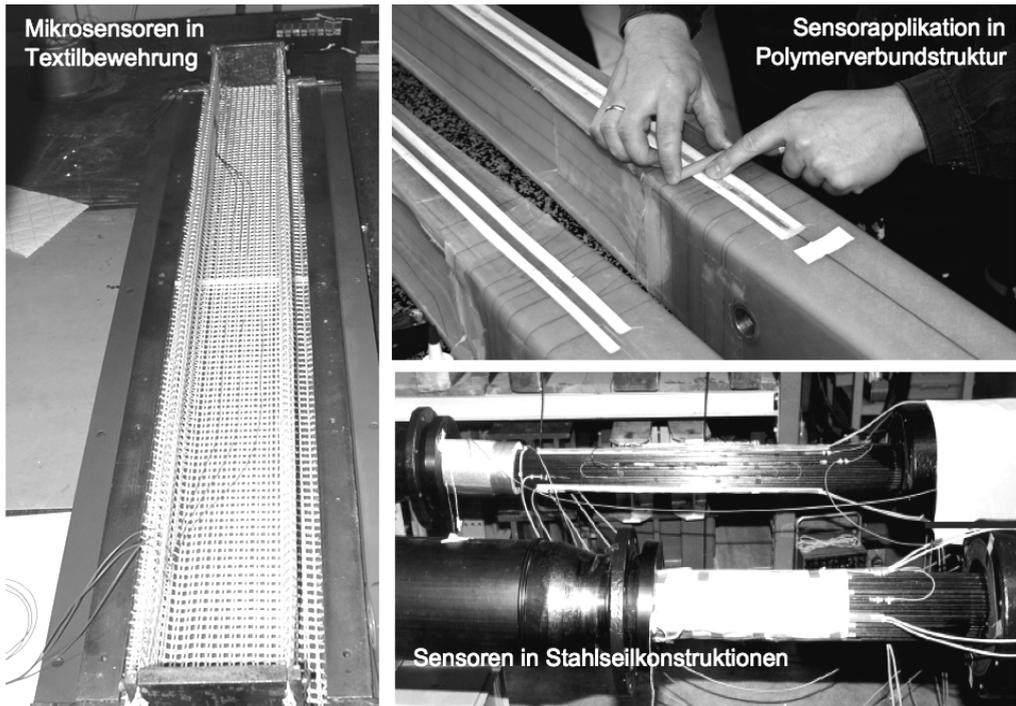


Bild 5.59 Applikation von Embedded Sensors in Bauteile unterschiedlicher Materialkategorien

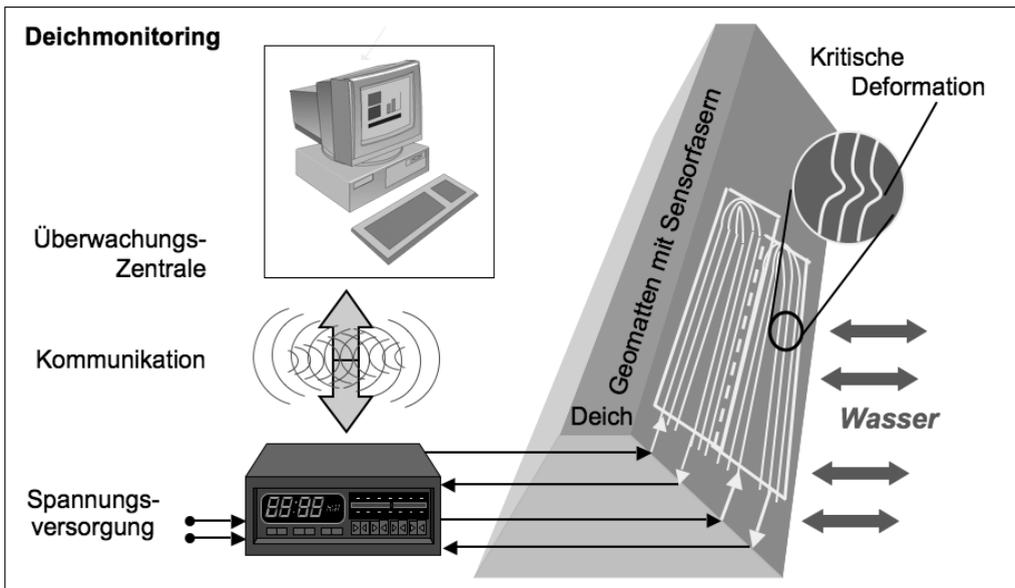


Bild 5.60 Strukturintegrierte Sensorik zur Überwachung technischer Anlagen, Beispiel

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. Bild 5.61 zeigt dazu ein messtechnisches Konzept mit einer Messfaser und einer Referenzfaser zur Kompensation von Temperatureinflüssen nach dem Prinzip des Michelson-Interferometers (vgl. Bild 5.31).

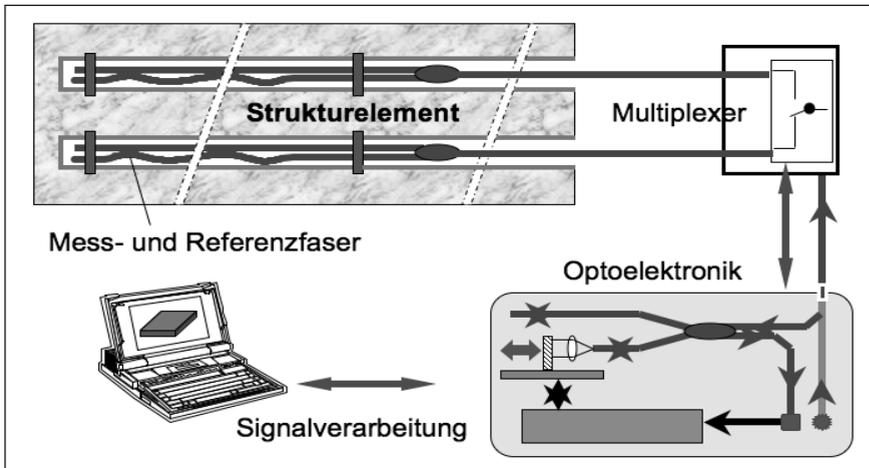


Bild 5.61 Messaufbau eines faseroptischen Systems, Michelson-Interferometer-Prinzip

5.9 Mikrosensorik

In der Mechatronik werden Sensoren häufig in miniaturisierter Ausführung benötigt, insbesondere für die im vorhergehenden Abschnitt behandelten Embedded Sensors. 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 Zeitauflösung. Mikrosensoren lassen sich außerdem zusammen mit der Mikroelektronik auf einem gemeinsamen Substrat zu kompakten Sensor-Modulen integrieren. Herstellungstechnologien für Mikrosensoren sind in Kapitel 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 mikromechanischer Herstellungsverfahren (siehe Kapitel 9.3) auf die im Abschnitt 5.5 behandelten Prinzipien der Sensorik kinematischer Größen (vgl. Bild 5.21) 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 Kapitel 13. Die Prinzipien der

Magnetoelektronik und ihre Anwendung in der mechatronischen Sensorik wurden bereits in Abschnitt 3.3 erläutert. Bild 5.62 zeigt den Aufbau magneto-resistiver Mikro-sensoren vom Typ AMR (Anisotrop Magneto Resistive) und GMR (Giant Magneto Resistive) und erläutert vergleichend ihre Funktionen.

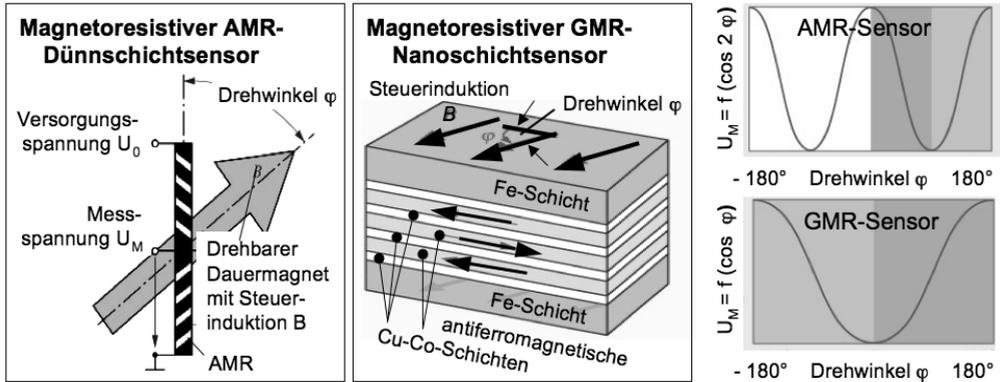


Bild 5.62 Aufbau und Funktion magneto-resistiver Mikro-Drehwinkelsensoren

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 Drehwinkel φ 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 φ ab. Damit ist mit GMR-Sensoren die Bestimmung von Drehwinkeln über volle 360° möglich, siehe Bild 5.62 rechts.

Mikrosensoren für dynamische Größen

Nahezu ein Viertel des Weltmarktes für Si-Mikrosysteme entfiel im Jahre 2005 auf Drucksensoren, ein weiteres Sechstel auf Beschleunigungs- und Drehratesensoren.

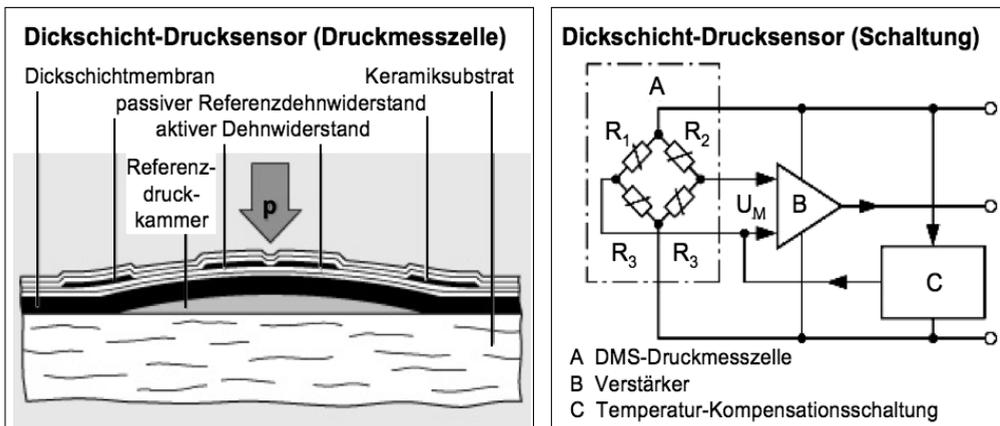


Bild 5.63 Drucksensor nach dem Piezowiderstandsprinzip, realisiert in Volumenmikromechanik

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). Bild 5.63 zeigt den Aufbau und die Messschaltung eines Mikrodrucksensors, vgl. dazu auch die Übersicht über die Drucksensorik in Bild 5.49.

Beschleunigungs- und Drehratesensoren erfassen die Beschleunigung a , wie in Abschnitt 5.5.4 dargestellt, indirekt über die Auslenkung einer seismischen Testmasse m infolge der Newtonschen Trägheitskraft $F = m \cdot a$. Das Prinzip eines kapazitiven Mikrobeschleunigungssensors und seinen mikrostrukturellen Aufbau zeigt Bild 5.64.

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

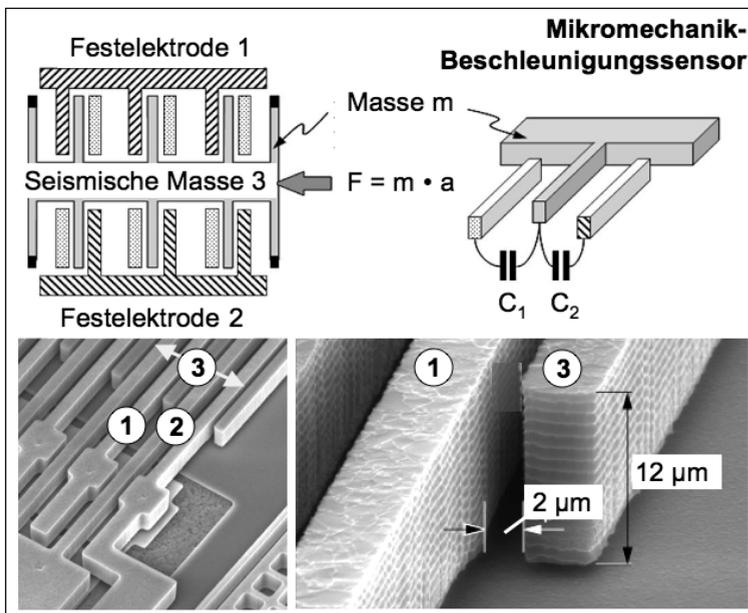


Bild 5.64 Kapazitiver Mikromechanik-Beschleunigungssensor

Mikrosensoren für thermische Größen

Die Temperatur ist die wichtigste Einflussgröße und häufig auch eine Prozessgröße mechatronischer Systeme. Die in Abschnitt 5.7.1 dargestellten Sensorprinzipien zur Temperaturmessung – Thermoelemente, Widerstandsthermometer, Pyrometersensoren – lassen sich sämtlich miniaturisieren. Ausführungsbeispiele von Mikrosensoren für die Temperatur wurden bereits in Abschnitt 5.7 dargestellt, siehe Bild 5.51 (Nano-Thermoelement) und Bild 5.52 (Mikro-Widerstandsthermometer).

Widerstandsthermometer auf Halbleiterbasis nutzen entweder die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit homogener Halbleiterproben oder aber die Temperaturab-

hängigkeit 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 ρ 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.

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 Al_2O_3 eingebettet und mit einem Edelstahlmantel umhüllt sind. Außendurchmesser von weniger als 3 mm sind dabei realisierbar. Die folgende Übersicht nennt Daten international vereinbarter Referenz-Thermoelemente.

Typ	Materialpaarung	T_{max} (°C)	Empfindlichkeit ($\mu V/^\circ C$) bei		
			20°C	100°C	500°C
E	NiCr / CuNi	870	60,5	67,5	81,0
K	NiCr / NiAl	1200	40,3	41,4	42,7
R	PtRh / Pt	1400	5,9	7,5	10,9

Die pyrometrische Temperatursensorik (vgl. Bild 5.53) kann durch mikrotechnologische Herstellungsverfahren zur thermischen Bilderfassung erweitert werden. Das Prinzip einer einfachen Infrarot-Kamera ist in Bild 5.65 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, Bild 5.51). 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, siehe Kapitel 6.6.2) können unter Verwendung eines Temperatur-Referenzsensors Bilder von flächenhaften Temperaturverteilungen gewonnen werden.

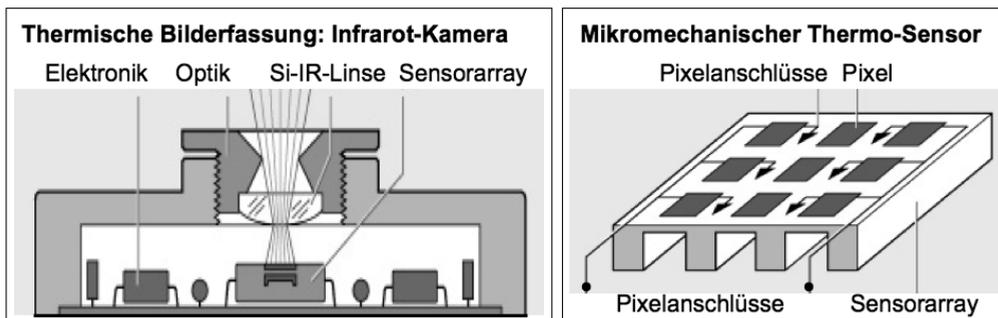


Bild 5.65 Prinzip einer einfachen Infrarot-Kamera zur thermischen Bilderfassung

5.10 Sensorsignalausgabe

Die mit den verschiedenen Sensoren in mechatronischen Modulen oder Systemen erfassten Messsignale sind am Sensorausgang in aufgabengerechter Form abzugreifen, zu speichern, darzustellen, auszudrucken oder weiter zu verarbeiten. Bild 5.66 zeigt nochmals den Zusammenhang zwischen einer gesuchten Messgröße und dem elektrischen Sensor-Ausgangssignal.



Bild 5.66 Eingangs- und Ausgangssignalkennzeichen von Sensoren

Die für gesuchte Messgrößen X – z. B. *Position, Länge, Weg, Winkel, Dehnung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Druck, Temperatur, Feuchte* – von Sensoren in elektrische Größen gewandelten Ausgangssignale Y – z. B. *Widerstand, Spannung, Strom, Ladung* – sind in Tabelle 5.1 (S. 61) in Matrixform zusammengestellt. Die elektrischen Sensorausgangssignale können Funktionen von statischen oder dynamischen Variablen mit wert/zeit-kontinuierlichen oder wert/zeit-diskreten Verläufen sein:

- 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 nach Bild 5.67 den Signaldurchlauf durch eine sensortekhnische Messkette, so gibt es – nach einer geeigneten Signalaufbereitung – für die aufgabenbezogene Nutzung von Sensorausgangssignalen folgende Möglichkeiten:

- Nutzung für Aufgaben der Aktorik (siehe Kap. 6) oder der Regelung (siehe Kap. 4)
- Nutzung für informationstechnische Aufgaben mittels BUS, Speicher, PC
- Signalanalyse: Bestimmung von Amplituden- und Frequenzmerkmalen
- Anzeige in digitaler oder analoger Form
- Ausdruck in digitaler oder analoger Form.

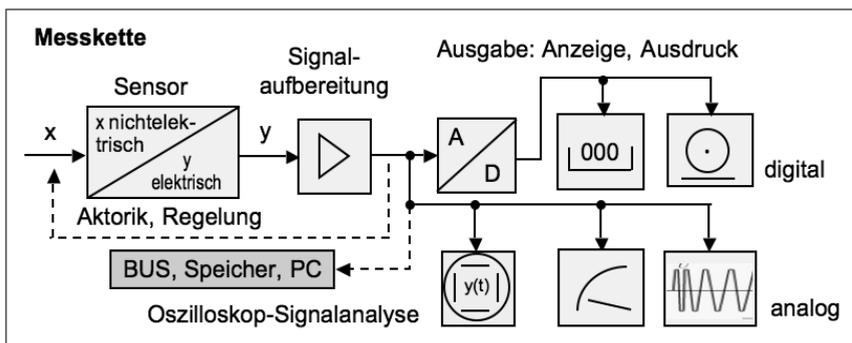


Bild 5.67 Sensortekhnische Messkette und die Möglichkeiten der Sensorsignalnutzung

Die in Bild 5.67 zusammengestellten Möglichkeiten der Sensorsignalnutzung müssen natürlich für den jeweils vorliegenden konkreten Anwendungsfall speziell ausgelegt und optimiert werden. Sensorausgangssignale können gemäß Tabelle 5.1 unterschiedlicher elektrischer Natur sein. Für Signalanalysen bzgl. Amplituden- und Frequenzverläufen sowie für die Anzeige und den Ausdruck von Sensorsignalen stehen die bekannten und heute mit hoher Empfindlichkeit und Präzision anwendbaren Methoden, Verfahren und Geräte der *Elektrischen Messtechnik* zur Verfügung. Da es über elektrische Messgeräte – Oszilloskope, Digitalvoltmeter, Schreiber, Drucker, etc. – eine sehr umfangreiche und über das Internet nach dem aktuellen Stand der Technik erschließbare Literatur gibt, sind im Folgenden nur einige Stichworte zu den in Bild 5.67 verwendeten Begriffen der Sensorsignalausgabe aufgeführt:

- *Signalanalyse*: Zur Analyse von Sensorsignalen im Hinblick auf ihre Amplituden- und Frequenzmerkmale dienen traditionell Oszilloskope. Das *Elektronenstrahl-oszilloskop*, das klassische analoge elektronische Messgerät in Labor und Prüffeld, gestattet die Darstellung einer oder mehrerer Messgrößen in Abhängigkeit einer anderen Größe auf einem flächenförmigen Bildschirm. Besonders geeignet ist ein analoges Oszilloskop zur Darstellung periodischer Signalverläufe, da durch messsignalgesteuerte Auslösung (Triggerung) der Ablenkung des Elektronenstrahls ein stehendes Schirmbild erzielt werden kann. Die heutigen digitalen Echtzeit-Oszilloskope zeichnen sich durch Vorteile der leichten Speicherung, der Weiterverarbeitung und Analyse digitaler Daten sowie der Rekonfigurierbarkeit durch Software aus. Diese Oszilloskope können Sensorsignal-Ausgangsanalysen mit Bandbreiten von über 15 GHz durchführen.
- *Anzeige*: Die analoge Anzeige von elektrischen Sensorausgangssignalen kann traditionell mit *Messwerken*, den klassischen elektromechanischen Weg- oder Winkelanzeigern erfolgen. Sie basieren auf dem elektrodynamischen Prinzip: Auslenkung eines stromdurchflossenen elektrischen Leiters in einem Magnetfeld durch die Lorentzkraft. Bild 6.3 zeigt das Funktionsprinzip mit den formelmäßigen Zusammenhängen. *Digitalvoltmeter* sind im Prinzip mit einer Ziffernanzeigeinrichtung kombinierte Analog-Digital-Umsetzer für elektrische Signalgrößen; Kapitel 6.6.1 gibt dazu eine kurze Übersicht. Die Anzeigegegenauigkeit ist im Allgemeinen höher als bei analoger Anzeige mit Zeigerinstrumenten; sie beträgt ± 1 Einheit der letzten Digitalstelle. Unter Berücksichtigung eventuell nichtidealer Eigenschaften des Verstärkers liegt die relative Messabweichung bei etwa 0,5 % des Messbereichs für einfache Instrumente und bei 10^{-4} bis 10^{-5} für Präzisionsgeräte.
- *Ausdruck*: Der *Ausdruck* von Sensorsignalverläufen erfolgt heute meist mit *Tintenstrahldruckern* oder *Laserdruckern*. Die piezoelektrischen und elektrothermischen Prinzipien von Tintenstrahldruckern sind in Bild 6.11 und 6.18 dargestellt. Laserdrucker gehören im Unterschied zu den Tintenstrahldruckern zu den so genannten Seitendrucker. Die Belichtung und der Druck erfolgen in einem Durchlauf. Der zentrale technologische Modul eines Laserdruckers ist die mit einem Photoleiter beschichtete Bildtrommel oder ein Endlosband. Laserdruckern liegt das Prinzip der Elektrofotografie (Xerox-Verfahren) zugrunde.

Neben einer Anzeige (z. B. auch mit *optoelektronischen Displays*) oder einem Ausdruck (*Hard Copy*) werden Sensorausgangssignale in mechatronischen Modulen und Systemen in vielfältiger Weise funktionell genutzt. Die für die mechatronische Regelungstechnik wichtige *Sensor/Aktor-Signalverarbeitung* wird in Kapitel 6.6.1 behandelt.

6 Aktorik

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.

Tabelle 6.1 Gliederung von Aktoren nach der für die Aktor-Funktion 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
	Magnetostraktiv	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

Aktoren steuern oder regeln technische Prozesse, ihre Funktion und technische Ausführung sind gemäß Bild 6.1 durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- 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.

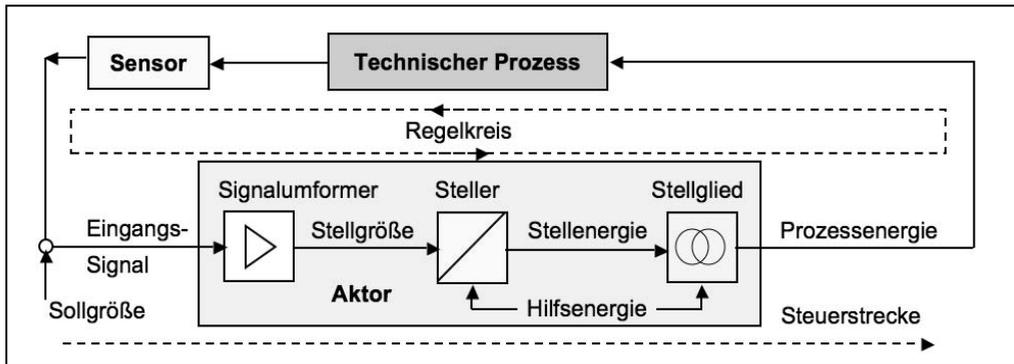


Bild 6.1 Der prinzipielle Aufbau eines Aktors und seine Funktion

6.1 Elektromechanische Aktoren

6.1.1 Funktionsprinzipien elektromechanischer Aktoren

Physikalische Grundlagen der elektromechanischen Aktoren sind das elektromagnetische und das elektrodynamische Prinzip, siehe Bild 6.2 und Bild 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 Mikroaktorking angewendet (Mikromotor, Elektrometer, Elektrostatischer Lautsprecher) siehe Abschnitt 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.

Elektromagnetisches Aktor-Prinzip

- Bei Elektromagneten (Eisenkern in einer Spule mit Strom i und Windungszahl N) treten an Trennflächen unterschiedlicher Permeabilität μ 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 Θ
- Feldstärke: $H = N i / l$
- Flussdichte $B = \mu H$ (max 2 Tesla)
- Die Wirkung geht vom Fluss aus
 $\Phi = B A$
- Kraft: ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$, $\mu_{Luft} = \mu$)
 $F = \Delta W / \Delta s = A B^2 / 2\mu$

Bild 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:
 $P_{mech} = P_{elektr} = F x = u i$
 $u(t) = B l \dot{x}$

Bild 6.3 Das elektrodynamische Prinzip und seine elementaren Kennzeichen

Durch die Kombination eines elektrodynamischen Aktors mit einem mechanisch zu bewegendem Element können mechatronische Bewegungssysteme aufgebaut werden, siehe Bild 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 Bild 11.11. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Mechatronische Waage mit elektromagnetischer Kraftkompensation, siehe Bild 10.9.

Elektrodynamischer Aktor: Elementarmaschine

• **Input** (elektrisch)
Spannungsbilanz:
 $u = u_R + u_L + 2 u_{ind}$,
wenn alle Größen orthogonal sind,
gilt mit $u_{ind} = B l \dot{x}$,
 $u = Ri + L di/dt + 2 B l \dot{x}$

• **Output** (mechanisch), z.B. Translation x , Kraft F eines Positioniertisches (Dämpfung d , Masse m , Feder k)
Bewegungsgleichung $F = m \ddot{x} + d \dot{x} + kx$

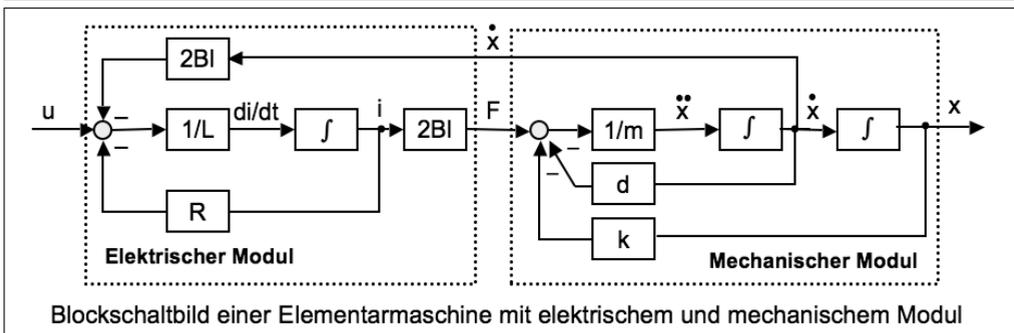


Bild 6.4 Das Prinzip einer mechatronischen Elementarmaschine

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 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:
 - Permanenterrgt: 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 permanenterrgt, 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 (Kommutatorless 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 Drehzahl verstellt 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 Makrotechnik bis hin zur Mikrotechnik. In Bild 6.5 sind die allgemeinen Merkmale von Gleichstrommotoren in einer vereinfachten Übersicht zusammengefasst.

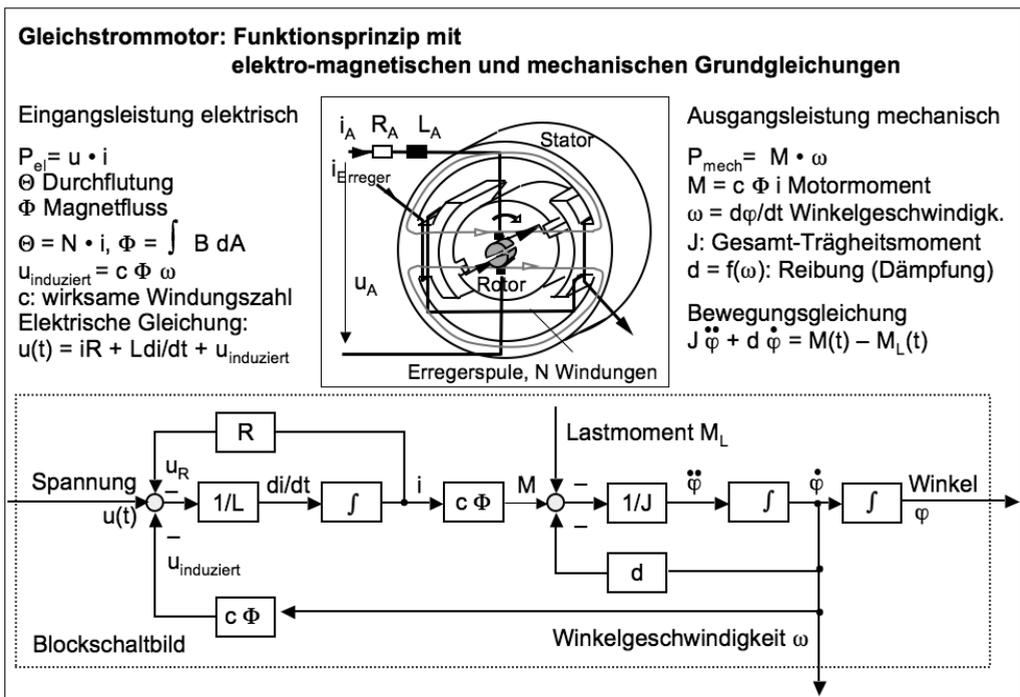


Bild 6.5 Funktionsprinzip, Grundgleichungen und Blockschaltbild eines Gleichstrommotors

Typische Anwendungsbereiche von Gleichstrommotoren reichen von Fahrzeugantrieben über Anlasser für Verbrennungskraftmaschinen zu Scheibenwischerantrieben 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 Abschnitt 6.8

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

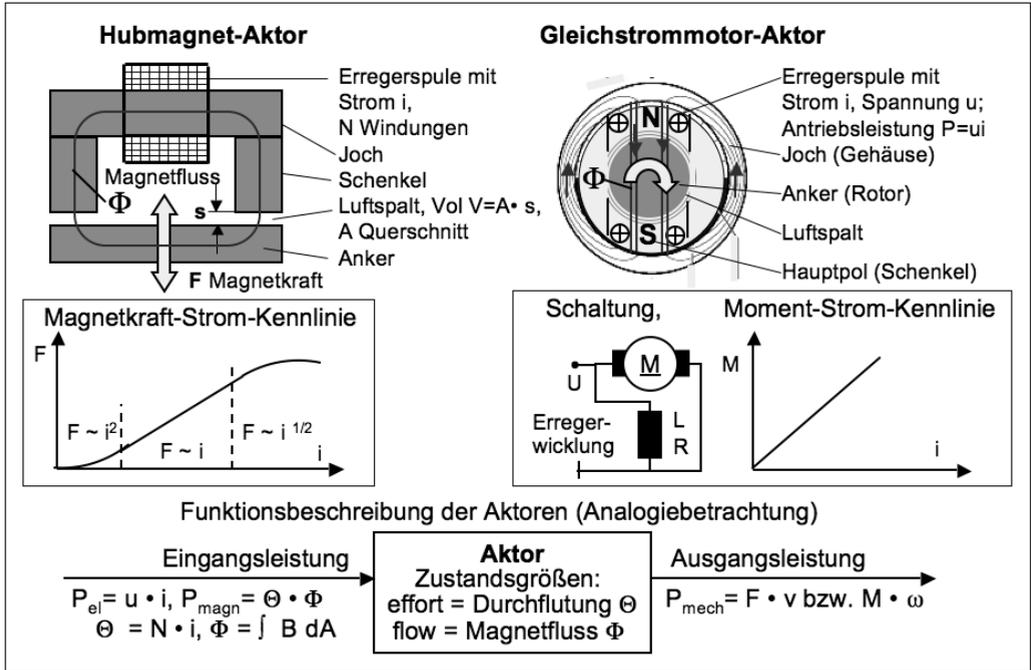


Bild 6.6 Aufbau und Kennzeichen von Aktoren: Analogiebetrachtung elektromagnetischer und elektrodynamischer Aktoren

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

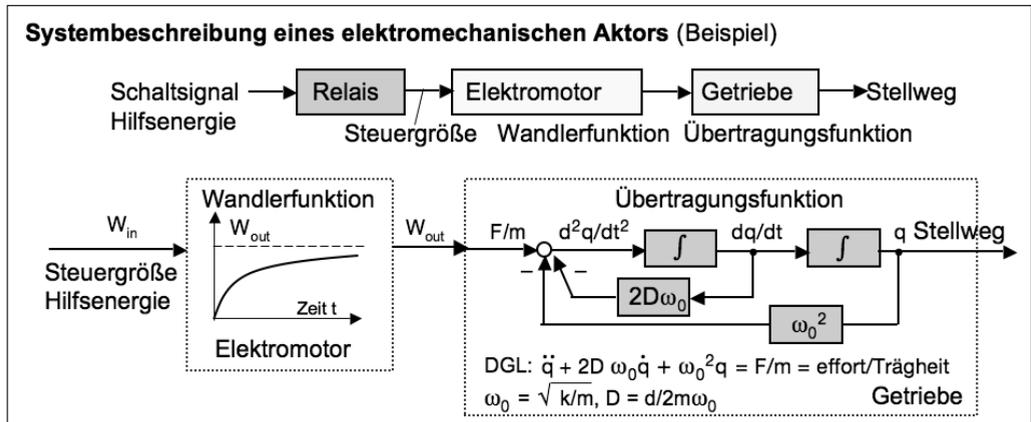


Bild 6.7 Elektromotor als Bestandteil eines mechatronischen Aktorsystems

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

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“)

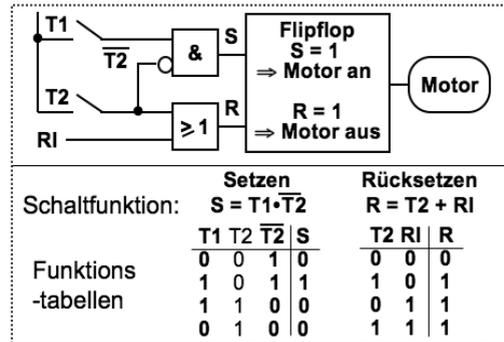


Bild 6.8 Beispiel einer einfachen Steuerungsfunktion für einen elektromechanischen Aktor

6.2 Piezoelektrische Aktoren

Bei bestimmten Festkörpern tritt bei Einwirkung einer mechanischen Spannung eine Verschiebung von Teilen der negativ geladenen Atomhülle gegenüber dem positiv geladenen 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 wird die Veränderung des Ladungszustandes durch eine mechanische Spannung für piezoelektrische Kraftsensoren genutzt (vgl. 5.7.1). Piezoelektrische Aktoren basieren auf dem inversen piezoelektrischen Transversal- oder Longitudinaleffekt, siehe Bild 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 μm -Bereich exakt positionierbar. In elektrischer Hinsicht sind sie reine Kapazitäten und verbrauchen nur im aktiven Betrieb elektrische Energie.

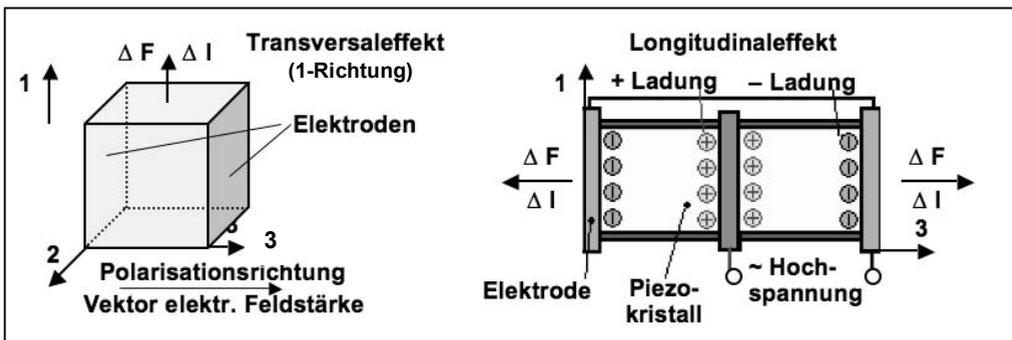


Bild 6.9 Der inverse piezoelektrische Effekt, Grundlage der Piezo-Aktoren

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

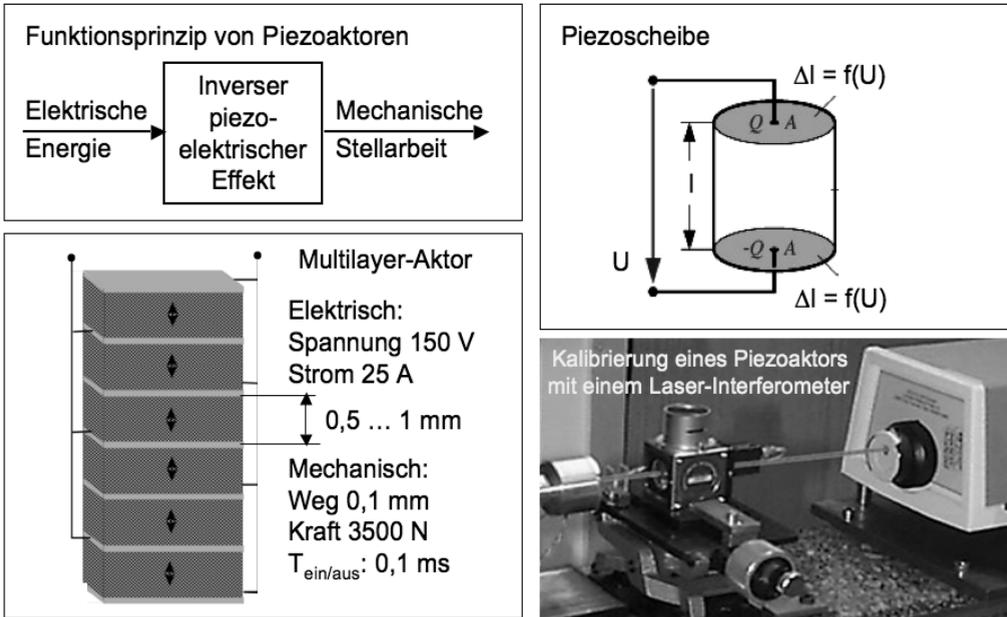


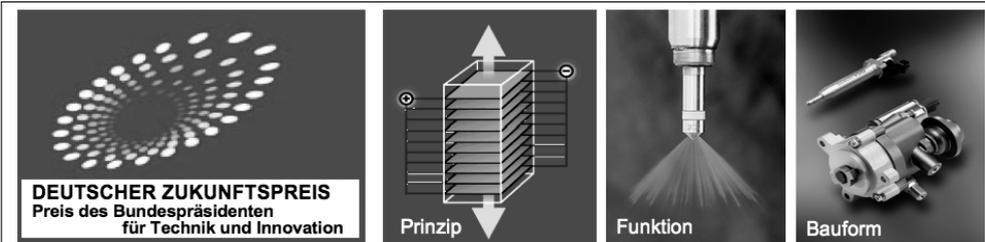
Bild 6.10 Piezelektrische Aktoren: Ausführungsarten, Kalibrierung, Anwendungsbeispiel

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
- Positioniergenauigkeit im Stellbereich < nm bis etwa 100 μm
- Steifigkeit: > 5 MN/mm für einen PZT-Aktor mit 100 μm Stellbereich
- Dynamik: Sprungantwort-Zeitkonstanten < 50 μs .

Die einzigartigen technischen Eigenschaften von Piezo-Aktoren haben die Entwicklung technischer Systeme von großer technisch-wirtschaftlicher Bedeutung ermöglicht, wie die Beispiele von Bild 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 elektro-thermische Fluid-Aktoren zur Anwendung, siehe Bild 6.18)



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.

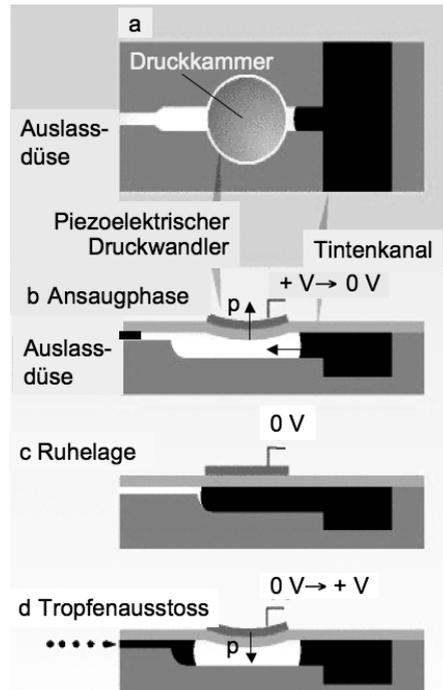


Bild 6.11 Technik-Innovationen durch Piezo-Aktorik: Motortechnik und Tintenstrahldrucker

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 Aktoren kann in Analogie zu der elektromechanischer Aktoren gesehen werden. Bild 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. Bild 2.6). Für Fluidik-Aktoren sind dies die Größen Druck und Volumenstrom.

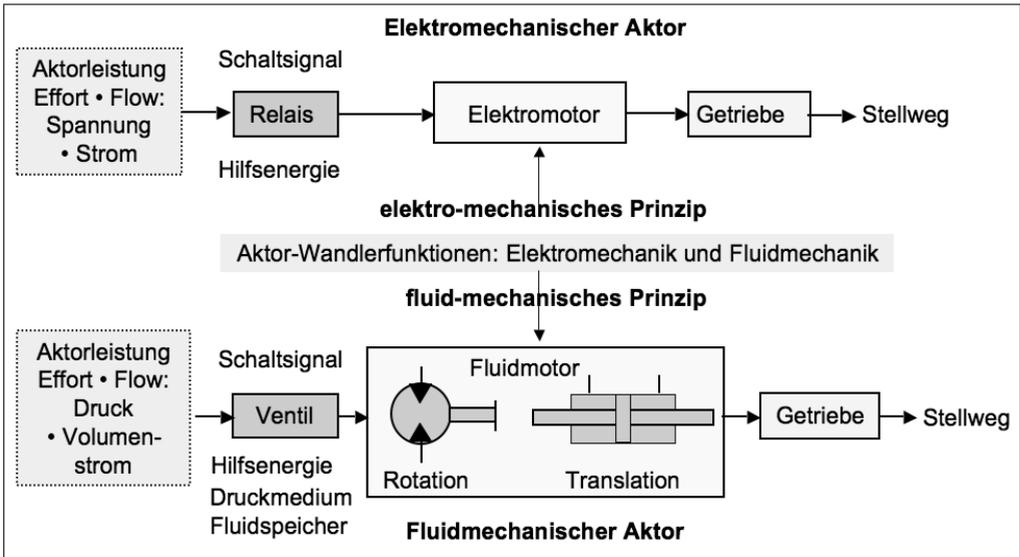


Bild 6.12 Analogiebetraachtung fluidischer und elektromechanischer Aktoren

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 Bild 6.13 in einfachen Darstellungen wiedergegeben.

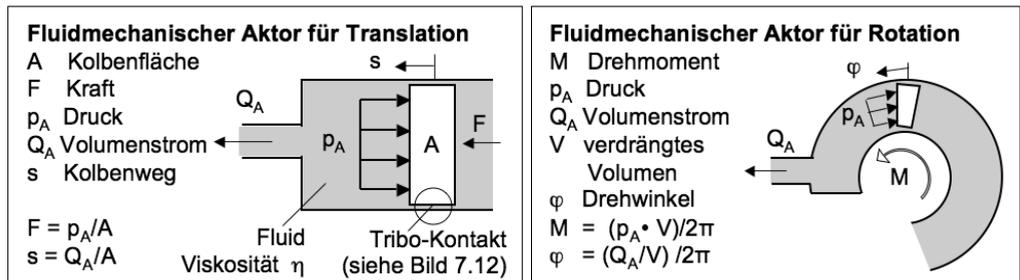


Bild 6.13 Prinzipdarstellungen fluidmechanischer Aktoren für Translation und Rotation

Fluidmechanische Aktoren sind rheologisch-tribologische Systeme, siehe Kapitel 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. Bild 6.14 zeigt als charakteristisches Beispiel einen pneumatischen Stellmotor.

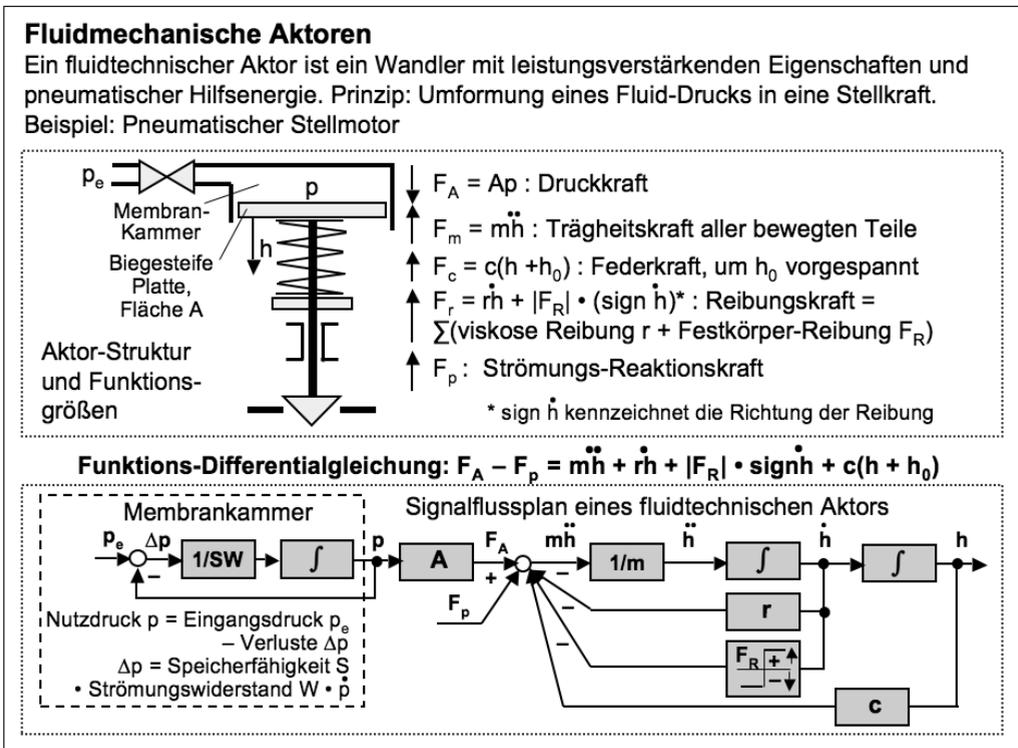


Bild 6.14 Pneumatischer Stellmotor als Beispiel eines fluidmechanischen Aktorsystems

6.4 Thermomechanische Aktoren

Thermomechanische Aktoren operieren im Unterschied zu den behandelten elektromechanischen, piezoelektrischen und fluidmechanischen Aktoren mit thermischer Aktor-Stellenergie. 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.

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 Bild 6.15.

Typische Dehnstoff-Aktor-Kenndaten :

Hubbereich s	5...25 mm
Stellkraft F	250...1500 N
Arbeitstemperatur	- 20...+120 °C
Reaktionszeit	8...50 s

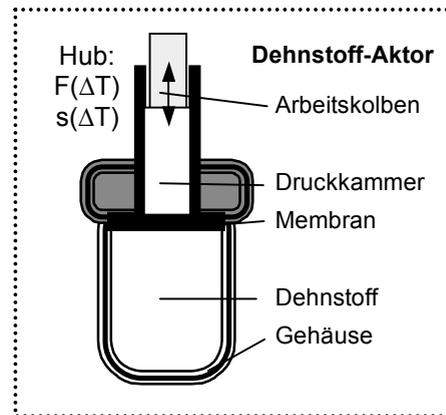


Bild 6.15 Aufbau eines Dehnstoff-Aktors

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 Bild 6.16.

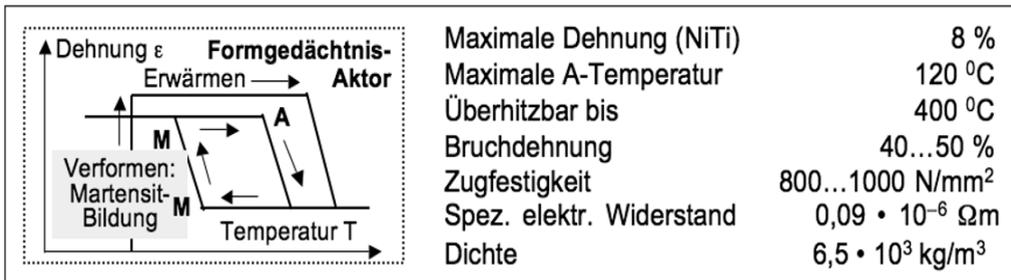


Bild 6.16 Funktionsprinzip und typische technische Daten von Formgedächtnis-Aktoren

Thermobimetall-Aktoren

Thermobimetall-Aktoren sind Schichtverbundwerkstoffe aus mindestens zwei miteinander verbundenen Komponenten mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, siehe Bild 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 temperaturgesteuert mechanische Energie speichern und mit aktorischer Wirkung von Auslenkungen oder Arbeitsleistung wieder abgeben.

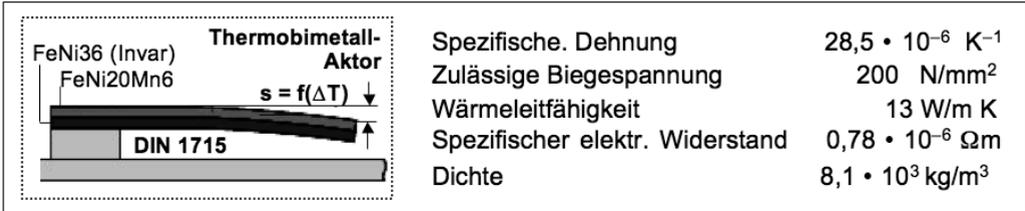


Bild 6.17 Aufbau und typische technische Daten von Thermobimetal-Aktoren

Elektrothermische Fluidaktoren

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

Durch einen elektrischen Spannungsimpuls wird in weniger als 10 μs an dem Heizelement eine Temperatur von etwa 500 °C erzeugt und die Tinte in der Düse impulsartig zum Sieden gebracht. Nach etwa 20 μs bildet sich eine geschlossene Dampfblase, die mit hohem Druck und hoher Fluggeschwindigkeit einen Tintentropfen aus der Düse austreibt. Die Blase kollabiert nach etwa 50 μs und saugt neue Tinte an, so dass nach etwa 250 μs ein neuer Funktionszyklus beginnen kann. Tintenstrahl-drucker mit diesem Aktorprinzip arbeiten mit getrennten Tintenpatronen für die drei subtraktiven Grundfarben Cyan, Magenta, Gelb sowie Schwarz.

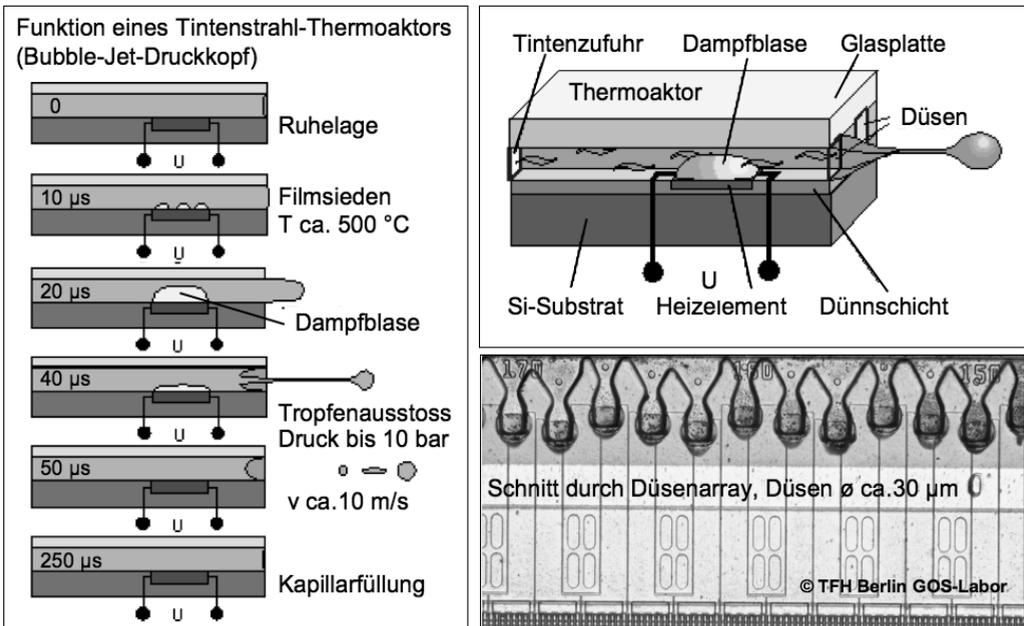
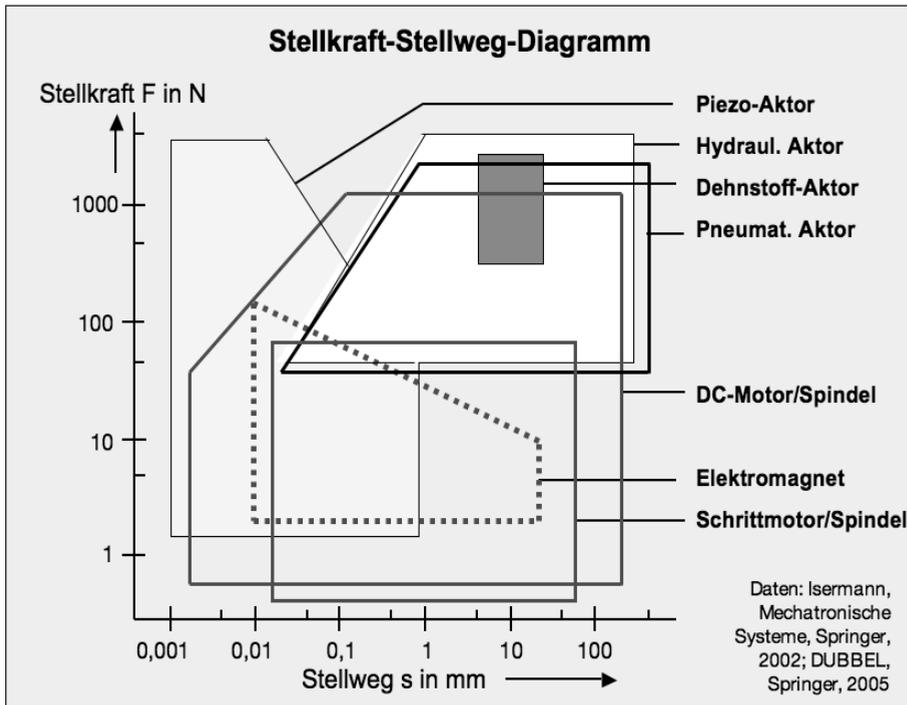


Bild 6.18 Elektrothermischer Fluidaktor für die Tintendrucktechnik: Funktion und Aufbau

6.5 Aktoreigenschaften und Kenndaten: Übersicht

Aktoren haben folgende Typenmerkmale, ihre Kenndatenfelder zeigt Bild 6.19:

- **Elektromagnetische Aktoren:** günstigstes Kurzhubelement (10 bis 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 1mm, Positioniergenauigkeit < 1 nm, Stellkraft 1 bis 5000 N, hohe Steifigkeit (z.B. 5MN/mm für 120 μ m-Aktor), Sprungantwort-Zeitkonstante < 50 μ s, 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 μ m, statisch genaue und dynamisch schnelle Aktoren durch *Fluidtronik*: Fluidik plus Elektronik.
- **Thermomechanische Aktoren:** temperaturgesteuerte, robuste Aktoren, benötigen keine elektrische Spannungsversorgung, geeignet für Schaltelemente (Bimetall), Zwei-Punkt-Regelungen (Formgedächtnis) und hohe Stellkräfte (Dehnstoff).



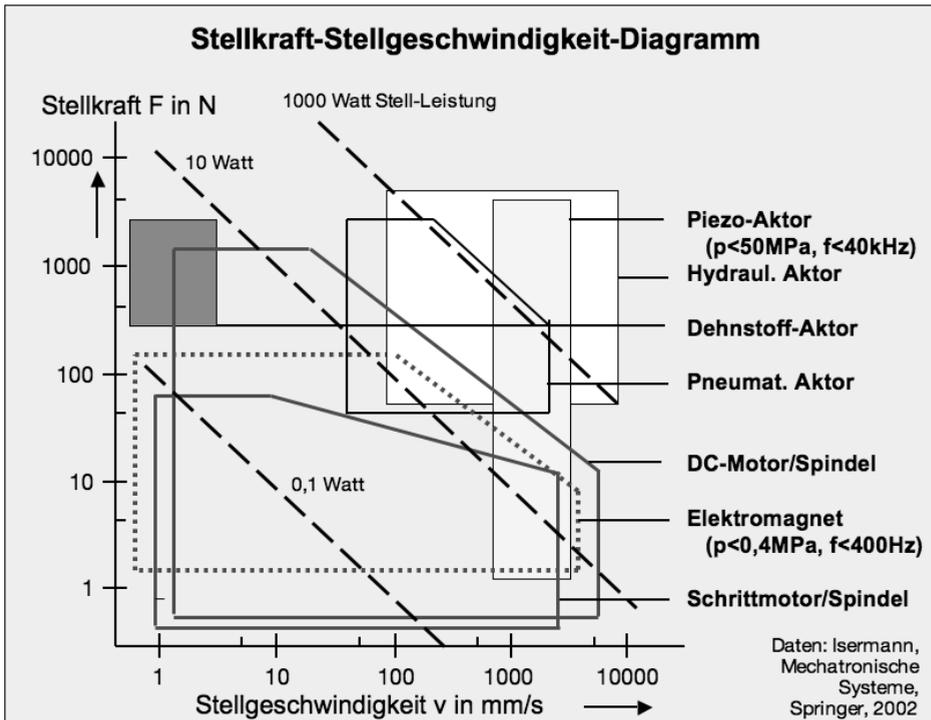


Bild 6.19 Kenndatenfelder von Aktoren

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 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 Bild 6.20. Eingesetzt werden dazu insbesondere auch *Microcontroller* und *Embedded Systems*, siehe Kapitel 3.4

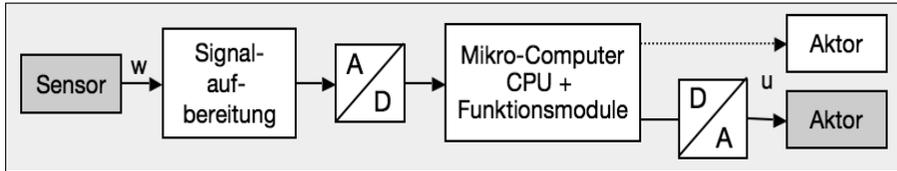


Bild 6.20 Prozessork-Elemente für das Zusammenwirken von Sensoren und Aktoren

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 Shannonsche Theorem erfüllt wird: Abtastfrequenz $> 2f_{\max}$. AD-Umsetzer unterscheiden sich durch die Wandlerstruktur:

- 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*-(σ - δ)-ADU arbeiten mit Integrator und Komparator, wobei die Zeit für den Ladevorgang und das Erreichen einer Komparatorschwelle für die digitale Impulsbildung herangezogen werden.
- *Rampverfahren* 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. Kapitel 3.4). Sie enthalten auf einem Chip:

- einen Mikroprozessor (μP)
- 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, vgl. S 31) dienen als standardisierte Schnittstellen für die Sensor-Aktor Kommunikation und ermöglichen im Zusammenwirken mit einer Zentraleinheit auch die Mehrfachnutzung von Leitungen.

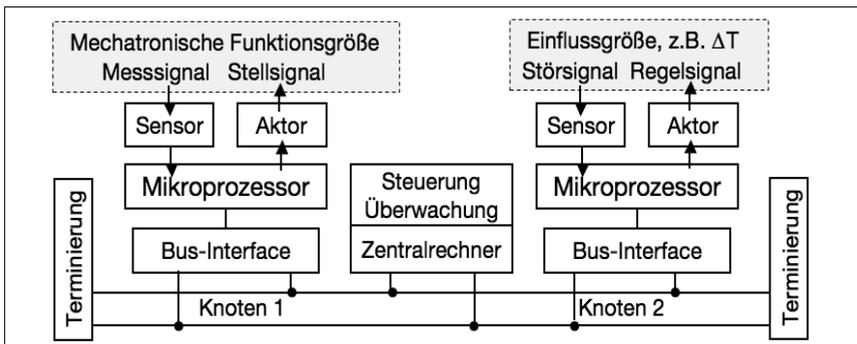


Bild 6.21 Prinzipieller Aufbau eines Bussystems für die Sensor/Aktor-Prozessorik

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. Bild 6.21 zeigt 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 μPs verarbeitet und zur Prozessregelung lokal für die Aktorbetätigung eingesetzt. Am Knoten 2 wird eine Störgröße (z.B. ΔT) gemessen, über ΔP 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-Reflexionsminimierung 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 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. 4.4) eingesetzt.

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

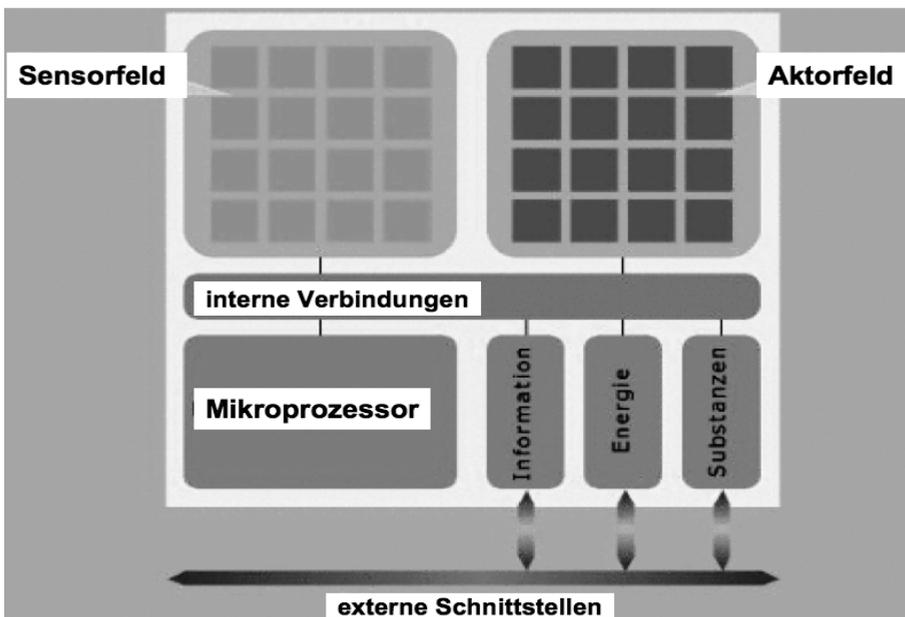


Bild 6.22 Prinzip der Vernetzung von Sensorik und Aktorik in der Mikrosystemtechnik

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 Bild 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 stör-sichere Einheit, die ggf. auch gemeinsam ausgewechselt werden kann.

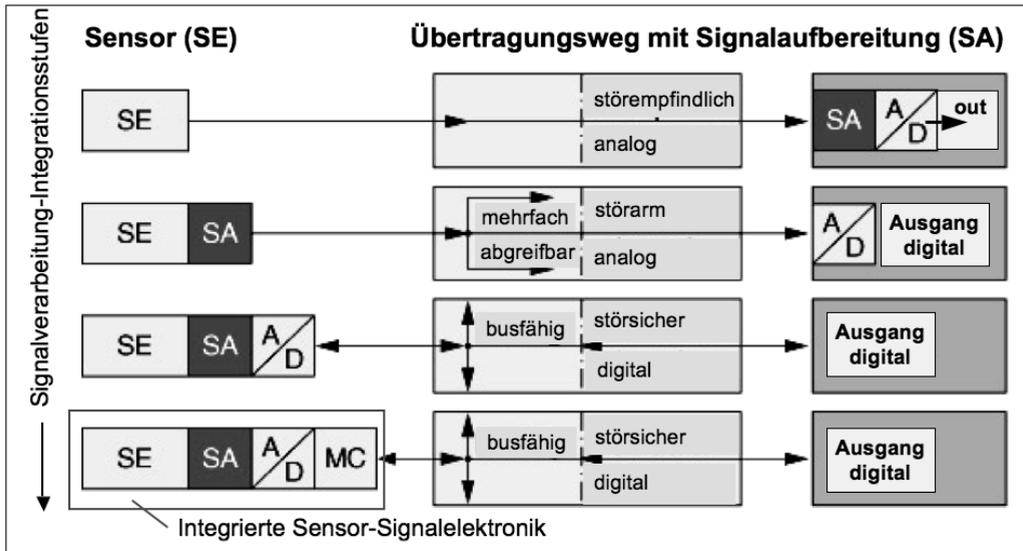


Bild 6.23 Integrationsstufen von Sensoren und Sensor-Signalaufbereitung

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

ASIC-Beispiel: Eliminierung des „Klopfens“ von Kfz-Motoren mit Mechatronik

Die bei einem Motorklopfen auftretenden Körperschallsignale (5 ... 15 kHz) werden mit vier Beschleunigungssensoren am Motorblock gemessen, durch ASIC in Aktorsignale umgeformt und einem Steuergerät zugeführt. Das Steuergerät als Teil des Sensor/Aktor-Regelsystems verschiebt den Zündzeitpunkt des Motors bis das Klopfen aufhört.

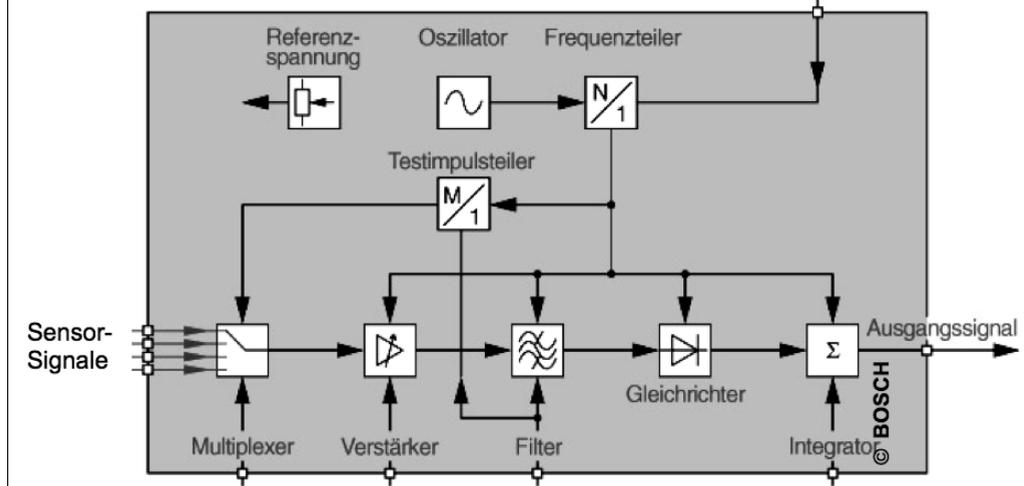
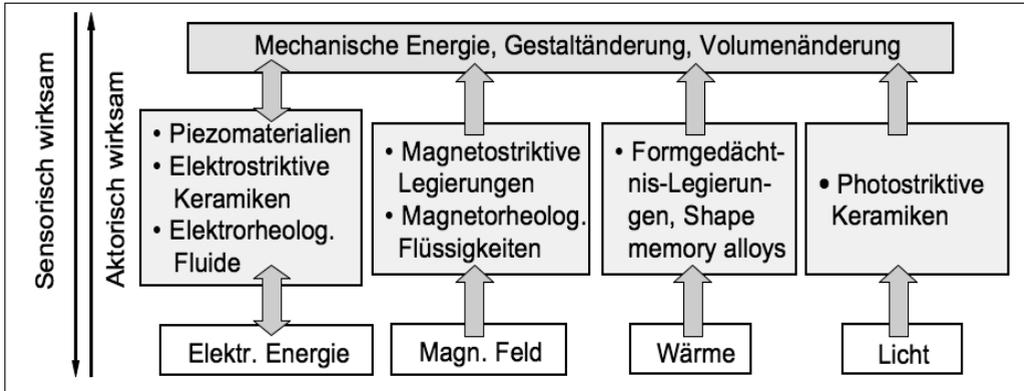


Bild 6.24 Beispiel der Anwendung von Application Specific Integrated Circuits /ASIC)

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 Bild 6.25.



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)
Elektrorheologische 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 °C und $\Delta s = - 5$ bis $- 8$ % bei 19 bis 9 °C, Aktivierungsfrequenz < 2 Hz

Bild 6.25 Übersicht über Multifunktionswerkstoffe für adaptronische Strukturelemente

Die in Bild 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 Bild 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 Prozessork mit zugehörigen elektronischen Schaltungen, Bausteinen und Modulen zu ergänzen.

- ◆ **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 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.

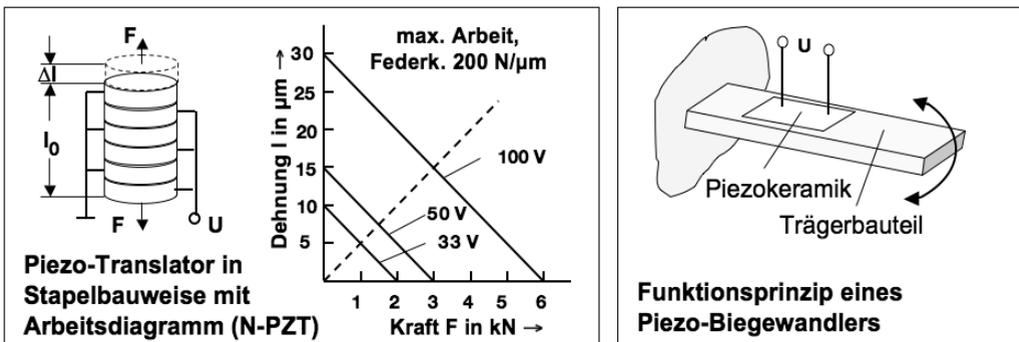


Bild 6.26 Modell eines Piezo-Biegewandlers für die Adaptronik

6.8 Mikroaktork

In der Mechatronik werden Aktoren, wie auch Sensoren (vgl. Kapitel 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 Kapitel 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 aktorisch zu bewegender Bauteile noch nicht relevant waren. Eine wichtige Auswirkung der Miniaturisierung von Aktoren sind insbesondere steigende Adhäsion

sionskräfte zwischen Aktor und zu bewegendem Bauteil in Form elektrostatischer Kräfte und van-der-Wals Kräfte. Sie können bewirken, dass sich Bauteile nicht mehr allein von der Berührerfläche 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 Abschnitt 6.1 behandelten 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 Coulombschen 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. Bild 6.27 zeigt das Beispiel eines elektrostatischen *Kamm-Aktors* für Translationsamplituden bis zu etwa 100 μm 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 Mikroswitcher, Mikroventile oder Mikromotoren.

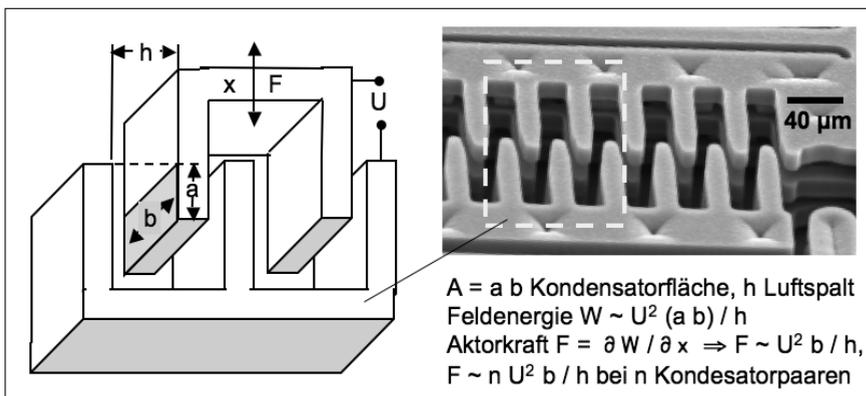


Bild 6.27 Elektrostatischer Mikroaktor für Translationsbewegungen

Neben den elektrostatischen Wirkprinzipien wird in der Mikroaktorik für Bewegungsvorgänge insbesondere der in Kapitel 6.2 mit seinem Funktionsprinzip und 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. Bild 6.28 zeigt auf der linken Seite einen bimorphen Piezo-Biegewandler, der aus zwei gegensinnig polarisierten Piezokeramiken mit positiver und negativer Dehnung ε aufgebaut ist. Auf der rechten Seite ist ein piezogetriebener, federgelagerter Positioniertisch dargestellt, wie er zur nanoskaligen Positionierung von Rastertunnelmikroskopen eingesetzt wird (vgl. Bild 8.5).

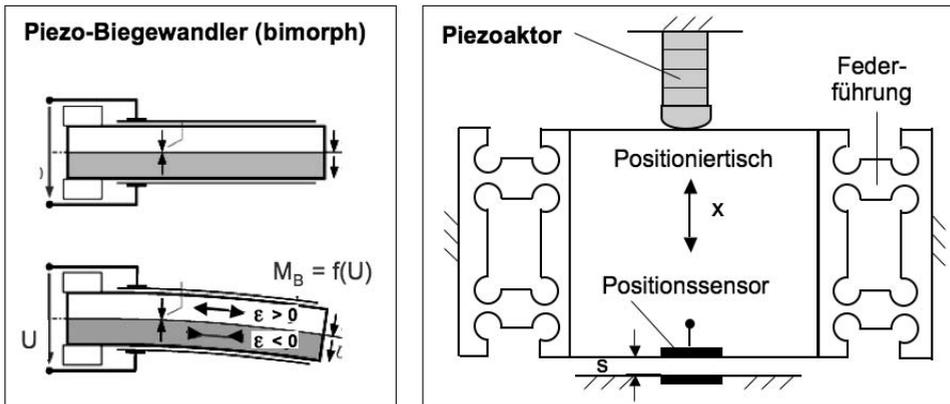


Bild 6.28 Beispiele von Mikro-Piezoaktoren

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

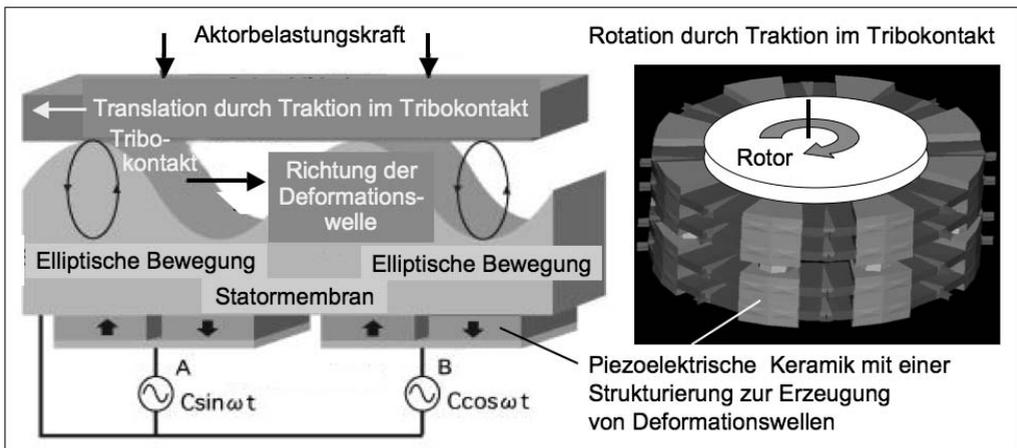


Bild 6.29 Prinzip eines piezoelektrischen Mikroantriebs für Translation und Rotation

Piezoelektrische Mikroaktoren arbeiten mit direktem Festkörper-Reibungskontakt (*Tribokontakt*) und sind tribologische Systeme, siehe Kapitel 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 Bild 6.11) bis hin zum nobelpreisgekrönten Rastertunnelmikroskop (siehe Bild 8.5) und zur Sonographie in der Medizintechnik (siehe Bild 15.6). Im anglo-amerikanischen Sprachgebrauch werden elektro-mechanische Mikroaktoren als *MEMS* (Micro Electro-Mechanical Systems) bezeichnet. Beispiele von MEMS und ihre Anwendung in der Mikropositionierungstechnik sind in Kapitel 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.

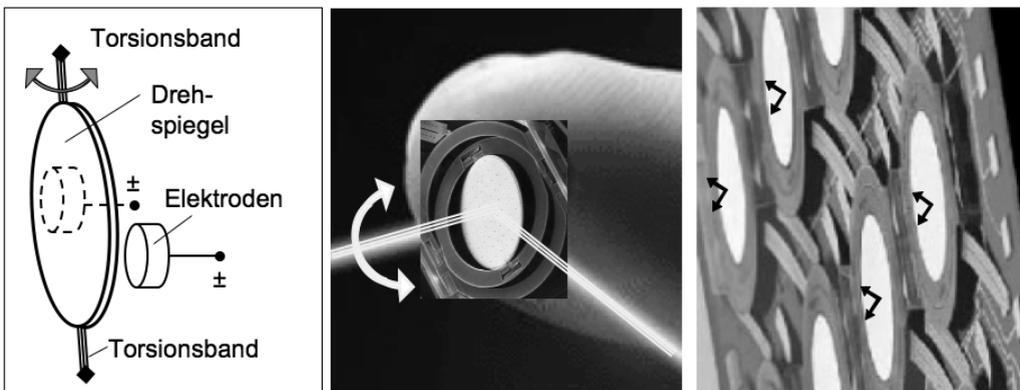


Bild 6.30 Beispiel der optoelektronischen Positionierung informationstragender Strahlung

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 Anwendungserfordernis lassen sich damit sehr vielfältige *MOEMS* (*Micro Opto-Electrical-Mechanical Systems*)-Aktorsysteme realisieren, siehe Kapitel 8.1. Wie in Bild 6.30 vereinfacht dargestellt, kann beispielsweise zur Abbildung bzw. zum Positionieren von Lichtstrahl-

len ein elektrodengesteuerter Silizium-Drehspiegel, der an zwei Torsionsbändern aufgehängt ist, verwendet werden. Bild 6.31 illustriert das Funktionsprinzip eines mit Mikro-Piezoaktoren gesteuerten flächenhaft arbeitenden Display-Systems.

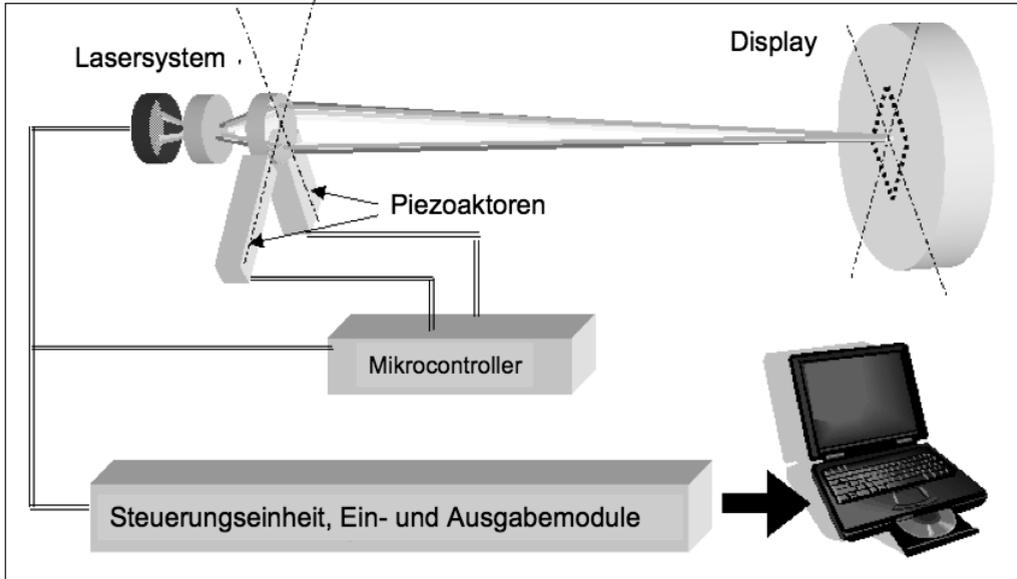


Bild 6.31 Beispiel eines optoelektronischen Mikroaktors mit piezoelektrischem Wirkprinzip

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 Kapitel 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) 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 Kapitel 9.2). Das Beispiel einer Mikropumpe mit elektrostatischem Antrieb zeigt mit einem Größenvergleich Bild 6.32.

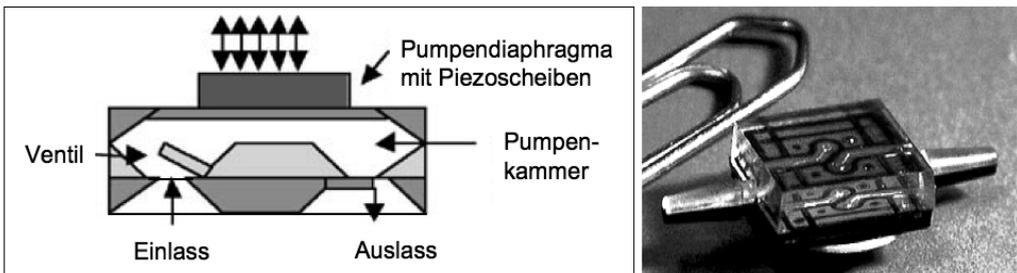


Bild 6.32 Beispiel einer Mikropumpe mit elektrostatischem Mikroaktorprinzip

7 Maschinenbau

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.

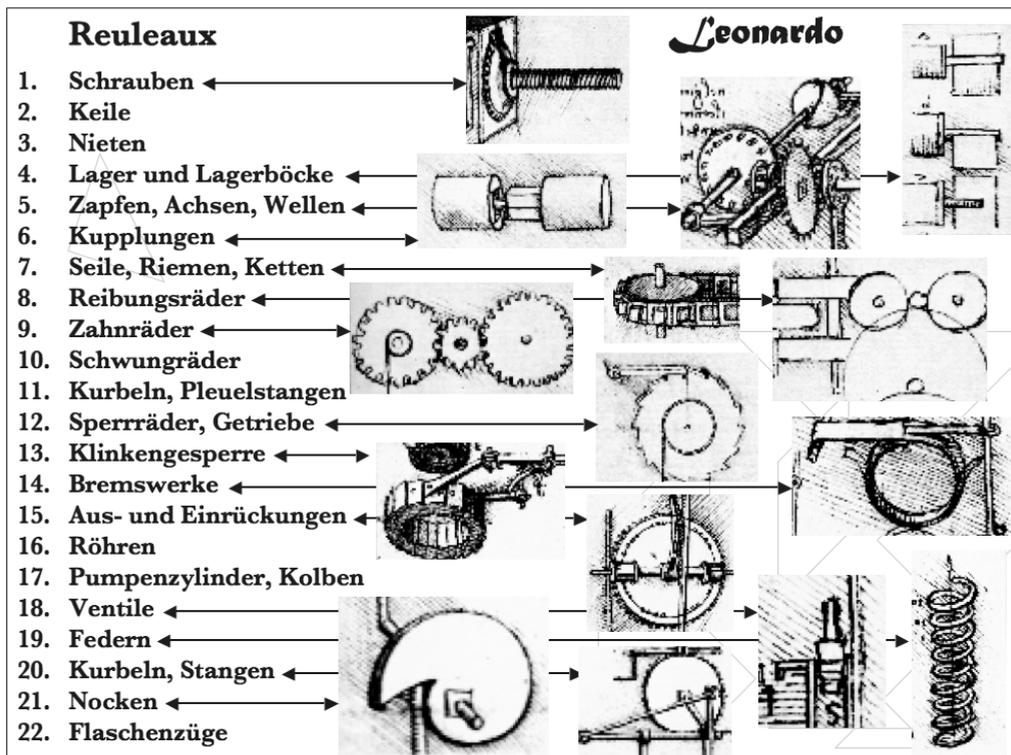


Bild 7.1 Historische Darstellungen der klassischen *Mechanismen von Maschinen*

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 Bild 7.2.

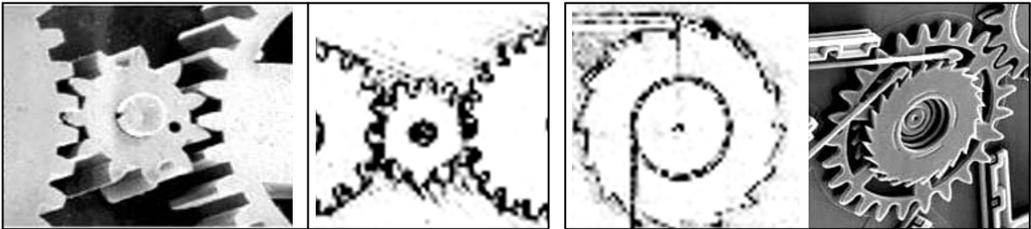


Bild 7.2 Beispiele mikromechanischer Zahnräder und Getriebe, (Rasterelektronenmikroskopie, 100-µm-Maßstab) im Vergleich zu den Skizzen Leonardo da Vincis (Nr.9 und 12 in Bild 7.1)

Die heutige Konstruktionssystematik gliedert nach *Funktion* und *Wirkprinzip*. Die grundlegenden Kategorien der Maschinenelemente gemäß der Systematik von Wolfgang Beitz (HÜTTE, Springer 2007) sind in Tabelle 7.1 zusammengestellt.

Tabelle 7.1 Die elementaren Kategorien der Maschinenelemente

Kategorie	Konstruktionselemente: Funktion und Wirkprinzip
Bauteilverbindungen	Feste Lagezuordnung von Bauteilen durch Form-Kraft(Reib)- oder Stoffschluss
Federn	Aufnehmen, Speichern und Übertragen mechanischer Energie (Kräfte, Momente, Bewegungen)
Lagerungen 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 zur 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 Mechatronische Maschinenelemente

Für die durch Maschinenelemente auszuführenden Funktionen der Mechanik

- Kinematik: Realisierung von Bewegungsvorgängen
- Kinetik: Bewegungsausübung im Zusammenhang mit Kräften
- Dynamik: Wechselwirkungen von Bewegungen und Kräften

kann die Mechatronik zur Funktionsoptimierung beitragen. Dies betrifft insbesondere

die Kategorien *Federn*, *Lagerungen*, *Kupplungen*, *Getriebe* der elementaren Maschinenelemente gemäß Tabelle 7.1 und wird mit Beispielen erläutert.

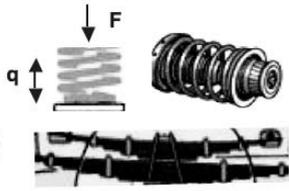
7.2.1 Mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul

Das Funktionsprinzip von Federn besteht in der Aufnahme, Speicherung und Übertragung mechanischer Energie, wie im oberen Teil von Bild 7.3 vereinfacht dargestellt.

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.

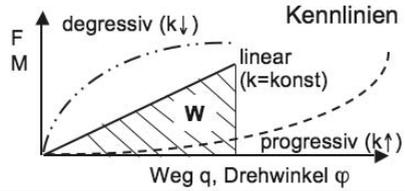


Ausführungsbeispiele

Wirkungen:

- Formänderungsarbeit: $W = \int F \cdot dq$
(F Kraft, M Moment) $W = \int M_T \cdot d\varphi$
- Federsteifigkeit: $k = F/q$
 $k_T = M_T / \varphi$
- Nachgiebigkeit: $\delta = 1/c$
- Federschaltungen:
 - Parallelschaltung: $F_{ges} = \sum F_i$
 $k_{ges} = \sum c_i$
 - Reihenschaltung: $q_{ges} = \sum q_i$
 $\delta_{ges} = \sum \delta_i$
- Dämpfung $\psi = \frac{\text{Verlustarbeit } \Delta W(q_i/q_{i+1})}{\text{Formänderungsarbeit } W}$

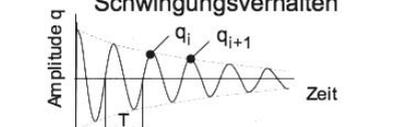
Kennlinien



degressiv ($k \downarrow$) linear ($k = \text{konst}$) progressiv ($k \uparrow$)

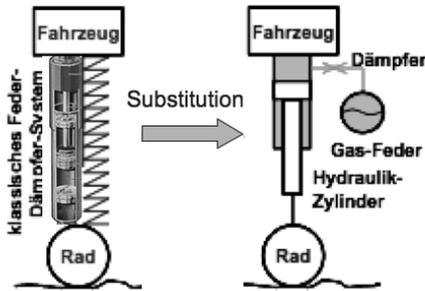
Weg q , Drehwinkel φ

Schwingungsverhalten



Abklingzeit $\tau = T \Lambda^{-1}$ mit $\Lambda = \ln(q_i/q_{i+1})$
T Periodendauer, Λ log. Dekrement

Mechatronischer Feder-Dämpfer Modul

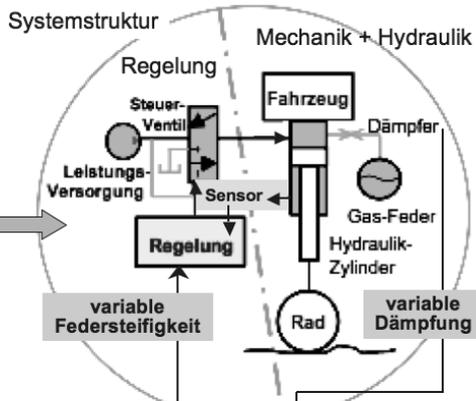


Substitution

Wirkprinzip mechatronischer Module: Substitution „passiver“ Elemente durch „aktive“ (geregelte) Elemente

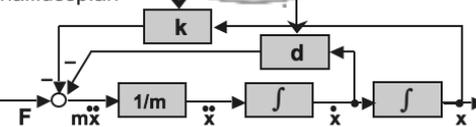
Funktions-DGL: $m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F$

Systemstruktur



Regelung, Sensor, Gas-Feder, Hydraulik-Zylinder, Dämpfer, Fahrzeug, Rad, variable Federsteifigkeit, variable Dämpfung

Signalflussplan



Block diagram showing force F input, mass $1/m$, damper d , spring k , and displacement x .

Bild 7.3 Konstruktionselement Feder (oben); mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul (unten)

Durch das Zusammenschalten von Federn mit Dämpfern lassen sich bekanntlich mechanische Module für vielfältige Aufgaben realisieren. Ihre mechanische Funktionalität ist in der herkömmlichen Modellbildung (vgl. Bild 3.9) 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. Kap. 14.1). Hierzu wird, wie in Bild 7.3 (unten) 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 natürlich mit größerem technischen Aufwand und höheren Systemkosten verbunden sind.

7.2.2 Automatisiertes Getriebe

Kupplungen und Getriebe sind Maschinenelemente für die mechanischen Funktionen des Schaltens und Übertragens mechanischer Energie. Sie verwenden dazu in der herkömmlichen Technik unterschiedliche Wirkprinzipien. Bild 7.4 zeigt eine Zusammenstellung herkömmlicher Module von Kupplungen und Getrieben

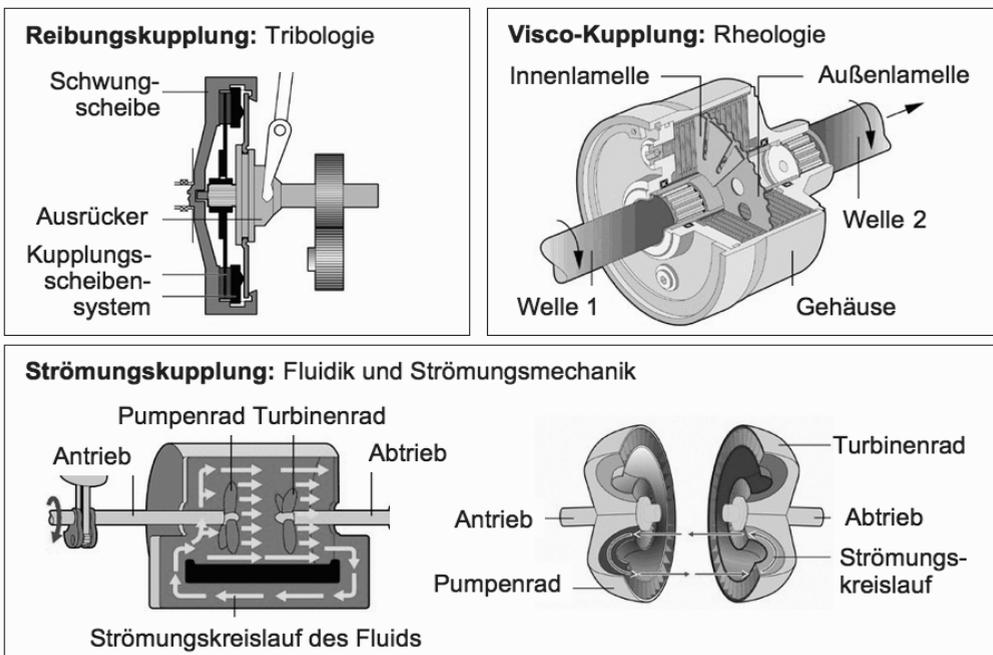


Bild 7.4 Wirkprinzipien zur technischen Realisierung mechanischer Kupplungen

Die hauptsächlichen Wirkprinzipien für Kupplungen lassen sich stichwortartig wie folgt kennzeichnen:

- Reibungskupplungen basieren auf tribologischen Wirkflächenpaaren
- Visco-Kupplungen haben bewegte Lamellenpaare, die mittels viskoser Flüssigkeiten auch geringe Drehzahlunterschiede zulassen (rheologisches Differenzial)
- Strömungskupplungen operieren mit Strömungs- und Fluidmechanik.

Wichtig für die mechanisch-dynamische Funktion von Getrieben sind insbesondere die folgenden Module, siehe Bild 7.5:

- Zahnradgetriebe mit Schaltung dienen der Antrieb/Abtrieb-Synchronisierung
- Planetengetriebe ermöglichen mit drei koaxialen Wellen in kompakter Bauweise eine Drehzahlwandlung ohne Trennung des Kraftflusses.

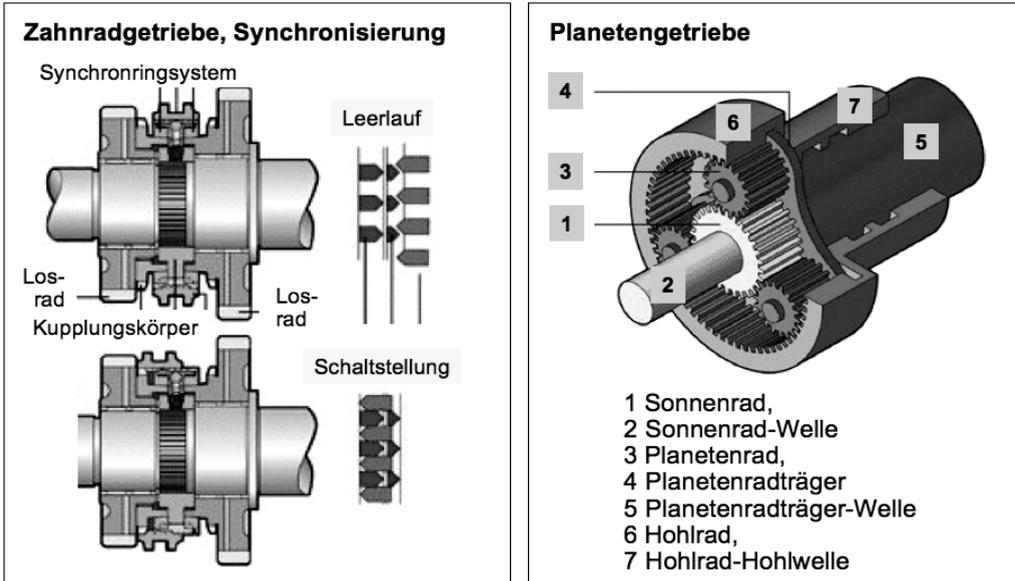


Bild 7.5 Module herkömmlicher Kupplungen und Getriebe

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 Bild 7.6.

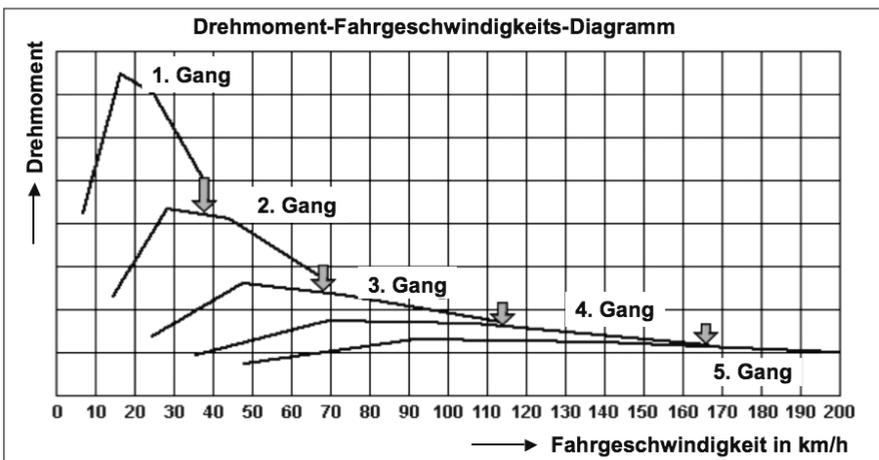


Bild 7.6 Drehmoment-Geschwindigkeits-Diagramme für die Getriebegänge eines Automobils

Das durch geeignete mechatronische Module zu automatisierende Zusammenwirken von Kupplung und Getriebe ist in Bild 7.7 schematisch vereinfacht dargestellt.

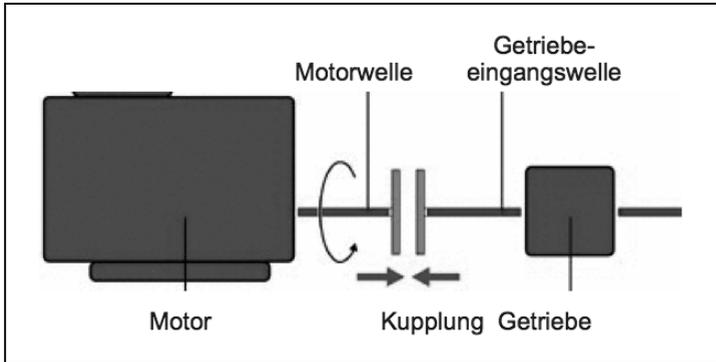


Bild 7.7 Kupplungs-Getriebe-Zusammenhang

Bei automatisierten Getrieben wird die Ausführung manuell eingeleiteter Schaltvorgänge von elektronisch gesteuerten Aktorsystemen übernommen. Dies bedeutet, dass während des Schaltvorgangs keine direkte mechanische Verbindung der Kupplungselemente besteht und damit die Zugkraft unterbrochen ist. Das Funktionsprinzip automatisierter Getriebe ist in Bild 7.8 stichwortartig erläutert.

Automatisiertes Getriebe, Funktionsprinzip:

- Mechanisches Getriebe mit zusätzlicher Hydraulikeinheit, Steuergerät zur Prozessork 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.

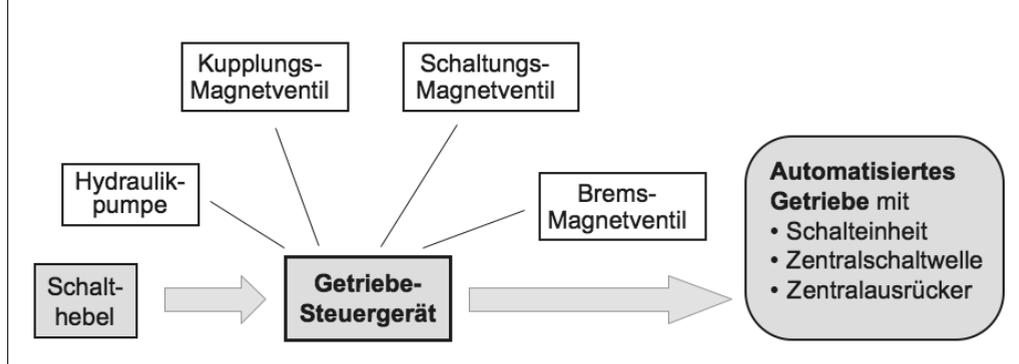
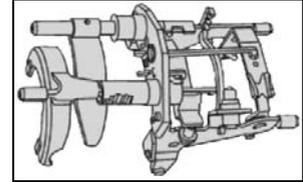


Bild 7.8 Funktionsprinzip und Module eines automatisierten Getriebes

Die mechatronische Funktion eines automatisierten Kupplungs-Getriebe-Systems erfordert das Zusammenwirken von Mechanik, Hydraulik, Elektrik und Elektronik:

Mechanische Bauteile:

- Radsatz mit Synchroneinrichtung, Fest/Losrädern
- Schaltaktor, Wählhülse mit Bremse
- Schalteinheit
- Zentralschaltwelle
- Zentralausrücker



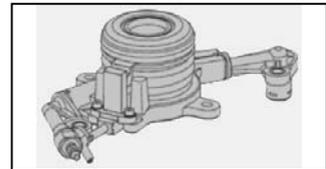
Hydraulische Bauteile

- Ölbehälter mit Filter
- Hydraulikanschluss
- Hydraulikpumpe
- Druckspeicher
- Ventil Bremsbetätigung
- Ventile Gangbetätigung
- Ventil Kupplungsbetätigung



Elektrische und elektronische Bauteile

- Elektromotor (an der Hydraulikpumpe)
- Drucksensor Hydraulik
- Gangassensensor
- Kupplungswegsensor am Zentralausrücker
- Drehzahlsensor (Kupplung).



Dem Funktionsablauf eines automatisierten Getriebes liegt der in Bild 7.9 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.

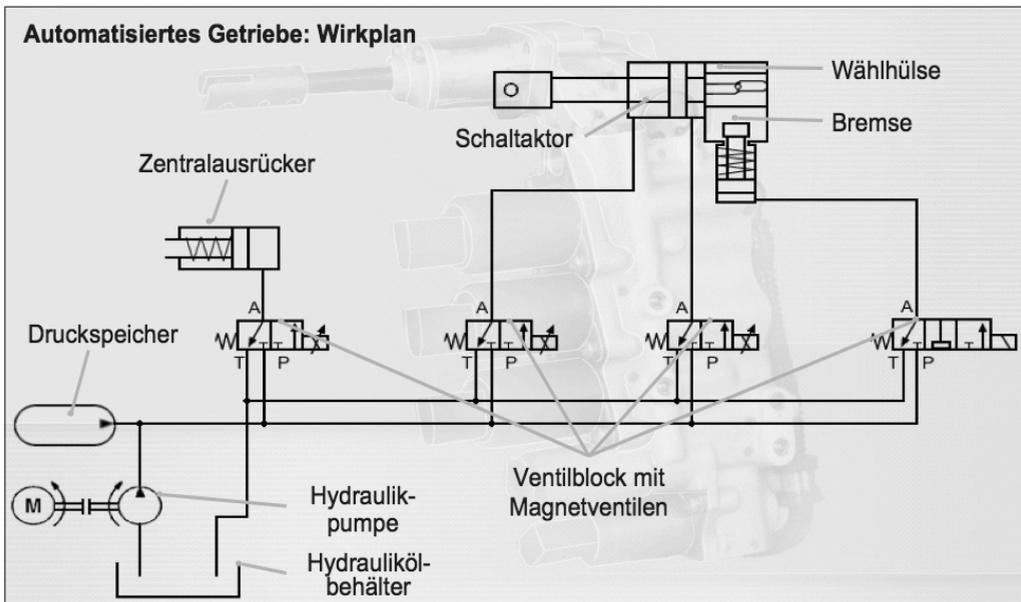


Bild 7.9 Wirkzusammenhang eines automatisierten Getriebes

Der Systemzusammenhang eines mechatronisch automatisierten Getriebes ist in Bild 7.10 dargestellt. Er illustriert blockschaltbildartig das in Bild 7.8 beschriebene Zusammenwirken von Sensorik, Aktorik und Informatik.

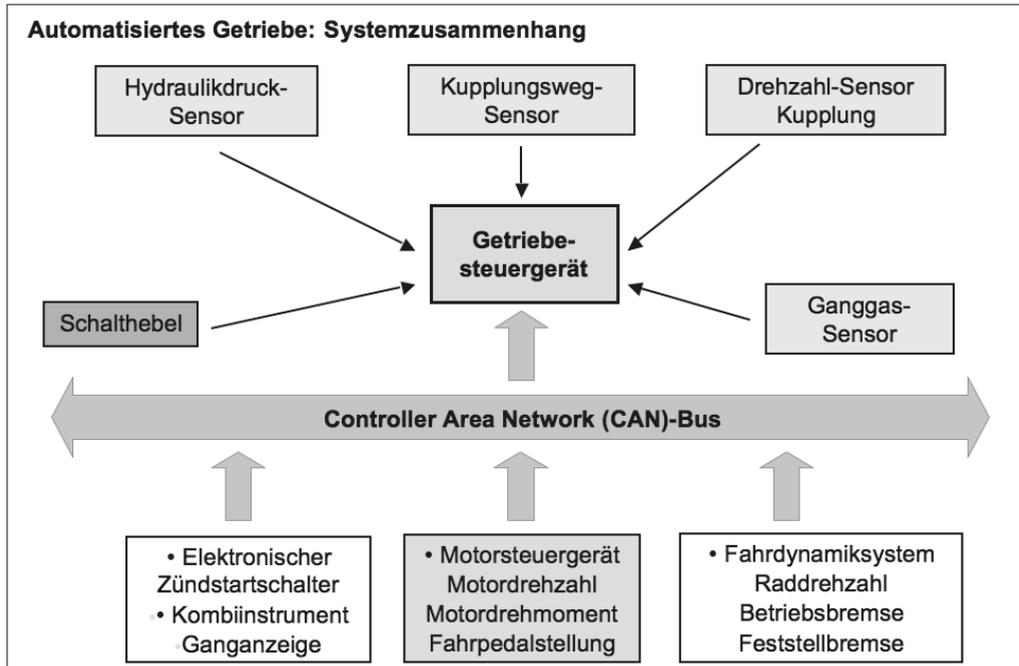


Bild 7.10 Systemzusammenhang eines automatisierten Getriebes

7.3 Tribologische Systeme

In der Technik können Bewegungen, Kraft- und Energieübertragungen, aber auch Materialbearbeitung und -umformung, häufig nur durch kontaktierende, relativ zu einander bewegte *Wirkflächen* realisiert werden. Dies ist stets mit Reibung sowie häufig mit Verschleiß verbunden und gehört zum Aufgabenbereich der *Tribologie* (tribein, griechisch reiben). Dieses fachübergreifende Wissenschafts- und Technikgebiet wurde Mitte der 1960er Jahre mit folgender Definition begründet (Peter Jost, 1966):

- *Tribologie is the science and technology of interacting surfaces in relative motion.*

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:

- *Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.*

Die Tribologie ist für Funktionalität technischer Systeme mit Wirkflächenpaaren – und damit auch für Anwendungen der Mechatronik auf diese Systeme – von großer Be-

deutung. Eine exemplarische Übersicht über tribologische Systeme im Maschinenbau und allgemein in der Technik geben Bild 7.11 und Tabelle 7.2.

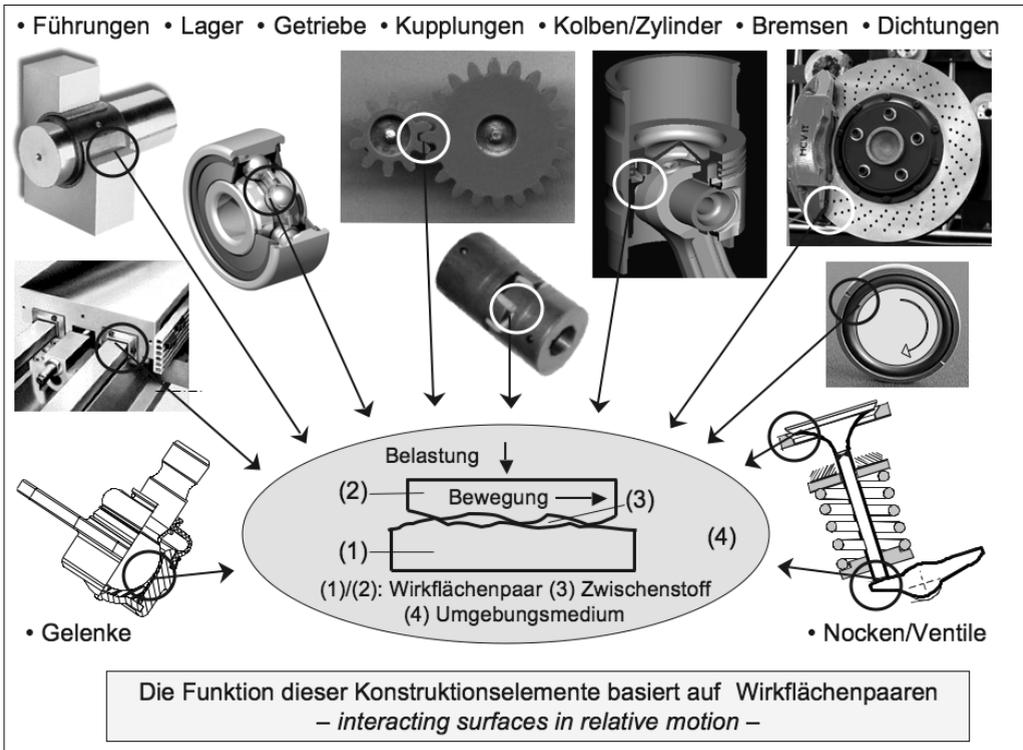


Bild 7.11 Tribologische Systeme des Maschinenbaus (Beispiele)

Tabelle 7.2 Kategorien tribologischer Systeme der Technik

Systemkategorie	Funktionen	Beispiele
Energie-bestimmte Tribo-Systeme → Maschinenbau	Bewegungsübertragung Bewegungshemmung Kraft/Energie-Übertragung	Führungen, Gelenke, Lager Bremsen Kupplungen, Getriebe
Stoff-bestimmte Tribo-Systeme → Fertigungstechnik	Urformen Umformen Trennen Fügen Beschichten Stoffeigenschaftsändern Stoff-Transport/Abdichtung Stoff/Güter-Transport	Gieß-, Press-, Extrudierwerkzeuge Biege, Walz-, Schmiede-, Ziehwerkzeuge Bohr-, Dreh-, Fräs-, Schleifwerkzeuge Passungen, Reibschweißen Spritzdüsen Oberflächentechnologien Kolben/Zylinder, Ventile, Dichtungen Pipeline, Rad/Schiene, Reifen/Strasse
Informations-bestimmte Tribo-Systeme → Informatik	Speicherspeicherung Signalübertragung Signalausgabe	Festplattenlaufwerk, CD, DVD Nocken/Stößel, Schaltrelais Typenraddrucker, Tintenstrahldrucker

Reibung und Verschleiß sind *Systemeigenschaften*, sie müssen auf das betreffende tribologische System bezogen sein. Die allgemeine Systemdarstellung und das Erscheinungsbild der elementaren Verschleißmechanismen zeigt Bild 7.12.

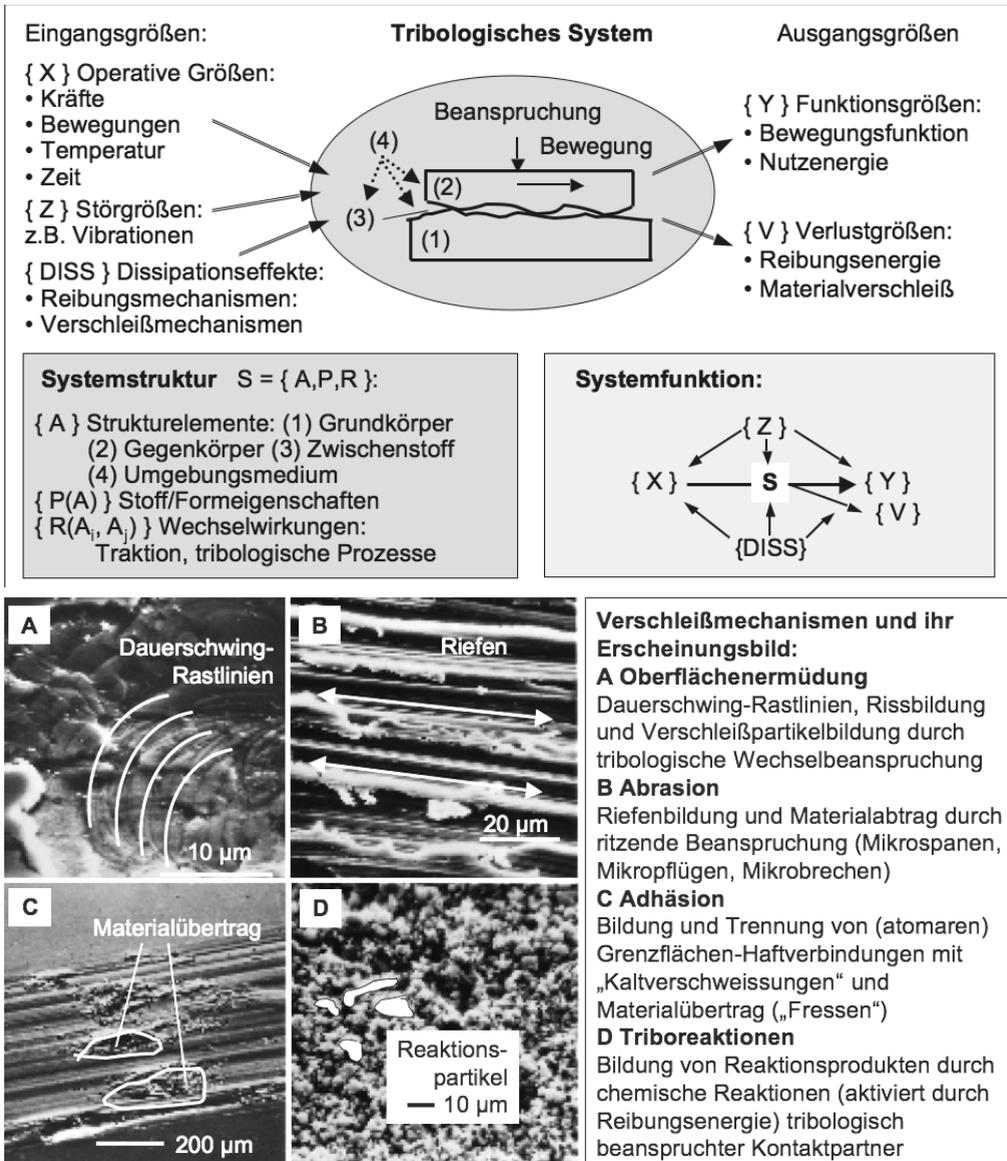


Bild 7.12 Allgemeine Darstellung eines tribologischen Systems und Erscheinungsbild der elementaren Verschleißmechanismen (DISS) bei Festkörperreibung

Der in tribologischen Systemen bei der Festkörperreibung von Wirkflächenpaarungen (1)/(2) – unter stofflicher Beeinflussung durch (3) und (4) – auftretende Verschleiß wird durch die in Bild 7.12 beschriebenen elementaren Verschleißmechanismen verursacht. Sie können einzeln oder überlagert auftreten und sich unter Beanspruchungen auch zeitlich verändern. Verschleiß lässt sich aufgrund seiner komplexen physika-

lisch-chemischen Ursachen und der stochastischen Natur seiner Einzelprozesse nicht analytisch berechnen. Er muss am Originalsystem oder modellmäßig mit dem originalen „Beanspruchungskollektiv“ und einer Modell-Systemstruktur mit den originalen Materialien experimentell bestimmt werden. Die einzelnen Verschleißmechanismen können durch folgende Maßnahmen beeinflusst werden:

- **Oberflächenermüdung:** Verwendung von Werkstoffen mit hoher Härte und hoher Zähigkeit (Kompromiss); Einsatz homogener Werkstoffe (z. B. Wälzlagerstähle); Erzeugung verschleißreduzierender Druckeigenstressungen in Oberflächen.
- **Abrasion:** Abrasiver Verschleiß ist gemäß der sogenannten „Verschleiß-Tieflege-Hochlage-Charakteristik“ nur dann gering, wenn der tribologisch beanspruchte Werkstoff mindestens um den Faktor 1,3 härter als das angreifende Material ist.
- **Adhäsion:** Vermeiden von Überbeanspruchungen durch die ein Schmierfilm oder schützende Adsorptions- und Reaktionsschichten von Werkstoffen durchbrochen werden können (*Fressen*); Verwendung von Schmierstoffen mit EP (extreme pressure)-Additiven; bei Wirkflächen Metall/Metall keine kubisch flächenzentrierten Metalle, sondern kubisch raumzentrierte sowie hexagonale Metalle oder Werkstoffe mit heterogenem Gefüge sowie Nichtmetalle einsetzen.
- **Chemische Triboreaktionen:** keine Metalle, stattdessen Kunststoffe und keramische Werkstoffe verwenden; Konstruktionen mit formschlüssigen statt kraftschlüssigen Verbindungen sowie hydrodynamischer Schmierung gestalten; Zwischenstoffe und Umgebungsmedium ohne oxidierende Bestandteile verwenden.

Tribologische Systeme sind durch Kontaktgeometrie, Bewegungsart und operative Variable definiert, die Stribeck-Kurve kennzeichnet das Reibungsverhalten, Bild 7.13.

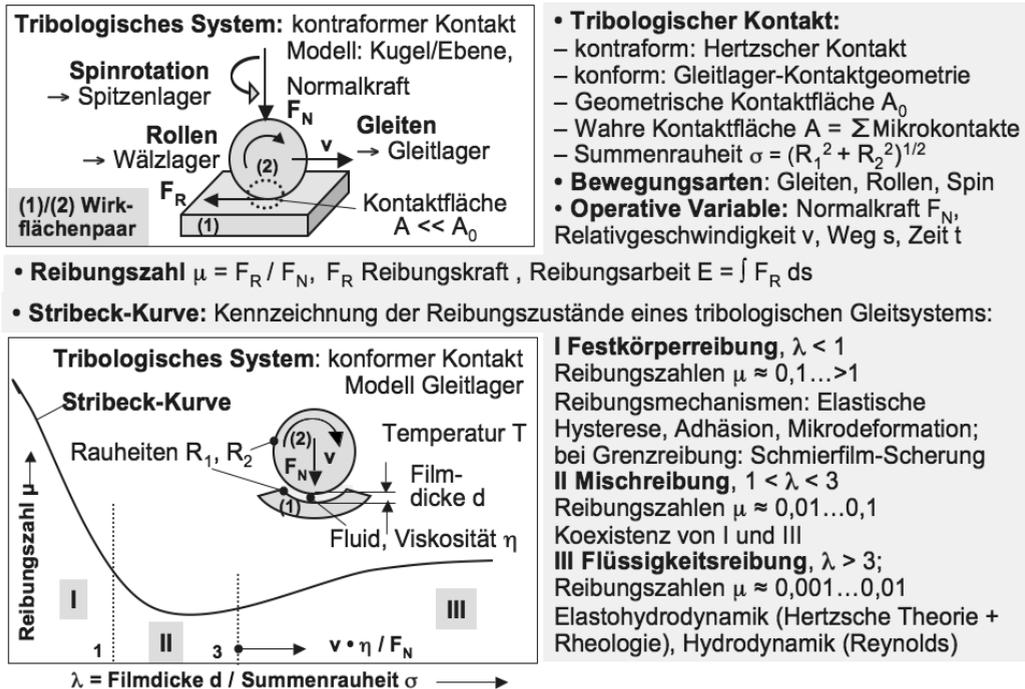


Bild 7.13 Kenngrößen tribologischer Systeme und Stribeck-Kurve der Reibungszustände

Elementare tribologische Gestaltungsregeln für reibungsarme Lagerungen, Bild 7.14:

- Ersatz von Festkörper-Gleitreibung durch Roll/Wälzreibung; $\rightarrow \mu \approx 0,001 \dots 0,005$
- Realisierung von Luftlagern und mechatronischen Lagern $\rightarrow \mu \approx 0,0001$

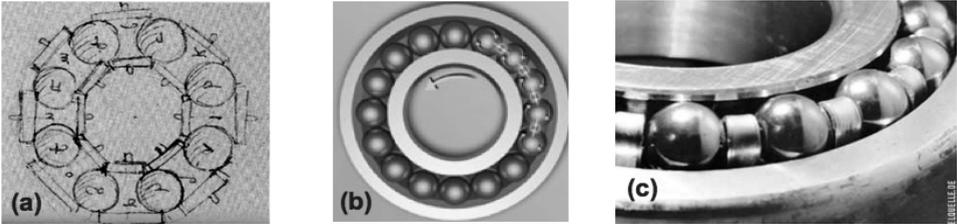
Tribologische Systeme für reibungsarme Führungen und Lager:

Rotationsbewegung: Kugellager

(a) Kugellager mit freien Rollbewegungen: Leonardo da Vinci (Codex Madrid, 1492)

(b) Kugellager-Urform: direkter Kugel/Kugel-Kontakt behindert Rollbewegungen

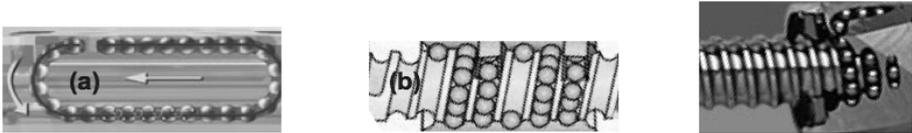
(c) Kugellager mit Kugelkäfig: Stand der Technik, Reibungszahl $\mu \approx 0,001 \dots 0,005$



Translationsbewegung: Kugelumlaufspindel

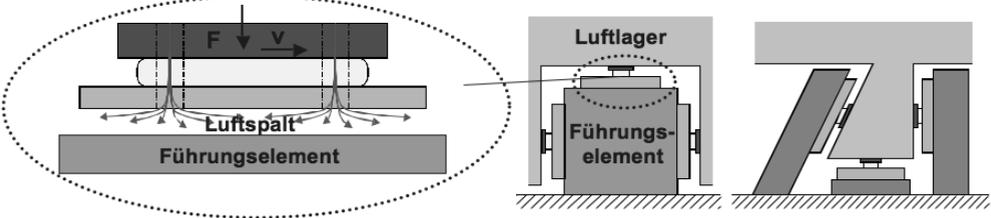
(a) Prinzip: geführte Kugel-Wälzbewegung zwischen Spindelnut und Spindelmutter

(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.

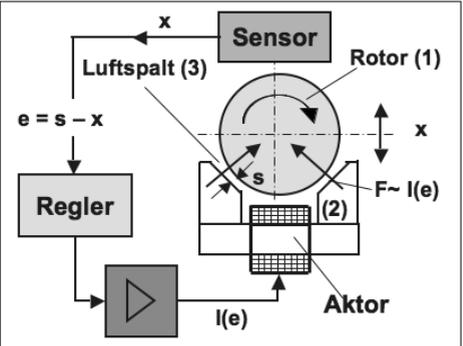


Bild 7.14 Tribologische Systeme für Translation und Rotation mit geringer Reibung

8 Positionierungstechnik und Robotik

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. Bild 8.1 und Bild 8.2 zeigen die Grundlagen.

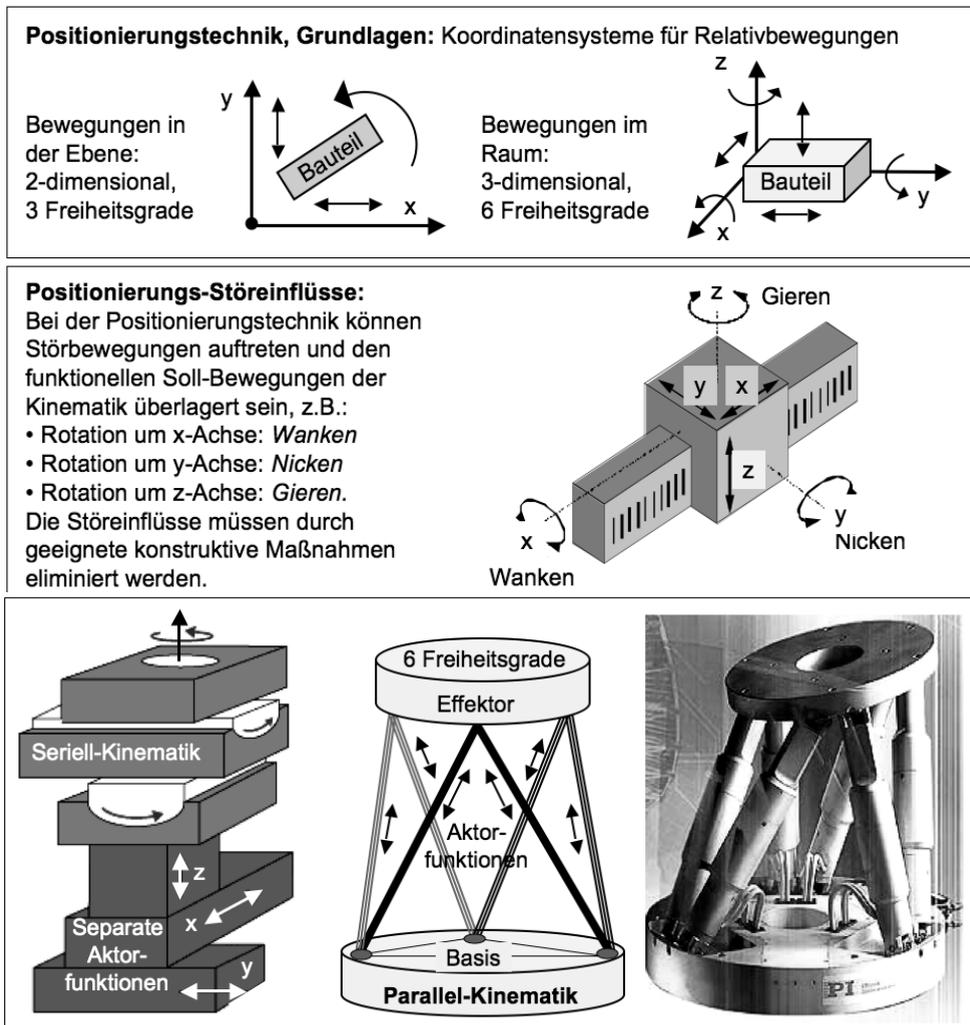


Bild 8.1 Kinematische und technische Grundlagen der Positionierungstechnik

In der mechatronischen Positionierungstechnik haben Aktoren im Zusammenwirken mit Sensoren (und einer Hilfsenergie) die regelungstechnische Aufgabe, Technische Objekte zu bewegen und zu positionieren.

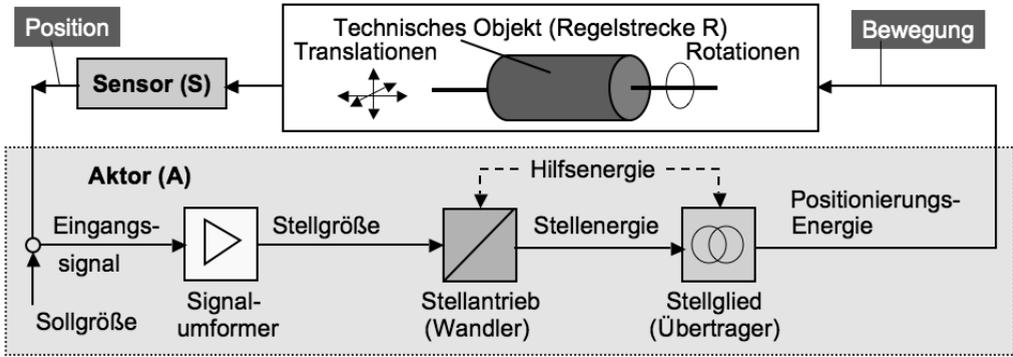
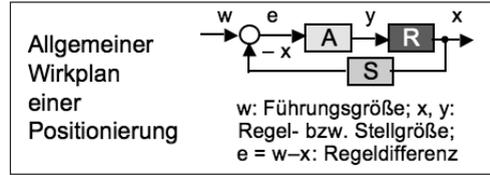


Bild 8.2 Positionierungstechnik: Das Zusammenwirken von Aktorik, Sensorik. Regelungstechnik

8.1 Mechatronische Positionierungstechnik

Die Aufgaben der Positionierungstechnik erstrecken sich über alle Dimensionen der Technik. Die **Makro-Positionierungstechnik** wird in Bild 8.3 am Beispiel der zu regelnden Translationsbewegung eines Positioniertisches dargestellt.

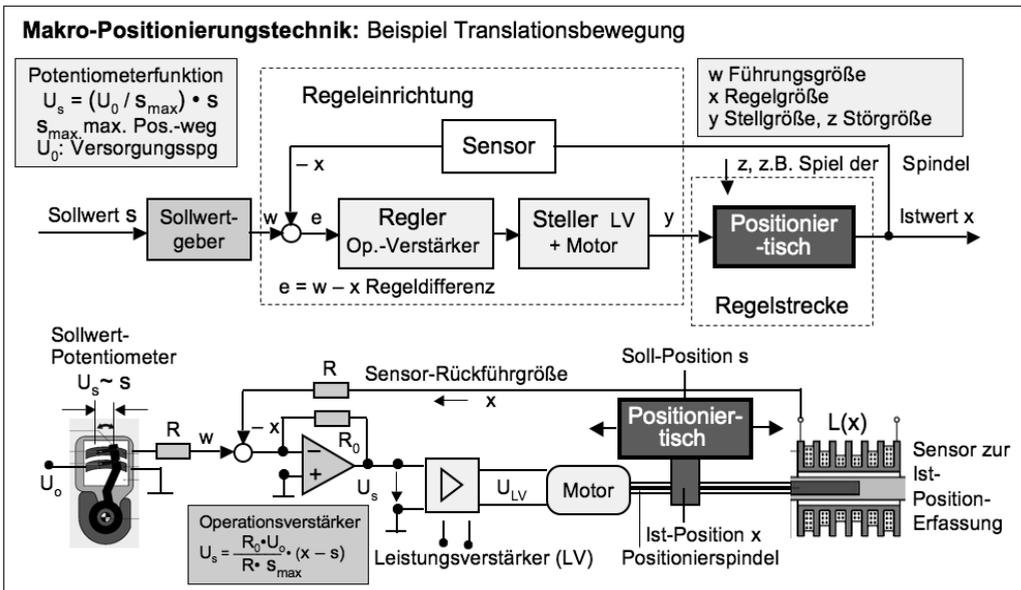


Bild 8.3 Makro-Positionierungstechnik mit Sensorik und Aktorik als Regelkreis

Für die **Mikro-Positionierungstechnik** wurden neue mechatronische Systeme mit Hilfe der Mikrosystemtechnik entwickelt (siehe Kap. 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 Kap. 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 Bild 8.4 erläutert.

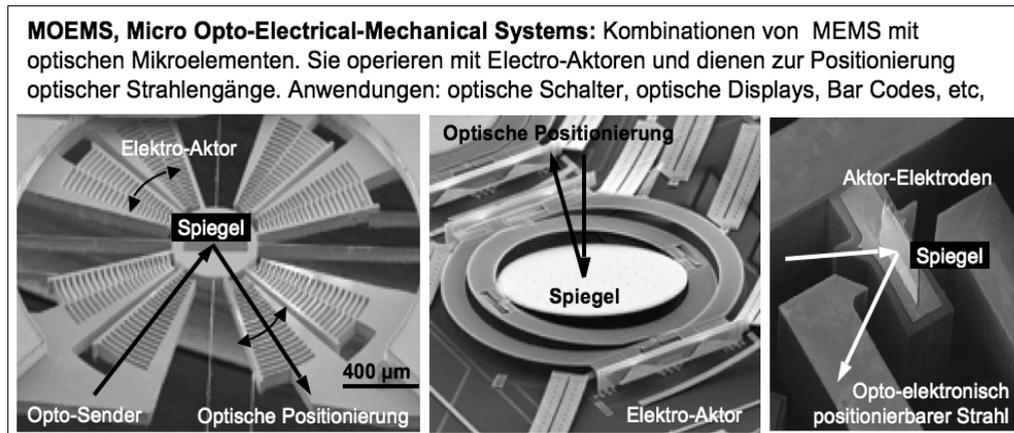
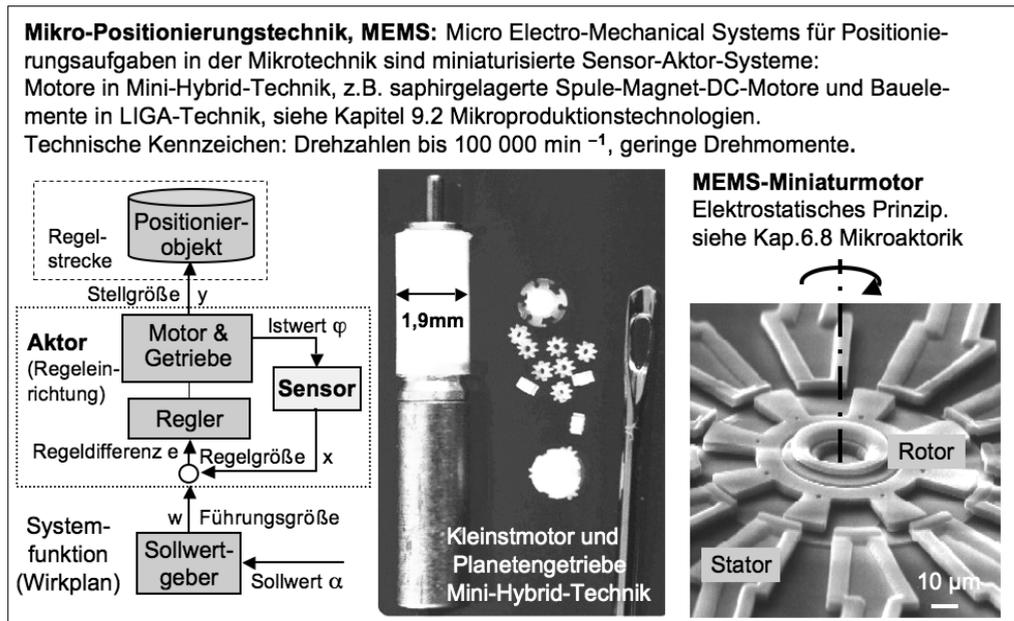


Bild 8.4 Mikro-Positionierungstechnik mit MEMS und MOEMS, Beispiele

Das bekannteste Anwendungsbeispiel der **Nano-Positionierungstechnik** ist das Rastertunnelmikroskop (Physik-Nobelpreis 1986, Binnig und Rohrer). Bild 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.

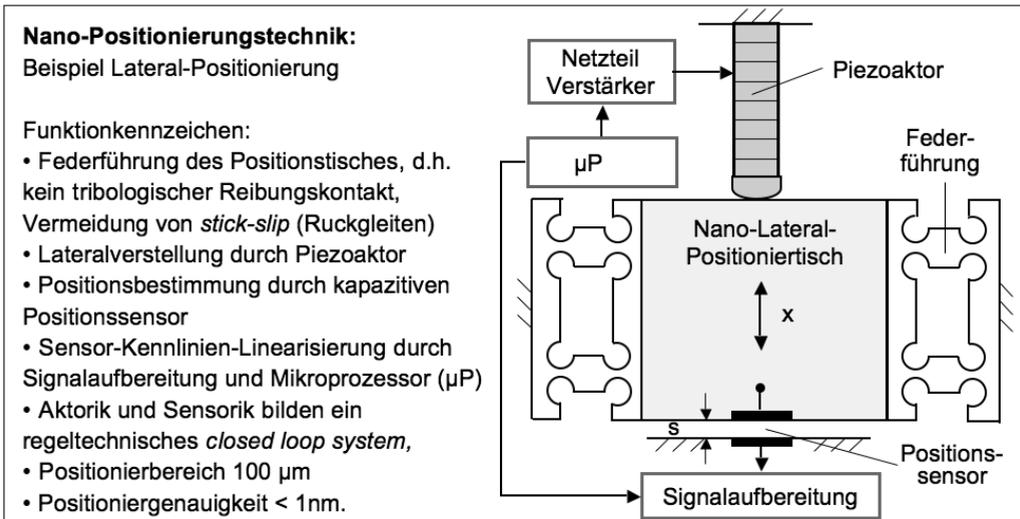
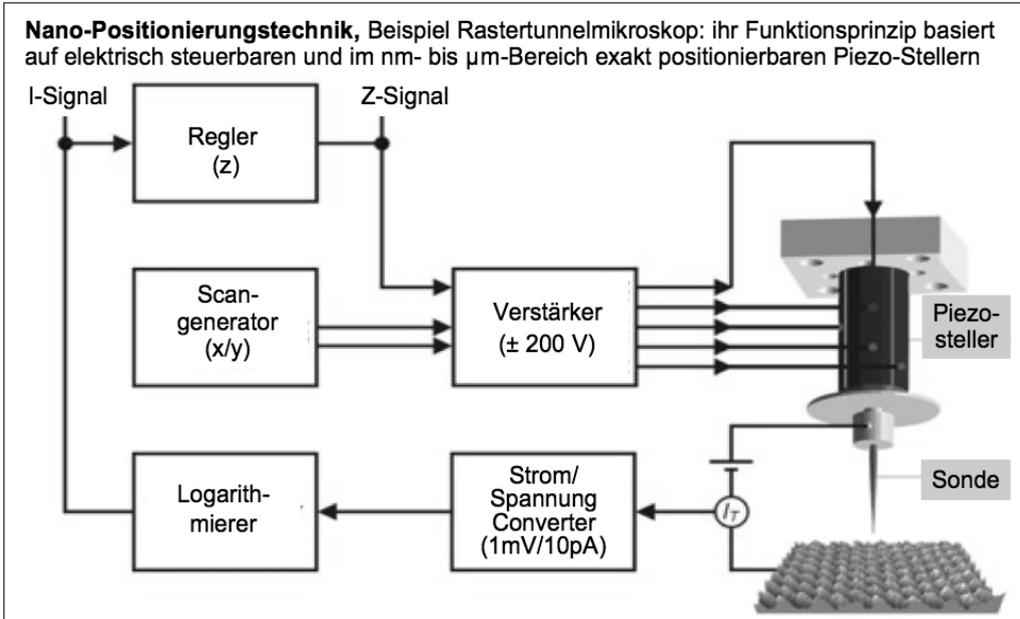


Bild 8.5 Nano-Positionierungstechnik des Rastertunnelmikroskops. Oben: Blockschaltbild des Regelkreises für die Abtastung der Probenoberfläche bei konstantem „Tunnelstrom“ als Indikator des konstanten Abstands zwischen Sonde und Probenoberfläche. Unten: Prinzip der Lateral-Positionierung im nm-Maßstab

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 Bezugskordinatensystem; Teilfunktionen sind:*

- *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.

Die Aufgaben für Handhabungssysteme umfassen zwei große Bereiche:

- Bewegungsfunktionen von mit Greifern erfassten technischen Objekten, z. B. Beschicken/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 Bild 8.6.

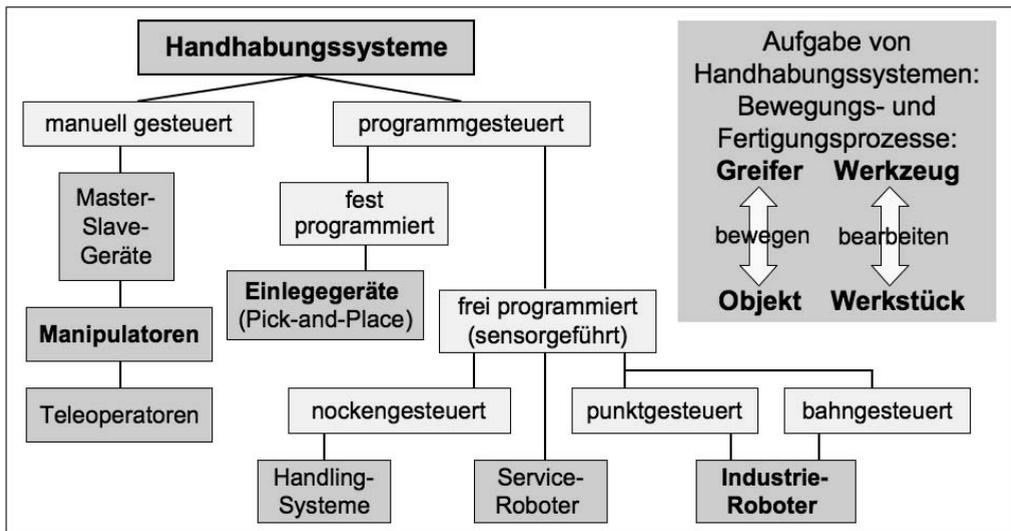


Bild 8.6 Klassifikation von Handhabungssystemen nach Steuerungs- und Programmierungsart

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 Kapitel 4) und den Prinzipien der Aktorik (siehe Kapitel 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 Bild 8.7 dargestellt.

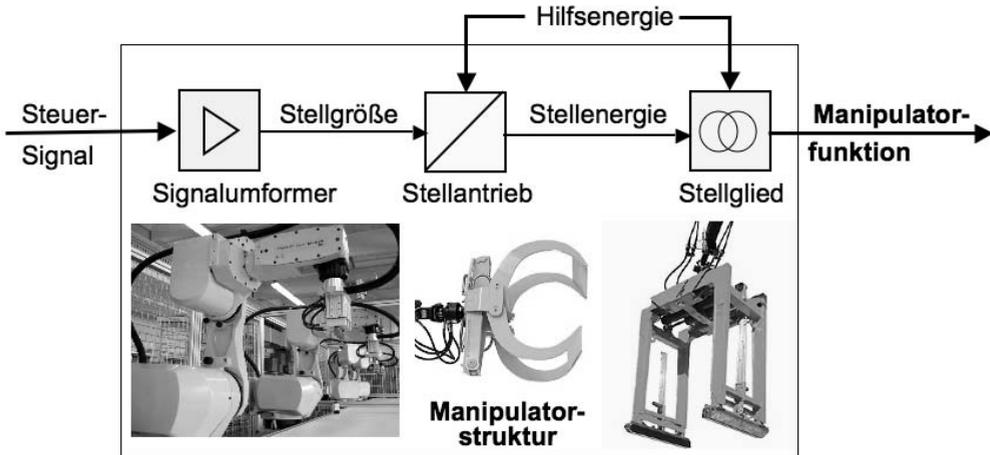


Bild 8.7 Manipulatoren und Pick-and-Place-Geräte: Darstellung als mechatronische Systeme

Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Geometrie und Ablauf frei programmierbar und sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln (Effektoren) ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen. Sie arbeiten mit „geregelten Aktoren“ (siehe Kapitel 4 und 6) nach dem in Bild 8.8 dargestellten Prinzip mechatronischer Systeme. Ihre grundlegenden Module – Roboterstruktur, Aktorik, Sensorik, Prozessork – und der Systemzusammenhang der Roboterfunktion werden im Folgenden in knapper Form beschrieben.

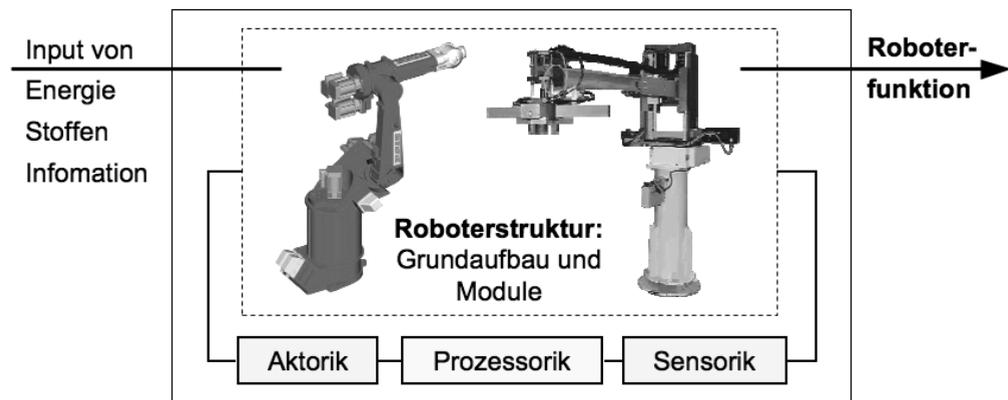


Bild 8.8 Industrieroboter: Darstellung als mechatronisches System

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:
 - 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 Bild 8.1)
- Delta-Roboter, 3 Rotationsachsen und Arbeitsplattform-Parallelogrammführung

Die elementaren Strukturen eines Portalroboters und eines Gelenkarmroboters sind in Bild 8.9 in stark vereinfachter Form skizziert.

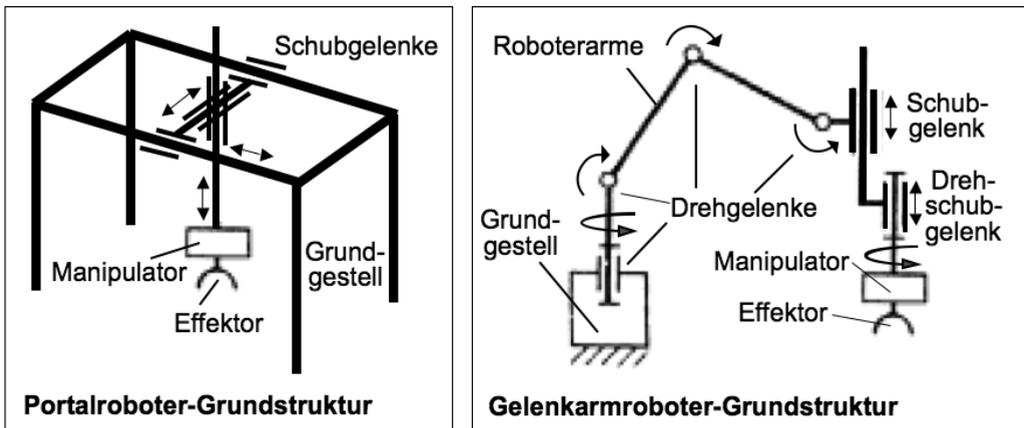


Bild 8.9 Struktur und elementare Elemente eines Portalroboters und eines Gelenkarmroboters

Technisch vielseitig anwendbar sind SCARA- und 6-Achsroboter, siehe Bild 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.

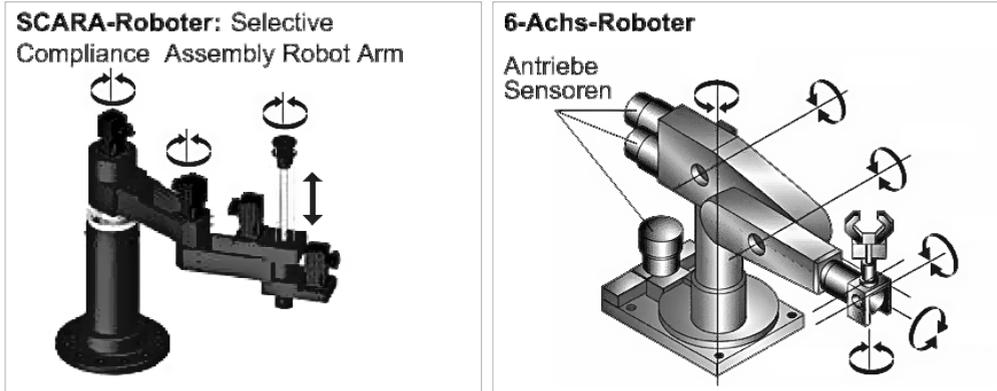


Bild 8.10 Struktur eines SCARA- und 6-Achs-Roboters mit elementaren kinematischen Achsen

Die Roboterstruktur definiert den geometrisch-operativen Funktionsbereich, den *Arbeitsraum* eines Roboters, siehe Bild 8.11. Er wird gekennzeichnet durch die Freiheitsgrade f der Bewegung ($f_{\max} = 6$, vgl. Bild 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.

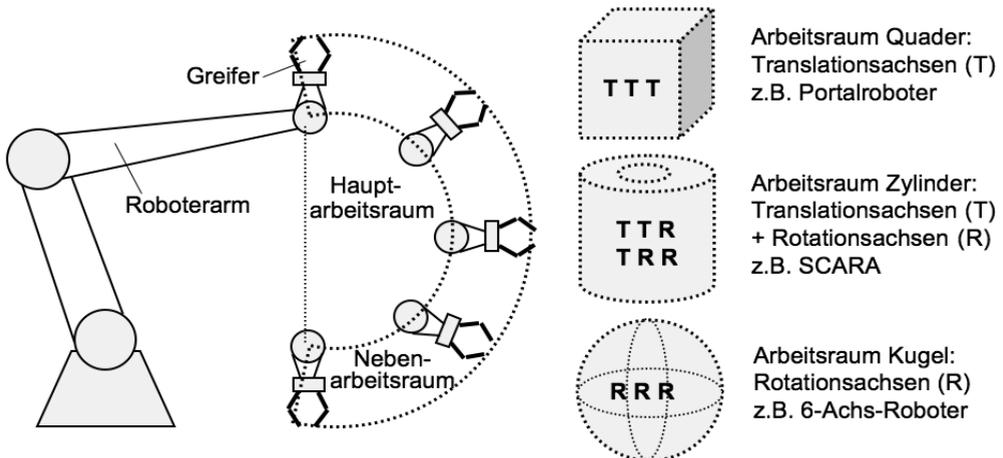


Bild 8.11 Arbeitsraum und Koordinatensysteme von Robotern

Aktorik

Als Antriebsmodule für Industrieroboter werden Elektromotoren, Hydraulikmotoren und Hydraulikzylinder sowie für Robotergreifer auch pneumatische Systeme eingesetzt. Die Prinzipien elektromechanischer Aktoren wurden in Kapitel 6.1 und die von fluidmechanischen Aktoren in Kapitel 6.3 behandelt. Stellkraft-Stellweg-Diagramme für elektromotorische, elektromagnetische, hydraulische und pneumatische Aktoren sind in Bild 6.19 zusammengestellt.

Ein charakteristischer Aspekt der Roboteraktork ist, dass die Bewegung schnell-drehender Elektromotoren in langsame Drehungen der Roboterjelenke (z. B. 1:300) überführt werden muss. Hierfür kommen *Planetengetriebe* (siehe Bild 7.5), Bauart „Harmonic Drive“ zur Anwendung. Prinzip und Funktionsweise sind in Bild 8.12 dargestellt. Grundelemente dieser Getriebeart sind eine elliptische Drehscheibe mit zentrischer Nabe und aufgezogenem, elliptisch verformbarem 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.

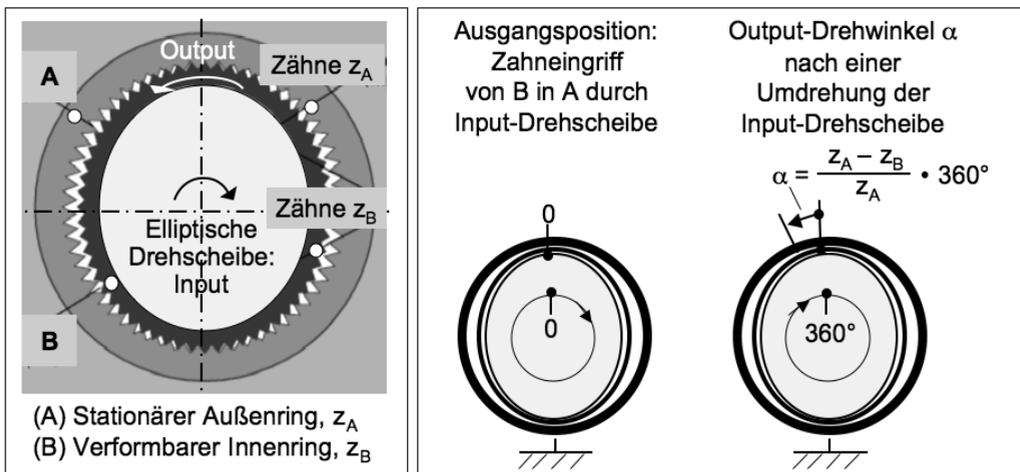


Bild 8.12 Aufbau und Funktion eines Getriebes mit hoher Untersetzung: *Harmonic Drive*

Die *Greifertechnik* ist ein wichtiger Bestandteil der Roboteraktork. 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 Objekt Oberfläche, wobei Greifer und Objekt ein tribologisches Haftreibungssystem bilden (siehe Kap. 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 Kapitel 5.4.3) zur Erfassung von Greifer-Haltekräften zeigt Bild 8.13.

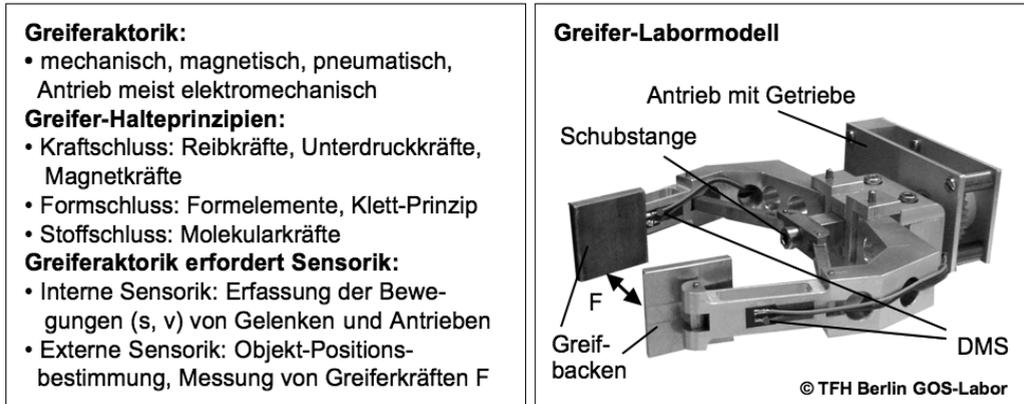


Bild 8.13 Kennzeichen der Roboter-Greifertechnik und ein Greifer-Labormodell

Sensorik

Die Funktion von Robotern als mechatronische Systeme erfordert die Kombination von Aktoriik und Sensorik. Neben den in Bild 8.12 genannte Sensoraufgaben für die Greiferaktoriik umfassen die allgemeinen Aufgaben der Sensorik in der Robotik folgende Schwerpunkte:

- 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 Kapitel 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 elementare Messgrößen der Robotik und nennt die Abschnitte des Kapitels 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.

Tabelle 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 φ (5.4.1, 5.5.1)	Potentiometer, Magnetoresistiver Sensor, Gauß-Feldplatte	Differenzial- Transformator, Tauchanker- Wegsensor	Kapazitiver Wegsensor	Hall-Sensor, Optoelektronischer Lichtschranken-Sensor	Wirbelstrom-Sensor
Dehnung $\epsilon = \Delta l / l_0$ (5.4.3)	Dehnungsmessstreifen (DMS)				Faser-optische Sensoren
Geschwindigkeit $v = ds/dt$ (5.5.2)	Magnetoresist. Drehwinkel-S.	Indukt. Drehwinkel-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	Magnetoelastischer Sensor	Kraftkompensations-Sensor	Federelemente oder DMS, Rückführung auf s , ϵ -Messung	
Druck $p = \text{Kraft}/\text{Fläche}$ (5.6.3)	Piezoresistiver Sensor Dehnstoff:	Magnetoelastischer Sensor	Kapazitiver Drucksensor	Federelemente oder DMS: Rückführung auf s , ϵ -Messung	
Temperatur T (5.7.1)	NTC/ PTC-Widerstände			Thermoelemente	Optoelektron. Pyrometer

Prozessorik

Die Prozessorik bezeichnet in der Mechatronik im engeren Sinne das funktionelle Zusammenwirken von Sensorik und Aktorik (siehe Kapitel 6.6) und im weiteren Sinne die für die Funktion mechatronischer Systeme erforderliche Steuerungs- oder Regelungstechnik (siehe Kapitel 4). In der Robotik hat die Steuerungstechnik die für die Roboterfunktion zentral wichtigen Aufgaben der Bahnplanung, der Koordinatentrans-

formationen 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 Bild 8.14 übersichtsmäßig dargestellt, sind Roboter-Steuerung und Roboter-Sensorik mit der Aktorik-Regelung für die Roboter-Module, dem Bediensystem, der Programmierumgebung und Schnittstellen zu anderen Systemen strukturell und funktionell verknüpft.

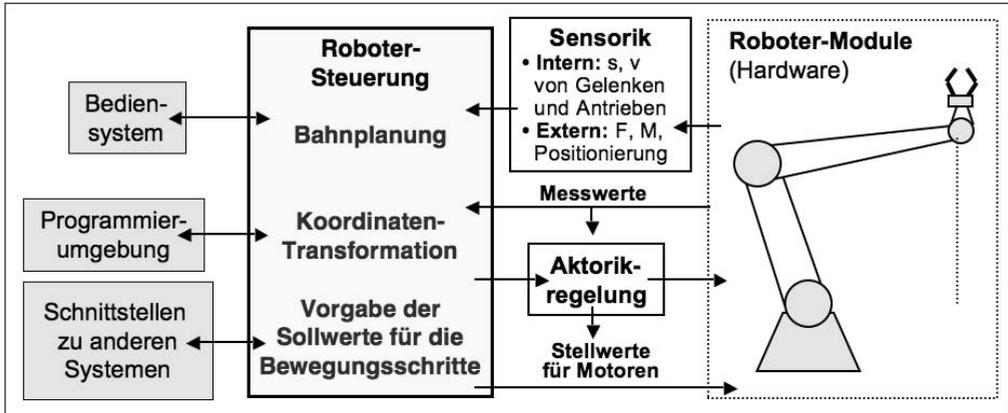


Bild 8.14 Module und Funktionszusammenhang der Prozessoren von Industrierobotern

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 Bild 8.15 in knapper Form für das Beispiel eines SCARA-Roboters zusammengefasst.

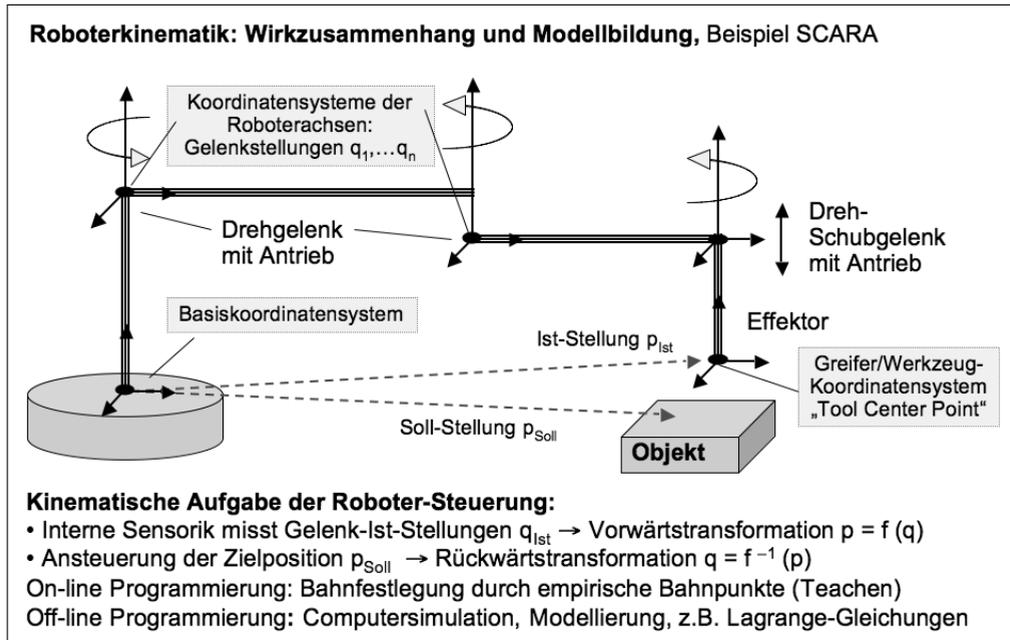


Bild 8.15 Grundzüge der Steuerung von Industrierobotern

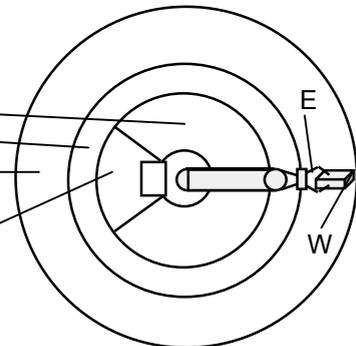
Roboterfunktionalität: Kennzeichen und Systemzusammenhang

Die hauptsächlichen 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_Z*) 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^2) 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 Δs bei wiederholtem Anfahren. Typische Werte liegen zwischen $\Delta s < \pm 0,02 \text{ mm}$ bei 10 kg Nennlast und $\Delta s < \pm 0,2 \text{ mm}$ bei 150 kg Nennlast. Die Bahngenauigkeit ist die Istbahn-Sollbahn-Abweichung. Sie liegt bei Industrierobotern zwischen $\pm 0,1$ und $\pm 2 \text{ mm}$.

Der Systemzusammenhang von Industrierobotern ist in zusammenfassender Darstellung in Bild 8.16 wiedergegeben. Der obere Teil illustriert in vereinfachter Form den Aufbau einer Roboterzelle, der untere Teil zeigt den generellen Funktionsplan.

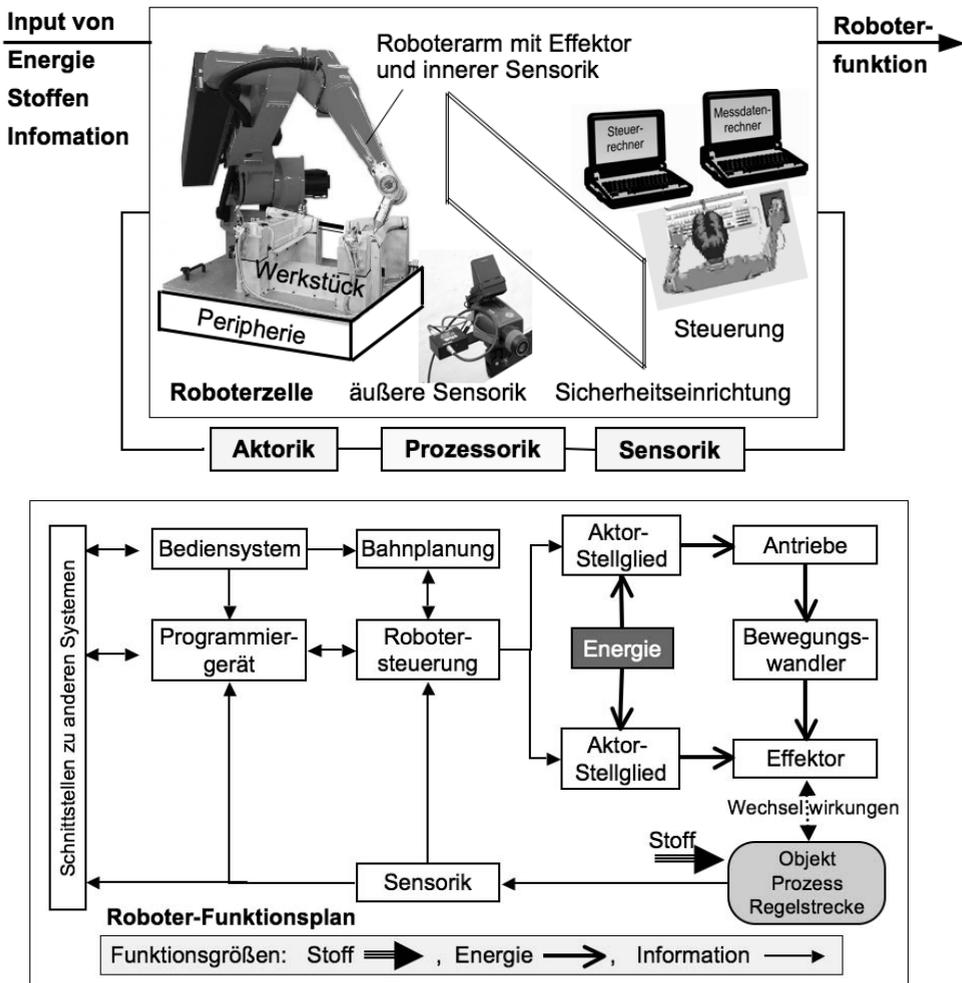


Bild 8.16 Systemzusammenhang von Industrierobotern

9 Produktionstechnik

Produktion ist die Erzeugung von Sachgütern und nutzbarer Energie sowie die Erbringung von Dienstleistungen durch Kombination von Produktionsfaktoren. Produktionsfaktoren sind alle zur Erzeugung verwendeten Güter und Dienste. Aus volkswirtschaftlicher Sicht besteht der Zweck der Produktion im Überwinden der Knappheit von Gütern und Diensten zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse. Die Produktion steht als Erzeugungssystem der Konsumtion als Verbrauchersystem gegenüber (Günter Spur).

Die Produktion 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 Produktionsmittelenwicklung gehört ferner die Erarbeitung geeigneter Programiersysteme.
- Die *Produktionslogistik* umfasst alle Funktionen von Gütertransport und -lagerung im Wirkzusammenhang eines Produktionsbetriebes. Sie gliedert sich in die Bereiche Beschaffung, Produktion und Absatz.

Aufgabe der *Produktionstechnik* ist die Anwendung geeigneter Produktionsverfahren und Produktionsmittel zur Durchführung von Produktionsprozessen bei möglichst hoher Produktivität. Die Produktionstechnik betrifft den gesamten Prozess der Gütererzeugung. Durch *Fertigungstechnik* und *Montagetechnik* erfolgen die Formgebung der Werkstoffe zu Bauteilen und ihre Kombination zu gebrauchsfertigen Gütern. Die Fertigungstechnik bewirkt Formgebung sowie Eigenschaftsänderungen von Stoffen. Man kann abbildende, kinematische, fügende und beschichtende Formgebung sowie die Änderung von Stoffeigenschaften unterscheiden.

Fertigungsverfahren sind als mechanische Systeme, wie mit Bild 9.1 illustriert, durch folgende generelle Merkmale gekennzeichnet:

- Fertigungsverfahren benötigen Relativbewegungen zur Werkstück-Formgebung
- Werkstück (1) und Werkzeug (2) bilden als *Wirkpaar* ein tribologisches System.



Bild 9.1 Übersicht über die grundlegenden Fertigungsverfahren und Beispiel eines tribologischen Systems zur spanenden Formgebung

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 Bild 9.2 sind die Hauptbaugruppen von Werkzeugmaschinen zusammen mit typischen Werkzeugen dargestellt:

- Gestell/Fundament → Mechanik
 - Führungen → Mechanik/Tribologie/Robotik
 - Antrieb → Elektromechanik/Fluidik
 - Steuerung → Regelungstechnik/Informatik
 - Werkstückwechsler → Mechanik
 - Werkzeugwechsler → Aktorik
 - Messeinrichtungen → Sensorik
 - Ver- u. Entsorgung → Energetik/Schmierung
 - Sicherheitseinrichtungen → Sensorik/Aktorik
- Man unterscheidet umformende, trennende, spanende, abtragende Werkzeugmaschinen.



Bild 9.2 Übersicht über die Baustruktur von Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen sind heute mechatronische Systeme mit mechanischer Grundstruktur, elektro-mechanisch-fluidischen Antrieben, numerischer Steuerung, Sensorik, Aktorik, Prozessork, 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 Bild 9.3.

	<p>Hauptspindel mit integrierter Prozessanalyse-Sensorik und integrierten Schmier- und Überwachungssystemen der Wälzlager</p>	<p>Werkzeugspeicher- und Werkzeugwechselsystem mit integrierter Werkzeugverwaltung und Werkzeugzustands- und -geometriemessung</p>
	<p>Vorschub-Antriebsmodule mit integrierter Verschleißanalyse der Führungsbahnen und Führungsbahnabdeckungen</p>	<p>Werkstück-Handlingsystem Palettenwechsler mit integriertem Spannsystem und Spannkraft- sowie Positionsüberwachung</p>
	<p>Funktions- und Sicherheitsüberwachung durch Sensorik und Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)</p>	<p>Fertigungsleitsystem zur Anbindung der Maschine an die Werkzeug- und Werkstücklogistik über flexible Transportsysteme</p>

Bild 9.3 Mechatronische Baugruppen von Werkzeugmaschinen

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 Bild 9.4 sind in vereinfachter Form für das mechatronische System eines Antriebsmoduls das Funktionsprinzip, der regelungstechnische Wirkplan und der prinzipielle Aufbau dargestellt.

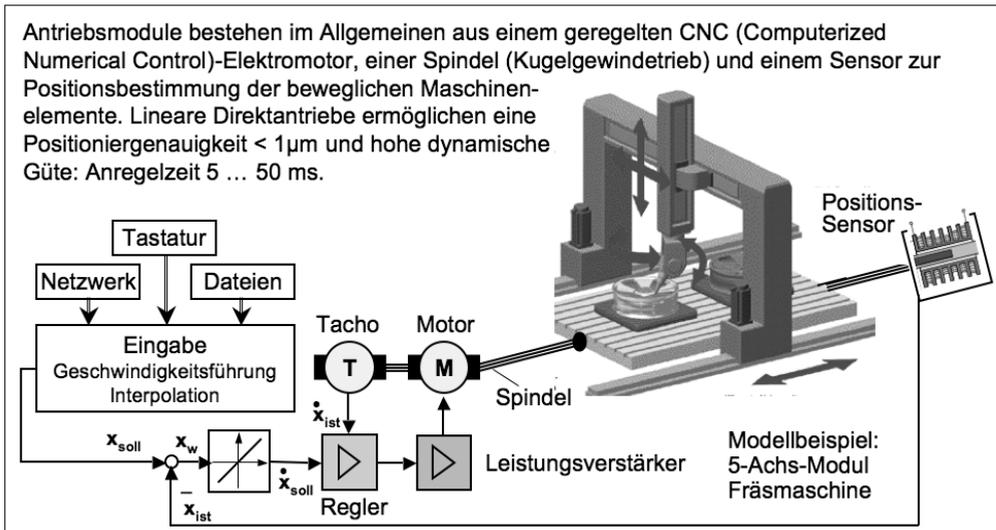


Bild 9.4 Mechatronischer Modul für Werkzeugmaschinen-Antriebe, Prinzipdarstellung

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 die Z-Koordinate (Länge). Mit den G-Befehlen (G = 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 Mikroproduktionstechnologien

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 Kapitel 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 – 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 Tabelle 9.1 zusammengestellt sind.

Tabelle 9.1 Übersicht über Fertigungstechnologien der Makro-, Mikro- und Nanotechnik

Fertigungsverfahren	Makrotechnik	Mikrotechnik	Nanotechnik
Trennen	Formänderung fester Körper durch Zerteilen, Zerlegen, Abtragen oder Zerspanen, z.B. Bohren, Drehen, Fräsen, Schleifen	Subtraktiv-Techniken • Mikro-Zerspanen mit Formdiamanten • Ätztechniken • Funkenerosion • Laser-Mikroablation	Additiv-Techniken „Nano-Fertigen“ von Stoffen aus Atomen/ Molekülen unter Anwendung der Nano-Positionierungstechnik
Urformen	Fertigen fester Körper aus formlosem Stoff	Mikro-Formtechniken • Abformverfahren • Heißprägen • Spritzgussverfahren	
Umformen	Formänderung bei Erhaltung von Masse und Kohäsion		
Fügen	Dauerhaftes Zusammenbringen von Werkstücken oder mit formlosen Stoff	Aufbau- und Verbindungstechniken • Laserstrahlfügen • Elektronenstrahlschweißen • Bonden • Löten • Kleben	
Beschichten	Aufbringen von fest haftenden Schichten aus formlosem Stoff auf Werkstücke, z.B. Galvanik, Emaillieren	Dünnschichttechniken • Aufdampfen • Sputtern • Physical Vapor Deposition • Chemical Vapor Deposition	
Stoffeigen-schafts-ändern	Fertigen fester Körper durch Umlagern, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen	Lithographie, LIGA-Technik: • Lithographie + Galvanoformung + Abformung	

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 Mikrometern 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 Bild 9.5. Die mit Abstandssensoren erfassten Lageabweichungssignale werden über einen Mikroprozessor (μP) in Korrektur-Stellsignale eines Piezo-Aktors zu Verbesserung der Werkstückrundheit überführt.

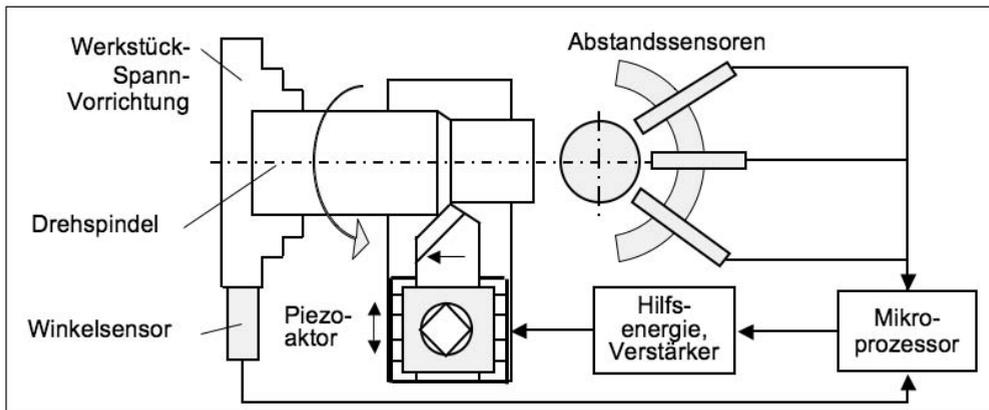


Bild 9.5 Mechatronischer Modul für eine Hochpräzisionsdrehvorrichtung

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 Biegebalen, wie z. B. in Beschleunigungs- oder Drucksensoren, siehe Abschnitt 9.3.

Funkenerosion: Hierbei wird zwischen eine 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 Drahterosion, bei der man einen dünnen Metalldraht (oft nur wenige $10\ \mu\text{m}$ 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 Mikro-Produktionstechnik mit den erzielbaren Oberflächengüten und zugehörigen Abtragraten der einzelnen Verfahren gibt Bild 9.6.

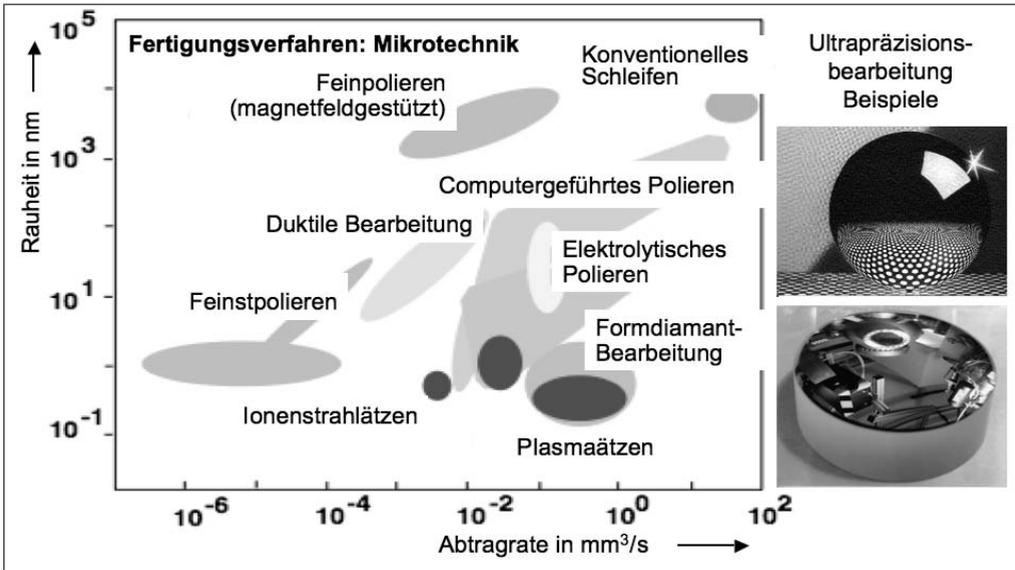


Bild 9.6 Kennfelder der Methoden der Mikro-Produktionstechnik (Subtraktivverfahren)

Mikro-Formtechniken

Abformverfahren beruhen darauf, dass die Form eines Werkzeugs (Formwerkzeug, Master) einem weicheren Material mechanisch eingeprägt 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 Bin-

der) 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 Luftauslassfugen 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 mit 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 Kapitel 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 Fügechnik auch Materialbearbeitung und -abtrag realisieren kann.

Bonden kennzeichnet Mikrotechnologien zum Verbinden von Halbleiterbauelementen (Dioden, Transistoren, integrierte Schaltungen, etc.) oder von Schaltkreisen in Hybrid-

schaltungen 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 weitest 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 Laserstrahllöten 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.

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 Photolithographie 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 eingepägt und additive oder subtraktive Bauteilstrukturen erzeugt werden.

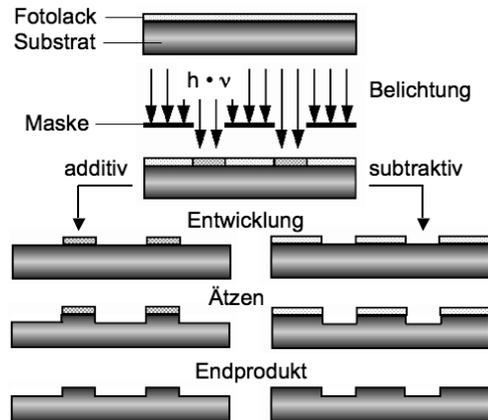


Bild 9.7 Das Prinzip der Photolithographie

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 Bild 9.8. Es lassen sich bei Verwendung von Optiken aus Quarz Auflösungen von etwa 100 nm mit Quecksilber-

hochdrucklampen ($\lambda = 365 \text{ nm}$, I-Linie) und mit Excimerlasern ($\lambda = 193 \text{ nm}$) auch darunter herstellen. Neuerdings können mit der *Extreme Ultra Violet Lithography EUVL* ($\lambda = 13 \text{ nm}$, Hochvakuum) unter Verwendung von Spiegeloptik, da Linsensysteme im EUVL-Wellenlängenbereich nicht mehr transparent sind, Strukturen im Dimensionsbereich von 30 nm erzeugt werden.

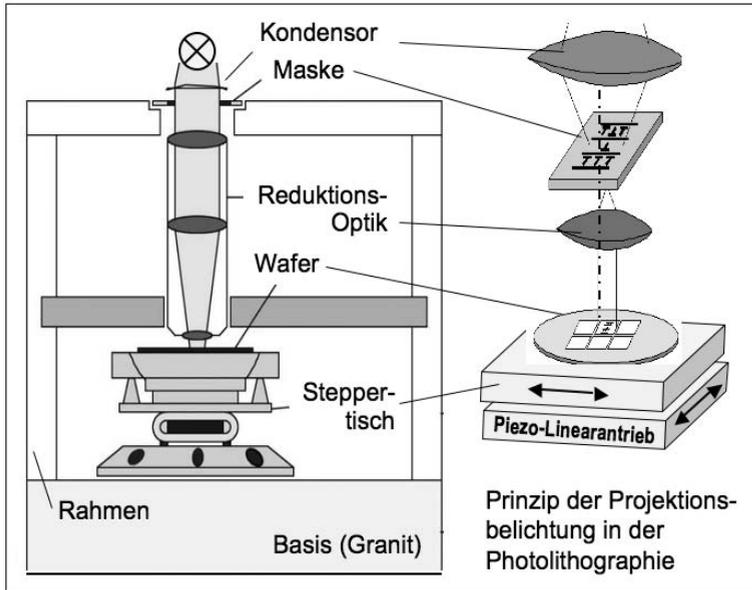


Bild 9.8 Aufbau und Funktion der Gerätetechnik für die Lithographie

LIGA-Technik

Das Verfahren besteht aus den Hauptschritten Lithographie, Galvanoformung und Abformung. Für eine dreidimensionale Struktur wird beim Lithographieschritt eine bis zu 1mm 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 Prägwerkzeug 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.

Nanotechnik

Ganz neue Möglichkeiten einer „Nano-Produktionstechnik“ eröffnen die Nano-Piezo-Steller der Rastertunnelmikroskopie (vgl. Bild 8.5). Im Unterschied zu der stets aus „Vollmaterial“ arbeitenden spanenden Fertigung können in „Additivtechnik“ Stoffe aus elementaren atomar/molekularen Bausteinen synthetisiert werden, siehe Bild 9.9.

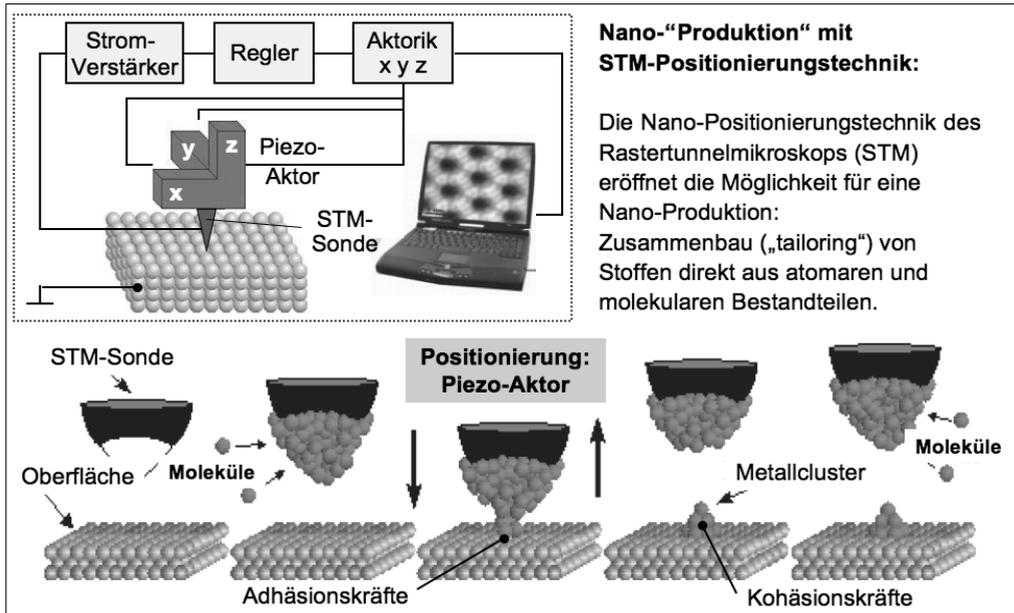


Bild 9.9 Prinzip einer Nano-Produktionstechnik

9.3 Mikrotechnologien für Sensoren und Aktoren

Von den dargestellten Mikrotechnologien haben für die Mechatronik die Herstellungstechnologien für Mikrosensoren (siehe Kapitel 5.9) und Mikroaktoren (siehe Kapitel 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, Al_2O_3) gedrückt, getrocknet und eingebrannt. Die damit herstellbaren Strukturen sind typisch 10 μm dick und 100 μm 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-Temperatursensoren aus MnO oder RuO_2
- Gassensoren aus 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, 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
- Magnetfeldsensoren: Ferromagnetika
- Gassensoren: Metalloxide, wie 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 Dampfabscheidung (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 Bild 9.10 in vereinfachter Weise erläuterten Technologien herstellen.

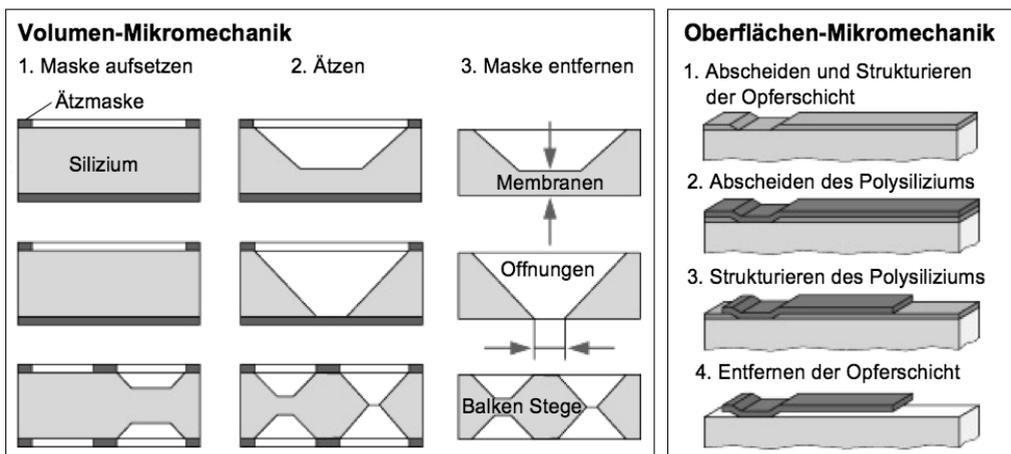


Bild 9.10 Technologien zur Herstellung mikromechanischer Bauelemente aus Halbleitern

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 bis 50 μm .
- Oberflächenmikromechanik: Realisierung von Mikrostrukturen durch Abscheiden und Strukturieren einer Opferschicht, Abscheiden und Strukturieren des Sensor-materials (Polysilizium), Entfernen der Opferschicht.

Anwendungsbeispiele dieser Technologien in der Mikrosensorik und in der Mikroaktuatorik sind in den Kapiteln 5.9 und 6.8 mit charakteristischen Beispielen dargestellt.

10 Feinwerktechnik

Die Mechatronik in der Feinwerktechnik (engl. **Precision Engineering**) wird einleitend in Bild 10.1 durch ein technisches System im öffentlichen Verkehrswesen illustriert, das sämtliche Merkmale mechatronischer Systeme feinwerktechnisch konkretisiert.

Funktion und Struktur eines Fahrscheinautomaten:
 Mechanik-Elektronik-Informatik-Optik
 + Sensorik-Prozessorik-Aktorik + Information-Stoff-Energiefluss.

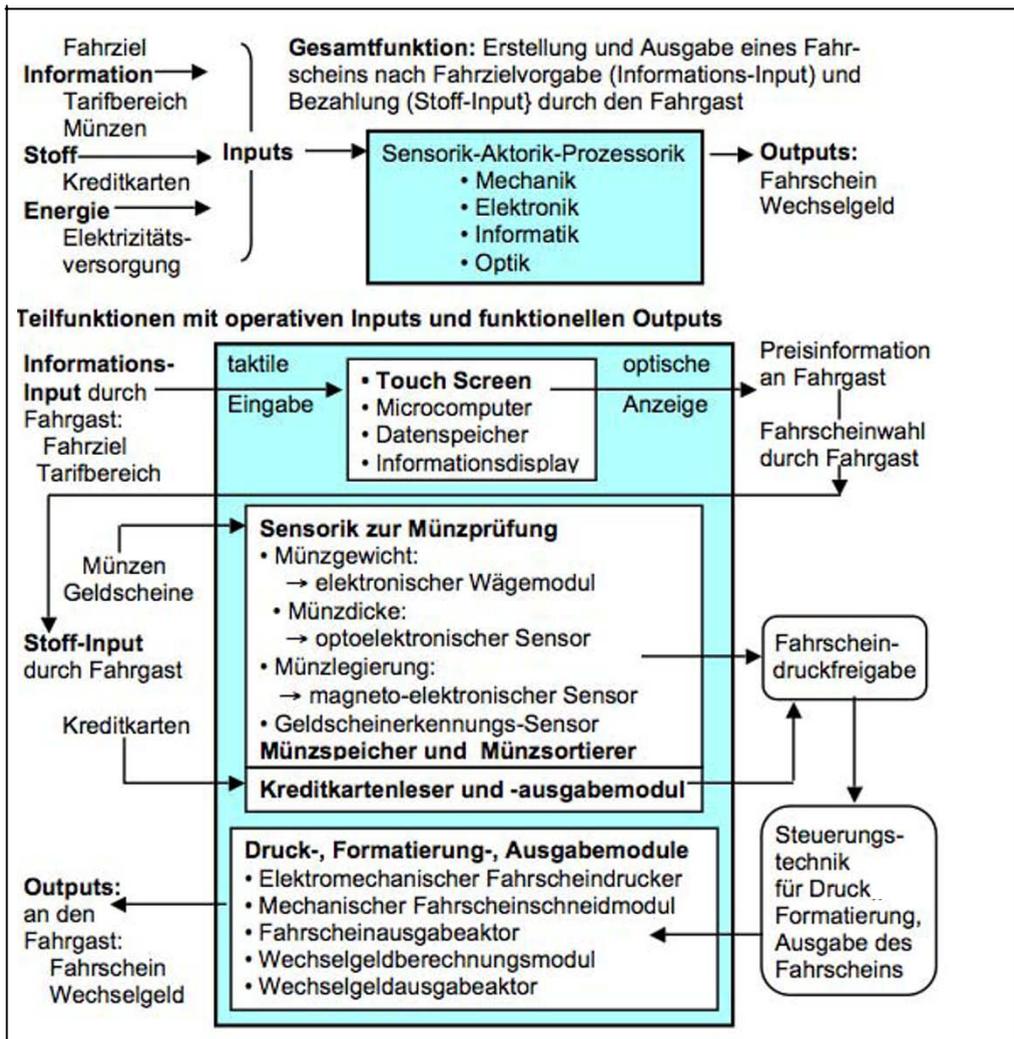


Bild 10.1 Funktionszusammenhang eines Fahrscheinautomaten. Dieses mechatronische System steht allein in Berlin mehr als 700-mal und liefert im Dialogbetrieb mit Fahrgästen von S-Bahn, U-Bahn und Bussen täglich viele Tausend fahrgastsspezifisch ausgestellte Fahrscheine

Die Feinwerktechnik, die aus der fachlichen Kombination *Feinmechanik-Optik-Elektrik* hervorging, war bereits vor Begründung der Mechatronik eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft; sie wird heute wie folgt gekennzeichnet:

Feinwerktechnik: Zweig der Technik, der sich mit der Konstruktion und Fertigung technischer Geräte, vor allem der Feinmechanik, Optik, Elektronik, Optoelektronik, Signalübertragung sowie Steuerungs-, Regelungs- und Mikrosystemtechnik befasst. Es bestehen enge Verbindungen zu Elektrotechnik und Informatik, da die entwickelten Geräte im Allgemeinen signalorientiert sind und der Erzeugung und Verarbeitung sowie Übertragung elektrischer, optischer, akustischer und anderer Signale dienen.

Durch Anwendung der Mechatronik können, wie auch in den anderen klassischen Gebieten der Technik, die Möglichkeiten der Feinwerktechnik erweitert werden. Dies wird – nach einer kurzen Übersicht über die *Mikrosystemtechnik* – für die beiden originären Teilbereiche der Feinwerktechnik, nämlich *Feinmechanik* und *Optik* dargestellt.

10.1 Mikrosystemtechnik

Mikrosysteme vereinen mit Bauteilabmessungen im mm/ μ m-Bereich Funktionalitäten aus Mikromechanik, Mikrofluidik, Mikrooptik, Mikromagnetik, Mikroelektronik mit Bauteilen und Modulen, die durch Mikro-Produktionstechnologien und miniaturisierte Aufbau- und Verbindungstechnik erstellt werden. Bild 10.2 zeigt eine Übersicht.



Bild 10.2 Mechatronik in der Mikrosystemtechnik: die grundlegenden Module und Technologien

Im oberen Teil von Bild 10.2 sind die für die Mikrosystemtechnik erforderlichen Mikro-Produktionstechnologien sowie die Aufbau- und Verbindungstechniken zusammengestellt. Der mittlere Teil von Bild 10.2 nennt die grundlegenden Module mechatronischer Mikrosysteme:

- Struktur- und Funktionskomponenten
- Mikroaktorik
- Mikroprozessork
- Mikrosensorik.

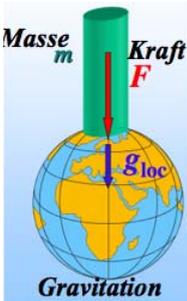
Das Zusammenwirken von Sensorik, Aktorik und Prozessork in mechatronischen Systemen wurde in Kapitel 6.6.1 behandelt und das Prinzip der Vernetzung von Sensorik und Aktorik in der Mikrosystemtechnik in Bild 6.22 illustriert. Typische Beispiele miniaturisierter Systeme sind im unteren Teil von Bild 10.2 dargestellt:

- Miniaturmotor (MEMS, Micro Electro-Mechanical System)
- Lichtmodulator (MOEMS, Micro Opto-Electrical-Mechanical System)
- Computer-Festplatten-Magnetkopf (HDD, Hard Disc Drive).

Alle in Bild 10.2 genannten Teilaspekte mechatronischer Systeme der Mikrosystemtechnik sind in den in Klammern genannten Kapiteln dieses Buches behandelt.

10.2 Mechatronisches System 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.

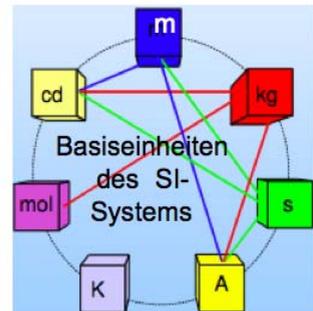


Physik der Wägetechnik

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 m/s^2 zu erteilen.

Die Gewichtskraft (Schwerkraft) ist abhängig von: Masse m , Erdbeschleunigung g_{loc} , Dichte von Luft ρ_L und Körper ρ_K am Ort des Körpers $\rightarrow F = m \cdot g_{loc} \cdot (1 - \rho_L / \rho_K)$. In der Metrologie wird durch diese Definition die Kräfteinheit (N) auf die Einheiten *Masse* (kg), *Länge* (m), *Zeit* (s) des SI-Systems zurückgeführt. Eine *Waage* ist ein Messgerät, das die Masse eines Körpers durch die Einwirkung der Schwerkraft auf diesen Körper ermittelt, Der *Wägewert* ist der Messwert der Wägung, er ist gleich der Masse des Gewichtstücks, das die Waage im Gleichgewicht hält.



Die klassischen feinmechanischen Prinzipien der *Neigungswaage* und der *Balkenwaage* zeigt Bild 10.3. Durch Anwendung eines Laserinterferometers als Nullindikator konnte bei dem historischen Massekomparator der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) eine Anzeigegenauigkeit < 10 Mikrogramm erreicht werden.

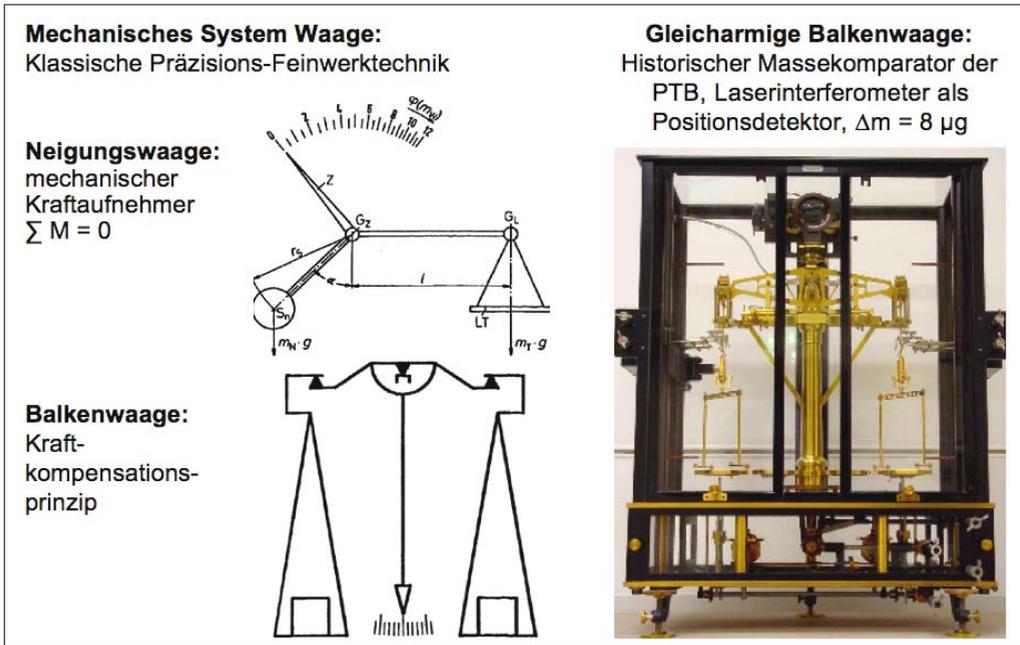


Bild 10.3 Die klassischen mechanischen Systeme der Wägetechnik

Mechatronische Waagen basieren auf verschiedenen Wirkprinzipien. Bild 10.4 zeigt dazu eine allgemeine Übersicht für die Funktionskette

- *Masse* \rightarrow *Gewicht* \rightarrow *elektrische Größe* \rightarrow *Wägewert*.

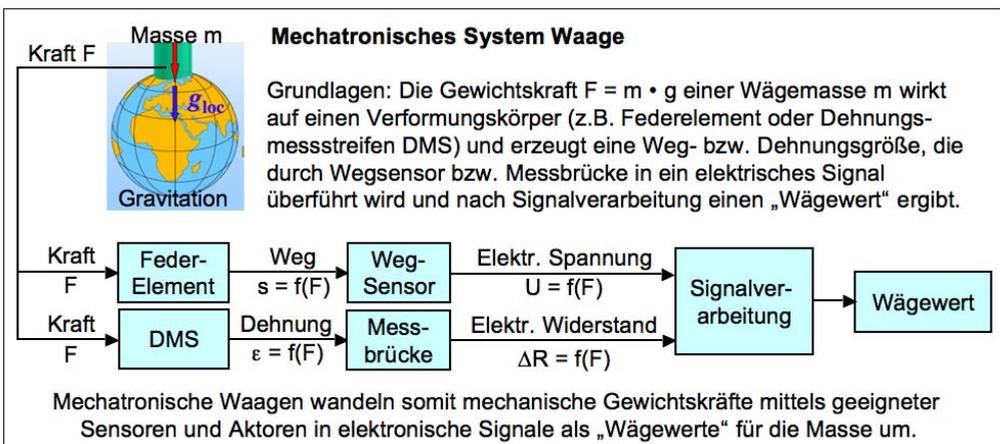


Bild 10.4 Die mechatronischen Prinzipien der Wägetechnik

Dehnungsmessstreifen-Wägeprinzip

Das DMS-Wägeprinzip verwendet *Verformungskörper*, mit denen die Wägemasse in eine mit DMS durchzuführende *Kraft-Sensorik* (siehe Kapitel 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.

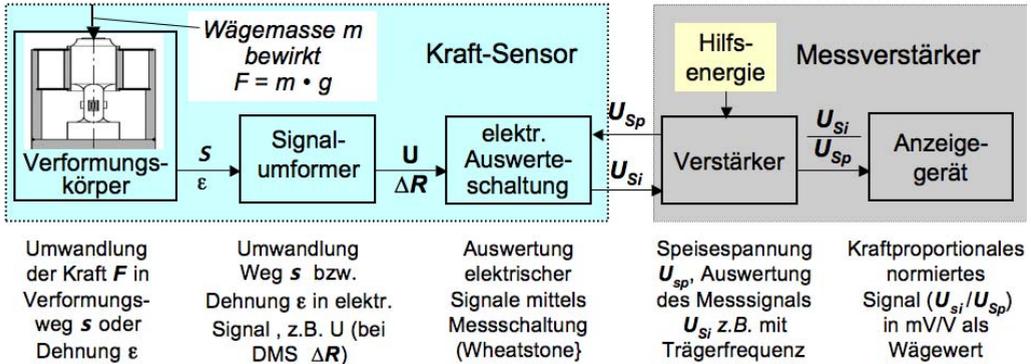


Bild 10.5 Messkette für die Kraft-Sensorik in Waagen mit dem DMS-Prinzip

Eine mechatronische Waage nach dem DMS-Prinzip besteht gemäß Bild 10.5 aus zwei grundlegenden Modulen, die sich wiederum aus verschiedenen Elementen zusammensetzen:

- Kraft-Sensor-Modul, bestehend aus Verformungskörper, Signalumformer, elektronische Auswerteschaltung
- Messverstärker, bestehend aus Verstärkereinheit, Anzeigergerät, Hilfsenergie.

Die technische Gestaltung einer mechatronischen Waage nach dem DMS-Prinzip mit ihren grundlegenden Modulen ist in Bild 10.6 dargestellt.

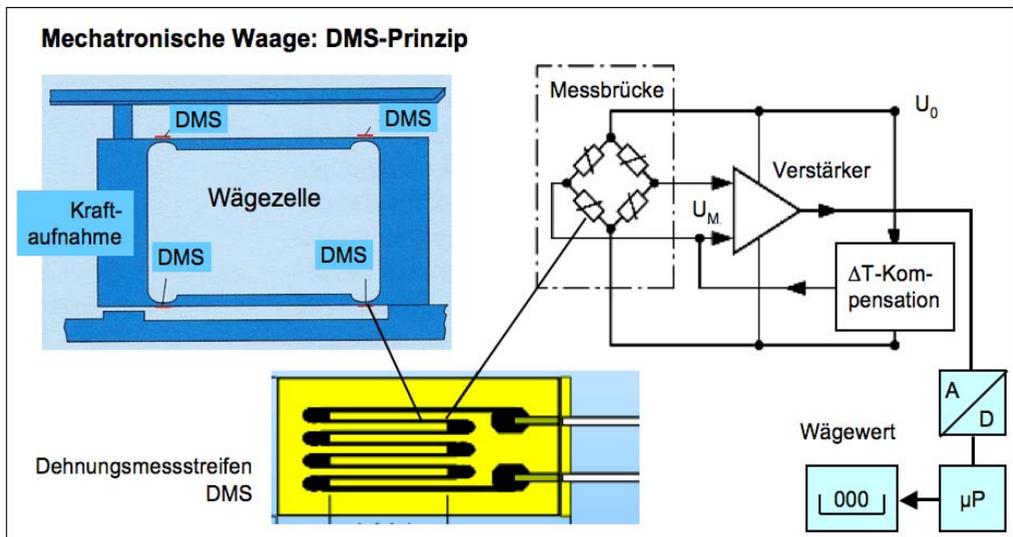


Bild 10.6 Mechatronische Waage nach dem DMS-Prinzip

Interferenzoptisches Wägeprinzip

Bei diesem Prinzip bewirkt die zu bestimmende Masse die elastische Auslenkung eines Wägearms, die interferenzoptisch gemessen wird (vgl. Bild 5.31) und über eine Auswerteelektronik den Wägewert ergibt, siehe Bild 10.7.

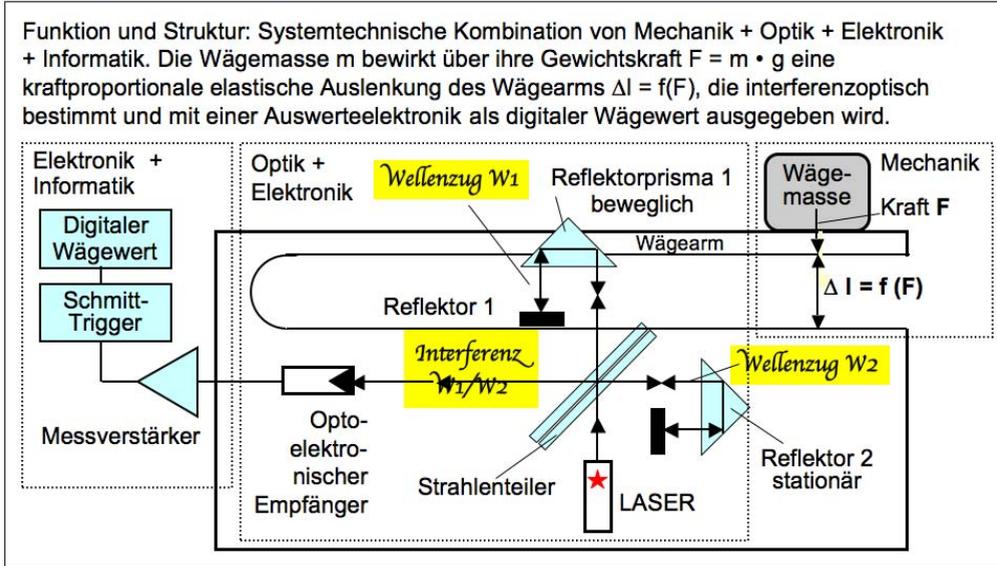


Bild 10.7 Das interferenzoptische Prinzip der mechatronischen Wägetechnik

EMKK-Wägeprinzip (Elektromagnetische Kraftkompensation)

Die Gewichtskraft der zu bestimmenden Wägemasse wird durch eine, von einem elektrodynamischen Aktor erzeugte und mittels Positionssensorik geregelte Gegenkraft kompensiert. Bild 10.8 zeigt den Funktionszusammenhang.

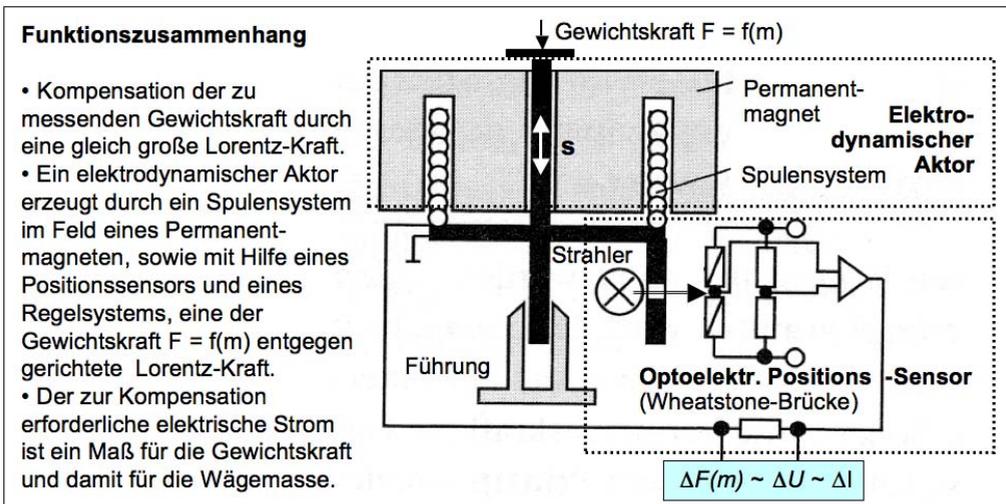


Bild 10.8 Funktionsprinzip einer EMKK-Waage und prinzipieller Aufbau

Der Systemzusammenhang der mechatronischen EMKK-Waage besteht gemäß Bild 10.9 im Zusammenwirken von Hebelsystem, Positionssensor, Aktor und Regler (PID, vgl. Bild 4.9), dargestellt sind auch der Wirk- und Bauzusammenhang.

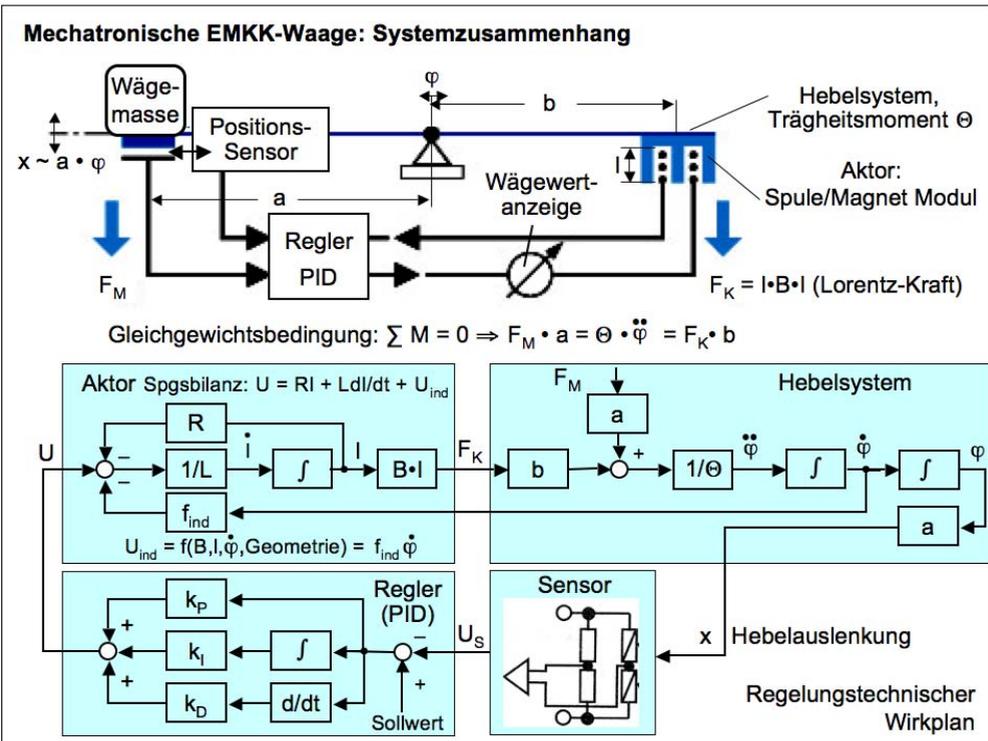
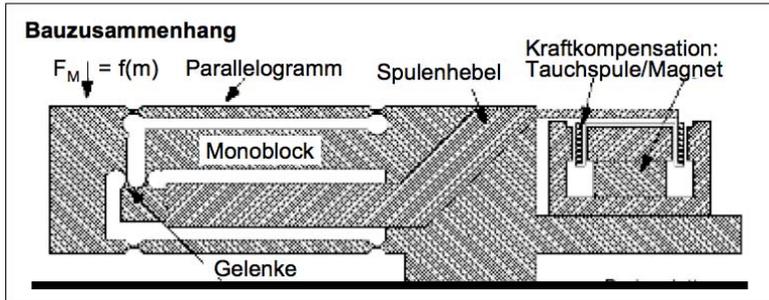
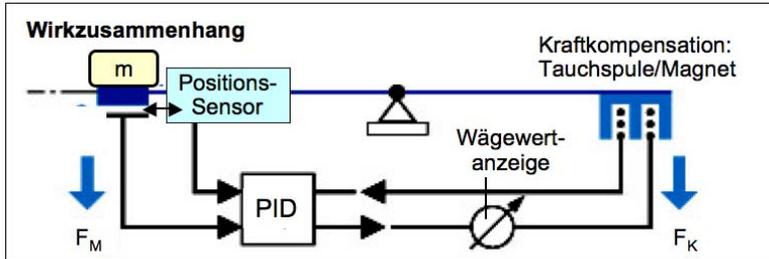


Bild 10.9 Mechatronische EMKK-Waage: Wirk-, Bau- und Systemzusammenhang

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. Beispiele von NSW: Plattformwaagen für Handel und Industrie, medizinische Personenwaagen, Behälterwaagen, Analysen- und Laborwaagen, siehe Bild 10.10. Die europäische Zulassung von NSW erfolgt auf der Basis der Europäischen Norm EN 45501.

**Mechatronisches System Waage (EMKK-Prinzip)
Technische Ausführung**



Ablesbarkeit	Bezeichnung	übliche Höchstlast
0,1 µg	Ultramikrowaage	bis 5 g
1 µg	Mikrowaage	1 bis 25 g
10 µg	Halbmikrowaage oder Semimikrowaage	30 bis 200 g
0,1 mg	Makrowaage oder Analysenwaage	50 bis 500 g
≥ 1 mg	Präzisionswaage	≥ 100 g

Bild 10.10 Technische Ausführung von Analysen- und Laborwaagen

Selbsttätige Waagen (SW): Waagen, die vorgegebenen Programmen charakteristischer Abläufe folgen und ohne Eingriff eines Bedieners korrekte Wägeresultate erzielen. Beispiele: Förderbandwaagen, Fahrzeugwaagen, Fertigpackungskontrollwaagen, Frachtgebührenwaagen, Gewichts- u. Preisauszeichnungswaagen, siehe Bild 10.11.

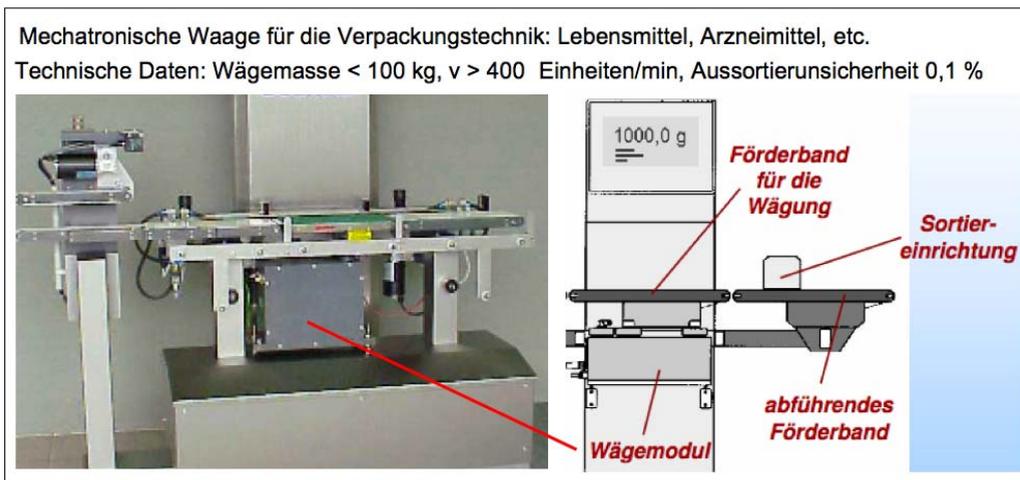


Bild 10.11 Technische Ausführung eines selbsttätigen Waagensystems

10.3 Mechatronisches System 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. Bild 10.12 zeigt die hauptsächlichsten technischen Ausführungen.



Bild 10.12 Kameratypen: Messsucherkamera (oben links), Digitalkamera (oben rechts), Spiegelreflexkamera (unten links), Bridge-Kamera *All-in-One* (unten rechts)

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 Bildinformation ist damit jeder elektronischen Darstellungs- oder Weiterverarbeitungstechnik zugänglich. *Spiegelreflexkameras* besitzen im Strahlengang hinter dem Objektiv und vor der Filmebene einen mechanisch schwenkbaren 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. Die folgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht und nennt beispielhaft einige Teilfunktionen in Stichworten:

- Speichermedium in Fotokamera einbringen: Film oder ggfs. Speicherkarte
- Energieversorgung Kamera, Batterie aufnehmen, verriegeln, Spannung abgreifen
- Energieüberprüfung, optische Anzeige (el. Spg), Energiesparfunktion (Stand-by)
- Kamera einschalten (Spannungsversorgung überprüfen)
- Belichtung vom Stativ? Fremdlichteinwirkung?
- Sucherfunktion: optischen Sucher fokussieren (Dioptrienanpassung)
- Spiegel bewegen, Objekt-Positionen betrachten, aufnehmen
- Motivprogramme: Auswahl und Einstellung, z.B. Sport: kurze Verschlusszeit; Landschaft: große Schärfentiefe, kleine Blende
- Kamera auf das Abbildungsobjekt fokussieren: manuell oder automatisch
- Autofokusbündel erzeugen, senden, empfangen, Fokussierung durchführen
- Laufzeit berechnen oder Kontrastverhältnis messen, Optimum berechnen
- Objektivbrennweite wählen und einstellen, Zoomfunktion
- Blendenwert errechnen und einstellen
- Blende einstellen, Blendenzahl anzeigen (fixieren) und übertragen (optisch, elektrisch), vor der Aufnahme auf Einstellwert schließen
- Streulichtblende aufnehmen und ggfs. Filter einsetzen (Polarisations-, UV-Filter)
- Beleuchtungsstärke messen, verarbeiten (Zeit-Blenden-Kombination)
- Blitzfunktion zuschalten, externen Blitz aufnehmen, synchronisieren. Aufnahmedaten übertragen
- Zoomblitz: Blitzreflektor (motorisch) einstellen
- Verschlusszeit errechnen, übertragen, einstellen
- Verschluss spannen
- Selbstauslöser aktivieren
- Digitalkamera: Menüfunktionen optisch anzeigen, einstellen
- Aufnahme auslösen, taktile, akustische Rückmeldung für Funktionsvorgang
- Aufnahmedaten anzeigen: Zeit, Blende, Blitzfunktion, Filmdaten
- Bild speichern: Film latent; CCD zwischenspeichern; CF-Card dauerhaft
- Digitalkamera: Bilddaten über Schnittstellen übertragen an PC, Drucker etc.
- Chip-Bilddaten anzeigen (LCD-Monitor), Wiedergabe, LösCHFunktion
- Fernsteuerung auslösen (Kabel, Funk, Infrarot) Einstelldaten übertragen
- Kamerahaltung erfassen: Hochformat, Querformat (Bilddatenanzeige)
- Bildstabilisation: Kamerabewegung sensorisch erfassen, berechnen, Korrekturlinse oder Empfängermatrix aktorisch bewegen.

Die Teilfunktionen einer Fotokamera werden durch geeignete Module und Komponenten technisch realisiert. Wie aus der Übersicht über die Teilfunktionen ersichtlich ist, sind dabei unterschiedliche optische, mechanische, elektronische und informations-technisch Aufgaben zu erfüllen sowie steuer- und regelungstechnisch aufeinander abzustimmen. Bild 10.13 zeigt an Beispielen von Spiegelreflexkameras die grundlegenden mechanisch-taktilen und optisch-sensorischen Komponenten.

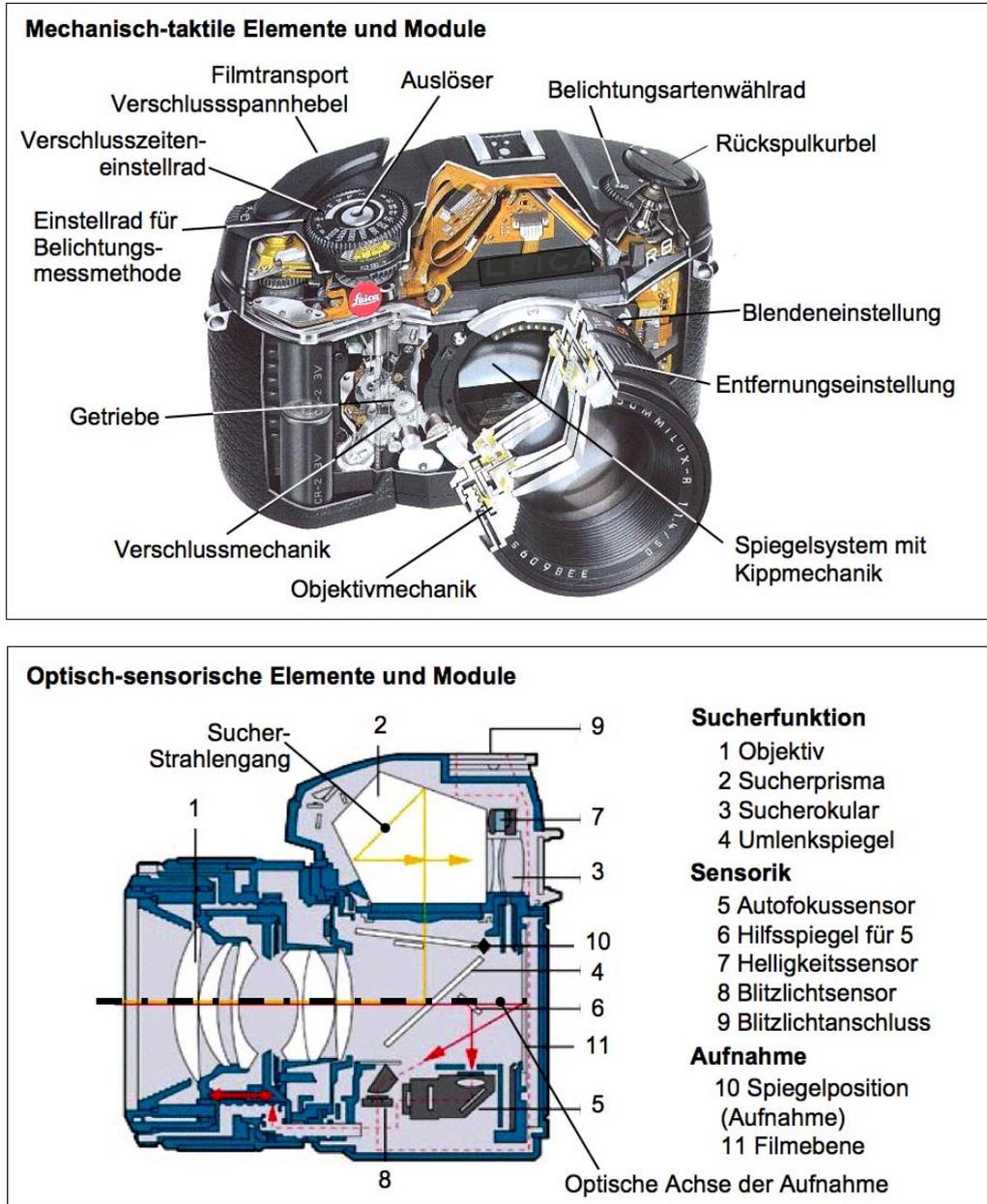


Bild 10.13 Mechanisch-taktile und optisch-sensorische Elemente von Spiegelreflexkameras

Digitalkameras basieren auf dem in Bild 10.14 erläuterten Funktionsprinzip der „pixelhaften“ Bildspeichertechnik unter Anwendung von Halbleiterspeichern; die Funktionsprinzipien sind in Kapitel 3.3 und die Herstellungstechnik in Kapitel 9.2 dargestellt.

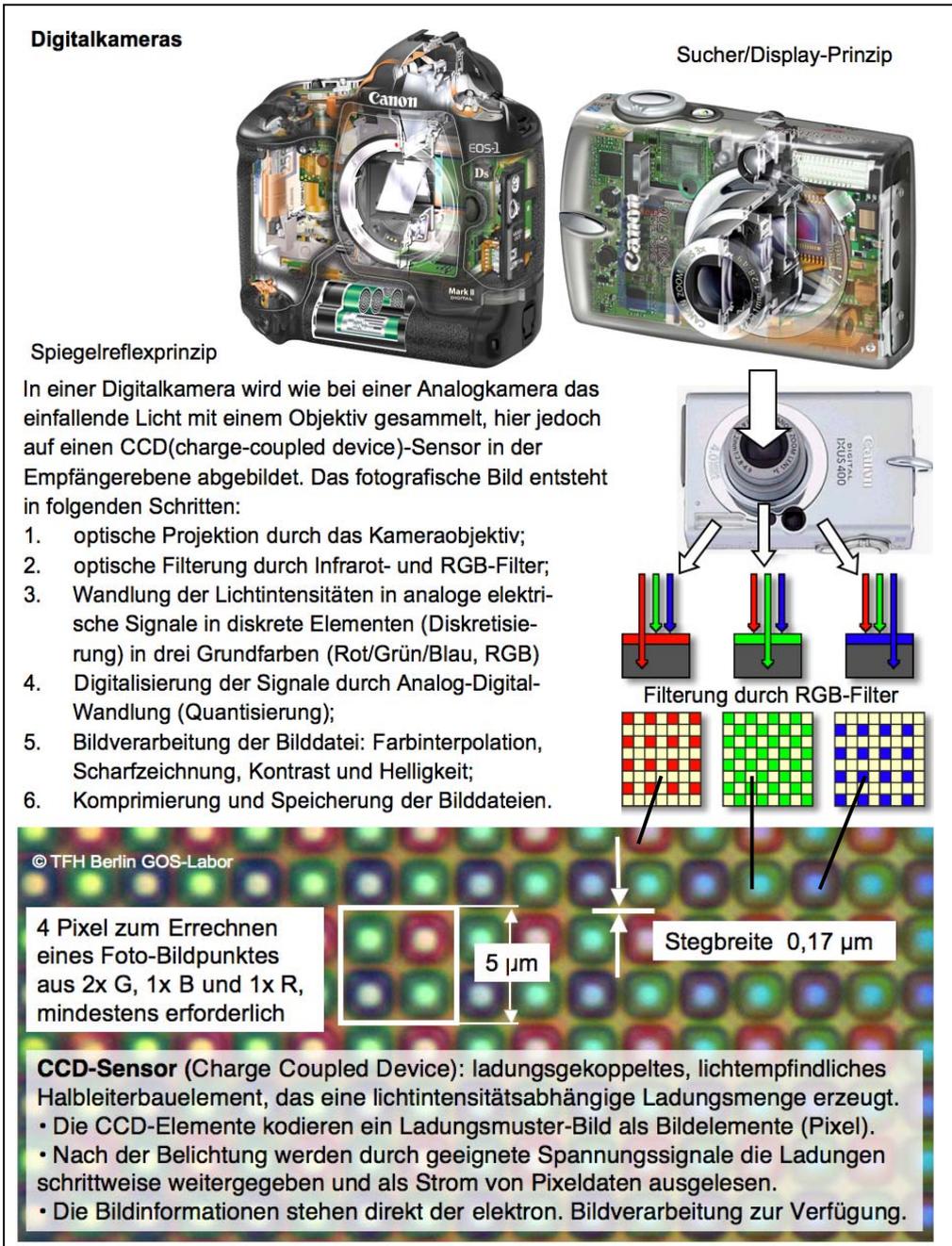


Bild 10.14 Funktionsprinzip und Speichermedium einer Digitalkamera

Die Struktur- und Funktionsmodule einer Kamera zeigt zusammenfassend Bild 10.15.

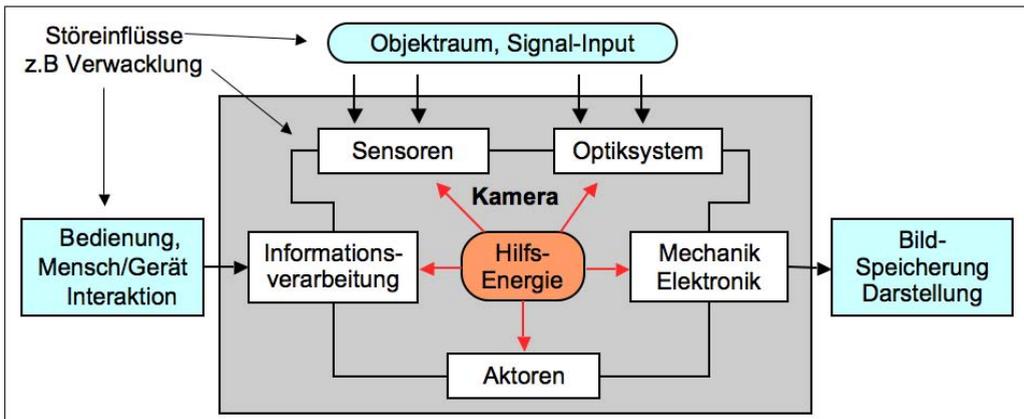


Bild 10.15 Blockschaltbild der Struktur- und Funktionsmodule einer Fotokamera

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. Bild 10.16 zeigt das Prinzip der Anordnung des Sensor-Aktor-Systems der Bildstabilisierung in der Abbildungsoptik einer Kamera.

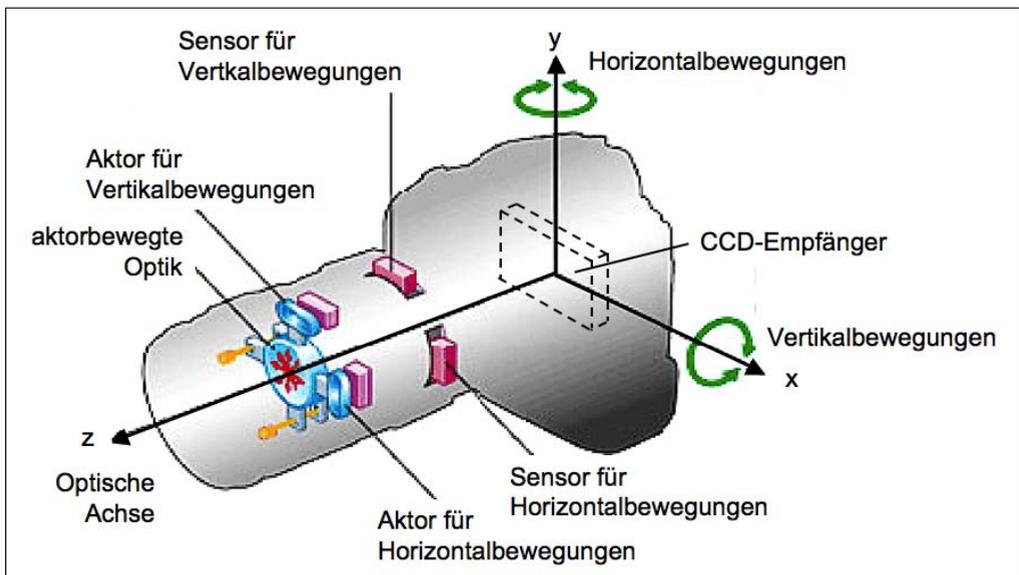


Bild 10.16 Mechatronisches Bildstabilisierungssystem in der Abbildungsoptik einer Fotokamera

Das in Bild 10.16 dargestellte mechatronische Prinzip wird heute auch zur Bildstabilisierung in Ferngläsern angewendet. Bild 10.17 zeigt ein geöffnetes Fernglasgehäuse mit den Optikkassungen, den Sensor- und Aktormodulen sowie den elektronischen Regler-Chipelementen. Die Funktion des Bildstabilisierungssystems wird durch den regelungstechnischen Wirkplan erläutert (Grundlagen siehe Kapitel 4). Das Prinzip des Wirkplans gilt auch für die in Bild 10.16 gezeigte Kamera-Bildstabilisierung.

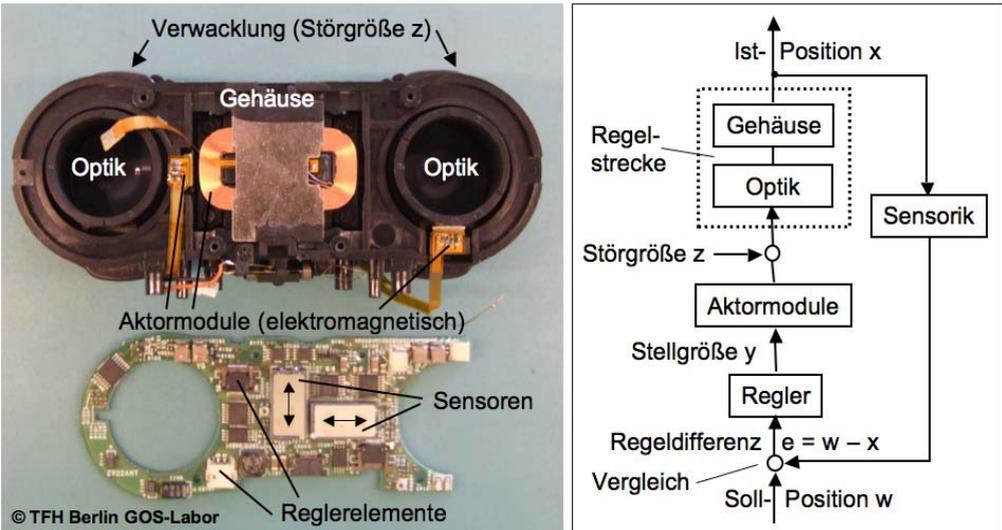


Bild 10.17 Fernrohr-Bildstabilisierung und regelungstechnischer Wirkplan

Neben der objektivseitigen Anordnung kann die Mechatronik der Bildstabilisierung auch im CCD-Empfängersystem angeordnet sein, siehe Bild 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. Auch für die Funktion dieses mechatronischen Systems gilt sinngemäß der Wirkplan von Bild 10.17.

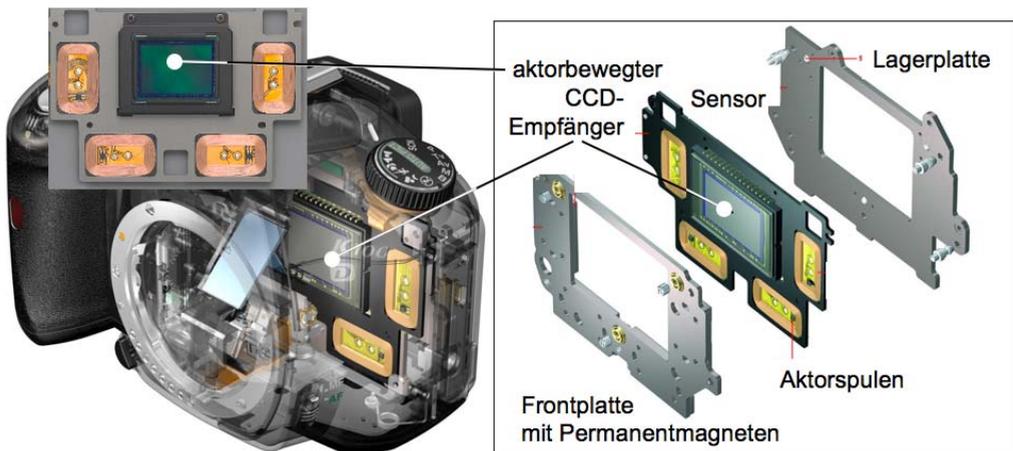


Bild 10.18 Mechatronisches Bildstabilisierungssystem im CCD-Empfänger einer Fotokamera

11 Audio-Video-Technik

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. Bild 11.1 zeigt die elementare Aufnahme-/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. DRAM-Speicher (Dynamic Random Access Memory) zeichnen sich bei allerdings geringerer Speicherkapazität durch sehr kurze Zugriffszeiten aus, Prinzip und Kenndaten sind in Kapitel 3.3, Bild 3.9, dargestellt.

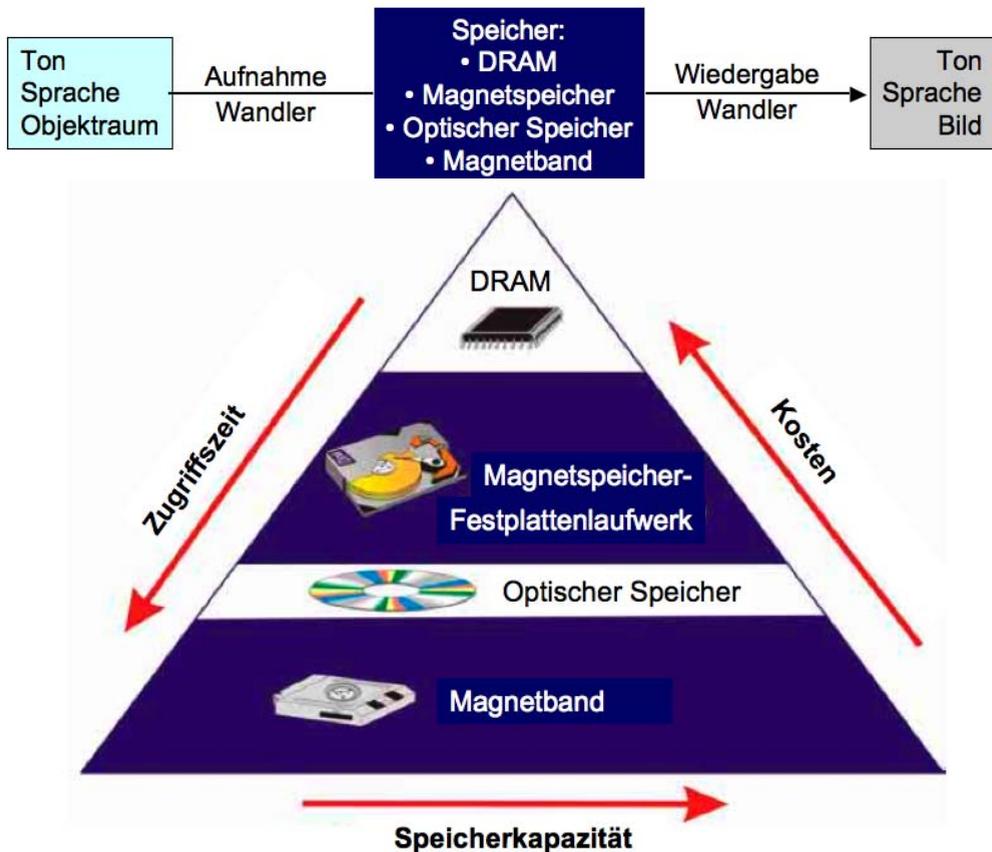


Bild 11.1 Übersicht über die Audio/Video-Technik und die hauptsächlichsten Speichertechniken

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 Schutzschicht und auf der Abspielseite mit einer spiegelnden Aluminium-Schicht versehen ist, siehe Bild 11.2.

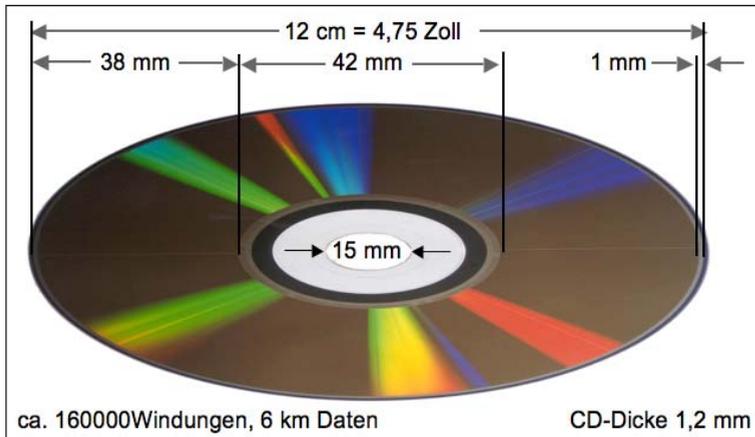


Bild 11.2 Die Compact Disc (CD) mit ihren standardisierten Abmessungen

Die digitalisierten Ton- oder Bildinformationen sind – gesehen von der Abspielseite – in einer spiralförmigen Datenspur mikrogeometrisch als „Pits“ und „Lands“ gespeichert, siehe Bild 11.3. Informationstechnisch entsprechen Pits oder Lands der binären 0 und Wechsel zwischen Pits und Lands der binären 1. Die optischen Datenträger der Audio-Video-Technik werden – ausgehend von einem mittels Lasertechnik gebrannten „CD-Master“ – durch die in Kapitel 9.2 beschriebene Spritzgusstechnik hergestellt. Bild 11.3 zeigt das Prägeprofil einer CD-Pressmatrize und die sich durch die Pressung ergebende Compact-Disc-Abformung sowie die digitalmikroskopisch aufgenommene Datenspur.

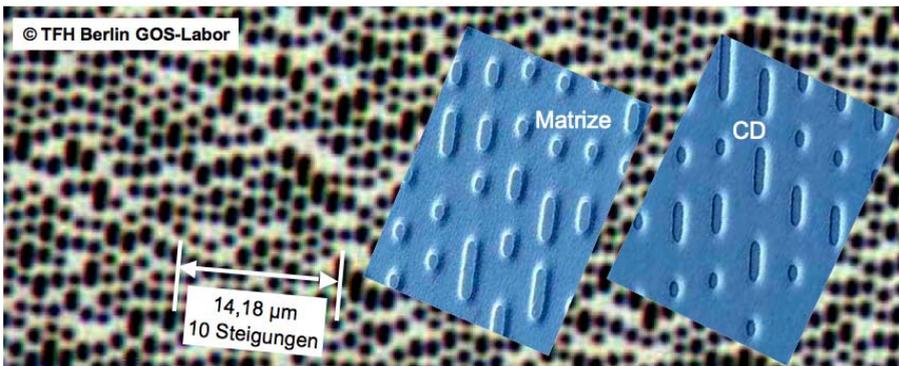


Bild 11.3 Compact-Disc-Abformung und Datenspur einer CD

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 Bild 11.4 sind die technischen Kenndaten der verschiedenen Speichermedien zusammengestellt.

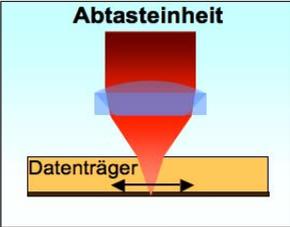
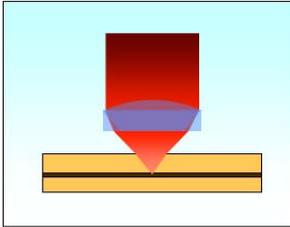
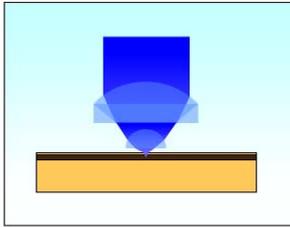
Abtasteinheit		
		
CD: Audio	DVD: Video	DVR: Video
Kapazität: 0.7 GB	4.7 GB	25 GB
Tastrate: 1.2 Mb/s	11 Mb/s	35 Mb/s
Optik: $\lambda = 780 \text{ nm}$	650 nm	405 nm
Optik-Apertur 0.45	0.60	0.85
Schichtdicke: 1.2 mm	0.6 mm	0.1 mm

Bild 11.4 Datenträger der Audio-Video-Technik und ihre technischen Kenndaten

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 löschbare CDs. Bei ihnen werden die 0-1-Bit-Informationen nicht mikro-*geometrisch* sondern mikro-*strukturell* „gebrannt“ und „gelesen“. Das Prinzip ist stichwortartig in Bild 11.5 dargestellt. Die Anwendung von CD-R und DC-RW erfordert auch die Verwendung der technisch zugehörigen Schreib- und Lesetechniken.

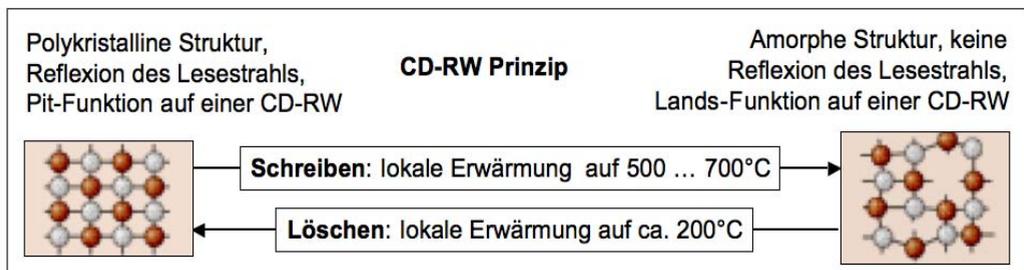


Bild 11.5 Funktionsprinzip und Struktur einer CD-RW (compact disc re-writeable)

11.2 Mechatronisches System CD/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 Schlittenservo von innen nach außen abgetastet, siehe Bild 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.

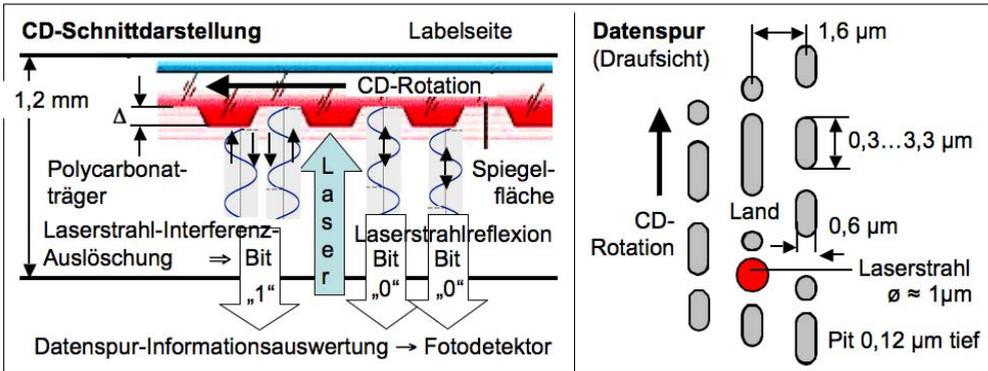


Bild 11.6 Querschnitt und Datenspur einer CD

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 $\Delta = (\Delta/4)/n = 0,12 \text{ }\mu\text{m}$. 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 ω der CD entsprechend der Laserposition r geregelt oder eine informationstechnische Datenegalisierung vorgenommen werden. Den Aufbau eines CD-Players zeigt Bild 11.7.

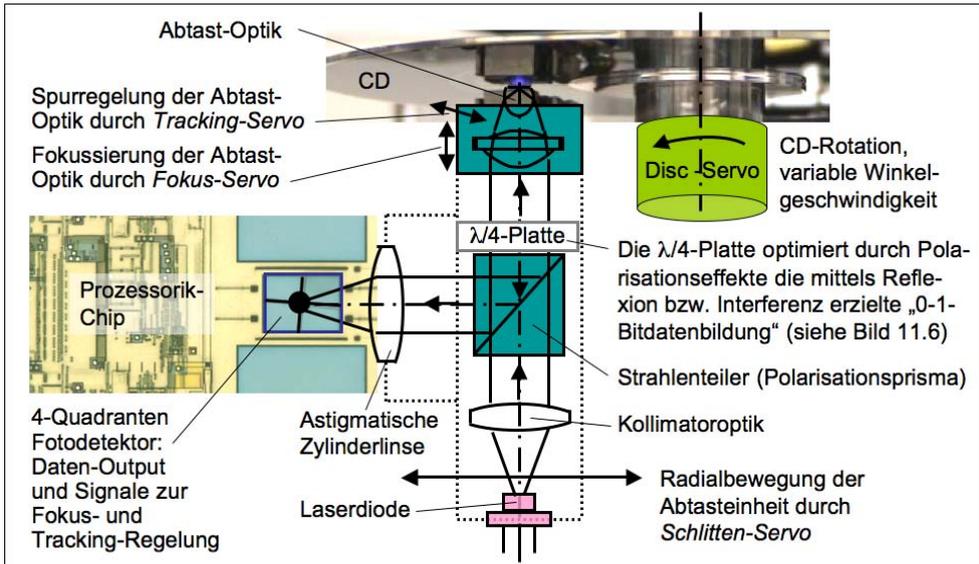


Bild 11.7 Funktionsprinzip, Strahlengang und Module eines CD-Players

Zur vertikalen Fokussierung und lateralen Ausrichtung des abtastenden Laserstrahls auf der Datenspur ist die Abtast-Optik in einem dynamischen Stellglied, dem 2-

Achsen-Fokus/Tracking-Servo geführt. Er erhält seine regelungstechnischen Korrektursignale von einem 4-Segment-Fotodetektor. Das Funktionsprinzip erläutert Bild 11.8.

- Fokussierung (Bild 11.8 oben): Bei vertikaler Defokussierung liefert die astigmatische Zylinderlinse (siehe Bild 11.7) ein elliptisches Signal für die Fokusregelung.
- Spurregelung (Bild 11.8 unten): 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.

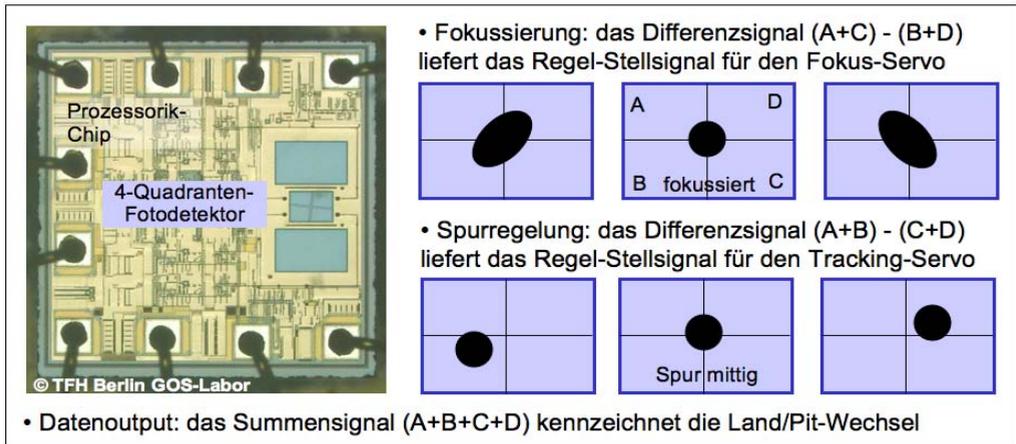


Bild 11.8 Prinzip des Fotodetektors eines CD-Players

Wie in Bild 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 Bild 11.9 dargestellt.

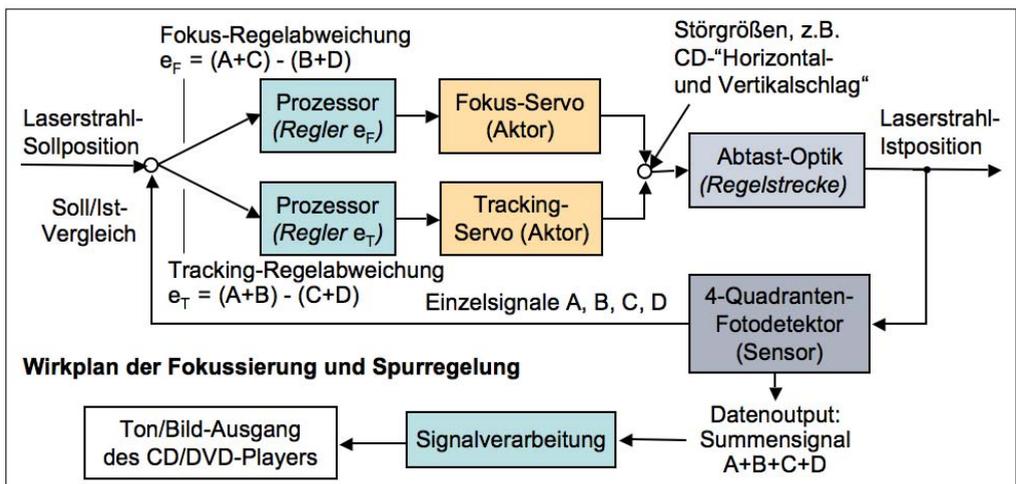


Bild 11.9 Blockschattdarstellung der Funktionsabläufe in einem CD-Player

Die konstruktive Gestaltung der CD-Player-Module *Abtast-Optik*, *Fokussierung* und *Spurregelung* zeigt Bild 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 (magnetische Flussdichte B) des Fokus/Tracking-Servos sowohl horizontal (Tracking) als auch vertikal (Fokussierung) regelungstechnisch bewegt werden.

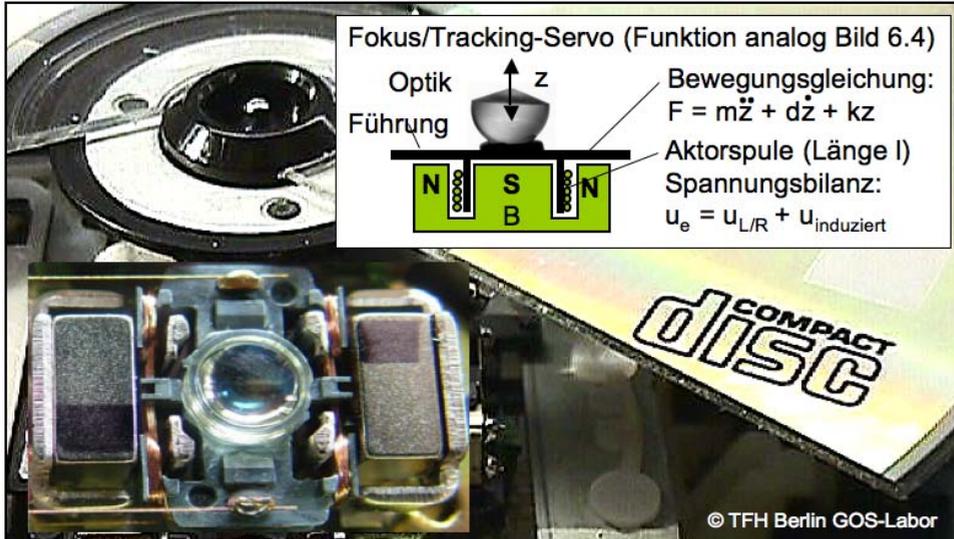


Bild 11.10 Die CD-Player-Module der Abtast-Optik, Fokussierung und Spurregelung

Die automatische Fokussierung der Laserstrahlabtastung der CD/DVD-Datenspur basiert auf dem in Kapitel 6 (vgl. Bild 6.4) beschriebenen elektrodynamischen Aktorprinzip der *mechatronischen Elementarmaschine*. Der aus diesem Prinzip ableitbare Wirkplan für den Fokussier-Regelkreis eines CD-Players ist Bild 11.11 dargestellt.

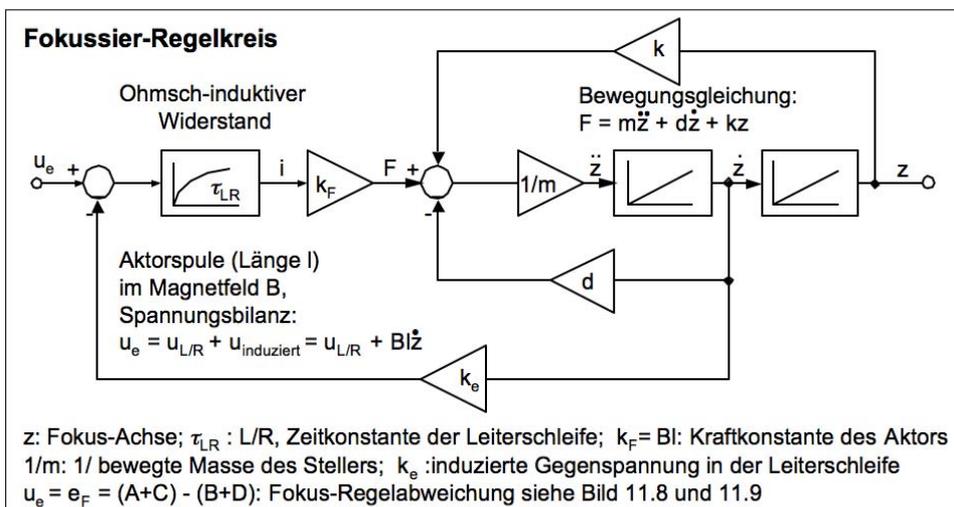


Bild 11.11 Der elektromechanische Wirkplan für die Fokussierung eines CD-Players

Eingangssignal U_e für den **Fokussier-Regelkreis** ist die von dem 4-Quadranten-Fotodetektor (Bild 11.8) gelieferte Fokus-Regelabweichung $e_f = (A+C) - (B+D)$, siehe Bild 11.9. Sie bewirkt mittels des in Bild 11.10 abgebildeten Fokus-Servo gemäß Wirkplan von Bild 11.11 die korrekte Position der Datenspur-Abtasteinheit in der Fokus-Achse z . Der Wirkplan für die **Radialpositionierung** – die durch einen Tracking-Aktor für kleine Auslenkungen und durch den Schlittenservo für große Auslenkungen über mehrere Datenspuren hinweg durchgeführt wird – ist in Bild 11.12 dargestellt.

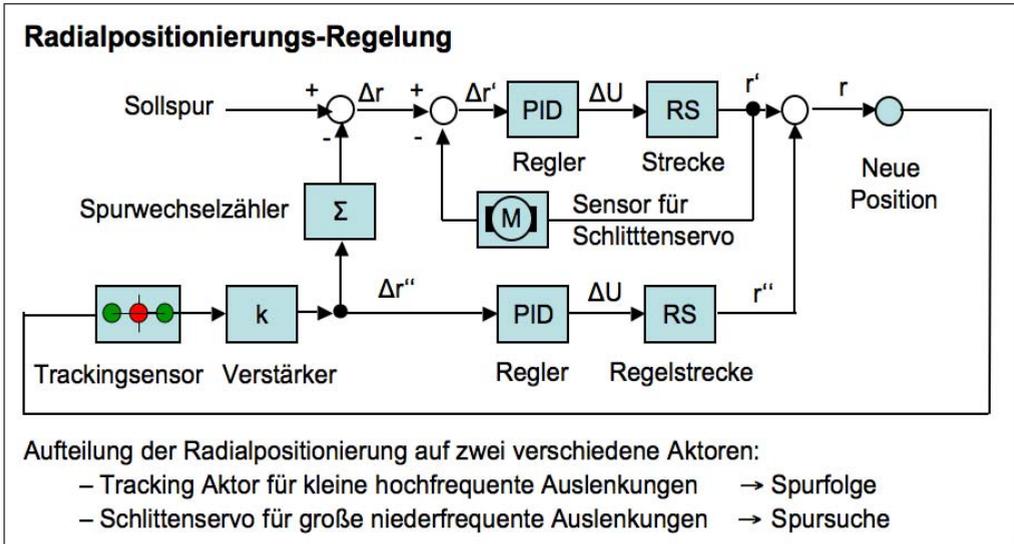


Bild 11.12 Der elektromechanische Wirkplan für die Radialpositionierung eines CD-Players

Die konstruktive Ausführung des Tracking-Aktors zeigt Bild 11.10 und die Modulelemente des Schlittenservos sind in Bild 11.13 abgebildet.



Bild 11.13 Der Schlittenservo eines CD-Players zur Radialbewegung der Laser-Abtasteinheit

Kompakte Geräte verwenden als Abtasteinheit eine so genannte FOP-Optik (Flat Optical Pick-up). Der Aufbau einer derartigen Abtasteinheit ist in Bild 11.14 dargestellt. Bei der FOP-Technik wird durch ein Umlenkprisma (Bild 11.14 unten rechts) der in Bild 11.7 dargestellte Strahlengang „horizontal geklappt“ und dadurch eine raumsparende konstruktive Gestaltung erreicht.

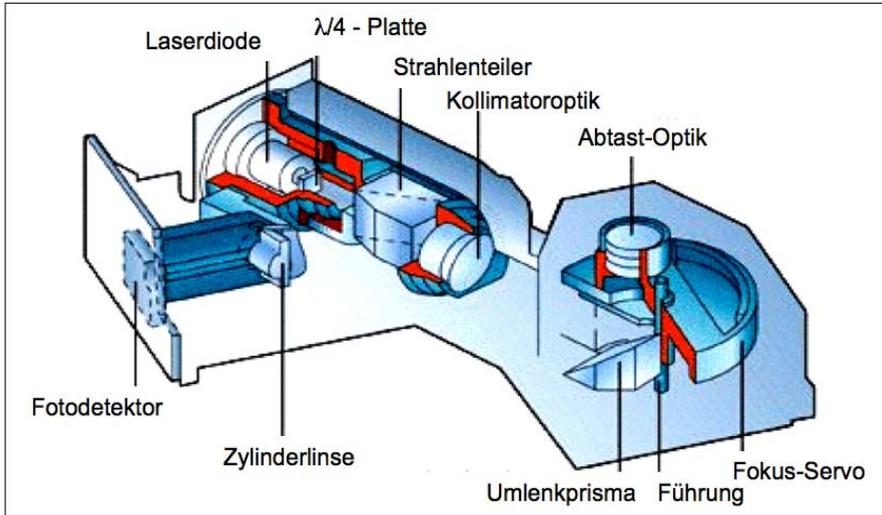


Bild 11.14 Abtasteinheit eines CD-Players in FOP-Bauweise

Der Funktionszusammenhang des mechatronischen Systems CD/DVD-Player ist zusammenfassend in Bild 11.15 in vereinfachter Weise als Blockschaltbild dargestellt.

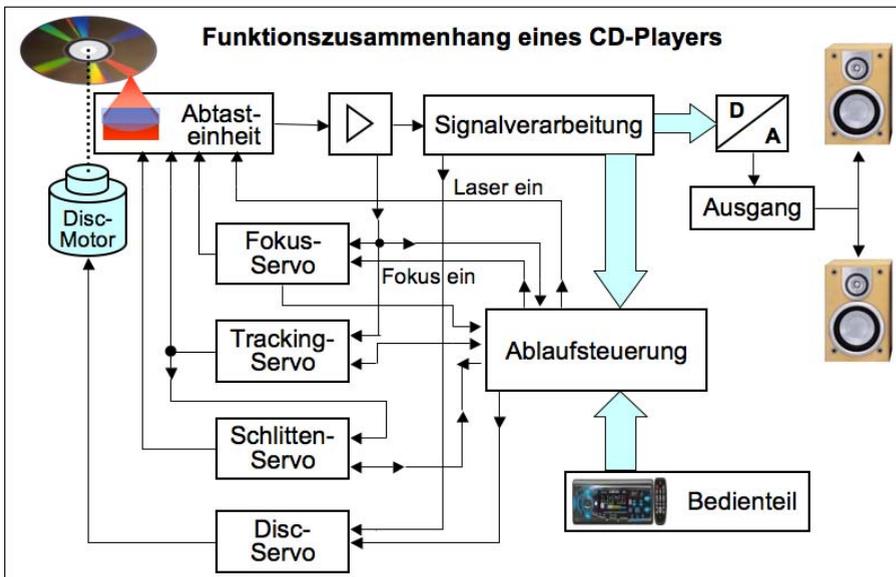


Bild 11.15 Blockschaltbild des Funktionszusammenhangs eines CD/DVD-Players

12 Computertechnik

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 Bild 12.1.



Computerarchitektur (John von Neumann)

Grundlegende Module:

- Recheneinheit, arithm/log. Einheit (ALU)
- Steuereinheit, meist mit ALU als
- Central Processing Unit zusammengefasst
- Eingabe- und Ausgabeeinheit
- Festplatte (hard disk drive): Speichermodul.

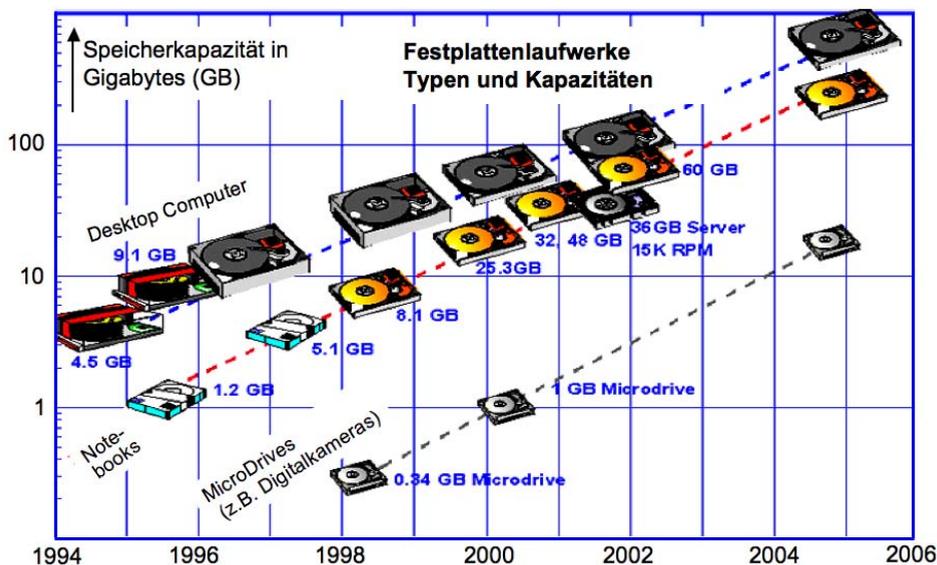


Bild 12.1 Computertechnik: ENIAC 1947 (*Electronic Numerical Integrator and Calculator*) im Vergleich zu heutigen Computern, Entwicklung der Festplattenlaufwerke

12.1 Magnetische Datenspeicher

Die magneto-mechanische Datenspeichertechnik basiert physikalisch auf der „0-1-Magnetisierung“ von Mikrodomänen, siehe Bild 12.2. Die Grundlagen der GMR (Giant Magneto Resistance) Computer-Speichertechnik sind in Kapitel 3.3 dargestellt. Technisch erforderlich sind Datenkodierung und Partitionierung des Speichermediums sowie eine Relativbewegung von Schreib/Lesekopf und Speichermedium.

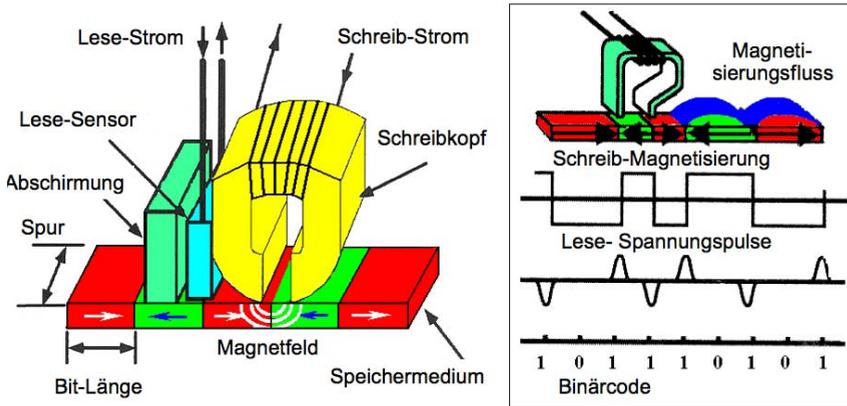


Bild 12.2 Funktionsprinzip der magneto-mechanischen Datenspeichertechnik

12.2 Mechatronisches System Festplattenlaufwerk

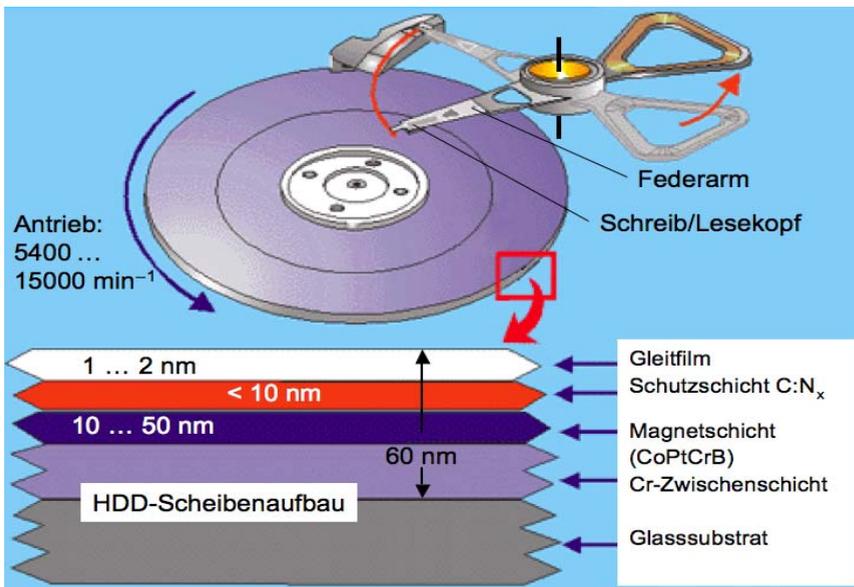


Bild 12.3 Aufbau eines Festplattenlaufwerks

Der Aufbau eines Festplattenlaufwerks mit Federarm, Schreib/Lesekopf, Antrieb und die Schichtstruktur einer magnetischen Speicherscheibe ist in Bild 12.3 dargestellt.

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 Bild 12.4.

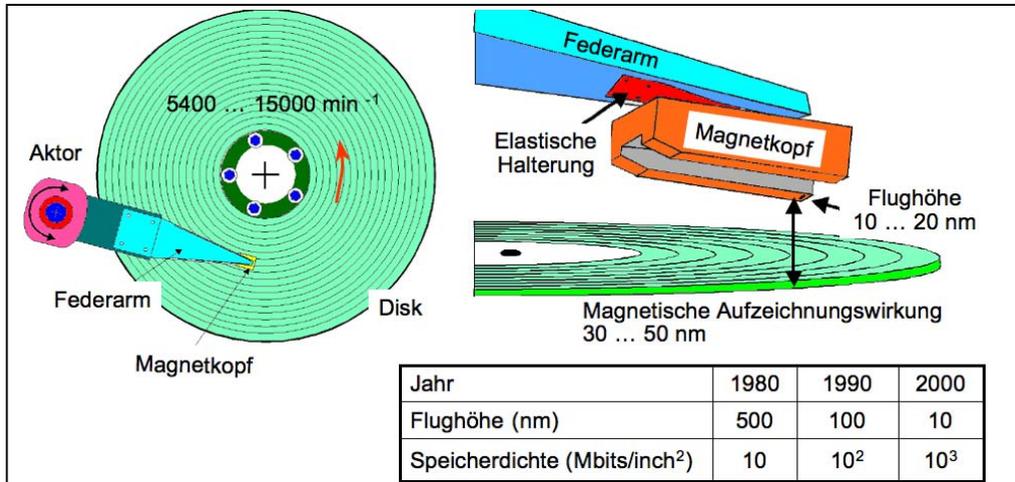


Bild 12.4 Funktionsprinzip und Kenndateneines Festplattenlaufwerks

Die ingenieurtechnische Leistung der Erzielung von Flughöhen im Bereich von 20 nm im dynamischen Betrieb von Festplatten wird aus einem – technisch natürlich unrealistischen – geometrischen Vergleich zwischen der Kinematik eines Festplattenlaufwerks und der eines Flugzeugs deutlich, siehe Bild 12.5.

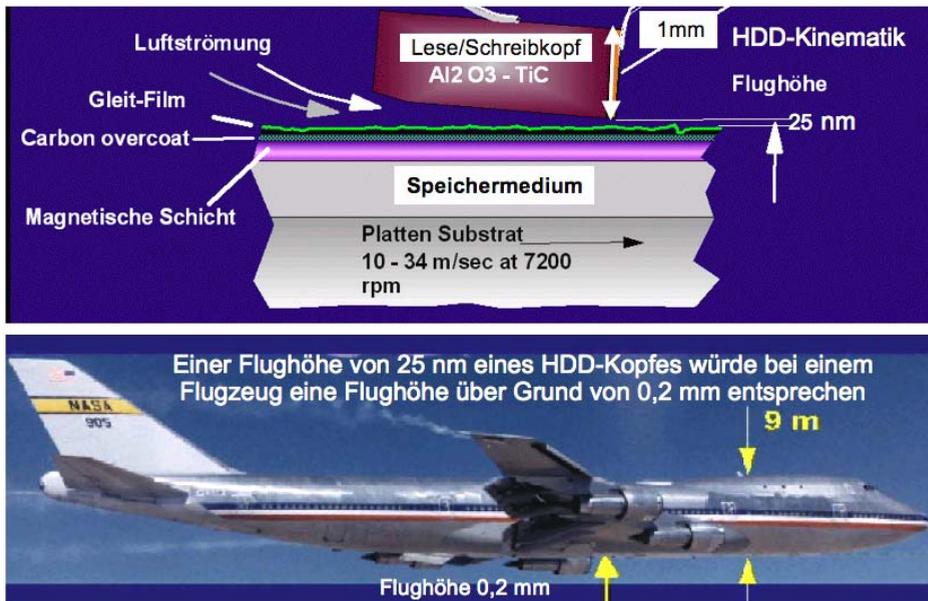


Bild 12.5 Geometrievergleich der kinematischen Kenndaten eines Festplattenlaufwerks und eines Flugzeugs

In systemtechnischer Betrachtung ist ein Festplattenlaufwerk ein tribologisches System (vgl.7.3). Es besteht aus den Komponenten (1) Lese/Schreibkopf, auch kurz Magnetkopf genannt; (2) Speichermedium; (3) Luftfilm, siehe Bild 12.6.

Der Ruhezustand des HDD-Systems ist gekennzeichnet durch die Mikro-Kontaktmechanik. Aufgrund der Magnetkopfkontur ergibt sich eine Kontaktdruckverteilung (siehe Bild 12.6, unten rechts) über dem Magnetkopf mit einer resultierenden Gesamtkraft, die mit der Vorspannkraft der Aufhängefeder im Gleichgewicht ist.

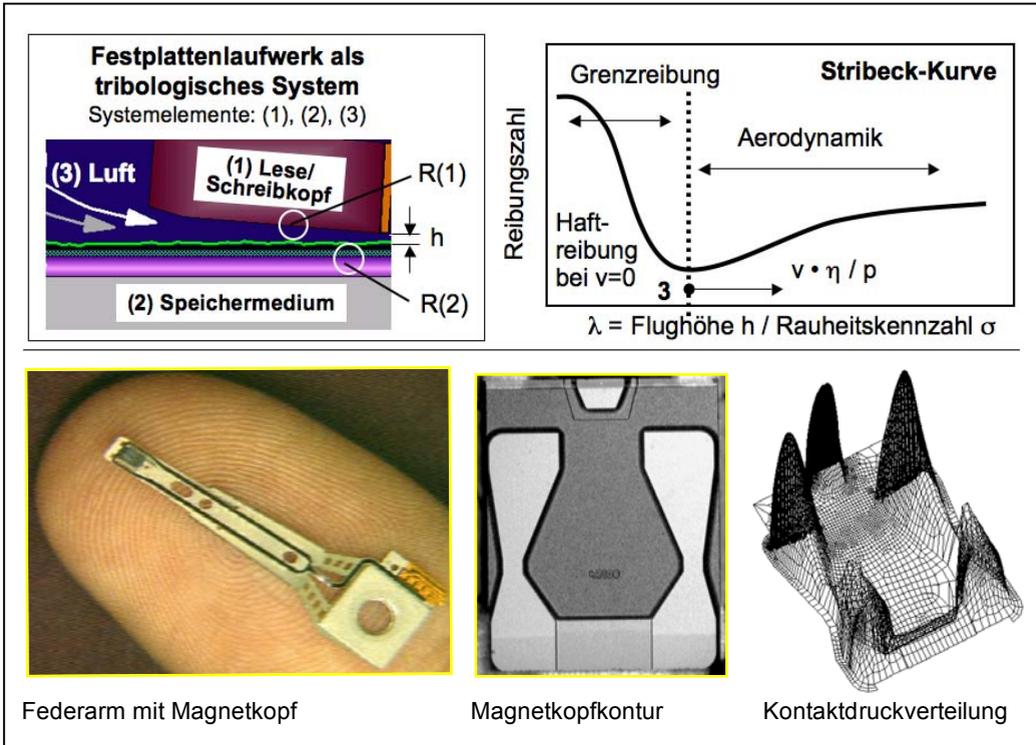


Bild 12.6 Die tribologischen Komponenten eines Festplattenlaufwerks und die Stribeck-Kurve

Im Betriebszustand hat das tribologische System gemäß Bild 12.6 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 η , 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 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 (Load-Unload). Der Reibungskoeffizient zeigt beim Start- und Stopbetrieb „Haftreibungs-Peaks“, sie können durch Optimierung der Magnetkopfgestaltung und der Oberflächenrauheit beeinflusst werden, siehe Bild 12.7.

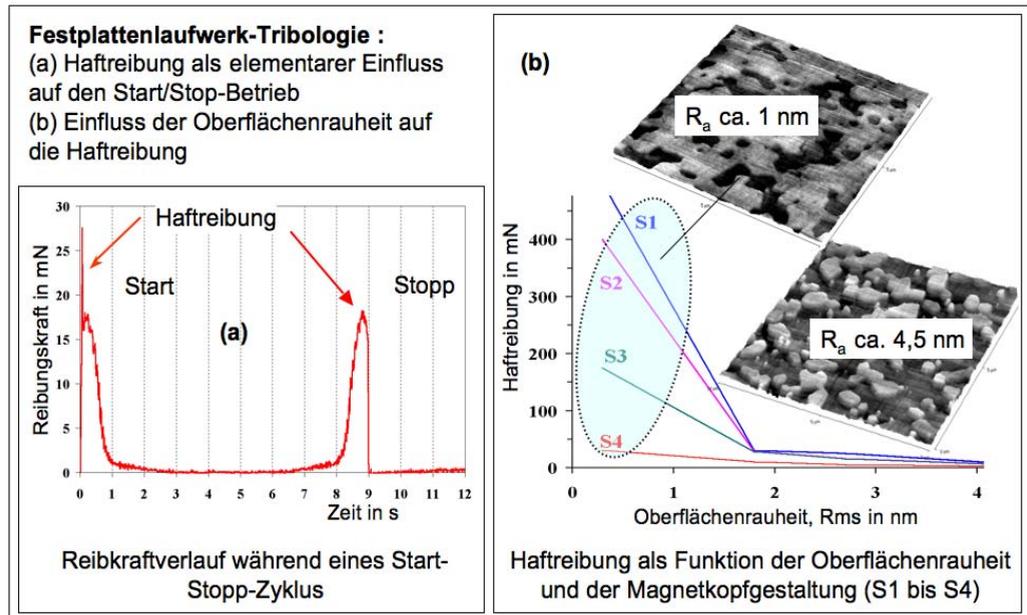
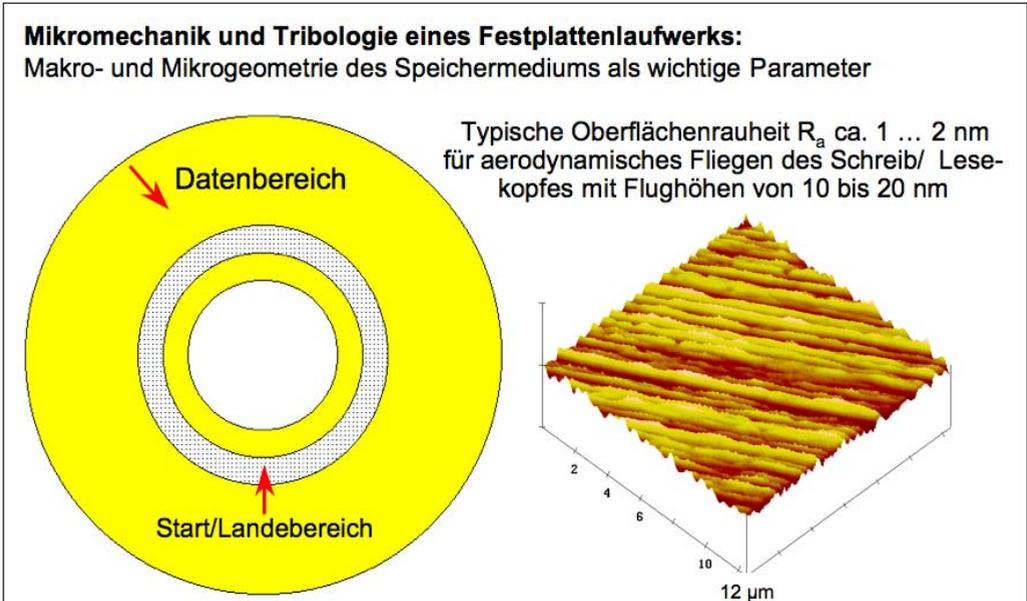


Bild 12.7 Optimierung von Festplattenlaufwerken durch Makro- und Mikrogestaltung

Zur Funktionsoptimierung von Festplattenlaufwerken werden auch Finite-Elemente-Methoden eingesetzt. Bild 12.8 illustriert dies für Beispiele der Untersuchung von Computer-Störeinflüssen und der HDD-Systemgestaltung.

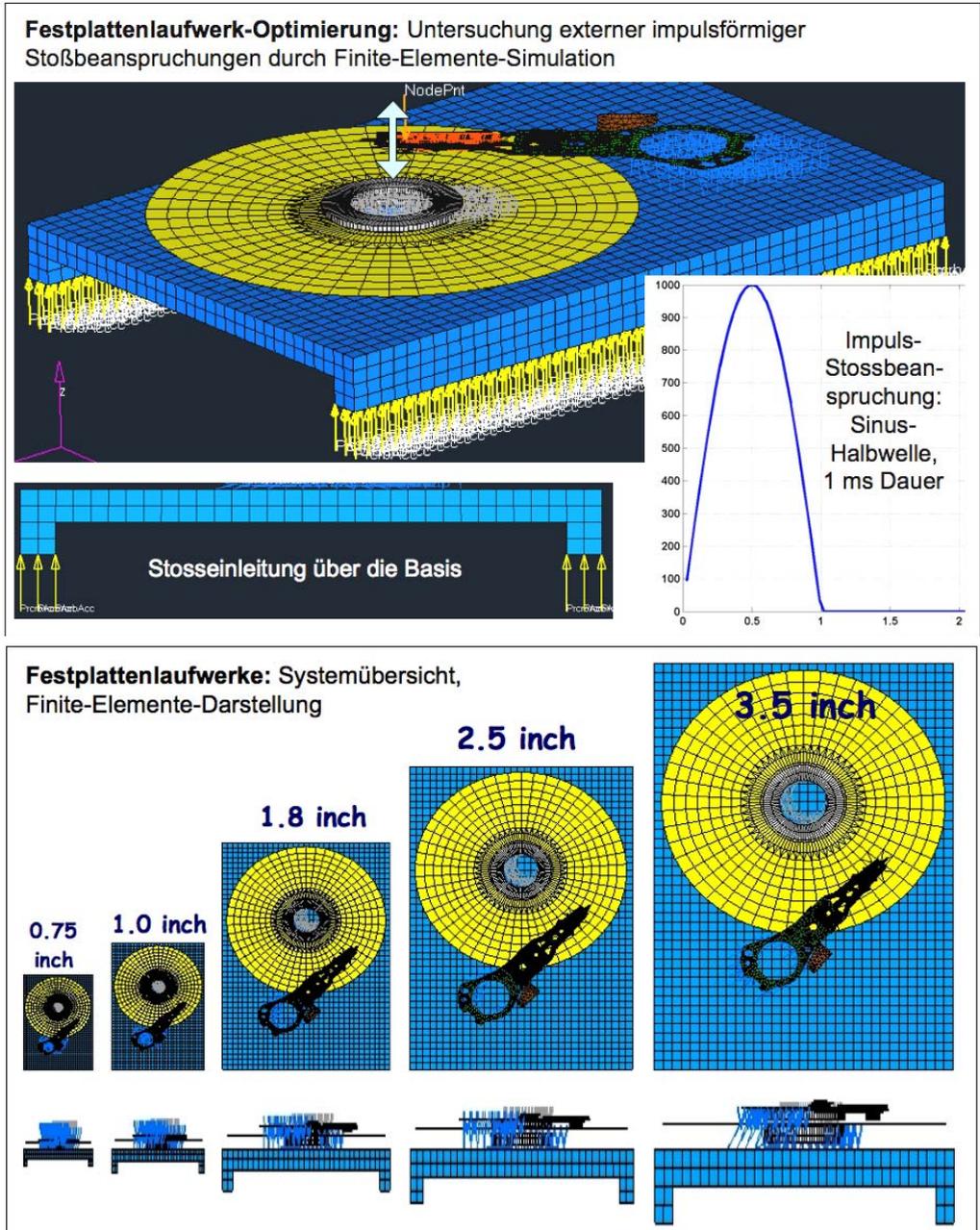


Bild 12.8 Optimierung der HDD-Systemgestaltung durch Finite-Elemente-Verfahren

13 Fahrzeugtechnik

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 erstes Glied 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 Bild 13.1:

• **Fahren • Lenken • Bremsen • Beleuchten • Tasten**

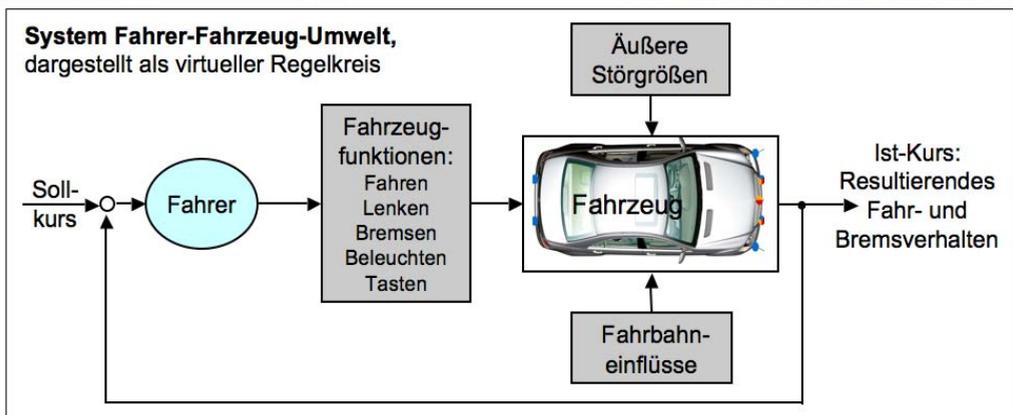
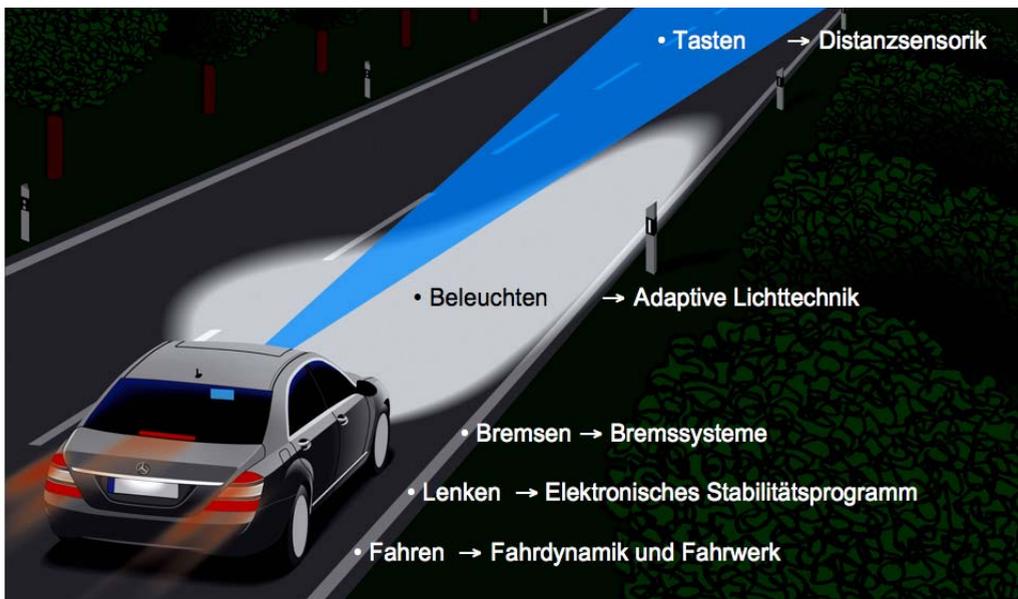


Bild 13.1 Das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt und seine elementaren Funktionen

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 Bild 13.2 sind die in der Krafffahrtechnik verwendeten Bezugsgrößen dargestellt.

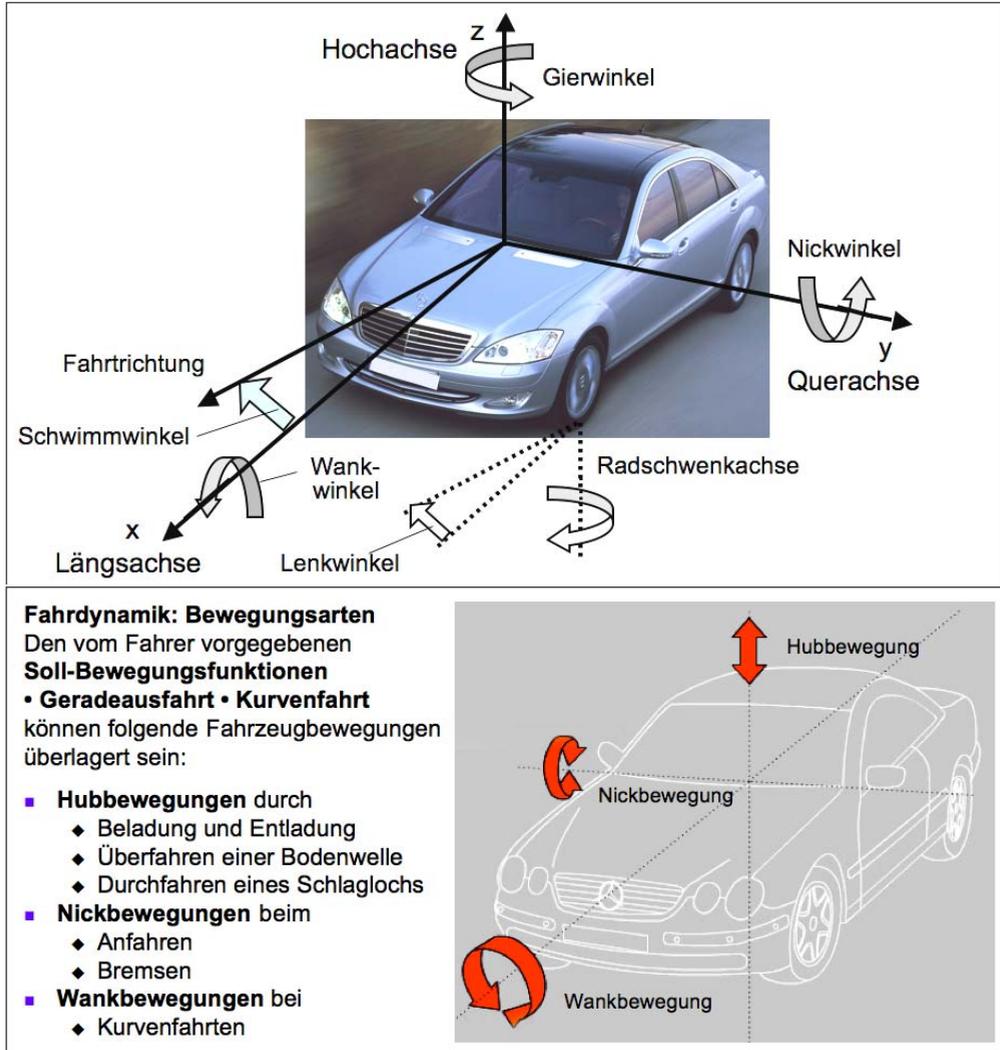


Bild 13.2 Fahrdynamik: Bezugssystem, Bewegungsarten, Bewegungskenngrößen

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:

**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.

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 , siehe Bild 13.3.

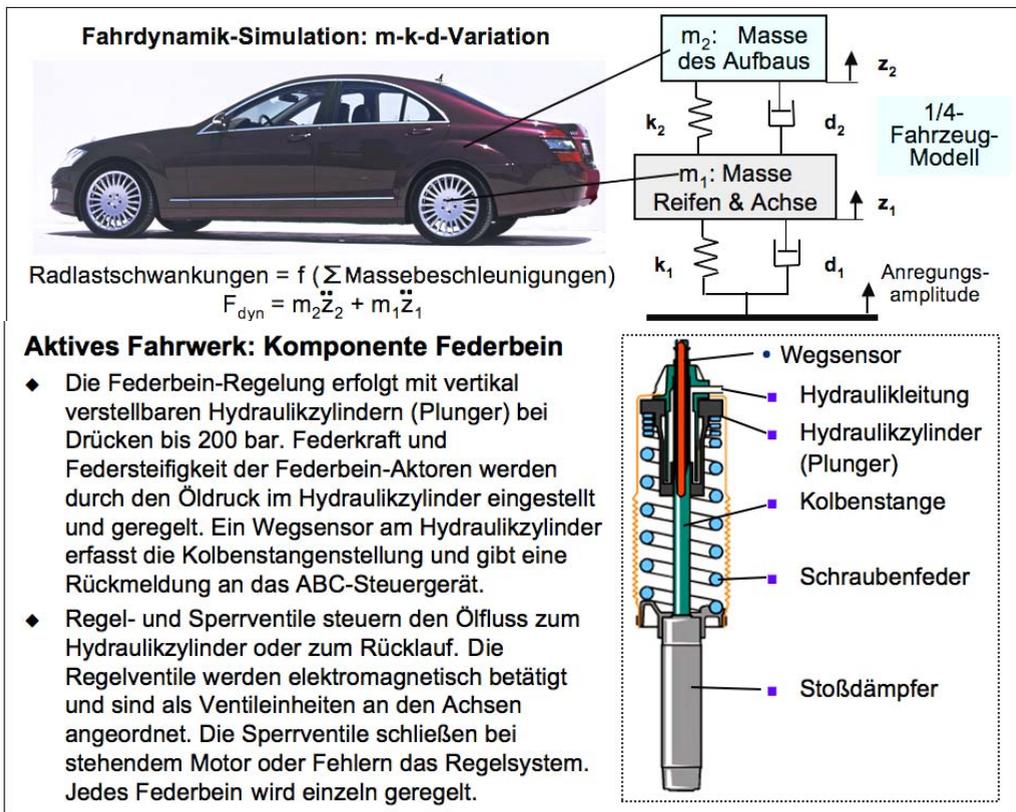


Bild 13.3 Fahrdynamik-Modellierung und technische Komponenten

Die Funktion des aktiven Fahrwerks (ABC) ist in Bild 13.4 erläutert:

Bei Fahrzeugen mit ABC wird in Abhängigkeit der sensordetektierten Fahrsituation durch Aktoren die Ölmenge in den Federbeinzylindern je nach Bedarf erhöht (+ Δz) oder reduziert (- Δz), um die Spannung der Schraubenfeder fahrsituationsunabhängig konstant zu halten. Im unteren Teil von Bild 13.4 sind die Aktorwirkungen in Abhängigkeit der einzelnen Fahrdynamiksituationen zusammengestellt. Die Reaktionszeit des mechatronischen Systems 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 Hertz werden von ABC, höherfrequente Schwingungen von den Stoßdämpfern gedämpft:

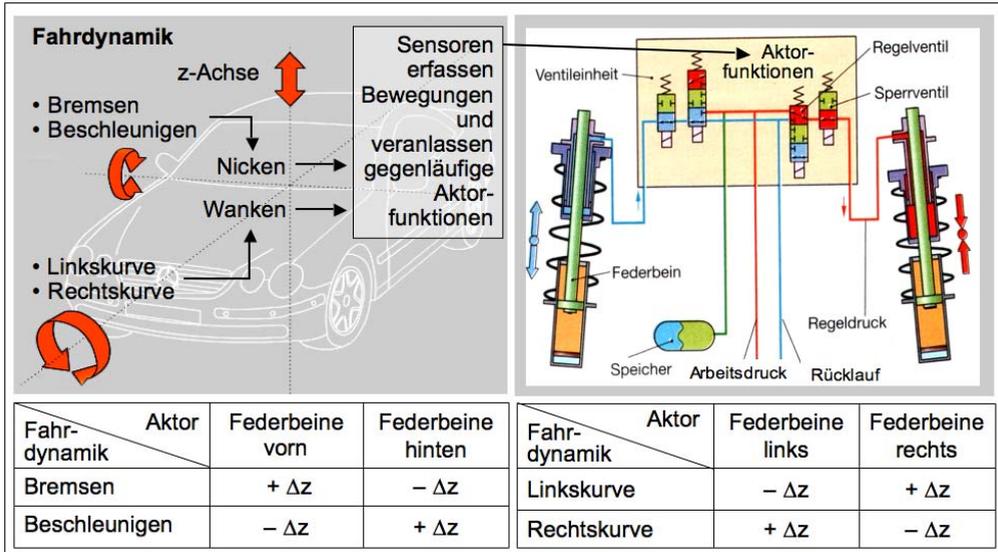


Bild 13.4 Funktionsweise des Aktiven Fahrwerks ABC

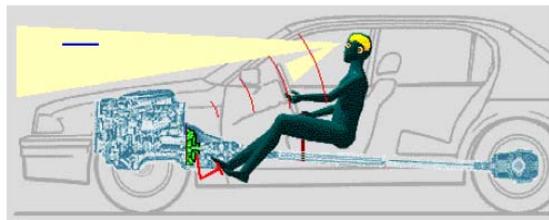
13.2 Funktion Lenken: Elektronisches Stabilitätsprogramm

Während beim Aktiven Fahrwerk Mechatronik und Fahrdynamik in direkter Wechselwirkung sind, steht bei der Anwendung mechatronischer Systeme für die Funktion Fahren und Lenken das Zusammenwirken von Mensch und Technik im Vordergrund:

Funktion Fahren und Lenken

Fahrdynamik-Situation:

- Auge und Ohr des Fahrers nehmen die Fahrsituation war.
- Durch subjektive Auswertung der Fahrsituation im Gehirn entsteht der Fahrerwunsch des Sollverhaltens.



Die Fahrstabilität wird durch den *Schwimmwinkel* gekennzeichnet. Er ist in Bild 13.2 in dem in der Fahrzeugtechnik üblichen Koordinatensystem definiert. Einflüsse sind Seitenwind, Über- und Untersteuern, wie in den folgenden Übersichten dargestellt.

- 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 Fahr situation vorliegt.
- Solange die Fahrzeuglängsachse in die Richtung zeigt, in die sich das Fahrzeug bewegt, ist der Schwimmwinkel gleich null.
- Bei instabilen Fahr situationen ist der Schwimmwinkel von null verschieden, dies kennzeichnet „Übersteuern“ oder „Untersteuern“.



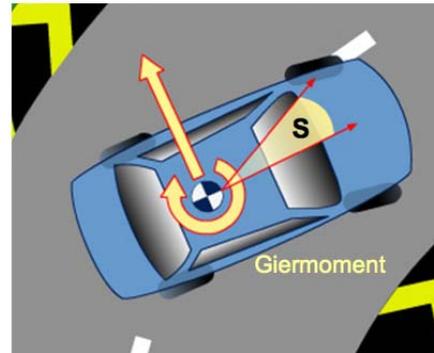
Instabile Fahrdynamik: Übersteuern

- Das Auswandern der Vorderachse ist kleiner als das der Hinterachse.
- Der Kurvenradius ist kleiner als es dem Lenkeinschlag entspricht.
- Zu starke Drehung des Fahrzeugs.



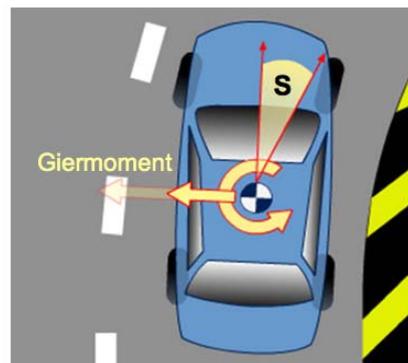
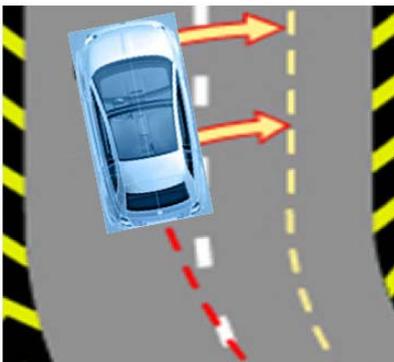
Merkmale des Übersteuerns:

- 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.



Das **Elektronische Stabilitätsprogramm ESP** soll Fahrdynamik-Instabilitäten entgegenwirken. Das Gesamtsystem wird gebildet durch das Fahrzeug (Regelstrecke), Sensoren, Aktoren und das ESP-Steuergerät, siehe Bild 13.5.

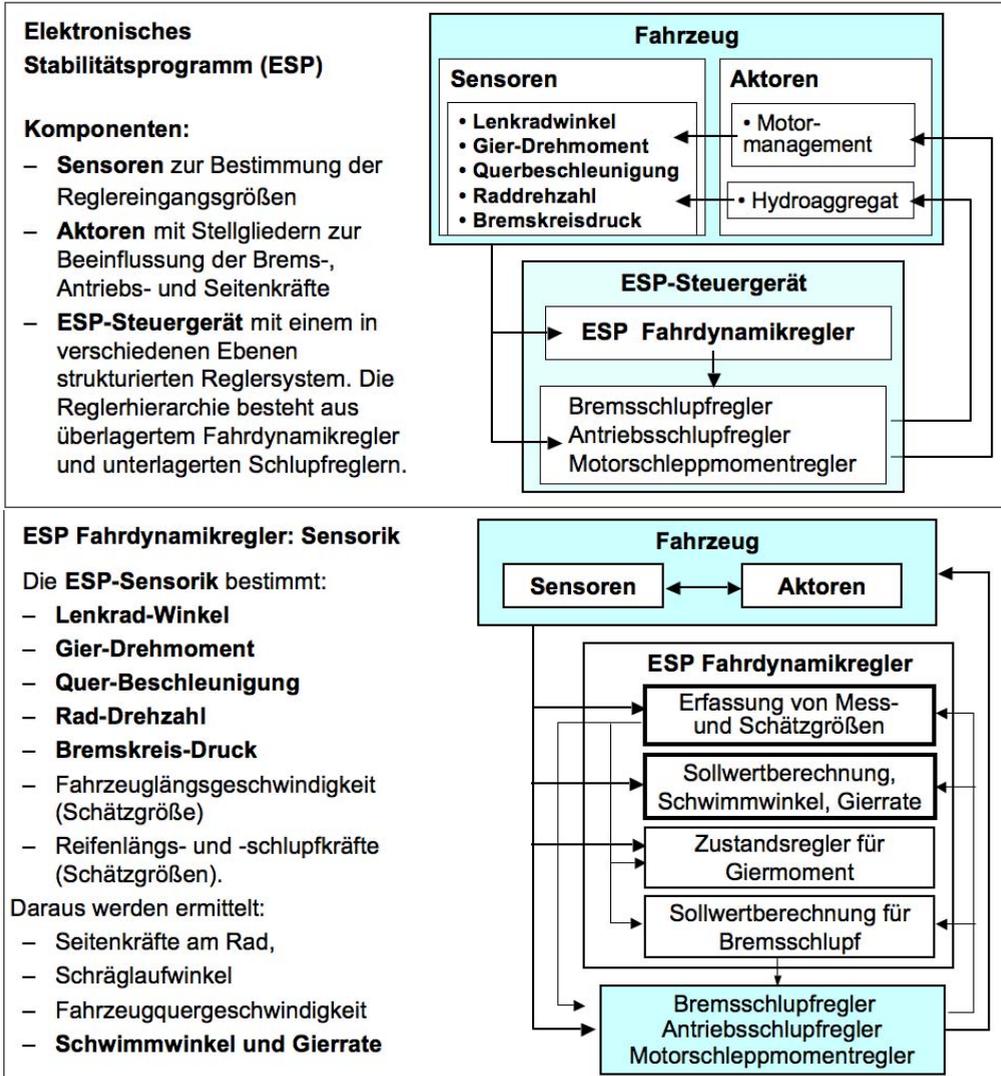


Bild 13.5 Das Elektronische Stabilitätsprogramm: Aufbau und Funktion

Die Sensorik des ESP-Systems besteht aus fünf Sensoren zur Bestimmung der in Bild 13.5 genannten Messgrößen. Die Sensoren für die Erfassung von Lenkrad-Winkel, Gier-Drehmoment und Quer-Beschleunigung sind in der Übersicht auf der nächsten Seite dargestellt und erläutert; die Sensoren für die Rad-Drehzahl und den Bremskreis-Druck sind in Kapitel 5 beschrieben.

Lenkrad-Winkel-Sensor, Prinzip:
Drehwinkelabhängiger elektrischer Widerstand

1 Lenkwelle, 2 Magnetoresistive Messzellen, 3 Zahnrad mit m Zähnen, 4 Auswerteelektronik, 5 Magnete, 6 Zahnrad mit n > m Zähnen, 7 Zahnrad mit m + 1 Zähnen → 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 .

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 Beschleunigen 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 Bremsenriffe Fahrdynamik-Instabilitäten in beherrschbaren Grenzen zu halten. Bild 13.6 illustriert dies für die Beispiele der Korrektur des Übersteuerns oder Untersteuerns.



Übersteuern:
ESP-Korrektur des Übersteuerns:
Bremsimpuls am kurvenäußeren Vorderrad
erzeugt ein korrigierendes Gierrmoment



Untersteuern:
ESP-Korrektur des Untersteuerns:
Bremsimpuls am kurveninneren Hinterrad
erzeugt ein korrigierendes Gierrmoment



Bild 13.6 Wirkungsweise von ESP: Korrektur des Übersteuerns oder Untersteuerns durch gezielte Bremsenriffe

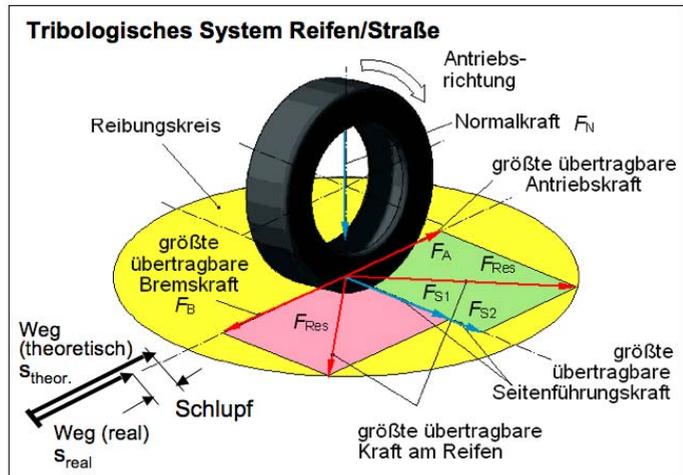
13.3 Funktion Bremsen: Bremssysteme

Bremseingriffe mittels ESP, wie auch ganz allgemein die Bremsfunktion von Kraftfahrzeugen – die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges kontrolliert zu verringern oder es in 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.

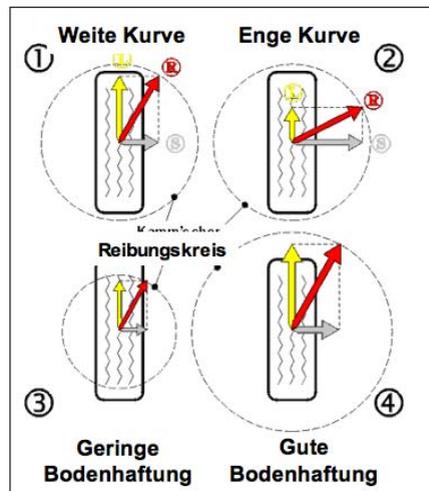
Tribophysik

- 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.



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 Bild 13.7.

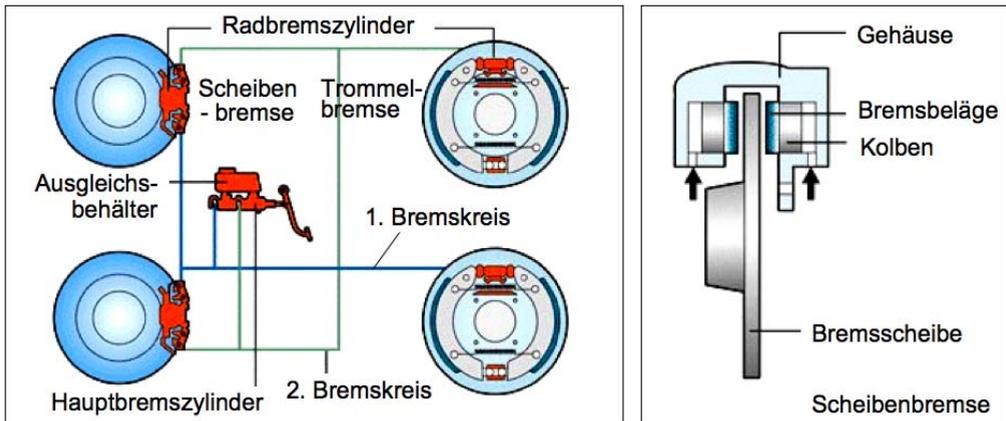


Bild 13.7 Aufbau eines konventionellen Zweikreis-Bremssystems

Die konventionellen Bremssysteme der Fahrzeugtechnik sind durch Anwendungen der Mechatronik um folgende Systeme erweitert worden:

- Bremskraftverstärker oder Brems-Assistent (BAS)
- Antiblockiersystem (ABS),
- 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. Die folgende Übersicht bezeichnet die hauptsächlichen Module und erläutert ihre Funktion:

◆ **Wegsensor:** Das Mess-Potentiometer erfasst Pedalstellung s und -geschwindigkeit v .

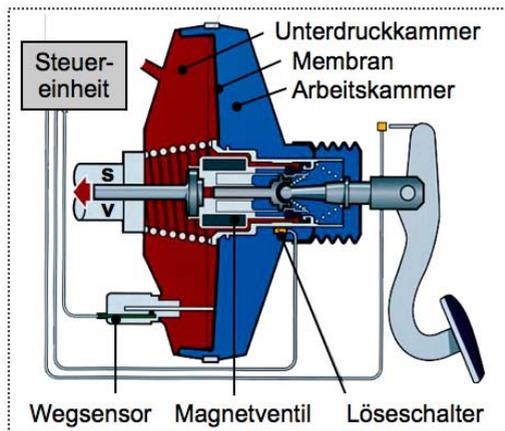
◆ **Steuereinheit:** Das BAS-Steuergerät bewertet die Sensorsignale von s und v in einem Soll-/Ist-Wert-Datenvergleich.

◆ **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.



Antiblockiersysteme, ABS sind Regeleinrichtungen, die als mechatronisch geregelte „Stotterbremsen“ das Blockieren der Räder beim Bremsen verhindern, siehe Bild 13.8:

- 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.

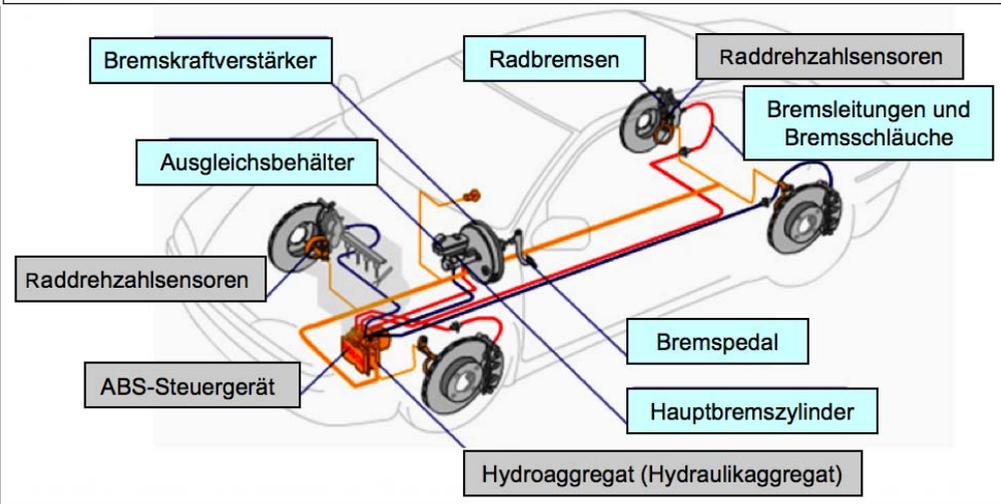
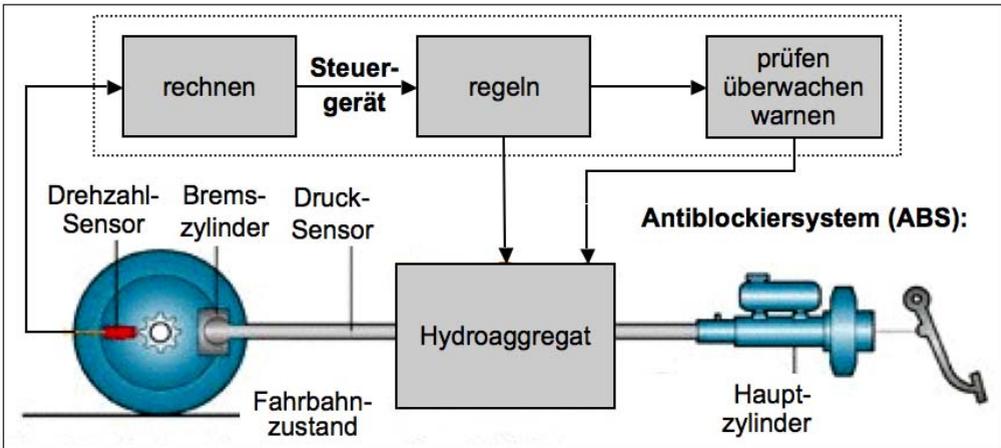
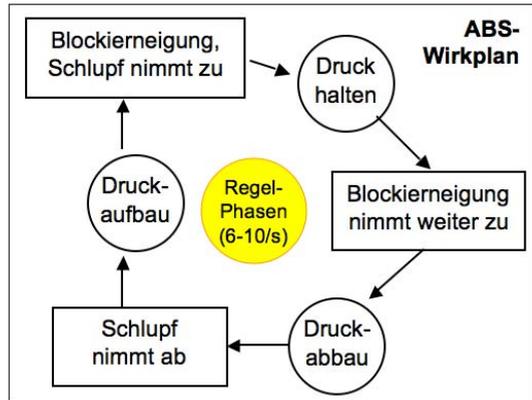


Bild 13.8 Antiblockiersystem. Funktionsweise und Aufbau

Die *Anti-Schlupfregelung*, ASR dient der Optimierung von Traktion und Fahrzeugstabilität, 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 Bremsengriff:



Motorengriff:

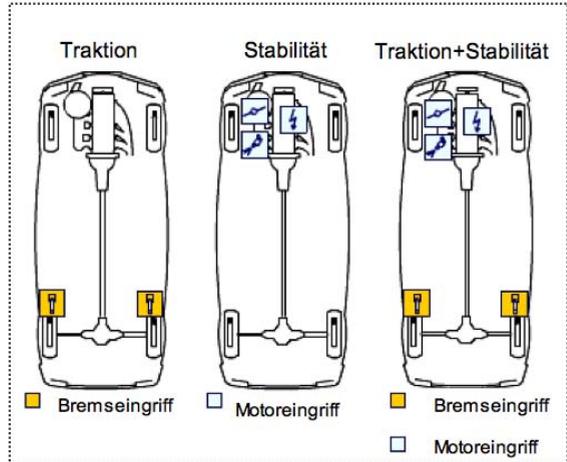
Leistungsreduzierung über Drosselklappe oder über Motorsteuergerät

- Drosselklappe: Verminderung der zur Verfügung stehenden Menge an Kraftstoff-Luft-Gemisch
- Motorsteuerung: Reduzierung der Motorleistung durch Minderung der Einspritzmenge und/oder Zündzeitpunkt-Verschiebung



Bremsengriff:

Räder mit zu hohem Schlupf werden gezielt abgebremst.



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 das Steuergerät mittels geeigneter Algorithmen in radindividuelle Steuerbefehle für die hydraulische Bremsdruckmodulation umgewandelt. Bild 13.9 und Bild 13.10 erläutern Aufbau, Funktion, Wirkzusammenhang und Module.

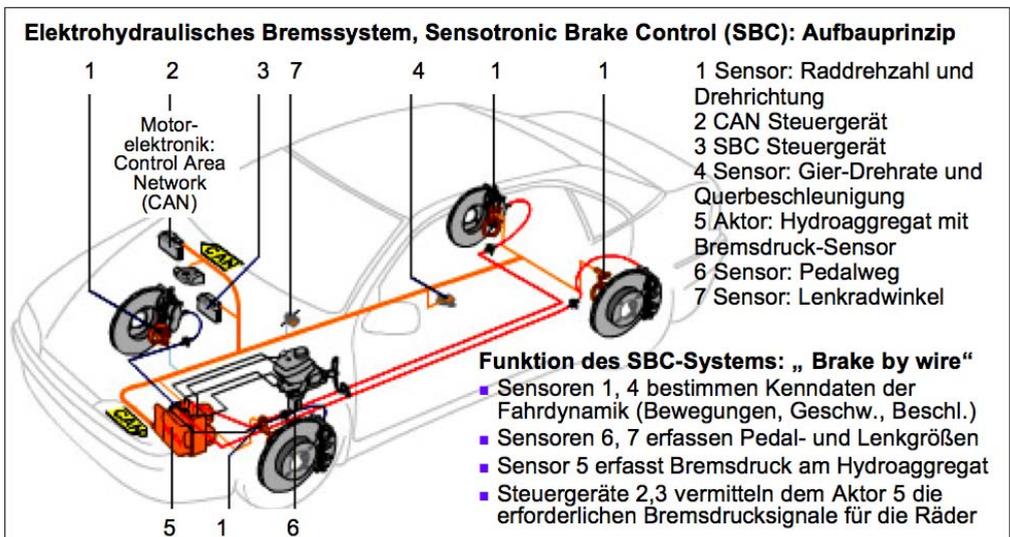


Bild 13.9 Das Elektrohydraulische Bremssystem wird englisch als „brake by wire“ bezeichnet

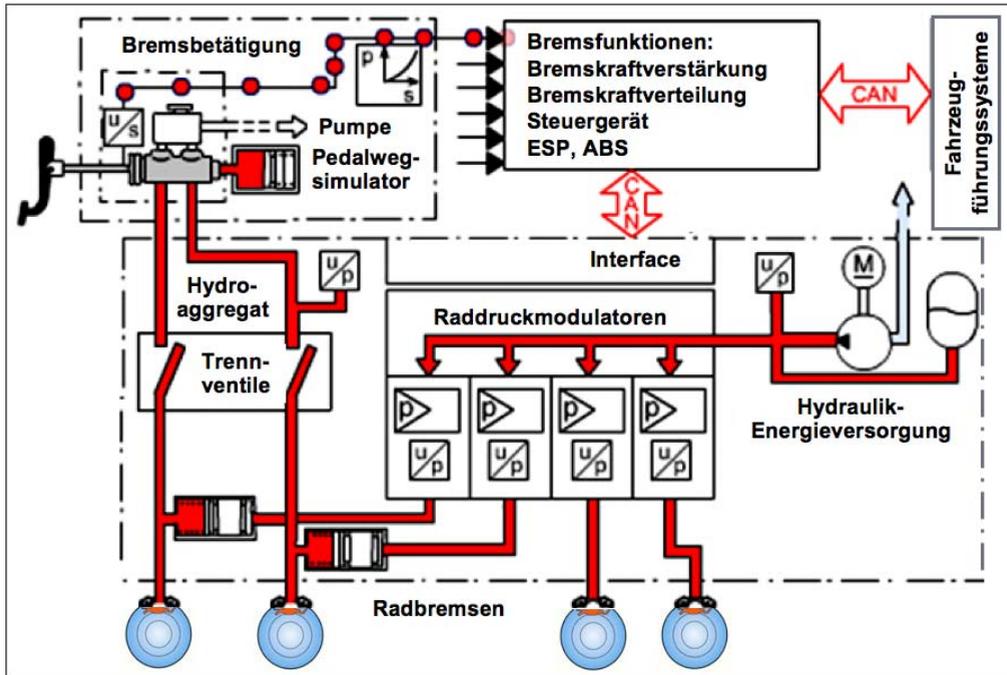


Bild 13.10 Elektrohydraulisches Bremssystem: Funktion, Wirkzusammenhang und Module

13.4 Funktion Tasten: Distanzsensoren

Unter der Funktion „Tasten“ wird die dynamische Abstandsbestimmung bei Vorwärts- oder Rückwärtsfahrt gemäß Bild 13.11 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) ... 150 m.

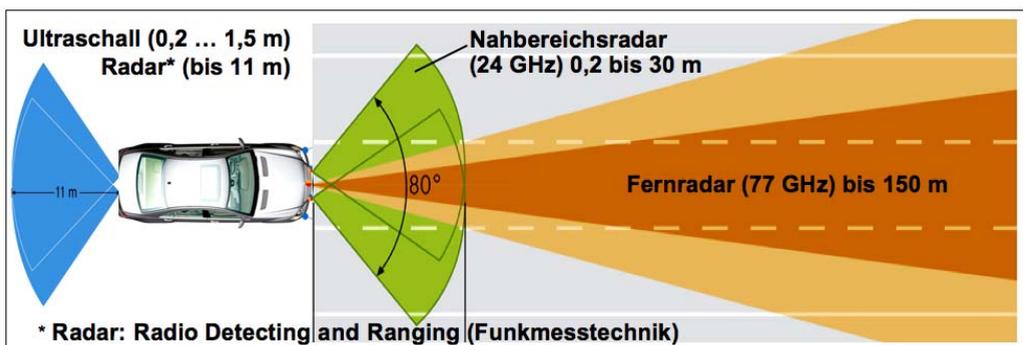


Bild 13.11 Distanzsensoren für die Fahrzeugtechnik

Für die Rückwärts-Tastfunktion können mit Ultraschallsensoren Hindernisse erkannt und durch optische oder akustische Mittel zur Anzeige gebracht werden. Bild 13.12 erläutert das Funktionsprinzip mit der zweidimensionalen Richtcharakteristik und zeigt das Blockschaltbild des Sensorsystems.

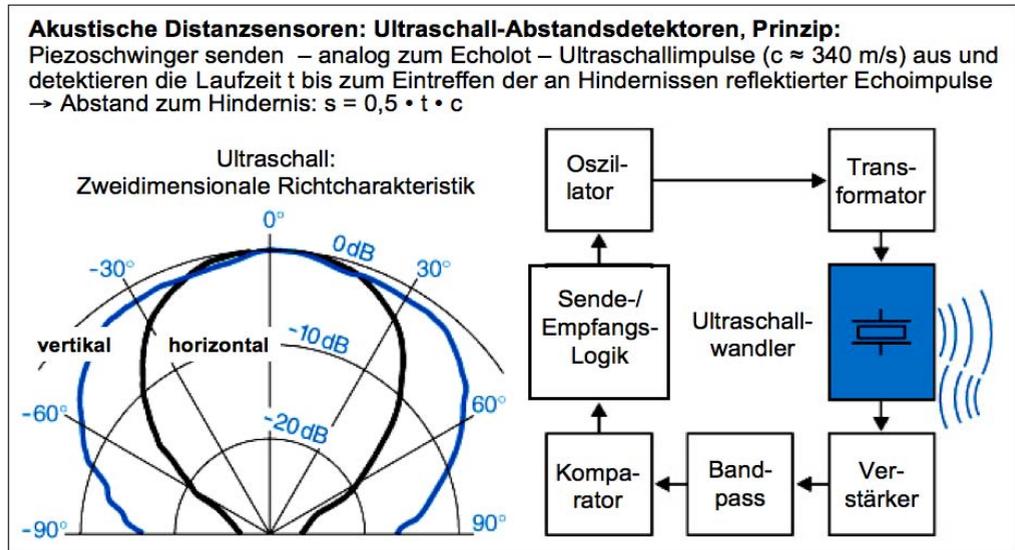


Bild 13.12 Funktionsprinzip und Blockschaltbild von Ultraschall-Distanzsensoren

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 Bild 13.13.

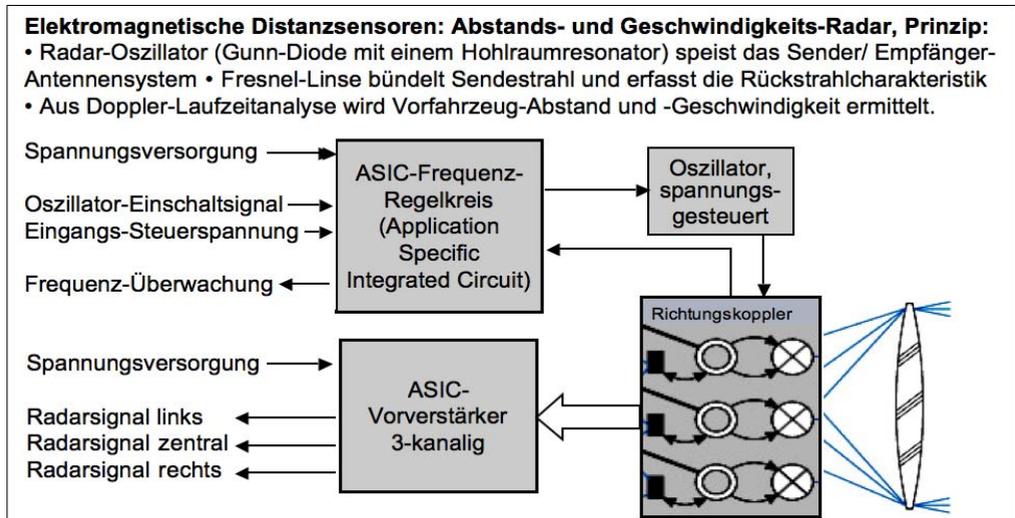


Bild 13.13 Funktionsprinzip und Blockschaltbild elektromagnetischer Distanzsensoren

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:

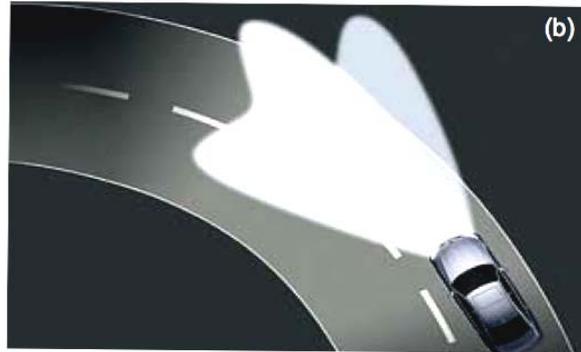
(a) Leuchtweitenregelung (LWR)

→ **Statische LWR:** Vertikale Scheinwerferlicht-Höheneinstellung in Abhängigkeit vom Beladungszustand des Fahrzeugs.

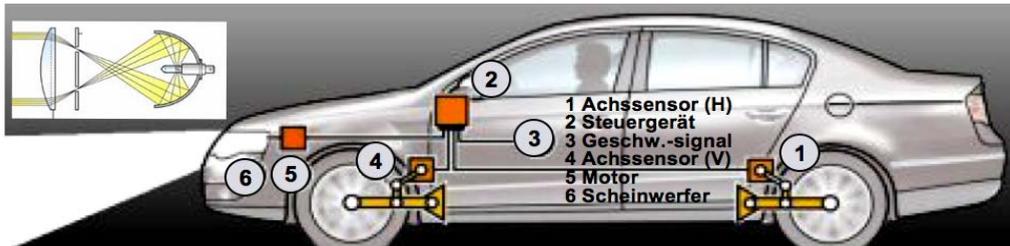
→ **Dynamische LWR:** Ausregelung von Fahrzeugnickbewegungen, z.B. beim Bremsen und Beschleunigen.

(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 Bild 13.14 dargestellt. Die dynamische LWR korrigiert somit durch Mechatronik fahrdynamisch bedingte Nickbewegungen bei Brems- oder Beschleunigungsvorgängen.



Dynamische Leuchtweitenregelung, Prinzip:

- Eine Fahrzeug-Nickbewegung wird über einen Drehhebel auf einen Sensor mit einem drehbaren Magnet der magnetischen Induktion B übertragen.
- Die Drehhebelrotation φ erzeugt an einem stromdurchflossenen Halbleiterplättchen eine drehwinkelproportionale Hallspannung $U_{\text{hall}} = f(\varphi)$.
- Der Nickwinkelauslenkung des Fahrzeugs – als Regelgröße der Leuchtweiteneinstellung – berechnet sich aus der Differenz der Hallspannungen des Vorderachssensors (V) und Hinterachssensors (H).

Hall-Achssensor, Schnittdarstellung

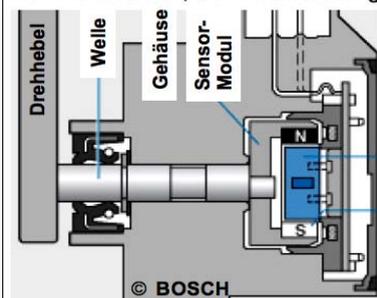


Bild 13.14 Funktionsprinzip und Komponenten der dynamischen Leuchtweitenregelung; oben links: Poly-Ellipsoid-System mit Abbildungsoptik für definierte Hell-Dunkel-Grenze

Das Prinzip der adaptiven Lichttechnik in der Fahrzeugtechnik erläutert Bild 13.15.

Adaptives Kurvenlicht: Prinzip

- Aktorische Regelung eines horizontal schwenkbaren Scheinwerfermoduls, basierend auf der Sensorik von Lenkradeinschlag und Fahrzeuggeschwindigkeit.
- Bei Kurvenfahrten schwenken die Scheinwerfer um ± 15 Grad. (maximal bis zur Fahrbahnmittellinie in ca. 70 m Entfernung, gesetzliche Vorschrift).

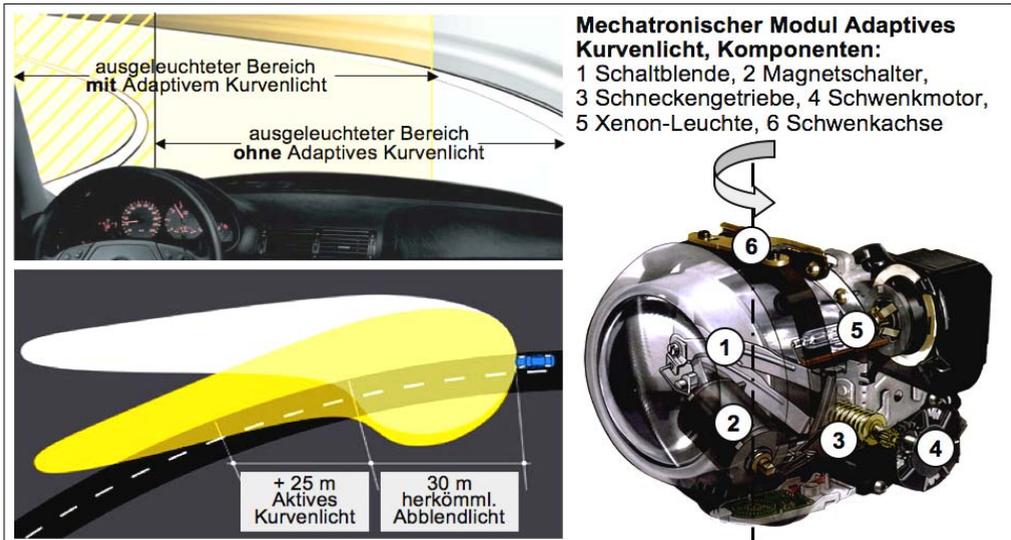
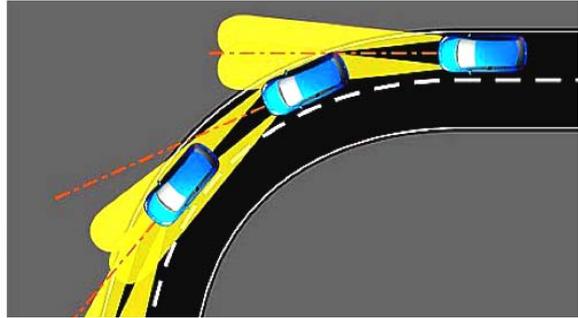


Bild 13.15 Adaptive Lichttechnik in der Fahrzeugtechnik

Die Bedeutung der Mechatronik für das Automobil dokumentiert die folgende Tabelle:

Mechatronik-Entwicklungen in der Fahrzeugtechnik

- ◆ Transistorzündung (1957) ◆ Elektronisch gesteuerte Benzineinspritzung (1967)
- ◆ Dreiwege-Katalysator mit Lambda-Sonde (1976) ◆ Digitale Motor-Elektronik (1978) ◆ Anti-Blockiersystem (1979) ◆ Leerlauf-Drehzahl-Regelung (1981)
- ◆ Antischlupf-Regelung (1986) ◆ Elektronisch gesteuerte Dieseleinspritzung (1988) ◆ Elektronisches Dämpfer-Controlling (1989) ◆ Aktive Hinterachsen-Kinematik (1989) ◆ Aktives Fahrwerk (1991) ◆ Dynamische Stabilitätskontrolle (1992) ◆ Adaptive Getriebe-Steuerung (1993) ◆ Motronic mit Drehmoment-Steuerung und integrierter Drosselklappen-Ansteuerung (1998) ◆ Electronic brake management (1998) ◆ Active cruise control (2000) ◆ Electro-hydraulic brake system (2001) ◆ Intelligent Light System (2006)

14 Bauliche Anlagen

Bauliche Anlagen sind immobile Konstruktionen und werden allgemein als *Bauwerke* bezeichnet, Bild 14.1 illustriert das Gesamtsystem. *Gebäude* sind eine technische Kategorie der Bauwerke. Die Muster-Bauordnung kennzeichnet sie folgendermaßen: *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.*

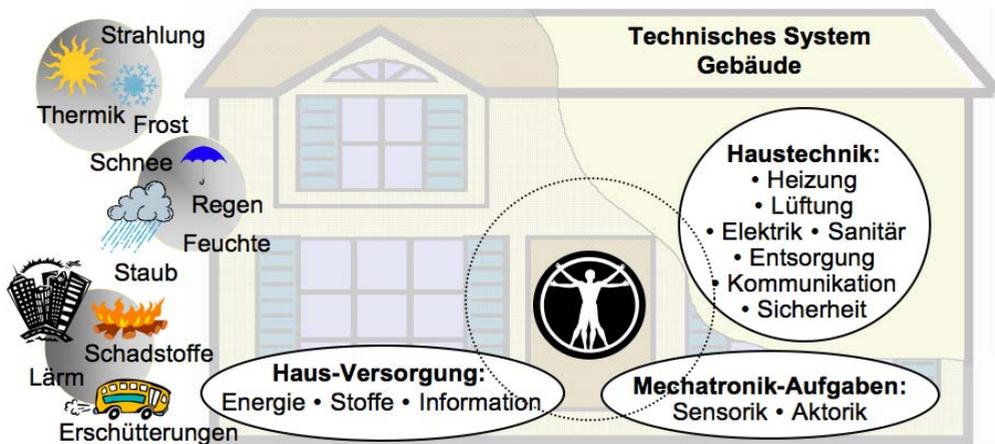


Bild 14.1 Das Gesamtsystem Mensch-Gebäude-Umwelt und seine elementaren Kennzeichen

Die gesetzlichen Vorgaben der Bauordnung zeigen, dass bauliche Anlagen nicht nur dem herkömmlichen Regelwerk der Baustatik, sondern auch vielfältigen technischen Anforderungen entsprechen müssen. Die Funktionalität baulicher Anlagen kann heute durch Sensorik und Aktorik in Verbindung mit Elektronik und Informatik, d.h. durch Mechatronik erweitert und die Bauwerkssicherheit erhöht werden, siehe Bild 14.2.

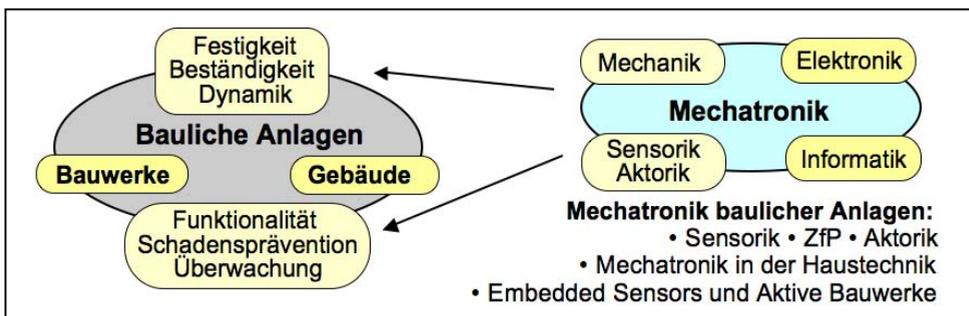


Bild 14.2 Anwendungsmöglichkeiten der Mechatronik für bauliche Anlagen

Bauliche Anlagen haben, wie alle technischen Gebilde, vorgegebene *Funktionen* mit dafür geeigneten *Strukturen* und *Eigenschaften* zu erfüllen. Bauliche Anlagen können spezifische technische Funktionen haben (wie z.B. Brückenbauwerke für den Schienenverkehr) oder allgemein-gesellschaftlichen Aufgaben dienen, wie z.B. Wohnen (Wohngebäude), Arbeiten (Fabrik), Handel (Kaufhaus), Gesundheit (Krankenhaus), Verwaltung (Rathaus), Kultur (Theater), Religion (Kirche), Freizeit (Sporthalle). Eine Übersicht über die Aufgaben und Technologien baulicher Anlagen gibt die *European Construction Technology Platform*, www.ECTP.org.

Betrachtet man bauliche Anlagen in Analogie zu anderen Technikfeldern als Technische Systeme mit einer „Soll-Funktion“ allgemeiner Attribute (z.B. Bauteilfestigkeit, Beständigkeit) und einer „zu regelnden“ Ist-Funktion, so können sie gemäß Bild 14.3 abstrakt dargestellt werden. Aus dieser Darstellung werden auch die Aufgaben der Sensorik und Aktorik baulicher Anlagen deutlich: die Sensorik führt Aufgaben der Prüfung und Überwachung durch und liefert Unterlagen und Daten für *off-line Maßnahmen*, wie Reparatur, Restaurierung, Sanierung. Sensorik und Aktorik können auch durch *on-line Maßnahmen* die Bauwerksdynamik beeinflussen (z.B. mittels Bauelementen regelbarer Steifheit/Dämpfung) und damit auf äußere Störungen, wie z.B. Vibrationen, Erdstöße, im Sinne eines „mechatronischen Regelkreises“ reagieren.

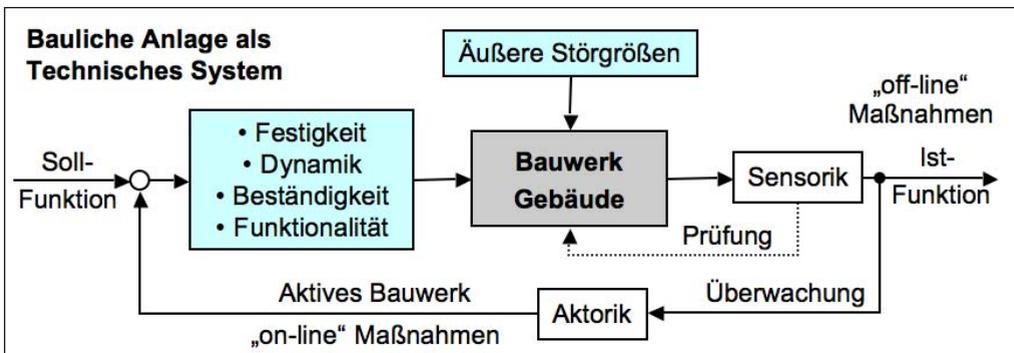


Bild 14.3 Abstrakte Darstellung einer baulichen Anlage als technisches System

14.1 Bauwerksüberwachung mit ZfP, Sensorik und Aktorik

Für die Prüfung, Untersuchung und Beurteilung von Bauwerken sowie zur Schadensprävention und Bauwerksüberwachung stehen heute vielfältige Sensoren und Methoden der zerstörungsfreien Prüftechnik (ZfP) zur Verfügung. Bild 14.4 illustriert mit charakteristischen Beispielen die hauptsächlichen Methoden.

- *Akustische Verfahren* basieren auf der Messung von an Grenzschichten reflektierten Ultraschallpulsen (50-300 kHz) zur Untersuchung des Inneren von Bauteilen.
- *Mikrowellenverfahren* (z.B. Radar) sind schnelle, bildgebende Ortungsverfahren unter Verwendung von elektromagnetischen Wellen; Messgrößen sind zumeist die Laufzeit des Impulses zwischen der Sende- und Empfangsantenne und dem reflektierenden Objekt sowie die Reflexionsamplitude des Impulses.

- *Thermografie* ist ein bildgebendes Verfahren zur Messung der von der Oberfläche eines Körpers ausgehenden Infrarotstrahlung, die Strahlungsleistung korreliert mit der Oberflächentemperatur (optoelektronische Pyrometrie, vgl. Bild 5.54).
- *DMS-Technik*, vgl. Kap. 5.8, wird auch im Bauwerk-Monitoring angewandt.

Zur Kalibrierung der Verfahren wurden anwendungsspezifische Kalibriermodelle mit genau definierten Eigenschaften entwickelt, siehe Bild 14.4 rechts oben.

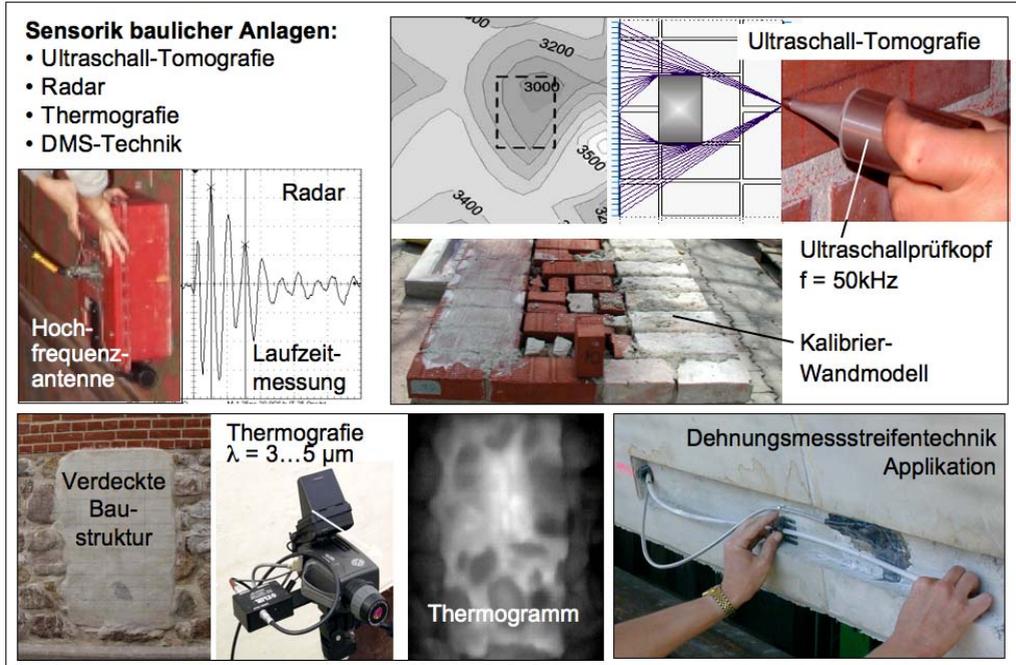
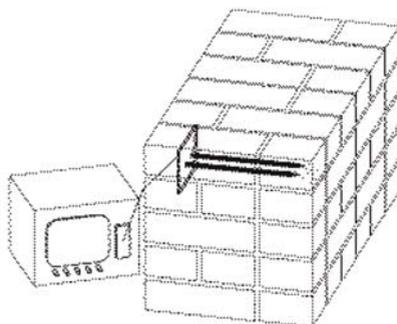


Bild 14.4 Übersicht über Methoden zur Sensorik baulicher Anlagen

Die Methoden zur zerstörungsfreien Untersuchung baulicher Anlagen sind in dem *ZfPBau-Kompendium* (www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm) mit der Beschreibung von mehr als 100 Untersuchungsmethoden und Hinweisen auf einschlägige Fachliteratur umfassend dargestellt; im Folgenden ist ein Beispiel wiedergegeben.



Time-Domain-Reflektometrie: Das Verfahren basiert auf der Laufzeitmessung von kurzen Mikrowellenimpulsen, die sich entlang einer Zweidrahtleitung ausbreiten und an Inhomogenitäten entlang der Leitung sowie an deren Ende reflektiert werden. Anwendungsbeispiele: Feuchtemessung, Kontrolle von Spannkanälen.

Die Sensorik baulicher Anlagen erfordert infolge der meist großen Abmessungen von Bauwerken eine genaue Positionierung. Hierzu müssen die Sensoren und ZfP-Detektoren mit „Scanner/Sensor/Systemen“ zweidimensional und häufig auch dreidimensional positioniert und „aktorisch geführt“ werden. Aktorische Scansysteme, die für die Sensorik von Ingenieurbauten entwickelt wurden, zeigt Bild 14.5. Mit den dargestellten Scannersystemen können mit mehreren Sensoren Bauwerke linienförmig und flächenförmig mit hoher örtlicher Reproduzierbarkeit untersucht werden.

Mechatronische Systeme zur Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Ingenieurbauwerken

(a) **Brückenscanner**
Messfläche 1,6 m x 1,6 m.
→ Radar, Impact-Echo, Ultraschall(US)-Echo

(b) **Brückenscanner**
Steg-Außenseiten, Höhe max. 1,6 m Länge ab 1,2 m beliebig

(c) **Fahrbahnscanner**
Messfläche 4 m x 10 m
→ Impact- und US-Echo

(d) **Linien-scanner mobil**
→ Impact- und US-Echo

Anwendungen der Mechatronik-ZfP

Bild 14.5 Aktor/Scanner/Sensor-Systeme für die Sensorik baulicher Anlagen

Die Messablaufsteuerung für gleichzeitige mechatronische Bauwerksuntersuchungen mit US- und IE-Sensoren ist in Bild 14.6 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 Aussagesicherheit.

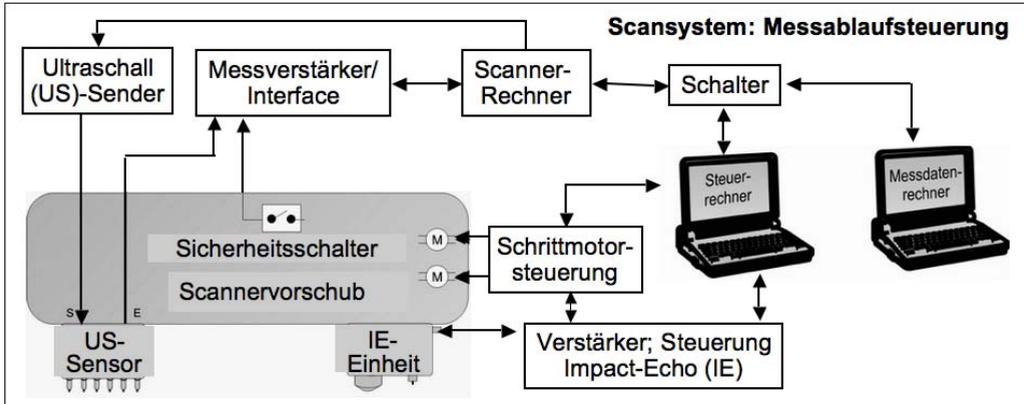


Bild 14.6 Messablaufsteuerung für mechatronische Bauwerksuntersuchungen

Durch die Kombination von Scanner/Sensor-Modulen (Bild 14.5) mit der elektronischen Messablaufsteuerung und Daten/Bildverarbeitung (Bild 14.6) ergibt sich eine aussagekräftige mechatronische Mess-, Prüf- und Überwachungstechnik für bauliche Anlagen. Bild 14.7 illustriert dies für das Beispiel von Brückenbauwerken.

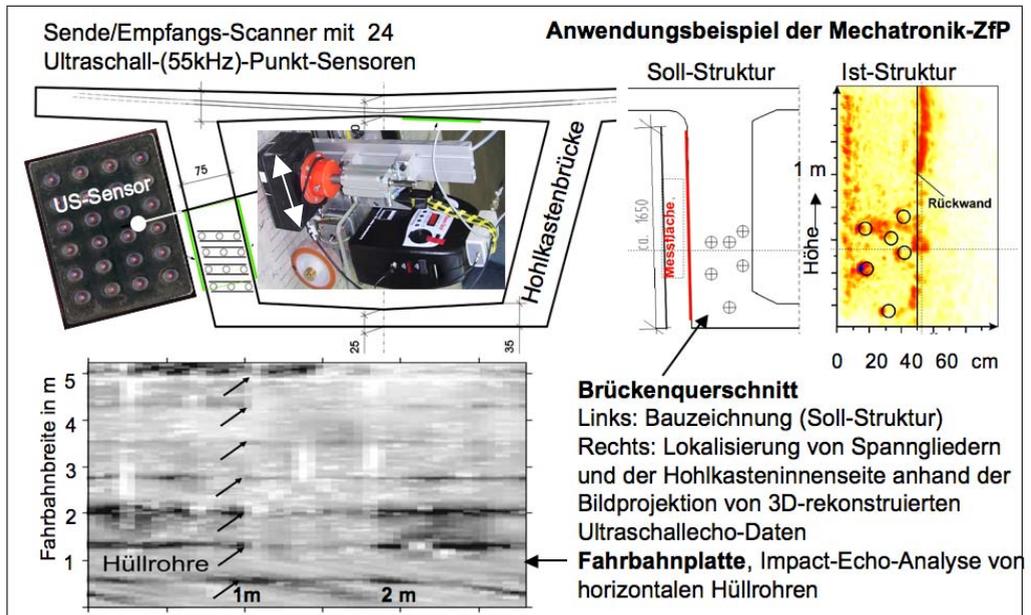


Bild 14.7 Ergebnisse der Sensorik baulicher Anlagen: Beispiel Brückenbauwerke

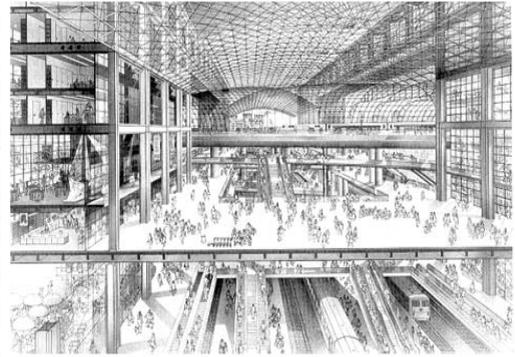
Die Sensorik baulicher Anlagen ist in neuartiger Weise in den Hauptbahnhof Berlins integriert worden. Aufgrund der großen allgemeinen Bedeutung des neuen Hauptbahnhof Berlins informierte das Fernsehen (3sat, 9/11/01) die Öffentlichkeit über diese Innovation des Langzeitmonitoring der Bauwerkssicherheit:

Ingenieure konstruieren ein System zur Kontrolle von Bauwerken



Hauptbahnhof Berlin: Größter Kreuzungsbahnhof Europas, eröffnet Mai 2006

Technikdaten: 164 000 m² Fläche • 4 300 m Zugtrasse
 • 0,5 Mio m³ 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



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 Meter 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 gesammelten Signale werden in physikalische Einheiten umgerechnet und weiter verarbeitet. 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“.

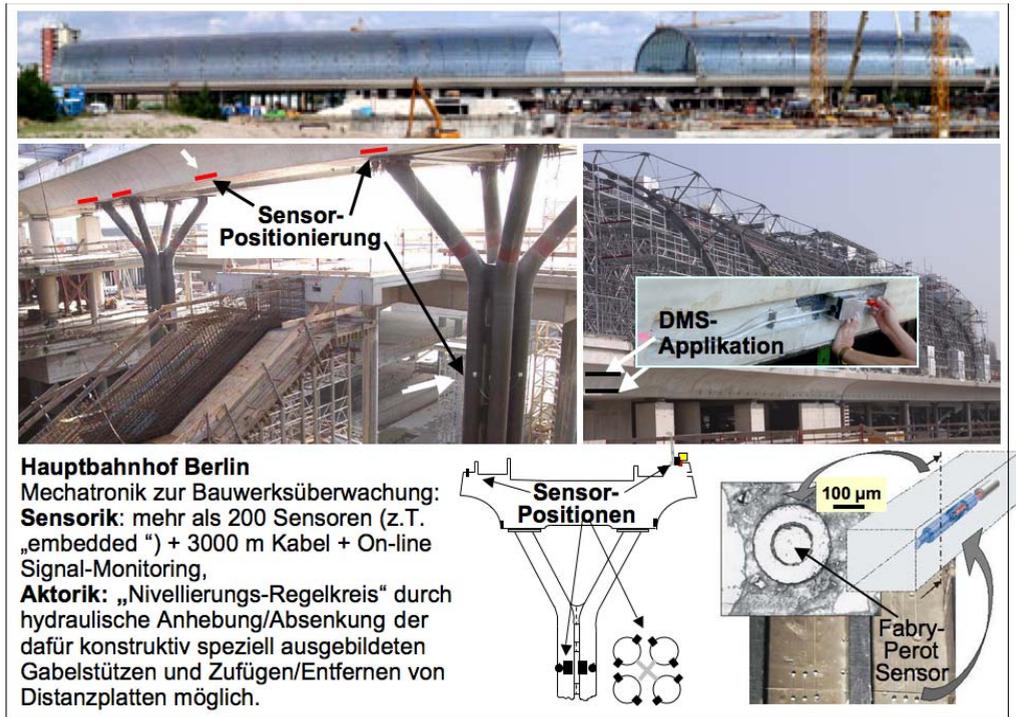


Bild 14.8 Integration von Sensorik und Aktorik in Ingenieurbauten: Hauptbahnhof Berlin

14.2 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:

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 bis 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 www.onsiteformasonry.bam.de und Bild 14.9.



Bild 14.9 Bauwerke des kulturellen Erbes in Europa, untersucht mit Sensorik und ZfP

Bei dem europäischen Sensorik-Projekt wurden neben den in Bild 14.4 erläuterten Akustischen Verfahren, Mikrowellenverfahren und der Thermografie auch Methoden der Mikroseismik und der Geoelektrischen Sensorik weiterentwickelt, siehe Bild 14.10.

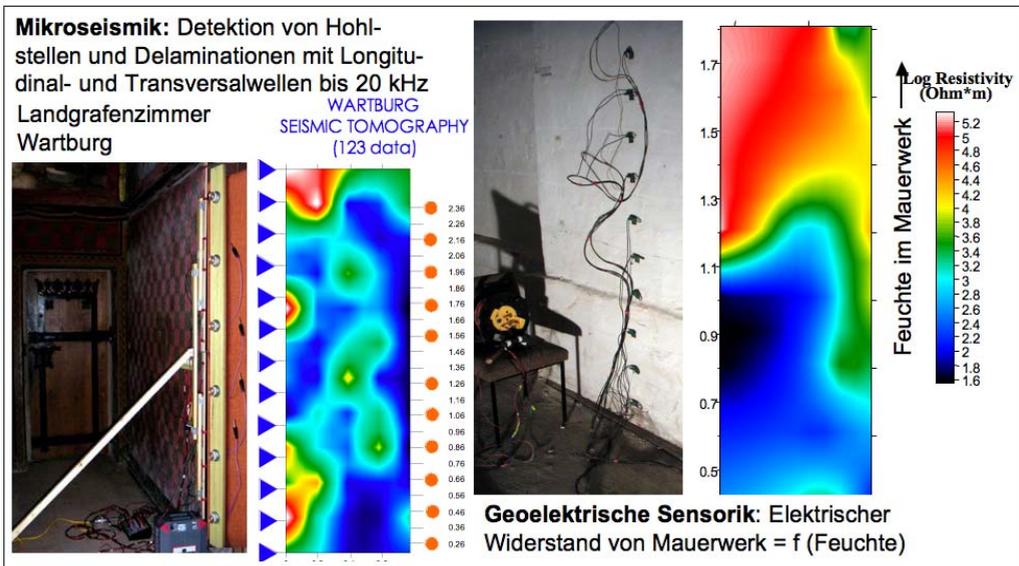
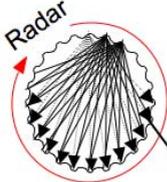


Bild 14.10 Übersicht über die Methoden der Mikroseismik und der Geoelektrischen Sensorik

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 Rekonstruktion der weltberühmten Säulenstrukturen der Außenfassade und der Rotunde durchgeführt werden, siehe Bild 14.11.

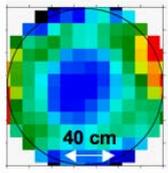


Radar

**Altes Museum Berlin,
Schinkel, 1829**



Ultraschall Tomografie



40 cm

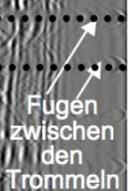



Analyse und Rekonstruktion der Säulen-Struktur

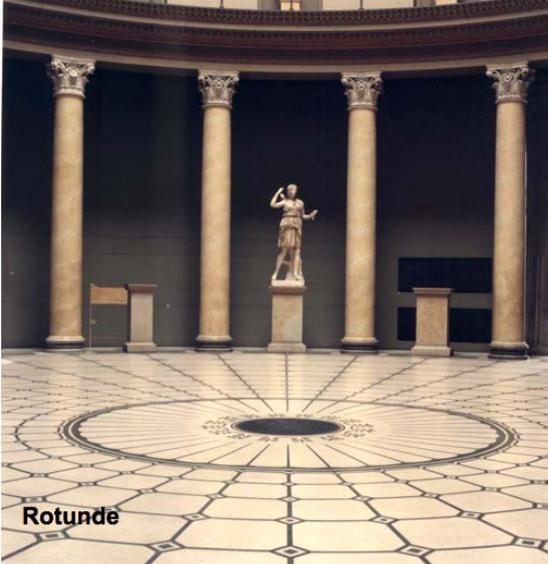
- Sandsteintrommeln à 1,7 m, Höhe: 12,3 m,
- Identifikation und Rekonstruktion von „Wolfslöchern“ (ca. 7-10 cm x 2-3 cm), die für Transport und Aufbau verwendet wurden,
- Fugenpositionen geortet, keine metallischen Verbindungselemente; Modellierung gelungen.



Wolfsloch



Fugen zwischen den Trommeln



Rotunde



**Rotunde-Säule
Altes Museum
Berlin**



Thermogramm:
Ablösungen
hell



Phasenbild:
Ablösungen
dunkel

Bild 14.11 Anwendung der Sensorik auf historische Bauwerke: Schinkels Altes Museum, Berlin

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 Bild 14.12.

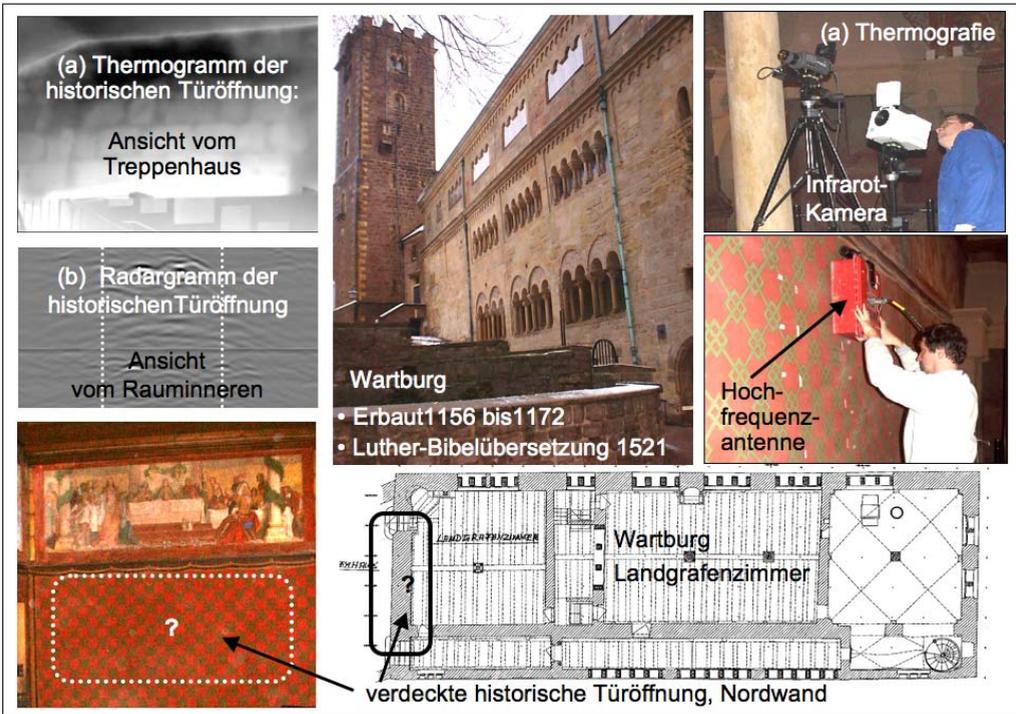


Bild 14.12 Anwendung der Sensorik auf historische Bauwerke: Wartburg, Eisenach

14.3 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 Bild 14.13.

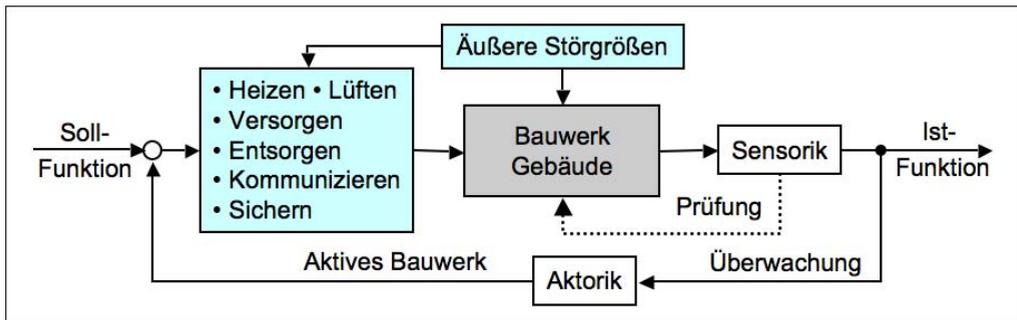


Bild 14.13 Abstrakte Systemdarstellung der Gebäudetechnik

Da die Mechatronik in der Gebäudetechnik auf „Immobilien“ anzuwenden ist, sind „lokale Systemlösungen“ – bezogen auf die Eigenschaften und Kenndaten des jeweiligen Gebäudes und seiner Umwelt – erforderlich. Bild 14.14 zeigt eine Übersicht allein über die vielfältigen Aspekte der Haus-Teilfunktionen *Heizung, Lüftung, Klima*.

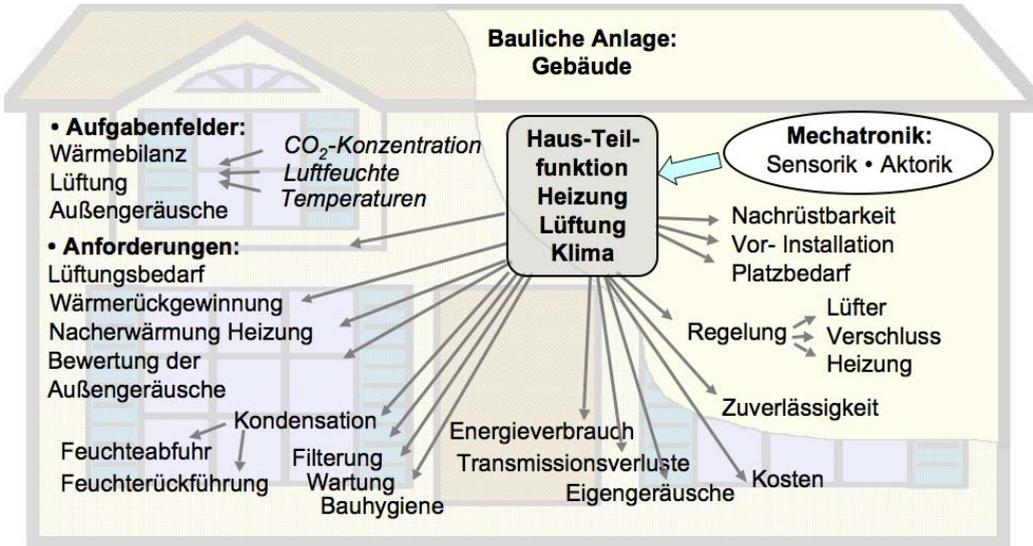


Bild 14.14 Charakteristika der Haus-Teilfunktionen Heizung, Lüftung, Klima

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. Bild 14.15 gibt eine Übersicht über die Instrumentierung zur Untersuchung von Heizung, Lüftung und Klima, einschließlich einer „Outdoor-Wetterstation“ für die sensortechnische Erfassung von Temperatur und Feuchte (Sensorprinzipien siehe Kapitel 5.7) sowie von Wind und Strahlung (optoelektronische Sensorik siehe Bild 3.11).

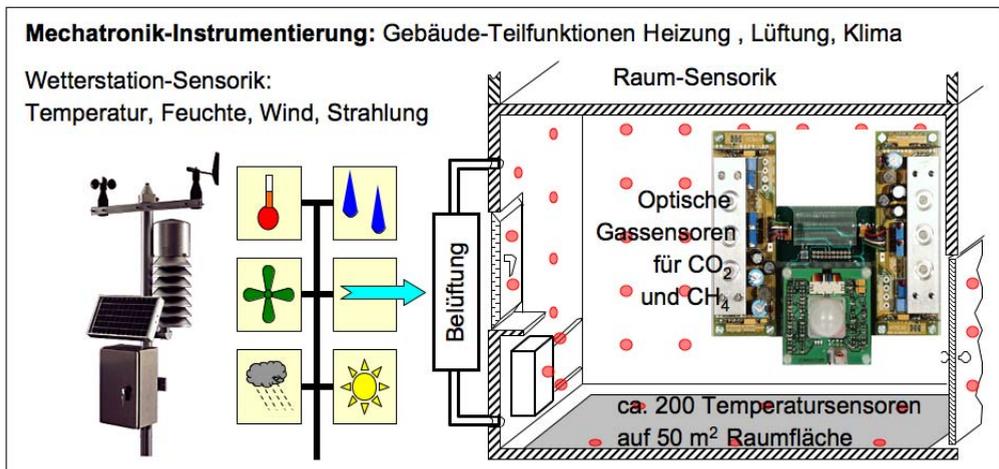
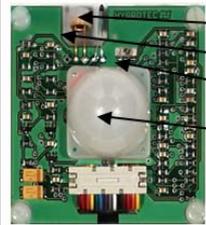


Bild 14.15 „Outdoor- und Indoor-Sensorik“ für haustechnische Untersuchungen

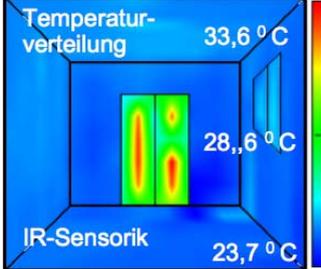
Bild 14.16 zeigt einen Versuchsraum mit Sensorik und Aktormodulen sowie Versorgungsaggregaten. In Bild 14.17 ist die Mechatronik-Instrumentierung an einem Gebäudeaußenwand-Versuchsmodul dargestellt.



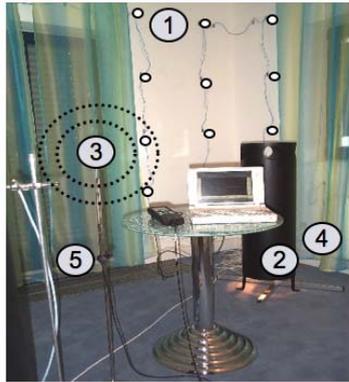
- Temperatur
- Feuchte
- Schall
- Lichtstärke

Multi-Sensor-Modul

Mechatronik in der Haus- und Gebäudetechnik: Versuchsraum mit Sensorik und Aktorikmodulen



IR-Sensorik



Versuchsraum

- (1) Sensoren für Raumluft und Oberflächentemperaturen
- (2) Simulationsmodul für Personenanwesenheit im Raum
- (3) Luftbewegung
- (4) Stromverbrauchs-zähler
- (5) Wärmemengen-zähler (Heizkörper, Konvektoren)

Versorgung

- Temperatur-sensor
- Wärmezähler (Bus an PC)
- Umwälz-pumpe
- Mischer, Dreipunkt-Regler



Bild 14.16 Versuchsraum und Instrumentierung für haustechnische Untersuchungen

Sensoren	Aktoren
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur: Wand oben, Rückwand oben 	<ul style="list-style-type: none"> • Getriebemotor Umluft
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur Wärmetauscher 	<ul style="list-style-type: none"> • Getriebemotor Abluft
<ul style="list-style-type: none"> • Außentemperatur • Außenfeuchte • Volumenstrom: Außenluft und Abluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Stellantrieb Ventil Fortluft • Heizwendel • UV-Lampe
<ul style="list-style-type: none"> • Innentemperatur • Innenfeuchte • CO₂ • Volumenstrom Umluft • Druckverlust 	<ul style="list-style-type: none"> • Getriebemotor Außenluft
<ul style="list-style-type: none"> • Druckverlust Filter Außenluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Stellantrieb Außenventil Außenluft • Heizwendel
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur: Wand unten, Rückwand unten 	<ul style="list-style-type: none"> • Kondensatpumpen • Heizkörperventil
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur Fortluft • Temperatur Auslassventil 	 <p>Versuchssteuerungseinheit</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Füllstand Kondensat • Temperatur Einlassventil 	



Mechatronik-Instrumentierung an einem Gebäudeaußenwand-versuchs-modul

Bild 14.17 Sensoren und Aktoren für Gebäudeaußenwand-Untersuchungen

Die Anwendung mechatronischer Systeme ermöglicht neue technische Lösungen für die Gebäudefunktionen Heizung und Lüftung. Für ein mechatronisches Regelsystem der Raumtemperierung (Prinzipdarstellung siehe Bild 4.4) muss der Temperatur-Fühler (meist ein PTC- oder NTC-Sensor, vgl. Kap. 5.7.1) mit einer Regeleinrichtung, d. h. einem Aktor kombiniert werden. Ein neuartiges mechatronisches System der energiesparenden Heizungsregelung mit einem ECA-Heizventil-Aktor zeigt Bild 14.18.

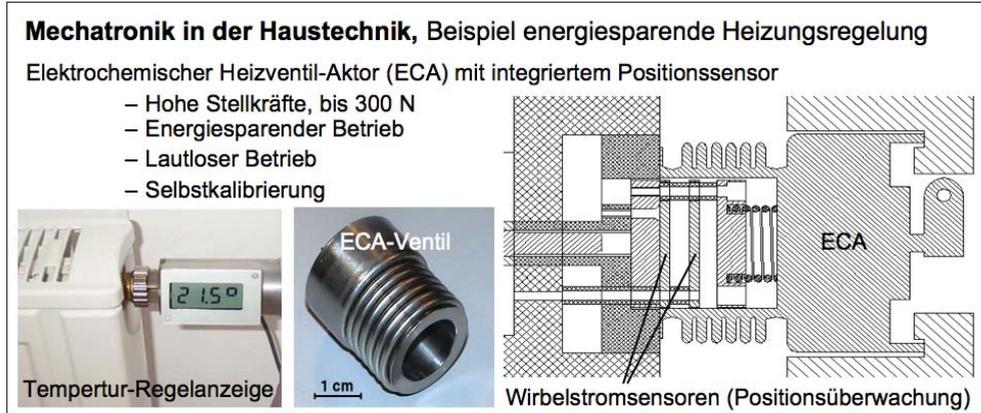


Bild 14.18 Aktormodul für die Heizungsregelung in der Gebäudetechnik

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 Bild 14.19.

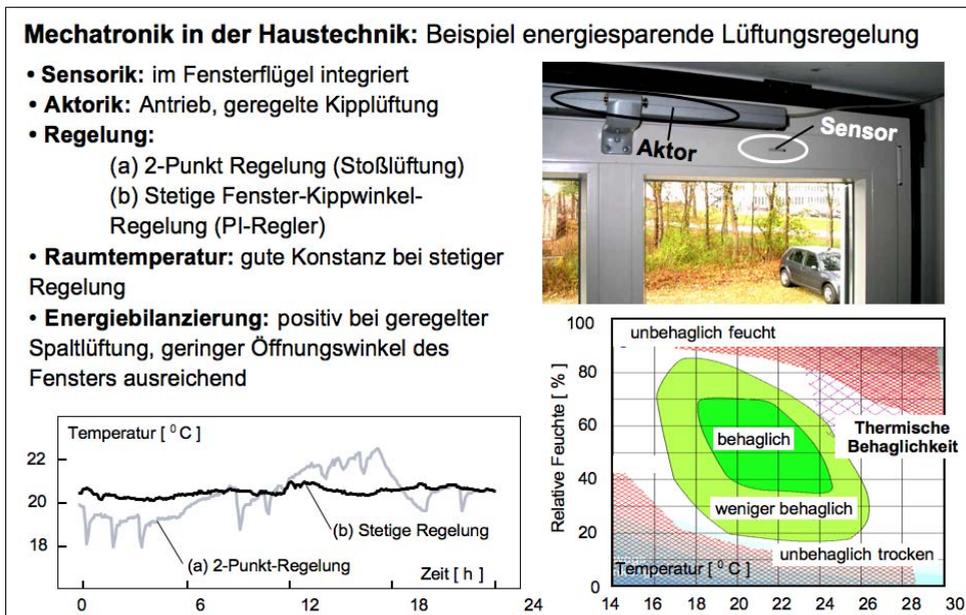


Bild 14.19 Mechatronik-Anwendungen in der Haus- und Gebäudetechnik

14.4 Bauwerksdynamik

Bauliche Anlagen sind wie alle technischen Systeme vielfältigen betrieblichen Beanspruchungen ausgesetzt. Von besonderer Bedeutung sind dabei Schwingungsbeanspruchungen mit ihren Einflüssen auf die gesetzlich geforderte Standsicherheit und die Bauwerksdynamik. Dies gilt insbesondere für *Verkehrsbauwerke*. Für bauwerksdynamische Untersuchungen, die mit einigen Beispielen in Bild 14.20 illustriert sind, nennt das *ZfPBau-Kompodium* (www.bam.de/zfpbau-kompodium.htm) stichwortartig folgendes Instrumentarium:



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.

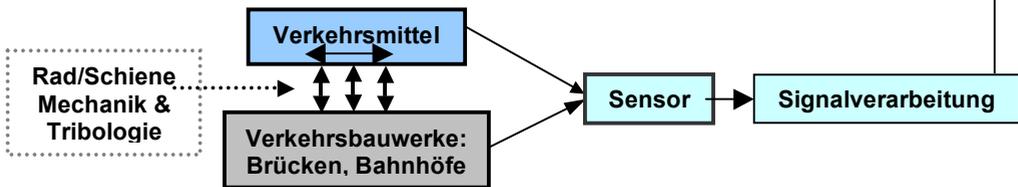


Bild 14.20 Anwendung der Sensorik in der Bauwerksdynamik

Das Instrumentarium der Sensorik kann auf alle baulichen Anlagen, deren technische Funktion durch die Bauwerksdynamik geprägt ist, angewendet werden. Neben Verkehrsbauwerken betrifft dies im Kraftwerksbereich die Ingenieurbauwerke für die Nutzung erneuerbarer Energien, die **Windenergieanlagen**.

Eine Windenergieanlage ist ein mechatronisches System mit Mechanik-Komponenten (ca. 50 % Kostenanteil) und Elektrik-Komponenten (ca. 25 % Kostenanteil). Es ist aus drei hauptsächlichen 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 sensorgestützte 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 Anlagenteile. Ein Beispiel für die Anwendung faseroptischer Sensorik (vgl. Kapitel 5.4.2) zeigt Bild 14.21.



Bild 14.21 Mechatronisches System Windenergieanlage

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 Bild 14.22 ist das bekannte allgemeine „Zweimassenschwinger-Modell“ zusammen Federelemente, die als „Schwingungstilger“ eingesetzt werden können, dargestellt.

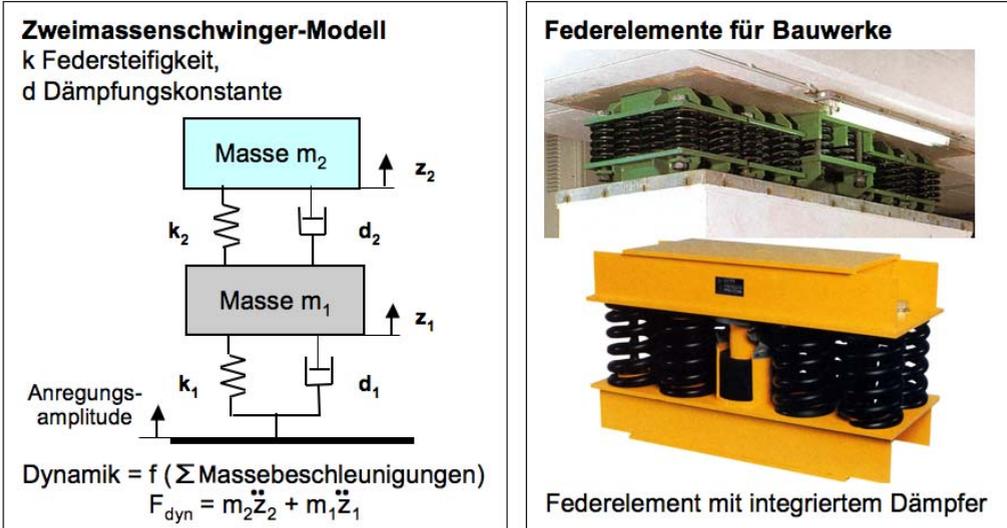


Bild 14.22 Dynamikmodell und industrielle Federelemente für bauliche Anlagen

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 Bild 14.23.

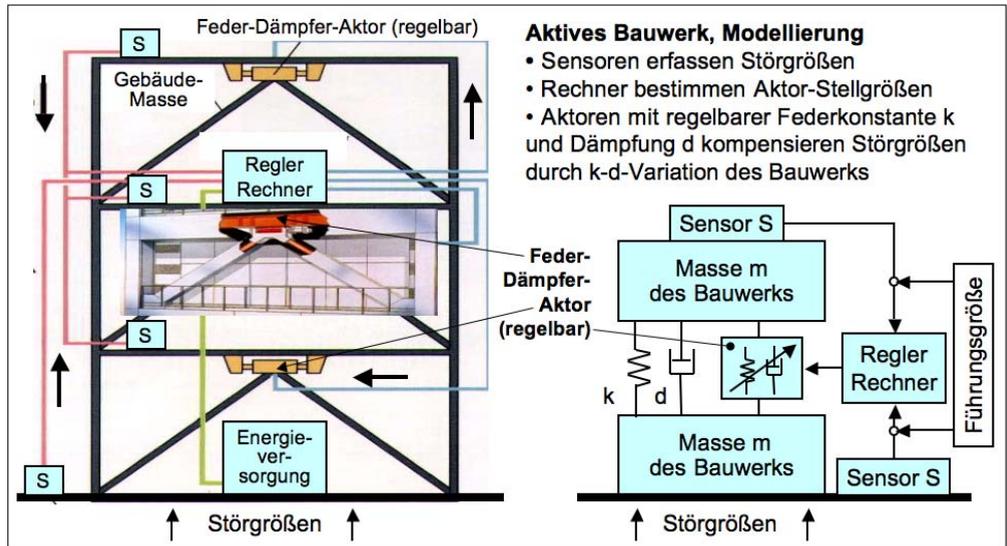


Bild 14.23 Mechatronik baulicher Anlagen: Modellierungsmodell eines aktiven Bauwerks

15 Medizintechnik

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 Medizinprodukterichtlinie* (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 Bild 15.1 in einer Übersicht mit charakteristischen Beispielen dargestellt.

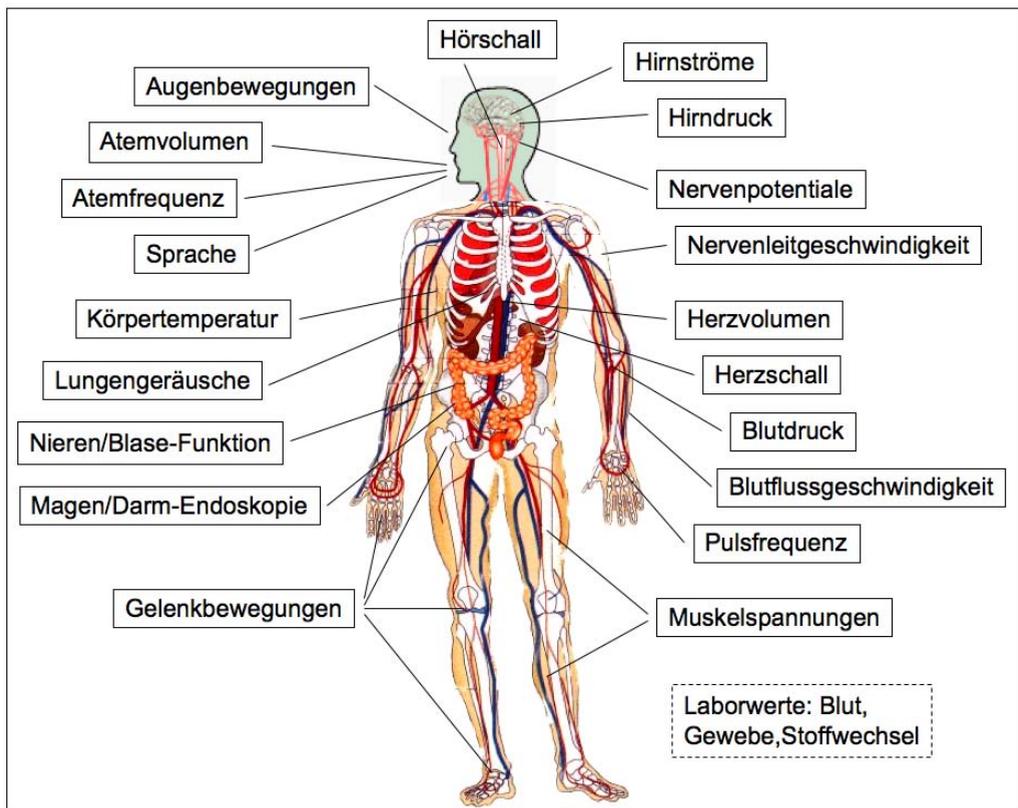


Bild 15.1 Körperfunktionen des Menschen und die sie kennzeichnenden Biosignale, Beispiele

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 Bild 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.

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 sensorteknische 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, Bild 5.33). Nervenleitgeschwindigkeiten werden durch Nervenstimulation an zwei Orten und Laufzeitanalysen bestimmt.
 - *Volumenstrom*: Atemflüsse können indirekt mittels Thermistoren (siehe Abschnitt 5.7.1) aus Temperaturdifferenzmessungen zwischen Ein- und Ausatemluft bestimmt werden. Für Blutstrommessungen kommt die magnetisch-induktive Durchflussmethode und das Ultraschall-Dopplerverfahren (vgl. Abschnitt 5.2.1) zur medizintechnischen Anwendung.
 - *Kraft*: dynamische Muskelkontraktionen werden beispielsweise mit piezoelektrischen Kraftsensoren verfolgt (siehe Bild 5.42).
 - *Druck*: medizintechnisch relevante Druckkenngrößen (siehe Abschnitt 5.6.3) 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 Mikrophonesensorik bestimmt werden.
- *Bioelektrische Signale* resultieren aus Differenzen der Ruhe- und Aktionspotentiale (Erregungen) von Nerven und Muskelzellen und lassen sich mittels Elektroden ableiten: Elektroretinographie, ERG (Auge); Elektrokardiogramm, EKG (Herz); Elektroencephalographie, EEG (Hirn); Elektrogastrographie, EGG (Magen); Elektromyographie, EMG (Muskel).
- *Biomagnetische Signale* resultieren aus Magnetfeldern, die elektrische Biosignale begleiten und können mittels hochempfindlicher SQUID-Sensoren (Superconducting Quantum Interference Device) detektiert werden.

Tabelle 15.1 Beispiele charakteristischer Biosignale des Menschen (Quelle: K.-P. Hoffmann: Biosignale erfassen und verarbeiten, in Medizintechnik, R. Kramme, Hrsg., Springer, 2006)

	Biosignalart	Frequenz	Amplitude
Bio-mechanische Signale	Atmung	5...60 min ⁻¹	
	Atmungsströmungsgeschw.		20...120 cm/s
	Atemzugvolumen		200...2000 ml
	Augeninnendruck		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
	Puls	20...200 min ⁻¹	
Bioakustische Signale	Herzschall	15...1000 Hz	
	Lungengeräusche	0.2...10 Hz	
Bioelektrische Signale	Auge: Elektroretinographie ERG	0,2...200 Hz	0,005...10 mV
	Herz: Elektrokardiogramm EKG	0,2...200 Hz	0,1...10 mV
	Hirn: Elektroencephalographie EEG	0,5...100 Hz	2...100 µV
	Magen: Elektrogastrographie EGG	0,02...0,2 Hz	0,2...1 mV
	Muskel: Elektromyographie EMG	0,01...10 kHz	0,05...1 mV

- *Biothermische Signale* kennzeichnen die mit Thermoelementen, Thermistoren, Infrarotthermometern und -kameras (siehe Abschnitt 5.7.1) bestimmbare Körpertemperatur und -verteilungen, sie geben auch Auskünfte über andere (gestörte) Körperfunktionen, wie z. B. Durchblutungsstörungen oder Tumoraktivitäten.
- *Biooptische Signale* ermöglichen mittels optischer Spektralphotometer (Optodensensoren) und bioaktiver Farb/Fluoreszenz-Indikatoren die Bestimmung körperfunktioneller pH-Werte, die Erfassung der O₂-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 Kapitel 5 beschriebenen physikalischen Prinzipien der *Sensorik* auf Biosignale an, insbesondere auf nichtelektrische Größen:

- *Sensorik geometrischer Größen*: Längen, Dehnungen, Abschnitt 5.4
- *Sensorik kinematischer Größen*: Position (Weg, Winkel), Translation, Rotation, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Abschnitt 5.5
- *Sensorik dynamischer Größen*: Kraft, Drehmoment, Druck, Abschnitt 5.6
- *Sensorik von Einflussgrößen*. Abschnitt 5.7.

Für die medizintechnische Sensortechnik sind auch *Embedded Sensors* (siehe Abschnitt 5.8) und die Mikrosensorik (siehe Abschnitt 5.9) von Bedeutung.

In medizintechnischen Anwendungen werden Biosensoren mit messtechnischen Komponenten der Signalverarbeitung zusammenschaltet – wie in allen sensortechnischen Anwendungen (vgl. Abschnitt 5.3) – sie bilden damit eine *biologische Messkette*, siehe Bild 15.2.

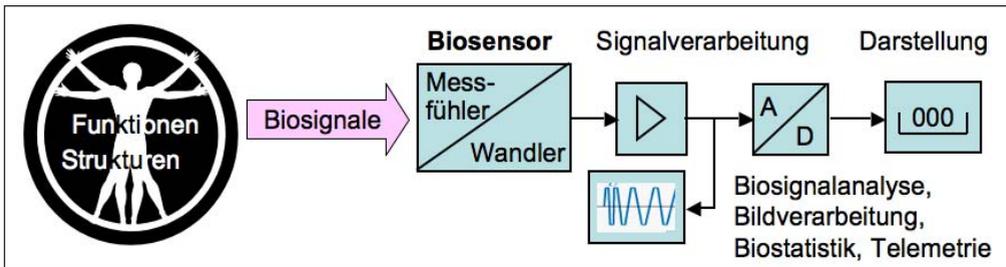


Bild 15.2 Prinzipdarstellung eines Biosensors in einer biologischen Messkette

Bei der Signalverarbeitung und Darstellung der elektrischen Ausgangssignale von Biosensoren werden in der Medizintechnik neben den allgemeinen Methoden der Sensorsignal-Processorik (siehe Kapitel 6.6) insbesondere folgende Methoden eingesetzt:

- *Biosignalanalyse*: Die Biosignalanalyse im *Zeitbereich* (Originalbereich, vgl. Abschnitt 3.5.2) umfasst im Wesentlichen die Signalverbesserung zur Funktionsdiagnostik, die Mustererkennung, die Signalvermessung, die Ähnlichkeitsanalyse (Kreuzkorrelation) und das Signalmapping. Die Biosignalanalyse im *Frequenzbereich* (vgl. Abschnitt 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 Mechatronik in der medizinischen 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 (ophtalmologische) 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. Nierensteinertrümmerer)
 - Röntgengeräte, Computertomographen
 - Elektrodiagnosegeräte, z. B. Kernspintomographie, Magnetresonanzgeräte
 - Elektrokardiographen (EKG)
 - Nuklearmedizinische Geräte mit Alpha-, Beta- oder Gammastrahlen
 - Ultraviolett/Infrarot-Bestrahlungsgeräte (Wellenlängenbereiche, siehe Bild 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 Bild 15.1 exemplarisch dargestellten Körperfunktionen, z.B. elektrophysikalische Messungen von Herz- oder Hirnfunktionen, EKG, Blutdrucksensorik,

- *Bildgebende Verfahren*, z. B. Röntgendiagnostik, Kernspintomographie, Ultraschall Diagnostik (Sonographie), Computertomographie.

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 *Sonographie*, *Tomographie*) illustriert.

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 ($1\text{mmHg} = 133,322\text{ Pa}$). Zum Verständnis der Blutdrucksensorik – der gebräuchlichsten Methode der Körpersensorik – sind Grundkenntnisse des Herz-Kreislaufsystems erforderlich, siehe Bild 15.3.

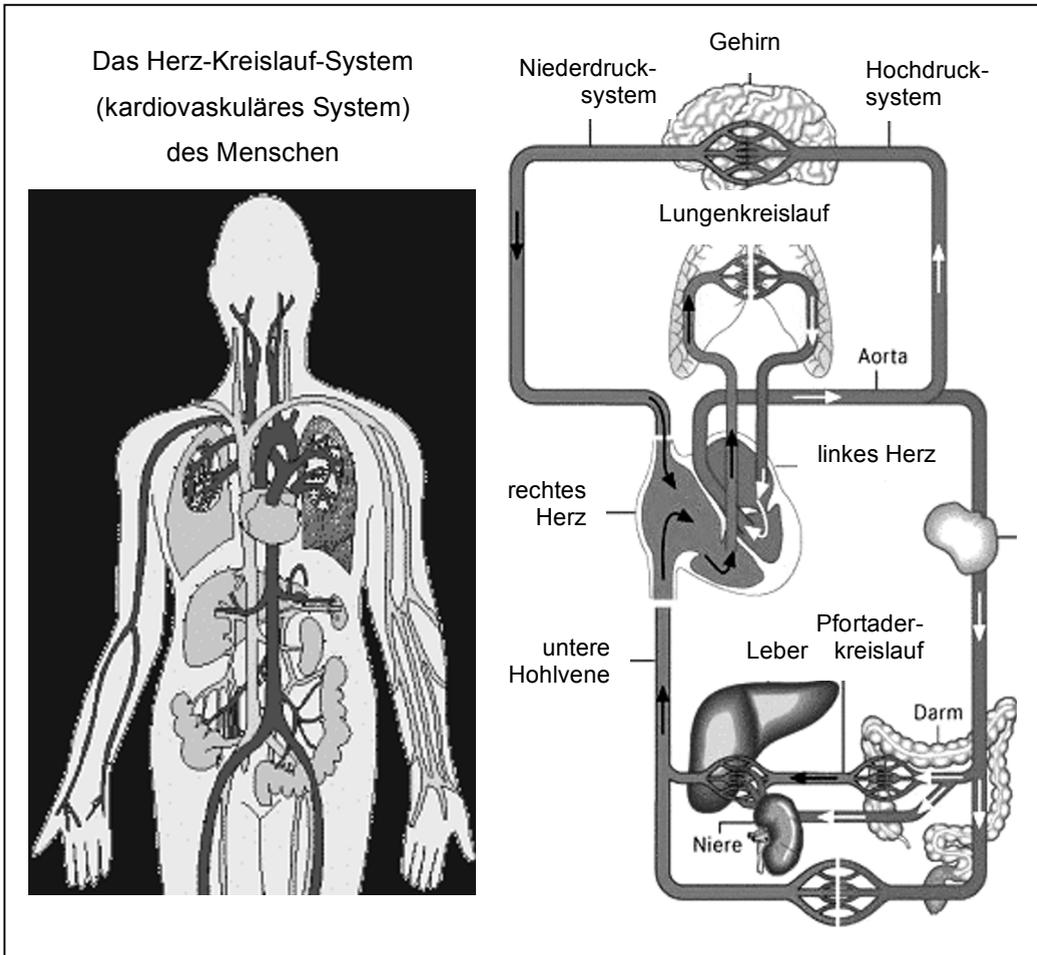


Bild 15.3 Herz-Kreislauf-System: Körperkreislauf, Lungenkreislauf, Pfortaderkreislauf

Wie in Bild 15.3 illustriert, kann 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 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: Herz-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. Bild 15.4 veranschaulicht das Prinzip des Verfahrens.

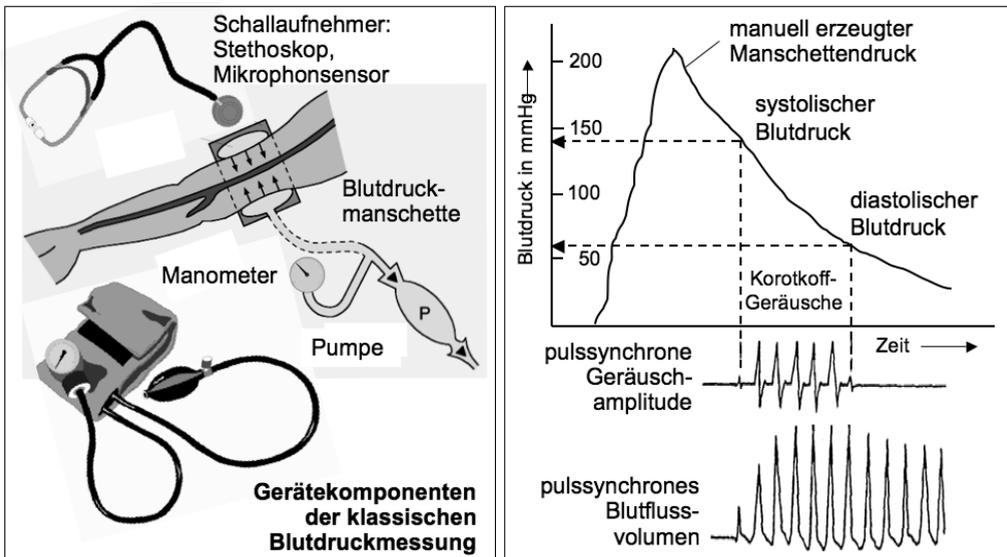


Bild 15.4 Das klassische Verfahren der nichtinvasiven Blutdruckmesstechnik

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.

Bild 15.5 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.

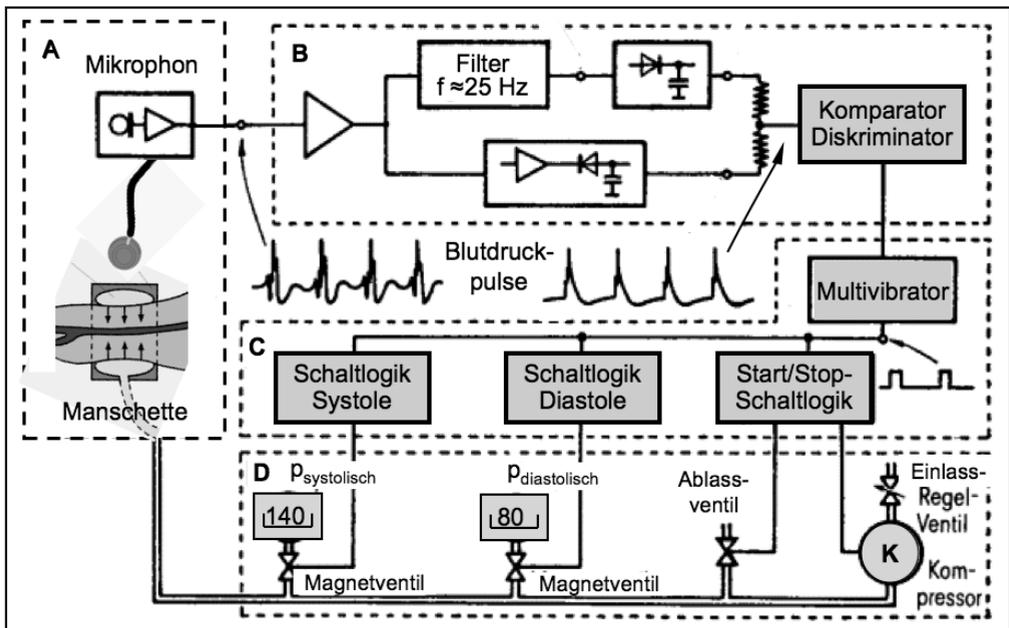


Bild 15.5 Blockschaltbild eines Blutdruckmessgerätes mit mechatronischen Modulen. A: Blutdruckmanschette mit integriertem Mikrophon, B: Elektronische Filtermodule, C: Mess- und Regelungseinheit, D: Steuerungsmodule für Manschettendruck, Messwertausgabe und Displays

Sonographie

Die Sonographie ist ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung morphologischer Verhältnisse des menschlichen Körpers; sie hat ihren technischen Ursprung in der zerstörungsfreien Materialprüfung (ZfP) mit Ultraschall (siehe Kapitel 5.4.1). 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 Sonographie erhält man medizinisch relevante Informationen durch Absorption, Reflexion und Brechung sowie durch den *Doppler-Effekt* von Ultraschallwellen, die durch Ultraschallsender (*Piezoschwinger*, siehe Abschnitt 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. Bild 15.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines mit Ultraschalltechnik arbeitenden Sonographen.

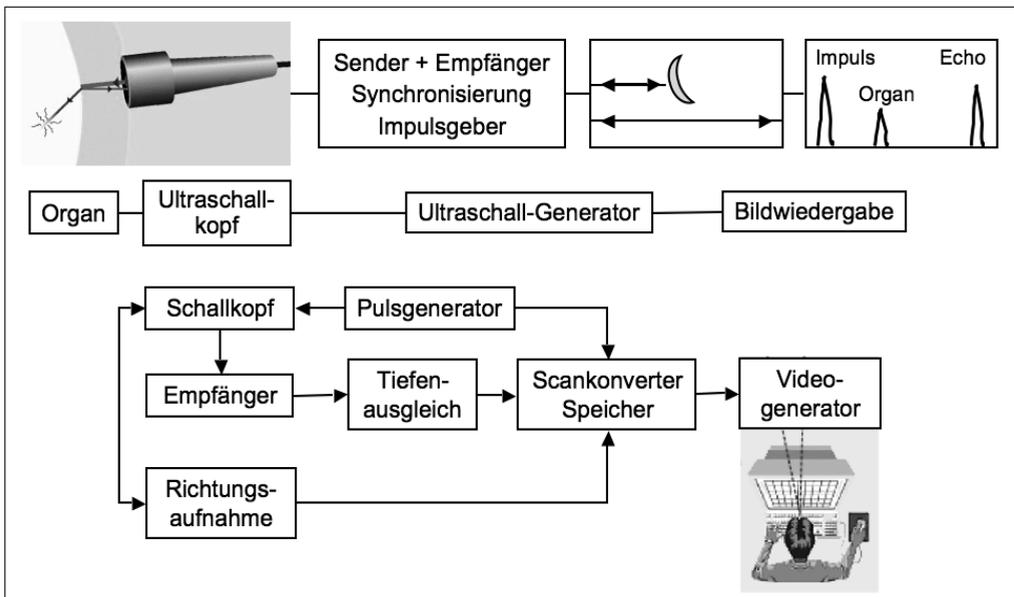


Bild 15.6 Blockschtbild Darstellung eines Sonographen mit Ultraschalltechnik

Die in Bild 15.6 dargestellten Module eines Sonographen 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 laufzeitabhängig 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 Scankonverters zugeführt, wo eine Bildtransformation vorgenommen wird.
- *Scankonverter*: Er verknüpft Informationen über die geometrischen Verhältnisse von Sendepuls und Echo mit den Bildkoordinaten der Bildpunkte. Die Bildinformationen werden digitalisiert und in den dazugehörigen Bildspeicheradressen abgelegt.
- *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 Bild 15.7 illustrierten Verfahren.

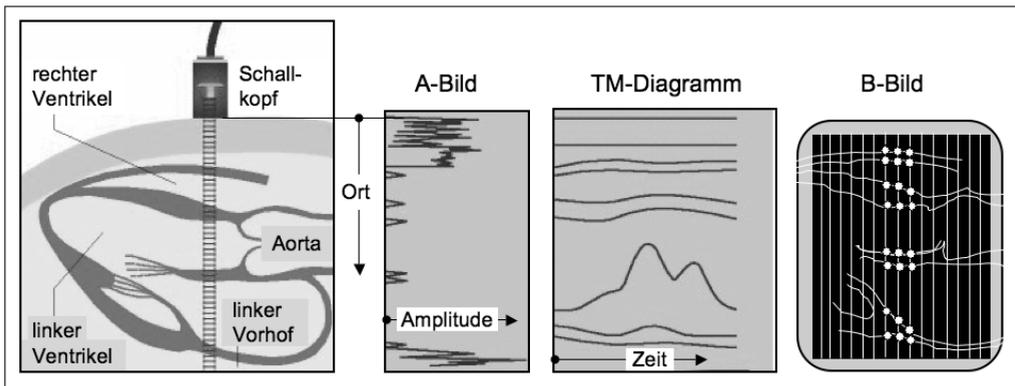


Bild 15.7 Die grundlegenden Verfahren der Sonographie, dargestellt am Beispiel der Ultraschalldiagnostik des Herzens mit einem auf die Brust aufgesetzten Schallkopf

Für die medizinische Sonographie 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 Sonographie 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 Sonographie bei der Untersuchung von Nieren, Harnblase, Prostata und in der Orthopädie bei Untersuchungen des Gelenk- und Bewegungsapparates.

Tomographie

Tomographie 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 Sonographie-Bilder mit Hilfe von longitudinalen Ultraschallwellen erzeugt werden, verwendet die Röntgen-Computertomographie (CT) dazu Röntgenstrahlen. Die Grundlagen der technischen CT wurden in Kapitel 5.4.1 behandelt (vgl. Bild 5.13). Ein weiteres bildgebendes Verfahren der medizinischen Diagnostik ist die Magnetresonanztomographie (MRT) – auch Kernspintomographie oder Nuclear Magnetic Resonance (NMR) genannt – bei der zur Bilderzeugung elektromagnetische Radiowellen eingesetzt werden. Die elementaren physikalischen Grundlagen von CT und MRT sind in Bild 15.8 illustriert.

Die Gerätetechnik eines Computertomographen (Nobelpreis 1979) erweitert die klassische Röntgenstrahltechnik durch Mechanik, Elektronik und Informatik zu einem mechatronischen System. Wie in Bild 15.8 auf der linken Seite dargestellt, besteht ein Computertomograph aus einer Röntgenquelle, die um die Achse des Patienten rotiert. Der 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 Compu-

ter 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 Computertomographie Schnittbilder des menschlichen Körpers aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften des Gewebes für Röntgenstrahlung, darstellt, 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.

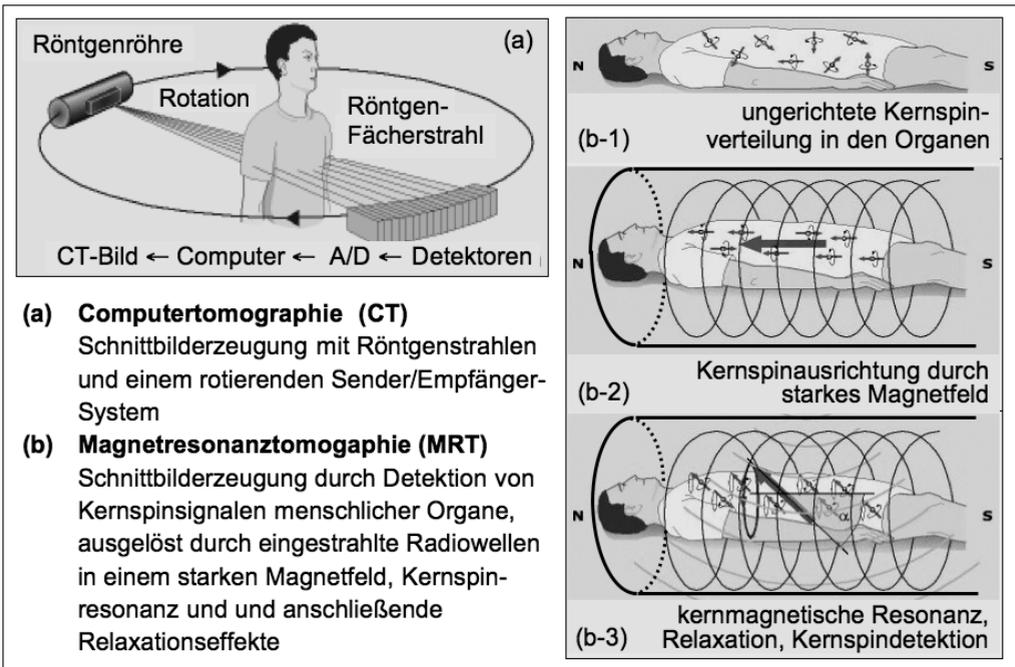


Bild 15.8 Physikalische Prinzipien von Tomographieverfahren medizintechnischer Geräte

Die Magnetresonanztomographie (MRT) nutzt die Kernspinnresonanz 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. Bild 15.8 zeigt auf der rechten Seite eine stark vereinfachte Darstellung der komplexen Vorgänge bei der Magnetresonanztomographie. Die wichtigsten Module eines Magnetresonanztomographen sind

- ein kräftiger Magnet, der ein homogenes (gleichförmiges), zeitlich konstantes magnetisches Grundfeld (bis zu etwa 3 Tesla, etwa 30 000 • 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. 2m) des Magneten eingebracht, (Bild 15.8 b-1). In dem starken Magnetfeld orientieren sich die meisten Kernspins der Atome des menschlichen Körper in Richtung des Grundfeldes (Bild 15.8 b-2). Bei Einschalten des zusätzlichen magnetischen Wechselfelds wird die Ausrichtung des Kernspins unter Aufnahme der eingestrahlten Energie verändert (Bild 15.8 b-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 Magnetresonanztomographie 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. Bild 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 Gehirnnareale sichtbar gemacht werden, die bei bestimmten geistigen Tätigkeiten wie Lesen, Rechnen oder Musikhören besonders aktiv sind.

Eine kurze zusammenfassende Übersicht über die behandelten bildgebenden Verfahren der medizinischen Gerätetechnik gibt Tabelle 15.2.

Tabelle 15.2 Charakteristika der behandelten bildgebenden Verfahren der Medizintechnik

Verfahren	Prinzip	Typische Parameter	Technische Trends
Sonographie	Reflexion, Absorption, Transmission, Dopplereffekt von Ultraschallwellen	Auflösung 0,1...1 mm, Aufnahmezeiten \approx sec	Echtzeit, 3D + Zeit, miniaturisierte Systeme für intravasculäre Bildgebung
Röntgen-Computer-Tomographie (CT)	Radiale Messung von Röntgenprojektionen und Rückprojektionen zu 2D-Schnittbildern	Auflösung 0.5...1mm, Aufnahmezeiten < 30 s (Ganzkörper-scan)	Multi-Schichtsysteme, Photodioden/Verstärker-Integration
Magnetresonanztomographie (MRT)	Messung der Kernspinresonanz von Wasserstoffatomen, Organen und Gewebe, Rekonstruktion von 2D-Schnittbildern. Keine Strahlungs-dosis für Patienten	Auflösung 250 μ m ...1 mm, Aufnahmezeiten μ Minuten	Offene Magnetsysteme, schnelle Aufnahmetechniken und Bewegungskompensation

Die Anwendung medizintechnischer Geräte durch den Arzt ist häufig mit der Applikation von Reizen, Strahlen, Wellen oder medizinischen Substanzen auf menschliche

Probanden und der Bestimmung der dadurch ausgelösten Biosignale verbunden. Diese „Bioaktorik“ dient beispielsweise dazu, die Funktionsfähigkeit menschlicher Sinnesorgane aus der Reaktion auf mechanische, akustische, elektrische, magnetische oder optische Reize zu beurteilen.

Ein typisches Beispiel ist die oben in Bild 15.7 dargestellte Sonographie. Sie ermöglicht z. B. die Analyse von Ultraschallreflexen im menschlichen Körper, die Darstellung von Bewegungsabläufen von Herzklappen sowie die Messung der Blutflussgeschwindigkeit. Röntgenstrahlabsorptionsmessungen erlauben die Vermessung anatomischer Strukturen. Aus ergonomischen Messungen kann auf die physische Belastbarkeit geschlossen werden. Mittels radioaktiv markierter Substanzen lassen sich Stoffwechselphänomene sowie die Transportgeschwindigkeit, der Anreicherungsort und die Dynamik von Ausscheidungsprozessen bestimmen.

Das Zusammenwirken dieser bioaktorisches Applikationen durch den Arzt mit der Biosensorik ist in einer zusammenfassenden Messkettendarstellung in Bild 15.9 wiedergegeben.

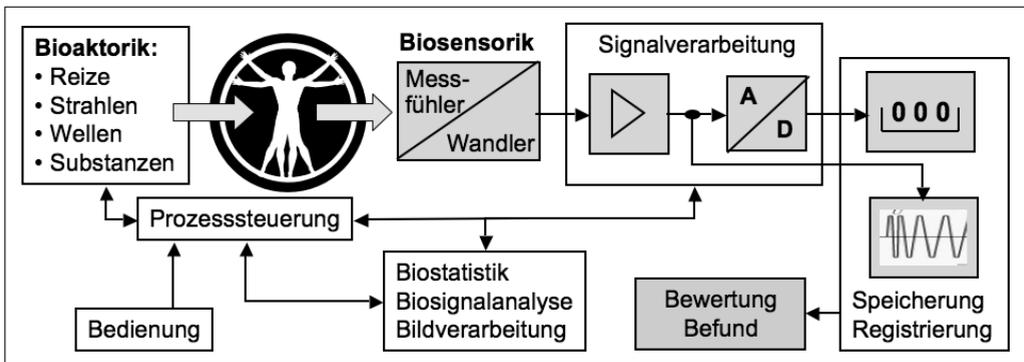


Bild 15.9 Die biologische Messkette der Medizintechnik in zusammenfassender Darstellung

Literatur und Quellen

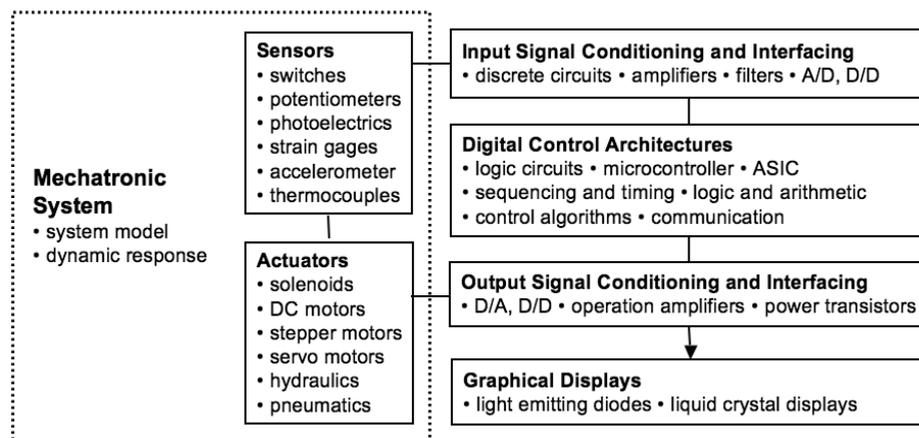
Die Literatur zur Mechatronik ist infolge ihrer interdisziplinären fachlichen Struktur sehr vielfältig und breit gestreut. Eine allgemeine *Informationsplattform* zum Thema Mechatronik und eine Literaturübersicht mit Kurzreferaten zu einzelnen Mechatronikbüchern vermittelt das Internet unter der Adresse www.mechatronik-portal.de. Auch fachspezifische Details, die in einem Kompendium naturgemäß nicht vertiefend behandelt werden können, lassen sich mittels der Stichworte des umfangreichen Sachwortverzeichnisses dieses Buches 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.; Hstand, M. B.: Introduction to Mechatronics and Measurement Systems. New York: McGraw-Hill, 2003.

Die Zielsetzung des 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, 2007, ISBN 978-3-540-71851-2) 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 Text-

gestaltung“ zu erzielen. Dabei musste auch bei der Schreibweise von Formelzeichen von Konventionen der Einzeldisziplinen 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. **Fett-druck**, *Kursivschrift*, Unterstreichungen, \wedge -Zusatzsymbole, \mathfrak{F} akturschrift) 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.

Literaturübersicht

Die bei der Erarbeitung dieses Kompendiums insgesamt verwendeten Bücher sind in der folgenden Übersicht zusammengestellt.

A Mechatronik-Bücher

- Bolton, W.: Bausteine mechatronischer Systeme. München: Pearson, 2004.
- Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003.
- Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Berlin: Springer 2002.
- Nordmann, R.; Birkhofer, H.: Maschinenelemente und Mechatronik. Aachen: Shaker-Verlag, 2002.
- Roddeck, W.: Einführung in die Mechatronik. Wiesbaden: Teubner, 2006.

- Schiessle, E. (Hrsg.): Mechatronik 1 und 2. Würzburg, Vogel, 2002.
- Wagner, F. E.; Bähnick, F. (Editors): European Workshop on Education in Mechatronics. Kiel: FH Kiel, 2001.

B Fachbücher

- Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch. Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- Bhushan, B. (Ed.): Springer Handbook of Nanotechnology. Berlin: Springer, 2004.
- Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Technologieführer. Heidelberg: Springer 2007.
- Czichos, H.; Daum, W.: Messtechnik und Sensorik, in: DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer, 2007 (Grote, K.-H.; Feldhusen, J., Hrsg.)
- Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Wiesbaden: Vieweg, 2003.
- Czichos, H. ; Hennecke, M. (Hrsg.): HÜTTE Das Ingenieurwissen. 33. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- Czichos, H.; Saito, T.; Smith, L. (Editors): Springer Handbook of Materials Measurement Methods. Berlin: Springer, 2006.
- Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M.: The Feynman Lectures on Physics. Reading: Addison-Wesley, 1963.
- Findeisen, D.: System Dynamics and Mechanical Vibrations. Berlin: Springer, 2000.
- Gevatter, H..J.; Grünhaupt, U. (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. Berlin: Springer, 2006.
- Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer, 2007.
- Hoffmann, J. (Hrsg.): Handbuch der Messtechnik. München: Hanser, 1999.
- Howarth, P.; Redgrave, F.: Metrology – in short. Brussels: EU Metrotrade Project, 2003.
- Kramme, R. (Hrsg.): Medizintechnik. Heidelberg: Springer, 2007.
- Niedrig, H.(Hrsg.): Optik, Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3. Berlin: Walter de Gruyter, 2004.
- Nordmann, R.; Birkhofer, H.: Maschinenelemente und Mechatronik. Aachen: Shaker-Verlag, 2002.
- Reti, L. (Editor): The Unknown Leonardo. London: McGraw.-Hill, 1974.
- Richard, H. A.; Sander, M. : Technische Mechanik. Festigkeitslehre. Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- Robert Bosch (Hrsg.): Autoelektrik Autoelektronik. Wiesbaden: Vieweg, 2007.
- Robert Bosch (Hrsg.): Fahrstabilisierungssysteme. Stuttgart, 2004.
- Robert Bosch (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Wiesbaden: Vieweg, 2007.
- Robert Bosch (Hrsg.): Sensoren im Kraftfahrzeug. Stuttgart, 2001.

- VDI-Technologiezentrum: Nanotechnologie, Präsentationsfolien. Düsseldorf, 2005.
- Völklein, F.; Zetterer, T.: Praxiswissen Mikrosystemtechnik. Wiesbaden: Vieweg 2006.
- Weck, M.: Werkzeugmaschinen. Berlin: Springer, 2001.
- Wolf, A.; Steinmann, R.: Greifer in Bewegung. München: Hanser, 2004.
- Zacher, S.: Übungsbuch Regelungstechnik. Wiesbaden: Vieweg, 2007.

Bildnachweis

Die Abbildungen dieses Buches wurden speziell für dieses Kompendium gemäß der im Vorwort dargestellten Konzeption meist als „Wort-Bild-Graphik-Kombinationen“ gestaltet, wobei partiell Vorlagen aus folgenden Quellen verwendet wurden:

- BAM: 5.13, 5.15, 5.16, 5.45, 5.50, 5.57–5.61, 6.10, 7.12, 14.4–14.12, 14.20, 14.21
- BOSCH: 4.10, 5.22, 5.25–5.30, 5.34, 5.36, 5.37, 5.39, 5.40, 5.42, 5.43, 5.47, 5.49, 5.52, 5.62–5.65, 6.18, 6.19, 9.9, 13.9, 13.10, 13.12–13.14
- BMW: 1.3, 13.15
- Brockhaus Office-Bibliothek 2004: 1.6, 6.17, 6.27, 7.4, 7.5, 8.4, 8.10, 10.2, 10.13, 11.3, 13.7, 13.8, 15.3, 15.7, 15.8
- Canon: 10.12, 10.14, 10.17
- Center for Magnetic Recording Research, University of California, San Diego: 10.2, 12.2, 12.4, 12.6–12.8
- DaimlerChrysler: 13.1–13.3, 13.11
- IBM: 11.1, 12.1, 12.5
- Institut für Mess- u. Automatisierungstechnik, UniBW München: 14.1, 14.14–14.19
- Leitz: 10.12, 10.13
- Lufthansa: 1.6
- Minolta: 1.2, 10.12
- Opel: 13.15
- Pentax: 10.18
- Physik Instrumente PI: 8.1
- PTB: 5.9 bis 5.11, 5.35, 5.44, 5.46, 5.48, 5.49, 10.3, 10.5–10.8
- Reiss: 1.7, 8.7, 8.8, 8.15
- Sandia: 1.7, 7.2, 8.4
- Sartorius: 1.7, 10.10
- TFH Berlin, Labor für Gerätetechnik, Optik und Sensorik: 8.12, 10.14, 11.4, 11.8, 11.10, 11.11
- VDI-TZ, Präsentation *Reise in den Nanokosmos*: 1.7, 5.44, 9.6, 9.7, 12.3.

Sachwortverzeichnis

Fachliche Stichworte

A

- Abbesches Komparatorprinzip 75
- Abfallverwertung 20
- Abformverfahren 176
- Ablaufsteuerungen 58
- Abrasion 154
- Abstand (Bauteilmerkmal) 74
- Abstandserfassung
(Fahrzeugtechnik) 223
- Abtasteinheit CD-Player 204
- Abtastregelkreis 54
- Actio 23
- Active Body Control, ABC 213
- Adaptive Cruise Control
System, ACC 224
- Adaptive Lichttechnik 225
- Adaptronik 139
- Adhäsion 154
- Adhäsionskräfte 141
- Aerodynamik, Festplattenlaufwerk 208
- Akkreditierung von Laboratorien 69
- Aktive Bauwerke 242
- Aktives Fahrwerk 213
- Aktorik 119
- Aktor-Sensor-Interface, ASI-Bus 137
- Aktor-Stellkraft/Stellgeschwindigkeits-
Diagramm 134
- Aktor-Stellkraft/Stellweg-
Diagramm 133
- Akustik 62, 64
- Algebraisierung 36
- Algorithmus 32
- Altes Museum Berlin: Sensorik 235
- ALU, Arithmetic Logic Unit 31
- Ampere 64
- Ampere's law 70
- Amplitudenresonanzkurve 25
- AMR-Sensoren, Anisotrop Magneto-
Resistive 114
- Analog-Digital-Umsetzer 118, 135
- Analoge Regelung 54
- Analogs in Physics 8, 34, 213
- Analysenwaage 190
- Anfachung (Schwingungen) 25
- Anforderungsbeschreibung 50
- Anlagenmonitoring 112
- Anthropotechnik 47
- Antiblockiersystem, ABS 3, 220
- Antischlupfregelung, ASR 3, 220
- Antriebsmodule (Werkzeug-
maschine) 173
- Anzeige (Messkette) 117
- Apparate 9
- Application Specific Integrated Circuits,
ASIC 138
- Arbeit (Mechanik) 23
- Arbeitsraum (Roboter) 164
- Archimedes' principle 70
- Assembleranweisungen 32
- Atomic Force Microscope AFM 100
- Atomphysik 8

- Ätztechniken 175
 Audio Compact Disc 199
 Audio-Video-Technik 197
 Aufbau- und Verbindungstechniken 177
 Aufgabengröße (Regelung) 52
 Ausdruck (Messkette) 117
 Ausgangsgrößen 9, 11
 Auslegungskonzeption 47
 Austenit/Martensit-Umwandlung 131
 Automatisiertes Getriebe 148
 Automobilindustrie 3
- B**
- Balkenwaage 186
 Bauelement-Katalog 45
 Bauliche Anlagen 227
 Bauordnung 227
 Bauteilkenngrößen 74
 Bauteilverbindungen 146
 Bauwerke 227
 Bauwerksdynamik 240
 Bauwerksüberwachung 228
 Bauzusammenhang 45
 Beanspruchungen 23
 Beanspruchungsanalyse mit DMS 83
 Beleuchten (Fahrzeugtechnik) 225
 Berlin Hauptbahnhof: Sensorik 232
 Bernoulli-Gleichung 57
 Bernoulli's equation 70
 Beschichten 171
 Beschleunigung 23
 Beschleunigungssensor (Mikromechanik) 115
 Beschleunigungssensorik 94
 Bilanzgleichungen 21
 Bildbereich 36
 Bildgebende Verfahren (Medizintechnik) 255
 Bildspeichertechnik 194
 Bildstabilisierung 195
 Bimorpher Piezo-Biegewandler 142
 Binäre Steuerungstechnik 57
 Bioaktoriik 256
 Biologische Messkette 256
 Biosensorik 244
 Biosignale 244
 Biot's law 70
 Biot-Savart law 70
 BIPM Bureau International des Poids et Measure 62
 Bipolartransistoren 26
 Bit, Binary Digit 27
 Blutdrucksensorik 248
 Bode Diagramm 18, 35, 37
 Bodenhaftung 219
 Bohrsches Atommodell 30
 Bonden 177
 Bondgraph 15
 Bourdonrohr 103
 Bragg-Gitter-Sensor 80
 Bragg's law 70
 Brake-by-wire 3, 222
 Brandschutz 227
 Brechungsgesetz 79
 Brems-Assistent, BAS 220
 Bremseingriff 218, 222
 Bremsen 219
 Bremskraftverstärker 220
 Bremskreis-Druck-Sensor 103
 Bremssysteme 219
 Bridge-Kamera, 191
 Brillouin-Streuung 110
 Brückenbauwerksüberwachung 231

Brückenscanner 230
BUS, Bidirectional Universal Switch 31
Bussysteme 136
Byte 27

C

C++ (Programmiersprache) 32
CAD, Computer-Aided Design 50
CAN-Bus, Controller Area Network 136
Candela 64
CCD Sensor, Charge Coupled Device 194
CD-Player 199
CD Pressmatritze 198
CD-R, Compact Disc Recordable 199
CD-RW, Compact Disc Rewritable 199
Central Processing Unit, CPU, 31, 205
Chemische Gasphasenabscheidung, CVD 178
Chemisch-physikalische Messgrößen (Sensoreffekte) 110
CMOS-Technologie, Complementary Metal Oxide Semiconductor 27
CNC-Werkzeugmaschine, Computerized Numerical Control 173
CO₂-Laser 29
Compact Disc, CD 198
Computerarchitektur 31, 205
Computer-Festplatte 206
Computertechnik 3, 205
Computertomographie 77, 253
conformity assessment 19
Controller Area Network, CAN-Bus 136
Coriolis effect 70
Coriolis-Gyrometer 91
Coulombsche Kraftwirkung (Mikroaktorik) 141

CPU, Central Processing Unit 31, 205

D

Dämpfer 24
Dämpfung 35
Dämpfungsmaß 25, 35
Datenfusion (ZfP Bau) 231
Dehnstoff-Aktoren 131
Dehnungsmessstreifen-Wägeprinzip 187
Dehnungsmessstreifen, DMS, 81
Delta-Impulsfunktion 14
Delta-Roboter 163
Design 19
Desktop Computer 205
Determiniertheit 18
Diastole 249
Dichtungen 146
Dickschichttechnik 179
Differentialtransformator-Sensor 86
Digital-Analog-Umsetzer 136
Digital-Audio-Compact Disc 199
Digitale Regelung 54
Digitalkamera 191, 194
Digitalvoltmeter 118
Dioden 26
Disc-Servo, CD-Player 200
Display 118
Display-System (Mikroaktorik) 144
Dissipationseffekte 9, 11
Distanzsensoren (Fahrzeugtechnik) 223
DMS Drehmomentsensor 101
DMS-Drucksensor 103
DMS-Kraftsensor 98
DMS-Rosetten 82
Domänenspezifischer Entwurf 49
Doppler effect 70

- DRAM, Dynamic Random Access Memories 27
 D-Regler 55
 Drehgeschwindigkeits-Sensor 91
 Drehmoment-Geschwindigkeits-Diagramm 149
 Drehmoment-Kalibriereinrichtungen 102
 Drehmomentsensorik 101
 Drehstrommotoren 122
 Drehzahlsensorik 92
 Druckkompatibilität 17
 Drucksensorik 102, 114
 Dünnschichttechniken 178
 Durchfluss-Sensor 57
 Durchflutungskompatibilität 17
 DVD, Digital Versatile Disc 199
 DVD-Player 199
 DVR, Digital Video Recorder 199
 Dynamik 18, 23, 25
- E**
- Echtzeit 134
 Edison effect 70
 EEPROM, Electrical Erasable Programmable Read Only Memory 27
 Effektor (Robotik) 163
 Effort 14, 17
 Eichen 65
 Eignungsprüfungen 69
 Einflussgrößen-Sensorik 104
 Eingangsgrößen 9, 11
 Eingebettete Systeme (Informatik) 32
 Einheitensystem (SI-System) 62
 Einparksysteme 223
 Elastizität 23
 Elastohydrodynamik 155
 Elektrische Messtechnik 118
 Elektrischer Energiefluss 13
 Elektrischer Modul 35
 Elektrizität 62
 Elektrochemischer Aktor 239
 Elektrodynamischer Sensor 92
 Elektrodynamisches Aktorprinzip 121
 Elektrohydraulische Bremse 220
 Elektromagnetisches Aktorprinzip 120
 Elektromagnetisches Spektrum 28
 Elektromagnetismus 8
 Elektromechanische Aktoren 120
 Elektromotoren 122
 Elektronenstrahloszilloskop 118
 Elektronenstrahlschweißen 177
 Elektronik 2, 8, 26
 Elektronische Elemente 45
 Elektronisches Stabilitätsprogramm, ESP 3, 214
 Elektrorheologische Fluide 139
 Elektrostatischer Aktor (Mikroaktorik) 141
 Elektrostriktive Keramiken 139
 Elektrotechnik 8
 Elektrothermische Fluidaktoren 132
 Elementarmaschine 121
 Embedded Sensors 109
 Emissionen 20
 EMKK-Wägeprinzip, Elektromagnetische Kraftkompensation 188
 Energetik 8
 Energie 12
 Energiebestimmte Systeme 11
 Energiebilanz 23
 Energietechnik 12
 Entropiebilanzgleichungen 21
 Entwicklungsmethodik Mechatronik 47
 Entwicklungswerkzeuge 50

EPTIS European Information System
on Proficiency Testing Systems 69

Erdbeschleunigung 185

Erhaltungssätze 23

Erschütterungsschutz 227

ESD-Schutz, Electro Static
Discharge 141

Etalon 62

EU-Richtlinien zur Technik 19

Europäisches Sensorprojekt 233

European Construction Technology
Platform, ECTP 228

European Train Control System,
ETCS 4

Excimerlaser 175

F

Fabry-Perot Sensor 80

Fahrbahns scanner 230

Fahrdynamik 212

Fahren 212

Fahrscheinautomat 183

Fahrwerk 212

Fahrzeugtechnik 2, 211

Faraday's law of induction 71

Faseroptische Sensorik 78

Feder 24

Federbein 213

Federn 146

Feed-back 51

Fehlerfortpflanzungsgesetz 66

Feinmechanik 8, 184

Feinwerktechnik 2, 183

Feldeffekttransistoren 26

Feldplatten-Drehwinkelsensor 93

Feldplatten-Sensor 89

FEM, Finite Elemente Methode 50

Fernglas 196

Fernradar 223

Fertigungsstraße 4

Fertigungstechnik 12, 171

Festkörperreibung 155

Festplattenlaufwerk 3, 205

Feuchtesensorik 107

Finite-Elemente-Methode 210

FLASH-Speicher 27

Flow 14, 17

Flugzeugindustrie 4

Fluid-Führungselemente 146

Fluidik-Mikroaktoren 144

Fluidik-Regelsystem 57

Fluidmechanische Aktoren 128

Fluidmotor 130

Fluoreszenz 110

Flüssigkeits-Druckmessgeräte 102

Flüssigkeitsreibung 155

Fly-by-wire 4

Fokus-Servo, CD-Player 202

Fokussierung (CD-Player) 200

FOP-Optik, Flat Optical Pick-up, CD-
Player 204

Form (Bauteilmerkmal) 74

Formdiamanten 175

Formgebung 171

Formgedächtnis-Aktoren 131

Formschluss (Roboter greifer) 165

Form-Sensorik 74

Fotografische Abbildung 191

Fotokamera 191

Fourier-Transformation 36

Freiheitsgrad 23, 157

Frequenz 62

Frequenzgang 18, 37

Fügen 171

Führungen 146, 153

Führungsgröße 52
 Funkenerosion 175
 Funktion technischer Systeme 13
 Funktionalität 19
 Funktionsgrößen 40
 Funktionsmerkmale 41
 Funktionsmodellierung 50
 Funktionszusammenhang 41

G

Galvanomagnetische Sensoren 88
 Ganzheit 8
 Gaslaser 29
 Gauss effect 71
 Gebäude 227
 Gebäudetechnik-Instrumentierung 237
 Gebrauchsdauer 20
 Gelenkarm-Roboter 163
 Gelenke 12, 146
 Generator 12
 Geoelektrische Sensorik 234
 Geräte 9
 Geschwindigkeit 23
 Geschwindigkeits-Radar 224
 Geschwindigkeitssensorik 91
 Gestaltungsmethodik 39
 Gestaltungsregeln 47
 Getriebe 10, 12, 146
 Gewichtskraft 185
 Gier-Drehmoment-Sensor 217
 Gieren 157
 Giermoment 215
 Gleichgewichtsbedingungen 23
 Gleichstrommotoren 122
 Gleichstrommotor-Aktor 124
 GMR Giant Magneto Resistance 28, 206

GMR-Sensoren, Giant Magneto-Resistive 114
 Gravitation 185
 Greifer (Roboter) 166
 Grenzreibung 155
 Grenzwert-Beurteilung von Messwerten 66
 GUM, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement 65
 Gyroscopic effect 71

H

Halbleiter-Chip 13
 Halbleiterlaser 29
 Halbleiterspeicher 27
 Hall effect 71
 Hall-Beschleunigungssensor 95
 Hall-Rotations-Sensor 93
 Hall-Winkelsensor 89
 Handhabungssysteme 12, 161
 Handling-Systeme 161
 Hard Copy 118
 Harmonic Drive (Roboteraktuatorik) 165
 Hauptflüsse 43
 Hauptschlussmotor 122
 HDD, Hard Disc Drive 205
 Heißeleiter (Temperatur-Sensorik) 105
 Heißprägen 176
 Heizungsregelung 239
 Heizungstechnik 236
 He-Ne Laser 29
 Hertzscher Kontakt 155
 Herz-Kreislaufsystem 248
 Hexapode 157
 Hochachse 212
 Hohlraumstrahlung 20
 Hubbewegung 212

Hubmagnet-Aktor 124
HÜTTE Das Ingenieurwissen 1
Hydraulische Aktoren 129
Hydrodynamik 155
Hygrometer 108

I

Immissionen 20
Impact Echo Sensorik 230
Impuls 23
Impulsbilanz 23
Induktive Wegsensoren 86
Induktiver Drehzahlsensor 93
Induktiver Kraftsensor 98
Induktiver Kurzschlussring-
Wegsensor 87
Induktivität 26
Industrie-Roboter 162
Informatik 30
Information 13
Informationsbestimmte Systeme 11
Informationstechnik 13
Infrarot 28
Infrarotkamera 116
Inputs 9
Integraltransformation 36
Integrierte Schaltkreise 26
Intensiometrischer Sensor 79
Intercomparisons 69
Interferenzoptisches Wägeprinzip 188
Interferometrischer Sensor 79
International Organization of Legal
Metrology, OIML 190
Internet 11
Inverser piezoelektrischer Effekt 125
Ionisierende Strahlung 62
I-Regler 55

J

Java (Programmiersprache) 32
Joule's law 71
Justieren 64

K

Kalibrieren 65
Kalibrierung von Embedded
Sensors 113
Kamera 191
Kamm-Aktor 141
Kapazität 26
Kapazitive Weg-Sensoren 86
Kapazitiver Beschleunigungssensor 94
Kapazitiver Drucksensor 103
Kapazitiver Feuchtesensor 107
Kelvin 64
Kerr effect 71
Kilogramm 64
Kinematik 23, 146
Kinetik 23, 146
Kinetische Energie 23
Kirchhoffsche Regeln 17
Kleben 178
Klemmenpaare 14
Klimatechnik 237
Knoten 17
Knoten-Gleichung 17
Kolben/Zylinder 153
Kolbenmanometer 103
Kommutator 122
Komparatorprinzip 75
Kompatibilitätsgleichung 17
Kompetenzanforderungen an
Laboratorien 69
Komplexe Ebene 35
Komplexität 18

- Konformität 19
Konstitutive Gleichungen 21
Konstruktionselemente 146
Konstruktive Grundregeln 46
Kontinuitätsgleichung 17
Konturmessgerät 75
Koordinatenmessgerät 75
Körperfunktionen des Menschen 243
Korrekturmodul für Sensoren 72
Kraft 23
Kraftdefinition 96, 185
Kräftesatz 23
Kraftmessdose 98
Kraft-Normalmesseinrichtung 99
Kraftschluss (Robotergreifer) 165
Kraftsensorik 96
Kreisschaltung 37
Kugelumlaufspindel 156
Kupplungen 146
Kurvenlicht 226
Kybernetik 9
- L**
- Laborwaage 190
Lage (Bauteilmerkmal) 74
Lagerungen 146
Lands (CD-Speichertechnik) 198
Länge 62
Längenmesstechnik 74
Laplace-Transformation 36
Laser 29
Laser Triangulations-Sensor 76
Laserdrucker 118
Laser-Mikroablation 175
Laserstrahlfügen 177
Leistung 23
Leittechnik 47
Leitwerk (Computer) 31
Lenken 214
Lenkrad-Winkel-Sensor 217
Lenkwinkel (Fahrzeugtechnik) 212
Leuchtweitenregelung 225
Lichterzeugung 29
Lichtquanten 28
Lichtquantentheorie 30
Lichtschanke 13
Lichttechnik 225
LIGA-Technik 180
Lineargeschwindigkeits-Sensor 92
Linearmotoren 122
Linientopologie 134
Lithographie 179
Logarithmenrechnen 36
Logarithmisches Dekrement 25
Logistiksysteme 11
Longitudinaleffekt (Piezo) 125
Lorentz's law 71
Löten 178
Luftfeuchte 107
Luftlager 156
Lüftungsregelung 239
Lüftungstechnik 236
- M**
- Magnetbandtechnik 197
Magnetdomänen 206
Magnetflussbilanz 17
Magnetische Elemente 45
Magnetische Speichermedien 205
Magnetkopf 208
Magnetlager 156
Magnetoelastischer Kraftsensor 97

- Magnetoelektronik 27
- Magneto-resistive Mikrosensoren 114
- Magneto-resistiver Winkelsensor 88
- Magnetorheologische Fluide 139
- Magnetostruktive Keramiken 139
- Magnetpol-Drehzahlsensor 82
- Magnetresonanztomographie (Medizintechnik) 254
- Magnetspeicher (Audio-Video-Technik) 197
- Makrotechnik 5, 6
- Manipulatoren 161
- Martensit/Austenit-Umwandlung 131
- Maschinen 9
- Maschinenbau 8
- Maschinenelemente 145
- Maschinensprachen 32
- Maß (Bauteilmerkmal) 74
- Masse 23, 24, 62, 185
- Massekomparator 186
- Massenbilanz 23
- Maß-Sensorik 74
- Materie 12
- Mealy-Atomat 57
- Mechanik 8, 23
- Mechanische Elemente 45
- Mechanischer Energiefluss 13
- Mechanischer Modul 35
- Mechatronik, Definition 1
- Mechatronische Elementarmaschine 121
- Mechatronische Maschinenelemente 146
- Mechatronische Systeme 21
- Mechatronische Waage 187
- Mechatronischer Feder-Dämpfer-Modul 147
- Mechatronisches Magnetlager 156
- Medizinprodukte 243
- Medizintechnik 243
- Mehrgrößenregelung 56
- Memory (Speicherwerk) 31
- Mensch-System-Umwelt 46
- Messschaltungen für DMS 82
- Messfehler 1. Ordnung 75
- Messgerät 64
- Messkette 73
- Messprinzip 64
- Messschieber 75
- Messschraube 75
- Messstrategie 67
- Messtechnik 62
- Messuhr 75
- Messunsicherheit 65
- Messunsicherheitsbudget 65
- Messverfahren 64
- Messwerk 118
- Messwert 65
- Meter 64
- Meterkonvention 62
- Metrologie 62
- Michelson-Interferometer 90
- Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS 159
- Microcontroller 136
- Micro-Opto-Electrical-Mechanical Systems.MOEMS 159
- Mikroaktorik 140
- Mikrobiegebalken 182
- Mikrocomputer 136
- Mikroelektronik 5
- Mikrofluidik 5
- Mikro-Formtechniken 176
- Mikromagnetik 5
- Mikromechanik 5

- Mikromechanischer Beschleunigungs-
sensor 94
- Mikromembranen 182
- Mikrooptik 5
- Mikro-Positionierungstechnik 159
- Mikro-Produktionstechnologien 174
- Mikroprozessoren 136
- Mikropumpe 144
- Mikrorechner 31
- Mikroseismik 234
- Mikrosensorik 113
- Mikrosystemtechnik 5, 137, 184
- Mikrotechnik 5, 6, 8
- Mikro-Verbindungstechniken 177
- Mikrowellenverfahren (ZfP-
Technik) 228
- Mikro-Zerspanen 174
- Miniaturmotor 159
- Mischreibung 155
- MKS, Mehrkörpersystemsimulation 50
- Mnemonics (Softwaretechnik) 32
- Modellbildung 21
- Modellierungsgrundlagen 34
- Mol 64
- Monitoring technischer Anlagen 112
- Montagetechnik 171
- MOSFET, Metal Oxide Semiconductor
Field Effect Transistor 27
- Motoreingriff 222
- Motor-Einspritzsystem (Piezo) 127
- Motorklopfen 138
- Multifunktionswerkstoffe 139
- Multivariable Regelstrecke 56
- N**
- Nahbereichsradar 223
- Nano-Piezo-Aktor 160
- Nano-Positionierungstechnik 160
- Nano-Produktionstechnik 179
- Nanoskalige Positionierung 142
- Nanotechnik 5, 7, 8
- NC-Werkzeugmaschine, Computeri-
zed Numerical Control 173
- Nebenflüsse 43
- Nebenschlussmotor 122
- Neigungswaage 185
- Nernst effect 71
- Newton's law 71
- Newtonsche Axiome 23
- Nichtselbsttätige Waagen 190
- Nicken 157, 212
- Nocken/Ventile 153
- Normal 65
- Notebook 205
- NTC-Temperatursensoren 105
- O**
- Oberflächenermüdung 154
- Oberflächenmessgerät 75
- Oberflächenmikromechanik 182
- Oberflächenrauheit (Computer-
Festplatte) 209
- Off-line Programmierung
(Robotik) 168
- Offshore-Windenergieanlagen 241
- Ohm's law 71
- Ökonomisches Prinzip 20
- On-line Programmierung
(Robotik) 168
- Operationsverstärker 26, 55
- Optik 2, 8, 184
- Optische Abbildung 191
- Optische Datenspeicher 198
- Optische Elemente 45

Optische Informations- und Kommunikationstechnik 143
Optoelektronik 28
Optoelektronische Wegsensoren 90
Optoelektronisches Pyrometer 106
Originalbereich (Zeitbereich) 34
Ortskurve 18
Ortskurvendarstellung 37
Oszilloskop 118
Outputs 9

P

Parallaxe 75
Parallel-Kinematik 157
Parallelschaltung 17, 37
Peltier effect 71
Periode 35
Pflichtenheft 40
Phänomenologische Gleichungen 21
Photoconductive effect 71
Photodiode 29
Photoelectric effect 71
Photolithographie 179
Photometrie 62
Photonen 28
Photostriktive Keramiken 139
Photovoltaic effect 71
Physikalische Gasphasenabscheidung, PVD 178
Physikalische Sensorprinzipien 69
Pick-and-Place-Geräte 161
PID-Regler 56
Piezo-Biegewandler 140
Piezoelectric effect 71
Piezoelektrische Aktoren 125
Piezoelektrische Werkstoffe 139
Piezoelektrischer Kraftsensor 97
Piezoelektrischer Mikroantrieb 142
Piezo-Injektortechnik 127
Piezoresistive effect 72
Piezoresistiver Drucksensor 103
Piezoresistiver Kraftsensor 97
Pits (CD-Speichertechnik) 198
Pixel-Bildspeichertechnik 194
Plancksches Strahlungsgesetz 106
Planetengeräte 149
Play-back-Programmierung (Robotik) 168
Pneumatischer Stellmotor 130
Pneumatische Aktoren 129
Poisson effect 72
Polieren 176
Portalroboter 163
Positionierungstechnik 157
Positionssensorik 84
Präzision von Messungen 67
Präzisionsdrehvorrichtung 175
Precision Engineering (Feinwerktechnik) 183
P-Regler 55
Pressmatritze CD 198
Probennahme 65
Produktionstechnik 171
Proficiency Testing 69
Programmiersprachen 32
Prototyping-Modell 32
Prozessgegenstand 12
Prozessor 31
Prüfen 65
PTC-Temperatursensoren 105
Punkt-zu-Punkt-Bewegungen 161
Pyrometersensoren 106
Pyrometrische Thermosensorik 116

Q

Qualität 19
 Qualitätsmanagement 68
 Quellen 15, 22
 Quer-Beschleunigung-Sensor 217

R

Radar, Radio Detecting and Ranging 223
 Radar-Regelung 59
 Radar-Steuerung 59
 Rad-Drehzahl-Sensor 92
 Radialpositionierung, CD-Player 201
 Radioaktivität 63
 Radiographische Verfahren (ZfP) 77
 Radschwenkachse 212
 Raman-Streuung 110
 Rampenfunktion 14
 Raoult's effect 72
 Rasterkraftmikroskop 100
 Rastertunnelmikroskop 7, 160
 Rauheit (Bauteilmerkmal) 74
 Reactio 23
 Recheneinheit (Computer) 205
 Rechenwerk (Computer) 31
 Recycling 20
 Referenzmaterial 68
 Referenzverfahren 68
 Regeldifferenz 52
 Regelfunktionen 54
 Regelkreis 52
 Regelstrecke 52
 Regelung 51
 Regelung, mathemat. Operationen 53
 Regler-Module 54
 Reibung 10, 155
 Reibungskupplung 148

Reifen/Straße-System 219
 Reihenschaltung 17, 37
 Reihenschlussmotor 122
 Reluktanzmotor 122
 Resistive Wegsensoren 85
 Resistiver Drucksensor 103
 Resistiver Feuchtesensor 107
 Resonanzfrequenz 35
 Resonanzkurve 25
 Richtigkeit von Messungen 67
 Ringtopologie 134
 Risiko 20
 Roboteraktoriik 165
 Roboter-Funktionsgenauigkeit 170
 Roboterkinematik 168
 Roboterzelle 170
 Robotik 157
 Rollreibung 156
 Rotation 23
 Rotationsmotoren 122
 Rotorblätter-Sensorik 241
 Rückführbarkeit (Metrologie) 64
 Rückkopplung 37, 51

S

Sampling (Probenahme) 65
 Scanner-Sensor-Module (ZfP Bau) 230
 Scansysteme Bauwesen 230
 SCARA-Roboter 164
 Schallschutz 227
 Schaltungsgänge (Getriebe) 149
 Schiefelage (Messfehler) 75
 Schlitten-Servo, CD-Player 203
 Schmitt-Trigger 90
 Schreib/Lesekopf (Computer-Laufwerk) 206
 Schreib/Lese-Speicher 32

- Schwarzer Körper 29
Schwarzer Strahler 106
Schwerkraft 185
Schwimmwinkel (Fahrtechnik) 215
Schwingsaiten-Kraftsensor 98
Schwingungen 24
Schwingungsanalysen 240
Schwingungstilger 242
Sechs-Achs-Roboter 164
Seebeck effect 72
Seismisches Sensorprinzip 94
Sekunde 64
Selbsttätige Waagen 190
Senken (Systemstruktur) 15, 22
Sensor-Aktor-Prozessorik 134
Sensor-Aktor-Signalverarbeitung 135
Sensor-Funktionsgleichungen 72
Sensorik 61
Sensor-Klassifikationsmerkmale 74
Sensor-Korrekturmodul 72
Sensorsignalausgabe 117
Sensor-Signalfunktionen 73
Sensotronic Brake Control, SBC 220
Seriell-Kinematik 157
Service-Roboter 161
Shannonsches Theorem 135
Shape memory effect 72
Sicherheit 19
Sicherheitsraum (Robotik) 169
Signalanalyse (Oszilloskop) 117
Signalaufbereitung 135
Signalflussdarstellung 35
Signal-Kommunikationsstrukturen 134
Signalüberragungsverhalten 14
Signalverarbeitung 137
SI-System 62
Skineffekt 76
Smart Sensor 72
Snell's law 72
Software Engineering 32
Softwaretechnik 32
Sonographie (Medizintechnik) 251
Spannungs-Dehnungs-Diagramm 23
Speicher (Systemstruktur) 15, 22
Speicherdichte, Computer 207
Speicherprogrammierbare Steuerungen 58
Speicherscheibe (Computer) 206
Speicherwerk (Computer) 31
Spektrometrischer Sensor 79
Spiegelreflexkamera 191
Spiralmodell (Softwaretechnik) 33
Spritzgussverfahren 176
Sprungantwort 14
Sprungfunktion 14
Spursicherung (CD-Player) 201
Sputtern 178
SRAM, Static Random Access Memories 27
SSI, Small Scale Integration 27
Stabilität (Systemeigenschaft) 18
Stabilität (Regelungstechnik) 52
Standicherheit 227, 240
Statik 25
Statistische Analyse von Messreihen 65
Stauklappen-Sensor 57
Stefan-Boltzmann law 72
Steifheit 35
Stellgröße 52
Sterntopologie 134
Steuerung 51
Steuerung von Aktoren 125

- Stoffbestimmte Systeme 11
Stoffeigenschaftsändern 171
Stoffmenge 62
Stoffschluss (Robotergreifer) 165
Störgrößen 10, 52
Stotterbremse 221
Strahlungsquellen 29
Stribeck-Kurve 155, 208
Strömungskupplung 148
Struktur technischer Systeme 15
Strukturdynamik 25
Strukturelemente 16, 40
Strukturintegrierte Sensorik 109
Struktur-Messgrößen 110
Substraktiv-Techniken (Produktionstechnik) 174
Sucherkamera 191
Summenpunkt (Regelungstechnik) 53
Synchronisierung (Getriebe) 149
Synchrotronstrahlung 29
Synchronmotor 123
Systematische Messabweichung 66
Systemaufbau 47
Systembegriff 9, 11
Systemeigenschaften 18
Systementwurf 49
Systemgrenze 9, 11
Systemmodule 16
Systemoptimierung 48
Systemstabilität 39
Systemstruktur 9, 11
Systemzusammenhang 46
Systole (Medizintechnik) 249
- T**
- Taktile Sensor 75
Tasten (Fahrzeugtechnik) 223
Taupunkt (Sensorik) 107
Teach-in-Verfahren (Robotik) 168
Technische Zeichnung 74
Technisches System, Definition 1
Temperatur-Feuchte-Diagramm 107
Temperaturkompatibilität 17
Temperaturregelung 53
Temperatursensorik 105
Temperatursteuerung 53
Testfunktionen 14
Textuelle Programmierung (Robotik) 168
Thermische Behaglichkeit 239
Thermische Bilderfassung 116
Thermische Elemente 45
Thermischer Energiefluss 13
Thermistoren 105
Thermobimetall-Aktoren 131
Thermoelemente 105
Thermografie 229
Thermomechanische Aktoren 130
Thermometrie 62
Thyristoren 26
Time-of-flight-Dehnungs-Sensor 80
Time-Domain-Reflektometrie 229
Tintenstrahldrucker 118, 127, 132
Tomographie (Medizintechnik) 253
Totalreflexion 79
Traceability (Metrologie) 64
Tracking-Servo (CD-Player) 203
Tragfähigkeitsbewertung 240
Trägheit 35
Trägheitsmaß 35
Tragvermögen (Roboter) 169
Transformator 10
Transistoren 26
Translation 23

Transversaleffekt (Piezo) 125
Trennen (Fertigungstechnik) 171
Triangulations-Sensor 76
Tribologie 152
Tribologischer Kontakt 155
Tribologisches System 152
Tribophysik Reifen/Straße 219
Triboreaktionen 154
Tunnelscanner (Bauwesen) 230
Turbinenschaufel-Vermessung 77

U

Übergangsfunktion 18
Übersteuern 215
Übertrager 15, 22
Übertragungsfunktion 37
Ultraschalldiagnostik (Medizintechnik) 252
Ultraschall-Distanzsensor (Fahrzeugtechnik) 224
Ultraschall-Sensorik (ZfP) 76
Ultraviolett 28
Umformen 17
Umlauf-Gleichung 17
Umwelteinflüsse (Bauten) 227
Umweltverträglichkeit 20
Untersteuern 215
Urformen 171

V

Verbindungsprogrammierbare Steuerungen 58
Verbundmotor 122
Verfahrenstechnik 12
Verknüpfungsgleichungen 21
Verknüpfungssteuerungen 58
Verschleiß 10

Verschleißmechanismen 154
Versorgungstechnik 236
Verzweigungspunkt (Regelungstechnik) 53
Vierpoldarstellung 14
Visco-Kupplung 148
VLSI, Very Large Scale Integration 27
V-Modell (Entwicklungsmethodik Mechatronik) 48
Volumenmikromechanik 182
Volumenstrombilanz 17
Von-Neumann-Rechnerarchitektur 30

W

Waage 185
Wägetechnik 185
Wägewert 185
Wälzreibung 156
Wanderfeldmotoren 122
Wandler 15, 22
Wanken 157
Wärmelehre 8
Wärmeschutz 227
Wärmestrombilanz 17
Wärmetechnik 8
Wartburg: Sensorik 236
Wasserdampfdruck 107
Wasserfall-Modell (Softwaretechnik) 32
Wechselstrommotoren 122
Wechselwirkungen 9, 11
Weg 23
Wegsensorik 84
Wellen 8
Welligkeit (Bauteilmerkmal) 74
Werkzeugmaschinen 172
Widerstand (Elektronik) 26

Widerstandssensoren 85
Widerstandsthermometer 105
Windenergieanlage 241
Winkelsensorik 84
Wirbelstrom-Positionssensor 87
Wirbelstrom-Verfahren 76
Wirkprinzipien 43
Wirkzusammenhang 43
Wirtschaftlichkeit 20

Z

Zahnradgetriebe 149
Zeit 63
Zeitbereich 34
Zeitdiskrete Regelung 54
Zerstörungsfreie Prüfung, ZfP 76
ZfP im Bauwesen 228
Zielscheibenmodell von Messungen 68
Zufällige Messabweichung 66
Zusammenschalten von Modulen 37
Zustandsraum 38
Zuverlässigkeit 20