

Stefan Hesse | Gerhard Schnell

Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation

Sensorschaltungen

von P. Baumann

Elektroniksimulation mit PSPICE

von B. Beetz

Vieweg Handbuch Elektrotechnik

herausgegeben von W. Böge und W. Pläßmann

Formeln und Tabellen Elektrotechnik

herausgegeben von W. Böge und W. Pläßmann

Elemente der angewandten Elektronik

von E. Böhmer, D. Ehrhardt und W. Oberschelp

**Elemente der angewandten Elektronik –
Repetitorium und Prüfungstrainer**

von E. Böhmer

Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik

herausgegeben von G. Schnell und B. Wiedemann

Optische Netzwerke

von R. Thiele

Digitale Schnittstellen und Bussysteme

von F. Wittgruber

Elektronik

von D. Zastrow

Stefan Hesse | Gerhard Schnell

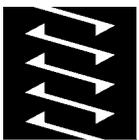
Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation

Funktion – Ausführung – Anwendung

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 482 Abbildungen

PRAXIS



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 1991
- 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 1993
- 3., vollständig überarbeitete Auflage 2004
- 4., aktualisierte und erweiterte Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Reinhard Dapper | Andrea Broßler

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe 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 978-3-8348-0471-6

Vorwort

Die Automatisierung von Produktions-, Logistik- und Fabrikprozessen hat sich heute zu einem bedeutenden wirtschaftlichen Erfolgsfaktor entwickelt. Automation ist jedoch ohne Sensorik nicht erreichbar. Nur was man vorher gemessen hat, kann anschließend zielgerichtet gesteuert werden. Sensoren sind aber nicht nur wichtige Funktionselemente in flexiblen Automaten, sondern werden auch als moderne Mess- oder Überwachungsgeräte genutzt. Es sind neuartige Sensorstrukturen entstanden, moderne Herstellungstechnologien hinzugekommen und leistungsfähige Signalverarbeitungssysteme verfügbar. Die Technik der Sensoren und ihre Applikationen sind greifbarer technischer Fortschritt, der mit einem Höchstmaß an Innovation und auch an Wachstum verbunden ist. Die Anwendungen reichen von der Qualitätskontrolle bis zur Positionserfassung, von der Fahrzeugtechnik bis zur Prozessindustrie und von der Haustechnik bis zum Medizingerätebau. Die Anwendungsbreite ist wohl kaum noch überblickbar. Um alles richtig zu verstehen und Sensoren fachgerecht zu beurteilen, ist ein solides Basiswissen unabdingbar.

Das Buch behandelt in knapper, anwendungsnaher Form die Grundlagen der Sensortechnik. Es wendet sich an Techniker, Ingenieure und Studierende, die in der Praxis tätig sind bzw. sich darauf vorbereiten und die sich mit den technischen Sinnesorganen beschäftigen müssen. Das Buch ist deshalb nicht nach Sensorwirkprinzipien gegliedert, sondern nach den messtechnischen Aufgabenstellungen, wie beispielsweise die Erfassung fluidischer Größen oder die Positionserfassung. Damit soll dem Leser eine Orientierungshilfe für die Lösung von Problemen und Aufgaben gegeben werden, wie sie in der Prozess- und Fabrikautomation vorkommen. Ein Mini-Lexikon und die Auswahl von Internet-Adressen am Schluss des Buches dienen dem schnellen Nachschlagen und der Vertiefung bis hin zum Auffinden potentieller Lieferanten. Damit soll auch eine Brücke zwischen Buchwissen und Praxis geschlagen werden.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Ing. *Gerhard Schnell*, der das Kapitel Sensorvernetzung und etliche Ergänzungen sowie Verbesserungen zu allen anderen Kapiteln beigesteuert hat. Die stets angenehme und hilfreiche Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. *Thomas Zipsner* vom Lehrstuhl Technik des Vieweg Verlages sei ebenfalls dankend vermerkt.

Plauen, Januar 2004

Stefan Hesse

Vorwort zur 4. Auflage

Die inhaltliche Neufassung des Buches in der 3. Auflage wurde in der Fachwelt sehr gut aufgenommen und hat damit die Basis für eine neue, etwas erweiterte Auflage geschaffen. Einige fachliche Ergänzungen wurden vorgenommen sowie Druck- und Sachfehler beseitigt. Das Glossar ist um einige Termini vervollständigt.

Plauen, August 2008

Stefan Hesse

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Sensoren – Sinnesorgane der Technik	1
1.1	Was sind Sensoren?	1
1.2	Einteilung und Begriffe	7
1.3	Aufgaben und nutzbare Effekte	13
1.4	Einsatz und Auswahl	17
2	Sensoren zur Positionserfassung	21
2.1	Elektromechanische und elektrische Positionserfassung	21
2.2	Pneumatische Positionserfassung	24
2.3	Induktive Positionserfassung	27
2.4	Kapazitive Positionserfassung	38
2.5	Magnetinduktive Positionserfassung	43
2.5.1	Hallsensor	43
2.5.2	Magnetschalter	47
2.5.3	Magnetisch steuerbare Widerstände	49
2.5.3.1	Feldplattensensor	50
2.5.3.2	Sättigungskernsonde	52
2.5.3.3	Magnetoresistive Metall-Dünnschicht-Sensoren	54
2.6	Positionserfassung mit Ultraschall	55
2.7	Optoelektronische Positionserfassung	62
2.7.1	Allgemeine Grundlagen	62
2.7.2	Einweg-Lichtschranke	69
2.7.3	Reflexlichtschranke	75
2.7.4	Reflexlichttaster	78
2.7.5	Lichtgitter	84
2.7.6	Faseroptische Sensoren	89
2.7.7	Positionsempfindliche Fotoelemente	93
2.7.8	Unterscheidung farbiger Objekte	95
2.7.9	Lasersensoren	98
2.8	Positionserfassung mit Mikrowellen	107
2.9	Positionserfassung mit Kernstrahlung	108
2.10	Füll- und Grenzstandsmessung	110
2.10.1	Allgemeine Grundlagen	111
2.10.2	Optische Füllhöhenbestimmung	112
2.10.3	Füllhöhenbestimmung mit Schwimmern	114
2.10.4	Elektromechanische Füllhöhenbestimmung	116
2.10.5	Druckabhängige Füllhöhenbestimmung	118
2.10.6	Konduktive Füllhöhenbestimmung	121

2.10.7	Kapazitive Füllhöhenbestimmung	122
2.10.8	Absorptionsabhängige Füllhöhenbestimmung	124
2.10.9	Reflexionsabhängige Füllhöhenbestimmung	125
2.10.10	Kalorimetrische Füllstandserfassung	130
2.11	Sensoren zur Bahnführung von Schweißrobotern	131
2.12	Sensoren für Autonome Mobile Roboter	136
3	Sensoren zur Erfassung mechanischer Größen	143
3.1	Messung von Kräften	143
3.2	Messung von Drehmomenten	160
3.3	Messung von Beschleunigungen	166
3.4	Bestimmung von Massen	170
3.5	Geschwindigkeitsmessung	175
3.6	Erkennen von Bewegungen	182
4	Sensoren zur Erfassung fluidischer Größen	184
4.1	Druckmessung	184
4.1.1	Allgemeine Grundlagen	185
4.1.2	Magnetoelastische Messung	188
4.1.3	Kapazitive Messung	190
4.1.4	Piezoelektrische Messung	193
4.1.5	Piezoresistive Messung	196
4.1.6	Galvanomagnetische Messung	199
4.1.7	Druckmessung mit akustischen Oberflächenwellen	200
4.2	Durchflussmessung	201
4.2.1	Volumetrische Messung	204
4.2.1.1	Verdrängungsverfahren	204
4.2.1.2	Volumenzähler mit Messflügel	204
4.2.1.3	Schwebekörper-Durchflussmesser	206
4.2.2	Wirkdruckverfahren	207
4.2.3	Magnetisch-induktive Durchflussmessung	208
4.2.4	Coriolis-Durchflussmessung	210
4.2.5	Durchflussmessung mit Ultraschall	212
4.2.6	Kalorimetrische Durchflussmessung	215
4.2.7	Wirbelfrequenz-Durchflussmessung	220
4.3	Feuchtemessung	222
4.3.1	Allgemeine Grundlagen	222
4.3.2	Feuchtesensoren	225
4.3.2.1	Taupunkthygrometer	225
4.3.2.2	Faserhygrometer	227
4.3.2.3	Kapazitive Feuchtesensoren	227
4.3.2.4	Feuchtesensoren in SAW-Technologie	229
4.3.2.5	Mikrowellen-Feuchtesensor	230
4.3.2.6	Elektrolysehygrometer	231
4.3.2.7	Aspirationshygrometer (Psychrometer)	231

5	Sensoren zur Erfassung der Temperatur	233
5.1	Allgemeine Grundlagen.....	233
5.2	Kontaktthermometrische Sensoren.....	235
5.2.1	Thermoresistive Temperaturmessung	235
5.2.2	Thermoelektrische Temperaturmessung.....	243
5.3	Strahlungsthermometrie	249
6	Sensoren zur Erfassung von Wegen und Winkeln	260
6.1	Allgemeine Grundlagen.....	260
6.2	Analoge Messverfahren.....	263
6.2.1	Tauchanker und Differentialtransformator	263
6.2.2	Potenzimeter	265
6.2.3	Kapazitive Weg- und Winkelmessung.....	266
6.2.4	Induktive Weg- und Winkelmessung.....	269
6.2.5	Magnetische Wegmessung	271
6.2.6	Resolver	272
6.2.7	Inductosyn	273
6.3	Digitale Messverfahren	275
6.3.1	Optisch-inkrementale Weg- und Winkelmesssysteme.....	275
6.3.2	Codelineale und Codescheiben.....	279
6.3.3	Magnetische Längenmesssysteme	283
6.3.4	Längenmessung mit Interferometer	284
6.3.5	Interferenzielle Längenmessung	285
6.4	Distanzmessung mit Triangulation.....	286
6.5	Distanzbestimmung mit Laufzeitmessung.....	290
6.6	Distanzbestimmung mit Phasenmessung.....	293
6.7	Magnetostriktive Wegmessung	297
6.8	Neigungsmessung	299
7	Abbildung und Erkennung von Objekten.....	303
7.1	Allgemeine Grundlagen.....	303
7.2	Optisch-visuelle Bildaufnahme	308
7.2.1	Höhenprofilschnitt	308
7.2.2	Objekterkennung mit CCD-Zeile.....	308
7.2.3	Objekterkennung mit Lichtschnittverfahren	309
7.2.4	Objekterkennung mit CCD-Matrix	311
7.2.5	Objekterkennung durch Schattenbilddauswertung	320
7.2.6	Bilderfassung mit stereoskopischem Prinzip	327
7.2.7	Beleuchtungstechnik.....	329
7.3	Nichtoptische Abtastsysteme.....	331
7.4	Erfassung codierter und nichtcodierter Informationen	334
7.4.1	Elektromechanische Erfassung.....	334
7.4.2	Optische Erfassung.....	337
7.4.3	Elektronische und elektromagnetische Erfassung.....	343

8	Erfassung chemischer und biologischer Stoffgrößen	346
8.1	Messung von Gaskonzentrationen allgemein	346
8.2	Sauerstoffmessung	352
8.3	Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit.....	354
8.4	Messung des pH-Wertes.....	356
8.5	Gasanalyse durch Wärmeleitfähigkeitsmessung	358
8.6	Erfassung biologischer Substanzen	360
8.7	Explosionsschutz bei Sensoren.....	362
9	Sensorvernetzung	364
9.1	Allgemeine Grundlagen.....	364
9.1.1	Netzwerktopologien.....	364
9.1.2	Buszugriffsverfahren	365
9.1.3	Telegramme	366
9.2	Bussysteme zur Sensorvernetzung	367
9.2.1	Aktuator/Sensor-Interface (AS-I)	367
9.2.2	Profibus	369
9.2.3	Interbus	371
9.2.4	HART-Protokoll	372
9.2.5	CAN-Bus	373
9.3	Ausblick.....	374
10	Fachbegriffe	377
	Internet Index	399
	Literatur und Quelle.....	405
	Sachwortverzeichnis.....	409

1 Sensoren – Sinnesorgane der Technik

1.1 Was sind Sensoren?

Ein Lebewesen ist nur existenzfähig, wenn es auf Umwelteinflüsse reagieren kann. Selbst Einzeller haben diese Fähigkeit entwickelt. Um spezifische Reize aus der Umgebung oder aus dem Körperinnern aufzunehmen, existieren biologische Strukturen, die als Rezeptor bezeichnet werden. Man unterscheidet zwei Arten:

- Exterorezeptoren
Sie dienen zur Orientierung im Raum und nehmen Reize aus der Umwelt auf.
- Interorezeptoren
Mit ihnen werden Reize aus dem Innern eines Organismus aufgenommen.

Die Sinnesphysiologie lehrt, dass jede Wahrnehmung über ein Sinnesorgan aus zwei Teilprozessen besteht. Der äußere Reiz wird vom Rezeptor in eine Nervenendigung umgesetzt. Der betroffene Nerv leitet das erzeugte elektrische Signal zum Zentralnervensystem (Gehirn) weiter. Dort erst entsteht ein Sinneseindruck (Wahrnehmung, Empfindung). Der Mensch besitzt etwa 10^9 bis 10^{11} Rezeptoren (*receptors*).

Inzwischen ist die Technik in ihrer Entwicklung derart fortgeschritten, dass sie ebenfalls Rezeptoren hervorbringen kann. Sie sind künstlich hergestellt und werden als Sensoren bezeichnet. Eingebaut in Maschinen, Vorrichtungen medizinischen Geräten, Anlagen, Fahrzeugen, Kaffeemaschinen und vielen anderen Erzeugnissen verleihen sie diesen die Fähigkeit, eigenständig auf bestimmte Zustände zu reagieren und diese zu kontrollieren. Sensoren übertragen das Wahrnehmungsvermögen des Menschen auf Maschinen. Dabei können den fünf Sinnen des Menschen entsprechende Sensortypen gegenübergestellt werden:

Mensch	Sinn	Organ	Sensorik	Erfassung von
Hören	Gehör	Ohr	Mikrofon	Schall
Sehen	Licht	Auge	Fotozelle Kamera	Licht, Konturen Szenen
Fühlen	Temperatur Schwere Kraft Tastsinn	Haut Muskel Nerven	Thermometer Waage Dehnmessstreifen Fühler, Schalter	Wärme Masse Kraft, Drehmoment Form, Lage
Riechen Schmecken	Geruch Geschmack	Nase Zunge/Gaumen	Rauchmelder Künstliche Zunge	Rauch, Gasen Inhaltsstoffen

Hinzu kommen noch weitere chemische, physikalische oder auch biologische Messgrößen, die den menschlichen Sinnen nicht zugänglich, aber mit Sensoren erfassbar sind.

In den letzten Jahren hat sich der Einsatz von Sensoren überdurchschnittlich gut entwickelt. In Zukunft darf man erwarten, dass fast alles von der Maschine bis zum Gebrauchsgegenstand mehr oder weniger sensorisiert sein wird. Große Bedeutung wird dabei den Mikrosystemen

zukommen. Sensor und Signalverarbeitung werden miteinander verschmelzen. Der Übergang zur sensorgestützten Maschinerie bedarf intensiver Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten und Verfahren der Sensorik (*sensorics, sensor technology*). Dazu soll das Buch beitragen.

Was wird unter einem Sensor verstanden?

- Der Sensor ist ein technisches Bauteil, das aus einem Prozess zeitvariable physikalische oder auch elektrochemische Größen erfasst und in ein eindeutiges elektrisches Signal umsetzt.
- Diejenige Baueinheit, die aus einem (mechanischen) Umsetzelement und einem elektrischen Sensorelement besteht, heißt Elementarsensor oder Messwertaufnehmer (**Bild 1-1**).

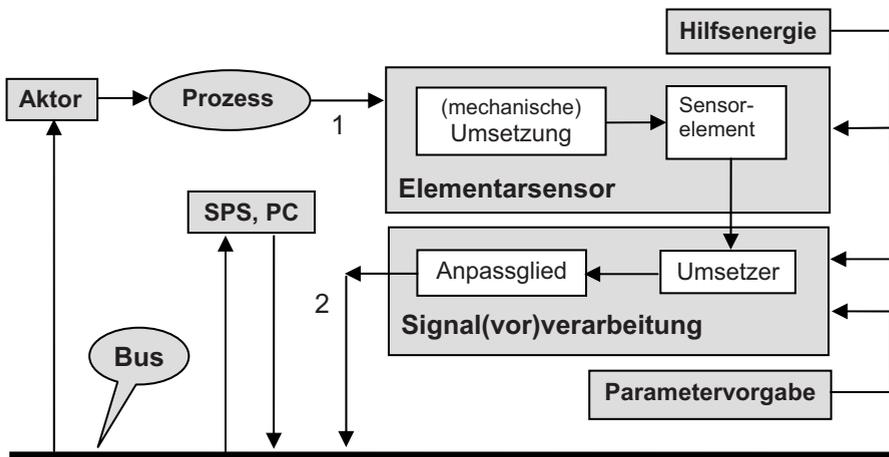


Bild 1-1 Prinzipanordnung eines Sensors

1 Eingangssignal, 2 Ausgangssignal

Der Begriff „Sensor“ kommt vom lateinischen *sensus* für Gefühl bzw. Empfindung (*sensualis* = die Sinne betreffend) und fand erst in den 1970er-Jahren Eingang in die Fachliteratur. Vorher sprach man von Aufnehmern, Wandlern, Gebern, Meldern, Messfühlern, Initiatoren, Transducern und Transmittern. In der DIN/VDE-Richtlinie 2600 wird der Begriff „Sensor“ als englische Übersetzung für Fühler angegeben. Die Genauigkeit bzw. Ungenauigkeit eines Sensors wird durch die Eigenschaften Linearität, Hysterese und Drift (*Offset*) beschrieben.

Wird der Messfühler (Elementarsensor) mit Hilfsenergie versorgt, dann handelt es sich um einen passiven Sensor. Das sind Impedanzen, die durch die physikalische Messgröße verändert werden (**Bild 1-2**). Es sind hohe Genauigkeiten erreichbar.

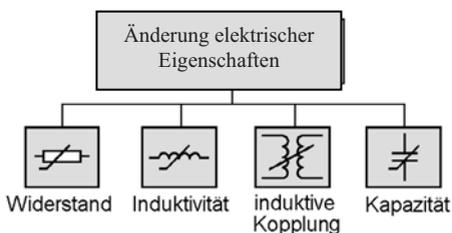


Bild 1-2 Beispiele für passive Sensoreffekte

Aktive Messfühler sind Energiewandler (Spannungserzeuger). Sie wandeln eine zu messende nichtelektrische physikalische Größe oder chemische Veränderungen direkt in ein elektrisches Signal um. Dazu gehören z. B. Thermo- und Fotoelemente sowie piezoelektrische Fühler. Letztere wiederum können z. B. nur für dynamische Kräfte verwendet werden, nicht aber für statisch anfallende Messgrößen. Ziel der Messtechnik ist es, bei aktiven Sensoren die nichtelektrische Energie direkt, also ohne Zwischenschalten weiterer Energieformen, in elektrische Energie umzusetzen. Bei passiven Sensoren versucht man, die Zahl der Messglieder so klein wie möglich zu halten. Aktive Messfühler erreichen oft nur eine geringe Genauigkeit, vor allem bezüglich der Langzeitstabilität. Daraus resultiert, dass man oft eine häufigere Kalibrierung hinnehmen muss.

In der Robotertechnik, vor allem bei autonomen mobilen Robotern die sich in einer Outdoorumgebung frei bewegen können, ist eine Einteilung der Sensoren in interne und externe Sensoren aktuell. Das **Bild 1-3** zeigt eine Übersicht.

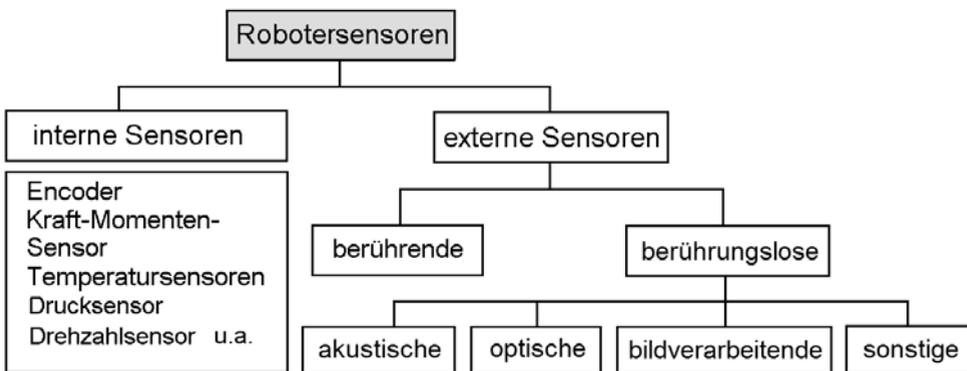


Bild 1-3 Gliederung der Sensoren für autonome mobile Roboter

Externe Sensoren (*external sensors*) dienen zum Aufnehmen von Messsignalen aus der Umwelt. Das sind beispielsweise Sensoren für Licht, Wärme, Schall (Mikrofon), Kollision mit Hindernissen, physikalischen Größen im technischen Prozess, Entfernungen, Objektkonturen und Umweltbilder (Kamera). Der Umfang an externen Sensoren hängt von Art und Komplexität der vorgesehenen Einsatzumgebung ab. Bei bewegten Systemen spielen auch Zeitanforderungen eine Rolle.

Interne Sensoren (*internal sensors*) erfassen die inneren Zustände eines Roboters, wie z. B. Position und Orientierung des Roboterarms und von Endeffektoren, Geschwindigkeiten mit der sich Gelenke bewegen, Innentemperatur, Batteriestand bei autonomen mobilen Robotern, Motorstrom, Kräfte und Momente. Beispiele sind u. a. auch Gyroskope, Radencodier, Neigungs- und Beschleunigungssensoren. Für interne Sensoren gilt allgemein, dass ihre Messsignale eindeutig interpretiert werden können, da der Zusammenhang zwischen Messgröße und Messsignal durch die Konstruktion festgelegt und somit eindeutig bekannt ist.

Insgesamt hat die Sensorisierung von mobilen autonomen Robotern die Aufgabe, eine gewisse Autonomie zu erreichen. Ein technisches System ist autonom, wenn es bei der Ausführung eines gegebenen Auftrags selbstständig Entscheidungen treffen kann, die zum Erreichen des Zieles notwendig sind. Sensorik, Software und Selbstorganisation können dazu beitragen.

Ein Sensorsystem besteht aus Sensor und Messobjekt, zwischen denen zum Zeitpunkt der Messung eine Wirkungsübertragung stattfindet. Außerdem gibt es Wirkungsverbindungen mit der Umwelt. Ein Sensorsystem ist nichts Statisches, sondern verändert mehr oder weniger seinen Zustand. Das kann durch eine Verhaltensfunktion Γ allgemein beschrieben werden, die die Zusammenhänge zwischen den im System auftretenden Variablen widerspiegelt. Das System wird insgesamt charakterisiert durch die Umgebung, die Verhaltensfunktion Γ und die Struktur.

$$\Gamma = \Gamma(u_i, x_i, q, dq / dt, E, t) \quad (1.1)$$

u_i	Eingangsvariable	q	Zustand des Systems
E	Systemelemente	dq/dt	Zustandsänderung
x_i	Ausgangsvariable	t	Zeit

Für die Zukunft kristallisieren sich für die nächsten Sensorgenerationen folgende Tendenzen heraus:

- Größere Vorwärtsintegration; also mehr Intelligenz im Sensor und weniger Leistungsbedarf
- Miniaturisierung durch Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik (Kleinstgehäuse)
- Senkung der Kosten durch Massenfertigungsverfahren und modularen Sensoraufbau
- Entwicklung von Kommunikationsstandards für Sensorsysteme (Bussysteme, Kommunikation zwischen Feld- und Leitebene, Diagnoseabfragen, Fehlersuche)
- Wesentlich reduzierter Installations- und Verdrahtungsaufwand; einfache Einbindung von Sensoren und Aktoren in ein Busnetzwerk, drahtlose Signalübertragung (Sensornetze)
- Bessere Kombinationsmöglichkeiten von Geräten unterschiedlicher Hersteller
- Robustere Messverfahren, die weitgehend störungssicher sind

Sensoren werden zunehmend auch mit weiteren Funktionen ausgestattet. Dazu gehören die Selbstüberwachung und die Selbstkalibrierung von Sensoren. Man braucht dazu spezielles Wissen über die Eigenschaften und vor allem über das Sensorverhalten sowie über die Vertrauensgrenzen der Sensorgrößen. Letztlich werden Regeln gebraucht, nach denen aus bestimmten Reaktionen ein definierter Eingriff selbsttätig abzulaufen hat. Außer den Regeln muss der Sensor natürlich auch hardwareseitig für den Selbsttest und die Einstelloperationen tauglich sein. Das Prinzip wird in **Bild 1-4** als Schema gezeigt.

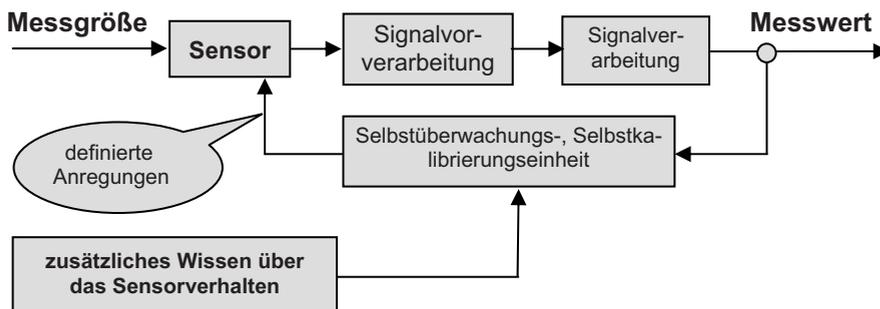
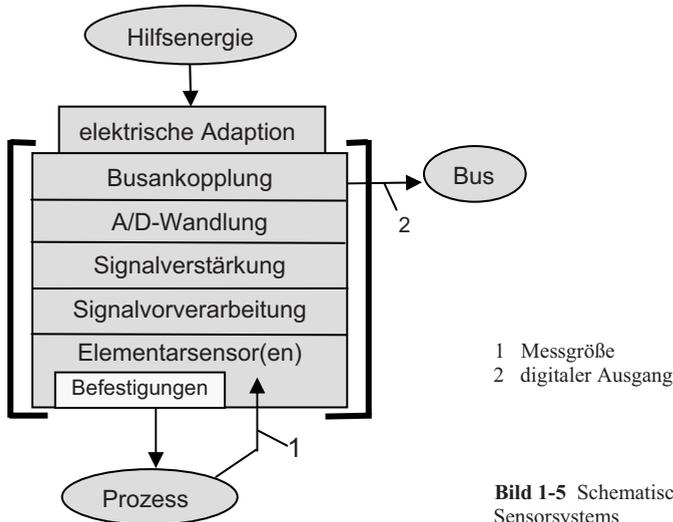


Bild 1-4 Selbstüberwachung und Selbstkalibrierung von Sensoren

In jüngster Zeit ist man bemüht, die Fortschritte in der Mikrosystemtechnik auszunutzen, um Sensorsysteme aus modularen Komponenten anforderungsgerecht zusammenzubauen. Wie aus dem **Bild 1-5** ersichtlich ist, denkt man an eine „Turmbauweise“, bei der die jeweils erforderlichen Module vertikal zu einem Stapel verbunden werden. Voraussetzung ist die Definition von elektrisch und geometrisch standardisierten Schnittstellen. Die Komponenten können dann in großer Stückzahl hergestellt werden und gehen in spezifisch zusammengestellte Sensoren ein, so wie sie aktuell in kleinen Stückzahlen vom Markt verlangt werden.



Für den Übergang von Messaussagen von der nichtelektronischen Welt in elektrisch bzw. elektronisch auswertbare Größen werden überwiegend die in **Bild 1-6** angegebenen technisch-physikalischen Zusammenhänge ausgenutzt [1-1].

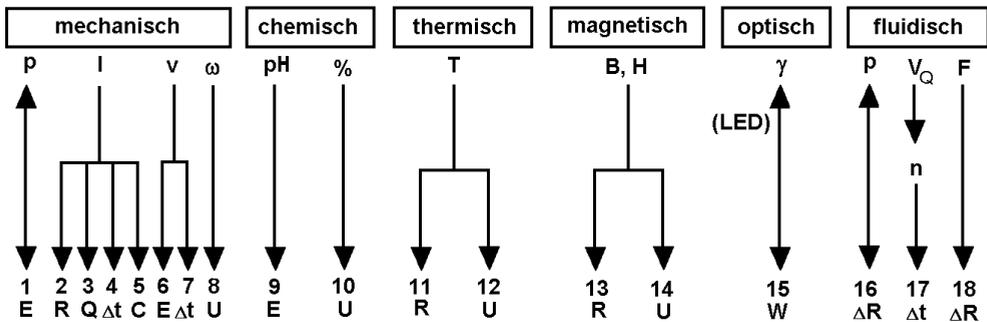


Bild 1-6 Eigenschaften von Objekten werden vom Sensor in elektrische Größen verwandelt

p Druck, *l* Weg, Abstand, *pH* Ionenkonzentration, *n* Drehzahl, Δt Zeitintervall, *v* Geschwindigkeit, *C* Kapazität, *B* Flussdichte, *E* elektrische Feldstärke, *F* Feuchte, *H* magnetische Feldstärke, *Q* Schwingkreisgüte, *R* Widerstand, *T* Temperatur, *U* Spannung, V_Q Volumendurchsatz, *W* elektrische Energie, ΔR Widerstandsänderung, % Gaskonzentration in Volumenprozent, ω Winkelgeschwindigkeit, Drehzahl, γ Lichtquant

Wie die Wandlung vor sich gehen kann, d.h. welche physikalischen Verknüpfungen beispielsweise verwendbar sind, wird in der Tabelle (**Bild 1-7**) erklärt. Die Zahlen 1 bis 18 sind als Zeilennummerierung angegeben. Dort findet man in der ersten Spalte die Gleichung, welche die nichtelektrische Größe mit der elektrischen verknüpft. Diese Tabelle enthält Beispiele und ist somit nicht vollständig. Sie zeigt aber, auf welche vielfältige Weise physikalische und elektrotechnische Effekte für die Sensoren zur Anwendung kommen. In den einzelnen Kapiteln wird auf diese Grundlagen noch ausführlicher eingegangen.

Nr.	Gleichung	Konstante	Erläuterung
1	$\Delta Q = K \cdot p$	$K = 2,3 \cdot 10^{-12}$ As/N (Quarz)	piezoelektrischer Effekt
2	$\Delta L/L = (k \cdot \Delta R)/R$	$k = 2$ (typisch), Konstantan	Dehnungsmessstreifen
3	$R_V \sim 1/L, Q \sim 1/R_V$		R_p durch Wirbelströme
4	$\Delta L = \Delta t \cdot v$		Weg-Zeit-Messung
5	$C = (\varepsilon A)/L, \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$	$\varepsilon_0 = 8,66 \cdot 10^{-12}$ As/Vm	Kapazitätsmessung
6	$E = v \times B$	B magnetische Flussdichte	Lorentz-Feldstärke
7	$v = \Delta L/\Delta t$		Weg-Zeit-Messung
8	$\omega = U/(A \cdot B)$	A Leiterschleifenfläche B magnetische Flussdichte	Induktionsgesetz
9	$U = K \cdot (pH_v - pH_m)$	$K = 58,2$ mV (20°C) m Messstelle, v Vergleichsstelle	modifizierte Nernst'sche Gleichung
10	$U = [(R \cdot T)/(n \cdot F)] \cdot \ln(P_1/P_2)$	P entspricht Volumen in Prozent $R = 8,32$ Ws/Grad $F = 9,65 \cdot 10^4$ As/Grammatom	Nernst'sche Gleichung
11	$R(T) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$	$\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$ /K (typisch), Platin	Metalle
	$R(T) \approx R_0 \cdot \exp[B \cdot (T^{-1} - T_0^{-1})]$	$B = 4200$ K (typisch), Mischoxid-Keramik	Heissleiter, NTC
	$R(T) \approx R_0 \cdot \exp[\alpha \cdot (T - T_0)]$	$\alpha = 16$ %/K (typisch), dotierte Bariumtitan-Keramik	Kaltleiter, PTC
12	$U = a \cdot (T_m - T_v)$	$a = 53$ μ V/Grad; Fe-Konstantan	Thermoelement
13	$R/R_0 \approx k \cdot B$	$k = 10/T$ (typisch)	magneto-resistiver Effekt
14	$U = (R_h \cdot I \cdot B)/d$	$R_h \approx 2 \cdot 10^{-4}$ m ³ /As (typisch), Halbleiter	Halleffekt
15	$f = W/h$	$H = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Ws ² $W = 1,92$ eV (GaAsP)	lichtelektrischer Effekt, Einstein-Gleichung
16	$\Delta R/R \sim \Delta L/L = \varepsilon$	ε Dehnung, L Leiterlänge $1\Omega = 1V/1A$	Dehnungsmessstreifen, laminare Strömung
17	$V_Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot A \cdot n$	r Turbinenradius A Strömungsquerschnitt n Drehzahl	Strömungsgesetze, laminare Strömung
18	$\Delta R = K \cdot F^{-n}$	K Materialkonstante F Feuchte n materialabhängiger Wert	LiCl Taupunkthygrometer, Gleichgewichtstemperatur

Bild 1-7 Verknüpfungsgleichungen (einige ausgewählte Beispiele)

1.2 Einteilung und Begriffe

Im Umfeld des Hauptbegriffes „Sensor“ gibt es viele weitere Termini. Geht die Informationsverarbeitung über einfache Vorstufen hinaus und sind alle elektrischen Funktionen in einem Halbleiterbaustein untergebracht, bezeichnet man das auch als „intelligenten“ Ein-Chip-Sensor. Auch die werbewirksame Bezeichnung *smart sensor* wird verwendet.

Weitere Begriffe sind:

Sensorelement, Elementarsensor, Messfühler

Bezeichnungen für das eigentliche Wandlerelement, welches über den physikalischen Effekt eine nichtelektrische Größe in eine elektrische Größe wandelt. Das geschieht mitunter auf dem Weg der Abbildung über eine Zwischengröße.

Sensorsystem

Bezeichnung für ein System, das aus mehreren Mess- und Auswertungskomponenten besteht und bei dem zum Zeitpunkt der Messung eine Wirkungsübertragung stattfindet, an der Sensor, Messobjekt und Umwelt beteiligt sind. Es verfügt über einen wesentlichen Anteil an Signalaufbereitungsfunktionen.

Multisensorsystem

Bezeichnung für ein System, das aus mehreren Einzelsensoren besteht, wobei diese gleichzeitig Messgrößen aufnehmen (**Bild 1-8**). Sie sind vorwiegend als Halbleitersensoren ausgeführt und deshalb sehr platzsparend [1-3].

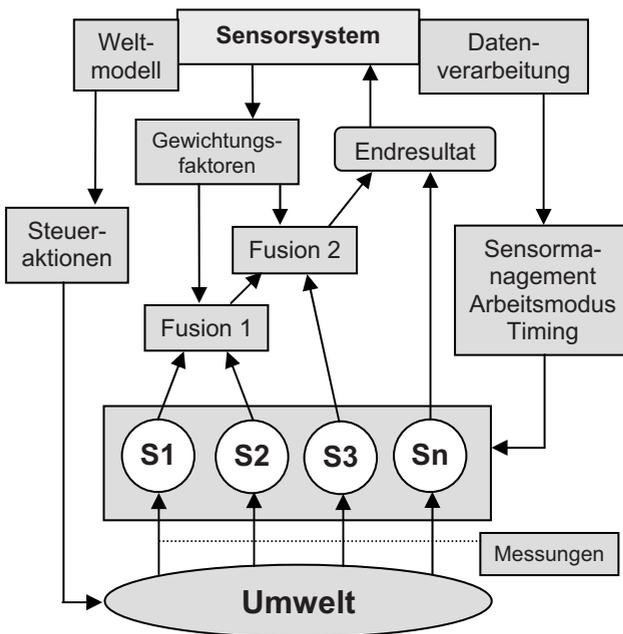


Bild 1-8 Prinzip der Datenintegration bei Multisensoren

Si Sensorelement

Multisensorielle Ansätze können auf drei Arten ausgelegt werden:

- Sensorkombination mit unterschiedlichen Messprinzipen, z. B. taktil, visuell, akustisch (heterogen)
- Sensorkombination mit demselben Messprinzip an verschiedenen Orten des Systems (homogen)
- Einzelsensor für die Erkennung mehrerer zueinander in Relation stehender Ereignisse, z. B. bewegter Objekte

Beim Einsatz von Multisensoren kann ein Ziel z. B. die Erhöhung der Zuverlässigkeit des Messwertes sein. Die Messwerte der Einzelsensoren werden zu einer Gesamtaussage verdichtet, wobei keine bloße Aufrechnung erfolgt, sondern eine gewichtete Auswertung. Möglicherweise muss ein Training an charakteristischen Umgebungen erfolgen, damit man zu den richtigen Gewichtungsfaktoren kommt.

Beispiel Gassensor: Es werden Temperatur-, Feuchte- und Druckschwankungen zusätzlich mit erfasst, um zu einer präzisen Aussage zu kommen (*multistate sensor*).

Eine andere Unterscheidung der Sensoren ist die in Binär-, Digital- und Analogsensoren.

Binärsensoren sind zweiwertige Schalter, die nur mit den beiden elektrischen Schaltsignalen EIN oder AUS arbeiten, wie z. B. Näherungssensoren, Druck- oder Temperaturschalter.

Analogsensoren liefern dagegen einen stetigen physikalischen Messwert, meistens als Spannung, z. B. 0...10 Volt, oder Strom, z. B. 0...20 mA bzw. 4...20 mA. Dazu gehören Sensoren für Wege, Winkel, Kräfte und z. B. für den Durchfluss. Durch Kalibrieren können Sensoren auch als Messwertgeber verwendet werden. Unter Kalibrieren versteht man nach DIN 1319 das Feststellen des Zusammenhangs zwischen Messgröße (wirklichem Wert) und Anzeige (Messwert).

Beispiel: Messgröße = 10,00; Anzeige = 10,86
Kalibrieren = Angleichen der Anzeige auf 10,00

In diesem Sinne werden die Sensoren auch nach dem Grad der Erfassungsfähigkeit eingeteilt in

- **Messende Sensoren**, die mit 2 bit und mehr arbeiten (Messen: Vergleichen mit einem Normal und Abzählen, wie oft die Normaleinheit in der zu messenden Größe enthalten ist.)
- **Erfassende Sensoren**, die mit nur einem einzigen bit auskommen. (Abzählen reduziert sich auf das Feststellen, ob die Messgröße den Vorgabewert über- bzw. unterschreitet.)

Beispiel Pneumatikzylinder:

In **Bild 1-9** werden Pneumatikzylinder gezeigt, bei denen die Kolbenstellung mit Sensoren abgefragt wird. Bei der Lösung nach **Bild 1-9a** trägt der Kolben einen Magnetring und über induktive Schalter werden nur die Endstellungen erfasst (siehe dazu auch Bild 2-1). Beim Aufbau nach **Bild 1-9b** ist die Kolbenstange dagegen mit Magnetelementen im Wechsel von Nord- und Südpolen besetzt, so dass eine Wegmessung über den gesamten Kolbenhub stattfinden kann. Es ist ein inkrementelles digitales System.

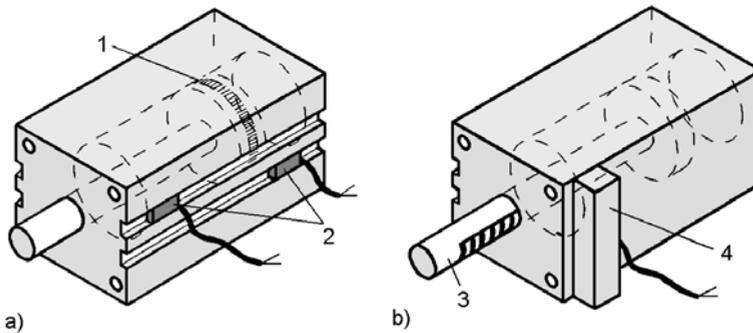


Bild 1-9 Pneumatikzylinder mit Sensoren

a) Endlagenerfassung mit induktiven Näherungssensoren, b) Wegmessung mit digital-magnetischer Kolbenstange.
 1 Magnetring, 2 induktiver Näherungssensor, 3 Kolbenstange mit Magnetelementen, 4 Impulsgeber

Jeder Erkennung von Objekteigenschaften mit Hilfe von Sensoren liegt das Prinzip zugrunde, dass Energie irgendeiner Form durch das Objekt verändert bzw. moduliert und die dadurch aufgeprägte Information vom Sensor analysiert wird. Man kann die Sensoren auch nach der Energieform in Arten einteilen:

Energieart	Sensortyp
mechanisch	taktil, akustisch, fluidisch
elektromagnetisch	elektrisch, magnetisch, induktiv, kapazitiv, dielektrisch, Lichtbogen
thermisch	Temperatur, Wärmebild
elektromagnetische Wellen (optisch)	geometrisch-optisch, bildgebend
elektromagnetische Wellen (radioaktiv)	Strahlungsabsorption, -streuung

Die jeweils wirkenden physikalischen Grundgesetze bestimmen dabei wesentliche Eigenschaften der Sensoren und auch ihre Anwendungsgrenzen.

Eine Einteilung der Sensoren ist nach vielen weiteren Gesichtspunkten möglich, so z. B. nach den Hauptanwendungsgebieten. Man kann unterscheiden in Sensoren für Chemie, Dynamik, Gase und Flüssigkeiten, Geometrie, Mechanik u. a. oder man teilt ein nach Wirkprinzipien, wie z. B. in Ultraschallsensoren, induktive und kapazitive Sensoren u. a. Für die Maschinen- bzw. Fabrikautomatisierung könnte man die Sensoren sehr detailliert auch in folgende Gruppen einteilen:

- | | | |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Beschleunigungsaufnehmer | DMS-Sensoren | Drehmomentsensoren |
| Drehschwingungssensoren | Dynamische Sensoren | Elektrische Sensoren allgemein |
| Wägezellen, Dosiersensoren | Halleffektsensoren | Impulssensoren |
| Induktiv-Tastsensoren | Kapazitiv-Tastsensoren | Lasersensoren |
| Magnetschalter-Sensoren | Mechanische Schalter | Mikrobiologische Sensoren |
| Schallsensoren | Schutz- und Prüfsensoren | Bildverarbeitungssysteme |
| Tachosensoren | Ultraschallsensoren | Schwingungsaufnehmer |
| Widerstandssensoren | Weg-, Winkelsensoren | Sensoren der Optoelektronik |

Sensoren müssen im übrigen als Konstruktionsteile verstanden werden und so gestaltet sein, dass sie in ein Ensemble anderer Bauteile und Baugruppen eingehen können. Deshalb muss ihre Ausfallwahrscheinlichkeit klein sein. Wichtige Eigenschaften sind auch Störgrößempfindlichkeit (Querempfindlichkeiten) und Selbstjustierungsfähigkeit. Abhängig von der Aufgabenstellung spielen die folgenden messtechnischen Begriffe bei der Beurteilung und bei der Auswahl eine mehr oder weniger große Rolle:

Auflösung (*resolution*)

Sie gibt die kleinstmögliche Veränderung am Objekt an, die noch eine messbare Änderung am Ausgangssignal bewirkt.

Linearität (*linearity*)

Das ist ein Maß für die Abweichung der Kennlinie des Ausgangssignals von einer Geraden.

Ansprechzeit (*response time*)

Darunter versteht man jene Zeit, die der Signalausgang braucht, um den maximalen Signalpegel zu erreichen.

Wiederholgenauigkeit (*repetition accuracy*)

Das ist die Differenz von Messwerten aufeinanderfolgender Messungen innerhalb einer bestimmten Zeit und Umgebungstemperatur.

In **Bild 1-10** werden diese Begriffe am Beispiel von Sensoren zur Distanz- und Positionsmesung nochmals grafisch erklärt.

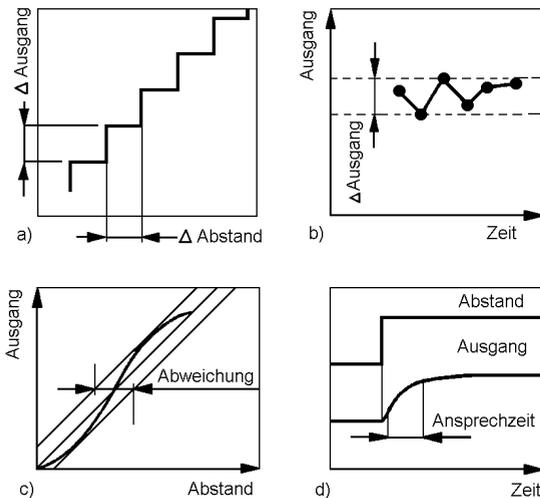


Bild 1-10 Wichtige messtechnische Begriffe am Beispiel von Abstandssensoren

- a) Auflösung
- b) Wiederholgenauigkeit
- c) Linearität
- d) Ansprechzeit

Einige weitere Begriffe aus der Messtechnik werden im Kapitel 10 (Fachbegriffe) aufgeführt.

Wichtig ist in jedem Fall, dass der Wert der Messgröße innerhalb des Messbereiches (*measuring range*) eines Sensors bzw. Messgerätes liegt. Nur dann kann man sich auf die vereinbarten Fehlergrenzen verlassen. Man kann von folgender Einteilung (**Bild 1-11**) ausgehen:

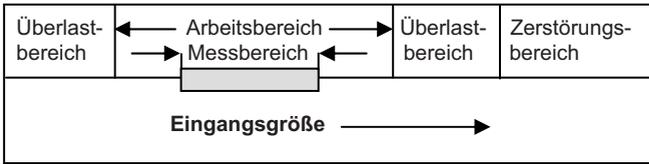
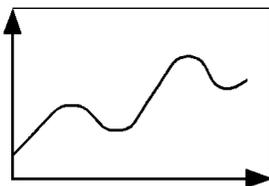


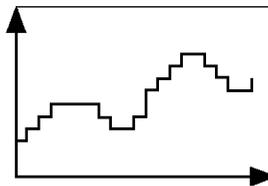
Bild 1-11 Definition Messbereich

Die zeitliche Folge von Messwerten bezeichnet man als Signale. Ein Signal kann verschiedene Formen annehmen und ist eine zeitvariable physikalische Zustandsgröße. Die Signalformen werden wie folgt systematisiert:

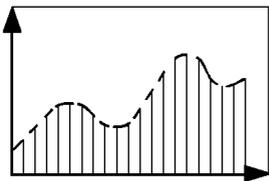
- **Deterministische Signale**
Der Signalwert ist zu jedem beliebigen Zeitpunkt verfügbar. Man unterscheidet weiterhin in analoge und diskrete Signale (**Bild 1-12**).
- **Stochastische Signale**
Sie haben einen regellos, zufällig schwankenden Signalverlauf. Rein stochastische Signale sind nur mit statistischen Methoden auswertbar.
- **Signalgemische**
Das sind deterministische Signalformen mit einem stochastischen Anteil (Rauschen). Das Rauschen ist unerwünscht und wird mit elektronischen Mitteln unterdrückt. Sensoren und elektronische Signalverarbeitungsgeräte mit einem geringen Eigenrauschen werden besonders für die Erfassung sehr kleiner Messgrößen eingesetzt.



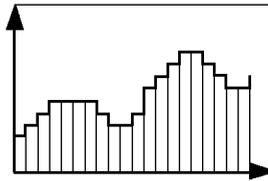
wert- und zeitkontinuierlich



wertkontinuierlich und zeitdiskret



wertdiskret und zeitkontinuierlich



wert- und zeitdiskret

analog = kontinuierlich, stufenlose Werte

diskret = durch endliche Intervalle voneinander getrennt stehende Werte

kontinuierlich = unaufhörlich, durchlaufend

diskontinuierlich = aussetzend, unterbrochen

Bild 1-12 Charakteristische Signaltypen im zeitlichen Verlauf

Große Bedeutung haben in der Fertigungsautomatisierung Sensoren, die eine Annäherung an Objekte detektieren. Die meisten Annäherungssensoren geben einen Output ab, der der Entfernung von Sensor zum Objekt äquivalent ist. Das geschieht auf zwei Arten:

- Der Sensoroutput wächst mit dem Abstand zum Objekt, wie z. B. bei der Messung von Licht- und Schalllaufzeiten.
- Der Sensoroutput wird kleiner, wenn sich die Entfernung zum Objekt vergrößert, was z. B. bei der Abstandsmessung mit elektromagnetischen Feldern der Fall ist.

Einiges zum Begriff der **Information**:

Das Wort ist bereits in der Wissenschaftssprache des 19. Jahrhunderts nachweisbar. Zum Inhalt zählte man folgende Gegebenheiten:

1. **Absender:** Das können Lebewesen ebenso sein, wie Maschinen und Messgeräte.
2. **Empfänger:** Dazu zählt man Menschen, aber auch entsprechend ausgelegte Vorrichtungen, Maschinen und elektronische Geräte.
3. **Text:** Das sind Beschreibungen, Befehle, Verbote, Empfehlungen, Messwerte u. a.
4. **Form:** Hier sind nicht nur beliebige Sprachen aktuell, sondern auch codierte Notationen, Signalcodes des Nervensystems oder ein chemischer Code, z. B. zur Fixierung von Erbmerkmalen.

In der DIN 44300 hat man dazu folgendes festgelegt:

Information: Sinngehalt der Nachricht (*was* mitgeteilt werden soll)

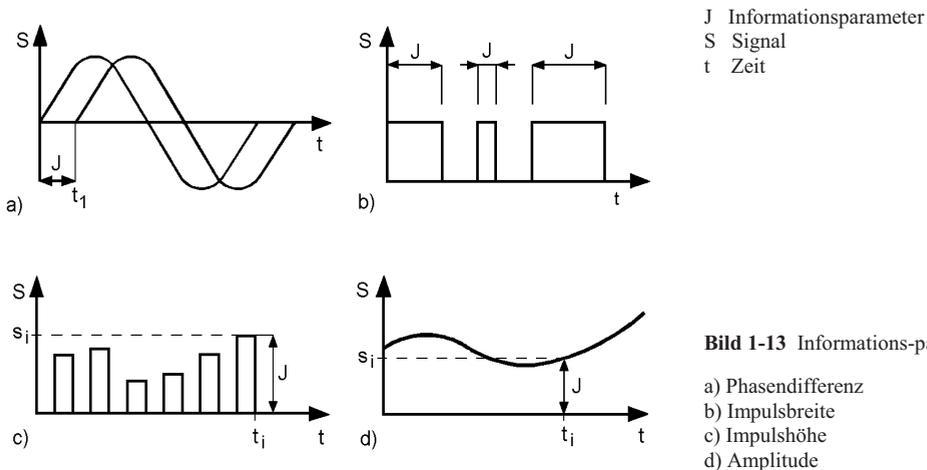
Nachricht: Sie besteht aus Information und Signal und wird *unverändert* weitergegeben.

Signal: Das ist die physikalische Realisierung (*wie* es mitgeteilt wird).

Daten: Sie werden im Gegensatz zu Nachrichten verändert und weiterverarbeitet.

Informationsparameter einer physikalischen Größe bzw. eines Signalträgers bilden den Werteverlauf einer zu signalisierenden Größe ab. Das können nach **Bild 1-13** die folgenden sein:

- Phasendifferenz periodischer Vorgänge
- Impulsbreite
- Impulshöhe
- Amplitude



1.3 Aufgaben und nutzbare Effekte

In den 1930er Jahren begann man erstmals Fotozellen für das Sortieren von Reiskörnern, Bohnen und Zigarren nach ihrer Farbe einzusetzen. Dann folgte die Kontrolle von Konservendosen auf richtige Etikettierung. Bei einer amerikanischen Firma konnte man schon bald 14 Arbeitskräfte einsparen, nachdem man bei der Kontrolle von Nockenwellen Fotozellen eingesetzt hatte. Was bei James Watt galt, das gilt auch heute noch: Niemand kann etwas zielgerecht steuern oder regeln, was er nicht vorher gemessen hat.

Es gibt etwa 5000 physikalische und chemische Effekte in der unbelebten Natur, die man als Wirkprinzip für Sensoren einsetzen kann. Davon werden heute in der Praxis etwa 150 für Sensoren ausgenutzt.

Wie kann nun eine zu messende Größe aufgenommen werden?

- Über einen direkten mechanischen Kontakt oder über ein mechanisches Koppelsystem (taktile Sensor),
- über ein auf Nahwirkung (Annäherung) beruhendem Arbeitsprinzip (approximativer Sensor) oder
- über ein abbildendes System, bei dem die Entfernung zum Messobjekt keine direkte Bedeutung für die sensorische Auswertung besitzt (Kamera mit Bildverarbeitungssystem).

Welche Größen müssen in der alltäglichen Produktionspraxis erfasst bzw. gemessen werden und welche Effekte lassen sich dafür ausnutzen?

Erfassung mechanischer Größen

- Induktionsgesetz
- piezoelektrischer Effekt und reziproker piezoelektrischer Effekt
- Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von geometrischen Größen
- Änderung des spezifischen Widerstandes unter mechanischer Spannung
- Kopplung zweier Spulen über einen Eisenkern
- Abhängigkeit der Induktivität einer Spule vom magnetischen Widerstand/Wirbelströmen
- Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators von geometrischen Größen
- Änderung der relativen Permeabilitätszahl unter mechanischer Spannung
- Abhängigkeit der Eigenfrequenz einer Saite oder eines Stabes von mechanischen Spannungen
- Wirkdruckverfahren
- Erhaltung des Impulses (Coriolis-Durchflussmesser)
- Wirbelbildung hinter einem Störkörper
- Durchflussmessung über die Erfassung des Wärmetransportes
- Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit des Mediums

Erfassung thermischer Größen

- thermoelektrischer Effekt
- pyroelektrischer Effekt
- Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur
- Abhängigkeit der Eigenleitfähigkeit von Halbleitern von der Temperatur

- Ferroelektrizität (dem Ferromagnetismus analoges Verhalten einiger weniger Stoffe auf Grund bestimmter elektrischer Eigenschaften)
- Abhängigkeit der Quarz-Resonanzfrequenz von der Temperatur

Erfassung von Strahlungen

- äußerer Fotoeffekt
- innerer lichtelektrischer Effekt, Sperrschicht-Fotoeffekt
- Fotoeffekt, Compton-Effekt (Stoß zwischen Photon und einem freien Elektron) und Paarbildung
- Anregung zur Lumineszenz, radioaktive Strahlungen

Erfassung chemischer Größen

- Bildung elektrochemischer Potentiale an Grenzschichten
- Änderung der Austrittsarbeit an Phasengrenzen
- Temperaturabhängigkeit des Paramagnetismus von Sauerstoff
- Gasanalyse über die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit oder Wärmetönung
- Wasserstoff-Ionenleitfähigkeit von Festkörper-Elektrolyten
- Prinzip des Flammen-Ionisationsdetektors
- Hygroskopische Eigenschaften des Lithium-Chlorids
- Abhängigkeit der Kapazität vom Dielektrikum

Sensoren werden in den unterschiedlichsten Bereichen und Branchen eingesetzt. So müssen z. B. die in der Medizintechnik eingesetzten Sensoren anderen Forderungen und Randbedingungen genügen als die in der Fertigungstechnik benutzten. Welche Aufgaben sind nun in der Fertigungstechnik relevant?

Feststellen der Anwesenheit von Objekten

- Vorhandensein einzelner Objekte, z. B. einer Unterlegscheibe
- Vollständigkeitskontrolle aller Bauteile z. B. einer Montagebaugruppe
- Detektieren von strömenden Flüssigkeiten, Gasen bzw. Mengen
- Zählen von Objekten

Feststellung der Identität von Objekten

- Erkennung nicht erlaubter (falscher, fehlerhafter, verdorbener) Teile im Prozess
- Klassifizierung erlaubter Objekte, z. B. nach Toleranzklassen oder Sorten
- Optische Zeichenprüfung und -erkennung, z. B. Klarschrift, Balkencodes, Matrixcodes

Erfassung von Position und/oder Orientierung von Objekten

- Erkennung einzelner Objekte relativ zur Umgebung, z. B. zu greifende Teile auf einem Förderband, Position von Maschinenschlitten, Flächen- und Volumenschwerpunktbestimmung
- Relativlage-Erkennung von Objekten zu Werkzeugen, z. B. Schweißfuge zum Brenner
- Lageerkennung von Objekten zu einem begrenzten Untergrund, z. B. bei der Zuschnittoptimierung (*nesting*), Template Matching-Verfahren, Drehlageerkennung
- Vermessung (Form- und Maßprüfung) von Objekten bezüglich Längen und Winkeln, z. B. zur Toleranzkontrolle, Verschiebung, Auslenkung, Verformung, Spiel, Schlag, Verkipfung, Exzentrizität, Dicke

Erfassen der Formeigenschaften von Objekten

- Prüfen von Konturverläufen, z. B. auf Richtigkeit von Gewinde (Steigung, Profil)
- Prüfen von Objektregionen, z. B. auf Vorhandensein von Kanten
- Untersuchung auf Vollzähligkeit von Formdetails, z. B. voll ausgespritztes Kunststoffteil (Sonderfall der Objekterkennung)
- Messung von Deformationen zum Zweck der Kraft- und Momentenbestimmung

Aufnahmen von Oberflächenmerkmalen auf Objekten

- Prüfen der Mikrogeometrie von Objekten, z. B. auf Rauheit, Welligkeit, Struktur
- Prüfen auf Farbton, z. B. bei der Farbglassortierung von Glasbruch
- Prüfen auf Homogenität der Mikrogeometrien von Objekten, z. B. auf Texturen, Beschädigungen oder Farbfehler, Topologie

Prüfen der Stoffeigenschaften von Objekten

- Beurteilung der Transparenz von Objekten oder auch des Glanzgrades
- Unterscheidung von Werkstoffarten, z. B. bei der Sortierung von Kunststoff-Recycling-Objekten auf Homogenität von Stoffen
- Bestimmung von Konzentrationen und stofflichen Zusammensetzungen

Eine große Rolle spielen heute Sensoren in der Robotertechnik. Eine Einteilung der dort verwendeten Sensoren geht aus **Bild 1-14** hervor.

Prinzip	taktil			elektrisch		optisch/visuell				akustisch				
Sensortyp	mechanischer Taster	Dehnungsmessstreifen	Piezo-Kraftmessdose	druckempfindliche Kunststoffstrukturen	induktive Näherungsschalter	kapazitive Näherungsschalter	Lichtschranke	Reflexionslichttaster	Laserscanner	Mikrowellensensor	Videosysteme	Ultraschallschranke	Ultraschallarray	Sonar
digital	●			●	●	●	●	●	●	●	●			
analog		●	●								●		●	●

Bild 1-14 Einteilung der Sensoren für die Industrierobotertechnik

Besonders wichtig sind die taktile (tastenden) Sensoren. Der physiologische Tastsinn beim Menschen leistet allerdings mehr. Der Spürsinn der Haut besitzt die Fähigkeit, Strukturen zu erkennen, die mit der Hautoberfläche in Berührung kommen. Die Druckempfindlichkeit spricht auf Kräfte und Drehmomente an. Einiges davon sollen die taktile Sensoren (*tactile sensors*) ebenfalls leisten. Sie vermögen folgendes zu erfassen (**Bild 1-15**):

- Anwesenheit von Objekten und deren Vollständigkeit
- Form, Position und Orientierung eines Werkstücks
- Druck an der Berührungsfläche und Druckverteilung
- Größe, Ort und Richtung einer Kraft
- Größe, Ebene und Wirkungssinn eines Drehmoments

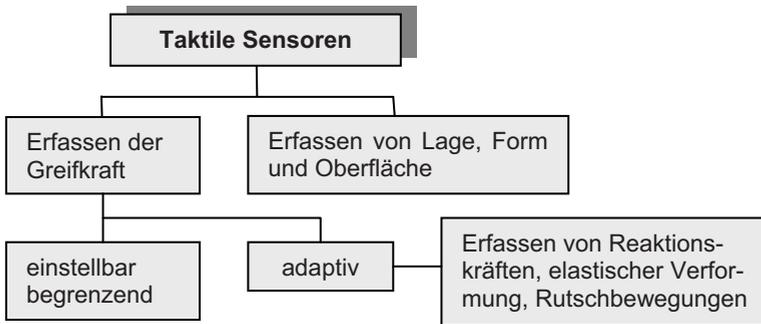


Bild 1-15 Einteilung der taktilen Sensoren

Der Umfang der Sensorisierung richtet sich nach den Erfordernissen und der Art des Prozesses. In **Bild 1-16** werden ganz grob einige Anforderungsprofile angegeben. Der auszuwählende Sensor muss nach dem Messprinzip, der Konstruktion und dem Störungsübertragungsverhalten möglichst gut zu einer bestimmten Klasse von Einsatzfällen passen.

Regelgröße und Anwendungen	Position	Orientierung	Geschwindigkeit	Kraft
Beschickung	*****			**
Sortieren	*****		***	
Palettieren	*****	***	***	
ortsfeste Montage	*****			***
Punktschweißen	*****	***		
Nahtschmelzschweißen	***	***	*****	
Brennschneiden	***		*****	
Farbauftrag	***	***	*****	
Bandmontage	****		*****	
Entgraten	***	***	****	*****
Fügen	****			*****
Kommissionieren	*****	***		
Kleben	****	***	*****	

Bild 1-16 Typische Regelgrößen, die durch die Technologie der Anwendung vorgegeben sind.

Sechs Punkte = sehr wichtig

Vor einem besonders schwierigen Problem steht der Roboter (besser sein Computer), wenn er mit einem Sichtsystem ein räumliches Objekt erkennen soll (*bin picking problem*). Das liegt daran, dass ein Körper aus verschiedenen Blickwinkeln völlig unterschiedliche Ansichten zeigt. Ein zylindrischer Trinkbecher kann eine Rechteck-, Kreis- oder Ovalform abgeben, wobei die Form der ovalen Enden exakt vom Sichtwinkel abhängt. Für den Zugriff des Roboters auf diesen Becher müssen aus den Ansichten Greifposition und Greiferorientierung abgeleitet werden. Moderne Sichtsysteme kommen heute aber damit zurecht, weil sie nicht nur Silhouetten, sondern auch Merkmale in der Fläche in den Erkennungsvorgang mit einbeziehen können.

1.4 Einsatz und Auswahl

Wenn im Rahmen einer Automatisierungsaufgabe Sensoren erforderlich werden, müssen zwei Teilaufgaben gelöst werden, Das sind:

- Welcher Bedarf an welchen sensorischen Funktionen liegt vor?
- Erarbeitung eines Anforderungsbildes je Sensor

Bei der Analyse der Ausgangsbedingungen kommt es auf folgendes an:

- Welche Unbestimmtheiten treten im Prozess auf?
- Welche Unbestimmtheiten sind nicht tolerierbar und sollen mit dem Sensor beherrschbar werden?
- Welche Umgebungsbedingungen (Staub, Feuchte, Temperatur u. a.) sind zu berücksichtigen?
- Welche Zustandsgrößen sind wichtig und welcher Wertevorrat ist vorhanden?
- Auf welche Art sollen die Informationen übertragen werden?
- Welches physikalische Prinzip ist einsetzbar und verspricht den größten Erfolg?
- Welche Hilfsenergie ist bereitzustellen?

Zuerst spielen die funktionellen Anforderungen die ausschlaggebende Rolle, wie z. B. Auflösung, Linearität und Ansprechzeit. Bei Distanzmessungen kann man sich an den folgenden Parametern orientieren [1-2]:

Sensorparameter	induktiv	optisch	akustisch
Messdistanz	0 bis 10 mm	15 bis 1000 mm	20 bis 2500 mm
Auflösung	0,1 μm	2 μm	0,3 mm
Wiederholgenauigkeit	1 μm	2 μm	0,5 mm
Linearität	0,4 bis 4 %	0,1 bis 1,2 %	0,5 %
Ansprechzeit	0,35 ms	0,9 ms	50 ms

Bei der Wahl des physikalischen Wirkprinzips sind der Abstand zwischen Sensor und Objekt sowie die Art des Zugriffs zu bewerten, d.h. es muss das Objekt punktuell, linienförmig, flächig oder räumlich erfasst werden. Eine grobe Übersicht bietet dazu das **Bild 1-17**.

Für eine Eignungsbewertung sind die technischen Kenngrößen dem Anforderungsbild gegenüber zu stellen. Das muss außerdem gewichtet geschehen, denn es gibt keinen Sensor, der alle durch die Messaufgabe geforderten Eigenschaften umfassend erfüllt. Folgende Kenngrößen können eine Rolle spielen:

- Ansprechzeiten, Reaktions-, Schaltgeschwindigkeit
- Anschlussystem (2-, 3-, 4-Leitertechnik, Reihen-, Parallelschaltung u. a.)
- Betriebssicherheit, Ausfallrate, Zuverlässigkeit
- Eigenüberwachungsmöglichkeit
- Einsatztemperaturbereich
- Einstellbarkeit von Arbeitspunkt, Empfindlichkeit und Ansprechschwelle

- Rückwirkungsfreiheit des physikalischen Prinzips
- Schaltabstand, Schaltpunktdrift, Schaltpunkthysterese
- Schutzgrad (*degree of protection*)
- Spannungsversorgung (Betriebsspannung, Spannungsschwankungen und -spitzen)
- Störungsunterdrückung (Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Störgrößen wie Schwingungen, Stoß, Fremdlicht u. a.)
- Technische Verfügbarkeit und Temperaturfestigkeit
- Überlastungsschutz (Kurzschlusschutz, Verpolungssicherheit, Überlastfestigkeit)
- Wirtschaftlichkeit (Aufwand/Nutzen, einschließlich der Anschaltkosten)
- Auflösung, Messgenauigkeit
- Korrosionsresistenz, Lebensdauer, Nutzungsdauer
- Leistungsgrenzen, Betriebsbereich
- Objekteigenschaften (Material, Remissionsgrad, Oberflächenmuster u. a.)
- Realisierungsaufbau (Abmessungen, Masse, Montagebedingungen, Anpassung an Erfassungsort)
- Redundanz der Auswerteeinheit
- Reproduzierbarkeit des Schaltverhaltens
- Zulassung für Spezialanwendungen (Reinraum, Explosions-, Personenschutz u. a.)

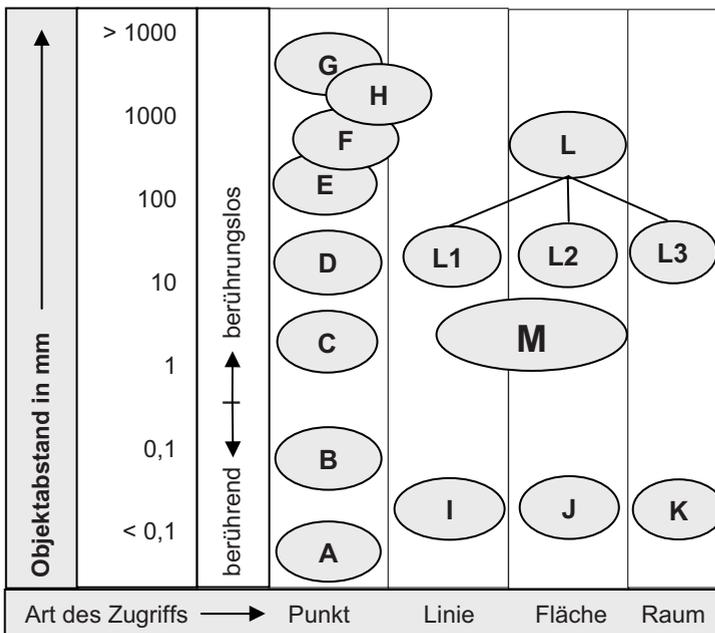


Bild 1-17 Gliederung sensorischer Prinzipie nach der Art des Zugriffs

A elektronischer Endschalter, B taktile Sensoren (Kraft, Druck, Masse), C Abstandssensoren (induktiv, kapazitiv), D Reflexlichttaster, E Triangulationssensor, F Lichtschranke, G Lichtimpuls-Laufzeitverfahren, H akustischer Abstandssensor, I tastende Sensor-Arrays, J Sensorarrays als Druck-/Kraftmatrix, K Mehrkomponenten-Kraftaufnehmer, L visuelle Systeme, L1 CCD-Linie, L2 CCD-Zeilenkamera, L3 Mehr-Kamerasysteme oder zweidimensionale Systeme mit Abstandssensoren, auch Stereosichtsysteme, M Sensorarray aus Sensoren mit punktförmigem Zugriff (optisch, akustisch)

Gleichschaltung (Synchronisation) aller Sensoren kann man die gegenseitige Beeinflussung ausschließen. Alle Sensoren senden gleichzeitig. Wenn nun der Weg des Schalls vom Sensor A zum Sensor B größer ist als die maximale Erfassungsdistanz, treten keine Probleme auf. Eine andere Betriebsart wäre der Multiplexbetrieb, bei der die Sensoren nacheinander aktiviert werden und sich ebenfalls nicht gegenseitig stören.

In welchen Schritten werden Sensoren ausgewählt?

- 1 Wahl eines geeigneten physikalischen Wirkprinzips
- 2 Bestimmung des benötigten Messbereiches
- 3 Festlegung der zu erwartenden Messgrößenänderung
- 4 Feinheit der Auflösung des Messsignals
- 5 Bestimmung des kleinsten zu messenden Wertes
- 6 Zulässiger Fehler als Auswirkung des statischen und dynamischen Verhaltens
- 7 Aufwand für Abschirmmaßnahmen (elektromagnetische Verträglichkeit)
- 8 Aufwand für Verstärkung und Auswertung des Messsignals
- 9 Bewertung von Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Wartungsaufwand
- 10 Untersuchung der An- und Einbaubedingungen
- 11 Möglichkeiten zum Anschluss an Feldbussysteme
- 12 Kosten für Beschaffung und Installation

Welche Sensoren werden am häufigsten eingesetzt?

Aus einer wertmäßigen Betrachtung des Weltmarktes ergibt sich etwa folgende Rangfolge für die Sensorarten (Quelle: *Intechno Consulting*, 1998):

- Temperatursensoren
- Drucksensoren
- Durchflusssensoren
- Binäre Positionssensoren
- Positionssensoren
- Flüssigkeits-Chemosensoren
- Füllstandssensoren
- Geschwindigkeitssensoren
- Gas-Chemosensoren

Der zivile Weltmarkt für Sensoren wurde für das Jahr 2000 auf mehr als 30 Mrd. Euro geschätzt. Er wird sich bis zum Jahr 2010 verdoppeln.

Zur weiteren Vertiefung und zum Nachschlagen findet der interessierte Leser in der Literatur [1-4] bis [1-15] umfangreiche Darstellungen zur Sensorik.

2 Sensoren zur Positionserfassung

2.1 Elektromechanische und elektrische Positionserfassung

In der Fertigung müssen maschinelle Werkzeug- und Werkstückbewegungen laufend kontrolliert werden. Dazu ist die Position von Maschinenteilen und Objekten der verschiedensten Art zu erfassen und als Signal bereitzustellen. Oft genügt auch schon eine Kontrolle der Anwesenheit.

Taktile Sensoren werden zur Ermittlung von Positionen, Formen, Temperaturen, Kräften, Momenten und Drücken eingesetzt. Zu den taktilen Sensoren gehören auch die mechanischen Positionsschalter (Grenztaster, Endschalter, Mikroschalter, Präzisionsschaltwerke), die an vielen Fertigungseinrichtungen für die Rückmeldung ausgeführter Bewegungen sorgen. Weil sie nur die Aussagen EIN oder AUS liefern, werden sie auch als Binärsensoren bezeichnet. Sie arbeiten zwar recht genau und automatisch, verschleifen jedoch und die Kontakte prellen. Sie können deshalb nicht so rasch schalten, wie berührungslos arbeitende Näherungsschalter. Das Prinzip tastender Schalter wird in **Bild 2-1** gezeigt. Grenztaster enthalten oft zur Erhöhung der Funktionssicherheit zwei Kontakte (Doppelkontakt) je Schaltstelle.

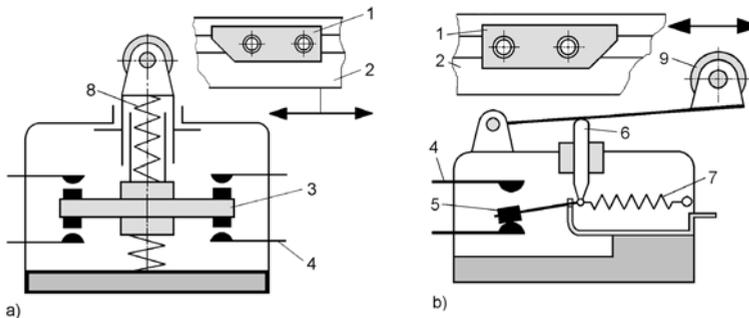


Bild 2-1 Elektromechanische Grenztaster

a) Taster, b) Sprungschalter. 1 Schaltnocken, 2 Maschinenteil, 3 Kontaktzunge, 4 Kontakt, 5 bewegliches Schaltstück, 6 Stößel, 7 Zugfeder, 8 Druckfeder, 9 Tastrolle

Die Bewegung des Tastorgans wird auf Kontakte übertragen, die einen Stromkreis öffnen oder schließen. Um einen exakten Schaltvorgang zu gewährleisten, sind bei vielen Schaltern dieser Art Feder-Sprungmechanismen eingebaut, die ein schlagartiges Umschalten gewährleisten (**Bild 2-1b**). Außerdem gibt es für die Bewegungsübertragung vom Maschinenteil zum Schalter verschiedene Betätigungsvorsätze. Neben einer Rolle sind das Rollenhebel, Kiprollenhebel mit Leerrücklauf, Federstabansätze, Zugösen u. a. Die Reproduzierbarkeit des Schaltpunktes liegt selbst bei Low-cost-Sensoren bei $\pm 0,01$ mm und ist damit ausgezeichnet. Präzisionsschalter können noch um eine Zehnerpotenz genauer sein. Mechanischer Verschleiß und Kontaktabbrand begrenzen aber die Lebensdauer von Mikroschaltern auf 10 Millionen Schaltspiele. Elektromagnetische Felder beeinträchtigen die Funktion nicht. Außerdem sind sie recht