

Stefan Hesse
Gerhard Schnell

Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation

Funktion – Ausführung – Anwendung

6. Auflage

Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation

Stefan Hesse · Gerhard Schnell

Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation

Funktion – Ausführung – Anwendung

6., korrigierte und verbesserte Auflage

 Springer Vieweg

Stefan Hesse
Plauen, Deutschland

Gerhard Schnell
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-658-05866-1
DOI 10.1007/978-3-658-05867-8

ISBN 978-3-658-05867-8 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1991, 1993, 2004, 2009, 2011, 2014

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 6. Auflage

Der Inhalt des Buches wurde um einige praxisorientierte Beispiele ergänzt, z. B. im Segment der Robotergreifer. In der E-Book-Ausgabe sind die Illustrationen nunmehr farbig ausgeführt. Die lexikalische Sammlung von Fachbegriffen wurde erweitert. Für die Betreuung danke ich Herrn Dipl.-Ing. *Reinhard Dapper*, Cheflektor des Lektorats Elektrotechnik.

Plauen, September 2014

Stefan Hesse

Vorwort zur 1. Auflage

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 einige Internet-Suchbegriffe dienen dem schnellen Nachschlagen und der Vertiefung bis hin zum Auffinden potenzieller 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 beige-steuert 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

Inhaltsverzeichnis

1	Sensoren – Sinnesorgane der Technik	1
1.1	Was sind Sensoren?	1
1.2	Einteilung und Begriffe	8
1.3	Aufgaben und nutzbare Effekte	15
1.4	Einsatz und Auswahl	19
	Literatur	23
2	Sensoren zur Positionserfassung	25
2.1	Elektromechanische und elektrische Positionserfassung	25
2.2	Pneumatische Positionserfassung	29
2.3	Induktive Positionserfassung	34
2.4	Kapazitive Positionserfassung	46
2.5	Magnetinduktive Positionserfassung	52
2.5.1	Hallsensor	52
2.5.2	Magnetschalter	56
2.5.3	Magnetisch steuerbare Widerstände	60
2.6	Positionserfassung mit Ultraschall	66
2.7	Optoelektronische Positionserfassung	74
2.7.1	Allgemeine Grundlagen	74
2.7.2	Einweg-Lichtschranke	83
2.7.3	Reflexlichtschranke	89
2.7.4	Reflexlichttaster	93
2.7.5	Lichtgitter	100
2.7.6	Faseroptische Sensoren	107
2.7.7	Positionsempfindliche Fotoelemente	112
2.7.8	Unterscheidung farbiger Objekte	115
2.7.9	Lasersensoren	119
2.8	Positionserfassung mit Mikrowellen	130
2.9	Positionserfassung mit Kernstrahlung	132
2.10	Füll- und Grenzstandsmessung	134
2.10.1	Allgemeine Grundlagen	135

2.10.2	Optische Füllhöhenbestimmung	136
2.10.3	Füllhöhenbestimmung mit Schwimmern	138
2.10.4	Elektromechanische Füllhöhenbestimmung	141
2.10.5	Druckabhängige Füllhöhenbestimmung	143
2.10.6	Konduktive Füllhöhenbestimmung	146
2.10.7	Kapazitive Füllhöhenbestimmung	147
2.10.8	Absorptionsabhängige Füllhöhenbestimmung	150
2.10.9	Reflexionsabhängige Füllhöhenbestimmung	151
2.10.10	Kalorimetrische Füllstandserfassung	156
2.11	Sensoren zur Bahnführung von Schweißrobotern	156
2.12	Sensoren für Autonome Mobile Roboter	164
2.13	Sensoren in der Endeffektortechnik	177
	Literatur	184
3	Sensoren zur Erfassung mechanischer Größen	185
3.1	Messung von Kräften	185
3.2	Messung von Drehmomenten	204
3.3	Messung von Beschleunigungen	210
3.4	Bestimmung von Massen	215
3.5	Geschwindigkeitsmessung	220
3.6	Erkennen von Bewegungen	228
3.7	Erfassen von Schwingungen	230
	Literatur	231
4	Sensoren zur Erfassung fluidischer Größen	233
4.1	Druckmessung	234
4.1.1	Allgemeine Grundlagen	234
4.1.2	Magnetoelastische Messung	238
4.1.3	Kapazitive Messung	240
4.1.4	Piezoelektrische Messung	243
4.1.5	Piezoresistive Messung	246
4.1.6	Galvanomagnetische Messung	249
4.1.7	Druckmessung mit akustischen Oberflächenwellen	250
4.2	Durchflussmessung	251
4.2.1	Volumetrische Messung	253
4.2.2	Wirkdruckverfahren	258
4.2.3	Magnetisch-induktive Durchflussmessung	259
4.2.4	Coriolis-Durchflussmessung	261
4.2.5	Durchflussmessung mit Ultraschall	263
4.2.6	Kalorimetrische Durchflussmessung	267
4.2.7	Wirbelfrequenz-Durchflussmessung	272
4.3	Feuchtemessung	274

4.3.1	Allgemeine Grundlagen	274
4.3.2	Feuchtesensoren	277
	Literatur	284
5	Sensoren zur Erfassung der Temperatur	285
5.1	Allgemeine Grundlagen	286
5.2	Kontaktthermometrische Sensoren	287
5.2.1	Thermoresistive Temperaturmessung	288
5.2.2	Thermoelektrische Temperaturmessung	296
5.3	Strahlungsthermometrie	302
	Literatur	313
6	Sensoren zur Erfassung von Wegen und Winkeln	315
6.1	Allgemeine Grundlagen	315
6.2	Analoge Messverfahren	319
6.2.1	Tauchanker und Differenzialtransformator	320
6.2.2	Potenzimeter	321
6.2.3	Kapazitive Weg- und Winkelmessung	323
6.2.4	Induktive Weg- und Winkelmessung	326
6.2.5	Magnetische Wegmessung	328
6.2.6	Resolver	329
6.2.7	Inductosyn	330
6.3	Digitale Messverfahren	332
6.3.1	Optisch-inkrementale Weg- und Winkelmesssysteme	333
6.3.2	Codelineale und Codescheiben	337
6.3.3	Magnetische Längenmesssysteme	342
6.3.4	Längenmessung mit Interferometer	343
6.3.5	Interferenzielle Längenmessung	345
6.4	Distanzmessung mit Triangulation	346
6.5	Distanzbestimmung mit Laufzeitmessung	350
6.6	Distanzbestimmung mit Phasenmessung	353
6.7	Magnetostriktive Wegmessung	357
6.8	Neigungsmessung	359
	Literatur	364
7	Abbildung und Erkennung von Objekten	365
7.1	Allgemeine Grundlagen	365
7.2	Optisch-visuelle Bildaufnahme	371
7.2.1	Höhenprofilschnitt	372
7.2.2	Objekterkennung mit CCD-Zeile	372
7.2.3	Objekterkennung mit Lichtschnittverfahren	374
7.2.4	Objekterkennung mit CCD-Matrix	376

7.2.5	Objekterkennung durch Schattenbildauswertung	386
7.2.6	Bilderfassung mit stereoskopischem Prinzip	395
7.2.7	Beleuchtungstechnik	397
7.3	Nichtoptische Abtastsysteme	400
7.4	Erfassung codierter und nichtcodierter Informationen	404
7.4.1	Elektromechanische Erfassung	404
7.4.2	Optische Erfassung	411
7.4.3	Elektronische und elektromagnetische Erfassung	418
	Literatur	420
8	Erfassung chemischer und biologischer Stoffgrößen	423
8.1	Messung von Gaskonzentrationen allgemein	424
8.2	Sauerstoffmessung	430
8.3	Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit	432
8.4	Messung des pH-Wertes	434
8.5	Gasanalyse durch Wärmeleitfähigkeitsmessung	436
8.6	Erfassung biologischer Substanzen	438
8.7	Explosionsschutz bei Sensoren	440
	Literatur	443
9	Sensorvernetzung	445
9.1	Allgemeine Grundlagen	445
9.1.1	Netzwerktopologien	446
9.1.2	Buszugriffsverfahren	446
9.1.3	Telegramme	448
9.2	Bussysteme zur Sensorvernetzung	449
9.2.1	Aktor/Sensor-Interface (AS-I)	449
9.2.2	Profibus	450
9.2.3	Interbus	453
9.2.4	HART-Protokoll	454
9.2.5	CAN-Bus	455
9.3	Ausblick	456
	Literatur	459
10	Fachbegriffe	461
	Literatur	497
	Sachverzeichnis	499

Es werden verschiedene Facetten zum Thema „Sensoren“ beleuchtet. Dazu gehören die Erläuterungen z. B. zu Elementarsensor, Robotersensoren und physikalische Zusammenhänge ebenso, wie typische Eigenschaften, Anwendungen und Signalzustände. Aufgaben und nutzbare Effekte vervollständigen diesen ersten Überblick. Der Leser bekommt einen Eindruck über die Häufigkeit in der fertigungstechnischen Automatisierung sowie die einsetzbaren physikalisch-technischen Möglichkeiten. Eine kurze Auflistung der Schritte zur Auswahl eines Sensors beschließt das Kapitel.

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 Senso-

Tab. 1.1 Wahrnehmungsvermögen von Mensch und Maschine

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

ren 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 in Tab. 1.1 gegenübergestellt werden.

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*). Dazu soll dieses 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, nennt man Elementarsensor oder Messwertempfänger (Abb. 1.1).

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.

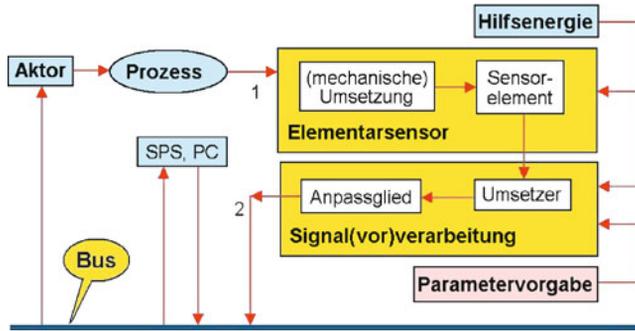
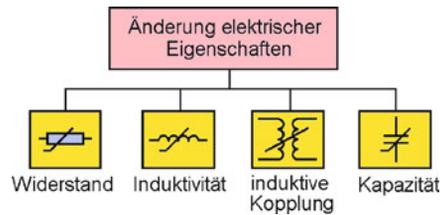


Abb. 1.1 Prinzipanordnung eines Sensors. 1 Eingangssignal, 2 Ausgangssignal

Abb. 1.2 Beispiele für passive Sensoreffekte



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 (Abb. 1.2). Es sind hohe Genauigkeiten erreichbar.

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 *Outdoor*-Umgebung frei bewegen können, ist eine Einteilung der Sensoren in interne und externe Sensoren aktuell. Die Abb. 1.3 zeigt eine Übersicht.

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

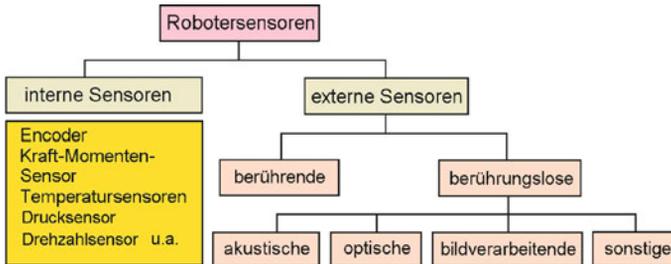


Abb. 1.3 Gliederung der Sensoren für autonome mobile Roboter

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, Rad-Encoder, 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

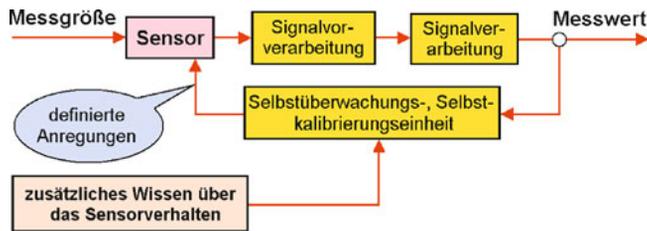


Abb. 1.4 Selbstüberwachung und Selbstkalibrierung von Sensoren

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 Abb. 1.4 als Schema gezeigt.

In jüngster Zeit ist man bemüht, die Fortschritte in der Mikrosystemtechnik auszunutzen, um Sensorsysteme aus modularen Komponenten anforderungsgerecht zusammenzubauen. Wie aus der Abb. 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.

Tab. 1.2 Verknüpfungsgleichungen (einige ausgewählte Beispiele)

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	$C = (\varepsilon \cdot A)/L, \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$	$\varepsilon_0 = 8,66 \cdot 10^{-12}$ 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	$U = [(R \cdot T)/(n \cdot F)] \cdot \ln \cdot (P_1/P_2)$	P 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	Heißeleiter, 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)	Magnetoresistiver Effekt
14	$U = (R_h \cdot I \cdot B)/d$	$R_h \cong 2 \cdot 10^{-4}$ m ³ /As (typisch), Halbleiter	Halleffekt
15	$f = W/h$	$H = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Ws ² $= 1,92$ eV (GaAsP)	Lichtelektrischer Effekt, Einstein-Gleichung
16	$\Delta R/R \sim \Delta L/L = \varepsilon$	ε Dehnung, L Leiterlänge $1 \Omega = 1$ V / 1 A	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, Gleichgewichtstempera- tur

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.

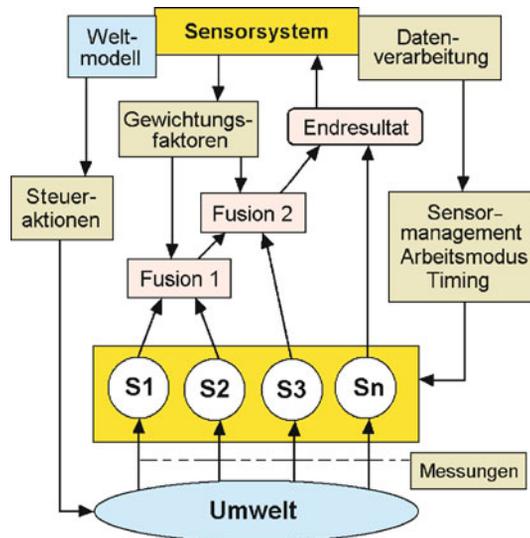
Sensorsystem Bezeichnung für ein System, das aus mehreren Mess- und Auswertungskomponenten besteht und bei dem zum Zeitpunkt der Messung eine Wirkungsübertragung stattfindet, an der Sensor, Messobjekt und Umwelt beteiligt sind. Es verfügt über einen wesentlichen Anteil an Signalaufbereitungsfunktionen.

Multisensorsystem Bezeichnung für ein System, das aus mehreren Einzelsensoren besteht, wobei diese gleichzeitig Messgrößen aufnehmen (Abb. 1.7). Sie sind vorwiegend als Halbleitersensoren ausgeführt und deshalb sehr platzsparend [2].

Multisensorielle Ansätze können auf drei Arten ausgelegt werden:

- Sensorkombination mit unterschiedlichen Messprinzipien, z. B. taktil, visuell, akustisch (heterogen)

Abb. 1.7 Prinzip der Datenintegration bei Multisensoren.
Si Sensorelement



- Sensorkombination mit demselben Messprinzip an verschiedenen Orten des Systems (homogen)
- Einzelsensoren 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 bis 10 Volt, oder Strom, z. B. 0 bis 20 mA bzw. 4 bis 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 Abb. 1.8 werden Pneumatikzylinder gezeigt, bei denen die Kolbenstellung mit Sensoren abgefragt wird. Bei der Lösung nach Abb. 1.8a trägt der Kolben einen Magnetring und über induktive Schalter werden nur die Endstellungen

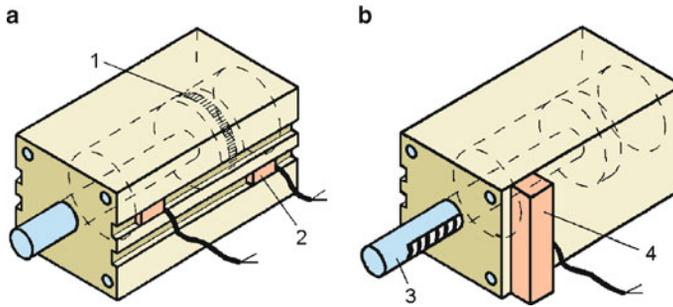


Abb. 1.8 Pneumatikzylinder mit Sensoren. **a** Endlagenerfassung mit induktiven Näherungssensoren, **b** Wegmessung mit digital-magnetischer Kolbenstange, 1 Magnetring, 2 induktiver Näherungssensor, 3 Kolbenstange mit Magnelementen, 4 Impulsgeber

Tab. 1.3 Einteilung der Sensoren nach der Energieart

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

erfasst (s. auch Abb. 2.1). Beim Aufbau nach Abb. 1.8b ist die Kolbenstange dagegen mit Magnelementen im Wechsel von Nord- und Südpolen besetzt, so dass eine Wegmessung über den gesamten Kolbenhub stattfinden kann. Es ist ein inkrementales digitales System.

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 (Tab. 1.3).

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 nach Wirkprinzipien ein, 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:

Übersicht

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

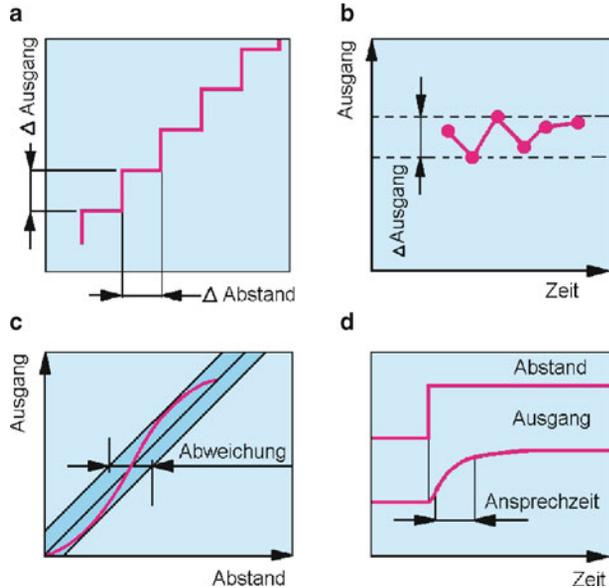
Sensoren müssen im Übrigen als Konstruktionsteile verstanden werden und so gestaltet sein, dass sie in ein Ensemble anderer Bauteile und Baugruppen eingehen können. Deshalb muss ihre Ausfallwahrscheinlichkeit klein sein. Wichtige Eigenschaften sind auch Störgrößenempfindlichkeit (Querempfindlichkeiten) 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.

Abb. 1.9 Wichtige messtechnische Begriffe am Beispiel von Abstandssensoren.

a Auflösung, **b** Wiederholgenauigkeit, **c** Linearität, **d** Ansprechzeit



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 der Abb. 1.9 werden diese Begriffe am Beispiel von Sensoren zur Distanz- und Positionsmessung nochmals grafisch erklärt.

Einige weitere Begriffe aus der Messtechnik werden im Kap. 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 der Einteilung nach Abb. 1.10 ausgehen.

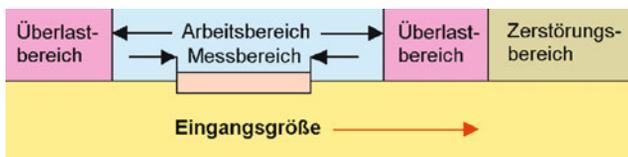


Abb. 1.10 Definition Messbereich

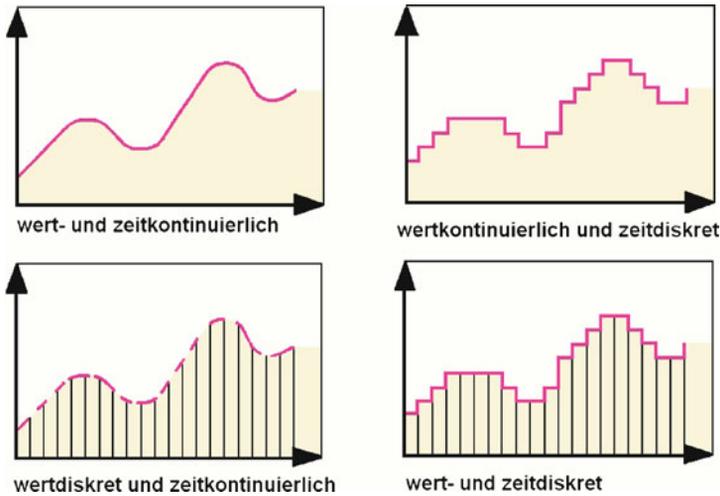


Abb. 1.11 Charakteristische Signaltypen im zeitlichen Verlauf. **analog** = kontinuierlich, stufenlose Werte, **diskret** = durch endliche Intervalle voneinander getrennt stehende Werte, **kontinuierlich** = unaufhörlich, durchlaufend, **diskontinuierlich** = aussetzend, unterbrochen

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 (Abb. 1.11).

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.

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.

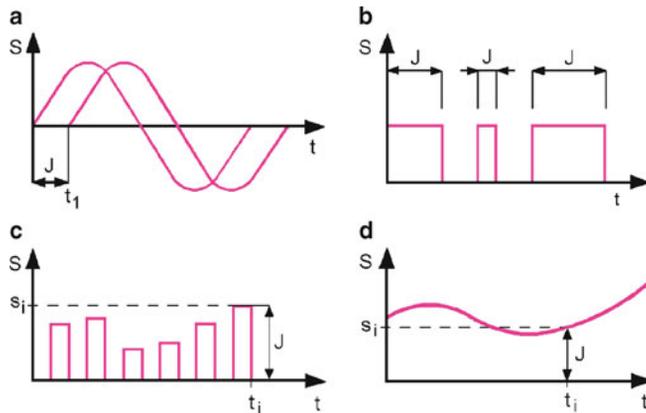


Abb. 1.12 Informationsparameter. **a** Phasendifferenz, **b** Impulsbreite, **c** Impulshöhe, **d** Amplitude, J Informationsparameter, S Signal, t Zeit

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 Abb. 1.12 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, Sperschicht-Fotoeffekt
- Fotoeffekt, Compton-Effekt (Stoß zwischen Foton und einem freien Elektron) und Paarbildung
- Anregung zur Lumineszenz, radioaktive Strahlungen

Erfassung chemischer Größen

- Bildung elektrochemischer Potenziale 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

Aufnehmen von Oberflächenmerkmalen auf Objekten

- Prüfen der Mikrogeometrie von Objekten, z. B. auf Rauheit, Welligkeit, Struktur
- Prüfen auf Farbton, z. B. bei der Farblassortierung 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 Abb. 1.13 hervor.

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

Abb. 1.13 Einteilung der Sensoren für die Industrierobotertechnik

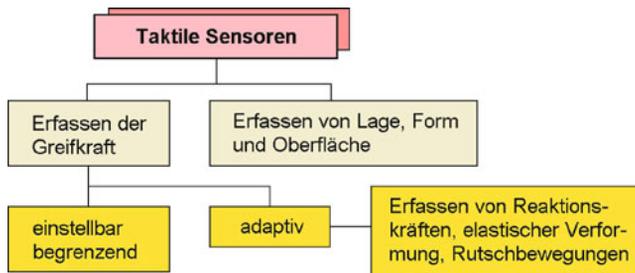


Abb. 1.14 Einteilung der taktilen Sensoren

Besonders wichtig sind die taktilen (tastenden) Sensoren. Der physiologische Tastsinn beim Menschen leistet allerdings viel 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 taktilen Sensoren (*tactile sensors*) ebenfalls leisten. Sie vermögen Folgendes zu erfassen (Abb. 1.14):

- 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

Der Umfang der Sensorisierung richtet sich nach den Erfordernissen und der Art des Prozesses. In der Abb. 1.15 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	■■■■■	■	■■■■■	

Abb. 1.15 Typische Regelgrößen, die durch die Technologie der Anwendung vorgegeben sind. sehr langer Balken = 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.

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?

Tab. 1.4 Physikalische Parameter für Distanzmessungen

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

- 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 Parametern der Tab. 1.4 orientieren [3].

Bei der Wahl des physikalischen Wirkprinzips sind der Abstand zwischen Sensor und Objekt sowie die Art des Zugriffs zu bewerten, d. h. muss das Objekt punktuell, linienförmig, flächig oder räumlich erfasst werden. Eine grobe Übersicht bietet dazu die Abb. 1.16.

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)