

Edmund Schiessle

INDUSTRIE- SENSORIK

SENSORTECHNIK UND
MESSWERTAUFNAHME



Ein Fachbuch von

ELEKTRONIK
PRAXIS

elektro
technik

konstruktions
praxis



Vogel Business Media

Der Onlineservice InfoClick bietet unter www.vbm-fachbuch.de nach Codeeingabe eventuell zusätzliche Informationen und Aktualisierungen. Fordern Sie für Ihr E-Book den Code unter info@vbm-fachbuch.de an!

Prof. Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Edmund Schiessle

Industriesensorik

Sensortechnik und Messwertaufnahme

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

Vogel Business Media

Prof. Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. **EDMUND SCHIESSLE**

Jahrgang 1946, studierte nach seiner Lehre und Industrietätigkeit als Elektromechaniker (Elektronik) an der Fachhochschule München Maschinenbau mit Vertiefung Luftfahrzeugbau, danach an den Universitäten München und Tübingen Physik mit dem Nebenfach Elektronik.

Ab 1979 war er anschließend Elektronik-Entwicklungsingenieur für Konstruktion und Entwicklung von elektromechanischen und elektronischen Messmitteln (Messwertaufnehmer, Sensoren, Sensorelektronik) im Elektronik-Messzentrum der Daimler-Benz AG (Mercedes-Benz AG). Neben seiner Ingenieur Tätigkeit leitete Edmund Schiessle als Referent und Koordinator Kurse über elektrische Messtechnik in der beruflichen Fort- und Weiterbildung der Fa. Mercedes-Benz AG. Außerdem hielt er als delegierter Lehrbeauftragter Vorlesungen über Sensortechnik an der Fachhochschule Esslingen FHTE im Studiengang MIA-1. Seit März 1991 lehrt Edmund Schiessle als Professor für Grundlagen der Elektrotechnik, elektrische Messtechnik und Sensorik im Studiengang Mechatronik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Aalen.

Weitere Informationen:
www.vbm-fachbuch.de

ISBN 978-3-8343-3341-4

2. Auflage. 2016

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2010 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Umschlaggrafik:

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Die Sensorik (oder Sensortechnik) ist eine Schlüsseltechnologie für fast alle technischen, industriellen und naturwissenschaftlichen Bereiche, in denen elektronisch gemessen, geprüft, überwacht, gesteuert und geregelt wird.

- ❑ Anwendungen finden moderne Sensoren zum einen in der gesamten produzierenden Industrie, z.B. in den Bereichen Automation (oder Automatisierungstechnik) und Industrie-Robotik, industrielle Sicherheitstechnik, technische Qualitätssicherung, physikalische und chemische Verfahrenstechnik, Bio- und Gentechnologie, elektronische Messtechnik und elektronische Steuerungs- und Regelungstechnik.
- ❑ Zum anderen werden sie aber auch in Endprodukten verwendet, z.B. in Fahrzeugen (Straßen-, Schienen-, Wasser-, Luft- und Raumfahrzeugen), Geräten der Unterhaltungselektronik, Haushaltsgeräten, Geräten der Informationstechnik und Geräten der Sicherheitstechnik.
- ❑ Zunehmend an Bedeutung gewinnt die Sensorik in der physikalischen Messtechnik der verschiedensten naturwissenschaftlichen Disziplinen: z.B. der Medizintechnik, im Umweltschutz oder der Mikrosensorik im Zuge einer weiteren Miniaturisierung (Mikromechanik, Mikrooptik und Mikrosystemtechnik).
- ❑ Neuartige physikalische, chemische, elektromechanische (EMS) und mikroelektromechanische Sensoren (MEMS), elektronische Sensoren und Sensorsysteme verwendet die Mechatronik für innovative Produkte mit höchster Funktionalität und Wirtschaftlichkeit.
- ❑ Die Adaptronik benötigt zum Aufbau ihrer kybernetischen Funktionalität strukturintegrierte Aktoren und Sensoren besonders auf mikroelektromechanischer Basis. Diese aktuelle kybernetische Technologie kann sich mit mechanischen Struktursystemen autonom an wechselnde Umgebungsbedingungen anpassen.

Die vorangestellten Übersichten (direkt nach dem Inhaltsverzeichnis), «Geometrische und mechanische Messgrößen und ihre verwendbaren Sensortypen» und «Optische, strahlungstechnische, chemische und biologische Messgrößen und ihre Sensortypen», geben einen wichtigen Überblick zur Identifikation von entsprechenden Sensoren und Messgrößen mit Kapitel- und Abschnittangaben. Über dieses Matrixsystem kann zu jeder Messgröße jeder geeignete Sensortyp, umgekehrt zu jedem Sensortyp jede relevante Messgröße gefunden werden. Die Tabellen wurden aufgrund ihrer Wichtigkeit direkt vor Kapitel 1 gestellt. Die Anforderungsliste in Abschnitt 1.9.2 «Auswahlkriterien für Sensorentwicklungen und Sensoranwendungen» ermöglicht dann abschließend über die Spezifikation eine Endauswahl des für die Lösung der Aufgabenstellung am besten geeigneten Sensors. Das Buch eignet sich damit auch als Nachschlagewerk.

Den verwendeten wissenschaftlichen systematischen Bezeichnungen wurden entsprechende Fachbezeichnungen der Industrie für eine gezielte Internetsuche beige stellt, um im Markt erhältliche Sensoren und ihre Hersteller bzw. Distributoren schnell und gezielt auffinden zu können.

Das Thema eignet sich für Ingenieure und Techniker verschiedenster Fachrichtungen, die sich mit Sensoren in ihrer Fort- und Weiterbildung oder in ihrer aktuellen beruflichen Tätigkeit befassen müssen. Sie finden physikalische Wirkungsweisen, technischen Aufbau, messtechnische Eigenschaften und Sensorelektronik, Technologien, Anwendungsgebiete, durchgerechnete Anwendungsbeispiele und anwendungsbezogene Fehleranalysen sowie Vor- und Nachteile von Messsystemen, Sensoren und Sensorsystemen.

Vertiefungen, Hinweise, Anwendungen, Beispiele und beispielhafte Berechnungen, Vorteile und Nachteile wurden mit entsprechenden Piktogrammen hervorgehoben. Das Buch eignet sich mit seinem klaren modularen Aufbau auch für Studierende in der Ingenieurausbildung zum Bachelor und Master.

Die Darstellung komplexer Sachverhalte wurde so einfach wie möglich gehalten. Weitere Informationen, Aktualisierungen und vertiefende Berechnungen werden über den Onlineservice InfoClick des Verlages kostenfrei angeboten.

Mein Dank gilt allen, die mit Informationen und Anregungen zum Buch beigetragen haben. Dem Verlag danke ich für die stets hervorragende Zusammenarbeit.

Resonanz zum Buch ist mir immer willkommen, weil eine lebendige Wissensvermittlung Forschungs- und Lehrbetrieb immer wieder neu motivieren und inspirieren kann. Den schnellsten Kontakt erfüllt eine E-Mail an:
industriesensorik@vbm-fachbuch.de.

Vorwort zur 2. Auflage

Die 1. Auflage des Fachbuches wurde von der Fachwelt gut angenommen, besonders durch die vielen technisch und mathematisch ausführlich dargestellten Anwendungsbeispiele. Neben der Korrektur von Druck- und Sachfehlern wurde die Neuauflage (2. Auflage) durch fachliche Ergänzungen erweitert. Forschungen und Anwendungsentwicklungen im Bereich der physikalischen, chemischen und biochemischen Sensoren und Sensorsystemen für den industriellen Einsatz sind weiterhin in schnellem Wachstum begriffen. Neben den schon in der 1. Auflage beschriebenen Sensoren, die nach wie vor aus physikalisch-technischen Gründen ihre Einsatzgebiete haben und haben werden, wurden daher Weiterentwicklungen, Entwicklungstrends und Einsatzgebiete von elektromechanischen Sensortypen (EMS), mikroelektromechanischen Sensortypen (MEMS) und nanoelektromechanischen Sensortypen (NEMS) sowie Entwicklungstrends von anderen technologischen Sensortypen kurz dokumentiert. Die Erfahrung zeigt, dass die physikalischen und die chemischen Grundlagen sowie neuentwickelte Werkstoffe wesentlich für Neuentwicklungen von Sensoren als auch für neue Anwendungsbereiche sind. Erweitert und aktualisiert wurden auch die Beschreibung und der Einsatz von intelligenten Sensoren (Smart-Sensoren). Aufgenommen wurde eine kurze einsatzorientierte Zusammenstellung von aktuellen Bussystemen und Sensornetzen. Notwendig wurden Neuaufnahmen und Ergänzungen besonders durch Realisierung einer hochentwickelten, flexiblen und damit komplexen Großserien-Produktion (Industrie 4.0) und einer zunehmend autonomen Robotik und autonomen Fahrzeugtechnik. Die dazu notwendige Automation kann nur durch die Einführung von intelligenten technischen Verfahren – gekennzeichnet durch Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration, Selbstdiagnose, Selbstreparatur und Autokommunikation (Internet der Dinge) – erreicht werden. Eine Schlüsselposition nimmt in diesem Bereich die technologische Vielfalt von Sensoren und Sensorsystemen (Dinge des Internets) ein, die die oben genannten Eigenschaften mindestens teilweise erfüllen. Neu aufgenommen wurde auch ein Kapitel über RFID-Sensorsysteme. Es handelt sich dabei um eine weitere sehr erfolgreiche Entwicklung von „klassischen“ RFID-Systemen mit Sensortechnologien zu sog. RFID-Sensoren oder RFDI-Sensorsystemen. Diese eröffnen erweiterte technische Möglichkeiten mit einer sehr hohen Wirtschaftlichkeit für die Industrie 4.0, die weit über die «einfache» Identifikation von Objekten reicht. RFDI-Sensorsysteme kommen zunehmend in der Industrieproduktion zur dezentral-intelligenten-Steuerung von Maschinen oder Produktionsprozessen zum Einsatz. Aufgenommen wurden außerdem die akustischen Oberwellen-Funksensoren. Sie basieren auf einer Weiterentwicklung der ausgereiften Technologie der älteren Schallwellen-Bausteine. Erfahrungen der letzten Jahre zeigen jedoch, dass ein sinnvoller effektiver und damit kostengünstiger Einsatz von physikalischen, chemischen und biologischen Sensoren und Sensorsystemen unterschiedlichster Technologien, in den diversen interdisziplinären Technologiebereichen der Industrieproduktion, nur mit einer multidisziplinären Denkweise und damit multidisziplinärer Aus- oder Weiterbildung der notwendigen Fachkräfte erfolgreich möglich ist. Ein inhaltlich breiter interdisziplinärer Aufbau wurde schon erfolgreich in der 1. Auflage durch zahlreiche Tabellen, Schemata und Listen von wichtigen Begriffsdefinitionen realisiert. Auch in der Neuauflage wird wieder darauf Wert gelegt, die sehr vielfältigen fachorientierten Denkweisen von Ingenieuren, Technikern, Naturwissenschaftlern und Ärzten der unterschiedlichsten Disziplinen zu überwinden. Ziel der Neuauflage ist es, dass durch ihren interdisziplinären Aufbau den Fachleuten der verschiedensten Disziplinen durch eine praxisorientierte, theoretisch einfache, aber dennoch exakte

Darstellung die vielfältigen sensorischen Technologien und deren Anwendungen verständlich nahezubringen, um diese bei ihrer zunehmend umfangreicheren komplexen Tätigkeit zu unterstützen.

Schorndorf

Edmund Schiessle

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Grundbegriffe der Sensormesstechnik, Sensorfertigung und Sensoranwendung	19
1.1 Systematik der Sensorsignale	19
1.2 Vom Elementarsensor zum Sensorsystem	21
1.3 Sensorterminologie und Sensortechnologie	23
1.4 Messtechnische Begriffe der Sensorik	24
1.5 Messabweichungen für Einzelmesswerte und Messwertverknüpfungen	25
1.5.1 Systematische Messabweichungen bei Einzelmesswerten ...	26
1.5.2 Zufällige Messabweichungen bei Einzelmesswerten	27
1.5.3 Messunsicherheiten	29
1.5.4 Fehlerfortpflanzung von Messabweichungen bei Messungen ..	31
1.6 Messabweichungen bei Messketten	35
1.7 Messtechnische Eigenschaften von Sensoren und Messmitteln	35
1.7.1 Statische Messabweichungen	35
1.7.2 Dynamische Messabweichungen	45
1.7.3 Korrektur statischer und dynamischer Messabweichungen ..	63
1.8 Störsicherheit und Zuverlässigkeit	63
1.9 Praktische Zusammenstellung und Auswahlkriterien für Messgrößen und Sensoren	64
1.9.1 Zusammenstellung von Sensor- und Messgrößenanwendungen	64
1.9.2 Auswahlkriterien für Sensorentwicklungen und Sensoranwendungen	64
2 Mechanoresistive Sensoren	67
2.1 Positionsresistive Sensoren (resistive Aufnehmer / Sensoren)	67
2.1.1 Linearpotentiometer und Winkelpotentiometer	67
2.2 Dehnungsresistive Sensoren (dehnungsresistive Aufnehmer)	74
2.2.1 Metall-DMS und Halbleiter-DMS	75
2.2.2 Piezoresistive mikroelektromechanische Sensoren	102
3 Elektromechanische Induktionssensoren	113
3.1 Induktionsspulensensor (Pick-up) (Induktionssensor)	114
3.2 Schwingenspulensensor (Schwingspule)	120
3.3 Magnetflussspulensensoren	123
3.4 Differentialtransformator (LVDT: linearer variabler Differentialtransformator)	126
3.5 Resolver	133
3.6 Inductosyn	133
4 Elektromechanische Induktivsensoren	135
4.1 Längsanker-1-Spulen-Sensor (Längsankeraufnehmer, induktiver Wegsensor, Wegaufnehmer)	137
4.2 Längsanker-Differenzspulensensor (Längsanker-Differenzwegaufnehmer)	138
4.3 Queranker-1-Spulen-Sensor (Querankeraufnehmer)	148

4.4	Queranker-Differenzspulensensor (Differential-Querankeraufnehmer, Differential-Queranker-Geber) . . .	150
5	Elektromechanische Wirbelstromsensoren	155
5.1	Längsanker-Wirbelstromsensor (Wirbelstrom-Längsankersensor) . . .	155
5.2	Queranker-Wirbelstromsensor (Wirbelstrom-Querankeraufnehmer) .	156
6	Induktive Positionssensoren (Näherungsschalter/Initiatoren)	159
6.1	Induktive Initiatoren	160
6.2	Wirbelstrominitiatoren	161
7	Magnetfeldsensoren	171
7.1	WIEGAND-Sensoren und Impulsdrähte	171
7.2	Magnetfeldsensoren mit amorphen Metallen	175
7.2.1	Magnetfeldpositionssensoren	176
7.3	Galvanomagnetische Sensoren	182
7.3.1	Galvanomagnetische Effekte und Technologien	182
7.3.2	HALL-Sensoren und HALL-Differenzsensoren	184
7.3.3	Magnetoinduktions-Durchflusssensoren (MID)	196
7.3.4	Feldplatte (FP) und Differenzfeldplatte (FFP)	201
7.4	XMR-Sensoren	209
7.4.1	IMR-Sensoren (isotrope magnetoresistive Sensoren)	210
7.4.2	AMR-Sensoren ohne Strukturgeometrie	211
7.4.3	AMR-Sensoren mit Strukturgeometrie	213
7.4.3.1	AMR-Sensoren mit BARBER-Pol-Strukturgeometrie (Version BARBER-Pole) (AMR-Sensoren mit BARBER-Polen, BARBER-Pol-Sensor, Widerstandsstreifen mit BARBER-Polen)	213
7.4.3.2	AMR-Sensoren mit speziell optimierter Barber-Pol-Strukturgeometrie (Version Pseudo-HALL) (Pseudo-HALL-Sensoren) . . .	217
7.4.4	GMR-Sensoren	226
7.4.5	GMI-Sensoren	238
7.4.6	CMR-Sensoren	239
7.4.7	TMR-Sensoren	239
7.4.8	Nanomagnetfeldsensoren (Nanosensoren)	240
7.5	SQUID-Sensoren	240
8	Reedsensoren	243
9	Magnetoelastische Sensoren	253
9.1	Magnetoelastischer Effekt und Technologie	253
9.2	Pressduktoren	254
9.3	Magnetoelastisch-induktive Kraftelementarsensoren (magnetoelastische Kraftsensoren / Kraftaufnehmer)	254
9.4	Magnetoelastische Druckelementarsensoren (magnetoelastische Drucksensoren / Druckaufnehmer)	255
9.5	Magnetoelastische Drehmomentelementarsensoren (magnetoelastische Drehmomentsensoren / Drehmomentaufnehmer) . . .	256
10	Kapazitive Sensoren	265
10.1	Kapazitive EMS-Sensoren	265
10.1.1	Kapazitive EMS-Differenzwegsensoren (kapazitive Wegsensoren)	266

10.1.2	Kapazitive EMS-Drucksensoren (kapazitive Drucksensoren)	267
10.1.3	Kapazitive EMS-Füllstandsensoren (kapazitive Füllstandsensoren)	268
10.1.4	Kapazitive MEMS-Näherungsschalter (kapazitive Näherungsschalter)	270
10.1.5	Elektrische und elektronische Schaltungen für kapazitive Elementarsensoren	271
10.2	Kapazitive MEMS-Sensoren	276
10.2.1	Kapazitive MEMS-Drucksensoren	277
10.2.2	Kapazitive MEMS-Beschleunigungssensoren	279
10.3	Applikationsbeispiele abgewandelter MEMS-Sensortypen	286
10.3.1	Kapazitive MEMS-Vibrationselementarsensoren	287
10.3.2	Kapazitive MEMS-Neigungswinkelsensoren (Inklinometer) (kapazitive Neigungswinkelsensoren, MEMS-Inclinometer)	287
10.3.3	Kapazitive MEMS-Drehratensensoren (Gyroskope) (kapazitive Drehratensensoren, kapazitives monolithisches Gyroskop, mikromechanische Inertialsensoren, Gyrometer) ...	289
10.3.4	EMS-Mikrofone (MEMS-Schallsensoren)	296
11	Piezoelektrische Sensoren	299
11.1	Physikalische, mathematische, technologische und messtechnische Grundlagen	299
11.2	Technische Bauformen von piezoelektrischen Elementarsensoren ...	305
11.2.1	Piezoelektrische Kraftelementarsensoren (piezoelektrische Kraftsensoren / Kraftaufnehmer)	305
11.2.2	Piezoelektrische Druckelementarsensoren (piezoelektrische Drucksensoren / Druckaufnehmer)	306
11.2.3	Piezoelektrische Beschleunigungselementarsensoren (piezoelektrische Beschleunigungssensoren / Beschleunigungsaufnehmer)	306
11.3	Elektronische Auswerteschaltungen für piezoelektrische Elementarsensoren	308
11.3.1	Spannungsverstärker (Elektrometerverstärker)	308
11.3.2	Ladungsverstärker	309
11.3.3	ICP-Sensoren	311
11.4	Technische Datenbeispiele ausgewählter piezoelektrischer Sensoren .	312
12	Optische und optoelektronische Sensoren	321
12.1	Optische und elektrophysikalische Grundlagen	321
12.2	Photoelektrische Effekte	321
12.3	Sensoreffekte	325
12.4	Photozelle (Vakuumpphotozelle)	325
12.5	Photomultiplier (Sekundär-Eelektronenvervielfacher)	327
12.6	Photowiderstand (photoresistiver Elementarsensor)	328
12.7	Photodioden und Photoelemente	331
12.7.1	PN-Photodioden	331
12.7.2	Photoelemente	333
12.8	Positionempfindliche Photodioden (PSD – Position Sensitive Detector)	335
12.8.1	Lateraleffekt-PSD (Lateraleffekt-Photodiode)	336
12.8.2	Segmentierte PSD (segmentierte Photodiode)	338

12.9	Bildsensoren (CCD, CMOS)	338
12.9.1	CCD-Bildsensoren	339
12.9.2	CCD-Farbsensoren	340
12.9.3	Weiterentwicklungen	340
12.10	Lichtwellenleiter (LWL) (Glasfasern)	340
12.10.1	Lichtwellenleitertypen (Multimode, Monomode, geometrisch)	341
12.11	Optische und optoelektronische Sender	344
12.11.1	Glühlampen und Metaldampflampen	344
12.11.2	Lichtemittierende Dioden (LED)	345
12.11.3	Halbleiterdiodenlaser (Injektionslaser)	346
12.12	Optische und optoelektronische Anwendungen	347
12.12.1	Lichtschranken	347
12.12.2	Reflexastköpfe (Reflexlichtschranken, optische Reflexastköpfe)	349
12.12.3	Störunterdrückung bei Lichtschranken und Tastköpfen	349
12.12.4	Lasertriangulationssensoren	350
12.12.5	Inkrementale Messeinrichtungen (Weg, Winkel, Drehzahl) (inkrementale Sensoren, incremental length or angle measuring device)	351
12.12.6	Hybridoptische Sensoren (Abstand, Druck, Füllstand)	353
12.13	Faseroptische Sensoren (Monomode, 2-Strahl-Interferometer, Kreisel)	356
12.13.1	Monomodesensorik	357
12.13.2	2-Strahl-Interferometer (MICHELSON, MACH-ZEHNDER, Kreisel) (Zweistrahlintferferometer)	358
13	Temperatursensoren	367
13.1	Kontaktthermometrie	367
13.1.1	Temperaturmessung in und an Festkörpern	367
13.1.2	Temperaturmessung in Flüssigkeiten	368
13.1.3	Temperaturmessung in Gasen und Dämpfen	368
13.2	Kontaktthermometrische Sensoren	368
13.2.1	Thermoresistive Metallsensoren (Metallwiderstandsthermometer) (thermoresistive Sensoren, Widerstandsthermometer)	369
13.2.2	Thermoelektrische Sensoren (Thermoelemente)	378
13.3	Strahlungsthermometrie	391
13.3.1	Gesamtstrahlungs-pyrometer	391
13.3.2	Teilstrahlungs-pyrometer	392
14	Schallsensoren (Schallmikrofon)	393
14.1	Allgemeine Grundlagen	393
14.1.1	Physikalische Einteilung der Schallfrequenzbereiche	393
14.1.2	Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Schalls in verschiedenen Medien	393
14.1.3	Schallfeld	394
14.2	Hörschallsensoren (Luftschallsensoren)	397
14.2.1	Elektrodynamische Hörschallsensoren (elektrodynamisches / dynamisches Mikrofon)	398
14.2.2	Elektromagnetische Hörschallsensoren (dynamisches Luftschallmikrofon)	401

14.2.3	Elektrostatistische Hörschallsensoren (Kondensatormikrofon) Kondensatormikrofone (elektrostatistischer Schallsensor)	402
14.2.4	Piezoelektrische Hörschallsensoren (piezoelektrisches Mikrofon / Piezomikrofon)	409
14.3	Spezielle Schallsensoren	412
14.3.1	Körperschallsensoren	412
14.3.2	Wasserschallsensoren (Hydrophone)	413
14.4	US-Sensoren (Ultraschallsensoren)	414
14.4.1	US-Abstandssensoren (Ultraschall-Abstandssensoren)	415
14.4.2	US-Füllstandssensoren (Ultraschall-Füllstandssensoren)	419
14.4.3	US-Durchflusssensoren (Ultraschall-Durchflusssensoren)	421
14.4.4	US-Volumenstrommessung	424
14.4.5	Akustische und US-Mikroskope (Ultraschall-Mikroskope)	425
15	Pneumatische Sensoren	427
15.1	Staudrucksensoren (Staudüsen) (pneumatische Staudruckgeber)	427
15.2	Ringstrahlsensoren (Ringstrahldüsen)	428
15.3	Pneumatische Luftschranksensoren (Luftschanke)	429
16	Kerntechnische Strahlungssensoren (kernphysikalische Sensoren)	433
16.1	Sicherheitstechnik	439
16.2	Kernstrahlungsdetektoren (Kernstrahlungssensoren) in der Technik	441
16.2.1	Ionisationskammern	441
16.2.1.1	Ionisationskammer mit Strombetrieb (Stromionisationskammer)	441
16.2.1.2	Ionisationskammer mit Impulsbetrieb (Impulsionisationskammer / -Detektor)	443
16.2.2	Zählrohre	446
16.2.2.1	Proportionalzählrohr	446
16.2.2.2	GEIGER-MÜLLER-Zählrohr (GM-Zählrohr)	449
16.2.3	Halbleiterstrahlungssensoren (Halbleiterdetektoren) (Halbleiterzähler)	454
16.2.3.1	Ge(Li)-Sensor und HPGe-Sensor (-Detektor / -Zähler)	454
16.2.3.2	Volumensperrschicht-Halbleitersensor (Sperrschichtdetektor)	455
16.2.3.3	Oberflächensperrschicht-Halbleitersensor mit pn-Übergang (pn-Oberflächensperrschichtdetektor / -Zähler)	456
16.2.4	Szintillationszähler (Szintillationssensoren)	460
16.3	Zusammenstellung der messtechnischen Eigenschaften und Strahlungssensoren	467
17	Chemosensoren (chemische Sensoren)	469
17.1	Chemische, physikalische und messtechnische Grundbegriffe und Grundlagen	469
17.2	Leitfähigkeitssensoren für Flüssigelektrolyte	474
17.2.1	Konduktive 2-Elektroden-LF-Sensoren für Flüssigelektrolyte (konduktive Sensoren, LF-Sensoren)	478
17.2.2	Konduktive 4-Elektroden-LF-Sensoren für Flüssigelektrolyte (konduktive Sensoren, LF-Sensoren)	483
17.2.3	Kontaktfreie, elektrodenlose LF-Induktionssensoren für Flüssigelektrolyte (induktive LF-Sensoren)	485

17.3	Konzentrationssensoren mit ionenselektiven Elektroden für Flüssigelektrolyte (ionenselektive Sensoren)	488
17.3.1	pH-Wert-Sensor mit protonenselektiver Glasmembran (pH-(sensitive) Glasmembran, pH-Meter, pH-Sonden)	494
17.3.2	Konzentrationssensoren mit ionenselektiven Festkörpermembranelektroden (ionenselektive Elektroden)	505
17.3.3	Konzentrationssensoren mit ionenselektiven Flüssigmembranelektroden (ionenselektive Sensoren)	508
17.3.4	Ionenselektive Feldeffekttransistoren (ISFET)	510
17.3.4.1	Messverfahren	516
17.3.4.2	Nicht elektrochemische Sensoren zur pH-Wert-Messung	516
17.4	Redoxpotentialsensoren	516
17.5	Gassensoren	523
17.5.1	Elektrochemische Gassensoren	523
17.5.1.1	Elektrochemische 2- und 3-Elektroden-Zellen (elektrochemische Zwei- und Drei-Elektrodenzelle)	524
17.5.1.2	CLARK-Elektrode	528
17.5.2	Elektronische Gassensoren (Halbleitergassensoren)	531
17.5.2.1	Metalloxid-Halbleitergassensoren	531
17.5.3	Pellistorsensoren (Pellistoren)	539
17.5.4	Metallisolatorgassensoren (metal oxide-based gas sensor, isolated gas sensor)	543
17.5.5	Festkörperelektrolyt-Gassensoren (Festkörper-Gassensoren, Festelektrolyt-Gassensoren)	548
17.5.5.1	NERNST-Sonde (Sauerstoffsensor)	549
17.5.5.2	Lambdasonden	550
18	Feuchtesensoren (Feuchtigkeitsensoren)	557
18.1	Grundbegriffe	557
18.2	Messprinzipien für Feuchtesensoren	558
18.2.1	Chemische Messprinzipien	558
18.2.2	Physikalische Messprinzipien	558
18.3	Messgrößen in der Feuchtemesstechnik	558
18.3.1	Messgrößen für gasförmige Stoffe	558
18.3.2	Messgrößen für flüssige und feste Stoffe	559
18.3.3	Kalibrierung	560
18.4	Messen mit Feuchtesensoren	560
18.4.1	KEIDEL-Messzelle (coulometrischer Feuchtesensor)	561
18.4.2	Lithiumchlorid-(LiCl)-Feuchtesensor	563
18.4.3	Resistive Feuchtesensoren (resistive Keramikhygrometer)	566
18.4.4	Kapazitive Feuchtesensoren	567
18.4.5	Prozesshygrometer	569
18.4.6	Handmessgerät zur Messung von relativer Luftfeuchte und Temperatur	569
18.4.7	Feuchtesensor für den Hochtemperatureinsatz	570
19	Biosensoren (biologische Sensoren)	573
19.1	Grundbegriffe	573
19.2	Systematik der Biosensoren	573
19.2.1	Biophysikosensoren (biophysikalische Sensoren)	574
19.2.2	Biochemosensoren (biochemische Sensoren) (biochemische Sensoren auf Basis enzymatischer Katalyse)	574

19.2.3 Bioelektroniksensoren (bioelektronische Sensoren) (ionensensitive Feldeffekttransistoren – ISFET)	575
19.3 Sensortechnische Applikationen	578
20 Intelligente Sensoren (Smart-Sensoren)	583
21 Bussysteme, Schnittstellen, Sensornetze	585
22 RFIDS-System	589
22.1 RFID-System	589
22.2 RFIDS-System	591
22.3 Mikrowellen-Transponder	596
23 Akustische Wellensensoren (AW-Sensoren, «acoustic wave»)	597
23.1 SAW-Sensoren ohne Funktechnologie	597
23.1.1 SAW-Sensoren mit Verzögerungsleitungs-Strukturen	598
23.1.2 SAW-Sensoren mit Resonator-Strukturen	600
23.2 SAW-Sensoren mit Funktechnologie	601
23.2.1 SAW-Funkelementarsensoren mit selektiven Reflektoren ...	602
23.3 Chemische und biologische SAW-Mikrosensoren	604
23.4 Anwendungsbeispiele	605
24 Micro Energy Harvesting (MEH) in der Sensorik	609
25 Weiterentwicklungen von Sensoren und Trends	611
25.1 Entwicklungstrends spezieller elektromechanischer Sensortypen (EMS)	611
25.2 Entwicklungstrends anderer technologischer Sensortypen	611
26 Sensorik in der Industrie 4.0	615
Weiterführende Literatur	617
Patentschriften des Autors	619
Stichwortverzeichnis	623

Übersicht Geometrische und mechanische Messgrößen und ihre verwendbaren Sensortypen

Sensoren für geometrische, mechanische und thermische Messgrößen						
Sensoren	Resistive Sensoren	Reaktive Sensoren	C (Kapazität)	Spannungsgesteuerte Sensoren	Stromgesteuerte Sensoren	Ladungsgesteuerte Sensoren
Messgrößen	R (Widerstand)	L (Induktivität)		U (Spannung)	I (Strom)	Q (Ladung)
Position, Weg, Füllstand, Winkel, Neigung, Horizont, Linear-/Winkel-Geschwindigkeit	Mechanoresistive Sensoren (⇒ 2.2.1.1) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.3.4, 7.4) Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.6)	Induktivsensoren (⇒ 4.4.1/4) Wirbelstromsensoren (⇒ 5.5.1/2) Induktive Positionsensoren (⇒ 6.6.1/2) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.2)	Kapazitive Sensoren (⇒ 10.10.1.1) (⇒ 10.1.3/4) (⇒ 10.3.2/3)	Induktionssensoren (⇒ 3.3.4) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.3.2) Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7.2)	Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7.1) (⇒ 12.12.8.1/2) (⇒ 12.12.9.1/3)	Kerntechnische Sensoren (⇒ 16.16.2.1/4) (⇒ 16.16.3) Ultraschallsensoren (⇒ 14.4.14.4.1/4)
Linear-/Winkel - Beschleunigung, Vibration, Schwingwege	Mechanoresistive Sensoren (⇒ 2.2.1/2) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.3.4) (⇒ 7.7.4.1/4)	Induktivsensoren (⇒ 4.4.1/4) Wirbelstromsensoren (⇒ 5.5.1/2) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.2)	Kapazitive Sensoren (⇒ 10.10.1.4) (⇒ 10.10.3.3) RFID-Sensoren (⇒ 22.22.2)	Induktionssensoren (⇒ 3.3.2/4/5/6) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.3.2)	Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7.1) (⇒ 12.12.8.1) (⇒ 12.12.13.2)	SAW-Sensoren (⇒ 23.23.4)
Drehzahl, Impulse, Frequenz	Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.3.4) (⇒ 7.7.4.1/4)	Induktive Positionsensoren (⇒ 6.6.1/2) Wirbelstromsensoren (⇒ 5.5.1/2) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.2)	Kapazitive Sensoren (⇒ 10.10.1.4) (⇒ 10.10.3.3) RFID-Sensoren (⇒ 22.22.2)	Induktionssensoren (⇒ 3.3.1/5/6) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.3.2) Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7.2)	Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7.1) (⇒ 12.12.8.1/2) (⇒ 12.12.9.1/3)	Induktionssensoren (⇒ 3.3.1) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.1)
Kraft, Gewicht, Druck, Dehnung	Mechanoresistive Sensoren (⇒ 2.2.2) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.2, 7.3.2/4, 7.4.1/4)	Induktivsensoren (⇒ 4.4.1/4) Magnetoelastische Sensoren (⇒ 9.9.2/4)	Kapazitive Sensoren (⇒ 10.10.1.2) (⇒ 10.10.2/2.1)	Magnetoelastische Sensoren (⇒ 9.9.2) Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7.2, 12.13)	Optoelektronische Sensoren (⇒ 1.2, 12.7.1) (⇒ 1.2, 12.8.1)	SAW-Sensoren (⇒ 23.23.4)
Drehmoment	Mechanoresistive Sensoren (⇒ 2.2.2) Magnetoresistive Sensoren (⇒ 7.7.3.4, 7.4)	Magnetoelastische Sensoren (⇒ 9.9.5) Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.3.2)	Kapazitive Sensoren (⇒ 10.10.1.1)	Magnetoelastische Sensoren (⇒ 9.9.5) Induktionssensoren (⇒ 3.3.1)	Optoelektronische Sensoren (⇒ 1.2, 12.7.1) (⇒ 1.2, 12.8.1)	Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.1) Magnetoelastische Sensoren (⇒ 9.9.5) Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7)
Durchfluss, Strömungs-Geschwindigkeit				Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.3.3) Ultraschallsensoren (⇒ 14.4, 14.4.4)	Piezoelektronische Sensoren (⇒ 11, 11.2.1/3)	Magnetfeldsensoren (⇒ 7.7.1) Magnetoelastische Sensoren (⇒ 9.9.5) Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.7)
Hörschall und Ultraschall			Hörschallsensoren (⇒ 14.2, 14.2.3)	Hörschallsensoren (⇒ 14.2, 14.2.1) Hörschallsensoren (⇒ 14.2, 14.2.2)	Hörschallsensoren (⇒ 14.2, 14.2.4) Ultraschallsensoren (⇒ 14, 14.4)	Ultraschallsensoren (⇒ 14.4, 14.4.4/5)
Dichte, Massenbelegung, Temperatur und Wärmestrahlung (IR-Strahlung)	Temperatursensoren (⇒ 13.13.2.1)		RFID-Sensoren (⇒ 22.22.2)	Induktionssensoren (⇒ 3.3.1, 3.3) Temperatursensoren (⇒ 13.13.2.2) Strahlungsthermometer (⇒ 13.13.3.1/2)	Optoelektronische Sensoren (⇒ 12.12.13)	SAW-Sensoren (⇒ 23.23.4)

Legende: ⇒ Verweise auf Kapitel und Abschnitte im Buch

Übersicht Optische, strahlungstechnische, chemische und biologische Messgrößen und ihre Sensortypen

Sensoren Messgrößen	Sensoren für thermische, strahlungstechnische, chemische und biologische Messgrößen					Ladungssensoren Q (Ladung)	Oszillatorische Sensoren f (Frequenz), t (Zeit) N (Impulse)
	Konduktometrische Sensoren G (Leitfähigkeit), R (Widerstand)	Reaktive Sensoren C (Kapazität)	Potentiometrische Sensoren U (Spannung)	Anperometrische Sensoren I (Strom)			
Feuchte	Feuchtesensoren (\Rightarrow 18)	Feuchtesensoren (\Rightarrow 18, 18.4)			Feuchtesensoren (\Rightarrow 18, 18.2.1/2)		
Triebung, Helligkeit, Licht, Farbwert	Optoelektronische Sensoren (\Rightarrow 12, 12.6)		Optoelektronische Sensoren (\Rightarrow 12, 12.4, 12.7.2, 12.8)		Optoelektronische Sensoren (\Rightarrow 12, 12.7/8/9/13)	Optoelektronische Sensoren (\Rightarrow 12, 12.9)	
Ionen-Aktivität und Ionen-Konzentration in Gasen	Chemische Sensoren (\Rightarrow 17, 17.5.2.1) (\Rightarrow 17, 17.5.3/4) (\Rightarrow 17, 17.5.5)		Chemische Sensoren (\Rightarrow 17, 17.5.1/2) (\Rightarrow 17, 17.5.5)		Chemische Sensoren (\Rightarrow 17, 17.5.1.1/2) (\Rightarrow 17, 17.5.5)		
Ionen-Aktivität und Ionen-Konzentration in Flüssigkeiten pH-Wert	Chemische Sensoren (\Rightarrow 17, 17.2.1/2)		Chemische Sensoren (\Rightarrow 17, 17.2.3), (\Rightarrow 17, 17.3.2/3) Chemische Sensoren (\Rightarrow 17.3, 17.3.1)		Chemische Sensoren (\Rightarrow 17, 17.3.4), (\Rightarrow 17, 17.4)		
Ionisierende Strahlung			Kerntechnische Sensoren (\Rightarrow 16, 16.2.1.2)				Kerntechnische Sensoren (\Rightarrow 16, 16.2.1/4)
UV-Strahlung							
Konzentration Biomoleküle	Biologische Sensoren (\Rightarrow 19, 19.2.1)		Optoelektronische Sensoren (\Rightarrow 12, 12.7.2)		Optoelektronische Sensoren (\Rightarrow 12, 12.7.1)		
			Biologische Sensoren (\Rightarrow 19, 19.2.2/3)		Biologische Sensoren (\Rightarrow 19, 19.2.2/3)		SAW-Sensoren (\Rightarrow 23, 23.3)

Legende: \Rightarrow Verweise auf Kapitel und Abschnitte im Buch

1 Grundbegriffe der Sensormesstechnik, Sensorfertigung und Sensoranwendung

Die Sensortechnik (Sensorik) entwickelt die Messmittel (Sensoren) zur Messung (Sensierung) von statischen und zeitvariablen elektrischen und nicht elektrischen, technischen und natürlichen Zustandsgrößen und Signalen.

Das Fachgebiet **Sensorik** lässt sich unterteilen in die Bereiche **Sensorphysik** (Entwicklung und Konstruktion von Sensoren auf naturwissenschaftlich technischer Basis), **Sensortechnologie** (Fertigung von Sensoren mit neuen Werkstoffen und aktuellen Produktionsverfahren) und **Sensorelektronik** (Signalanpassung, Signalumformung und Signalauswertung). Unter dem Begriff **Sensormesstechnik** (Messwert-erfassung) werden **Sensoranwendung zur Gewinnung von Informationen** (Messwerten und Signalen) über den jeweiligen **physikalischen Zustand** (z.B. Druckverhältnisse) von **natürlichen Systemen** (z.B. Herz-Kreislauf-System) und von **technischen Systemen** (z.B. Verbrennungsmotoren) oder **technischen Prozessen** (z.B. die chemische Synthese von Ammoniak) verstanden.

Vielseitige Anwendung finden die **unterschiedlichsten Sensorarten**, für die Erfassung der unterschiedlichsten **physikalischen, chemischen und biologischen Zustandsgrößen und Signalen** in der *Automatisierungstechnik* (Automation), in der *Verfahrenstechnik*, in der *Mechatronik*, in der *Medizintechnik*, in der *Robotik*, im *Umweltschutz*, in der modernen *Messtechnik* und in der *Steuerungs- und Regelungstechnik*, um nur die wichtigsten zu nennen.

1.1 Systematik der Sensorsignale

Der Sensor als technisches Bauteil erzeugt aus einem elektrischen oder nicht elektrischen Eingangssignal ein elektrisches Ausgangssignal (Bild 1.1a). Der physikalische Signalträger ist eine elektrische Spannung oder Strom und der Informationsparameter ist die Amplitude oder die Frequenz des Spannungssignals oder des Stromsignals.

Eine zeitliche Folge von Messwerten (Zustandsgrößen) nennt man Signal. Das Signal stellt also eine zeitvariable physikalische Zustandsgröße (z.B. Druck, Temperatur, Beschleunigung, Kraft usw.) eines technischen Prozesses oder Systems dar (Bild 1.1b). Die Sensorsignale können wie folgt eingeteilt werden:

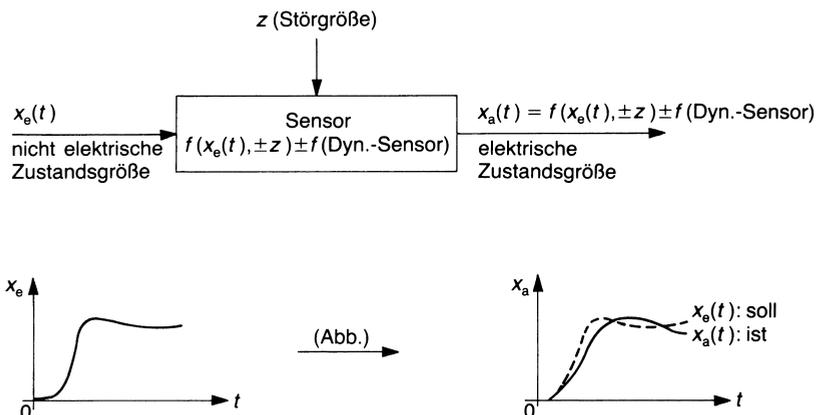


Bild 1.1a Funktion des Sensors

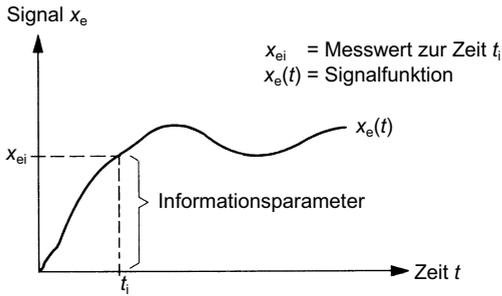


Bild 1.1b
Zeitverlauf eines Signals

Deterministische Signale

Sie sind analog und daher im gesamten Messbereich zeitkontinuierlich. Man unterscheidet:

- statische Signale (Bild 1.2),
- dynamische Signale (Bild 1.3),
- Signalgemische (Bild 1.4).

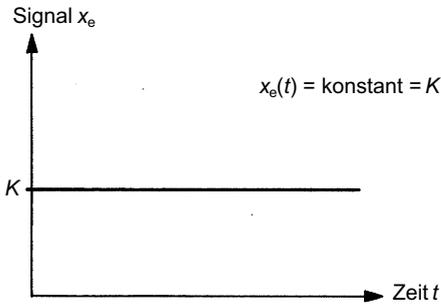


Bild 1.2 Statisches Signal

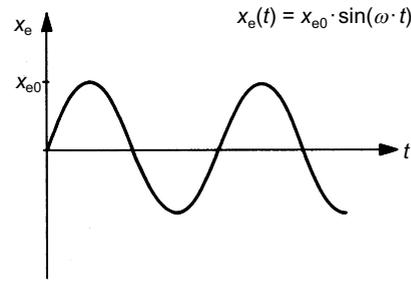


Bild 1.3 Dynamisches Signal

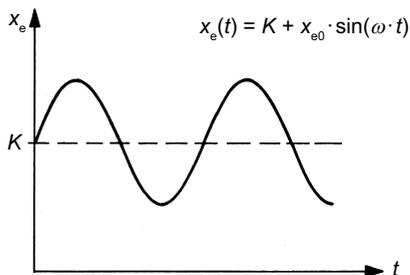


Bild 1.4
Signalgemisch

Diskrete Signale

Sie sind nur amplitudendiskret oder nur zeitdiskret oder beides. Man unterscheidet:

- amplitudenquantisierte Signale (Bild 1.5),
- amplituden- und zeitquantisierte Signale (Bild 1.6),
- digitale Signale (Bild 1.7).

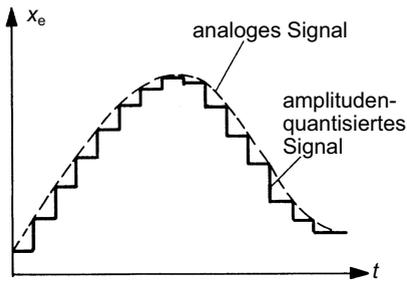


Bild 1.5 Amplitudenquantisiertes Signal

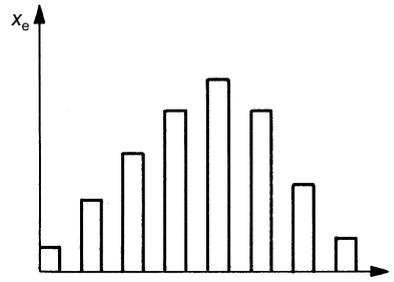
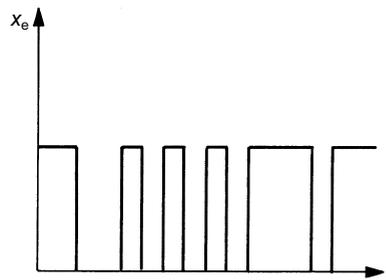


Bild 1.6 Amplituden- und zeitquantisiertes Signal

Bild 1.7
Digitales Signal

Stochastische Signale

Sie haben einen regellosen zufällig schwankenden Signalverlauf. Rein stochastische Signale sind nur mit statistischen Methoden auswertbar.

Signalgemische

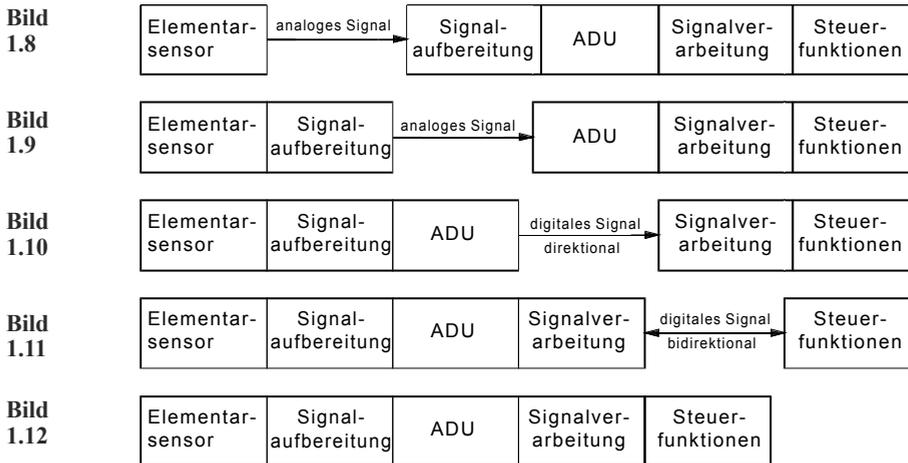
Sie bestehen aus einem Gemisch von deterministischen und stochastischen Signalformen. In der Praxis treten deterministische Signalformen oft mit einem stochastischen Anteil (Rauschen) auf. Rauschen ist i.Allg. unerwünscht und muss mit elektronischen Mitteln unterdrückt werden. Sensoren und Signalverarbeitungselektroniken mit einem geringen Eigenrauschen werden für die Erfassung sehr kleiner Signale eingesetzt. Es ist Aufgabe der Informationsverarbeitung, diese Signale auszuwerten. Die Informationstheorie beschreibt die theoretischen Grundlagen zur richtigen Verarbeitung von elektrischen Sensorsignalen mit elektronischen Mitteln.

1.2 Vom Elementarsensor zum Sensorsystem

Die Unterscheidung der technischen Baueinheiten erfolgt nach technischer Funktion und Komplexität (Bilder 1.8 bis 1.12):

Elementarsensor (oder Messwertaufnehmer) (Bild 1.8)

Er besteht aus einem mechanischen Umsetzelement und einem elektrischen Sensorelement. Die analoge Messsignalübertragung ermöglicht eine örtliche Trennung von Elementarsensor und Sensorelektronik, ein großer Vorteil bei sehr hohen Messobjekttemperaturen.



Bilder 1.8 bis 1.12 Entwicklung vom Elementarsensor zum Sensorsystem



Beispiel 1.1 Elementarsensor

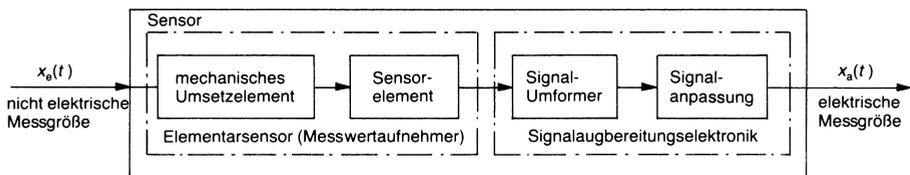
Eine nicht elektrische Messgröße (z.B. mechanische Kraft) wird von einem mechanischen Umsetzelement (z.B. Biegebalken) aufgenommen und in eine andere mechanische Größe (z.B. mechanische Dehnung) umgesetzt. Ein Sensorelement (z.B. Dehnmessstreifen) erzeugt aus der mechanischen Größe (z.B. Dehnung) eine elektrisch auswertbare Größe (z.B. eine elektrische Widerstandsänderung).

Sensor (Bild 1.9)

Er besteht aus einem Elementarsensor und einer Signalaufbereitungselektronik, bestehend aus einem elektrischen Signalumformer und einer elektronischen Signalanpassung.



Beispiel 1.1a Sensor (Bild 1.13)



- a) Mechanisches Umsetzelement : Membran, Biegebalken, seismische Masse usw.
 b) Sensorelement : Induktivität, Kapazität, DMS, Piezokeramik usw.
 c) Signalaufbereitungselektronik

Bild 1.13 Blockschaftbild des Sensors

Der Elementarsensor setzt eine nicht elektrische Messgröße (z.B. mechanische Kraft) in eine elektrisch auswertbare Größe (z.B. elektrischer Widerstandsänderung) um. Ein elektrischer Signalumformer (z.B. elektrische Widerstandsmessbrücke) setzt

die elektrisch auswertbare Größe (Widerstandsänderung) in eine elektrische Größe (elektrische Spannung) um. Eine elektronische Signalanpassung (z.B. Gleichspannungsverstärker) erzeugt den gewünschten Spannungswert, der dann elektronisch weiter verarbeitet werden kann.

Intelligenter Sensor (Bild 1.10)

Er besteht aus einem Sensor und einem Digital-Analog-Umsetzer (ADU). Während bisher die analoge störanfällige Signalübertragung zwischen Sensor und Messelektronik erfolgte, ist jetzt eine wenig störanfällige parallele oder serielle digitale Messwertübertragung möglich.

Sensorsystem (Bild 1.11)

Es besteht aus einem intelligenten Sensor und einer Steuerelektronik mit serieller Schnittstelle zur digitalen bidirektionalen Messsignalübertragung.

Roboter (Bild 1.12)

Er ist eine autonome technische Baueinheit, die definierte Aufgaben adaptiv verrichtet. Der Roboter besteht aus Mechanik, Sensoren, softwaregestützter Elektronik und Aktoren.

1.3 Sensorterminologie und Sensortechnologie

Die technologische Basis der Sensoren (früher Fühler, Geber, Detektoren usw.) war bis ca. 1980 die Feinwerktechnik (Feinmechanik und Elektromechnik). Man sprach damals allgemein von «elektromechanischen Messmitteln» und analog von der «elektrischen Messtechnik mechanischer Größen». Mit Verbreitung der Siliziumtechnologie ab ca. 1970 wurden Messwertaufnehmer (ersetzte damals den Begriff Geber) auf Si-Halbleiterbasis entwickelt, z.B. HALL-Elemente, Feldplatten (auch GAUß-Elemente genannt), piezoresistive Dehnmessstreifen und piezoelektrische Messwertaufnehmer. Bis zu diesem Zeitpunkt waren Messwertaufnehmer und Messelektroniken noch getrennte technische Einheiten. Erst mit der raschen Entwicklung der Mikroelektronik, ab ca. 1970, begann der Prozess der Integration von Halbleiternaufnehmern mit der Mikroelektronik zu Sensoren auf IC-Basis. Der Begriff Sensor war geboren und zunächst ein synonyme Begriff zum Messwertaufnehmer. Erst Ende 1980 wurde für den Messwertaufnehmer der neue Begriff Elementarsensor und für die Messelektronik der neue Begriff Sensorelektronik vorgeschlagen. Der Sensor bestand also aus dem Elementarsensor vereint mit der Sensorelektronik als Hybrid in einem Gehäuse oder später auch als monolithischer Baustein oder «*System on Chip*» (kurz SoC). Nach 1990 entwickelten die mikromechanischen Technologien auf Siliziumbasis die Mikromechanik. Aus multitechnischen Systemen entwickelte sich die Mikrosystemtechnik mit den Teilgebieten Mikromechanik, Mikroelektronik und Mikrooptik. Ca. seit dem Jahr 2000 nennt man dieses Gebiet auch Mikromechatronik. Die schon aus der Anfangszeit der Sensortechnik (später Sensorik genannt) bekannten physikalischen Grundprinzipien (z.B. mechanische, resistive, magnetische, reaktive und optische Prinzipien) wurden auf die neuen Technologien übertragen. Ca. ab Mitte 1990 wurden monolithisch integrierte MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems* oder in Deutsch: mikroelektromechanische Systeme) auf einem Chip auf CMOS-Basis entwickelt und hergestellt. Die weitere Miniaturisierung und zunehmende «Intelligenz» in den Sensorsystemen prägen die aktuelle Entwicklung der «MEMS-Technologie». So werden heute Sendeelektroniken in die Sensorsysteme integriert und damit Messwerte oder Messsignale per Funk zu einem PC übertragen.

1.4 Messtechnische Begriffe der Sensorik

Grundbegriffe

❑ Messen

ist ein technischer Vorgang, bei dem ein spezieller Wert (= Messwert) einer physikalischen Größe (= Messgröße) an seinem Standort (= Messort) als Teil eines Vielfachen eines Bezugswertes (= Maßeinheit) quantitativ mit begrenzter Genauigkeit (= Messabweichung) erfasst wird.

❑ Messprinzip

nennt man den charakteristischen physikalische Effekt, der für die technische Durchführung der Messung benutzt wird. Es wird nach seinem physikalischen Effekt benannt.

Erklärung:

Die aktuelle Temperatur (= Messgröße) der elektrischen Feldwicklung eines E-Motors (= Messobjekt) auf einem Prüfstand (= Messort) kann z.B. mit Hilfe des thermoelektrischen Effektes gemessen werden (= thermoelektrisches Messprinzip).

❑ Messverfahren

heißt die praktische Anwendung des Messprinzips. Eine Messung kann mit dem gleichen Messprinzip nach verschiedenen Messverfahren durchgeführt werden.

Erklärung:

Die Messung der mittleren Temperatur (= Messgröße) eines IC-Gehäuses (= Messobjekt) nach dem thermoresistiven Messprinzip kann z.B. mit einem elektrischen Messbrückenverfahren oder einem elektrischen Strom-Spannungsmessverfahren durchgeführt werden.

❑ Messmittel

sind technische Vorrichtungen, Geräte und Hilfsvorrichtungen zur messtechnischen Erfassung von Messgrößen und Messsignalen.

Erklärung:

Das können mechanische und elektrische Vorrichtungen sein, Sensoren, Messgeräte, Elektroniken sowie technisches Zubehör der verschiedensten Art.

❑ Messaufbau (auch Messeinrichtung)

nennt sich die technische Realisierung eines gewählten Messverfahrens nach einem bestimmten Messprinzip. Das sind Mechaniken, Messgeräte und Zusatzeinrichtungen.

❑ Das Messergebnis

ist ein einzelner Messwert oder die mathematische Verknüpfung von zwei oder mehr Messwerten mit Angabe der jeweiligen Messabweichung.

Tätigkeiten

❑ Prüfen

ist die Feststellung, ob eine Messgröße vorhanden ist bzw. zwischen definierten Grenzwerten (Fehlergrenzen oder Toleranzen) liegt.

❑ Klassifizieren oder klassieren

kann man gleichartige Messobjekte nach ihren Messwerten in vorgegebene oder feststellbare Klassen und mit der festzustellenden Klassenhäufigkeit.

❑ Sortieren

nennt man die gegenständliche Trennung der klassierten Messobjekte nach feststellbaren Klassen.

❑ Justieren

ist das Einstellen oder Abgleichen z.B. des Nullpunktes eines Messgerätes oder die Einstellung der Verstärkung eines Messverstärkers, dass die Beträge der Messabweichungen die Fehlergrenzen nicht überschreiten.

❑ Kalibrieren

ist das Ermitteln der Abweichung der Ist-Messwerte eines Messgerätes oder Sensors von den Soll-Messwerten eines um 3...6 Zehnerpotenzen genaueren Messgerätes oder Sensors (sog. Labor-Normale oder Kalibratoren).

Durch Kalibrieren werden Messabweichungen der Anzeige eines Messgerätes oder Sensors im Messlabor festgestellt. Die Kalibrierung kann von jeder autorisierten Fachkraft durchgeführt werden oder als Dienstleistung von einem örtlich zuständigen Kalibrierdienst.

❑ Eichen

ist eine von der Eichbehörde nach gesetzlichen Eichvorschriften vorzunehmende Prüfung, ob Messgeräte, Messeinrichtungen oder Sensoren den festgelegten Eichvorschriften entsprechen und die vorgeschriebenen Eichfehlergrenzen einhalten. Die Eichung darf nur von vereidigten Eichbeamten durchgeführt und beurkundet werden. Zur Eichung werden immer Primärnormale verwendet.

1.5 Messabweichungen für Einzelmesswerte und Messwertverknüpfungen

Jede Messung ist mit Messabweichungen und Messunsicherheiten behaftet. Das liegt an der technischen Unvollkommenheit der Messmittel und den physikalisch-chemischen Umwelteinflüssen auf die Messobjekte. In Bild 1.14 ist eine Systematik der Messabweichungen dargestellt.

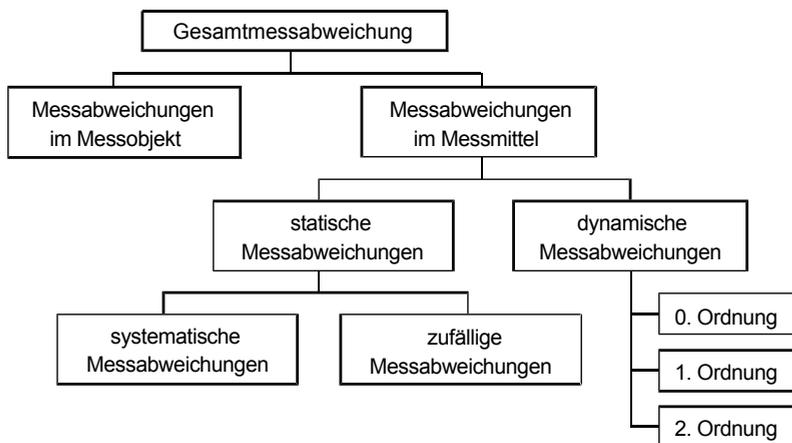


Bild 1.14 Überblick und Zusammenhang der Messabweichungen

Messabweichungen im Messobjekt

Diese Abweichungen des Messobjektzustandes entstehen durch defekte Messobjekte und durch äußere unbekannte Störeinflüsse oder durch Rückwirkung des Sensors auf das Messobjekt. Diese Messabweichungen sind erkennbar und können somit verhindert werden.

Messabweichungen im Messmittel

entstehen durch statische und dynamische Messabweichungen. Diese Formen von Messabweichungen und ihre Berechnung zur Angabe in den Messergebnissen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

1.5.1 Systematische Messabweichungen bei Einzelmesswerten

Sie entstehen durch ein gleichbleibendes nicht ideales Abbildungsverhalten der Sensoren und Signalverarbeitungselektroniken. Systematische Messabweichungen sind bei exakter Wiederholung der Messung immer gleich groß, sind also durch mehrfaches Wiederholen der Messungen nicht erkennbar, d.h., systematische Messabweichungen machen somit ein Messergebnis falsch. Erst durch Vergleichsmessungen (Kalibriermessungen) mit geeichten Präzisionsmesseinrichtungen und geeichten Kalibratoren können die systematischen Messabweichungen erkannt werden. Sie sind also grundsätzlich erfassbar und somit auch korrigierbar. Sie können durch geeignete Hardware- oder/und Software-Korrekturverfahren weitgehend kompensiert werden (Korrekturwert = Messabweichung). Nicht korrigierte oder unbekannt systematische Messabweichungen müssen immer im Messergebnis geeignet, d.h. normgerecht dokumentiert werden.

Ursachen für systematische Messabweichungen sind z.B. falsche Messmethoden, fehlerhafte Kalibratoren, fehlerhafte Messgeräte, nicht erfasste Leitungswiderstände oder nicht erfasste bleibende Änderungen der Spannungsversorgung, um nur einige zu nennen.

Die systematischen Messabweichungen werden nach DIN 1319 wie folgt unterteilt:

- absolute Messabweichungen,
- relative Messabweichungen.

Für absolute Messabweichungen F gilt mit DIN 1319:

$$F = x - x_R \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Hierbei ist x der gemessene Wert (d.h. der falsche Wert) und x_R ist der richtige Wert (d.h. vom Normal oder Kalibrator) der Messgröße. Absolute Messabweichungen können in der Praxis nur durch eine Kalibrierung sinnvoll festgelegt werden.

Für relative Messabweichungen f gibt es 3 Definitionen nach DIN 1319

Relative Messabweichungen, bezogen auf den richtigen Wert x_R (Kalibrierwert):

$$f_R = \frac{F}{x_R} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 1.2})$$

Relative Messabweichungen, bezogen auf den Messwert x_x (gemessener Wert):

$$f_x = \frac{F}{x_x} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 1.3})$$

Relative Messabweichungen, bezogen auf den Messbereichsendwert x_E :

$$f_E = \frac{F}{x_E} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 1.4})$$

Zur Beurteilung der Messabweichungen von Messgeräten und Sensoren werden diese, in der Praxis auf den Messbereichsendwert bezogen, auch Gerätemessabweichung genannt.

1.5.2 Zufällige Messabweichungen bei Einzelmesswerten

Sie entstehen durch zufällige Schwankungen in der physikalisch-chemischen Umwelt, im Messobjekt selbst, im Sensor und der Signalaufbereitungselektronik. Bei Wiederholung einer Messung am selben Messobjekt mit demselben Sensor weichen die Messergebnisse immer voneinander ab. Die Messabweichungen schwanken regellos nach Betrag und Vorzeichen. Sie sind nicht erfassbar und machen das Messergebnis somit unsicher. Der Aussagewert regellos schwankender (stochastischer) Messergebnisse wird durch die statistische Fehlertheorie auf der Grundlage der mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie berechnet.

Hinweis



Wir befassen uns hier nicht mit der umfangreichen Theorie der statistischen Berechnung von zufälligen Messabweichungen, sondern stellen die für die Praxis wichtigsten Gleichungen zusammen und interpretieren ihre messtechnischen Eigenschaften.

Unendlich viele statistisch streuende Messwerte ($n \rightarrow \infty$)

Um die statistische Messabweichung des Messergebnisses zu verringern, wird der arithmetische Mittelwert μ einer Reihe von n Messwerten einer einzigen Messgröße x_k gebildet. Der tatsächliche Messwert wird durch den sog. «Mittelwert μ des richtigen Wertes» ersetzt. Es gilt also:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n x_k \quad (\text{Gl. 1.5})$$

Der Mittelwert μ entspricht für unendlich viele Messwerte dem tatsächlichen, richtigen Wert.

Als Streuung der Messwerte x_k um den Erwartungswert μ wird die sog. Standardabweichung σ des Mittelwertes μ definiert:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \mu)^2}{n - 1}} \quad (\text{Gl. 1.6})$$

Die Standardabweichung gibt an, wie weit die einzelnen Messwerte x_k um den Mittelwert μ streuen. Es lässt sich erkennen, dass die GAUß-Verteilung $W(x_k)$ für die Standardabweichung (Gl. 1.6) gut mit den tatsächlichen messtechnischen Gegebenheiten übereinstimmt. Es gilt:

$$W(x_k) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x_k - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (\text{Gl. 1.7})$$

Bild 1.15 zeigt die GAUß-Verteilung $W(x_k)$ oder Normalverteilung.

In endlichen Vertrauensintervallen $a \leq x_k \leq b$ gilt für die statistische Sicherheit S :

- $S(\pm 1\sigma) = 68,3\%$, d.h. 68,3% aller Messwerte x_k befinden sich in diesem Intervall,
- $S(\pm 2\sigma) = 95,4\%$, d.h. 95,4% aller Messwerte x_k befinden sich in diesem Intervall,
- $S(\pm 3\sigma) = 99,7\%$, d.h. 99,7% aller Messwerte x_k befinden sich in diesem Intervall.

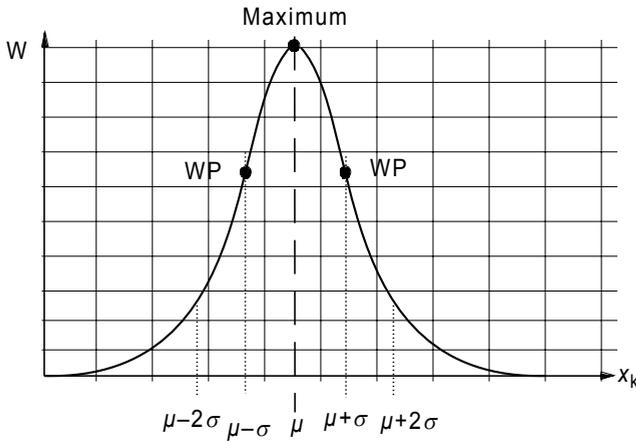


Bild 1.15
Normal-
verteilungs-
funktion
oder GAUß-
Funktion

Endlich viele statistisch streuende Messwerte ($n = 1000 \dots 100$)

In der Praxis wird man sich mit einer begrenzten Anzahl von Messungen begnügen müssen. Anstatt der exakten Werte bestimmt man jetzt nur den sog. «Näherungswert \bar{x} des Mittelwertes» und die sog. «Standardabweichung $\bar{\sigma}$ des Näherungswertes».

Für den Näherungswert gilt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n x_k \quad (\text{Gl. 1.8})$$

Der Näherungswert \bar{x} entspricht nur noch näherungsweise dem tatsächlich richtigen Wert μ .

Als Streuung der Messwerte x_k um den Näherungswert \bar{x} wird die sog. «Standardabweichung $\bar{\sigma}$ des Näherungswertes» definiert:

$$\bar{\sigma} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (\text{Gl. 1.9})$$

Die neue Verteilung entspricht noch der Normalverteilung, d.h., für die statistischen Sicherheiten S gilt das oben Gesagte.

Sehr kleine Zahl von statistisch streuenden Messwerten ($n = 100 \dots 10$)

Bei dieser kleinen Messwertzahl weicht die neue Verteilung von der Normalverteilung deutlich ab und geht in die sog. « t -Verteilung» über. Wichtig ist die Frage, welches Vertrauensintervall $\pm v$ und welche statistische Sicherheit S der sog. Schätzwert $\bar{\bar{x}}$ des Mittelwertes μ jeweils hat.

Für den Schätzwert gilt:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n x_k \quad (\text{Gl. 1.10})$$

Der Schätzwert entspricht nur noch ungefähr dem Mittelwert μ .

Die Standardabweichung des Mittelwertes muss jetzt mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden, dem sog. « t -Faktor». Damit gilt für das Vertrauensintervall oder die Vertrauensgrenze v :

$$v = \pm t \cdot \bar{\sigma} \quad (\text{Gl. 1.11})$$

Tabelle 1.1 ist eine kleine Zusammenstellung der t -Verteilung nach DIN 1319. Sie zeigt, dass bei einer statistischen Sicherheit von 68,3% ab 100 Einzelmessungen der Vertrauensfaktor $t = 1,00$ wird, d.h., die t -Verteilung entspricht dann wieder der Normalverteilung, jedoch mit einer statistischen Unsicherheit von 31,7%.

Tabelle 1.1 Auszug aus der t -Verteilung nach DIN 1319

Zahl der Einzel- Messwerte	$S = 68,3\%$	$S = 95\%$	$S = 99,73\%$
	t	t	t
3	1,32	4,31	19,10
6	1,11	2,60	5,50
10	1,06	2,30	4,10
20	1,30	2,10	3,40
50	1,10	2,00	3,20
100	1,00	1,96	3,10

1.5.3 Messunsicherheiten

Sie entstehen durch Überlagerungen von systematischen und zufälligen Messabweichungen bei Einzelmessungen und treten in der Praxis häufig auf.

Messunsicherheiten bei Messmitteln

Den Anwender von Messmitteln interessiert nur die gesamte Messabweichung mit der bei einer Messung zu rechnen ist. Sie ist eine Mischmessabweichung (kurz Mischabweichung), bestehend aus systematischen und zufälligen Messabweichungen der Messmittel. Die Verteilung zwischen systematischer und zufälliger Messabweichung ist für den Anwender nicht von Bedeutung. Daher geben Messmittelhersteller zur messtechnischen Beurteilung ihrer Messmittel die Grenzabweichung G (früher Garantiefehlergrenze, darf noch verwendet werden) an, die nur unter Einhaltung genau definierten Betriebsbedingungen verbindlich sind. Nach DIN 43 781 und VDE 0410 gilt:

$$G = \frac{F}{x_E} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 1.12})$$

Messunsicherheit bei Messungen

□ Keine Mehrfachmessungen

In den Grenzabweichungen G sind also aus gerätetechnischer Sicht systematische und zufällige Messabweichungen enthalten. Für die messtechnische Praxis wird aber die Grenzabweichung G als systematische Messabweichung behandelt. Ihr Wert wird vom Hersteller dokumentiert. Hinzu kommen weitere systematische und zufällige Messabweichungen, die beim messtechnischen Einsatz der Mess-

mittel entstehen, und von externen Störsignalen. Da zufällige Messabweichungen nicht durch Kalibrierungen erfassbar sind, müssen sie für Einmalmessungen gerätetechnisch kompensiert werden. Weiter müssen besondere physikalische und technische Vorkehrungen gegen zufällig auftretende Störsignale (z.B. Abschirmungen gegen elektromagnetische Störstrahlungen) getroffen werden. Nur so ist eine Minimierung der zufälligen Messabweichung erreichbar.

□ Mehrfachmessungen

Sind Mehrfachmessungen möglich, kann man die zufällige Messabweichung statistisch berechnen und mit der gegebenen systematischen Messabweichung F als sog. Messunsicherheit angeben. Die Messunsicherheit setzt sich also aus der systematischen Messabweichung und der zufälligen Messabweichung zusammen. Die Messunsicherheit wird mit zunehmender Anzahl von Messungen aufgrund ihrer statistischen Komponente immer kleiner. Für die Messunsicherheit δu gilt:

$$\delta u = F + v = F + t \cdot \bar{\sigma} \quad (\text{Gl. 1.13})$$

F = die absolute systematische Messabweichung und v = das Vertrauensintervall Gl. 1.11 mit dem t -Faktor und der Standardabweichung des Näherungswertes von Gl. 1.9.



Beispiel 1.2

Ein Drucksensor hat eine Grenzabweichung von $G = \pm 2,5\%$ v. MBE und einen Messbereich von $MB = 0 \dots 15$ bar. 3 Messungen am gleichen Objekt unter gleichen Bedingungen ergeben die Messwerte: 9,90 bar, 9,16 bar und 9,05 bar. Die Messunsicherheit ist für eine statistische Sicherheit von $S = 95\%$ zu ermitteln und das Messergebnis fachgerecht darzustellen.

Lösung 1.2

Schätzwert

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n p_i = \frac{1}{3} \cdot (9,09 + 9,16 + 9,05) \text{ bar} = 9,1 \text{ bar} \quad (\text{Gl. 1.14})$$

Zufällige Messabweichung

Standardabweichung des Schätzwertes

$$\bar{\sigma} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (p_i - \bar{p})^2}{3 \cdot (3 - 1)}} = \dots = \pm 0,032 \text{ bar} \quad (\text{Gl. 1.15})$$

Vertrauensgrenze (oder Vertrauensintervall)

Aus Tabelle 1.1 entnimmt man mit $n = 3$ den t -Faktor $t = 4,3$ und erhält damit

$$v = t \cdot \bar{\sigma} = 4,3 \cdot (\pm 0,032) \text{ bar} = \pm 0,137 \text{ bar} \quad (\text{Gl. 1.16})$$

Systematische Messabweichung

$$F_p = \frac{G \cdot MBE}{100\%} = \frac{\pm 2,5\% \cdot 15 \text{ bar}}{100\%} = \pm 0,375 \text{ bar} \quad (\text{Gl. 1.17})$$