

Hans-Rolf Tränkler • Ernst Obermeier (Hrsg.)

# Sensortechnik

## Handbuch für Praxis und Wissenschaft

Mit 1067 Abbildungen und 122 Tabellen



Springer

# Inhalt

## Teil A

### Grundlagen und Technologie

<b>1</b>	<b>Einführung in die Sensortechnik</b>	<b>3</b>
1.1	Sensoren in technischen Systemen	3
1.1.1	Der Sensorbegriff	3
1.1.2	Allgemeine Struktur eines Instrumentierungssystems	4
1.1.3	Anwendungsgebiete und Anforderungen an Sensoren	5
1.2	Statische Sensoreigenschaften	6
1.2.1	Ideale Sensorkennlinie (Soll-Kennlinie)	6
1.2.2	Reale Sensorkennlinie (Ist-Kennlinie)	7
1.2.3	Einflüsse durch Störgrößen (Einflußeffekte)	10
1.2.4	Fehlerfortpflanzung systematischer Fehler	11
1.3	Korrektur von statischen Sensoreigenschaften	12
1.3.1	Kalibrierung, Skalierung und Modellierung	12
1.3.2	Linearisierung in der Meßkette	13
1.3.3	Linearisierung und Einflußkorrektur durch das Differenzprinzip	14
1.3.4	Umkehrung der Wirkungsrichtung durch Gegenkopplung (Kompensationsprinzip)	16
1.4	Entwurf von Sensoren	17
1.4.1	Das Entwurfskonzept	17
1.4.2	Anforderungen und ihre Auswirkungen auf den Entwurf	18
1.4.3	Dominierende Struktur von künftigen Instrumentierungssystemen	20
<b>2</b>	<b>Auswertung von Meßsignalen</b>	<b>23</b>
2.1	Einleitung	23
2.2	Normung	23
2.2.1	DIN 1319	24
2.2.2	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen	24
2.2.3	Internationales Wörterbuch der Metrologie	24
2.3	Begriffe	24
2.3.1	Meßgröße	24
2.3.2	Eingangsgröße und Ergebnisgröße	25
2.3.3	Meßabweichung	25

2.3.4	Einflußgröße und Korrektion . . . . .	26
2.3.5	Meßunsicherheit . . . . .	26
2.4	Vier Schritte der Auswertung von Messungen . . . . .	28
2.5	Aufstellung des Modells. . . . .	28
2.5.1	Eingangsgrößen. . . . .	29
2.5.2	Modellfunktion . . . . .	29
2.6	Vorbereiten der Eingangsdaten. . . . .	29
2.6.1	Mehrmals gemessene Größen . . . . .	29
2.6.2	Einzelwerte oder wenige Werte. . . . .	30
2.6.3	Einflußgrößen . . . . .	30
2.6.4	Korrelationen . . . . .	30
2.7	Berechnung des vollständigen Meßergebnisses. . . . .	31
2.7.1	Der Rechner macht's möglich . . . . .	31
2.7.2	Meßergebnis . . . . .	31
2.7.3	Standardunsicherheit . . . . .	31
2.7.4	Wichtige Formeln der Standardunsicherheit . . . . .	32
2.7.5	Numerische Berechnung der Standardunsicherheit . . . . .	32
2.8	Angabe des vollständigen Meßergebnisses. . . . .	33
2.8.1	Schreibweisen der Angabe mit Meßunsicherheit . . . . .	33
2.8.2	Signifikante Ziffern . . . . .	33
2.8.3	Erweiterte Meßunsicherheit . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Physikalische Sensoreffekte . . . . .</b>	<b>35</b>
3.1	Sensoreffekte zur Umsetzung mechanischer Größen. . . . .	36
3.1.1	Piezoelektrischer Effekt . . . . .	36
3.1.2	Piezoresistiver Effekt . . . . .	42
3.2	Sensoreffekte zur Umsetzung magnetischer Größen. . . . .	47
3.2.1	Hall-Effekt . . . . .	47
3.2.2	Gauß-Effekt . . . . .	51
3.2.3	Magnetoresistiver Effekt . . . . .	53
3.3	Sensoreffekte zur Umsetzung thermischer Größen. . . . .	57
3.3.1	Thermowiderstands-Effekt . . . . .	57
3.3.2	Temperatureffekte bei Halbleiterübergängen. . . . .	67
3.3.3	Thermoelektrischer Effekt . . . . .	68
3.3.4	Pyroelektrischer Effekt . . . . .	70
3.4	Sensoreffekte zur Umsetzung optischer und strahlungstechnischer Größen . . . . .	72
3.4.1	Äußerer Photoeffekt . . . . .	72
3.4.2	Innerer Photoeffekt . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Modellierung und Simulation . . . . .</b>	<b>83</b>
4.1	Einleitung . . . . .	83
4.2	Simulationsverfahren . . . . .	83
4.2.1	Stochastische Simulationsverfahren (Monte-Carlo-Methoden)	84

4.2.2	Deterministische Simulationsverfahren . . . . .	84
4.3	Die Finite-Elemente-Methode . . . . .	88
4.3.1	Historischer Rückblick . . . . .	88
4.3.2	Theoretische Grundlagen . . . . .	89
4.3.3	Ablauf einer FE-Simulation . . . . .	92
4.3.4	Hard- und Softwareanforderungen . . . . .	94
4.4	Anwendung der Finite-Elemente-Methode in der Sensorik . . . . .	95
4.4.1	Modellierung von Sensoren . . . . .	95
4.4.2	Lösungsverfahren . . . . .	99
4.4.3	Interpretation der Ergebnisse . . . . .	102
4.4.4	Beispiele für die Anwendung der FEM in der Mikrosensorik . . . . .	103
4.5	Ausblick . . . . .	121
<b>5</b>	<b>Materialien</b> . . . . .	<b>125</b>
5.1	Wandlerwerkstoffe . . . . .	127
5.1.1	Piezoelektrische Materialien . . . . .	127
5.1.2.	Pyroelektrische Werkstoffe . . . . .	127
5.1.3	Optoelektronische Wandlermaterialien . . . . .	130
5.1.4	Thermoelemente . . . . .	136
5.2	Widerstandswerkstoffe . . . . .	139
5.3	Elektrische Verbindungswerkstoffe . . . . .	141
5.3.1	Metalle und Legierungen . . . . .	141
5.3.2	Schaltkontakte . . . . .	43
5.3.3	Bondwerkstoffe . . . . .	143
5.3.4	Lote . . . . .	143
5.3.5	Kleber und Leitkleber . . . . .	148
5.4	Isoliermaterialien und Dielektrika . . . . .	148
5.5	Materialien für die Hybridintegration . . . . .	148
5.6	Gehäusewerkstoffe . . . . .	148
<b>6</b>	<b>Mikrotechnologien</b> . . . . .	<b>165</b>
<b>6.1</b>	<b>Reinraumtechnik</b> . . . . .	<b>165</b>
6.1.1	Reinraumklassen . . . . .	165
6.1.2	Reinraumkonzepte . . . . .	167
<b>6.2</b>	<b>Siliziumtechnologie</b> . . . . .	<b>172</b>
6.2.1	Herstellung von Silizium . . . . .	175
6.2.2	Technologische Grundprozesse . . . . .	181
<b>6.3</b>	<b>Mikromechanik-Technologien</b> . . . . .	<b>245</b>
6.3.1	Dreidimensionale naßchemische Strukturierung von Silizium (Bulk Micromachining) . . . . .	246
6.3.2	Dreidimensionale Strukturierung von Silizium durch Trockenätzen . . . . .	256
#.3.3	Oberflächen-Mikromechanik (Surface Micromachining). . . . .	257
§A	Waferverbindungstechniken . . . . .	259

6.4.1	Feldunterstützte Verbindungsverfahren . . . . .	259
6.4.2	Silizium/Silizium-Verbindung (Silicon Fusion Bonding) . . . . .	263
6.5	Schichttechniken . . . . .	264
6.5.1	Dickschichttechnik . . . . .	265
6.5.2	Dünnschichttechnik . . . . .	266
6.6	Verbindungs- und Kontaktiertechniken . . . . .	269
6.6.1	Verbindungstechniken . . . . .	269
6.6.2	Kontaktierverfahren . . . . .	273
6.7	LIGA-Verfahren . . . . .	280
7	<b>Sondertechnologien</b> . . . . .	285
7.1	Hartstoffbearbeitung mit Ultraschall . . . . .	285
7.1.1	Allgemeines . . . . .	285
7.1.2	Verfahrensbeschreibung . . . . .	285
7.1.3	Einsatzmöglichkeiten der US-Bearbeitung . . . . .	292
7.1.4	Ultraschall-Bearbeitungsmaschine . . . . .	295
7.1.5	Qualitätssicherung . . . . .	298
7.1.6	Anwendungsbeispiele . . . . .	299
7.1.7	Ausblick . . . . .	299
7.2	Photoätzbare Glaskeramik (Foturan) . . . . .	303
7.2.1	Der Begriff Glas . . . . .	303
7.2.2	Phasentrennung/Entglasung . . . . .	304
7.2.3	Glaskeramik . . . . .	304
7.2.4	Photoätzbare Glaskeramik (Foturan) . . . . .	305
7.3	Mikrofunkenerosion . . . . .	308
7.4	Materialbearbeitung mit dem Laserstrahl . . . . .	312
7.4.1	Schweißen mit dem Laserstrahl . . . . .	313
7.4.2	Bohren . . . . .	317
7.4.3	Trennen . . . . .	318
7.4.4	Löten . . . . .	320
7.4.5	Abgleichen . . . . .	321
7.4.6	Vergüten von Oberflächen . . . . .	321
7.4.7	Beschriften . . . . .	322
7.4.8	Abtragen . . . . .	323
7.4.9	Halbleiterprozesse . . . . .	324

## TeilB

### Sensoren und Verfahren

<b>8</b>	<b>Druck</b> . . . . .	329
8.1	DMS- und Dünnsfilm-Drucksensoren . . . . .	329
8.1.1	Meßgrößentransformation . . . . .	330
8.1.2	Druckaufnehmer mit Metallfolien-DMS . . . . .	334
8.1.3	Druckaufnehmer mit Dünnsfilm-DMS . . . . .	339

8.1.4	Druckaufnehmer Kenngrößen und die Möglichkeit ihrer gezielten Beeinflussung . . . . .	345
8.2	Silizium- und Keramik-Drucksensoren . . . . .	355
8.2.1	Piezoresistive Siliziumdrucksensoren . . . . .	357
8.2.2	Kapazitive Drucksensoren . . . . .	375
8.2.3	Drucksensoren auf der Basis verschiedener Herstellungstechnologien . . . . .	387
8.2.4	Anforderungen und Anwendungen . . . . .	390
<b>9</b>	<b>Kraft, Drehmoment, Beschleunigung</b> . . . . .	<b>395</b>
9.1	Kraft, Drehmoment . . . . .	395
9.1.1	Allgemeines zur Messung mit Kraftaufnehmern . . . . .	398
9.1.2	Spezielles zur Messung mit Wägezellen . . . . .	405
9.1.3	Grundlagen der DMS-Meßtechnik . . . . .	408
9.1.4	Allgemeines zu DMS-Aufnehmern . . . . .	415
9.1.5	Anwendung von DMS-Kraftaufnehmern und Wägezellen . . . . .	423
9.1.6	Piezoelektrische Kraftaufnehmer . . . . .	425
9.1.7	Magnetoelastische Kraftaufnehmer . . . . .	428
9.1.8	Induktive Kraftaufnehmer . . . . .	430
9.1.9	Drehmomentmessung . . . . .	431
9.1.10	DMS-Drehmomentaufnehmer . . . . .	435
9.1.11	Drehmomentaufnehmer nach dem induktiven Prinzip . . . . .	439
9.1.12	Drehmomentaufnehmer nach dem Wirbelstromprinzip . . . . .	441
9.1.13	Drehmomentaufnehmer nach dem piezoelektrischen Prinzip . . . . .	441
9.2	Beschleunigung . . . . .	445
9.2.1	Einleitung . . . . .	445
9.2.2	Beschleunigte Feder-Masse-Systeme . . . . .	449
9.2.3	Empfindlichkeit, Bandbreite und Rauschen . . . . .	455
9.2.4	Sensorprinzipien zur Messung der Masseauslenkung . . . . .	459
9.2.5	Konstruktive und fertigungstechnische Aspekte . . . . .	465
9.2.6	Meßsignalverarbeitung . . . . .	473
<b>10</b>	<b>Länge und Winkel</b> . . . . .	<b>479</b>
10.1	R-, L-, C-, magnetische Aufnehmer . . . . .	479
10.1.1	Dehnungsaufnehmer . . . . .	479
10.1.2	Wegaufnehmer . . . . .	482
10.1.3	Winkelaufnehmer . . . . .	508
10.2	Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung und Präsenzdetection . . . . .	511
10.2.1	Einleitung . . . . .	511
10.2.2	Ausbreitung von Ultraschall . . . . .	513
10.2.3	Abstandsmessung mit Ultraschall . . . . .	521
10.2.4	Schlüsselement Ultraschallwandler . . . . .	531
10.2.5	Beispiel zur Abschätzung des Erfassungsbereiches . . . . .	541

10.2.6	Realisierungen . . . . .	544
10.3	Optische Aufnehmer . . . . .	553
10.3.1	Einleitung . . . . .	553
10.3.2	Baugruppen optischer Meßaufnehmer. . . . .	555
10.3.3	Triangulationssensoren . . . . .	571
10.3.4	Lichtschnittsensoren. . . . .	580
10.3.5	Gitterprojektion und Moire-Verfahren . . . . .	587
10.3.6	Laufzeitverfahren . . . . .	597
10.3.7	Kamera-Meßtechnik . . . . .	603
10.3.8	Interferometrie . . . . .	606
10.3.9	Autofokustaster. . . . .	613
10.4	Inkrementale und kodierte Längen- und Winkelaufnehmer. . . . .	616
10.4.1	Einführung . . . . .	616
10.4.2	Definitionen . . . . .	616
10.4.3	Einteilung der Meßsysteme . . . . .	618
10.4.4	Inkrementale Meßverfahren. . . . .	619
10.4.5	Code-Meßverfahren . . . . .	631
10.4.6	Interpolation . . . . .	633
<b>11</b>	<b>Füllstand</b> . . . . .	<b>639</b>
11.1	Hydrostatische Füllstandmessung . . . . .	639
11.1.1	Einleitung . . . . .	639
11.1.2	Meßprinzip . . . . .	639
11.1.3	Meßeinrichtung . . . . .	641
11.1.4	Meßschaltung . . . . .	645
11.1.5	Typische Anwendungsgebiete . . . . .	646
11.2	Lotsystem . . . . .	651
11.2.1	Einleitung . . . . .	651
11.2.2	Meßprinzip . . . . .	652
11.2.3	Meßeinrichtung . . . . .	653
11.2.4	Meßschaltung . . . . .	657
11.2.5	Typische Anwendungsgebiete . . . . .	659
11.3	Radiometrische Füllstandmessung . . . . .	660
11.3.1	Einleitung . . . . .	660
11.3.2	Begriffe . . . . .	662
11.3.3	Meßprinzip . . . . .	665
11.3.4	Meßeinrichtung . . . . .	666
11.3.5	Typische Anwendungsgebiete . . . . .	676
11.4	Füllstandmessung mit Mikrowellen . . . . .	687
11.4.1	Einleitung . . . . .	687
11.4.2	Meßprinzip . . . . .	688
11.4.3	Geräteaufbau . . . . .	692
11.4.4	Meßschaltung . . . . .	694
11.4.5	Technische Daten . . . . .	700

11.4.6	Typische Anwendungsgebiete . . . . .	704
11.5	Kapazitive Füllstandmessung . . . . .	706
11.5.1	Einleitung . . . . .	706
11.5.2	Meßprinzip . . . . .	707
11.5.3	Meßeinrichtung . . . . .	709
11.5.4	Meßschaltung . . . . .	712
11.5.5	Typische Anwendungsgebiete . . . . .	728
11.6	Füllstandmessung mit Vibrationssonde . . . . .	730
11.6.1	Einleitung . . . . .	730
11.6.2	Meßprinzip . . . . .	731
11.6.3	Meßeinrichtung . . . . .	736
11.6.4	Elektrische Schaltung . . . . .	737
11.6.5	Typische Anwendungsgebiete . . . . .	739
12	Drehzahl . . . . .	741
12.1	Allgemeines . . . . .	741
12.2	Wirbelstromdrehzahlmesser . . . . .	741
12.3	Stroboskop . . . . .	742
12.4	Tacho-Generatoren . . . . .	743
12.4.1	Wirbelstromsensor . . . . .	743
12.4.2	Wechselstrom-Generatoren . . . . .	744
12.4.3	Unipolarmaschine . . . . .	746
12.5	Impuls-Drehzahlsensoren . . . . .	746
12.5.1	Allgemeines . . . . .	746
12.5.2	Impulsbildung . . . . .	746
12.5.3	Impulsformung . . . . .	752
12.5.4	Koinzidenz-Verfahren . . . . .	753
12.5.5	Zählverfahren . . . . .	754
13	Durchfluß . . . . .	761
13.1	Volumetrische Meßverfahren . . . . .	761
13.1.1	Auslaufzähler . . . . .	762
13.1.2	Verdrängungszähler . . . . .	763
13.2	Volumenzähler mit Meßflügeln . . . . .	768
13.2.1	Turbinenradzähler . . . . .	768
13.2.2	Flügelradzähler . . . . .	770
13.3	Wirbelzähler . . . . .	771
13.3.1	Einleitung . . . . .	771
13.3.2	Meßprinzip . . . . .	775
13.3.3	Gerätetechnische Ausführungen . . . . .	776
13.4	Drallzähler . . . . .	781
13.5	Pitot-Rohr . . . . .	782
13.6	Wirkdruckverfahren . . . . .	783
JÜ9.6.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	784



13.6.2	Wirkdruck-Zähler . . . . .	789
13.6.3	Blendenmessung . . . . .	789
13.6.4	Weitere Wirkdruckverfahren . . . . .	792
13.7	Durchflußmessung aus der Kraft auf angeströmte Körper. . .	793
13.7.1	Schwebekörper-Durchflußmessung . . . . .	793
13.7.2	Federscheibendurchflußmesser. . . . .	795
13.7.3	Klappendurchflußmesser. . . . .	795
13.8	Magnetisch-induktive Durchflußmessung . . . . .	796
13.8.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	796
13.8.2	Aufbau . . . . .	798
13.8.3	Störsignale. . . . .	799
13.8.4	Magnetisch-induktive Geschwindigkeits- und Durchflußsonden. . . . .	800
13.8.5	Bewertung der magnetisch-induktiven Durchflußmessung . .	801
13.9	Durchflußmessung in offenen Gerinnen. . . . .	801
13.9.1	Konventionelle Messung mit Höhendifferenzverfahren. . . .	802
13.9.2	Ultraschall-Laufzeitverfahren. . . . .	804
13.9.3	Magnetisch-induktive Durchflußmessung an offenen Gerinnen. . . . .	805
13.10	Ultraschall-Durchflußmessung . . . . .	806
13.10.1	Funktionelle Merkmale. . . . .	806
13.10.2	Grundlagen . . . . .	807
13.10.3	Meßrohrgestaltung . . . . .	814
13.10.4	Fehlereinflüsse. . . . .	821
13.10.5	Wandlertechnik . . . . .	827
13.10.6	Anwendungsbeispiele. . . . .	832
13.10.7	Ausblick . . . . .	837
13.11	Hitzdraht-Anemometrie für Geschwindigkeitsmessungen in Unterschallströmungen. . . . .	837
13.11.1	Einleitung . . . . .	837
13.11.2	Meßprinzip und Aufbau der Aufnehmer. . . . .	838
13.11.3	Wärmeübergang von dünnen Drähten. . . . .	841
13.11.4	Frequenzgang. . . . .	843
13.11.5	Richtungsempfindlichkeit von Hitzdrahtaufnehmern. . . .	843
13.11.6	Kalibrierung von Hitzdrahtaufnehmern . . . . .	844
13.11.7	Hitzdrahtmessungen in Unterschallströmungen . . . . .	846
13.11.8	Einfluß der Fluidtemperatur. . . . .	849
13.11.9	Fehlerquellen der Hitzdrahtanemometrie . . . . .	849
13.11.10	Industrielle Anwendungen . . . . .	853
13.11.11	Ausblick . . . . .	854
13.12	Laser-Doppler-Anemometrie (LDA). . . . .	856
13.12.1	Einleitung . . . . .	856
13.12.2	Meßprinzip . . . . .	857
13.12.3	Referenzstrahlanemometer. . . . .	858

13.12.4	Zweistrahl-anemometer . . . . .	859
13.12.5	Interferenzstreifenmodell der LDA-Signale . . . . .	861
13.12.6	Komponenten und optische Auslegung eines einfachen Zweistrahl-LDA-Systems . . . . .	862
13.12.7	Photodetektoren . . . . .	866
13.12.8	Streuteilchen (Seeding) . . . . .	871
13.12.9	Signalauswertung . . . . .	875
13.12.10	Richtungserkennung durch Frequenzverschiebung . . . . .	881
13.12.11	Rückstreuungssysteme . . . . .	885
13.12.12	Zwei- und Dreikomponenten-Laser-Doppler-Anemometer ..	886
13.12.13	Lichtwellenleiter- und Halbleiter-LDA . . . . .	889
13.13	Laser-Doppler-Durchflußmeßtechnik . . . . .	892
13.13.1	Einleitung . . . . .	892
13.13.2	Meßprinzip . . . . .	893
13.13.3	Instationäre Messungen . . . . .	895
13.13.4	Gerätetechnische Ausführungen . . . . .	895
13.13.5	LDA-Durchflußmeßgerät in Glasfasertechnologie mit großer Bandbreite . . . . .	896
13.13.6	LDA-Durchflußmeßgerät mit Halbleiterlaser und holographischen Optikkomponenten . . . . .	898
13.13.7	Anforderungen - Vorteile des Meßprinzips . . . . .	900
13.14	Coriolis-Massendurchflußmessung . . . . .	900
13.14.1	Funktionsweise . . . . .	900
13.14.2	Ausführung . . . . .	904
13.14.3	Anwenderspekte . . . . .	908
13.15	Thermische Massendurchflußmessung . . . . .	911
13.16	Laufzeitmessung mit Markier- und Impfverfahren . . . . .	914
13.17	Laufzeitmessung durch Korrelation . . . . .	915
<b>14</b>	<b>Temperatur</b> . . . . .	<b>923</b>
14.1	Einleitung . . . . .	923
14.2	Sensorprinzipien und -materialien . . . . .	924
14.2.1	Thermoresistive Prinzipien . . . . .	924
14.2.2	Flußspannung von Dioden, Basis-Emitter-Spannung von Transistoren . . . . .	929
14.2.3	Thermoelektrische Effekte . . . . .	931
14.2.4	Quarz-Temperatur Sensoren . . . . .	933
14.3	Design und Herstellungsverfahren der Elementarsensoren . .	934
14.3.1	Platin-Temperatur Sensoren . . . . .	934
14.3.2	Dünnschicht-Metall Temperatur Sensoren . . . . .	935
14.3.3	NTC und PTC-Thermistoren . . . . .	935
14.3.4	Silizium-Spreading Resistance-Temperatur Sensoren . . . . .	936
14.4	Kenndaten . . . . .	938
14.4.1	Metallwiderstands-Temperatur Sensoren . . . . .	938

14.4.2	NTC- und PTC-Thermistoren . . . . .	940
14.4.3	Silizium-Spreading-Resistance-Temperatur Sensoren . . . . .	943
14.4.4	Integrierte Temperatursensoren . . . . .	944
14.4.5	Thermoelemente . . . . .	944
14.5	Anwendungen . . . . .	945
14.5.1	Industrielle Prozeßkontrolle . . . . .	945
14.5.2	Automobilanwendungen . . . . .	947
14.5.3	Sonstige Anwendungsbereiche . . . . .	948
<b>15</b>	<b>Infrarot-Strahlungssensoren zur berührungslosen Temperaturmessung</b> . . . . .	<b>953</b>
15.1	Grundlagen der Infrarotstrahlung . . . . .	953
15.2	Sensorkenngrößen von Infrarotsensoren . . . . .	963
15.2.1	Spektralbereich, spektrale Empfindlichkeit . . . . .	963
15.2.2	Empfindlichkeit . . . . .	964
15.2.3	Rauschen . . . . .	964
15.2.4	Rauschäquivalente Leistung und spezifische Detektivität . . . . .	969
15.2.5	Frequenzabhängigkeit, Ansprechzeit, Zeitkonstante . . . . .	969
15.3	Thermische Sensoren . . . . .	970
15.3.1	Grundprinzip . . . . .	970
15.3.2	Bolometer . . . . .	974
15.3.3	Thermoelektrische Sensoren . . . . .	977
15.3.4	Pyroelektrische Sensoren . . . . .	980
15.4	Photonensensoren . . . . .	985
15.4.1	Grundprinzip . . . . .	985
15.4.2	Photoleiter (Photowiderstände) . . . . .	988
15.4.3	Photodioden . . . . .	990
15.4.4	Schottky-Barriere-Sensoren . . . . .	994
15.5	Anwendungen . . . . .	995
15.5.1	Kenngrößen für Pyrometer und Bildgeräte . . . . .	996
15.5.2	Punktförmige Temperaturmessung . . . . .	998
15.5.3	Anwendungen von punktförmig messenden Pyrometern . . . . .	1004
15.5.4	Wärmebildgeräte . . . . .	1005
15.5.5	Anwendungen von Wärmebildgeräten . . . . .	1010
15.5.6	Sicherheitstechnik . . . . .	1012
15.6	Zusammenfassung . . . . .	1014
<b>16</b>	<b>Vakuum-Totaldruck-Messung</b> . . . . .	<b>1021</b>
16.1	Meßmethoden . . . . .	1023
16.2	Mechanische Vakuummeter . . . . .	1023
16.3	Wärmeleitungs-Vakuummeter . . . . .	1026
16.4	Ionisations-Vakuummeter . . . . .	1029
16.5	Gasreibungs-Vakuummeter . . . . .	1035
16.6	Kalibrieren von Vakuummetern . . . . .	1036

<b>17</b>	<b>Partikelmeßtechnik</b> . . . . .	.1039
17.1	Einleitung . . . . .	.1039
17.2	Unterschiedliche Eigenschaften von Kolloiden und Aerosolen . . . . .	.1043
17.3	Probennahme . . . . .	.1044
17.4	Partikelgrößensortierung . . . . .	.1051
17.5	Optische Sensoren . . . . .	.1054
17.6	Elektroresistive Partikelmessung in Flüssigkeiten: der Coulter-Zähler . . . . .	.1073
17.7	Pulsverarbeitung bei Partikelzählern . . . . .	.1076
17.8	Fehler in Partikelzählermessungen . . . . .	.1077
17.9	Elektroresistive Partikelsensoren für Gase . . . . .	.1081
17.10	Das Aerosolelektrometer . . . . .	.1082
17.11	Partikelmassen-Sensoren . . . . .	.1084
17.12	Das Epiphaniometer . . . . .	.1089
17.13	Rußbestimmung durch Echtzeitmessung von Filterschwärzungsgraden . . . . .	.1090
17.14	Rußbestimmung aufgrund des photoakustischen Effekts . . . . .	.1092
17.15	Der Photo elektrische Aerosolsensor (PAS) . . . . .	.1093
17.16	Eichung von Partikelsensoren . . . . .	.1095
<b>18</b>	<b>Konzentrationsmessung in Gasen</b> . . . . .	.1101
18.1	Gassensoren . . . . .	.1101
18.1.1	Definition eines Gassensors und Allgemeines zur Einteilung . . . . .	.1101
18.1.2	Anwendungsgebiete und Anforderungen . . . . .	.1102
18.1.3	Thermische Gassensoren . . . . .	.1104
18.1.4	Metalloxidhalbleitergassensoren und verwandte Sensoren . . . . .	.1109
18.1.5	Festkörperionenleiter . . . . .	.1116
18.1.6	Weitere Gassensoren . . . . .	.1117
18.1.6	Ausblick . . . . .	.1119
18.2	Elektrochemische Gassensoren . . . . .	.1122
18.3	Analysengeräte . . . . .	.1133
<b>19</b>	<b>Konzentrationsmessungen in Flüssigkeiten</b> . . . . .	.1179
19.1	Flüssige Meßmedien . . . . .	.1179
19.2	Potentiometrie . . . . .	.1180
19.3	Amperometrie . . . . .	.1194
<b>19.4</b>	<b>Konduktometrie</b> . . . . .	.1198
19.5	Optische Detektion . . . . .	.1208
19.6	Biosensoren . . . . .	.1211
<b>20</b>	<b>Gasfeuchte</b> . . . . .	.1219
\$0.1	Eigenschaften wasserbeladener Gase . . . . .	.1222
0.2	Meßgrößen in der Feuchte-meßtechnik . . . . .	.1227
.10.3	Spurenfeuchte-Sensoren . . . . .	.1233
\$0.4	Klimafeuchte-Sensoren . . . . .	.1247

20.5	Hochfeuchte-Sensoren . . . . .	.1257
20.6	Neue Meßverfahren . . . . .	.1262
20.7	Feuchtgeneratoren und Referenzmessungen . . . . .	.1265

## TeilC

### Sensorsysteme und Signalverarbeitung

<b>21</b>	<b>Signalverarbeitung bei Multisensoren . . . . .</b>	<b>.1277</b>
21.1	Signalverarbeitung bei Einzelsensoren . . . . .	.1280
21.1.1	Aufgaben der Sensorsignalverarbeitung . . . . .	.1280
21.1.2	Analoge Signalumformung . . . . .	.1282
21.1.3	Digitalumsetzung . . . . .	.1289
21.1.4	Signalübertragung . . . . .	.1296
21.1.5	Digitale Signalverarbeitung . . . . .	.1297
21.1.6	Beispiel zur digitalen Signalverarbeitung . . . . .	.1305
21.1.7	Ausblick . . . . .	.1310
21.2	Kaiman Filter. . . . .	.1311
21.2.1	Einführung . . . . .	.1311
21.2.2	System- und Beobachtungsmodelle . . . . .	.1312
21.2.3	Herleitung der Kaiman Filter Algorithmen . . . . .	.1317
21.2.4	Das Kaiman Filter in der Praxis . . . . .	.1322
21.2.5	Erweitertes Kaiman Filter. . . . .	.1326
21.2.6	Variationen des Kaiman Filters. . . . .	.1330
21.2.7	Beispiele . . . . .	.1331
21.2.8	Bibliographische Bemerkung . . . . .	.1342
21.3	Datenintegration durch Fuzzy Logic. . . . .	.1346
21.3.1	Einleitung . . . . .	.1346
21.3.2	Grundbegriffe der Fuzzy Logic. . . . .	.1348
21.3.3	Anwendungsfelder für Fuzzy Logic. . . . .	.1353
21.4	Neuronale Netze. . . . .	.1359
21.4.1	Einführung . . . . .	.1359
21.4.2	Neuronale Netze - ihr Konzept . . . . .	.1360
21.4.3	Neuronale Netze - ihre Funktionsweise. . . . .	.1364
21.4.4	Neuronale Netze - ihre besonderen Vorteile. . . . .	.1366
21.4.5	Zusammenfassende Wertung . . . . .	.1366
<b>22</b>	<b>Objekterkennung mit Ultraschall . . . . .</b>	<b>.1369</b>
22.1	Aufnahme von Objektsituationen . . . . .	.1371
22.1.1	Einsatzparameter des Objekterkennungssystems. . . . .	.1371
22.1.2	Anordnung der Wandler. . . . .	.1372
22.1.3	Auflösungsvermögen . . . . .	.1378
22.2	Rekonstruktion der Objekteigenschaften. . . . .	.1379
22.2.1	Übertragungsmodell . . . . .	.1380
22.2.2	Zeitliche Übertragungsfunktion. . . . .	.1382

22.2.3	Räumliche Übertragungsfunktion . . . . .	1383
22.2.4	Rückfaltung . . . . .	1384
22.3	Auswertung des Empfangsechos . . . . .	1389
22.3.1	Echoprofilspeicherung . . . . .	1389
22.3.2	Differenzprofile . . . . .	1391
22.3.3	Subtraktion des Norm-Echos . . . . .	1393
22.3.4	Korrelationsanalyse . . . . .	1395
22.3.5	Inverses Filter zur Objektidentifikation . . . . .	1398
22.4	Klassifikation . . . . .	1399
22.4.1	Numerische Klassifikatoren . . . . .	1400
22.4.2	Klassifikation mit Methoden der Fuzzy-Logik . . . . .	1401
22.4.3	Neuronale Netze . . . . .	1403
22.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	1405
22.5.1	Vergleich der Empfangsechos für Objekt und Muster . . . . .	1405
22.5.2	Verwendung angepaßter Sendesignale . . . . .	1406
22.5.3	Auswertung mit Fuzzy Logik . . . . .	1407
22.5.4	Auswertung der Phaseninformation . . . . .	1410
22.5.5	Positionsinvariante Objekterkennung . . . . .	1411
22.6	Ausblick . . . . .	1416
<b>23</b>	<b>Detektoren in der Gefahrenmeldetechnik . . . . .</b>	<b>1419</b>
23.1	Allgemeines . . . . .	1419
23.2	Meßgrößen . . . . .	1422
23.3	Möglichkeiten zur Vergrößerung der Detektionswahrscheinlichkeit und zur Verringerung der Falschmeldungswahrscheinlichkeit . . . . .	1424
23.3.1	Integration der Meßgröße über der Zeit . . . . .	1424
23.3.2	Integration über dem Ort . . . . .	1425
23.3.3	Gleichzeitige Nutzung auf unterschiedliche physikalische Größen empfindlicher Sensoren . . . . .	1425
23.4	Aufbau einer Gefahrenmeldeanlage . . . . .	1427
23.5	Verbindung Melder Zentrale . . . . .	1429
23.5.1	Gleichstromlinientechnik . . . . .	1429
23.5.2	Lokales Sicherheits-Netzwerk (LSN) . . . . .	1431
23.6	Meßprinzipien in der Einbruchmeldetechnik . . . . .	1432
23.6.1	Objektüberwachung . . . . .	1433
23.6.2	Raumüberwachungsmelder . . . . .	1440
23.6.3	Melder zur Außenhautüberwachung . . . . .	1449
23.6.4	Sensoren für die Freigeländeüberwachung . . . . .	1457
<b>23.7</b>	<b>Meßprinzipien in der Brandmeldetechnik . . . . .</b>	<b>1458</b>
<b>23.7.1</b>	<b>Rauchmelder . . . . .</b>	<b>1459</b>
23.7.2	Wärmemelder . . . . .	1467
23.7.3	Wärmestrahlungsmelder . . . . .	1467
<b>23.8</b>	<b>Ausblick . . . . .</b>	<b>1468</b>

<b>24</b>	<b>Elektromagnetisch verträgliche Signalübertragung</b> . . . . .	1471
24.1	Definition Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). . . . .	1471
24.2	Übersicht Störbeeinflussung. . . . .	1471
24.3	Störgrößenbeschreibung auf Leitungen. . . . .	1472
24.4	Leitungsgebundene Kopplung. . . . .	1475
24.4.1	Ohmscher Leitungswiderstand. . . . .	1477
24.4.2	Leitungsinduktivität . . . . .	1479
24.4.3	Qualitative Konstruktionsrichtlinien. . . . .	1481
24.5	Leitungsungebundene Kopplung von Leitungen. . . . .	1483
24.5.1	Niederfrequente Felder. . . . .	1485
24.5.2	Leitungsungebundene Kopplung über hochfrequente Felder . . . . .	1488
24.5.3	Qualitative Konstruktionsrichtlinien. . . . .	1489
24.6	Kopplung Feld-Leitung . . . . .	1492
24.6.1	Felder. . . . .	1492
24.6.2	Feldeinkopplung in elektrisch kurze Leitungen. . . . .	1494
24.6.3	Feldeinkopplung in elektrisch lange Leitungen. . . . .	1497
24.6.4	Qualitative Konstruktionsrichtlinien. . . . .	1500
24.7	Schirmung . . . . .	1500
24.7.1	Leitungsschirm . . . . .	1501
24.7.2	Schirmung der Endgeräte. . . . .	1504
24.7.3	Schutzschirmtechnik (Guard). . . . .	1506
24.8	Filter. . . . .	1507
24.9	Signaleingänge, Übertragungsstrecken, Übertragungsverfahren . . . . .	1509
24.9.1	Signaleingänge. . . . .	1509
24.9.2	Signalübertragung . . . . .	1510
24.9.3	Übertragungsverfahren. . . . .	1512
24.10	Schlußbemerkung . . . . .	1513
25	Sensorbussysteme. . . . .	1515
25.1	Busfähige Sensoren. . . . .	1515
25.2	Grundlagen serieller Bussysteme für die Sensorebene. . . . .	1521
25.3	Das ISO-OSI-Schichtenmodell und seine Anwendung auf sensornahe Bussysteme. . . . .	1525
25.4	Verfügbare Systeme und Auswahlkriterien. . . . .	1538
25.5	Wirtschaftliche Aspekte des Sensorbuseinsatzes. . . . .	1547
25.6	Nationale und internationale Normung. . . . .	1548
25.7	Ausblick: Tendenzen bei Sensorbussen. . . . .	1552
	Sachverzeichnis. . . . .	1555