

1 Sensorsysteme	1
Ekbert Hering	
1.1 Definition und Wirkungsweise.	1
1.2 Einteilung.	2
2 Physikalische Effekte zur Sensornutzung	5
Ekbert Hering, Thomas Kubasta, Frank Winkens, Martin Liess, Winfried Vonau, Ulrich Guth und Karl-Ernst Biehl	
2.1 Piezoelektrischer Effekt.	5
2.1.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	5
2.1.2 Materialien.	8
2.1.3 Anwendungen	9
2.2 Resistiver und piezoresistiver Effekt	9
2.2.1 Funktionsprinzipien und physikalische Beschreibung	9
2.2.2 Resistiver Effekt und dessen Anwendung durch Dehnmess-Streifen (DMS)	11
2.2.3 Piezoresistiver Effekt und dessen Anwendung durch Silicium-Halbleiter-Elemente	13
2.3 Magnetoresistiver Effekt	16
2.3.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	16
2.3.2 Vorteile der XMR-Technologie	21
2.3.3 Anwendungen der XMR-Technologie.	22
2.4 Magnetostriktiver Effekt	26
2.4.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	26
2.4.2 Vorteile der magnetostriktiven Sensor-Technologie	27
2.4.3 Anwendungen der magnetostriktiven Sensor-Technologie	28
2.5 Effekte der Induktion	30
2.5.1 Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	30
2.5.2 Vorteile der induktiven Sensor-Technologie	36
2.5.3 Anwendungen der induktiven Sensor-Technologie	36

2.6	Effekte der Kapazität	38
2.6.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	38
2.6.1.1	Kondensator und Kapazität	38
2.6.1.2	Kapazität im Wechselstromkreis	42
2.6.2	Vorteile der kapazitiven Sensor-Technologie	49
2.6.3	Anwendungen der kapazitiven Sensor-Technologie	50
2.7	Gauß-Effekt	51
2.7.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	51
2.7.2	Anwendung des Gauß-Effektes	53
2.8	Hall-Effekt	55
2.8.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	55
2.8.2	Anwendung des Hall-Effektes	58
2.9	Wirbelstrom-Effekt	61
2.9.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	61
2.9.2	Anwendung des Wirbelstrom-Effektes	62
2.10	Thermoelektrischer Effekt	66
2.11	Thermowiderstands-Effekt	71
2.11.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	71
2.11.2	Vorteile der Sensorik mit dem Thermowiderstands-Effekt	73
2.11.3	Einsatzgebiete	74
2.12	Temperatureffekte bei Halbleitern	75
2.12.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	75
2.12.2	Kaltleiter (PTC-Widerstände)	76
2.12.3	Heißleiter (NTC-Widerstände)	78
2.13	Pyroelektrischer Effekt	81
2.13.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	81
2.13.2	Materialien	83
2.13.3	Anwendungen	84
2.14	Fotoelektrischer Effekt	87
2.14.1	Funktionsprinzipien und physikalische Beschreibung	87
2.14.2	Fotoelektrische Sensorelemente	91
2.14.3	Fotoelektrische Sensorelemente	93
2.15	Elektrooptischer Effekt	101
2.15.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	101
2.15.2	Materialien	103
2.15.3	Anwendungen	103
2.16	Elektrochemische Effekte	106
2.16.1	Funktionsprinzip und Klassifizierung	106
2.16.2	Potenziometrische Sensoren	106
2.16.3	Amperometrische Sensoren	111
2.16.4	Konduktometrische und impedimetrische Sensoren	113
2.16.5	Anwendungsbereiche	113

2.17	Chemische Effekte	115
2.17.1	Physikalisch-chemische Wechselwirkungen von Gasen mit Oberflächen	115
2.17.2	Gaslöslichkeit (Absorption)	116
2.17.3	Gastransport zur Festkörperoberfläche	118
2.17.4	Adsorption und Chemisorption	120
2.17.5	Reaktionen mit adsorbierten Spezies	121
2.17.6	Reaktion des Gases mit dem Festkörper	121
2.17.7	Die Mischphasenfehlordnung	124
2.18	Akustische Effekte	125
2.18.1	Definition und Einteilung des Schalls	125
2.18.2	Charakterisierung akustischer Wellen	126
2.18.3	Schallgeschwindigkeit in idealen Gasen	126
2.18.4	Intensität oder Schallstärke	128
2.18.5	Absorption von Schall in Luft	129
2.18.6	Reflektion und Transmission	129
2.19	Optische Effekte	131
2.19.1	Physikalische Effekte	131
2.19.2	Aufbau optischer Sensoren	135
2.19.3	Kategorien optischer Sensoren	136
2.19.4	Anwendungsfelder optischer Sensoren	138
2.20	Doppler-Effekt	139
2.20.1	Funktionsprinzip und physikalische Beschreibung	139
2.20.2	Anwendungsbereiche	142
	Weiterführende Literatur	145
3	Geometrische Größen	147
	Albert Feinäugle, Sorin Fericean, Stefan Hubrich, Alexander Forkl, Christopher Herfort, Ernst Halder, Bernhard Hahn, Thomas Burkhardt, Stefan Sester, Stefan Basler, Michael Röbel, Gert Schönfelder, Carsten Giebeler, Jürgen Reichenbach und Thomas Engel	
3.1	Weg- und Abstandssensoren	147
3.1.1	Induktive Abstands- und Wegsensoren	151
3.1.1.1	Funktionsprinzip und morphologische Beschreibung der Induktivsensoren	151
3.1.1.2	Berührungslose induktive Abstandssensoren (INS)	152
3.1.1.3	Berührungslose induktive Wegsensoren (IWS)	161
3.1.1.4	Differenzialtransformatoren mit verschiebbarem Kern (LVDT)	164
3.1.1.5	Gepulster induktiver Linear-Positionssensor (Micropulse® BIW)	169

3.1.1.6	<i>Signalverarbeitung durch Phasenmessung (Sagentia)</i>	173
3.1.1.7	PLCD-Wegsensoren (PermanentLinear Contactless Displacement Sensor)	179
3.1.1.8	<i>Berührungslose magnetoinduktive Wegsensoren (smartsens-BIL)</i>	185
3.1.2	Optoelektronische Abstands- und Wegsensoren	193
3.1.2.1	Übersicht	193
3.1.2.2	Optoelektronische Bauteile	195
3.1.2.3	Optische Grundlagen von Abstandssensoren	199
3.1.2.4	Messprinzip: Triangulation	204
3.1.2.5	Messprinzip: Pulslaufzeitverfahren	205
3.1.2.6	Messprinzip: Phasen- oder Frequenzlaufzeitverfahren	207
3.1.2.7	Messprinzip: Fotoelektrische Abtastung	209
3.1.2.8	Messprinzip: Interferometrische Längenmessung	211
3.1.3	Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung und Objekterkennung	212
3.1.3.1	Funktionsprinzipien und Aufbau	212
3.1.3.2	Aufbau des Ultraschallwandlers	214
3.1.3.3	Erfassungsbereich eines Ultraschallsensors	214
3.1.3.4	Umlenkung des Ultraschalls	216
3.1.3.5	Objekt- und Umwelteinflüsse	217
3.1.3.6	Anwendungen	218
3.1.4	Potenziometrische Weg- und Winkelsensoren	221
3.1.4.1	Einleitung	221
3.1.4.2	Funktionsprinzip und Kenngrößen von potenziometrischen Sensoren	222
3.1.4.3	Technologie und Aufbautechnik	226
3.1.4.4	Produkte und Applikationen	231
3.1.5	Magnetostriktive Wegsensoren	233
3.1.5.1	Wirkprinzip und Aufbau magnetostriktiver Wegsensoren	233
3.1.5.2	Gehäusekonzepte und Anwendungen	237
3.1.6	Wegsensoren mit magnetisch codierter Maßverkörperung	243
3.1.6.1	Messprinzip	243
3.1.6.2	Aufbau und Funktionsweise inkrementeller und absoluter Mess-Systeme	246
3.1.6.3	Kennwerte	251
3.1.6.4	Sensortypen im Vergleich	253
3.1.6.5	Anwendungsbeispiele	255

3.1.7	Spezielle Sensoren für die lineare Wegmessung	256
3.1.7.1	Umsetzung von Linearbewegung in Drehbewegung...	256
3.1.7.2	Prinzip der „optischen Maus“ für die Wegmessung ...	258
3.2	Sensoren für Winkel und Drehbewegung.....	259
3.2.1	Optische Drehgeber	270
3.2.1.1	Physikalische Prinzipien	270
3.2.1.2	Aufbau optischer Drehgeber	275
3.2.1.3	Besondere Eigenschaften optischer Drehgeber.....	282
3.2.2	Magnetisch codierter Drehgeber	283
3.2.3	Umdrehungszählende Winkelsensoren	289
3.2.3.1	Allgemeines Funktionsprinzip und morphologische Beschreibung von Umdrehungen zählenden Winkelsensoren	289
3.2.3.2	Getriebebasierende Umdrehungszählverfahren.....	290
3.2.3.3	Umdrehungszählverfahren auf induktiver Basis.....	292
3.2.3.4	Batteriepufferung der Umdrehungsinformation	294
3.2.3.5	Neuartiges GMR-System zur Detektion und Speicherung von Umdrehungsinformation	295
3.2.3.6	Weitere Umdrehungszählverfahren mit induktivem Energy Harvesting	301
3.2.4	Kapazitive Drehgeber.....	303
3.2.5	Variable Transformatoren, Resolver.....	307
3.2.5.1	Allgemeines Funktionsprinzip des VT	307
3.2.5.2	Signifikante Varianten von VT	308
3.2.5.3	Resolver, eine repräsentative Variante von VT	308
3.2.6	1Vpp oder sin/cos-Schnittstelle	315
3.2.7	Inkrementelle Geber.....	318
3.3	Neigung	320
3.3.1	Magnetoresistive Neigungssensoren	320
3.3.2	Kompass-Sensoren.....	323
3.3.3	Elektrolytische Sensoren	323
3.3.4	Piezoresistive Neigungssensoren/ DMS-Biegebalkensensoren	324
3.3.5	MEMS	325
3.3.6	Servoinclinometer	326
3.3.7	Übersicht und Auswahl von Neigungssensoren.....	327
3.4	Sensoren zur Objekterfassung	328
3.4.1	Näherungsschalter	328
3.4.2	Objekterkennung und Abstandsmessung mit Ultraschall	341
3.4.3	Objekterkennung mit Radar.....	344

3.4.4	Pyroelektrische Sensoren für die Bewegungs und Präsenzdetektion	345
3.4.5	Objekterkennung mit Laserscanner	348
3.4.6	Sensoren zur automatischen Identifikation (Auto-Ident).	350
3.4.6.1	Übersicht	350
3.4.6.2	Barcodescanner	351
3.4.6.3	Auto-Ident-Kameras	359
3.5	Dreidimensionale Messmethoden (3D-Messung)	369
3.5.1	Tastende 3D-Messmethoden	370
3.5.2	Optisch tastende 3D-Messmethoden	373
3.5.3	Bildgebende 3D-Messmethoden	377
3.5.4	Übersicht zu 3D-Messmethoden	381
	Weiterführende Literatur	382
4	Mechanische Messgrößen	387
	Ekbert Hering, Gert Schönfelder und Stefan Vinzelberg	
4.1	Masse	387
4.1.1	Definition	387
4.1.2	Anwendungen	388
4.2	Kraft	390
4.2.1	Definition	390
4.2.2	Effekte für die Anwendungen	391
4.2.3	Anwendungsbereiche	395
4.3	Dehnung	399
4.3.1	Definition	399
4.3.2	Messung der Dehnung	400
4.4	Druck	402
4.4.1	Definition	402
4.4.2	Messprinzipien	404
4.4.3	Messanordnungen	405
4.5	Drehmoment	409
4.5.1	Definition	409
4.5.2	Messprinzipien	409
4.5.3	Anwendungsbereiche	411
4.6	Härte	412
4.6.1	Definition	412
4.6.2	Makroskopische Härtebestimmung	412
4.6.3	Härtebestimmung durch Nanoindentation	413
4.6.4	Sensoren für die Nano-Härtemessung	414
4.6.5	Modell und Auswertung	415
4.6.6	Anwendungen	416
	Weiterführende Literatur	418

5	Zeitbasierte Messgrößen	419
	Gert Schönfelder und Gerd Stephan	
5.1	Zeit	419
5.2	Frequenz	420
5.3	Pulsbreite	426
5.4	Phase, Laufzeit und Lichtlaufzeit	428
5.5	Visuelle Darstellung von Messgrößen	434
5.6	Drehzahl und Drehwinkel	444
5.7	Geschwindigkeit	448
5.8	Beschleunigung	451
5.9	Durchfluss (Masse und Volumen)	457
	Weiterführende Literatur	462
6	Temperaturmesstechnik	463
	Martin Liess, Ekbert Hering und Lothar Michalowsky	
6.1	Temperatur als physikalische Zustandsgröße	463
6.2	Messprinzipien und Messbereiche	465
6.3	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	466
6.3.1	Metalle	466
6.3.2	Metalle mit definierten Zusätzen (Legierungen) oder Gitterfehlern	470
6.3.3	Ionenleitwerkstoffe für hohe Temperaturen	471
6.3.4	Thermistoren	472
6.3.5	Engwiderstand-Temperatur-Sensoren (Spreading Resistor)	473
6.3.6	Dioden	475
6.4	Thermoelektrizität (Seebeck-Effekt)	475
6.5	Wärmeausdehnung	482
6.5.1	Wärmeausdehnung fester Körper	482
6.5.2	Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten	485
6.5.3	Wärmeausdehnung von Gasen	486
6.6	Temperatur und Frequenz	487
6.7	Thermochromie	487
6.8	Seegerkegel	488
6.9	Berührungslose optische Temperaturmessung	489
6.9.1	Strahlungsthermometer (Pyrometer)	489
6.9.2	Faseroptische Anwendungen	492
6.9.2.1	<i>Intrinsische Sensoren, DTS (Distributed Temperature Sensing)</i>	492
6.9.2.2	Extrinsische Sensoren	494
	Weiterführende Literatur	495

7 Elektrische und magnetische Messgrößen	497
Gert Schönfelder und Andreas Wilde	
7.1 Spannung	497
7.1.1 Definition	497
7.1.2 Messanordnungen	502
7.2 Stromstärke	507
7.2.1 Definition	507
7.2.2 Messanordnungen	508
7.3 Elektrische Ladung und Kapazität	510
7.3.1 Definition	510
7.3.2 Messanordnungen	514
7.4 Elektrische Leitfähigkeit und spezifischer elektrischer Widerstand	518
7.4.1 Definition	518
7.4.2 Messanordnungen	519
7.5 Elektrische Feldstärke	522
7.5.1 Definition	522
7.5.2 Messprinzipien für die elektrische Feldstärke	523
7.6 Elektrische Energie und Leistung	524
7.6.1 Definitionen	524
7.6.2 Formen von Leistung	525
7.6.3 Messprinzipien	527
7.7 Induktivität	531
7.7.1 Definition	531
7.7.2 Messprinzipien	531
7.8 Magnetische Feldstärke	533
7.8.1 Definition	533
7.8.2 Messprinzipien magnetischer Größen	533
7.8.3 Messanordnungen	534
7.8.4 Mehrdimensionale Messungen mit dem Hall-Effekt	536
Weiterführende Literatur	538
8 Radio- und fotometrische Größen	539
Eckbert Hering und Gert Schönfelder	
8.1 Radiometrie	539
8.1.1 Radiometrische Größen	539
8.1.2 Messung elektromagnetischer Strahlung	544
8.2 Fotometrie	544
8.2.1 Fotometrische Größen	544
8.2.2 Messung fotometrischer Größen	548
8.3 Anwendung von Helligkeitssensoren	550
8.4 Farbe	552
8.4.1 Farbempfinden	552
8.4.2 Farbmodelle	555

8.4.3	Farbsysteme	556
8.4.4	Farbfilter für Sensoren	556
8.4.5	Farbsensoren	559
	Weiterführende Literatur	560
9	Akustische Messgrößen	561
	Ekbert Hering	
9.1	Definition wichtiger akustischer Größen	561
9.2	Menschliche Wahrnehmung	563
9.2.1	Pegel	563
9.2.2	Lautstärke	564
9.2.3	Lautheit	566
9.3	Schallwandler	567
9.4	Anwendungsfelder	569
	Weiterführende Literatur	572
10	Klimatische und meteorologische Messgrößen	573
	Robert Krah, Roland Wernecke, Gert Schönfelder und Gerd Stephan	
10.1	Feuchtigkeit in Gasen	573
10.1.1	Definitionen und Gleichungen	573
10.1.2	Feuchtemessungen in Gasen	579
10.1.2.1	Psychrometer, Aufbau und Funktionsweise	579
10.1.2.2	Taupunktspiegel	582
10.1.2.3	Kapazitive Feuchtemessung	585
10.1.2.4	Integrierte kapazitive Feuchtesensoren mit Bus-Ausgang	585
10.2	Feuchtebestimmung in festen und flüssigen Stoffen	587
10.2.1	Direkte Verfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte	588
10.2.1.1	Prozentualer Wassergehalt einer Materialprobe	588
10.2.1.2	Wasseraktivität einer Materialprobe	589
10.2.1.3	Karl-Fischer-Titration	590
10.2.1.4	Calciumcarbid-Methode	590
10.2.1.5	Calciumhydrid-Methode	591
10.2.2	Indirekte Messverfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte	591
10.2.2.1	Messung der elektrischen Eigenschaften	591
10.2.2.2	Erfassen der optischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf	593
10.2.2.3	Messung des Saugdruckes in feuchten Materialien (Tensiometrie)	594
10.2.2.4	Messung der atomaren Eigenschaften	594

10.2.2.5	Nuklear-Magnetisches-Resonanz-Verfahren (NMR)	595
10.2.2.6	Messung der Wärmeleitfähigkeit	596
10.3	Messung von Niederschlägen im Außenklima	596
10.4	Feuchtemessung in geschlossenen Räumen	599
10.4.1	Messung des Klimas in Wohnungen und am Arbeitsplatz	599
10.4.2	Klima in Museen und Ausstellungsräumen	600
10.4.3	Klima in elektrischen Anlagen	603
10.4.4	Beeinflussen des Raumklimas	604
10.5	Luftdruck	605
10.6	Wind- und Luftströmung	606
10.6.1	Definition	606
10.6.2	Methoden zur Windmessung	607
10.7	Wasserströmung	612
10.7.1	Definition	612
10.7.2	Direkte und indirekte Durchflussmessung	612
	Weiterführende Literatur	617
11	Ausgewählte chemische Messgrößen	619
	Winfried Vonau	
11.1	Redoxpotenzial	619
11.1.1	Allgemeines	619
11.1.2	Edelmetallische Redoxelektroden	622
11.1.3	Redoxglaselektroden	625
11.1.4	Bezugselektroden	627
11.2	Ionen inkl. Hydroniumionen	633
11.2.1	Allgemeines	633
11.2.2	pH-Messung	634
11.2.3	Weitere Ionen	641
11.3	Gase	646
11.3.1	Allgemeines	646
11.3.2	Gase im physikalisch gelösten Zustand bzw. bei Normaltemperatur	646
11.3.2.1	Festelektrolytsensoren	649
11.3.2.2	Elektrochemische Zellen mit festen Elektrolyten	649
11.3.3	Halbleiter-Gassensoren – Metalloxidhalbleitersensoren (MOS)	661
11.3.4	Pellistoren	663
11.4	Elektrolytische Leitfähigkeit	663
11.4.1	Allgemeines	663
11.4.2	Kohlrausch-Messzellen	664

11.4.3	Mehrelektroden-Messzellen	665
11.4.4	Elektrodenlose Leitfähigkeitsmesszellen	666
11.4.5	Beispiele zur Anwendung von Leitfähigkeitssensoren	667
	Weiterführende Literatur	670
12	Biologische und medizinische Sensoren	673
	Elfriede Simon	
12.1	Biologische Sensorik	673
12.1.1	Biosensorik	673
12.1.2	Echte biologische Sensoren	675
12.2	Funktionsprinzipien der Biosensoren	677
12.2.1	Kalorimetrische Sensoren	678
12.2.2	Mikrogravimetrische Sensoren	680
12.2.3	Optische Sensoren	681
12.2.4	Elektrochemische Sensoren	684
12.2.5	Immobilisierungsmethoden	686
12.3	Physikalische und chemische Sensoren in der Medizin	687
12.3.1	Physikalisch-chemische Blutanalysen	688
12.3.2	Klinisch-chemische Blutanalysen	692
12.4	Enzymatische Methoden – Enzymsensoren	693
12.4.1	Enzymbasierter Analytnachweis	696
12.4.2	Bestimmung der Enzymaktivität	698
12.4.3	Anwendungsfelder enzymatischer Tests	698
12.5	Immunologische Methoden – Immunosensoren	699
12.5.1	Direkte Immunosensoren	703
12.5.2	Indirekte Immunosensoren	703
12.5.3	Anwendungsfelder von Immunosensoren	705
12.6	DNA-basierte Sensoren	707
12.6.1	Hybridisierungsdiagnostik	708
12.6.2	Anwendung und Einsatz von DNA-Sensoren	709
12.7	Zellbasierte Sensorik	711
12.7.1	Metabolischer Zellchip	712
12.7.2	Neuro-Chip	712
	Weiterführende Literatur	714
13	Messgrößen für ionisierende Strahlung	715
	Hartmut Bärwolff	
13.1	Einführung und physikalische Größen	715
13.2	Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie	720
13.3	Einteilung der Sensoren	725
13.4	Gasgefüllte Strahlungssensoren	728
13.5	Strahlungssensoren nach dem Anregungsprinzip	733
13.6	Halbleitersensoren	735
	Weiterführende Literatur	745

14 Fotoelektrische Sensoren	747
Martin Liess, Gert Schönfelder und Ekbert Hering	
14.1 Strahlung.	747
14.2 Szintillatoren.	748
14.3 Äußerer Fotoeffekt	750
14.3.1 Fotomultiplier	750
14.3.2 Channel-Fotomultiplier	751
14.3.3 Bildaufnahmeröhren	752
14.4 Innerer Fotoeffekt	752
14.4.1 Fotoleiter	753
14.4.2 Fotodioden	755
14.4.3 Fototransistor, Fotothyristor und Foto-FET	758
14.4.4 CMOS-Bildsensoren	758
14.4.5 Hochdynamische CMOS-Bildsensoren	759
14.5 CCD-Sensoren	761
14.5.1 Zeilensensoren	761
14.5.2 CCD-Matrixsensoren	763
14.6 Quantum Well Infrared Photodetector QWIP.	764
14.7 Thermische optische Detektoren	765
14.7.1 Thermosäulen	766
14.7.2 Pyroelektrische Detektoren	768
14.7.3 Bolometer	770
15 Signalaufbereitung und Kalibrierung	771
Gert Schönfelder	
15.1 Signalaufbereitung	771
15.1.1 Analoge (diskrete) Signalaufbereitung	772
15.1.2 Signalaufbereitung mit Systemschaltkreisen	773
15.1.3 Signalaufbereitung mit ASICs	773
15.1.4 Signalaufbereitung mit Mikrocontrollern	774
15.2 Sensorkalibrierung	775
15.2.1 Passive Kompensation	776
15.2.2 Justage mit analoger Signalverarbeitung	777
15.2.3 Justage mit digitaler Signalverarbeitung	778
15.3 Energiemanagement bei Sensoren	780
Weiterführende Literatur	782
16 Interface	783
Schönfelder Gert	
16.1 Analoge Interfaces	783
16.1.1 Spannungsausgang	784
16.1.2 Ratiometrischer Spannungsausgang	785
16.1.3 Stromausgang	785

16.1.4	Frequenzausgang und Pulsweitenmodulation.	787
16.1.5	4-/6-Draht-Interface	788
16.2	Digitale Interfaces.	789
16.2.1	CAN-Gruppe.	792
16.2.2	LON	794
16.2.3	HART	794
16.2.4	RS485	795
16.2.5	IO-Link	795
16.2.6	Profibus	797
16.2.7	I ² C	798
16.2.8	SPI.	799
16.2.9	IEEE 1451.	801
	Weiterführende Literatur.	804
17	Sicherheitsaspekte bei Sensoren	805
	Sorin Fericean und Gert Schönfelder	
17.1	Eigenschaften zur Funktionsüberwachung.	805
17.2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	809
17.3	Funktionale Sicherheit (SIL)	813
17.4	Sensoren in explosiver Umgebung (ATEX)	815
17.4.1	Grundlagen des ATEX	816
17.4.2	Zündschutzart Eigensicherheit	818
17.4.3	Zündschutzart druckfeste Kapselung	820
	Weiterführende Literatur.	820
18	Messfehler, Messgenauigkeit und Messparameter	821
	Gert Schönfelder	
18.1	Einteilung der Messfehler nach ihrer Ursache	821
18.2	Darstellung von Messfehlern	823
18.2.1	Arithmetischer Mittelwert, Fehlersumme und Standardabweichung.	823
18.2.2	Absoluter Fehler	824
18.2.3	Relativer Fehler.	824
18.3	Messparameter	827
18.3.1	Streuung von Messwerten.	827
18.3.2	Auflösung von Messwerten.	828
18.3.3	Signal-Rausch-Abstand und Dynamik von Messwerten	829
	Weiterführende Literatur.	830
19	Sensoren unter low power-Bedingungen	831
	Schönfelder Gert	
19.1	Definition von low power.	831
19.2	Prozessanalyse und Sensordefinition	832

19.2.1	Auswahl der Methode des Messverfahrens	832
19.2.1.1	Örtliches Ziel der Messwerte	833
19.2.1.2	Störverhalten.	833
19.2.1.3	Sensorinformationen.	833
19.3	Systemkomponenten.	834
19.3.1	Komponentenauswahl.	834
19.3.1.1	Energieversorgung	834
19.3.1.2	Energieerzeugung.	834
19.3.1.3	Wahl einer CPU	835
19.3.1.4	Auswahl des Sensors	835
19.3.1.5	Aufbau eines Interface	835
19.3.2	Hardwarebetrachtungen	836
19.3.2.1	Batterien und Akkumulatoren.	836
19.3.2.2	Zeitverhalten einzelner Verbraucher.	837
19.3.2.3	Zeitsteuerung	838
19.3.3	Firmware und Energieverbrauch.	839
19.3.3.1	Softwareorganisation	839
19.3.3.2	Optimierung der Rechenabläufe.	839
19.3.3.3	Optimierung der Datenübertragung	840
19.3.3.4	Auslagerung von Aufgaben	840
19.4	Energiekalkulation	840
	Literatur.	841
	Stichwortverzeichnis.	843