
Handbuch der industriellen Meßtechnik

herausgegeben von
Professor em. Dr. Paul Profos
ETH Zürich
und
Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. Tilo Pfeifer
RWTH Aachen

5., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1015 Bildern und 135 Tabellen

2598
~~Inv.-Nr.~~

Bibliothek des Fachgebietes
Hydraulik und Hydrologie

Technische Hochschule Darmstadt
D-6100 Darmstadt/Petersenstraße

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1992

Inhalt

Vorwort zur 5. Auflage	V
Autorenverzeichnis	VII
A. Theoretische Grundlagen	1
1. Grundlegende Begriffe und Definitionen	3
1.1 Wesen des Messens; Fundamental-Voraussetzungen	3
1.2 Normale und deren Einheiten	3
1.3 Idealisieretes Blockschema; allgemeine Begriffe	6
1.4 Meßverfahren	8
1.4.1 Direkte und indirekte Meßverfahren	8
1.4.2 Analoge und digitale Verfahren	9
1.4.3 Zeitlich kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren	10
1.4.4 Ausschlags- und Kompensationsverfahren	11
2. Meßfehler und Fehlerursachen	14
2.1 Repräsentativität, Repräsentativitätsfehler	14
2.2 Allgemeines Blockschema des fehlerbehafteten Meßsystems	14
2.2.1 Fehler, Korrektion	15
2.2.2 Rückwirkung des Meßvorganges auf die Meßgröße: Bürde	16
2.2.3 Superponierende äußere Störeinflüsse	16
2.2.4 Deformierende äußere Störeinflüsse	16
2.2.5 Innere Störeinflüsse	17
2.3 Fehler im Zusammenhang mit dem Meßvorgang	17
2.3.1 Einfluß der Einsatzbedingungen der Meßeinrichtung	17
2.3.2 Systematische und zufällige Fehler	17
2.3.3 Statische und dynamische Fehler	19
2.4 Fehler im Zusammenhang mit der Auswertung von Meßwerten	19
2.4.1 Quantisierung der Meßwerte, Ablesefehler	19
2.4.2 Zeitliche Diskretisierung durch die Auswertung	19
2.4.3 Fehler bedingt durch die Auswertehypothese	20
2.4.4 Fehlerfortpflanzung durch die Auswertung	21
2.5 Fehlercharakteristiken von Meßgeräten	21
2.5.1 Nullpunktsunempfindlichkeit, Ansprechwert, Anlaufwert	21
2.5.2 Umkehrspanne, Hysterese, elastische Nachwirkung	21
2.5.3 Auflösung	22
2.5.4 Nullpunktstabilität	23
2.5.5 Meßunsicherheit, Fehlergrenzen	23
2.5.6 Linearität, Toleranzbänder	23
2.5.7 Güteklassen	24
3. Statische Meßfehler	26
3.1 Fehlerarten	26
3.2 Fehlererfassung	27
3.2.1 Zufällige Fehler der Einzelmessung	27
3.2.2 Zufällige Fehler von Mittelwerten	32
3.2.3 Systematische Fehler: Eichung	34

3.3	Fehlerfortpflanzung	35
3.3.1	Systematische Fehler	35
3.3.2	Zufällige Fehler	35
3.3.3	Fehlergrenzen	36
3.4	Auswerteverfahren im Zusammenhang mit statistischen Fehlern	37
3.4.1	Prüfung der Hypothese der Gauß-Verteilung	37
3.4.2	Ausreißer	39
3.4.3	Unterschiede von Mittelwerten	40
3.4.4	Lineare Regression	42
3.4.5	Lineare Korrelation	45
3.5	Möglichkeiten der automatischen Fehlerkorrektur	48
3.5.1	Prinzip der Störgrößenabschirmung	48
3.5.2	Prinzip der Fehlerkompensation	48
3.5.3	Prinzip der Rückführung	49
3.5.4	Prinzip der Signalfilterung	50
4.	Dynamische Meßfehler	52
4.1	Messen als Signalübertragungsprozeß	52
4.2	Signale und ihre mathematische Beschreibung	52
4.2.1	Klassierung von Signalen	52
4.2.2	Beschreibung deterministischer Signale im Zeitbereich	54
4.2.3	Beschreibung stochastischer Signale im Zeitbereich	55
4.2.4	Beschreibung periodischer Signale im Frequenzbereich	59
4.2.5	Beschreibung aperiodischer Signale im Frequenzbereich	61
4.2.6	Beschreibung stochastischer Signale im Frequenzbereich	64
4.2.7	Beschreibung von Signalen durch Impulsreihen	65
4.3	Übertragungsverhalten des Meßsystems und seine mathematische Beschreibung	68
4.3.1	Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch die Differentialgleichung	68
4.3.2	Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch Antwortfunktionen	69
4.3.3	Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch die Übertragungsfunktion bzw. den Frequenzgang	71
4.3.4	Zusammenhang der Beschreibungsmittel des Übertragungsverhaltens	75
4.4	Dynamische Eigenschaften fundamentaler Meßsysteme	77
4.4.1	Meßsystem 1. Ordnung	77
4.4.2	Meßsystem 2. Ordnung	80
4.4.3	Meßsystem mit Totzeit	86
4.5	Dynamische Meßfehler	87
4.5.1	Definition des dynamischen Meßfehlers	87
4.5.2	Berechnung des dynamischen Meßfehlers	89
4.5.3	Dynamische Kenngrößen von Meßsystemen	92
4.5.4	Korrektur dynamischer Meßfehler	93
4.6	Dynamische Störwirkungen	95
4.6.1	Berechnung der durch dynamische Störwirkungen hervorgerufenen Fehler	95
4.6.2	Bekämpfung der dynamischen Störwirkungen	96
5.	Gesetzliche Grundlagen des Meßwesens	99
5.1	Einleitung	99
5.2	Das Internationale Einheitensystem (SI)	99
5.2.1	Basiseinheiten	99
5.2.2	Abgeleitete SI-Einheiten	100
5.3	Gesetzliche Vorschriften über Einheiten im Meßwesen	101
5.3.1	Gesetzliche SI-Einheiten	105
5.3.2	Weitere gesetzliche Einheiten	105

5.3.3	Gesetzliche Einheiten mit eingeschränktem Anwendungsbereich	106
5.3.4	Tabelle häufig verwendeter Einheiten	106
5.3.5	Umrechnung angelsächsischer Einheiten	112
5.4	Gesetzliche Vorschriften des Meß- und Eichwesens	118

B. Allgemeines zur Gerätetechnik

1.	Funktionselemente und Strukturen von Meßsystemen	123
1.1	Einleitung	123
1.2	Funktionselemente von Meßsystemen	123
1.3	Funktionsstrukturen von Meßsystemen	124
1.3.1	Grundstrukturen	124
1.3.2	Funktionsstrukturen „klassischer“ Meßsysteme	126
1.3.3	Funktionsstrukturen komplexer Meßsysteme	126
1.3.4	Funktionsstrukturen modellgestützter Meßsysteme	129
2.	Meßgrößenerfassung	132
2.1	Begriff der Meßgrößenerfassung	132
2.1.1	Erfassung einer repräsentativen Meßgröße	132
2.1.2	Möglichst fehlerfreie Erfassung dieser Meßgröße	132
2.1.3	Primäre Umwandlung der Meßgröße	133
2.2	Arten der Meßwerterfassung	134
2.3	Primäre Umwandlungseffekte und Meßgrößenaufnehmer	135
2.3.1	Aufnehmer mit mechanischem Ausgang	135
2.3.2	Aufnehmer mit pneumatischem Ausgang	135
2.3.3	Sensoren mit elektronischem Analogausgang	135
2.3.4	Sensoren mit optischer Wirkung	155
2.4	Sensoren mit integrierter Signalelektronik und Digitalausgang	159
3.	Meßgrößenumformung	168
3.1	Grundlagen	168
3.1.1	Zielsetzung und Bedeutung	168
3.1.2	Begriffe	168
3.2	Verknüpfung von Eingangs- und Ausgangsgröße eines Meßgrößenumformers durch physikalische und physikalisch-chemische Effekte	171
3.2.1	Verknüpfungsmatrix	171
3.2.2	Umkehr der Wandelungsrichtung	171
3.2.3	Spezielle Anwendungen	174
3.3	Umformung nichtelektrischer Signale in elektrische	175
3.3.1	Mechanische Größen	175
3.3.2	Thermische Größen	180
3.3.3	Akustische Größen	182
3.4	Umformung elektrischer Signale	184
3.4.1	Umformung der Größenart elektrischer Signale	184
3.4.2	Umformung eines elektrischen Signals in eine andere Signalart	185
4.	Rechenschaltungen	188
4.1	Analoge Rechenschaltungen	188
4.1.1	Addierer und Subtrahierer	188
4.1.2	Multiplizierer und Dividierer	189

4.1.3	Radierer und Potenzierer	191
4.1.4	Differenzierer und Integrierer	192
4.2	Digitale Rechenschaltungen	196
4.2.1	Rechenoperationen mit Impulsfolgen und Frequenzsignalen	197
4.2.2	Kombinatorische Logikschaltungen	198
4.2.3	Rechenwerke	202
5.	Meßsignalverarbeitung	205
5.1	Allgemeines	205
5.1.1	Aufgaben und Bedeutung der Meßsignalverarbeitung	205
5.1.2	Entwicklungstrend	206
5.1.3	Signalanpassung	207
5.2	Getastete Signale und ihre Übertragung	210
5.2.1	Auswirkungen der Abtastung	210
5.2.2	Die Übertragungsfunktion digitaler Systeme	215
5.3	Filter	218
5.3.1	Analoge Filter	218
5.3.2	Digitale Filter	231
5.4	Signalverarbeitung durch Einzweckgeräte	249
5.4.1	Übersicht über Aufgaben und Lösungsmöglichkeiten	249
5.4.2	Geräte zur Messung von Amplitudenverteilungen	250
5.4.3	Geräte zur Bestimmung von Mittelungswerten	257
5.4.4	Frequenzanalyse	271
5.5	Meßsignal-Erfassung und -Verarbeitung mit Digitalrechnern	277
5.5.1	Übersicht	277
5.5.2	Die Meßkette für digitale Meßsignal-Verarbeitung	279
5.5.3	Prozeßrechner	290
5.5.4	Programme für Prozeßrechner	297
5.5.5	Möglichkeiten der Signalverarbeitung mit Prozeßrechnern	299
6.	Ausgabegeräte	313
6.1	Übersicht	313
6.2	Darstellung analoger Meßwerte	313
6.3	Darstellung digitaler Meßwerte	314
6.3.1	Mechanische Anzeigen	314
6.3.2	Optische Anzeigen	314
6.3.3	Optoelektronische Anzeigen	315
6.3.4	Intelligente Anzeigen	319
6.4	Datensichtgeräte	319
6.4.1	Informationsdarstellung durch Sichtgeräte	320
6.4.2	Technologie der Bildschirme	320
6.5	Meßwertausgabe durch Personal Computer (PC)	322
6.5.1	Hardware-Benutzerschnittstelle: Grafikbildschirme	322
6.5.2	Meßtechnische Hardware-Erweiterungen für PCs	323
6.5.3	Software-Benutzerschnittstelle	323
6.6	Meßwertausgabe in der industriellen Prozeßleittechnik	325
6.7	Meßwertdrucker	325
6.7.1	Typen- und Matrixdrucker	327
6.7.2	Zeichen- und Zeilendrucker	327
6.7.3	Anschlagende und nichtanschlagende Drucker	328
6.7.4	Übersicht verschiedener Druckertypen	328
6.8	Plotter	331
6.8.1	Flachbettplotter	331

6.8.2	Trommelplotter	331
6.9	Schreiber	331
6.9.1	Punkt- und Linienschreiber	332
6.9.2	Kompensationsschreiber	333
6.9.3	Übersicht der Schreibverfahren	333
6.9.4	Schreiber als intelligente Registriergeräte	334
6.10	Sprachausgabe	335
7.	Die Zuverlässigkeit von Meßsystemen	337
7.1	Die wichtigsten Größen der Zuverlässigkeitsrechnung und ihre Zusammenhänge	337
7.2	Die Zuverlässigkeit von Bauelementen	340
7.2.1	Die Ausfallrate	340
7.2.2	Die exponentielle Verteilung der Überlebenswahrscheinlichkeit	341
7.2.3	Ausfallkriterium	344
7.2.4	Beanspruchungen	345
7.2.5	Zuverlässigkeitsprüfungen	345
7.3	Einige Grundlagen der Verknüpfung von Wahrscheinlichkeiten	345
7.4	Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen	346
7.4.1	Die Zuverlässigkeit einfacher Schaltungen	348
7.4.2	Die Zuverlässigkeit redundanter Schaltungen	349
7.4.3	Reparatur und Inspektion	351
7.4.4	Methoden zur Berechnung der Zuverlässigkeit vermaschter Systeme	352
7.5	Zuverlässigkeit von Rechnern	353
7.5.1	Zuverlässigkeit der Hardware	353
7.5.2	Zuverlässigkeit der Software	354

C. Meßverfahren und Meßgeräte

1.	Messung elektrischer Größen	363
1.1	Grundlagen für das Messen elektrischer Größen	363
1.1.1	Maß-Systeme und Einheiten	363
1.1.2	Definitionen bei periodischen elektrischen Größen	365
1.1.3	Leistungsdefinitionen	368
1.1.4	Frequenzgang und Anstiegszeiten bei Momentanwertmessung	370
1.1.5	Frequenzgang bei Mittelwert- und Effektivwertmessung	370
1.2	Klassische elektrische Meßverfahren und Meßgeräte	371
1.2.1	Anzeige von Strom, Leistung, Energie und Frequenz	371
1.2.2	Elektrische Meßwandler	379
1.2.3	Widerstands- und Impedanzmessung	381
1.2.4	Messung elektromagnetischer Feldgrößen	384
1.2.5	Messungen in Drehstromnetzen	385
1.3	Elektronische Meßverfahren und Meßgeräte	386
1.3.1	Elektronische Meßverstärker	387
1.3.2	Elektronenstrahloszillographen	392
1.3.3	Elektronische anzeigende Geräte	400
1.4	Eichung und Kalibrierung von elektrischen Meßgeräten	406
1.5	Reduktion systematischer Meßfehler	407
1.5.1	Fehler infolge Belastung des Meßortes	408
1.5.2	Fehler infolge ungeeigneter Signale am Meßgeräteeingang	408
1.5.3	Fehler infolge Einwirkung von Fremdfeldern auf Meßgeräte	409
1.5.4	Einstreuung von Fremdfeldern und Fremdsignalen auf Meßleitungen	410

2.	Messung von Zeit und Frequenz	413
2.1	Einführung	413
2.2	Zeiteinheit/Definition	413
2.3	Frequenzgeneratoren und Uhren	414
2.4	Erzeugung beliebiger Frequenzen	415
2.5	Frequenzmessung und Zeitmessung	417
2.6	Probleme bei der Frequenz- und Zeitmessung	419
3.	Ereigniszählung	421
3.1	Einleitung	421
3.2	Allgemeine Betriebsbedingungen	421
3.3	Zählimpulse und Impulsgeber	421
3.3.1	Zählimpulse und Pulsgeber für elektromechanische Zähler	421
3.3.2	Zählimpulse und Pulsgeber für elektronische Zähler	423
3.4	Mechanische Zähler	423
3.5	Elektromechanische Zähler	424
3.5.1	Summen-/Vorwahlzähler	424
3.5.2	Differenzzähler	426
3.6	Pneumatische Zähler	426
3.7	Elektronische Zähler	427
3.7.1	Einzelsummen-/Vorwahlzähler	427
3.7.2	Programmierbare Zähler mit Mehrfach-Funktionen	430
3.7.3	Vor-Rückwärtszähler, Differenzzähler	430
3.7.4	Zähler Bus-Systeme zur Betriebsdaten-Erfassung- und Steuerung	430
4.	Messung von Längen und daraus abgeleiteten Größen	432
4.1	Messung geometrischer Größen	432
4.1.1	Einführung	432
4.1.2	Aufgaben, Meßstrategien und daraus abzuleitende Anforderungen an Verfahren und Geräte	435
4.1.3	Sensoren, Meßmittel, Verfahren	442
4.2	Dehnungs- und Spannungsmessung	520
4.2.1	Mechanische Meßverfahren	521
4.2.2	Elektrische Meßverfahren	525
4.2.3	Optische Methoden der Dehnungs- und Spannungsmessung	549
4.3	Drehzahlmessung, Geschwindigkeitsmessung	560
4.3.1	Drehzahlmessung	560
4.3.2	Geschwindigkeitsmessung	565
4.4	Messung mechanischer Schwingungen	566
4.4.1	Einleitung	566
4.4.2	Aufgaben der Schwingungsmessung	567
4.4.3	Schwingungen als Signale im Zeit- und Frequenzbereich	568
4.4.4	Modell eines Feder-Dämpfer-Masse-Systems	571
4.4.5	Beziehungen zwischen schwingenden Systemen und angekoppelten Sensoren	580
4.4.6	Sensoren für translatorische und rotatorische Schwingungen	581
4.4.7	Fehler	590
4.4.8	Befestigung von Schwingungssensoren	591
4.4.9	Testen und Anregen	592
4.4.10	Bestimmung von Federsteifigkeiten und Dämpfungen über die Messung schwingungstechnischer Kennwerte	595
4.4.11	Modalanalyse	596
4.5	Messung des Füllstandes	599
4.5.1	Einleitung	599

4.5.2	Mechanische Verfahren	599
4.5.3	Elektromechanische Verfahren	601
4.5.4	Füllstandsmessung durch Verändern von Gleich- und Wechselstromwiderständen	606
4.5.5	Hydrostatische und pneumatische Verfahren	612
4.5.6	Ultraschallmethode	613
4.5.7	Füllstandsmessung mit radioaktiven Isotopen	615
4.5.8	Weitere Methoden zur Füllstandsmessung	617
5.	Messung von Kräften und daraus abgeleiteten Größen	626
5.1	Kraftmessung	626
5.1.1	Allgemeiner Überblick über Kraftaufnehmer	626
5.1.2	Kritische Gesichtspunkte beim Einsatz von Kraftaufnehmern	628
5.1.3	Elektrische Kraftaufnehmer	629
5.1.4	Mechanische Kraftaufnehmer	638
5.1.5	Hydraulische Kraftaufnehmer	639
5.2	Messen von Drehmoment, mechanischer Arbeit und mechanischer Leistung	641
5.2.1	Drehmomentmessung	641
5.2.2	Messung der mechanischen Arbeit (Energie)	649
5.2.3	Messung der mechanischen Leistung	650
6.	Messung von Massen und daraus abgeleiteten Größen	652
6.1	Wägung	652
6.1.1	Masse und deren Verkörperung für die Meßtechnik	652
6.1.2	Waagen, Wägeprinzipien	657
6.1.3	Waagenarten und deren Einsatz	672
6.2	Durchflußmessung	696
6.2.1	Volumetrische Meßverfahren	696
6.2.2	Wirkdruckverfahren	710
6.2.3	Durchflußmessung aus dem Druckabfall in geraden Rohren	722
6.2.4	Durchflußmessung aus der Kraft auf angeströmte Körper	723
6.2.5	Höhendifferenzverfahren	726
6.2.6	Impfverfahren mit Chemikalien und radioaktiven Substanzen	728
6.2.7	Durchflußmessung nach dem Korrelationsverfahren	729
6.2.8	Durchflußmessung auf thermischer Grundlage	732
6.2.9	Magnetisch-induktive Durchflußmessung	735
6.2.10	Ultraschall-Strömungsmessung	745
6.2.11	Wirbel-Durchflußmesser	749
6.2.12	Schwingkörper-Durchflußmesser	751
6.2.13	Gyroskopische Massendurchflußmesser	751
6.2.14	Durchflußmessung mit Hilfe von Kernresonanz	
6.2.15	Geschwindigkeitsmessung mittels Laser	753
6.3	Dichtemessung	757
6.3.1	Einführung	757
6.3.2	Dichte fester Stoffe	758
6.3.3	Dichte von Flüssigkeiten	759
6.3.4	Dichte von Gasen	767
7.	Messung hydrostatischer und hydrodynamischer Größen	771
7.1	Druck-, Druckdifferenz- und Vakuum-Messung	771
7.1.1	Allgemeines über Druckmessung	771
7.1.2	Flüssigkeitsmanometer und -Barometer	774
7.1.3	Druckwaagen und Kolbenmanometer	776
7.1.4	Federmanometer	779

7.1.5	Sonstige mechanische Manometer	788
7.1.6	Wärmeleitungsmanometer	789
7.1.7	Elektrische Manometer	790
7.2	Messung der Strömungsgeschwindigkeit	795
7.2.1	Messungen der örtlichen Strömungsgeschwindigkeit	795
7.2.2	Messung der Strömungsrichtung	803
7.2.3	Messung von Geschwindigkeitsschwankungen	806
7.3	Viskosimetrie	808
7.3.1	Definitionen der Meßgrößen	808
7.3.2	Abhängigkeit der Viskosität von verschiedenen Einflußgrößen	810
7.3.3	Meßverfahren und Geräte	812
7.3.4	Fehlerquellen	820
7.4	Messung von Grenzflächenspannungen	821
7.4.1	Das Phänomen Grenzflächenspannung	821
7.4.2	Verfahren zur Messung der Grenzflächenspannung	823
8.	Thermometrie	834
8.1	Einführung	834
8.2	Reproduktion der Temperaturskala	835
8.2.1	Temperaturskalen und Einheiten	835
8.2.2	Fixpunkte	836
8.2.3	Thermostate	837
8.3	Berührungsthermometrie	838
8.3.1	Mechanische Berührungsthermometer	838
8.3.2	Elektrische Berührungsthermometer	847
8.3.3	Fehler bei Berührungsthermometern	860
8.4	Strahlungsthermometrie	864
8.4.1	Theoretische Grundlagen	864
8.4.2	Strahlungsthermometer	866
8.4.3	Kalibrierung von Strahlungsthermometern	868
8.4.4	Meßanordnung bei Strahlungsthermometern	870
8.4.5	Dynamik von Strahlungsthermometern	872
8.4.6	Anwendung von Strahlungsthermometern	873
9.	Messung kalorischer Größen	875
9.1	Begriffe, Einheiten, Dimensionen	875
9.2	Wärmemenge	876
9.2.1	Allgemeines	876
9.2.2	Kalorimeterbauarten	877
9.2.3	Kalorimetrische Methoden	878
9.2.4	Verbrennungskalorimeter	879
9.2.5	Messung und Auswertung	882
9.3	Wärmestrom, Wärmestromdichte	885
9.3.1	Physikalische Grundlagen	885
9.3.2	Meßverfahren	885
10.	Messung von Konzentration bzw. Zusammensetzung	891
10.1	Entnahme, Aufbereitung und Transport von Analysenproben	891
10.1.1	Allgemeines	891
10.1.2	Methoden der Probenahme	893
10.1.3	Probenaufbereitung	897
10.1.4	Probentransport	909
10.1.5	Probenahme und -Aufbereitung als Teil der Analysenmeßstelle	911

10.2	Verschiedene physikalische Methoden zur Gasanalyse	913
10.2.1	Wärmeleitfähigkeitsmessung	913
10.2.2	Paramagnetische Sauerstoffmessung	923
10.2.3	Wärmetönungsmessung	936
10.2.4	Flammenionisationsmessung	946
10.3	Optische Methoden	952
10.3.1	Einführung	952
10.3.2	Refraktometrie und Interferometrie	954
10.3.3	Polarimetrie	960
10.3.4	Spektralphotometrie UV/VIS	968
10.3.5	Infrarot- und Ramanspektroskopie	996
10.4	Feuchte-Messung	1015
10.4.1	Die Physik feuchter Luft	1015
10.4.2	Der Wassergehalt fester und flüssiger Stoffe	1017
10.4.3	Die Auswahl des Meßverfahrens	1020
10.4.4	Die Luftfeuchtemeßverfahren	1023
10.4.5	Die Materialfeuchtemeßverfahren	1027
10.5	Chromatographie	1031
10.5.1	Chromatographie als Analysenmethode	1031
10.5.2	Der chromatographische Trennprozeß	1032
10.5.3	Chromatographische Begriffe und Kenngrößen	1032
10.5.4	Besonderheiten der chromatographischen Prozeßkontrolle	1036
10.5.5	Gaschromatographie	1037
10.5.6	Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC)	1043
10.5.7	Fluidchromatographie	1049
10.5.8	Methodenwahl, Datenverarbeitung und automatischer Betrieb	1052
10.6	Konduktometrische Messungen	1054
10.6.1	Theoretische Grundlagen	1054
10.6.2	Meßtechnik	1056
10.7	Potentiometrische Messungen	1064
10.7.1	pH-Messungen	1066
10.7.2	Ionenselektive Elektroden	1077
10.7.3	CHEMFETS und ISFETs	1083
10.7.4	Redoxpotentialmessung	1086
10.7.5	Potentiometrische Gasanalyse	1090
10.8	Voltametrische Messungen	1096
10.8.1	Begriffe und Methoden	1096
10.8.2	Amperometrische Methoden	1098
10.8.3	Amperometrische Messungen in Lösungen	1101
10.8.4	Amperometrische Messungen in Gasen	1103
10.9	Titrationen	1105
10.9.1	Titrimetrie als Konzentrationsbestimmungsmethode	1105
10.9.2	Grundlagen der Titrimetrie	1106
10.9.3	Praktische Ausführung von Titrationsen – Titrationsmodi	1114
10.9.4	Titratoren und automatisierte Titrationsysteme	1118
10.10	Messung von Schwebstoffen	1120
10.10.1	Einführung	1120
10.10.2	Staubgehaltsbestimmung	1121
10.10.3	Korngrößenmeßtechnik	1131
10.10.4	Oberflächenmeßtechnik	1144
11	Messung ionisierender Strahlungen	1149
11.1	Grundlagen	1149

11.2	Meßgrößen und Einheiten	1150
11.2.1	Beschreibung des Strahlungsfeldes	1150
11.3	Meßeffekte, Meßverfahren und Geräte	1154
11.3.1	Ionisationseffekte in Gasen	1154
11.3.2	Strahleneffekte in Festkörpern	1157
11.4	Spezielle Anwendungen	1160
11.4.1	Tracermethode	1160
11.4.2	Aktivierungsanalyse	1161
11.4.3	Abriebmessungen	1162
11.4.4	Strahlenschutzmessungen	1162
12.	Lichtmessung	1167
12.1	Meßgrößen	1167
12.2	Meßgrundlage und allgemeine Meßverfahren	1167
12.3	Kennzeichnung von Photometern	1168
12.3.1	Photometer	1168
12.3.2	Kalibrierung	1168
12.4	Lichtempfindliche Empfänger	1171
12.5	Messung der Beleuchtungsstärke	1172
12.6	Messung der Leuchtdichte	1173
12.7	Messung der Lichtstärke und der Lichtstärkeverteilung	1174
12.7.1	Lichtstärkeeinheit	1174
12.7.2	Meßprinzipien	1174
12.7.3	Meßanordnungen	1176
12.7.4	Darstellung	1178
12.8	Lichtstrommessung	1180
12.8.1	Auswertung der Lichtstärkeverteilung	1180
12.8.2	Auswertung der Beleuchtungsstärkeverteilung	1180
12.8.3	Messung mit einem Kugelphotometer	1183
12.9	Messungen an Lampen	1184
12.9.1	Allgemeine Bedingungen	1184
12.9.2	Messungen an Glühlampen	1184
12.9.3	Messungen an Entladungslampen	1184
12.10.	Messungen an Leuchten	1185
12.10.1	Betriebswirkungsgrad der Leuchte	1185
12.10.2	Vorschaltgerät-Lichtstromfaktor	1185
12.10.3	Lichtstärkeverteilung	1186
12.10.4	Leuchtdichteverteilung	1186
12.10.5	Messungen an Scheinwerfern	1186
12.11	Kennzahlen von Materialien	1186
12.11.1	Kennzahlen und Einflußgrößen	1186
12.11.2	Messung von ρ und τ	1187
12.11.3	Messung von Streuvermögen, Halbwertswinkel, Leuchtdichtefaktor und Leuchtdichtekoeffizient	1188
12.11.4	Reflexions- und Transmissionsnormale	1189
12.12	Strahlungsmessungen	1189
12.13	Spektralmessung	1189
12.13.1	Spektrale Zerlegung	1189
12.13.2	Strahler und Spektralapparat	1190
12.13.3	Spektrale Emission von Strahlern	1190
12.13.4	Spektrale Empfindlichkeit von Empfängern	1190
12.14	Farbmessung	1190
12.14.1	Spektralverfahren	1190

12.14.2	Dreibereichsverfahren	1190
12.14.3	Meßbedingungen	1191
12.15	Messung von Beleuchtungsanlagen	1191
12.15.1	Messung und Bewertung der Innenraumbeleuchtung	1191
12.15.2	Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung	1191
12.15.3	Messung der Sportstättenbeleuchtung	1191
12.15.4	Tageslichtmessungen	1192
13.	Lärmmessung	1194
13.1	Physikalisch-technische Grundlagen	1194
13.1.1	Schallentstehung	1194
13.1.2	Schallkennwerte	1194
13.1.3	Pegelmaße	1196
13.1.4	Rechenoperationen mit Pegelwerten	1197
13.1.5	Spektrale Zusammensetzung des Schalls	1198
13.2	Physiologisch-technische Grundlagen	1201
13.2.1	Lautstärke	1201
13.2.2	Kurven gleicher Lautstärke	1201
13.2.3	Zeitbewertung	1202
13.2.4	Beurteilung zeitlich schwankender Geräusche	1203
13.3	Meßtechnische Grundlagen	1203
13.3.1	Schalldruckmeßtechnik	1204
13.3.2	Schallintensitätsmeßtechnik	1206
13.4	Geräuschemission von Maschinen	1207
13.4.1	Selektivanalyse	1207
13.4.2	Kohärenzanalyse	1207
13.4.3	Vergleich unterschiedlicher Meßmethoden	1209
13.4.4	Beschreibung des Standes der Technik	1210
13.4.5	Lärminderung	1211
	Stichwortverzeichnis	1213