

Jörg Hoffmann

Taschenbuch der Messtechnik



7. Auflage



HANSER

1	Grundbegriffe	17
2	Messen elektrischer Größen	53
3	Messen nichtelektrischer Größen	134
4	Messelektronik	383
5	Rechnerkopplung	485
6	Ausgabegeräte	516
7	Das Konzept Messfehler	531
8	Das Konzept Messunsicherheit	571
9	Einheiten und Umrechnungen	600
10	Formelzeichenverzeichnis	620
11	Verzeichnis englisch-deutscher Begriffe	623
12	Literaturverzeichnis	631
13	Sachwortverzeichnis	658

Hoffmann
Taschenbuch der Messtechnik



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Jörg Hoffmann, Osnabrück

Autoren

Prof. Dr. phil. Dr. techn. Franz Adunka, Wien

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Biermann, Osnabrück

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl Walter Bonfig, Siegen

Dr.-Ing. Günther Fuder, Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Gruhn, Luckau

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hebestreit, Leipzig

Prof. Dr.-Ing. Jörg Hoffmann, Osnabrück

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Kopp, Hannover

Prof. Dr.-Ing. Constans Lehmann, Leipzig †

Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Richter, Leipzig †

Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Elmar Schrüfer, München

Prof. Dr.-Ing. Klaus Urbanski, Osnabrück

Taschenbuch der Messtechnik

herausgegeben von
Jörg Hoffmann

7., aktualisierte Auflage

Mit 476 Bildern und 64 Tabellen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN: 978-3-446-44271-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-44511-6

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

© 2015 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Franziska Jacob, M. A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Satz: Satzherstellung Dr. Steffen Naake, Brand-Erbisdorf

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Binden: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

Vorwort

Die Messtechnik ist interdisziplinär ausgerichtet wie kaum eine andere Wissenschaft. Sie zeichnet sich durch Anwendungen von der Produktionsautomatisierung bis zur Umweltanalytik aus und ist durch immer kürzere Innovationszyklen geprägt. Das betrifft vor allem die Sensorik und die rechnergestützte Messwertverarbeitung.

Solide Kenntnisse auf dem Gebiet der Messtechnik sind daher heute auf fast allen, insbesondere den ingenieur- und naturwissenschaftlichen Fachgebieten erforderlich. Das Taschenbuch der Messtechnik wendet sich an einen entsprechend großen Leserkreis: Studenten, Schüler, Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker, die in Studium, Beruf oder Weiterbildung mit messtechnischen Aufgabenstellungen konfrontiert werden.

Das Buch ist praxisnah gegliedert. Nach den Grundlagen der Messtechnik folgen die elektrische und die nichtelektrische Messtechnik, die Messelektronik, die Rechnerkopplung sowie die Messwertausgabe und -beurteilung. Die Abschnitte zur Messwertaufnahme sind dabei nach den zu messenden Größen gegliedert.

Die Forderung, das Gesamtgebiet der Messtechnik bei fest vorgegebenem Umfang in maximal möglicher fachlicher Breite abzudecken, führt notwendigerweise zu Einschränkungen. Es wurden daher die Grundprinzipien und typische, in der Praxis häufig anzutreffende Lösungen herauskristallisiert. Auf die Darstellung der nahezu unüberschaubaren Vielfalt an Variationen messtechnischer Lösungen, die oftmals Anpassungen an verschiedene konkrete Verhältnisse sind, wurde bewusst verzichtet. Ein umfangreiches, fachlich gegliedertes Literaturverzeichnis schlägt die Brücke zur zahlreich vorhandenen Spezialliteratur.

Verlag und Herausgeber möchten die Leser des Taschenbuches ermuntern, ihre Verbesserungsvorschläge und Wünsche zu formulieren. Sie werden dankbar entgegengenommen.

Abschließend ist es dem Herausgeber ein Bedürfnis, stellvertretend für alle beteiligten Autoren, Frau Dipl.-Ing. Erika Hotho vom Fachbuchverlag Leipzig und Herrn Dr. Steffen Naake, Chemnitz, für die stets hervorragende Zusammenarbeit sehr herzlich zu danken.

Vorwort zur 7. Auflage

Da auch die sechste Auflage des Taschenbuches wieder eine sehr gute Resonanz hatte, konnten wir die Gelegenheit für Aktualisierungen zur siebenten Auflage nutzen. In fast allen Beiträgen wurden kleinere Unebenheiten oder missverständliche Formulierungen überarbeitet, um die Qualität des Buches weiter zu erhöhen, sowie das Literaturverzeichnis aktualisiert. Aufgrund der technischen Entwicklung in der Beleuchtungstechnik (Stichwort LED-Leuchten) wurden größere Aktualisierungen im Abschnitt „Messung optischer Größen“ vorgenommen.

Stellvertretend für alle Autoren möchte ich mich bei unserer Lektorin, Frau Franziska Jacob, M. A., bedanken, sowie bei Herrn Dr.-Ing. Steffen Naake, Brand-Erbisdorf, für die in gewohnter Weise hohe Qualität bei der Erstellung von Layout und Satz.

Verbunden mit einem Dank für alle Hinweise und Anregungen zur sechsten Auflage möchten wir unsere Leser zur Artikulation derselben auch für die vorliegende siebente Auflage herzlich ermuntern.

Osnabrück, im Juli 2015

Jörg Hoffmann

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe (W. Richter, A. Hebestreit)	17
1.1	<i>Gegenstand der Messtechnik</i>	17
1.2	<i>Messtechnische Disziplinen, Aufgaben und Ziele</i>	18
1.2.1	Bezeichnungen	18
1.2.2	Strategische Ziele	20
1.2.3	Messtechnische Handlungen und Einrichtungen	22
1.3	<i>Größen und Einheiten</i>	24
1.3.1	Größen	25
1.3.2	Einheiten	25
1.4	<i>Messgrößenwandlung</i>	27
1.5	<i>Grundstrukturen</i>	30
1.6	<i>Weiterverarbeitung</i>	33
1.7	<i>Unifizierung und Schnittstellen</i>	35
1.7.1	Aufgabenunifizierung	35
1.7.2	Schnittstellen	35
1.8	<i>Signale</i>	36
1.8.1	Signalmerkmale	37
1.8.2	Signalwandlung	39
1.8.3	Abtastung und Analog/Digital-Umsetzung	41
1.8.4	Einheitssignale	42
1.9	<i>Kennfunktionen und Kennwerte</i>	44
1.9.1	Statische Kennfunktionen und Kennwerte	45
1.9.2	Dynamische Kennfunktionen und Kennwerte	46
1.9.3	Fehler	48
1.10	<i>Entwicklungstendenzen</i>	48
1.10.1	Historischer Rückblick	49
1.10.2	Ausblick	51
2	Messen elektrischer Größen (G. Gruhn, A. Hebestreit)	53
2.1	<i>Größen in Gleich- und Wechselspannungssystemen</i>	53
2.1.1	Gleichspannung und Gleichstrom	53
2.1.2	Wechselspannung und Wechselstrom	56
2.1.3	Grundschaltelemente	60
2.1.4	Wechselspannungen und Wechselströme im Dreiphasensystem	62
2.1.5	Impulsförmige und zufällige Spannungs- und Stromverläufe	65
2.1.6	Leistung	66
2.1.6.1	Wirkleistung	67
2.1.6.2	Blindleistung	69
2.1.6.3	Scheinleistung	70
2.1.6.4	Leistungsfaktor	71
2.1.7	Wirk- und Blindenergie	71
2.1.8	Größen des elektrischen und magnetischen Feldes	71
2.2	<i>Messwerke und Messgeräte</i>	73
2.2.1	Messung zeitlicher Verläufe	81
2.2.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	87
2.2.3	Messung des Quotienten zweier Gleichgrößen	89

2.2.4	Messung des Spitzenwertes	89
2.2.5	Messung des Gleichrichtwertes	90
2.2.6	Messung des Effektivwertes	91
2.2.7	Messung der Leistung	95
2.2.8	Messung der Energie	97
2.2.9	Messung der Frequenz	100
2.2.10	Messung des Phasenwinkels	101
2.2.11	Messung magnetischer Feldgrößen	103
2.2.12	Messung elektrischer Feldgrößen	104
2.2.13	Universalmessgeräte und Messplätze	104
2.2.14	Kenngrößen und Anwenderinformationen	106
2.3	<i>Messzubehör</i>	107
2.3.1	Normale	107
2.3.2	Messwiderstände	108
2.3.3	Spannungsteiler	108
2.3.4	Messwandler	110
2.3.5	Messumformer	112
2.4	<i>Messverfahren zur Messung elektrischer Größen</i>	114
2.4.1	Widerstand	115
2.4.2	Induktivität	117
2.4.3	Kapazität und Verlustfaktor	119
2.4.4	Spannung	121
2.4.5	Strom	123
2.4.6	Leistung	123
2.4.7	Energie	125
2.4.8	Phasenwinkel	126
2.4.9	Frequenz	126
2.4.10	Klirrfaktor	127
2.4.11	Formfaktor	127
2.4.12	Teilentladungen	127
2.5	<i>Analyse elektrischer Signale</i>	128
2.5.1	Harmonische Analyse	128
2.5.2	Fourier-Transformation	130
3	Messen nichtelektrischer Größen	134
3.1	<i>Temperatur (E. Schrüfer)</i>	134
3.1.1	Thermoelemente	134
3.1.2	Metall-Widerstandsthermometer	138
3.1.3	Heißleiter	140
3.1.4	Kaltleiter	142
3.1.5	Silizium-Widerstandstemperatursensor	143
3.1.6	Silizium-Sperrschicht-Temperatursensor	144
3.1.7	Quarztemperatursensor	145
3.1.8	Faseroptisches Lumineszenzthermometer	146
3.1.9	Störung des Temperaturfeldes durch Berührungsthermometer	147
3.1.10	Thermosäule	148
3.1.11	Bolometer	149
3.1.12	Pyroelektrischer Temperatursensor	149
3.1.13	Strahlungs-pyrometer	152

3.2	<i>Druck (K. W. Bonfig)</i>	153
3.2.1	Federelastische Druckmessgeräte	154
3.2.2	Flüssigkeitsmanometer	157
3.2.3	Druckmessumformer	158
3.2.3.1	Druckmessumformer nach dem Dehnungsmessstreifen- (DMS-)Prinzip	159
3.2.3.2	Druckmessumformer nach dem piezoresistiven Prinzip	159
3.2.3.3	Druckmessumformer nach dem induktiven Prinzip . .	162
3.2.3.4	Druckmessumformer nach dem kapazitiven Prinzip . .	163
3.2.3.5	Druckmessumformer nach dem Prinzip der Resonanz- frequenzmessung	165
3.2.3.6	Druckmessumformer nach dem piezoelektrischen Prin- zip	166
3.2.3.7	Druckmessumformer mit Schwingquarzen	167
3.2.3.8	Drucksensoren nach dem Prinzip der akustischen Oberflächenwellen	167
3.2.4	Vakuumdruckmessung	168
3.3	<i>Durchfluss (K. W. Bonfig)</i>	169
3.3.1	Durchflussmessung durch energetische Beziehungen einer Strö- mung	170
3.3.2	Volumenzähler	173
3.3.3	Schwebekörper-Durchflussmessung	175
3.3.4	Magnetisch-induktive Durchflussmessung (MID)	177
3.3.5	Wirbelfrequenz-Durchflussmessung	178
3.3.6	Laufzeitverfahren (Korrelation)	181
3.3.7	Ultraschall-Durchflussmessung	182
3.3.8	Massendurchflussmessung nach dem Coriolis-Prinzip	185
3.3.9	Durchflussmessung auf thermischer Grundlage	187
3.3.10	Geschwindigkeitsmessung nach dem Laser-Doppler-Verfahren .	189
3.4	<i>Füllstand und Grenzstand (K. W. Bonfig)</i>	190
3.4.1	Verfahren mit Schwimmern und Tastplatten	190
3.4.2	Kapazitive und konduktive Füllstandsmessung	192
3.4.3	Füllstandsmessung mit thermischen Verfahren	194
3.4.4	Füllstandsmessung mit radiometrischen Verfahren	195
3.4.5	Füllstandsmessung mit Schall und Ultraschall	196
3.4.6	Füllstandsmessung mit optischen Verfahren	197
3.4.7	Füllstandsmessung mit Mikrowellen nach dem Radar-Prinzip . .	198
3.4.8	Füllstandsmessung über Kraft- und Druckmessungen	199
3.4.9	Weitere Methoden zur Grenzstandsüberwachung und zur Füll- standsmessung	200
3.5	<i>Dichte (K. W. Bonfig)</i>	201
3.5.1	Dichtemessung fester Stoffe	202
3.5.1.1	Wägemethoden	202
3.5.1.2	Auftriebsmethoden	202
3.5.2	Dichtemessung von Flüssigkeiten	203
3.5.2.1	Wägemethoden, kontinuierlich und diskontinuierlich .	203
3.5.2.2	Auftriebsmethoden, kontinuierlich und diskontinuier- lich	204
3.5.2.3	Hydrostatische Dichtemessmethoden	206

	3.5.2.4	Radiometrische Dichtemessmethoden	207
	3.5.2.5	Resonanz- bzw. Schwingungsdichtemessmethoden	207
	3.5.2.6	Spezielle Verfahren für die Dichtemessung	208
3.5.3		Dichtemessung von Gasen	208
	3.5.3.1	Wäge- und Auftriebsmethoden zur Gasdichtemessung	208
	3.5.3.2	Ausström- und Schleuderverfahren für die Gasdichtemessung	209
	3.5.3.3	Schwingungsmethoden für die Gasdichtemessung	210
3.6		Viskosität (<i>K. W. Bonfig</i>)	211
	3.6.1	Abhängigkeit der Viskosität von verschiedenen Einflussgrößen	214
	3.6.2	Kapillarviskosimeter	215
	3.6.3	Rotationsviskosimeter	215
	3.6.4	Verschiebung zweier konzentrischer Zylinder	216
	3.6.5	Kugelfallviskosimeter	216
	3.6.6	Schwebekörperviskosimeter	216
	3.6.7	Schwingungsviskosimeter	216
3.7		Oberflächenspannung (<i>J. Hoffmann</i>)	217
	3.7.1	Ringaufnehmer	217
	3.7.2	Plattenaufnehmer	218
3.8		Messen mechanischer und geometrischer Größen (<i>J. Hoffmann, W. Richter</i>)	218
	3.8.1	Messen von Längen und Winkeln	218
	3.8.1.1	Mechanische Verfahren	219
	3.8.1.2	Induktive und kapazitive Verfahren	220
	3.8.1.3	Optische Verfahren	222
	3.8.1.4	Ultraschallverfahren	226
	3.8.1.5	Winkelbestimmung	227
	3.8.2	Positionsbestimmung	228
	3.8.2.1	Optische Verfahren	228
	3.8.2.2	Nichtoptische Verfahren	229
	3.8.3	Messen von Dehnungen und daraus abgeleiteten Größen	232
	3.8.3.1	Metall-Dehnungsmessstreifen	234
	3.8.3.2	Halbleiter-Dehnungsmessstreifen	235
	3.8.3.3	Anordnungen von Dehnungsmessstreifen	236
	3.8.4	Messen von Kräften	237
	3.8.5	Beschleunigungs- und Schwingungsmessung	240
	3.8.6	Messung der Masse	243
	3.8.7	Drehmomentmessung	245
	3.8.8	Messen von Oberflächeneigenschaften fester Stoffe	247
	3.8.8.1	Bestimmung von Gestaltabweichungen	247
	3.8.8.2	Bestimmung der Härte	249
	3.8.8.3	Bestimmung der Schichtdicke	250
3.9		Zeitmessung (<i>H. Kopp</i>)	251
	3.9.1	Zeitskalen	251
	3.9.2	Zeitbasen	252
	3.9.2.1	RC-Schaltungen	252
	3.9.2.2	Kondensator-Konstantstromladung	253
	3.9.2.3	LC-Oszillatoren	253
	3.9.2.4	Quarzoszillatoren	254

3.9.3	Zeitsignale von Funksendern	254
3.9.3.1	DCF77	254
3.9.3.2	GPS	255
3.9.3.3	Galileo	256
3.10	<i>Frequenzmessung (H. Kopp)</i>	256
3.10.1	Bestimmung der Frequenz	256
3.10.2	Rückführung der Frequenz- auf die Zeitmessungen	256
3.10.3	Frequenzteiler, Frequenzvervielfachung	257
3.11	<i>Drehzahl- und Winkellageerfassung (H. Kopp)</i>	258
3.11.1	Optische Signalgeber	258
3.11.2	Induktive Signalgeber	259
3.11.3	Feldplatten- und Hall-Geber	260
3.11.4	Tachogenerator	261
3.11.5	Stroboskop	261
3.12	<i>Konzentrations- und Analysenmesstechnik (J. Hoffmann)</i>	261
3.12.1	Wichtige Grundprinzipien	262
3.12.1.1	Prinzip der Absorption	263
3.12.1.2	Prinzip der Reflexion	264
3.12.1.3	Prinzip der Emission	264
3.12.1.4	Prinzip der Chromatographie	265
3.12.2	Gas- und Flüssigkeitschromatographie	266
3.12.3	Massenspektroskopie	268
3.12.4	NMR-Spektroskopie	270
3.12.5	Röntgenfluoreszenzanalyse	271
3.12.6	Optische Analyseverfahren	274
3.12.6.1	UV/VIS-Spektroskopie	274
3.12.6.2	Flammenspektroskopie / AAS, AES	275
3.12.6.3	Funken-/Bogenspektroskopie	276
3.12.6.4	Fluoreszenzspektroskopie	277
3.12.6.5	Infrarot- und Raman-Spektroskopie	278
3.12.6.6	Refraktometrie	282
3.12.6.7	Polarimetrie	285
3.12.7	Kalorimetrie	286
3.12.8	Wärmeleitfähigkeitsmessung zur Gaskonzentrationsbestimmung	288
3.12.9	Wärmetönungsmessung	289
3.12.10	Flammenionisationsmessung	290
3.12.11	Sauerstoffmessung	291
3.12.11.1	Ringkammersauerstoffsensor	291
3.12.11.2	Hitzdrahtsauerstoffsensor	292
3.12.11.3	Magnetomechanische Geräte	293
3.12.11.4	Magnetopneumatische Geräte	294
3.12.11.5	Festkörper-Sauerstoffsensor	295
3.12.12	Feuchtemessung	296
3.12.12.1	Aspirationshygrometer	297
3.12.12.2	LiCl-Hygrometer	298
3.12.12.3	Elektrolysehygrometer	299
3.12.12.4	Tauspiegelhygrometer	300
3.12.12.5	Kapazitive Feuchtesensoren	301
3.12.12.6	Haarhygrometer	301

3.12.12.7	Bistreifenhygrometer	302
3.12.12.8	Neutronen-Feuchtesensor	303
3.12.12.9	Weitere Feuchtesensoren	304
3.12.13	Konduktometrie	305
3.12.14	Potentiometrie	306
3.12.14.1	pH-Wert-Sensoren	306
3.12.14.2	Ionenselektive Sensoren	308
3.12.14.3	Redoxpotentialsensoren	309
3.12.15	Elektrodenkinetische Messverfahren	309
3.12.16	Partikelmesstechnik	310
3.12.16.1	Mechanische Verfahren	312
3.12.16.2	Optische Verfahren	313
3.12.16.3	Sedimentationsverfahren	318
3.12.16.4	Feldstörungsverfahren	322
3.12.16.5	Akustische Verfahren	323
3.12.16.6	Oberflächenbestimmungsverfahren	323
3.12.17	Probennahme und Probenteilung	324
3.13	<i>Messung ionisierender Strahlung (E. Schrüfer)</i>	325
3.13.1	Größen und Einheiten	325
3.13.2	Detektoren für γ -Strahlung	326
3.13.2.1	Ionisationskammer	327
3.13.2.2	Auslösezählrohr	327
3.13.2.3	Szintillationszähler	328
3.13.2.4	Halbleiter-Strahlungsdetektor	329
3.13.2.5	Impulshöhenanalyse	330
3.13.3	Detektoren für β -Strahlung	330
3.13.4	Detektoren für α -Strahlung	330
3.13.5	Neutronenflussmessung	331
3.13.5.1	BF ₃ -Zählrohr	332
3.13.5.2	Borbelegte Ionisationskammer	332
3.13.5.3	Spaltkammer	332
3.13.5.4	Neutronen-Beta-Detektoren	333
3.13.6	Dosismessung	334
3.13.7	Integriertes Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Umweltradioaktivität	335
3.14	<i>Messung optischer Größen (H. Kopp)</i>	336
3.14.1	Strahlungsphysikalisches und lichttechnisches Maßsystem	336
3.14.2	Empfänger zur Messung optischer Strahlung	338
3.14.2.1	Fotowiderstände	339
3.14.2.2	Fotodioden	340
3.14.2.3	Fototransistoren	342
3.14.2.4	Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) und Kanalelektronenvervielfacher (KEV)	343
3.14.2.5	Charge Coupled Device (CCD)	344
3.14.2.6	Lateraleffektdioden	345
3.14.2.7	Breitbandige Strahlungsempfänger	345
3.14.2.8	UV-Sensoren	346

3.14.3	Besonderheiten von Empfängern für Lichtmessungen	346
3.14.3.1	$V(\lambda)$ -Anpassung	346
3.14.3.2	Kosinusanpassung	347
3.14.4	Messung lichttechnischer Größen	348
3.14.4.1	Verfahren der Lichtschwächung	348
3.14.4.2	Beleuchtungsstärke	349
3.14.4.3	Leuchtdichte	351
3.14.4.4	Lichtstrom	352
3.14.4.5	Lichtstärke	354
3.14.4.6	Lichtstärkeverteilung	355
3.14.4.7	Farbmessungen	356
3.14.4.8	Lichttechnische Stoffkennzahlen	360
3.14.5	Fotometrische Normale	361
3.14.5.1	Fotometrische Strahlungsnormale	361
3.14.5.2	Fotometrische Empfängernormale	361
3.14.5.3	Fotometrische Reflexionsnormale	361
3.14.5.4	Normlichtarten	362
3.15	Messung akustischer Größen (G. Fuder)	362
3.15.1	Schalldruckpegel	362
3.15.1.1	Bewertete Schalldruckpegel	364
3.15.1.2	Addition von Schalldruckpegeln	366
3.15.1.3	Mittelwerte des Schalldruckpegels	367
3.15.2	Geräte zur Messung von Schalldruckpegeln	368
3.15.3	Beurteilung praktischer Schallsituationen	369
3.15.4	Lautstärkepegel und Lautheit	371
3.15.4.1	Ermittlung des Lautstärkepegels durch Hörvergleich	371
3.15.4.2	Lautheit	374
3.15.4.3	Berechnung von Lautstärkepegel und Lautheit	374
3.15.4.4	Vergleich der Kenngrößen Schalldruckpegel, Lautstärkepegel und Lautheit	376
3.15.5	Schalleistungspegel	376
3.15.6	Direkte Messung der Schallintensität	379
3.15.7	Akustische Nahfeld-Holografie	380
4	Messelektronik	383
4.1	Analoge Messelektronik (C. Lehmann)	383
4.1.1	Prinzipien der analogen Messwertverarbeitung	383
4.1.1.1	Strukturen und Komponenten von Messeinrichtungen	384
4.1.1.2	Prinzip der Rückkopplung	386
4.1.1.3	Varianten der elektrischen Anpassung	387
4.1.2	Systemkomponenten analoger Messgeräte	390
4.1.2.1	Tastköpfe	390
4.1.2.2	Sensoren in Brückenschaltungen	391
4.1.2.3	Messverstärker	396
4.1.2.4	Analoge Rechenschaltungen	411
4.1.2.5	Hilfsschaltungen für Messwandler	418
4.1.2.6	Analoge elektronische Schalter	424
4.1.2.7	Filter	428

4.2	<i>Digitale Messelektronik (K. Urbanski)</i>	433
4.2.1	Grundlagen der Digitaltechnik	433
4.2.1.1	Zuordnungssysteme	434
4.2.1.2	Boolesche Algebra	436
4.2.1.3	Logische Grundverknüpfungen	440
4.2.1.4	Minimieren von Schaltfunktionen	441
4.2.2	Kombinatorische Grundsaltungen	445
4.2.2.1	Code-Umsetzer	445
4.2.2.2	Zahlenkomparator	447
4.2.2.3	Multiplexer und Demultiplexer	448
4.2.2.4	Addierer	449
4.2.3	Sequentielle Grundsaltungen	451
4.2.3.1	Prinzipieller Aufbau einer sequentiellen Schaltung	451
4.2.3.2	Monostabile Kippstufen (Monoflops)	452
4.2.3.3	Bistabile Kippstufen (Flipflops)	452
4.2.3.4	Zähler	455
4.2.3.5	Register und Schieberegister	458
4.2.4	Eigenschaften digitaler integrierter Schaltkreise	460
4.2.5	Anwenderspezifische Bausteine (ASICs)	466
4.2.5.1	Fullcustom	467
4.2.5.2	Semicustom	467
4.2.5.3	Programmierbare Logik	468
4.2.6	Mikrocomputer-Schaltkreise	471
4.2.6.1	Struktur des Mikrocomputers	472
4.2.6.2	Mikroprozessoren	473
4.2.6.3	Schreib-/Lesespeicher (RAM)	474
4.2.6.4	Festwertspeicher (ROM)	478
4.2.6.5	Ein-/Ausgabe-Bausteine	479
4.2.6.6	Mikrocontroller	479
4.2.7	Messgeräte für die Logikanalyse	482
4.2.7.1	Logikprüfer	482
4.2.7.2	Logikanalysator	483
5	Rechnerkopplung	485
5.1	<i>Grundlagen und Begriffe (J. Hoffmann)</i>	485
5.1.1	A/D-Umsetzer	488
5.1.1.1	Parallel-A/D-Umsetzer	489
5.1.1.2	Sukzessive-Approximation-A/D-Umsetzer	490
5.1.1.3	Nachlauf-A/D-Umsetzer	491
5.1.1.4	Rampen-A/D-Umsetzer	492
5.1.1.5	Dual-Slope-A/D-Umsetzer	493
5.1.1.6	Charge-Balancing-A/D-Umsetzer	495
5.1.1.7	Delta-Sigma-Umsetzer	496
5.1.2	D/A-Umsetzer	498
5.1.2.1	Stromgewichtete D/A-Umsetzer	498
5.1.2.2	R-2R-D/A-Umsetzer	499
5.2	<i>Intelligente Sensorik (K. Urbanski)</i>	499
5.3	<i>Bussysteme in der Messtechnik (H. Kopp)</i>	503
5.3.1	Bus-Topologie	504
5.3.2	OSI-Schichtenmodell	505

5.3.3	Physikalische Schnittstellenstandards	506
5.3.3.1	RS232C	506
5.3.3.2	RS422	507
5.3.3.3	RS485	508
5.3.4	Datenübertragung	508
5.3.4.1	Busse für serielle Übertragung	508
5.3.4.2	Synchronisationsverfahren	509
5.3.4.3	Bus-Zugriffsverfahren	509
5.3.4.4	Bus-Protokolle	510
5.3.4.5	Sicherung gegen Übertragungsfehler	510
5.3.5	Messgerätebus IEEE488	511
5.3.5.1	IEEE STD 488.1	511
5.3.5.2	IEEE STD 488.2	512
5.3.6	Beispiele genormter Feldbussysteme	512
5.3.7	Kopplungen unterschiedlicher Bussysteme (Gateways)	512
5.3.8	Maßnahmen zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)	514
6	Ausgabegeräte (C. Lehmann)	516
6.1	<i>Digitale Anzeigeelemente</i>	516
6.1.1	Optoelektronische Anzeigeelemente	516
6.1.1.1	Binärsignal-Anzeige mit LED	517
6.1.1.2	Quasi-analoge Anzeige	517
6.1.1.3	Numerische Anzeige mit LCD	518
6.1.1.4	Alphanumerische Anzeigen	519
6.2	<i>Bildsichtgeräte</i>	520
6.2.1	Farbbildröhren für Monitore	520
6.2.1.1	Prinzipieller Aufbau	521
6.2.1.2	Frequenzkennwerte	521
6.2.1.3	Grundfunktionen der Grafikkarte	523
6.2.2	LCD-Bildschirme	524
6.3	<i>Drucker</i>	525
6.3.1	Funktionsprinzipien im Überblick	525
6.3.2	Kommunikations-Schnittstellen	526
6.3.2.1	Centronics-Schnittstelle	527
6.3.2.2	IEC-Bus-Schnittstelle	528
6.3.2.3	Serielle Schnittstelle EIA-232	528
6.3.2.4	USB-Schnittstelle	529
6.3.2.5	Firewire-Schnittstelle	530
7	Das Konzept Messfehler (J. Hoffmann, J. Biermann)	531
7.1	<i>Fehlerdefinition</i>	531
7.2	<i>Fehlerarten</i>	532
7.2.1	Quantisierungsfehler und digitaler Restfehler	532
7.2.2	Statische Fehler	534
7.2.3	Dynamische Fehler	535
7.2.4	Systematische Fehler	538
7.2.5	Zufällige Fehler	539
7.3	<i>Trennung von systematischen und zufälligen Fehleranteilen</i>	539
7.4	<i>Kennlinienkorrektur</i>	540
7.4.1	Lineare Approximation	541

7.4.2	Geradenapproximation	542
7.4.3	Polynominterpolation	544
7.4.4	Spline-Interpolation	547
7.5	Fehlerfortpflanzung	549
7.6	Messbereich, Auflösung und Messgenauigkeit	550
7.7	Auswertung von Messergebnissen	551
7.7.1	Der Begriff der Messreihe	551
7.7.1.1	Schätzwerte und wahre Werte	552
7.7.1.2	Mittelwert und Erwartungswert	552
7.7.1.3	Stichprobenvarianz und Varianz	553
7.7.1.4	Mittlerer Fehler der Einzelmessung	553
7.7.1.5	Mittlerer Fehler des Mittelwertes	555
7.7.1.6	Mittlerer Fehler der Standardabweichung	557
7.7.1.7	Empirische Kovarianz und Korrelationskoeffizient	558
7.7.2	Grafische Darstellung von Messergebnissen	558
7.7.2.1	Histogramm und Verteilungsdichtefunktion	558
7.7.2.2	Summenhäufigkeit und Verteilungsfunktion	560
7.7.2.3	Weitere Darstellungsmöglichkeiten	561
7.7.3	Regressionsrechnung	561
7.7.3.1	Einfache lineare Regression	562
7.7.3.2	Vertrauensintervalle für Regressionskoeffizient und -konstante	564
7.7.3.3	Mehrfache lineare und nichtlineare Regression	564
7.7.4	Tests	565
7.7.4.1	Der t -Test als einseitiges Problem	567
7.7.4.2	Der t -Test als zweiseitiges Problem	567
7.7.4.3	Der χ^2 -Streutest	568
7.7.4.4	Der t -Zweistichprobentest	568
7.7.4.5	Der F -Test	569
7.7.5	Weitere Auswertungsmethoden	569
8	Das Konzept Messunsicherheit (F. Adunka)	571
8.1	Messwertverteilungen	576
8.2	Die Verteilungsfunktion der Ergebnisgröße	582
8.3	Korrelierte Eingangsdaten	583
8.4	Kritik an der Vorgehensweise nach dem GUM	588
8.5	Vorgehensweise bei der Berechnung von Messunsicherheiten	589
8.5.1	Schematische Vorgehensweise nach EA-4/02	589
8.5.2	Angabe der Messunsicherheit	590
8.5.3	Unsicherheitsangabe bei Digitalanzeigen	590
8.6	Weitere Beispiele	591
8.7	Ergänzende Bemerkungen	598
9	Einheiten und Umrechnungen (W. Richter, J. Hoffmann)	600
	Formelzeichenverzeichnis	620
	Verzeichnis englisch-deutscher Begriffe	623
	Literaturverzeichnis	631
	Sachwortverzeichnis	658

1 Grundbegriffe

Die Messtechnik erfährt wie jede andere technische Wissenschaftsdisziplin eine ständige Weiterentwicklung. Typisch dafür ist das Auftauchen neuer Begriffe oder die Änderung von Begriffsinhalten; so hat beispielsweise der „Sensor“ den früheren „Messfühler“ weitgehend abgelöst. Eine Erläuterung der im Buch verwendeten Fachbegriffe ist deshalb sinnvoll.

1.1 Gegenstand der Messtechnik

Die **Messtechnik** ist heute ein disziplinübergreifendes Wissenschafts- und Technologiegebiet. Sie befasst sich (im engeren Sinne) beim Messvorgang mit der Erfassung und Darstellung von physikalischen Größen und der Zuordnung einer Maßzahl.

Tabelle 1.1 Begriffe der Mess- und Prüftechnik

Begriff	Erklärung
Eichen	Von einer staatlichen Stelle (in Deutschland: Eichamt) oder von einem Produzenten mit dem Recht zur Herstellereichung nach gesetzlichen Vorschriften durchgeführte Prüfung
Graduieren	Teilen einer Skala (Aufbringen von Teilungsmarken auf dem Skalenträger)
Justieren	Einstellen eines Messsystems, um Messabweichungen auf Werte zu bringen, die den technischen Forderungen entsprechen
Kalibrieren	Feststellen des für ein Messsystem gültigen Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße
Lehren	maßlicher Vergleich auf vorgegebene Grenzwerte mit Hilfe nichtanzeigender Prüfmittel
Maßliches Prüfen	objektiver Vergleich einer quantitativ unbekanntem Größe mit einer Maßverkörperung
Messen	quantitative Ermittlung des Wertes einer physikalischen Größe durch objektiven Vergleich mit einer Maßverkörperung
Nichtmaßliches Prüfen	subjektiver Vergleich durch Sinneswahrnehmung
Prüfen	Feststellen, ob ein Prüfobjekt in seinen Eigenschaften mit den geforderten hinreichend übereinstimmt
Schätzen	Behelf für Messen (Schätzen von Zwischenwerten, Bereichsabschätzung u. ä.)
Zählen	Feststellen einer Anzahl gleichartiger Objekte, Vorgänge oder Einheiten

Der Größe X wird die Maßzahl x als Vielfaches der Einheitsgröße N zugeordnet. N wird durch ein Messnormal verkörpert:

$$X = x \cdot N \quad (1.1)$$

► *Hinweis:* Dazu müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein /0.48/:

1. Die zu messende Größe muss qualitativ eindeutig bestimmt sein.
2. Das Messnormal muss durch Konvention festgelegt sein.

Beide Voraussetzungen sind keineswegs trivial: Größen wie etwa „Behaglichkeit“ in der Klimatechnik, „Schönheit“ oder „Intelligenz“ sind nicht allgemein anerkannt definiert und damit im obigen strengen Sinn nicht messbar. Begrifflich werden die Mess- und die Prüftechnik oft gleichwertig benutzt, weil sie sich auf Objekteigenschaften beziehen. Tabelle 1.1 enthält zugehörige Begriffserklärungen.

Messen ist die Gesamtheit von Tätigkeiten oder Vorgängen, mit denen eine quantitativ unbekannte Größe mit einer Maßverkörperung verglichen und bewertet wird; *Messen heißt vergleichen.*

1.2 Messtechnische Disziplinen, Aufgaben und Ziele

Eine Unterteilung der Messtechnik ist angesichts der existierenden Vielfalt an Aufgaben, Einsatzfeldern und Zielstellungen notwendig und zweckmäßig. Dabei lässt sich kein allgemein gültiges Prinzip anwenden. Leider bleibt der Sprachgebrauch auch heute noch uneinheitlich.

1.2.1 Bezeichnungen

In der historischen Entwicklung galt für eine *angewandte Messtechnik* die Unterteilung in Betriebs-, Labor- und Fertigungsmesstechnik lange Zeit als ausreichend:

Betriebsmesstechnik umfasst den Bereich des betrieblichen Messwesens für kontinuierliche und quasikontinuierliche Prozesse (Verfahrens-, Energie-, Kraftwerkstechnik).

Labormesstechnik bezieht sich auf nichtfertigungsgebundene Messprozesse in besonderen Räumen und mit unterstellter höherer Präzision.

Fertigungsmesstechnik ist vor allem Längen- und Gestaltmesstechnik in der metallverarbeitenden Industrie.

Der wissenschaftlich-technische Fortschritt hat diese Grenzen weitgehend aufgehoben. So müssen z. B. in der Halbleiterfertigung sehr extreme Bedingungen eingehalten werden, wobei gleichzeitig Massenproduktion vorliegt; zur *Betriebsüberwachung* gehört auch die Technik zur Überwachung der Sicherheit von Personen, Betriebsmitteln und Produkten (z. B. zur Einhaltung der *MAK-Werte*, das sind maximale Arbeitsplatzkonzentrationen), zur Einhaltung der Vorschriften des Umweltschutzes, die ihrerseits sehr spezielle Messtechniken erfordern usw.

Tabelle 1.2 *Messaufgaben der industriellen Messtechnik*

Informationsgewinnung für	Anwendung, Ziel
1 Energieumwandlung und -verteilung	Überwachung und Steuerung von energetischen Umwandlungsprozessen in Kraftwerken; Überwachung und Steuerung in Verteilungsnetzen für Elektroenergie, Gas und Kohlenwasserstoffe (Erdöl, Heizöl, Benzin); Energieabrechnung und -verkauf
2 Prozesssteuerung	Prozesssteuerung von Hand (Anzeige für Bedienpersonal), durch Regler (Verwendung von Einheitssignalen) oder durch Rechner (Prozessleitsysteme; Verwendung von Bussystemen). Zielfunktionen: maximale Ausbeute, minimaler Energie- und Stoffeinsatz, hohe Produktqualität usw.
3 Prozessanalyse	Untersuchung von Prozessen zur quantitativen Beschreibung und mathematischen Modellierung (Erstellung von Prozessmodellen)
4 Produktanalyse	Bestimmung von Zusammensetzung und Konzentrationen in Produkten der Verfahrenstechnik, in Roh- und Hilfsstoffen sowie Abprodukten
5 Fertigungstechnik	Fertigungskontrolle und -steuerung, vorwiegend über geometrische Größen (Länge, Winkel, Gestalt, Oberfläche) im Maschinen- und Gerätebau
6 Qualitätsüberwachung und -sicherung	Eingangskontrolle für Einsatzmaterialien und -produkte (z. T. Stichprobenkontrolle); Überwachung der Qualität von Halbfertig- und Fertigprodukten; Basis für Gewährleistung und Produkthaftung
7 Logistik, Warenverkehr	Lagerhaltung, Bilanzierung, Abrechnung; Kauf, Verkauf; Transport- und Dienstleistungen; Dokumentation, Statistik
8 Betriebstechnik	Gebäudeleittechnik (Heizung, Klima, Lüftung, Versorgung, Kommunikation), Sicherheitstechnik, Brandwarnung und Brandschutz; Umweltschutz (Emission von Schadstoffen, Lärm, ...)

Die **industrielle Messtechnik** umfasst heute alle Messaufgaben, Messmittel, Messverfahren und messtechnischen Tätigkeiten in Industriebetrieben.

Die Aufgaben der industriellen Messtechnik sind in Tabelle 1.2 aufgelistet, wobei sich verschiedene Aufgaben überschneiden können. Die Informationen aus einer Messeinrichtung können zur Lösung von verschiedenen Aufgaben genutzt werden, etwa die Nutzung einer Messreihe zur *Qualitätsüberwachung*, zur daraus abgeleiteten *Steuerung* von Teilprozessen und zur gleichzeitigen logistischen *Auswertung* in der Betriebsführung. Diese weit gefächerten Aufgaben machen eine einfache Klassierung problematisch. Trotzdem ist eine Unterteilung in drei Gebiete sinnvoll, die traditionell eine gewisse Eigenständigkeit gewahrt haben:

Die **Prozessmesstechnik** umfasst die Messung verfahrenstechnischer Prozessgrößen, z. B. Temperatur, Druck, Durchfluss, Füllstand u. a. (s. Zeilen 1 bis 3 in Tabelle 1.2, aber auch Zeilen 6 und 8).

Die **Analysenmesstechnik** beinhaltet die Messung von Stoffeigenschaften und Stoffkonzentrationen (Zeile 4 in Tabelle 1.2).

Die **Fertigungsmesstechnik** umfasst die Messung von Länge, Winkel, Gestalt und Oberfläche, vorwiegend im Maschinen- und Gerätebau (Zeile 5 in Tabelle 1.2).

Nicht an einer solchen „Branchen“zuordnung orientiert ist eine Gruppierung nach der Größenart der zu messenden Größen, also z. B. nach *Längenmesstechnik*, *Temperaturmesstechnik* usw. Eine aus dieser Sichtweise ganz wesentliche Disziplin von übergreifender Bedeutung ist die *Elektrische Messtechnik*.

Die **Elektrische Messtechnik** umfasst die Messung elektrischer und magnetischer Größen, z. B. elektrischer Strom, Spannung, Widerstand, Kapazität, Induktivität, Frequenz und Phasenwinkel, die Messung elektrischer Größen in Energienetzen, im Nieder- und Hochfrequenzbereich usw. und ebenso die Messung nichtelektrischer Größen über die Abbildung auf elektrische Größen, was heute summarisch als *Sensortechnik* bezeichnet wird.

► Damit kann heute eine Vielzahl der Aufgaben in Tabelle 1.2 gelöst werden.

1.2.2 Strategische Ziele

Die Aufgaben der Messtechnik sind weitreichend. Sie ist Mittel zur Kenntniserweiterung über naturwissenschaftlich-technische, biologische, ökonomische oder auch gesellschaftliche Zusammenhänge und liefert Informationen

Tabelle 1.3 Aufgabengebiete der Messtechnik

Aufgabe	Charakter der Messung	Strategisches Ziel	Möglichkeitsfeld der Information	Kriterien	Beispiel
Erkundungsmessung	oft nur einmalig	Analyse, Quantifizierung	wenig oder nur teilweise bekannt	große Informationsmenge, Speicherung, etappenweise Auswertung	Grundlagenforschung
	beliebig wiederholbar (Testmessung)	Festlegung von Nenn- und Grenzwerten	weitgehend bekannt, Störungen sind möglich	Programmverarbeitung, Bewertung manuell	
Prozessmessung	ständig, evtl. zu diskreten Zeitpunkten	Istdaten im Nennbereich, Störungserkennung	bekannt	Programmverarbeitung, ggf. Eingriff	Prozessüberwachung
		Einfahren und Halten optimaler Zustände		Programmverarbeitung	
Produktmessung (Prüfung)	zu diskreten Zeitpunkten	Parameterwandlung, Fehlerdiagnose, Fehlerreduktion (Nullfehlerproduktion)	vollständig bekannt	Programmverarbeitung, Sortierung (Klassierung)	Qualitätskontrolle, Produktionssteuerung

zur Verallgemeinerung solcher Kenntnisse zu neuen Gesetzmäßigkeiten. Ihre strategische Zielstellung ist unterschiedlich. Man kann zwei große Zielgruppen unterscheiden /0.31/:

Erkundungsmessungen sind Bestandteil wissenschaftlicher Experimente. Sie dienen der quantitativen Bestätigung oder der Korrektur von Hypothesen oder Thesen.

Die *Messaufgabe* ist unvollständig formuliert. Eine Wiederholung der Messung ist oft nicht möglich und erfordert deshalb größte Sorgfalt (Beispiel: Erkundungen des erdfernen Raums mit Flugkörpern). Eine Erkundungsmessung liegt auch vor, wenn Messgröße, Messbereich und Messsystem zwar hinreichend, die *Einflussgrößen* aber wenig bekannt sind.

Produkt- und Prozessmessungen finden unter weitgehend bekannten Bedingungen statt. Handlungen und Entscheidungen sind vorgeschrieben bzw. sind aus der *Produktionsstrategie* abgeleitet.

- *Hinweis*: Produkt- und Prozessmessungen erfordern meist wenig *Messpersonal*, lassen sich gut programmieren und selbsttätig ablaufend gestalten.

Erkundungsmessungen stellen ein *Suchproblem* dar, während Produkt- und Prozessmessungen typische *Wiederholprobleme* sind, bei denen Aufwandsaspekte ein größeres Gewicht haben als bei Erkundungsaufgaben. In Tabelle 1.3 werden beide Zielgruppen weiter aufgefächert und erläutert.

1.2.3 Messtechnische Handlungen und Einrichtungen /0.49/

Messobjekt ist der unmittelbar am Messvorgang beteiligte Körper oder Stoff, der Träger der Messgröße ist.

Messgröße heißt ein gesuchtes oder zu bestimmendes Objektmerkmal im Zusammenhang mit dem Messvorgang.

Messgegenstand heißt die messbare Eigenschaft eines Körpers.

Messeinrichtung heißt eine konstruktive oder funktionelle Einrichtung zur Messung, Anzeige und Messdatenverarbeitung der Messwerte von einer oder mehreren physikalischen Größen. *Sensor* (Messfühler), Wandler, Anzeige- und Verarbeitungseinheiten sowie zugehörige Steuerungen und Programme lassen sich unter dem Begriff *Messeinrichtung* zusammenfassen.

Messergebnis ist ein einzelner Messwert oder das mit Hilfe mathematischer Beziehungen aus mehreren Werten ermittelte Ergebnis.

Messmittel sind Maßverkörperungen, Messgeräte, Programme usw., die bei Anwendung einer bestimmten Messmethode zu einem Messergebnis führen.

Messmethode ist eine allgemeine Regel zur Durchführung einer Messung. Sie ist nicht an eine physikalische Realisierung gebunden und damit von großer Allgemeingültigkeit.

Ausschlagmethode. Hierbei wird die Messgröße direkt in eine Ausgangsgröße (z. B. Anzeige) umgewandelt. Dazu wird keine Hilfsenergie von außen benötigt; die zur Messgrößenumwandlung benötigte Energie wird dem Messmedium oder dem Umfeld (z. B. dem Schwerfeld der Erde) entnommen. Anschauliche Beispiele dafür sind die Federwaage oder das Flüssigkeits-Ausdehnungsthermometer.

Differenzmethode. Bei dieser Methode wird der Messgröße (oder deren Abbildungsgröße) von außen eine Vergleichsgröße gegenübergestellt. Diese *Vergleichsgröße* bleibt während des Messvorgangs konstant, so dass nur eine Differenz zwischen Mess- und Vergleichsgröße gebildet werden muss, die zur Anzeige (oder zur Auswertung) kommt. Ist die Vergleichsgröße zugleich *Sollwert*, wird nur die Differenz dazu angezeigt (sog. *Abweichungsanzeige*).

Kompensationsmethode. Dabei wird der zu messenden Größe eine zweite Größe entgegengesetzt gerichtet entgegengeschaltet. An einem Nullindikator wird festgestellt, ob beide Größen gleich groß sind. Ist dies der Fall, so ist die Kompensationsgröße zum Maß für die Messgröße geworden. Diese Methode ist deswegen von großer Bedeutung, weil die Kompensationsgröße von anderer physikalischer Größenart als die Messgröße sein kann, d. h., es ist der Übergang von einem Signalträger auf einen zweiten Signalträger möglich (z. B.: Kraft \rightarrow elektrischer Strom).

- Ein anschauliches Beispiel ist die bekannte Hebelwaage: Dem vom Wägegut ausgeübten Drehmoment am Waagebalken wird ein von aufgelegten Wägestücken verursachtes Moment entgegengeschaltet; bei Nullstellung ist die Summe der einzelnen Wägestücke ein Maß für die Masse des Wägegutes. Das Kompensationsmoment (bzw. die entsprechende Kraft) muss nicht zwangsläufig vom Schwerfeld, sondern kann auch von einem Elektromagneten erzeugt werden, so dass der Übergang *Drehmoment* \rightarrow *elektrischer Strom* problemlos möglich ist.

Messverfahren ist eine praktische Anwendung einer Messmethode unter Nutzung eines Messprinzips zur Gewinnung von Messwerten für eine bestimmte Messgröße. Dazu gehört unter Umständen auch die Tätigkeit einer Messperson.

Messprinzip heißt ein physikalisches Prinzip oder ein gesetzmäßiger Zusammenhang, der für den jeweiligen Messvorgang genutzt wird.

Messreihen heißt die Gesamtheit aller gemessenen Werte, die am gleichen Objekt nacheinander gewonnen oder aus an gleichen Objekten vorgenommenen Einzelmessungen gebildet werden.

Das **Messwesen** ist die Gesamtheit von Bestimmung und materieller Darstellung (Verkörperung) von physikalisch-technischen Maßeinheiten, die Überwachung von Messmitteln sowie aller zugehörigen wissenschaftlichen, technischen, juristischen und Verwaltungsbereiche einschließlich der nationalen und internationalen Vereinheitlichung.

Direkte Messung. Die direkte Messung ist eine grundlegende Messmethode, bei der eine Messgröße unmittelbar mit einem die Einheit tragenden Maßstab verglichen wird (z. B. Längenmessung mit dem Lineal).

Indirekte Messung. Bei einer indirekten Messung wird die zu messende Größe aus den Messdaten einer oder mehrerer anderer Größen ermittelt, die mit der gesuchten Größe (Aufgabengröße) in einem definierten Zusammenhang steht (stehen).

Inkrementale Messung. Eine inkrementale Messung liegt vor, wenn von einem Bezugspunkt aus durch Addition oder Subtraktion in *Inkrementen* (= kleinster Zuwachs einer veränderlichen Größe) die momentane Größe ermittelt wird, z. B. zur Winkelmessung oder Wegmessung an Werkzeugmaschinen. Dazu werden in gleichmäßigen Abständen auf einem Träger aufgebrachte Markierungen optisch oder elektrisch abgetastet.

1.3 Größen und Einheiten

Das für den Messvorgang unabdingbar notwendige Vergleichsnormale wird der Messperson oft nicht mehr bewusst. In der historischen Entwicklung war ein Normal und dessen Darstellung dagegen oft Gegenstand des wissenschaftlichen Meinungsstreits, der bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts anhielt und erst mit der Einführung der Internationalen Einheitensystems (SI) einen gewissen Abschluss erfahren hat.

1.3.1 Größen

Der Begriff „Größe“ bedeutet in technischen Systemen das *Merkmal* eines Objekts (Körper, Zustand, Vorgang). Er dient zur qualitativen Beschreibung dieses Merkmals (z. B. Länge, Zeit, Temperatur, elektrischer Widerstand, Durchfluss . . .). Nur von Größen der gleichen Größenart können Summen oder Differenzen gebildet werden. Der Wert einer Größe wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit gebildet. Er beschreibt dann die Größe quantitativ.

- *Hinweis*: Ist das gesuchte Merkmal einer Messgröße nicht direkt messbar, so sind doch Aussagen darüber möglich, wenn ein gesetzmäßiger Zusammenhang mit einer messbaren Größe besteht. Auch ist es möglich, dass die gesuchte Größe nicht direkt oder nur mit großem Aufwand direkt zugänglich ist oder kein brauchbares Messergebnis existiert. Wenn also eine messbare Größe existiert, die mit der gesuchten in einem reproduzierbaren Zusammenhang steht, wird diese gemessen.

Aufgabengröße heißt eine gesuchte Größe, die nicht direkt messbar ist und mit der gesuchten Größe in einem reproduzierbaren Zusammenhang steht.

1.3.2 Einheiten /0.11/, /1.1/, /1.2/

Eine (Maß-)Einheit dient als *Bezugsgröße* für die quantitative Bestimmung und Angabe des Wertes von gleichen Größen der gleichen Größenart. Der Einheit wird der Zahlenwert 1 zugeordnet.

Entwicklungsgeschichte. Eine Einheit könnte im Prinzip beliebig gewählt werden. Diese prinzipielle Möglichkeit einer willkürlichen Festlegung, etwa durch Landesfürsten oder andere Obrigkeiten, hat in der Vergangenheit zu der teilweise heute noch spürbaren Vielfalt und Uneinheitlichkeit von Einheiten geführt. Zunehmende Verflechtungen in Wirtschaft und Industrie förderten nachhaltig die Bestrebungen zur Vereinheitlichung von Maßeinheiten, so dass es viele Versuche gab, allgemein gültige Maßsysteme zu schaffen. Bis weit in das 19. Jahrhundert hinein wurden die Einheiten vielfach von menschlichen Körpermaßen (*Elle, Fuß, Klafter*), von Gegenständen (*Scheffel, Fass, Fuder*) oder vom Arbeitsvermögen (*Morgen, Tagewerk*) gebräuchlich oder willkürlich definiert und meist nicht dezimal unterteilt. Heute sind die wichtigsten Einheiten in internationalen Vereinbarungen festgelegt und in den meisten Industriestaaten gesetzlich vorgeschrieben.

Das bekannteste *nichtmetrische System* ist das englische ft-lb-s-System (foot, pound, second als Basiseinheiten). Andere frühere Einheitensysteme sind das cgs-System (*Zentimeter, Gramm, Sekunde*), wobei noch ein elektrostatisches, ein elektromagnetisches und ein symmetrisches (Gaußsches) Maßsystem unterschieden wurde.

Internationale Meterkonvention. Die Herausbildung des *metrischen Systems* und dessen gesetzliche Einführung (in Frankreich 1799, in Sachsen 1858, in Preußen 1868) führte schließlich im Jahre 1875 zum Abschluss der Internationalen Meterkonvention mit Gründung eines *Internationalen Büros für Maß und Gewicht* (BIPM) mit Sitz in Paris, zu den seit 1889 stattfindenden *Generalkonferenzen für Maß und Gewicht* sowie zu Gründungen von Staatsinstituten. Diese staatlichen Einrichtungen sind die jeweilige technische Oberbehörde für das Eichwesen, so im deutschsprachigen Raum in

- Deutschland: *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*,
- Österreich: *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*,
- Schweiz: *Eidgenössisches Amt für Maß und Gewicht*.

Diese staatlichen Einrichtungen haben vor allem die Aufgaben der Festlegung von Einheiten und Einheitensystemen, der Festlegung des Umfangs staatlicher Einflussnahmen (z. B. der *Eichpflicht*) und der Durchführung von Eichungen und anderen amtlichen Überwachungen.

Internationales Einheitensystem. Die 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) hat 1960 das „Internationale Einheitensystem“, abgekürzt SI (Système International d’Unités), aus 7 Basiseinheiten beschlossen. Diese *Basiseinheiten* beruhen weitgehend auf reproduzierbaren Naturkonstanten und können ihrerseits nicht weiter aus anderen Einheiten abgeleitet werden (→ Tabelle 9.1).

Vorsätze. Für den praktischen Gebrauch können und sollen dezimale Vielfache und Teile von SI-Einheiten gebildet werden. Dazu dienen Vorsätze, die möglichst so gewählt werden sollen, dass die Zahlenwerte der anzugebenden Größen zwischen 0,1 und 1000 liegen. Als Vorsätze sollen ganzzahlige Potenzen von Tausend (10^{3n}) bevorzugt werden (→ Tabelle 9.2); die anderen Vorsätze sind nur noch zu verwenden, wenn diese bereits üblich sind, wie z. B. cm.

Abgeleitete Einheiten. Natürlich lässt sich mit den Basiseinheiten nur ein Teil der in der Technik auftretenden Größen vergleichen, so dass weitere SI-Einheiten notwendig sind, die aus den Basiseinheiten abgeleitet werden. Sie werden unter Benutzung der bekannten Zeichen für Multiplikation und Division dargestellt (z. B. m/s als abgeleitete Einheit für die Geschwindigkeit).

Abgeleitete Einheiten mit besonderem Namen. Weitere abgeleitete SI-Einheiten haben einen besonderen Namen. Sie sind in Tabelle 9.3 aufgeführt. Auch mit diesen Einheiten können weitere Einheiten durch Multiplikation oder Division dargestellt werden (z. B. V/m für die elektrische Feldstärke).

Gesetzliche Einheiten mit besonderem Namen. Weiter gibt es SI-fremde, wegen ihrer weiten Verbreitung aber auch weiter zulässige Einheiten (so z. B.

die Zeiteinheiten *Minute*, *Stunde* und *Tag*) sowie nur in speziellen, eingeschränkten Anwendungsbereichen zulässige Einheiten wie die *Dioptrie* in der Augenoptik, das metrische *Karat* für Edelsteine oder das *Tex* für längenbezogene Maße in der Textilbranche. Tabelle 9.4 enthält alle gesetzlichen Einheiten mit besonderem Namen.

Suchhilfen. Dem Anwender begegnen in der Praxis die Einheiten seltener geordnet nach ihrer Größenart, wie das in Normen und Tabellenwerken geschieht, sondern über ihre Einheitenzeichen oder über die Größe selbst. Tabelle 9.5 ist deshalb nach Einheitenzeichen geordnet und enthält alle kohärenten gesetzlichen SI-Einheiten. Da hierbei, wie oben erwähnt, Mehrfachbelegungen auftreten, ist der jeweilige physikalische Bereich mit angegeben, um die Zuordnung zu erleichtern. Tabelle 9.6 ist dagegen nach Größen geordnet und gibt die dafür zu benutzende SI-Einheit an. Selbstverständlich kann diese, je nach Zahlenwert (Wertebereich) der betreffenden Größe, mit Vorsätzen gemäß Tabelle 9.2 versehen werden, um handliche Zahlenwerte zu erhalten (siehe oben).

Angelsächsische Maßeinheiten. Schwierigkeiten bereitet oft der Umgang mit angelsächsischen Maßeinheiten, da dort noch zahlreiche, meist historisch bedingte Einheitenbezeichnungen existieren, die jeweils in SI-Einheiten umzurechnen sind. Hinzu kommt, dass Einheiten mit derselben Benennung in den USA und Großbritannien unterschiedliche Werte haben können. Zur Unterscheidung werden deshalb oft die Zusätze US (für USA) und UK (für United Kingdom, Großbritannien) angefügt. In Tabelle 9.7 sind die in der Messtechnik häufig auftretenden angelsächsischen Einheiten aufgeführt, wiederum nach ihrem Einheitenzeichen geordnet und mit ihren Umrechnungsbeziehungen in SI-Einheiten versehen.

Einheiten für Energie und Leistung. Schließlich werden in der Fachliteratur im Zusammenhang mit Energiebetrachtungen, in nationalen und überregionalen Bedarfsrechnungen sowie bei globalen Betrachtungen der Energiesituation neben den SI-Einheiten noch weitere, nichtkohärente Einheiten benutzt. Sie sind mit ihren Umrechnungsbeziehungen zu den SI-Einheiten in Tabelle 9.8 aufgenommen worden.

1.4 Messgrößenwandlung

Die Wandlung der Messgröße in eine weitere Größe ist eine der häufigsten Vorgänge in Messeinrichtungen; eine direkte Vergleichbarkeit ist sehr selten. Das gilt besonders für das Messen mit elektrischen Größen.

Mit dem Vergleichsaspekt (siehe oben) ist unmittelbar die Frage nach der *Maßverkörperung* und deren Realisierung im Einzelfall verknüpft.