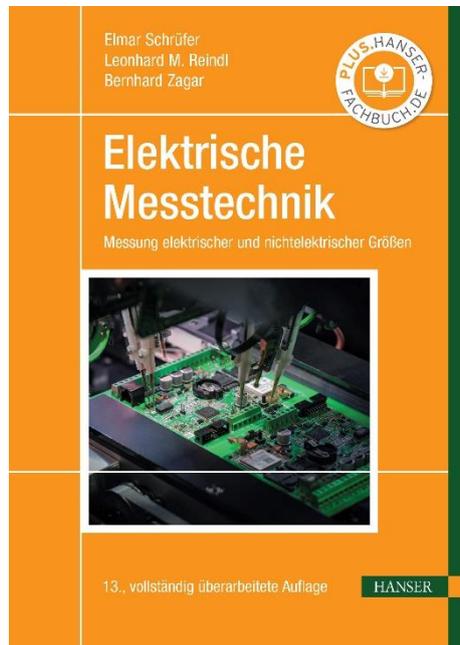


HANSER



Leseprobe

zu

Elektrische Messtechnik

von Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl und Bernhard
Zagar

Print-ISBN: 978-3-446-47164-1
E-Book-ISBN: 978-3-446-47443-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446471641>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 13. Auflage

Am 20. Mai 2019 gab es aus Sicht der Metrologie eine entscheidende Änderung bei der Festlegung der sieben SI-Basiseinheiten, die seitdem nicht mehr als Artefakte (das Urkilogramm), idealisierte Messvorschriften (das Ampere), Materialeigenschaften (das Kelvin, das Mol), festgelegte Faktoren (die Candela) oder Naturkonstanten (die Sekunde, der Meter), sondern über sogenannte definierende Konstanten festgelegt sind. Das erste Kapitel der vorliegenden Auflage wurde also gründlich überarbeitet um diese Neudefinition zu berücksichtigen.

Ebenso wurde das neunte Kapitel vollständig überarbeitet und an die moderne Messpraxis angepasst. Die Behandlung der Computer-Schnittstellen wurde gestrafft, dafür wurden Programmierbeispiele für Mikroprozessoren in eingebetteten Anwendungen zusätzlich aufgenommen.

Die Autoren bedanken sich bei den Studierenden für Hinweise auf die in der vorigen Auflage bedauerlicherweise immer noch vorhandene Unklarheiten, Fehler und teilweise auch falsche Referenzierungen, die korrigiert bzw. präzisiert wurden.

Wir würden uns freuen, wenn auch die aktualisierte 13. Auflage freundlich aufgenommen werden würde.

Übungsaufgaben mit Lösungen zu den Kapiteln aus dem Buch finden Sie als Zusatzmaterial auf www.plus.hanser-fachbuch.de. Auf den Webseiten www.schruefer-messtechnik.de und www.jku.at/emt sind weitere Informationen und Übungsaufgaben zur Elektrischen Messtechnik verfügbar.

Die Herstellung des Buches lag auf Seiten des Carl Hanser Verlags in den bewährten Händen von Frau Natalia Silakova. Die Autoren sind ihr zu großem Dank verpflichtet.

München, Freiburg, Linz, Mai 2022 Elmar Schrüfer†, Leonhard M. Reindl, Bernhard Zagar

Vorwort zur 12. Auflage

In der Neubearbeitung für die 12. Auflage wurden neben einige Korrekturen und Präzisierungen auch neue Inhalte aufgenommen wie zum Beispiel im Kapitel Messverstärker die Ableitung der Kennlinie einer Differenzeingangsstufe eines Operationsverstärkers oder die Darlegung der Kalibrierung bei einem Wechselstrom-Gleichstrom-Komparator. Die von der Generalkonferenz und des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht vorgegebene Schreibweise der Einheiten, nach der bei der Angabe von Einheiten nur ein SI-Vorsatz für die Bildung von dezimalen Vielfachen verwendet werden soll, wurde durchgehend berücksichtigt, auch wenn dadurch an manchen Stellen die bei ungekürzter Schreibweise oft ersichtliche Information wegfällt (Beispiel Beweglichkeit von Ladungsträgern in m^2/Vs vs. $(\text{m/s})/(\text{V/m})$, also Geschwindigkeit bezogen auf die vorherrschende Feldstärke).

Die Autoren bedanken sich ferner bei den Studierenden für die zahlreichen Rückmeldungen zum Inhalt und für Hinweise auf typografische wie auch sonstige Fehler, die in der Neuauflage gerne berücksichtigt wurden.

Die Autoren würden sich freuen, wenn auch die aktualisierte 12. Auflage freundlich aufgenommen werden würde.

Hingewiesen sei neben der Hanser-Fachbuch-Homepage noch auf die folgenden Webseiten mit weiteren Informationen und Übungsaufgaben zur Elektrischen Messtechnik:

www.schruefer-messtechnik.de

www.jku.at/emt

Die Herstellung des Buches lag auf Seiten des Carl Hanser Verlags in den bewährten Händen von Frau Franziska Kaufmann und Herrn Manuel Leppert. Die Autoren sind ihnen zu großem Dank verpflichtet.

München, Freiburg, Linz, Mai 2018 Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl, Bernhard Zagar

Inhalt

1	Grundlagen	15
1.1	Umfang und Bedeutung der elektrischen Messtechnik	15
1.2	Naturkonstanten und Maßeinheiten	17
1.2.1	Naturkonstanten	17
1.2.2	Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten	18
1.2.3	Die neuen SI-Einheiten	20
1.2.4	Definition und Darstellung der Sekunde	21
1.2.5	Definition und Darstellung des Meters	23
1.2.6	Definition und Darstellung des Kilogramms	23
1.2.7	Definition und Darstellung der elektrischen Einheiten	25
1.2.8	Die SI-Einheiten der Temperatur, der Stoffmenge und der Lichtstärke	28
1.2.9	Größen- und Zahlenwertgleichungen	30
1.3	Statisches Verhalten der Messgeräte; Kennlinie und Empfindlichkeit	31
1.4	Messfehler und Messunsicherheiten	32
1.4.1	Bekannte Einflüsse; Korrektur des bekannten Messfehlers	33
1.4.2	Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; eine einzige Messgröße X	35
1.4.3	Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; verknüpfte Messgrößen $Y = f(X_i)$	39
1.4.4	Student'sche t -Verteilung	43
1.4.5	Unbekannte, systematische Unsicherheiten	43
1.4.6	Korrelierte Messgrößen	44
1.4.7	Zusammenfassung	48
1.5	Dynamisches Verhalten der Messgeräte	49
1.5.1	Verzögerungsglied 1. Ordnung	50
1.5.2	Verzögerungsglied 2. Ordnung	57
1.5.3	Weitere Beispiele für das Zeitverhalten	65
1.6	Dynamische Messfehler	67
1.6.1	Fehlermöglichkeiten	67
1.6.2	Korrektur des dynamischen Fehlers	69
1.7	Strukturen von Messeinrichtungen	71
1.7.1	Kettenstruktur	71
1.7.2	Parallelstruktur	72
1.7.3	Kreisstruktur	74
1.8	Die informationstragenden Parameter der Messsignale	75
1.9	Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen	78
1.9.1	Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen	78
1.9.2	Sensornahe Signalverarbeitung	78

Messung von Strom und Spannung;**spannungs- und stromliefernde Aufnehmer 81**

2.1	Elektromechanische Messgeräte und ihre Anwendung	81
2.1.1	Messwerke	81
2.1.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	84
2.1.3	Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	90
2.1.4	Messung der Leistung	95
2.1.5	Messung der elektrischen Arbeit	100
2.2	Elektronenstrahl-Oszilloskop	101
2.2.1	Elektronenstrahl-Röhre	101
2.2.2	Baugruppen	103
2.2.3	Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops	108
2.3	Messverstärker	109
2.3.1	Einführung	109
2.3.2	Nicht invertierender Spannungsverstärker	116
2.3.3	Invertierender Stromverstärker	122
2.3.4	Anwendungen des Spannungsverstärkers	127
2.3.5	Anwendungen des Stromverstärkers	129
2.3.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers	134
2.4	Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer	139
2.4.1	Weg- und Winkelmessung	140
2.4.2	Drehzahlaufnehmer – Generatoren	141
2.4.3	Hall-Sonde	142
2.4.4	Induktions-Durchflussmesser	146
2.5	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer	148
2.5.1	Thermoelement	148
2.5.2	Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor	155
2.6	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren	156
2.6.1	Galvanisches Element	156
2.6.2	pH-Messkette mit Glaselektrode	156
2.6.3	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter	159
2.7	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer	161
2.7.1	Wirkungsweise und Werkstoffe	161
2.7.2	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	164
2.7.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor	167
2.8	Optische Aufnehmer und Sensoren	169
2.8.1	Fotoelement und Fotodiode	171
2.8.2	Fotosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung	174
2.8.3	Fotozelle	175
2.8.4	Fotovervielfacher und Mikrokanalplatte	176
2.9	Aufnehmer für ionisierende Strahlung	177
2.9.1	Ionisationskammer	177
2.9.2	Halbleiter-Strahlungsdetektor	179

Messung von ohmschen Widerständen;

Widerstandsaufnehmer	182
3.1 Strom- und Spannungsmessung	182
3.1.1 Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom	182
3.1.2 Vergleich mit einem Referenzwiderstand	183
3.2 Anwendung einer Konstantstromquelle	184
3.3 Brückenschaltungen	186
3.3.1 Abgleich-Widerstandsmessbrücke	186
3.3.2 Ausschlag-Widerstandsmessbrücke	188
3.4 Verstärker für Brückenschaltungen	193
3.4.1 Subtrahierer mit invertierendem Verstärker	193
3.4.2 Subtrahierer mit Elektrometer-Verstärkern	194
3.4.3 Trägerfrequenz-Brücke und -Messverstärker	197
3.5 Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	200
3.6 Widerstandstemperaturfühler	201
3.6.1 Metall-Widerstandsthermometer	201
3.6.2 Heißeleiter	205
3.6.3 Kaltleiter	207
3.6.4 Silizium-Widerstandstemperatursensor	209
3.6.5 Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern	210
3.7 Ermittlung verfahrenstechnischer Größen durch Temperaturmessungen ..	211
3.7.1 Füllstandswächter	211
3.7.2 Thermischer Massenstrommesser	212
3.7.3 Messung der Luftfeuchte; Messung von Gaskonzentrationen	215
3.8 Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden	216
3.9 Lichtempfindlicher Widerstand	217
3.10 Magnetisch steuerbarer Widerstand	218
3.10.1 Feldplatte	218
3.10.2 Anisotroper magnetoresistiver Effekt (AMR)	219
3.10.3 Spinventil, Riesenmagnetowiderstand und kolossaler Magnetowiderstand	220
3.11 Dehnungsmessstreifen	220
3.11.1 Prinzip	220
3.11.2 Metall-Dehnungsmessstreifen	221
3.11.3 Störgrößen	223
3.11.4 Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse	224
3.11.5 Halbleiter-Dehnungsmessstreifen	227
3.12 Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien	228
3.12.1 Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand	229
3.12.2 Messung der Spannungsdifferenz bei Differenzial-Widerstands- aufnehmern	231
3.12.3 Differenzial-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke	232

4

**Messung von Blind- und Scheinwiderständen;
induktive und kapazitive Aufnehmer 233**

4.1	Strom- und Spannungsmessung	234
4.1.1	Messung der Effektivwerte	234
4.1.2	Vergleich mit Referenzelement	235
4.1.3	Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstandes	236
4.1.4	Messung eines Phasenwinkels	237
4.1.5	Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis	239
4.2	Wechselstrom-Abgleichbrücke	240
4.2.1	Prinzip	240
4.2.2	Kapazität-Messbrücke nach Wien	241
4.2.3	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell	242
4.2.4	Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell-Wien	242
4.2.5	Phasenschieber-Brücke	243
4.3	Wechselspannungs-Ausschlagbrücke	243
4.4	Induktive Aufnehmer	244
4.4.1	Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	245
4.4.2	Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung	247
4.4.3	Kurzschlussring-Sensor	249
4.4.4	Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber	249
4.4.5	Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen	250
4.4.6	Magnetoelastische Kraftmessdose	251
4.5	Kapazitive Aufnehmer	252
4.5.1	Änderung des Plattenabstands	252
4.5.2	Änderung der Plattenfläche	253
4.5.3	Geometrische Änderung des Dielektrikums	254
4.5.4	Änderung der Permittivitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur	256
4.6	Einsatz der induktiven und kapazitiven Abgriffe in Differenzdruck-Messumformern	256
4.7	Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer	258
4.7.1	Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes	259
4.7.2	Größe der Brückenschaltung entnehmbare Leistung	260
4.7.3	Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer	261

5

Digitale Grundschaltungen; Zeit- und Frequenzmesstechnik . 263

5.1	Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Messwerte	263
5.1.1	Duales Zahlensystem	263
5.1.2	Binärcodes für Dezimalzahlen	264
5.1.3	Ziffernanzeige; Vergleich mit Skalenanzeige	266
5.1.4	Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer; digital steuerbare Spannungsquelle . . .	266
5.2	Bistabile Kippstufen	268
5.2.1	Asynchrones <i>RS</i> -Speicherglied	268
5.2.2	Taktgesteuertes <i>RS</i> -Speicherglied	269
5.2.3	Taktflankengesteuertes <i>D</i> -Speicherglied	270

5.2.4	Taktflankengesteuertes <i>JK</i> -Speicherglied	271
5.2.5	Taktflankengesteuertes <i>T</i> -Speicherglied	271
5.3	Zähler	272
5.4	Register	273
5.4.1	Parallelregister	273
5.4.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	274
5.4.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	275
5.4.4	Multiplexer als Parallel/Serien-Umsetzer	276
5.5	Digitale Zeitmessung	277
5.5.1	Einführung	277
5.5.2	Digitale Messung eines Zeitintervalls	278
5.5.3	Messung einer Periodendauer	278
5.5.4	Messung eines Phasenwinkels	279
5.6	Digitale Frequenzmessung	280
5.6.1	Digitale Messung einer Frequenz oder einer Impulsrate	280
5.6.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen ..	281
5.6.3	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen	281
5.6.4	Universalzähler	281
5.7	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz	283
5.7.1	Analoge Messung eines Zeitintervalls; <i>t/u</i> -Umformung	283
5.7.2	Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; <i>f/u</i> -Umformung	283

6

Analog/Digital-Umsetzer für elektrische und mechanische Größen 286

6.1	Abtast- und Halteglied	286
6.2	Direkt vergleichende A/D-Umsetzer	288
6.2.1	Komparator	288
6.2.2	Komparator mit Hysterese	289
6.2.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	290
6.2.4	Kaskaden-Parallel-Umsetzer	291
6.2.5	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Messwert	292
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	294
6.3.1	<i>u/t</i> -Zweirampen-Umsetzer	294
6.3.2	<i>u/f</i> -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	296
6.3.3	Delta-Sigma-Umsetzer	298
6.4	Kenngrößen der Analog/Digital-Umsetzer	301
6.4.1	Kennlinie	301
6.4.2	Abtasttheorem	302
6.4.3	Umsetzrate und Auflösung	303
6.4.4	Quantisierungsrauschen, Zahl der effektiven Bit	304
6.5	Analog/Digital-Umsetzer in Messgeräten	306
6.5.1	Digital-Multimeter	306
6.5.2	Digitales Speicher-Oszilloskop	307
6.6	A/D-Umsetzer für mechanische Größen	310
6.6.1	Endlagenschalter	310
6.6.2	Codierte Längen- und Winkelgeber	311

6.6.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber	312
6.6.4	Vergleich der codierten und inkrementalen Längengeber	316

7 Schwingungsmessungen

7.1	Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer	317
7.1.1	Kippschaltung mit Verstärker und Komparator	317
7.1.2	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen	320
7.2	Harmonische Oszillatoren	322
7.2.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen, Prinzip	322
7.2.2	LC-Oszillator	323
7.2.3	RC-Oszillator	326
7.3	Piezoelektrische Resonatoren	328
7.3.1	Volumenschwingende Quarze	328
7.3.2	Oberflächenwellen OFW in Quarzen	335
7.3.3	Funkabfragbare Sensoren	338
7.3.4	Ultraschall-Durchflussmesser	340
7.4	Mechanische Schwingungen	343
7.4.1	Charakteristische Größen	343
7.4.2	Relative Schwingungsmessung	344
7.4.3	Absolute Schwingungsmessung	346
7.4.4	Monolithisch integrierter Beschleunigungssensor	349
7.4.5	Stimmgabel-Frequenzumsetzer	350
7.4.6	Coriolis-Massendurchflussmesser	351

8 Spektralanalyse

8.1	Aufgabenstellung	354
8.2	FTC eines zeitkontinuierlichen Signals	354
8.3	FTD eines zeitdiskreten Signals	355
8.3.1	Übergang vom zeitkontinuierlichen zum zeitdiskreten Signal	355
8.3.2	Unterschiede bei der Transformation eines zeitkontinuierlichen und eines zeitdiskreten Signals	356
8.3.3	Abtasttheorem	357
8.4	DFT eines abgetasteten, zeitbegrenzten Signals	358
8.4.1	Datensatz mit endlich vielen Werten; diskrete Spektralfunktion ..	358
8.4.2	Zusammenhang zwischen FTD und DFT; Anhängen von Nullen ..	362
8.4.3	Wahl der Abtastfrequenz	365
8.4.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	366
8.5	DFT eines abgetasteten, nicht zeitbegrenzten Signals	368
8.5.1	Konstantes Signal	368
8.5.2	Periodisches Signal	371
8.5.3	Anhängen von Nullen, Abtastfrequenz und Messzeit	376
8.5.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT	376
8.6	Fensterfunktionen	378
8.6.1	Kriterien zur Beurteilung	378
8.6.2	Fensterfunktionen und ihre Spektren	379
8.6.3	Fensterung bei transienten Signalen	386

8.7	Anwendungen der DFT	387
8.8	Leistungsmessung im Zeit- und Frequenzbereich	388
9	Rechnerunterstützte Messsysteme	393
9.1	Bussysteme	393
9.1.1	Kenngrößen von Bussystemen	393
9.1.2	Universal Serial Bus USB	395
9.2	Steuerung eines Messaufbaus	395
9.2.1	Gerätesteuerung	396
9.2.2	Aufgaben der Messprogramme	397
9.2.3	Ablauf eines rechnergestützten Messprozesses	398
9.2.4	Virtuelles Messgerät	404
9.2.5	Steuerung eines Messaufbaus mit LabVIEW	405
9.3	Eingebettetes System	410
9.3.1	Mikrocontroller	411
9.3.2	Programmierung von Mikrocontrollern	414
	Literatur	419
	Index	427

Übungsaufgaben mit Lösungen zu den Kapiteln aus dem Buch finden Sie als Zusatzmaterial auf plus.hanser-fachbuch.de.

1

Grundlagen

Das Messen ist das quantitative Erfassen einer Größe. Die Messgeräte erweitern dabei in einem fast unvorstellbaren Ausmaß die über unsere Sinne wahrnehmbare Umwelt. Sie erschließen uns Bereiche, in denen wir blind oder taub sind. So sieht unser Auge z. B. von den elektromagnetischen Schwingungen nur die Strahlung mit Wellenlängen zwischen 0,38 und 0,78 μm , während den Messgeräten ein Wellenlängenbereich von über 18 Zehnerpotenzen zugänglich ist. Gemessen und berechnet werden Größen, die weit außerhalb unserer direkten Erfahrung liegen, wie etwa der Durchmesser von Atomkernen oder die Ausdehnung des Weltalls.

Das objektive, quantitative Beobachten bildet zusammen mit dem logischen Denken die Quelle jeder naturwissenschaftlichen Erkenntnis¹⁾. Diese von Galilei konsequent angewandte Methode führte zur Entwicklung der Naturwissenschaften und diese wiederum bilden die Grundlage unserer durch die Technik geprägten Zivilisation. Hier ist das Messen wichtig für Forschung, Entwicklung, Fertigung, Produktion und Prüffeld in der Industrie, für den Austausch von Gütern im Handel und für die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Transportsysteme. Darüber hinaus hilft die Messtechnik auf den Gebieten des Umweltschutzes und der Medizin unsere Lebensbedingungen zu verbessern. Aus diesem breiten Einsatz resultiert, dass nicht nur die mit Entwicklung, Fertigung und Vertrieb der Messgeräte befassten Ingenieure, sondern praktisch alle in der Naturwissenschaft oder Technik Tätigen als potenzielle Anwender der Messtechnik entsprechende Kenntnisse benötigen.

■ 1.1 Umfang und Bedeutung der elektrischen Messtechnik

Die elektrische Messtechnik befasst sich zunächst mit der Messung elektrischer Größen wie z. B.

- Spannung,
- Ladung, Strom,
- Widerstand, Induktivität, Kapazität,
- Phasenwinkel,
- Frequenz.

¹⁾ Plato (427–347 v. Chr.): „Das beste Mittel gegen Sinnestäuschungen ist das Messen, Zählen und Wägen. Dadurch wird die Herrschaft der Sinne über uns beseitigt. Wir richten uns nicht mehr nach dem sinnlichen Eindruck der Größe, der Zahl, des Gewichts der Gegenstände, sondern berechnen, messen und wägen sie. Und das ist Sache der Denkkraft, Sache des Geistes in uns.“ [Der Staat, Kröner Stuttgart 1973]

Dabei lässt sich die zu messende Größe nur selten direkt auf einem Instrument anzeigen. Oft müssen die Messsignale galvanisch getrennt, entkoppelt, übertragen und fast immer auch „verarbeitet“ werden, wie z. B. verstärkt, kompensiert, umgeformt, umgesetzt, gefiltert, gespeichert, umgerechnet, linearisiert, bevor das Messergebnis auf einer

- Skalen-, Ziffern- oder Bildschirmanzeige ausgegeben,
- auf Papier oder elektronischen Medien festgehalten und dokumentiert oder auch
- direkt zur Überwachung, Steuerung oder Regelung eines Prozesses benutzt werden kann.

Messgeräte sind die im Signalfluss liegenden Geräte einer Messeinrichtung, die die Qualität des Messergebnisses wie z. B. die Genauigkeit und die Anzeigegeschwindigkeit beeinflussen [1.1, 1.2, 1.4]. Sie müssen nicht wie in Bild 1.1 in Reihe geschaltet sein, sondern können auch andere **Strukturen** bilden. Die zwischen den Messgeräten ausgetauschten **Signale** enthalten die Information über die zu messende Größe. Diese Information kann z. B. in der Amplitude oder Frequenz einer elektrischen Größe stecken oder auch quantisiert in Form eines codierten Signals vorliegen.

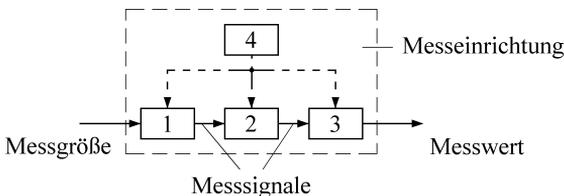


Bild 1.1 Messeinrichtung bestehend aus den Messgeräten 1, 2, 3 und einem die Hilfsenergie liefernden Hilfsgerät 4

Das elektrische Messen hat eine besondere Bedeutung dadurch gewonnen, dass über verschiedene physikalische Effekte nichtelektrische Größen in elektrische umgeformt werden können. Die dafür benötigten **Aufnehmer, Sensoren, Detektoren, Fühler** sind für sehr viele zu messende Größen verfügbar (Bild 1.2), so dass praktisch jede physikalische Größe als elektrisches Signal dargestellt und dann mit den Methoden der elektrischen Signalverarbeitung weiterbehandelt werden kann. Die Messtechnik wird insbesondere durch die Anwendung dieser physikalischen Effekte auf den unterschiedlichsten Gebieten der Technik zu einem sehr interessanten Fach.

Die elektrische Messtechnik ist somit die Disziplin, die sich befasst mit

- der Gewinnung des elektrischen Messsignals,
- der Struktur der Messeinrichtung,
- den Eigenschaften der Signalformen,
- der Übertragung und Verarbeitung der Messsignale und
- der Ausgabe und Darstellung der gewonnenen Information.

Für eine gegebene Messaufgabe sind jeweils der geeignete Aufnehmer auszuwählen, die Struktur zu entwerfen und die Signalform festzulegen, um die hinsichtlich der Genauigkeit, Störsicherheit und Kosten günstigste Kombination zu erhalten.

Die elektrische Messung ist dabei anderen Verfahren insbesondere überlegen durch

- das leistungsarme bis leistungslose Erfassen von Messwerten,
- das hohe Auflösungsvermögen,
- das gute dynamische Verhalten,
- die stete Messbereitschaft,

- die bequeme Übertragbarkeit über weite Entfernungen,
 - die leichte Verarbeitung der Messdaten
- und hat sich so weitgehend durchgesetzt.

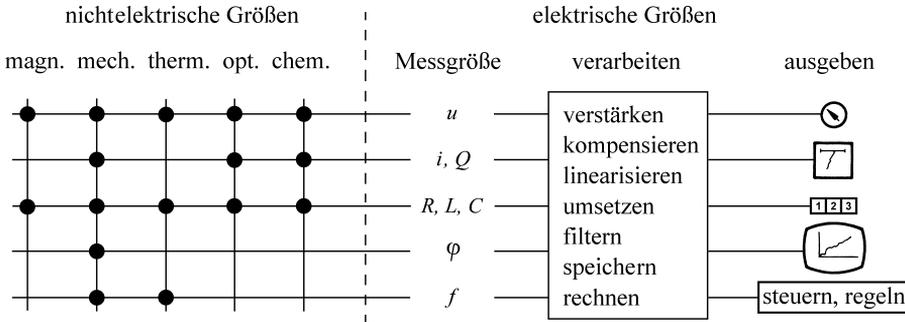


Bild 1.2 Mit Hilfe von Sensoren oder Aufnehmern werden nichtelektrische Größen in elektrische umgeformt und damit der elektrischen Messung zugänglich

■ 1.2 Naturkonstanten und Maßeinheiten

Eine physikalische Größe ist die messbare Eigenschaft eines Objekts, Zustands oder Vorgangs. Die Messung der physikalischen Größe erfolgt durch einen Vergleich mit einer Maßeinheit. Die Zahl, die angibt, wie oft die Einheit in der zu messenden Größe enthalten ist, wird als Zahlenwert der physikalischen Größe bezeichnet:

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit.} \quad (1.1)$$

Um messen zu können, müssen also vorher die Einheiten definiert sein. Diese orientierten sich zunächst am Menschen (Elle, Fuß) oder an den Abmessungen und der Umdrehungszeit unserer Erde (Meile, mittlerer Sonntag). Sie werden teilweise von Ort zu Ort unterschiedlich gehandhabt und erschwerten damit sowohl den Austausch von Gütern des täglichen Bedarfs als auch den von wissenschaftlichen Erkenntnissen. So werden seit über hundert Jahren große Anstrengungen unternommen, die Einheiten allgemein verbindlich, genau und zeitlich beständig zu definieren.

1.2.1 Naturkonstanten

Schon 1889 hat Max Planck vorgeschlagen, das System der Einheiten nicht auf Materie zu gründen, sondern auf die Fundamentalkonstanten, die Naturkonstanten, selbst. Diese sind unabhängig von den spezifischen Eigenschaften der Stoffe. So sind die Naturkonstanten von besonderem Interesse für die Messtechnik, da sie die Basis der Einheiten bilden können. Das Ziel ist, die Einheiten weniger durch Maßverkörperungen zu definieren, sondern mehr durch Experimente, die überall und immer wieder nachvollzogen werden können. Dabei werden die Einheiten gleichzeitig auf Fundamentalkonstanten zurückgeführt. [1.3]–[1.5]. In

folgender Tabelle sind die von CODATA (Committee on Data for Science and Technology) 2022 empfohlenen physikalischen Fundamentalkonstanten zusammengestellt.

Tabelle 1.1 Physikalische Fundamentalkonstanten [1.3]

	Zahlenwert	Einheit	rel. Unsicherheit
Avogadro-Konstante N_A	$6,02214076 \cdot 10^{23}$	mol^{-1}	null
Boltzmann-Konstante k	$1,380649 \cdot 10^{-23}$	J K^{-1}	null
elektrische Elementarladung e	$1,602176634 \cdot 10^{-19}$	A s	null
elektrische Feldkonstante ε_0	$8,8541878128 \cdot 10^{-12}$	$\text{A s V}^{-1} \text{m}^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Faraday-Konstante $F = e N_A$	96485,33212...	A s mol^{-1}	null
Gravitationskonstante G	$6,67430 \cdot 10^{-11}$	$\text{N m}^2 \text{kg}^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Josephson-Konstante $K_J = 2e/h$	$4,835978484... \cdot 10^{14}$	Hz V^{-1}	null
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0	299792458	m s^{-1}	null
magnetische Feldkonstante μ_0	$1,25663706212 \cdot 10^{-6}$	$\text{V s A}^{-1} \text{m}^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Ruhemasse des Elektrons m_0	$9,1093837015 \cdot 10^{-31}$	kg	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Planck'sches Wirkungsquantum h	$6,62607015 \cdot 10^{-34}$	J s	null
universelle Gaskonstante $R = k N_A$	8,314462618...	$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$	null
Von-Klitzing-Konstante $R_K = h/e^2$	$2,581280745... \cdot 10^4$	Ω	null

Die Lichtgeschwindigkeit c_0 ist als Konstante festgelegt zu

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}. \quad (1.2)$$

Auch die elektrische Feldkonstante ε_0 (Permittivität des Vakuums) und die magnetische Feldkonstante μ_0 (Permeabilität des Vakuums) sind mit Zahlenwert und Einheit definiert. Sie sind mit der Lichtgeschwindigkeit verknüpft über

$$c_0^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}. \quad (1.3)$$

Durch diese Festlegung wird erreicht, dass die mechanisch und elektrisch gemessenen Werte für Kraft, Energie und Leistung übereinstimmen.

1.2.2 Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten

Die Generalkonferenz für Maß und Gewicht hat 1960 das „Système International d’Unités“ empfohlen, das inzwischen weltweit eingeführt und auch in der Bundesrepublik Deutschland gesetzlich vorgeschrieben ist [1.6]–[1.8]. Das System definiert die sogenannten SI-Einheiten (Tabelle 1.2), denen die Basiseinheiten zugrunde liegen (Tabelle 1.3). Durch Multiplikation und/oder Division der Basiseinheiten werden die für die anderen physikalischen Größen benötigten Einheiten abgeleitet, wie z. B. die Einheit m/s für die Geschwindigkeit oder m/s^2 für die Beschleunigung. Wird die Ableitung so vorgenommen, dass bei der Umrechnung nur der Zahlenfaktor 1 auftritt, so sind die dabei entstandenen Einheiten **kohärent**. Sie bilden zusammen mit den Basiseinheiten ein kohärentes System. Einige der abgeleiteten SI-Einheiten haben dabei selbstständige Namen mit eigenen Kurzzeichen bekommen.

Tabelle 1.2 Abgeleitete SI-Einheiten; die in Klammern stehenden Einheiten sind veraltet

Größe und Formelzeichen	SI-Einheit	Beziehung	Weitere und zum Teil veraltete Einheiten
ebener Winkel α	Radian rad	1 rad = 1 m/m	Grad: $1^\circ = \pi/180$ rad
räumlicher Winkel Ω	Steradian sr	1 sr = 1 m ² /m ²	
Frequenz f, ν	Hertz Hz	1 Hz = 1/s	
Kraft F	Newton N	1 N = 1 kg m/s ²	1 kp \approx 9,81 N (1 dyn \approx 10 ⁻⁵ N)
Druck p	Pascal Pa	1 Pa = 1 N/m ²	Bar: 1 bar = 10 ⁵ Pa (1 kp/m ² \approx 0,98 bar)
Energie E	Joule J	1 J = 1 N m = 1 W s = 1 kg m ² /s ²	1 kWh = 3,6 · 10 ⁶ J 1 eV = 1,60 · 10 ⁻¹⁹ J (1 cal \approx 4,19 J) (1 erg = 10 ⁻⁷ J)
Leistung P	Watt W	1 W = 1 J/s = 1 N m/s = 1 kg m ² /s ³	(Pferdestärke) (1 PS \approx 735,499 W)
elektr. Ladung Q	Coulomb C	1 C = 1 A s	
elektr. Spannung U	Volt V	1 V = 1 W/A	
elektr. Feldstärke E	V/m		
elektr. Widerstand R	Ohm Ω		
Leitwert G	Siemens S	1 S = 1/ Ω	
Induktivität L	Henry H	1 H = 1 Wb/A = 1 Vs/A	
elektr. Kapazität C	Farad F	1 F = 1 C/V = 1 A s/V	
magn. Feldstärke H	A/m		(Oersted Oe: 1 Oe \approx 80 A/m)
magn. Fluss Φ	Weber Wb	1 Wb = 1 V s	(Maxwell M: 1 M = 10 ⁻⁸ V s)
magn. Flussdichte B	Tesla T	1 T = 1 V s/m ²	(Gauß G: 1 G = 10 ⁻⁴ V s/m ²)
Lichtstrom Φ	Lumen lm	1 lm = 1 cd sr	
Beleuchtungsstärke E	Lux lx	1 lx = 1 lm/m ²	
Aktivität A einer radioaktiven Substanz	Becquerel Bq	1 Bq = 1/s	(Curie Ci: 1 Ci = 3,7 · 10 ¹⁰ s ⁻¹ = 3,7 · 10 ⁻¹⁰ Bq)
Energiedosis D	Gray Gy	1 Gy = 1 J/kg	(Rad rd: 1 rd = 10 ⁻² J/kg)
Ionendosis J	C/kg		(Röntgen R: 1 R = 2,58 · 10 ⁻⁴ C/kg)
Äquivalentdosis	Sievert Sv	1 Sv = 1 J/kg	(Rem rem: 1 rem = 10 ⁻² J/kg)

Tabelle 1.3 Basisgrößen und Basiseinheiten

Gebiet	Basisgröße	Formelzeichen	Basiseinheiten	Einheitenzeichen
Mechanik	Länge	l	Meter	m
	Masse	m	Kilogramm	kg
	Zeit	t	Sekunde	s
Elektrotechnik	Stromstärke	I	Ampere	A
Thermodynamik	Temperatur	T	Kelvin	K
Optik	Lichtstärke	I_v	Candela	cd
Chemie	Stoffmenge	n	Mol	mol

Um bei den SI-Einheiten unter Umständen recht unhandliche Zahlenwerte zu vermeiden, dürfen durch dezimale Vorsätze neue vergrößerte oder verkleinerte Einheiten gebildet werden (Tabelle 1.4). Die so entstandenen Einheiten, wie z. B. MW, cm, mV, μ A sind dann allerdings nicht mehr kohärent.

Tabelle 1.4 Vorsätze zur Kennzeichnung dezimaler Vielfacher und Teile von Einheiten

Vorsatz	Zeichen	Zahlenwert	Vorsatz	Zeichen	Zahlenwert
Exa-	E	10^{18}	Dezi-	d	10^{-1}
Peta-	P	10^{15}	Zenti-	c	10^{-2}
Tera-	T	10^{12}	Milli-	m	10^{-3}
Giga-	G	10^9	Mikro-	μ	10^{-6}
Mega-	M	10^6	Nano-	n	10^{-9}
Kilo-	k	10^3	Piko-	p	10^{-12}
Hekto-	h	10^2	Femto-	f	10^{-15}
Deka-	da	10	Atto-	a	10^{-18}

1.2.3 Die neuen SI-Einheiten

Die folgende Diskussion des Internationalen Einheitensystems bzw. der Definition der SI-Basiseinheiten sowie der sie realisierenden Experimente wurde [1.42] auszugsweise entnommen.

Das Internationale Einheitensystem SI wurde in der Zeit von 1948 bis 1960 etabliert und 1960 *Système international d'unités*, kurz SI, getauft. Von den Organen der Meterkonvention entwickelt und eingerichtet, baut das SI auf dem metrischen System auf. Die Grundidee ist, alle SI-Einheiten nur durch Multiplikation oder Division aus wenigen Basiseinheiten (zuerst sechs, heute sieben) zu bilden. Dabei sollen lediglich dezimale Faktoren Verwendung finden, die durch entsprechende Präfixe wie ‚k‘ für ‚kilo‘, also 1000, bezeichnet werden. Die sieben Basiseinheiten sind: die Sekunde (s), der Meter (m), das Kilogramm (kg), das Ampere (A), das Kelvin (K), die Candela (cd) und das Mol (mol). Jede der Basiseinheiten bringt eine weitere ‚Dimension‘, d. h. ein weiteres physikalisch-messtechnisches Gebiet in das Einheitensystem ein.

Bis zum 20. Mai 2019 waren die Basiseinheiten auf unterschiedliche Weise definiert. Als Bezugsgrößen wurden teils Artefakte (wie das Urkilogramm), idealisierte Messvorschriften

(Ampere), Materialeigenschaften (Kelvin, Mol), festgelegte Faktoren (Candela) oder Naturkonstanten (Sekunde, Meter) verwendet. Hätte sich eine dieser Größen geändert (wie das etwa beim ‚Urkilogramm‘, dem internationalen Kilogrammprototyp, tatsächlich der Fall war), so mussten konsequenterweise die durch die Naturkonstanten gegebenen Zusammenhänge scheinbar ebenfalls geändert werden – mit teils absurden Konsequenzen. Deshalb erschien es sinnvoller, feststehende Zusammenhänge zwischen verschiedenen (Natur-) Konstanten zur Definition der Bezugsgrößen zu nutzen. Nachdem die Sekunde, der Meter und auch die Candela bereits über festgelegte (Natur-) Konstanten definiert waren, wollte man im neuen SI auch das Kilogramm, das Ampere, das Kelvin und das Mol dadurch definieren, dass man sie über solche Konstanten miteinander verbindet.

Im neuen SI definiert man die sieben Basiseinheiten dadurch, dass man sieben ‚definierende Konstanten‘ festlegt, die diese Einheiten enthalten. Statt Artefakte zu verwenden, wie heute noch in der Definition des Kilogramms, ‚verankern‘ diese Konstanten das SI und werden zur neuen Basis. Die dimensional Bezüge der SI-Einheiten untereinander bleiben erhalten und alle Einheiten können durch Multiplikation oder Division der ‚Basiskonstanten‘ mit einem Vorfaktor gebildet werden. Der jeweilige Vorfaktor ergibt sich aus den festgelegten Zahlenwerten der beteiligten Basiskonstanten. Natürlich können weiterhin alle Einheiten auch aus den Basiseinheiten gebildet werden, aber die dahinterstehenden Basiskonstanten sind die tatsächlichen Bezugspunkte.

Sieben Naturkonstanten, sogenannte **definierende Konstanten**, erhalten im neuen SI festgelegte Werte; die Zahlenwerte entstammen den Ausgleichsrechnungen von CODATA im Sommer 2017. Die hier wiedergegebenen Definitionen der Einheiten sind aus der Richtlinie 2019/1258 der Europäischen Kommission übernommen. Diese ist eine offizielle deutsche Übersetzung der Neudefinitionen aus der 9. Auflage der SI-Broschüre des Internationalen Büros für Maße und Gewichte (BIPM). Die Definitionen traten am 20. Mai 2019 in Kraft, dem Datum des alljährlichen Weltmetrologietags.

Definierende Konstanten

- Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im ^{133}Cs -Atom
 $\Delta\nu = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$
- Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$
- Planck-Konstante $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\text{ J s}$ ($\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$)
- Elementarladung $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ ($\text{C} = \text{A s}$)
- Boltzmann-Konstante $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$ ($\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- Avogadro-Konstante $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
- Das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} einer monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$ ist genau gleich 683 Lumen durch Watt.

1.2.4 Definition und Darstellung der Sekunde

a) SI-Einheit der Sekunde

Die Sekunde, Einheitenzeichen s, ist die SI-Einheit der Zeit. Sie ist definiert, indem für die Cäsiumfrequenz $\Delta\nu$, der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms 133, der Zahlenwert 9 192 631 770 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit Hz, die gleich s^{-1} ist.

Diese Definition legt $\Delta\nu$ fest zu $9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit s auf, so ergibt sich:

$$1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu} \quad \text{oder} \quad 1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu}{9\,192\,631\,770} \quad (1.4)$$

Das heißt, eine Sekunde ist gleich der Dauer von $9\,192\,631\,770$ Schwingungen der Strahlung, die der Energie des Übergangs zwischen den zwei Hyperfeinstruktur-niveaus des ungestörten Grundzustands im ^{133}Cs -Atom entspricht.

Cäsium-Atomuhr

In dieser „primären“ Uhr werden Cs-133-Atome verdampft, laufen durch ein Magnetfeld und treffen auf einen Detektor. Beim Passieren des magnetischen Wechselfeldes nehmen die Cs-Atome in einer Resonanzabsorption Energie auf und gehen in den energiereicheren Zustand über. Ändert sich die Frequenz des Wechselfeldes, so ändert sich die Zahl der auf den Detektor treffenden Cs-Atome. Die Frequenz, bei der der Detektorstrom sein Maximum hat, wird zu

$$f_0 = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$$

definiert und die Sekunde ergibt sich als die entsprechende Zahl von Periodendauern (Atomuhr). Die Resonanzabsorption ist sehr ausgeprägt und wird nicht durch andere Effekte gestört. Gleichzeitig lassen sich Frequenzen im GHz-Bereich gut messen, so dass die Sekunde mit der außerordentlich geringen Unsicherheit von nur 10^{-14} dargestellt werden kann.

Eine noch größere Genauigkeit erreicht die **Cs-Fontänen-Uhr**. Hier werden die Cs-Atome auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt [1.9]. Dabei verringert sich die thermische Bewegung auf wenige cm/s. Die Atome lassen sich sammeln und als „Fontäne“ durch das Magnetfeld schicken. Dadurch verbessert sich das Signal/Rausch-Verhältnis und die Genauigkeit steigt um eine Zehnerpotenz.

Zusätzlich zur Messung der Sekunde müssen die Nationalen Metrologischen Institute sich dann noch darüber verständigen, welche Sekunde als die erste eines Tages zu nehmen ist. Das Ergebnis wird in Deutschland durch den Normalfrequenz- und Zeitzeichensender DCF 77 (Langwelle) in Mainflingen bei Frankfurt/Main übertragen. Während jeder Minute werden die Informationen über Minute, Stunde, Kalendertag, Wochentag, Monat und die beiden letzten Ziffern des Jahres BCD-codiert gesendet (Funkuhr) [1.10].

b) Optische Uhren

Das sichtbare Licht hat eine etwa 50 000mal höhere Frequenz als die Mikrowellenstrahlung. So liegt der Gedanke nahe, die höhere optische Frequenz für eine Uhr zu benutzen. Dabei wird nicht nur eine höhere Auflösung erwartet, sondern auch eine verbesserte Stabilität und Genauigkeit. So wird in naher Zukunft die SI-Einheit Sekunde über optische Frequenzen neu definiert werden. [1.11]–[1.14].

Die hohen Frequenzen des sichtbaren Lichtes lassen sich nicht direkt mit elektronischen Baugruppen messen. Sie müssen aber auf die Frequenz der Mikrowellenstrahlung zurückgeführt werden. Dies gelingt mit optischen Teilerstufen und optischen Synthesizern oder mit Frequenzkämmen (J. Hall und Th. Hänsch, Nobelpreis 2005). Darin werden optische

Frequenzen ohne Verlust an Genauigkeit auf leicht messbare Radiofrequenzen abgebildet. Diese Frequenzkammgeneratoren sind eine wesentliche Komponente einer optischen Uhr [1.15, 1.16].

Für optische Uhren sind scharfe Spektrallinien, sehr schmalbandige Übergänge zwischen den Spektralniveaus, erforderlich. Deshalb werden die Messaufbauten alle in der Nähe des absoluten Nullpunkts betrieben. Viele Elektronenübergänge in Atomen oder Ionen wurden untersucht. Besonders geeignet erwiesen sich die Isotope Strontium-88, Indium-115, Ytterbium-171 und Quecksilber-190 [1.17].

Insgesamt werden bei den optischen Uhren Unsicherheiten im Bereich von 10^{-17} bis 10^{-18} s erwartet. Bei diesen Auflösungen ist schon die Allgemeine Relativitätstheorie zu berücksichtigen. Diese erklärt den Einfluss der Schwerkraft auf die Ganggenauigkeit. Der Gangunterschied ist mit einer relativen Frequenzverschiebung von $1,1 \times 10^{-16}$ pro Meter Höhenunterschied zwar sehr klein, aber doch von Bedeutung. Die Ganggeschwindigkeit ändert sich schon um 10^{-18} , wenn die Uhr um einen Zentimeter angehoben wird. Schon jetzt ist bei dem Zeitvergleich der für die offizielle Zeit zuständigen Staatsinstitute deren Höhenlage zu berücksichtigen [1.18].

1.2.5 Definition und Darstellung des Meters

Der Meter, Einheitenzeichen m, ist die SI-Einheit der Länge. Er ist definiert, indem für die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum c der Zahlenwert 299 792 458 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit m/s, wobei die Sekunde mittels $\Delta\nu$ definiert ist. Diese Definition gibt c den Wert $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit m auf, so ergibt sich:

$$1\text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \cdot \frac{c}{\Delta\nu} \approx 30,663\,319 \cdot \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1.5)$$

Das heißt, ein Meter ist gleich der Strecke, die Licht im Vakuum innerhalb des Bruchteils von $1/299\,792\,458$ einer Sekunde zurücklegt.

In der Längenmesstechnik werden Strecken mit Hilfe von Interferometern gemessen. Diese benötigen eine sichtbare Strahlung, deren **Wellenlänge** λ bekannt sein muss. Laser z. B. sind als Strahlenquellen geeignet. Ihre Frequenz f wird wie bei optischen Uhren mittels Frequenzkammgeneratoren ermittelt. Aus der Lichtgeschwindigkeit c_0 ergibt sich dann die für Längenmessungen benötigte Wellenlänge λ :

$$c_0 = f \cdot \lambda. \quad (1.6)$$

Größere Entfernungen werden über Laufzeitmessungen ermittelt. Hier bestimmt die Genauigkeit der Zeitmessung den Fehler in der Längenmessung.

1.2.6 Definition und Darstellung des Kilogramms

a) SI-Einheit des Kilogramms

Das Kilogramm, Einheitenzeichen kg, ist die SI-Einheit der Masse. Es ist definiert, indem für die Planck-Konstante h der Zahlenwert $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit J s, die gleich $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ ist, wobei der Meter und die Sekunde mittels c und $\Delta\nu$ definiert sind.

Diese Definition gibt h den Wert $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Löst man diese Beziehung nach der Einheit kg auf, so ergibt sich:

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s} \quad (1.7)$$

$$= \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}) \cdot (9\,192\,631\,770)} \cdot \frac{h\Delta\nu}{c^2} \approx 1,475\,521\,4 \cdot 10^{40} \frac{h\Delta\nu}{c^2} \quad (1.8)$$

Das heißt, die Einheit kg wird mit der Wirkung (Einheit $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$) verknüpft, einer physikalischen Größe in der theoretischen Physik. Zusammen mit der Definition für die Sekunde und den Meter ergibt sich die Definition für das Kilogramm als Funktion des Planck'schen Wirkungsquantums h .

b) Quantennormale für das Kilogramm

Avogadro-Projekt. Im Avogadro-Projekt geht es zunächst darum, die Avogadrozahl N_A genauer zu bestimmen als bisher. Das soll über die folgende Beziehung geschehen:

$$N_A = \frac{M V n}{m} \quad \text{mit der Einheit} \quad \text{mol}^{-1} = \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \text{ m}^3 \frac{1}{\text{m}^3} \frac{1}{\text{kg}}. \quad (1.9)$$

In dieser Gleichung bedeuten

N_A : Avogadro-Konstante in mol^{-1} ,

M : molare Masse in $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$,

V : Volumen in m^3 ,

n : Teilchendichte in m^{-3} ,

m : Masse in kg.

An diesem Projekt beteiligen sich Forschungsinstitute aus verschiedenen Ländern. Für die Masse m dient das monokristalline hochreine Isotop Silizium-28. Es wurde in einer russischen Isotopenanlage hergestellt. Daraus wurden in Australien zwei Kugeln mit einem Durchmesser von 93,7 mm und einem Gewicht von ungefähr 1 kg gefertigt. Die für Gl. (1.9) nötigen Größen wurden dann wie folgt ermittelt:

Die Masse m der Kugeln wurde durch einen Vergleich mit internationalen Normalen gefunden (Japan, Deutschland).

Das Volumen V der äußerst sorgfältig polierten Kugeln wurde mit einem Kugelinterferometer bestimmt [1.21]. Die Ungenauigkeiten bei den Rundheitsmessungen lagen im Bereich von wenigen Nanometern (Japan, Australien, Deutschland).

Die Teilchendichte n wurde aus Messungen mit einem Röntgeninterferometer erhalten (Italien, USA).

Die mittlere molare Masse M ergab sich aus Messungen mit einem Massenspektrometer, wofür ein neues Verfahren entwickelt worden ist (Deutschland). Berücksichtigt wurden eventuell vorhandene Kristallfehler, Fremdatome und die Oberflächenschicht aus Siliziumdioxid.

Damit konnte 2010 die Avogadro-Konstante bis auf eine Unsicherheit von $3 \cdot 10^{-8}$ bestimmt werden. Das ist eine Verbesserung gegenüber dem bisherigen Wert, reicht aber noch nicht für eine Neudefinition des Kilogramms. Dafür wird eine Unsicherheit von $2 \cdot 10^{-8}$ verlangt. Dieses scheint möglich zu sein. Danach könnte das Kilogramm mit einer festgelegten Avogadrozahl neu definiert und die Masse m könnte über Gl. (1.9) gemessen werden.

Index

A

A/D-Umsetzer 286
–, Delta-Sigma-Umsetzer 298
–, direkt vergleichende 288
–, Flash- 291
– für mechanische Größen 310
– in Messgeräten 306
–, Kaskaden-Parallel- 291
–, Kenngrößen 301
– mit parallelen Komparatoren 75, 290
– mit sukzessiver Annäherung 292
–, Simultan- 291
–, u/f -Ladungsbilanz- 296
–, u/t -Zweirampen-Umsetzer 294
–, Wäge-Umsetzer 292
Abgleichbrücke 240
Ablenkoeffizient 103
Absolutdruckmessung 228
Abtast- und Halteglied 286
Abtast- und Haltekreis 67
Abtastfrequenz 357, 365, 376
Abtasttheorem 302, 357
Addierverstärker 129
Aiken-Code 265
Ampere 25
Amplituden- u. Phasengang 50
Amplitudengang 53, 359
Amplitudenspektrum 390
Anhängen von Nullen 362, 376
aperiodischer Grenzfall 61
astabile Kippschaltung 317 f.
Auflösungsvermögen 313
Aufnehmer 16, 76
–, chemischer 156
–, Differenzial-Widerstands- 231
–, elektrodynamischer 139
–, für ionisierende Strahlung 177
–, induktiver 244
–, kapazitiver 252
–, optischer 169
–, piezoelektrischer 161, 164
–, pyroelektrischer 161
–, Queranker 247

–, Tauchanker 245
–, thermischer 148
–, Widerstands- 200
Ausschlagbrücke 243
Autokorrelationsfunktion 391 f.
Autoleistungsdichtespektrum 390 ff.
Avogadro-Konstante 18

B

Bandbreite 67
Bartlett-Fenster 381
BCD-Zahlen 265
Beschleunigungssensor 349
Biasstrom 135
Biegeschwinger 329
Binärcode 264
binäres Signal 263, 288
bistabile Kippstufe 268
Bit 264
Blackman-Fenster 384
Blindleistung 96 f., 100
Boltzman-Konstante 18
Braun'sche Röhre 101
Brücke, spannungsgespeist 192
–, stromgespeist 192
Brückenschaltung 186 f.

C

Candela 28 f.
CdS-Fotowiderstand 217
codierte Längen- und Winkelgeber 311

D

Dehnungsmessstreifen 220
Delta-Sigma-Umsetzer 298
Diagnose 387
Dichtemessung 350, 353
Dickenscherschwinger 329
Differenzdruck-Messumformer 256
Differenzdruckmessung 228
Differenzial-Kondensator 244
Differenzial-Tauchanker-Geber 247

Differenzial-Transformator 140
 differenzielle Nichtlinearität 301
 Differenzierglied 65
 Differenzverstärker 113
 digitales Speicher-Oszilloskop 307
 Digital-Multimeter 306
 Digitaloszilloskop 307
 Diskrete Fouriertransformation DFT 355
 Diskrete Fouriertransformierte 392
 Diskriminator 290
 DMS 224
 Doppelweggleichrichtung 92
 Drehmomentmessung 226
 Drehspulinstrument 82
 Drehschulmesswerk 81
 Drehstromsystem 98
 Drehzahlaufnehmer 141
 –, Induktions- 141
 Drehzahlmessung 281
 Dreieckfenster 381
 Druckmessdose 340
 Druckmessung 167, 223
 –, DMS 223
 – mit Schwingquarz 340
 –, piezoelektrisch 167
 D-Speicherglied 270
 dual slope converter 294
 duales Zahlensystem 263
 Durchflussmessung, Coriolis-
 Massendurchflussmesser 351
 –, Heißfilm 214
 –, Hitzdraht-Anemometer 214
 –, Induktions- 140, 146 f.
 –, magnetische 147
 –, thermischer Massenstrommesser 212
 –, Ultraschall- 340
 dynamisches Verhalten 49

E

Effekt, AMR 219
 –, äußerer Foto- 171, 175
 –, CMR 220
 –, ferroelektrischer 207
 –, Gauß- 218
 –, GMR 220
 –, innerer Foto- 171 f.
 –, Josephson- 26
 –, magnetoelastischer 251
 –, magnetoresistiver 218
 –, piezoelektrischer 161, 335
 –, piezoresistiver 227
 –, pyroelektrischer 162

–, Seebeck- 148
 –, Sekundärelektronenemission 176
 –, Sperrschicht-Foto- 172
 –, thermoelektrischer 148
 –, thermomagnetischer 215
 –, Thomson- 218
 –, Von-Klitzing- 27
 effektives Bit 304
 Effektivwert 90, 93, 234
 Einfügen von Nullen 376
 Eintor-Resonator 337
 Einweggleichrichtung 92
 Einzelelektronen-Pumpe 28
 Elektrizitätszähler 100
 elektrodynamischer Schwingungsgeber 345
 elektrodynamisches Instrument 95
 elektrodynamisches Messwerk 83
 elektromagnetischer Schwingungsgeber 346
 elektromechanische Messgeräte 81
 Elektronenstrahl-Oszilloskop 101
 Elektronenstrahl-Röhre 101
 Elektrostriktion 162
 Empfindlichkeit 31, 115
 Endlagenschalter 310
 Energie des elektrischen Feldes 259
 – des magnetischen Feldes 259

F

f/u-Umformung 283
 Fehler, absoluter 33
 –, bekannter 34
 –, dynamischer 67, 69, 207
 –, fehlerkorrigierender Code 265
 –, Korrektur 265
 –, Nullpunkt- 134
 –, Quantisierungs- 68, 278, 304
 –, relativer 33
 –, systematischer 33
 –, zufälliger 38
 Feldplatte 218 f.
 Fensterfunktion 378
 Feuchtemessung 215
 –, kapazitiver Geber 256
 –, LiCl-Geber 215
 Flächenscherschwinger 329
 Flammen-Ionisationsdetektor 179
 Formfaktor 91
 Fotodiode 171
 Fotoelement 171
 Fotovervielfacher 169, 176
 Fotowiderstand 217
 Fotozelle 169, 175

Fourier-Transformation 354
 –, diskrete 362
 –, inverse diskrete 366, 376
 –, nicht zeitbegrenzt Signal 368
 –, periodisches Signal 371
 –, zeitbegrenzt Signal 358
 –, zeitdiskretes Signal 355
 –, zeitkontinuierliches Signal 354, 356
 Fouriertransformierte 391
 Frequenzgang 50, 52
 Frequenzkammgenerator 23
 frequenzkompensierter Spannungsteiler 104
 Frequenzmessung 68, 280 f.
 Frequenzsignal 277
 Frequenzumsetzer 317
 Füllstandsmessung, kapazitive 254 f.
 – mit Kaltleiter 211
 Füllstandswächter 211
 Fundamentalkonstanten 18

G

Gasanalyse, SnO₂-Sensor 216
 –, Wärmetönungsmessung 215
 Gatter 268
 Gegenkopplung 74, 114
 Gleichrichter, phasenselektiv 199
 Gleichrichtwert 90
 Gleichtaktunterdrückung 72, 113, 192
 Gleichtaktverstärkung 113
 Graetzschaltung 92
 Gray-Code 264
 Grenzfrequenz 50, 53
 Grenzwerteinheit 290
 Grenzwertsatz, zentraler 44
 Größengleichung 30

H

Halbleiter-Dehnungsmessstreifen 227
 Halbleiter-Strahlungsdetektor 179
 Hall-Generator 143
 Hall-Sonde 142
 Hamming-Fenster 383
 Hauptzipfel 379
 Heißleiter 32, 205
 Hitzdraht-Anemometer 212
 Hochpass 65

I

i/i-Verstärker 110, 125
i/u-Verstärker 110, 122
 Impedanzwandler 128

Impulsantwort 50, 55 f., 63
 Impulsratenmessung 280, 283
 Induktionsdrehzahlgeber 141
 induktiver Aufnehmer 244 f., 250, 262
 induktiver Schleifendetektor 250
 Induktivitätsmessung 234
 Infrarot-Sensor 167
 inkrementaler Längen- und Winkelgeber 312
 Instrumentierungsverstärker 195 f.
 integrale Nichtlinearität 302
 Integrationsverstärker 319
 Integrierglied 66
 Interferometer 315
 invertierender Verstärker 335
 Ionisationskammer 177

J

JK-Speicherglied 271
 Josephson-Effekt 26

K

Kaltleiter 207
 Kapazitätsmessung 234
 kapazitive Füllstandsmessung 254 f.
 kapazitiver Aufnehmer 252
 Kelvin 28
 Kennlinie 31
 Kettenstruktur 71
 Kilogramm 23
 Kippschaltung 317, 320
 Komparator 288
 Komparator mit Hysterese 289
 Kompensationsdose 153
 Konstantspannungsquelle 127
 Konstantstromquelle 127, 184
 Korrelationskoeffizient 44
 Kovarianz 44 f.
 Kraftmessung, Kraftmessdose mit DMS 227
 –, magnetoelastische Kraftmessdose 251
 –, piezoelektrischer Aufnehmer 67
 Kreisstruktur 74
 Kreuzkorrelationsfunktion 391
 Kreuzleistungsdichtespektrum 390 f.
 Kurzschlussring-Sensor 249

Ladungsempfindlicher Verstärker 133
 Ladungsverstärker 166
 Lambda-Sonde 160
 Längen- und Winkelmessung, codierte Geber 316
 –, Dehnungsmessstreifen 220

–, inkrementaler Geber 312
 –, Interferometer 315
 –, Kurzschlussring-Sensor 249
 –, Magnetschranke 145
 –, Queranker-Aufnehmer 247
 –, Tauchanker-Aufnehmer 245
 –, Widerstandsferngeber 200
 Längsschwinger 329
 LC-Oszillator 323
 Leerlaufspannung 34, 84 f.
 Leistungsmessung bei Drehstrom 98
 – bei Gleichspannung 95
 – bei Wechselspannung 96
 – im Zeit- und Frequenzbereich 388
 lichtempfindlicher Widerstand 217
 Lichtmessung, Fotodiode 169
 –, Fotoelement 169
 –, Fotovervielfacher 169
 –, Fotowiderstand 217
 –, Fotozelle 169
 –, Tabelle 171
 Linearisierung, Kennlinie 228
 logarithmischer Verstärker 134
 Luftmassenmesser 212, 214

M

Magnetfeldmessung, Induktionsaufnehmer 141
 magnetische Feldkonstante 245
 Mantel-Thermoelement 50
 Massenstrommesser 352
 maximaler Abtastfehler 379
 mechanische Schwingungen 343
 Messbereichsbegrenzung 89
 Messbereichserweiterung 86
 Messbrücke, Ausschlag- 243
 –, Maxwell- 242
 –, Maxwell-Wien- 242
 –, Wien- 241
 Messeinrichtung 16
 Messfehler 48
 Messgeräte, statisches Verhalten 31
 Messkette 71
 Messunsicherheit 48
 Messverstärker 109, 197
 Messzeit 376
 Metalloxid-Gassensor 216
 microchannel plate 176
 Mikrokanalplatte 176 f.
 Mitkopplung 74
 Mittelwert, linearer 90
 Moiré-Streifen 315

Mol 29
 monostabile Kippstufe 284, 350
 Monotoniefehler 302
 Multiplexer 276, 286
 Multiplizierer, Hall-Multiplizierer 144
 –, Parabel-Multiplizierer 130
 Multivibrator 317

N

Naturkonstanten 17
 nichtinvertierender Verstärker 116
 Normalverteilung 36
 NTC-Widerstand 50
 Nullpunktunterdrückung 192

O

Oberflächenwelle 335
 Offset 134, 196, 319
 Offsetspannung 196
 OFW-Sensor 335
 Operationsverstärker 112, 119, 134, 139
 –, Tabelle 119
 optische Aufnehmer 169
 Oszillator, harmonischer 322
 –, LC- 323
 –, Quarz- 281
 –, RC- 326
 –, Relaxations- 204
 Oszilloskop, analoges 104
 –, digitales 307

P

Parallelregister 273
 Parallelstruktur 72, 192
 Parseval'sches Theorem 388
 Parseval-Theorem 391 f.
 Periodendauermessung 278
 Phasengang 53
 Phasennmessung, digital 280
 –, gesteuerter Gleichrichter 237
 Phasenregelung 342
 Phasenschieber-Brücke 243
 Phasenwinkelmessung 237, 279
 pH-Messkette 156
 Physikalische Effekte 78
 piezoelektrischer Aufnehmer 164
 piezoelektrischer Effekt 335
 piezoelektrischer Resonator 328
 piezoelektrischer Schallgeber 340
 piezoresistiver Effekt 227
 Planck'sches Wirkungsquantum 18

Plank'sches Gesetz 169
 Platin-Messwiderstand 203
 Positionsmessung 145, 174
 PTC-Widerstand 207
 PVDF 162
 pyroelektrischer Effekt 162
 pyroelektrischer Sensor 167

Q

Quanten-Hall-Effekt 27
 Quantisierungsfehler 278, 304
 Quantisierungsrauschen 304, 306
 Quarz 328
 Quarzoszillator 334
 Queranker-Aufnehmer 247, 249

R

radizierender Verstärker 132
 Rauschen 139
 RC-Oszillator 326
 RC-Spannungsteiler 106
 RC-Tiefpass 54, 283 f.
 Rechteckfenster 380
 Register 273
 Reifendruckmessung 340
 Relaxationsoszillator 317
 Remote Sensing 339
 reziproker piezoelektrischer Effekt 162
 RS-Speicherglied 268 f.
 Rückwirkung 32, 105

S

Sägezahngenerator 106
 SAW surface acoustic wave 335
 Schadensfrüherkennung 387
 Scheinleistung 96, 98
 Scheitelfaktor 91
 Schieberegister 274 f.
 schwarzer Körper 169
 Schwingbeschleunigung 344
 Schwinggeschwindigkeit 344
 Schwingkreis 239
 Schwingquarz, Frequenznormal 328
 –, Temperaturfühler 335
 Schwingungsmessung 317
 –, absolute 346
 –, relative 344
 Schwingweg 344
 Seebeck-Effekt 148
 seismischer Aufnehmer 344, 348
 Sekunde 21

Sensor, Beschleunigungs- 349
 –, Differenzial-Widerstands- 231
 –, Druck- 349
 –, Foto- 174
 –, funkabfragbarer 338
 –, Gas- 216
 –, Hall- 144
 –, induktiver 244, 262
 –, Infrarot- 167
 –, integrierter 79
 –, kapazitiver 244, 252
 –, Kurzschlussring- 249
 –, magnetoresistiver 219
 –, NTC- 50
 –, OFW-Laufzeit- 337
 –, ohmscher 182
 –, optischer 169
 –, optoelektronischer 171
 –, OWF-Laufzeit 335
 –, piezoelektrischer 161
 –, pyroelektrischer 161
 –, Sauerstoff- 159
 –, Schwingungs- 352
 –, Silizium- 209
 –, SnO₂- 216
 –, Taguchi- 216
 –, Temperatur- 155
 –, thermischer 148
 –, Widerstands- 200
 sensornahe Signalverarbeitung 78
 SI-Einheiten 18
 Sigma-Delta-Umsetzer 300
 Signal/Rausch-Verhältnis 301, 304
 Sinusantwort 50, 52
 Sinus-Spektrum 373 f.
 SI-System 18
 Spannung/Frequenz-Umsetzer 294
 Spannung/Zeit-Umsetzer 294
 Spannungsfollower 127
 Spannungsmessung 85
 –, A/D-Umsetzer 286
 –, Anzeigegerät 82, 87, 306
 –, Josephson-Effekt 26
 –, Modulations- 197
 –, Nullpunktfehler 135
 –, Offsetgrößen 134, 136, 196
 –, Oszilloskop 105
 –, Verstärker 116
 Spektralanalyse 354
 Sperrschicht-Fotoeffekt 172
 Sperrschicht-Temperatursensor 155
 Spinventil 220

Spitzenwertgleichrichter 128
 Spitzenwert-Gleichrichtung 92
 spreading resistance sensor 209
 Sprungantwort 50, 56, 63
 SrTiO₃-Sensor 216
 Standardabweichung 35, 40
 Standardabweichung, empirisch 36
 Stichprobe 37
 Stimmgabel-Frequenzumsetzer 350
 Strahlungsdetektor, Halbleiter-Detektor 177
 –, Ionisationskammer 177
 Strahlungsthermometrie 167
 Stromgenerator 111
 Strommessung 84
 –, Anzeigegerät 84
 –, Hallsonde 144
 –, Nullpunktfehler 137
 –, Offsetgrößen 137
 –, Verstärker 110
 Student'sche *t*-Verteilung 43
 Subtrahierverstärker 130, 193
 Superposition 135
 Szintillationsmesskopf 176 f.

T

t/u-Umformung 283
 Tastteiler 105
 Tauchanker-Aufnehmer 245
 Temperaturkoeffizient 201 f., 205
 Temperaturmessung, berührungslos 169
 –, Berührungsthermometer 210
 –, Heißleiter 205
 –, integrierter Sensor 155
 –, Kaltleiter 207
 –, Quarz 335
 –, spreading resistance sensor 209
 –, Tabelle 210
 –, Thermoelement 148
 –, verfahrenstechnische Größen 211
 –, Widerstandsthermometer 201
 Temperaturspannung 113
 Thermistor 205
 thermoelektrischer Effekt 148
 Thermoelement 148, 153
 Thermoumformer 93
 Thomson-Messbrücke 187
 Tiefpass 51, 66
 Torzeit 280
 Trägerfrequenz-Brücke 197
 Transformatorbrücke 235
 Transientenrecorder 308
 Triggerung 282

T-Speicherglied 271
 Tukey-Fenster 385
t-Verteilung 43

U

u/i-Verstärker 110
u/u-Verstärker 110
 Übergangsfunktion 50
 Übertragungsfaktor 31, 50
 Uhr, Caesium 22
 –, optisch 22
 Ultraschall-Durchflussmesser 340
 Ultraschallwandler 340
 Universalzähler 281
 Univibrator 283
 Unsicherheit 43

V

V-Abtastung 312
 Varianz 35 f., 44
 Vergleichsstelle 152
 Verhältnisbildung 73
 Verlustwinkel 233
 Verstärker, Elektrometer- 194
 – für Brückenschaltungen 193
 –, Lock-in- 198
 –, Nullpunktfehler 134
 –, Offsetgrößen 134
 –, Operations- 112
 –, Spannung 110
 –, Spannungsverstärker 116
 –, Strom 110, 122, 125
 –, Trägerfrequenz- 198
 –, Wechselspannungs- 198
 Vertrauensbereich 38
 Verzögerungsglied 1. Ordnung 50
 – 2. Ordnung 57
 Volt 26
 Von-Hann-Fenster 382
 Von-Klitzing-Effekt 27

W

Wäge-Umsetzer 292
 Wechselstrom-Gleichstrom-Komparator 94
 Weg- und Winkelmessung 140
 Wheatstone-Messbrücke 186
 Widerstandsaufnehmer 182
 Widerstandsmessung 182, 185, 189, 204
 Widerstandstemperaturfühler 201
 Widerstandsthermometer 201

Wiener-Chintschin-Theorem 390
Wirkleistung 97

Z

Zahlenwertgleichung 30
Zähler 272
Zeitbasis 280

Zeitintervallmessung 278, 283
Zeitmessung 277 f.
Zenerdiode 88 f., 127
Zentraler Grenzwertsatz 44
zero padding 363
Ziffernanzeige 266
Zweirampen-A/D-Umsetzer 294
Zwei-Tor-Resonator 336