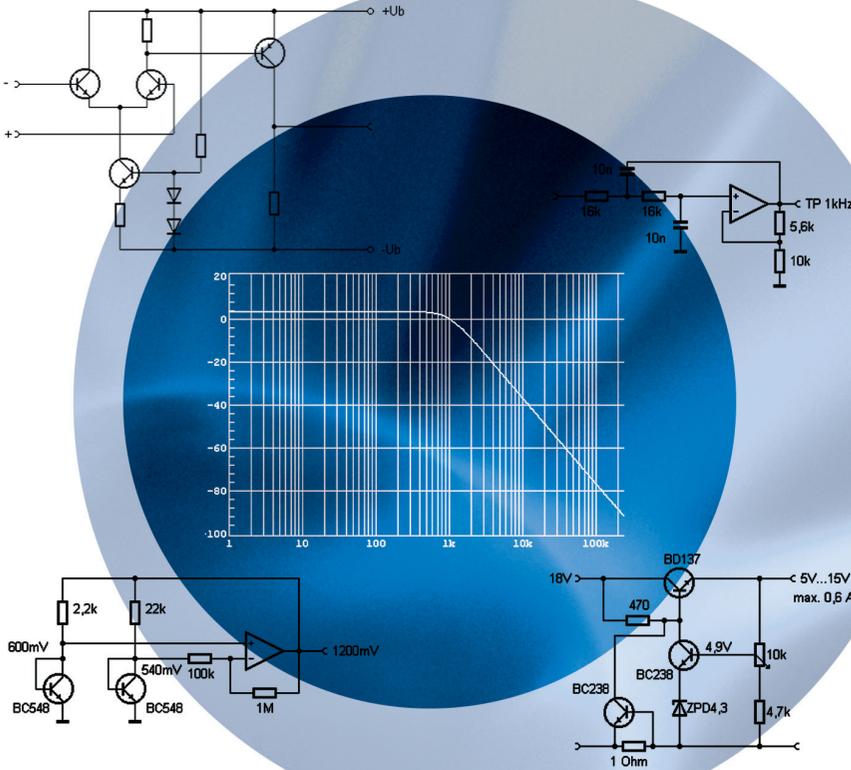


Burkhard Kainka/Herbert Bernstein



# Grundwissen Elektronik

Die Grundlagen für Hobby, Ausbildung und Beruf

**Teil 1:** Analogtechnik

**Teil 2:** Messtechnik

# Vorwort

Die Elektronik ist ein breit gefächertes und in den letzten Jahrzehnten stark angewachsenes Fachgebiet, in dem man als Neuling leicht den Überblick verlieren kann. Besonders schwierig ist es daher, einen geeigneten Einstieg zu finden. Obwohl heute die digitale Elektronik zum Beispiel in der Computertechnik weiter verbreitet ist, finden sich in der analogen Elektronik, die bereits seit den Anfängen der Radiotechnik entwickelt wurde, die entscheidenden Grundlagen, an denen man nicht vorbeigehen sollte. Es werden zunächst keine Grundkenntnisse vorausgesetzt. Vielmehr soll der Analogteil des Buches ein solides Fachwissen von Grund auf vermitteln.

Teil 1 behandelt die erforderlichen Theorien, beschränkt sich aber nicht auf theoretische Grundlagen, sondern bietet immer auch praktisch erprobte Schaltungen für konkrete Projekte. Zahlreiche Schaltungen können zum Ausgangspunkt für eigene Entwicklungen werden.

Es wurde versucht, einen umfassenden Überblick der wichtigsten Bereiche zu geben. Viele in der praktischen Arbeit auftretende Probleme führen dazu, dass man häufig auf der Suche nach konkreten Fachinformationen ist. Die Zusammenstellung der Inhalte wurde daher auch von dem Ziel geleitet, die Suche nach praktisch relevanten Informationen zu vereinfachen.

Ich wünsche allen Lesern viel Erfolg bei der praktischen Arbeit mit dem Analogteil des Buches!

Burkhard Kainka

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11
<b>2</b>	<b>Der Gleichstromkreis</b> .....	13
2.1	Ladung und Strom .....	13
2.2	Leistung und Spannung .....	14
2.3	Der elektrische Widerstand, Ohmsches Gesetz .....	16
2.4	Drahtwiderstand .....	20
2.5	Reihenschaltung .....	24
2.6	Parallelschaltung .....	26
2.7	Vorwiderstände .....	27
2.8	Innenwiderstand .....	28
<b>3</b>	<b>Der Wechselstromkreis</b> .....	30
3.1	Effektivspannung und Leistung .....	30
3.2	Das Dezibel .....	32
3.3	Transformatoren.....	34
3.4	Kondensatoren .....	36
3.5	RC-Glieder .....	37
3.6	Kondensator-Bauformen .....	43
3.7	Induktivitäten .....	46
3.8	Spulen-Bauformen .....	49
3.9	Schwingkreise .....	51
<b>4</b>	<b>Dioden-Sperrschichten</b> .....	55
4.1	Leitfähigkeit und Dotierung .....	55
4.2	Die Diode .....	57
4.3	Anwendung der Diode als Gleichrichter .....	58
4.4	Dioden-Kennlinien .....	59
4.5	Dioden-Bauformen .....	63
<b>5</b>	<b>Der bipolare Transistor</b> .....	69
5.1	Aufbau und Grundfunktion .....	69
5.2	Der Stromverstärkungsfaktor .....	71
5.3	Transistor-Kennlinien .....	73
5.4	Transistor-Bauformen .....	77

<b>6</b>	<b>Feldeffekttransistoren</b> .....	81
6.1	Der J-FET .....	82
6.2	Doppelgate-MOS-FET .....	83
6.3	VMOS-Leistungstransistoren .....	85
<b>7</b>	<b>Verstärker-Grundsaltungen</b> .....	87
7.1	Der Verstärker in Emitterschaltung .....	87
7.2	Gegenkopplung .....	91
7.3	Steilheit und Innenwiderstand .....	94
7.4	Breitbandverstärker .....	96
7.5	Gleichstromgekoppelte Stufen .....	99
7.6	Die Kollektorschaltung (Der Emitterfolger) .....	102
7.7	Die Basisschaltung .....	104
7.8	Die Darlington-Schaltung .....	106
7.9	Der Differenzverstärker .....	107
7.10	Der Gegentaktverstärker .....	111
7.11	Die Konstantstromquelle .....	115
<b>8</b>	<b>Transistor-Kippstufen</b> .....	118
8.1	Statische Flip-Flops .....	118
8.2	Monoflops .....	120
8.3	Schmitt-Trigger .....	121
<b>9</b>	<b>Transistor-Oszillatoren</b> .....	122
9.1	Der Multivibrator .....	122
9.2	RC-Oszillatoren .....	123
9.3	LC-Oszillatoren .....	124
<b>10</b>	<b>Operationsverstärker</b> .....	126
10.1	Prinzipschaltung .....	126
10.2	Der OPV als Komparator .....	128
10.3	OPV-Grundsaltungen .....	130
10.4	Invertierende Verstärker .....	131
10.5	OPVs mit einfacher Spannungsversorgung .....	132
10.6	NF-Vorverstärker .....	132
10.7	Leistungsverstärker .....	133
10.8	Feldeffekt-OPV .....	135
10.9	Der OTA .....	141
<b>11</b>	<b>Hochfrequenz-Anwendungen</b> .....	144
11.1	Modulation und Demodulation .....	144
11.2	Das Diodenradio .....	145
11.3	Das Audion .....	146
11.4	UKW-Pendelaudion .....	150
11.5	HF-Oszillatoren .....	151

<b>12</b>	<b>Stromversorgungen</b> .....	154
12.1	Batterieversorgung .....	154
12.2	Netzteil-Grundsaltungen .....	155
12.3	Spannungs-Vervielfachung .....	158
12.4	Spannungsstabilisierung mit Z-Dioden .....	159
12.5	Längsregler .....	166
12.6	Integrierte Spannungsregler .....	169
12.7	Bandgap-Referenzen .....	172
12.8	Entkopplung der Spannungsversorgung .....	177
<b>13</b>	<b>Spannungswandler und Schaltnetzteile</b> .....	180
13.1	Spannungswandler .....	180
13.2	Schaltregler .....	183
13.3	Spannungswandler mit geschalteten Kondensatoren .....	186
<b>14</b>	<b>Messtechnik</b> .....	190
14.1	Messbereichserweiterungen beim Voltmeter .....	190
14.2	Messbereichserweiterung beim Amperemeter .....	193
14.3	Das Ohmmeter .....	195
14.4	Messfehler .....	198
14.5	Messgleichrichter .....	199
14.6	Logarithmierer .....	202
14.7	Messbrücken .....	204
<b>15</b>	<b>Signalgeneratoren</b> .....	207
15.1	Rechteck-Generatoren mit OPV .....	207
15.2	Rechteckgenerator mit dem 555 .....	209
15.3	CMOS-Oszillatoren .....	213
15.4	Wien-Brücken-Oszillator .....	215
15.5	Integrierte Funktionsgeneratoren .....	217
15.6	Spannungsgesteuerte Oszillatoren .....	220
15.7	Steuerbarer Sinusgenerator mit OTA .....	222
<b>16</b>	<b>Sensoren</b> .....	227
16.1	NTC-Sensoren .....	227
16.2	PT100-Messwiderstände .....	231
16.3	KTY-Sensoren .....	231
16.4	Dioden und Transistoren als Temperatursensoren .....	233
16.5	Integrierte Temperatursensoren .....	234
16.6	Thermoelemente .....	235
16.7	Lichtsensoren: LDR .....	237
16.8	Fotodioden und Fototransistoren .....	238
16.9	Kraftsensoren und Drucksensoren .....	240
16.10	Piezo-Sensoren .....	241
16.11	Magnetfeld-Sensoren .....	242

## Inhalt

<b>17</b>	<b>Leistungselektronik</b> .....	244
17.1	Lineare Leistungsregler .....	244
17.2	Leistungsschalter .....	247
17.3	Leistungs-MOS-FETs .....	254
17.4	PWM-Regler .....	258
17.5	Integrierte Leistungsschalter .....	260
17.6	Brückentreiber .....	262
17.7	Power-OPV .....	263
<b>18</b>	<b>Filter</b> .....	266
18.1	Entstörmaßnahmen .....	266
18.2	Passive RC-Filter .....	270
18.3	LC-Filter .....	273
18.4	Quarzfilter .....	276
18.5	Aktive Filter .....	277
18.6	Universalfilter .....	280
18.7	Spannungsgesteuerte Filter .....	280
<b>19</b>	<b>Mischer und Modulatoren</b> .....	283
19.1	Empfängerkonzepte .....	283
19.2	Multiplikative Mischer .....	286
19.3	Additive Mischer .....	289
19.4	Ringmischer .....	291
19.5	Integrierte Balance-Mischer .....	292
<b>Literatur</b>	.....	296
<b>Sachverzeichnis</b>	.....	297

# 3 Der Wechselstromkreis

Die Gesetze des Gleichstromkreises gelten grundsätzlich auch für Wechselstrom. Allerdings treten bei Wechselstrom einige zusätzliche Phänomene auf. Insbesondere Kondensatoren und Spulen verhalten sich völlig anders als bei Gleichstrom. Die Grundlagen des Wechselstromkreises spielen in der analogen Schaltungstechnik eine wichtige Rolle, weil vielfach Wechselspannungssignale verarbeitet werden. Außer der Spannung und der Stromstärke muss hier auch die Frequenz und die Kurvenform eines Signals beachtet werden. Während Wechselstromkreise zunächst bei sinusförmigen Wechselspannungen untersucht werden, treten in elektronischen Schaltungen auch Rechteck-, Dreieck- und andere Signale auf.

## 3.1 Effektivspannung und Leistung

Während Batterien Gleichstrom liefern, verwendet man im Lichtnetz Wechselstrom. Die Polarität der Wechselspannung kehrt sich mit einer Frequenz  $f$  laufend um. An der Steckdose findet man eine Wechselspannung mit 230 V bei einer Frequenz von 50 Hertz ( $f = 50 \text{ Hz}$ ), also mit 50 vollständigen Wechseln in einer Sekunde. Eine volle Periode dauert 20 Millisekunden. Die höchste Momentanspannung, also die Spitzenspannung  $U_s$ , liegt bei ca. 325 V. Die Spitze-Spitze-Spannung  $U_{ss}$  beträgt 650 V. Die Effektivspannung  $U_{\text{eff}}$  beträgt 230 V. Das bedeutet, dass an einem ohmschen Widerstand bei einer Gleichspannung von 230 V die gleiche mittlere Leistung umgesetzt wird. Mit einem Oszilloskop lässt sich der zeitliche Verlauf der Wechselspannung sichtbar machen.

Die Momentanspannung einer sinusförmigen Wechselspannung folgt allgemein dem Verlauf einer mathematischen Sinusfunktion mit der Höhe  $U_s$ :

$$U = U_s \cdot \sin(2\pi ft)$$

Mittelt man die auftretenden Leistungen über eine volle Sinusperiode der Wechselspannung, dann zeigt sich, dass die Momentanleistung am Scheitel-

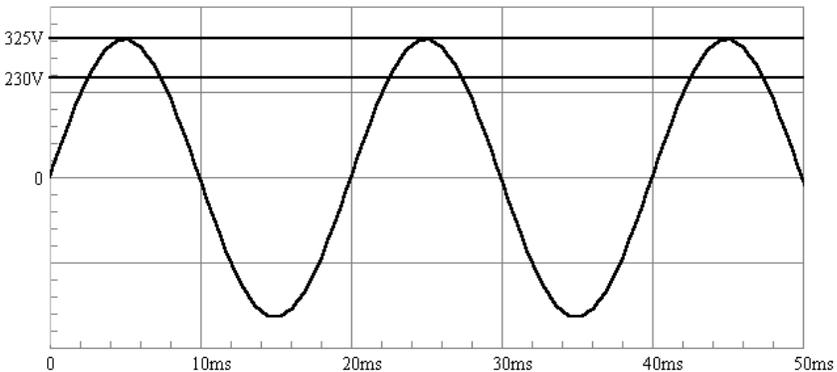


Abb. 3.1 Das Oszillogramm einer Wechselspannung

punkt  $U_s$  der Spannung gerade doppelt so groß ist wie die durchschnittliche, also die effektive Leistung. Da die Leistung bei konstantem Widerstand eines Verbrauchers mit dem Quadrat der Spannung steigt, ergibt sich ein Verhältnis zwischen Spitzenspannung  $U_s$  und Effektivspannung  $U_{\text{eff}}$  von  $\sqrt{2} = 1,41$ . Ein Transformator mit einer Sekundärspannung von 12 V liefert also eine Spitzenspannung von  $12\text{V} * 1,41 = 17\text{ V}$ . Dies spielt eine große Rolle bei der Dimensionierung von Netzteilen.

In der Elektronik verwendet man oft auch rechteckförmige Wechselspannungen. In diesem Fall ist die Effektivspannung gleich der Scheitelspannung. Für jede Kurvenform gilt ein eigenes Verhältnis von Effektivspannung zu Spitzenspannung. Ein Wechselspannungs-Voltmeter zeigt im allgemeinen die Effektivspannung an. Man unterscheidet jedoch zwischen einer echten und technisch sehr aufwendigen Effektivwertmessung (engl. True RMS) und einer nur über die Spannung ermittelten Messung, was bei den einfachen Voltmetern der Fall ist. Diese zeigen nur für sinusförmige Spannungen korrekte Ergebnisse, während bei allen anderen Kurvenformen mehr oder weniger falsche Messwerte angezeigt werden. Andererseits ist der Effektivwert nicht unbedingt immer der interessante Messwert. In der Schaltungstechnik interessiert oft mehr die Spitzenspannung, die sich am besten mit einem Oszilloskop bestimmen lässt.

Jede beliebige periodische Kurvenform lässt sich aus Sinusschwingungen zusammensetzen, wobei eine Grundfrequenz und Vielfache davon verwendet werden. Umgekehrt kann man auch sagen, dass eine beliebige Kurvenform eine Grundschwingung und viele Oberschwingungen enthält. Eine Rechteckspannung mit der Grundfrequenz 100 Hz enthält neben der Grundfrequenz von

### 3 Der Wechselstromkreis

100 Hz auch noch schwächere Oberschwingungen mit den Frequenzen 300 Hz, 500 Hz, 700 Hz usw. Legt man eine bestimmte Signalform an einen Lautsprecher, dann ist der Gehalt an Obertönen im Klangbild des Signals deutlich zu hören. Nur der reine Sinuston enthält keine Obertöne. Jede Verzerrung der reinen Sinusform fügt jedoch Anteile höherer Frequenzen hinzu.

Die *Tabelle 3.1* zeigt die relativen Anteile der einzelnen Oberschwingungen für die drei wichtigsten Kurvenformen Rechteck (symmetrisch), Dreieck (symmetrisch) und Sägezahn. Bei den symmetrischen Kurvenformen kommen nur ungerade Oberschwingungen vor. Die Dreieckschwingung ist unter den drei Kurvenformen der Sinusschwingung am ähnlichsten und hat daher den geringsten Gehalt an Anteilen höherer Frequenzen. Den höchsten Gehalt an Obertönen hat die Sägezahnschwingung.

*Tabelle 3.1 Oberwellenanteile in einigen Kurvenformen*

Form	$f_0$	$2 * f_0$	$3 * f_0$	$4 * f_0$	$5 * f_0$	$6 * f_0$
Rechteck	1	0	1/3	0	1/5	0
Dreieck	1	0	1/9	0	1/25	0
Sägezahn	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6

Bei der Betrachtung von Wechselspannungssignalen ist es üblich, von reinen Sinusspannungen auszugehen. Alle anderen Kurvenformen werden als Gemisch von Sinussignalen betrachtet. Umgekehrt lassen sich beliebige Kurvenformen aus Sinussignalen erzeugen. *Abb. 3.2* zeigt die Synthese eines Rechtecksignals aus den ersten drei Grundsignalen. Die angenäherte Rechteckspannung folgt hier der folgenden Funktion:

$$U = U_s \cdot \sin(2\pi ft) + \frac{U_s}{3} \cdot \sin(6\pi ft) + \frac{U_s}{5} \cdot \sin(10\pi ft)$$

### 3.2 Das Dezibel

In der Nachrichtentechnik spricht man statt von Spannungen oft von Pegeln. Ein bestimmter Spannungspegel wird auch oft in Dezibel (dB) angegeben. Das Dezibel ist eine reine Verhältnisgröße, d.h., man gibt den Unterschied zu einer Bezugsgröße an. Die Angabe 20 dB bedeutet z.B. die zehnfache Spannung bzw. die 100-fache Leistung. Man kann diese Angabe sinnvoll auf einen Ver-

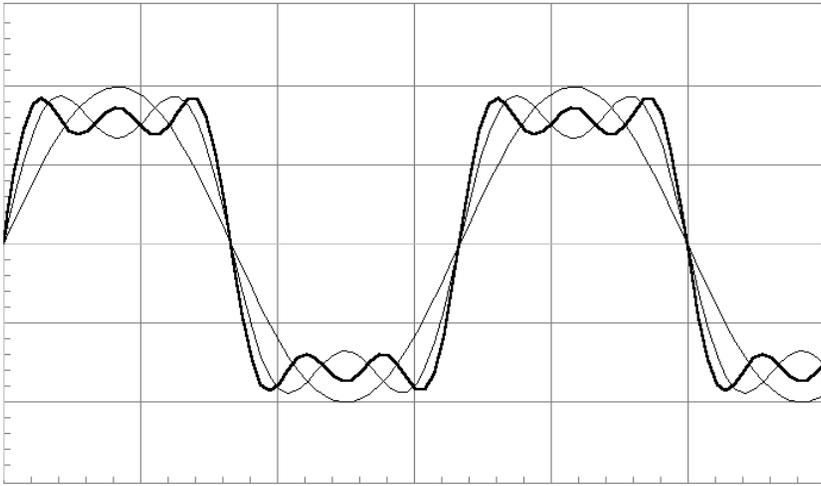


Abb. 3.2 Annäherung eines Rechtecksignals aus drei Sinusspannungen

stärker anwenden und sagen, die Verstärkung beträgt 20 dB. Zur Bestimmung der Verstärkung müssen die Eingangsspannung  $U_1$  und die Ausgangsspannung  $U_2$  gemessen werden. Die Umrechnung der Verstärkung  $V$  in Dezibel beruht auf dem Zehnerlogarithmus des Spannungsverhältnisses:

$$V = 20 \text{ dB} \cdot \log \frac{U_2}{U_1}$$

Für eine 100-fache Verstärkung  $V$  ergibt sich 40 dB.

$$V = 20 \text{ dB} \cdot \log 100$$

$$\underline{\underline{V = 40 \text{ dB}}}$$

Verwendet man das Dezibel zur Angabe eines Pegels, dann muss immer mit angegeben werden, in Bezug auf welchen Pegel die Angabe gilt. In der Fernmeldetechnik verwendet man z.B. als Bezugspegel 1 mW an 600  $\Omega$ . Die Signalspannung beträgt dann 0,7746 V = 0 dBm. Größere oder kleinere Pegel werden in dBm angegeben. Negative Pegel entsprechen kleineren Spannungen, positive größeren.

Als Bezugspegel kommen auch andere Größen in Frage. In der Hochfrequenztechnik verwendet man oft ein Mikrovolt als Nullpegel. Die Angabe 40 dB( $\mu$ V) bedeutet dann eine Signalspannung von 100  $\mu$ V.

*Tabelle 3.2 Einige Pegel in dBm*

<b>Pegel</b>	<b>Leistung P</b>	<b>Spannung U</b>
+20 dBm	100 mW	7,75 V
+10 dBm	10 mW	2,45 V
+ 3 dBm	ca. 2 mW	1.10 V
0 dBm	1 mW	0,775 V
-3 dBm	ca. 0,5 mW	0,548 V
-6 dBm	ca. 0,25 mW	0,388 V
-10 dBm	0,1 mW	0,245 V
-20 dBm	0,01 mW	0,0775 V
-30 dBm	0,001 mW	0,0245 V

Ein Vorteil des logarithmischen Maßes dB ist, dass man Abschwächungen und Verstärkungen einfach addieren kann. Zwei hintereinandergeschaltete Verstärker mit Verstärkungen mit jeweils 12 dB haben eine Gesamtverstärkung von 24 dB. Wenn zusätzlich noch ein Leitung mit Verlusten von 2 dB und ein Übertrager mit Verlusten von 4 dB verwendet werden, beträgt die Gesamtverstärkung nur noch 18 dB. Ein weiterer Vorteil ist, dass man sehr große Pegelunterschiede gut zusammen in einem Diagramm darstellen kann.

### 3.3 Transformatoren

Der wichtigste Grund Wechselstrom einzusetzen ist die Möglichkeit, mit Transformatoren die Spannung zu verändern. Ein Transformator enthält zwei Drahtspulen auf einem gemeinsamen Eisenkern. Ein Wechselstrom durch eine der Spulen erzeugt ein Magnetfeld im Kern, das in der zweiten Spule eine Spannung induziert. Die Induktion wird weiter unten im Zusammenhang mit Spulen noch genauer erläutert. Das Verhältnis der Windungszahlen eines Transformators entspricht dem Verhältnis der Spannungen. Ein Transformator verändert im umgekehrten Windungsverhältnis die Stromstärke, so dass die Leistung bis auf geringe Verluste unverändert bleibt.

*Abb. 3.3* zeigt die Verhältnisse an einem idealen Netztransformator ohne jede Verluste für die Sekundärspannung 12 V. Die Primärwicklung könnte 2300 Windungen haben, die Sekundärwicklung 120 Windungen, so dass jeweils 10 Windungen an beiden Seiten auf ein Volt kommen. Die Stromstärke wird im

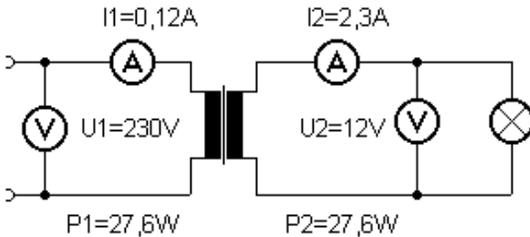


Abb. 3.3 Der Transformator

gleichen Maß herauftransformiert wie die Spannung heruntertransformiert wird. Die Leistung ist daher primär wie sekundär mit  $27,6\text{ W}$  gleich.

In der Realität besitzen Transformatoren jedoch einige abweichende Eigenschaften. Es treten ohmsche Verluste in beiden Wicklungen auf, die zu einem Spannungsabfall unter Belastung führen. Die nicht vollständige magnetische Kopplung zwischen den Wicklungen führt zu weiteren Spannungsverlusten, so dass die Sekundärwicklung insgesamt als eine Spannungsquelle mit einem gewissen Innenwiderstand erscheint. Dies berücksichtigt man, indem man das Wicklungsverhältnis für eine um etwa 10% größere Leerlaufspannung auslegt. Bei einem 12-V-Netztrafo aus dem obigen Beispiel bedeutet das eine Leerlauf-Effektivspannung von  $13,2\text{ V}$  und eine Leerlauf-Spitzenspannung von ca.  $18,7\text{ V}$ . Transformatoren sehr kleiner Leistung weisen noch größere Leerlaufspannungen und Spannungsverluste auf. Sehr große Transformatoren arbeiten dagegen mit sehr viel geringeren Verlusten.

Auch ohne eine Belastung fließt bereits ein Primärstrom durch den induktiven Widerstand der Primärspule. Bei einem idealen Transformator ist dies wie bei einer idealen Spule ein reiner Blindstrom, der zu keinen Verlusten führt. In der Realität kann man jedoch auch bei einem unbelasteten Transformator bereits eine Erwärmung feststellen, was auf Energieverluste hinweist.

Außer Spannungsabfällen treten bei Transformatoren auch gewisse nicht-lineare Effekte auf. Da man den Eisenkern nicht größer als unbedingt nötig auslegt, erreicht er in den Stromspitzen teilweise schon seine maximale Magnetisierung. Die dabei auftretenden Effekte führen zu einer Verzerrung der Kurvenformen und zu Energieverlusten im Kern. Die Verwendung höherer Frequenzen ermöglicht die Verwendung kleinerer Trafokerne bei zugleich geringeren Verlusten. Die relativ geringe Frequenz von  $50\text{ Hz}$  führt zu großen und schweren Trafos. In Schaltnetzteilen verwendet man daher größere Frequenzen um etwa  $50\text{ kHz}$  und erreicht damit insgesamt kleinere und preiswertere Transformatoren.

Wechselspannungen spielen auch als Signalspannungen eine wichtige Rolle. So sind z.B. Tonfrequenzsignale auf einer Telefonleitung oder an einem Lautsprecher ebenfalls Wechselspannungen, wobei aber meist mehrere Frequenzen im Bereich 20 Hz bis 20 kHz (Niederfrequenz) zusammen auftreten. Man kann typische Niederfrequenzsignale z.B. mit einem Oszilloskop untersuchen.

Bei der Übertragung von Tonsignalen über einen Transformator muss dieser für den gesamten Frequenzbereich ausgelegt sein, also z.B. für 20 Hz bis 20 kHz. Die Gefahr von Verzerrungen führt dazu, dass man NF-Übertrager nach Möglichkeit vermeidet. Im speziellen Fällen bieten sie jedoch Vorteile wie z.B. die Möglichkeit der Potentialtrennung zur Vermeidung von Brummschleifen. Bei größeren Anlagen mit vielen Lautsprechern verwendet man Verstärker in 100-V-Technik, wobei jeder Lautsprecher der Anlage einen eigenen Tonübertrager zur Anpassung erhält. Die früher in jedem Röhrenverstärker verwendeten Ausgangsübertrager können jedoch bei Transistorverstärkern völlig vermieden werden.

## 3.4 Kondensatoren

Kondensatoren sind Bauteile mit zwei Anschlussdrähten, deren Funktion sich vereinfacht als Ladungsspeicher beschreiben lässt. Schaltet man einen Kondensator im Gleichstromkreis in Reihe zu einem Verbraucher, dann ist der Stromkreis unterbrochen. Allenfalls beim ersten Einschalten fließt ein kurzer Stromstoß. Verwendet man dagegen Wechselspannung, dann fließt ein Strom, und der Kondensator verhält sich ähnlich wie ein Widerstand.

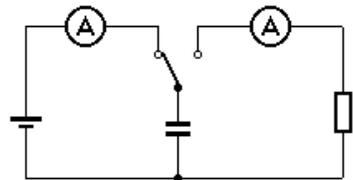


Abb. 3.4 Auf- und Entladen eines Kondensators

Der Kondensator besteht aus zwei Metallfolien, die gegeneinander isoliert sind. Bei Anschluss einer Spannung werden die Folien (Kondensatorplatten) aufgeladen, bis die Spannung gleich der Batteriespannung ist. Die Ladung bleibt gespeichert und kann beim Anschluss eines Widerstands in kurzer Zeit abfließen, wobei die Spannung abnimmt. Grundsätzlich fließt nur Strom, solange die Spannung sich ändert. Die Größe des Stroms hängt von der Platten-

größe, von ihrem Abstand und vom verwendeten Isoliermaterial (Dielektrikum) ab. Man ordnet dem Kondensator als messbare Größe die Kapazität  $C$  in Farad (F) zu. Meist kommen Werte im Bereich Mikrofarad ( $\mu\text{F}$ , Millionstel Farad), Nanofarad ( $\text{nF} = 1/1000 \mu\text{F}$ ) und Pikofarad ( $\text{pF} = 1/1000 \text{nF}$ ) vor. Die Kapazität kann gemessen werden, wenn man den Spannungsanstieg  $\Delta U$  bei einem Strom  $I$  in einer gewissen Zeit  $\Delta t$  bestimmt.

$$C = \frac{I \cdot \Delta t}{\Delta U}$$

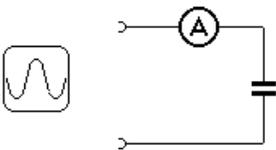


Abb. 3.5 Der Kondensator im Wechselstromkreis

Beim Anlegen einer Wechselspannung ändert sich die momentane Spannung zu jedem Zeitpunkt. Der Kondensator wird also dauernd aufgeladen und wieder entladen. Es fließt ein Wechselstrom, der von der Spannung, der Frequenz und der Kapazität des Kondensators abhängt. Der Kondensator verhält sich ähnlich wie ein Widerstand und besitzt einen „kapazitiven Widerstand“  $R_C$ .

$$R_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Für einen Kondensator mit  $C = 100 \mu\text{F}$  bestimmt man bei einer Frequenz von 50 Hz einen kapazitiven Widerstand von  $R_C = 31,8 \Omega$ .

### 3.5 RC-Glieder

Im Wechselstromkreis mit einem Kondensator ist zu beachten, dass es eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom gibt, d.h., der höchste Strom tritt nicht zum Zeitpunkt der höchsten Spannung auf, sondern früher. Aus diesem Grunde lassen sich auch nicht die Gesetze der Reihenschaltung einfach auf einen Kondensator und einen Widerstand anwenden. Trotzdem können Kondensatoren wie Vorwiderstände eingesetzt werden. Allerdings sind größere Kapazitäten meist nur bei Elektrolytkondensatoren erhältlich, die eine Polung aufweisen und nicht an Wechselspannung betrieben werden dürfen.

### 3 Der Wechselstromkreis

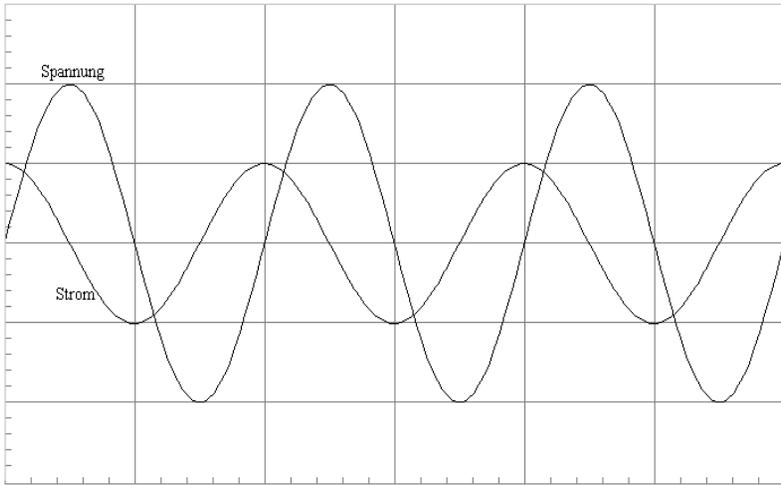


Abb. 3.6 Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

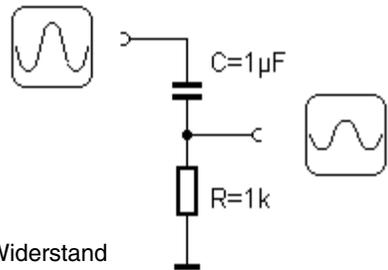


Abb. 3.7 Reihenschaltung aus Kondensator und Widerstand

Eine Reihenschaltung aus einem Widerstand und einem Kondensator bildet einen komplexen Gesamtwiderstand  $Z$  mit einem Betrag kleiner als der Summe aus  $R$  und  $R_C$ . Außerdem tritt eine Phasenverschiebung zwischen Null und  $90^\circ$  auf. Allgemein gilt für den Betrag von  $Z$ :

$$Z = \sqrt{R^2 + R_c^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}$$

Für den Betrag des Stroms in Abhängigkeit von der Frequenz gilt für die Reihenschaltung aus  $R$  und  $C$ :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + R_C^2}}$$

Der Strom  $I$  und damit auch der Spannungsabfall am Widerstand nimmt mit steigender Frequenz  $f$  zu. Deshalb spricht man hier von einem Hochpass. Ein wichtiger Punkt ist die sogenannte Grenzfrequenz  $f_G$ .

$$f_G = \frac{1}{2\pi RC}$$

Im Beispiel mit  $R = 1 \text{ k}\Omega$  und  $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$  ergibt sich eine Grenzfrequenz von 159 Hz. Bei der Grenzfrequenz gilt  $R = R_C$ . Die Impedanz der Gesamtschaltung ist  $Z = R \cdot \sqrt{2}$ , im Beispiel also 1,41 k $\Omega$ . Damit ist die Spannung am realen Widerstand auf den Wert  $U \cdot 0,707$  abgefallen.

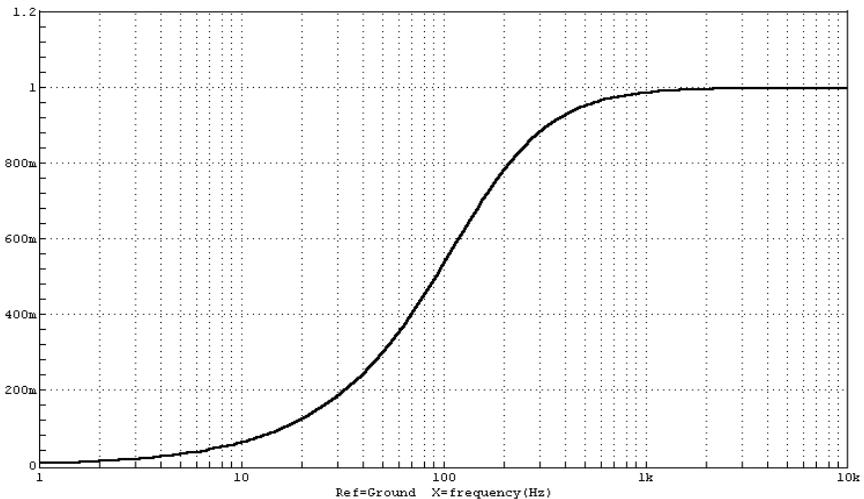


Abb. 3.8 Frequenzgang eines RC-Hochpass

Kondensatoren als Vorwiderstände setzt man in Lautsprecher-Frequenzweichen ein, um einen Hochpass zu realisieren. Ein Kondensator in Reihe zum Hochtönlautsprecher lässt also vornehmlich die hohen Frequenzen passieren. Mit  $C = 5 \text{ }\mu\text{F}$  und einem Lautsprecherwiderstand von  $R = 8 \text{ }\Omega$  ergibt sich eine Grenzfrequenz von  $f_G = 4 \text{ kHz}$ .

Bisher wurden Kondensatoren nur im Wechselstromkreis mit sinusförmigen Spannungen betrachtet. Interessant ist jedoch auch das Verhalten des Kondensators bei Spannungssprüngen oder bei Rechteckspannungen. Ein echter Span-

### 3 Der Wechselstromkreis

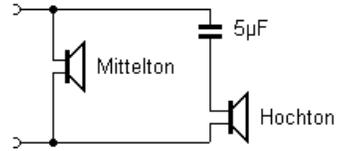


Abb. 3.9 Der Kondensator in der Frequenzweiche

nungssprung am Kondensator selbst ist praktisch unmöglich, da er einen unendlichen Ladestrom voraussetzen würde. In der Praxis muss es vermieden werden, einen Kondensator mit großer Kapazität über ca. 1000  $\mu\text{F}$  schlagartig an eine Gleichspannung wie z.B. 12 V zu schalten. Der impulsartige Ladestrom kann zur Beschädigung des Kondensators, eines Schalters oder einer Sicherung führen, wenn die Stromquelle einen niedrigen Innenwiderstand aufweist. Im Moment des Einschaltens ist die Spannung am Kondensator noch Null. Er stellt also einen Kurzschluss dar, wobei der Strom allein vom Innenwiderstand der Spannungsquelle begrenzt wird. Im Falle eines Bleiakkumulators können leicht Impulsströme von einigen hundert Ampere auftreten. Ähnlich liegen die Verhältnisse, wenn zwei große Kondensatoren zusammengeschaltet werden, wobei einer bereits geladen ist.

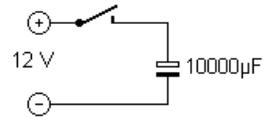


Abb. 3.10 Stoßartiges Aufladen eines Elkos

Das gleiche Problem tritt auf, wenn in einem Netzteil Kondensatoren über einen Gleichrichter direkt am Netz geladen werden, wie es z.B. in Schaltnetzteilen vorkommt. Die Größe des Impulsstroms hängt dabei von zufälligen Einschaltmoment ab und ist dann besonders groß, wenn gerade im Moment der Scheitelspannung eingeschaltet wird. Zur Vermeidung zu großer Impulsströme muss ein Widerstand von etwa 5  $\Omega$  in Reihe zum Gleichrichter geschaltet werden, obwohl dabei auch im laufenden Betrieb höhere Verluste auftreten. Bei einem Netzteil mit Transformator sorgt dagegen der Innenwiderstand des Transformators selbst für eine ausreichende Begrenzung des Impulsstroms.

Im Normalfall werden Kondensatoren nur zusammen mit Widerständen an eine Gleichspannung oder an eine Rechteckspannung gelegt. Beim Einschalten einer Gleichspannung lädt sich der Kondensator anfangs schneller und gegen Ende langsamer auf, weil bei zunehmender Ladespannung der Spannungsabfall am Ladewiderstand  $R$  und damit der Ladestrom abnimmt. Ebenso nimmt

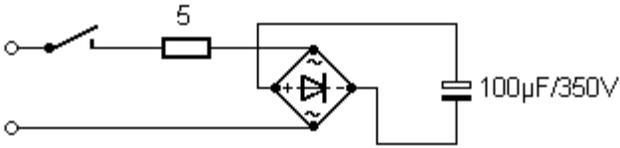


Abb. 3.11 Begrenzung des Stoßstroms durch einen Widerstand

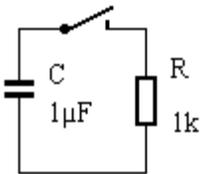


Abb. 3.12 Entladen eines Kondensators über einen Widerstand

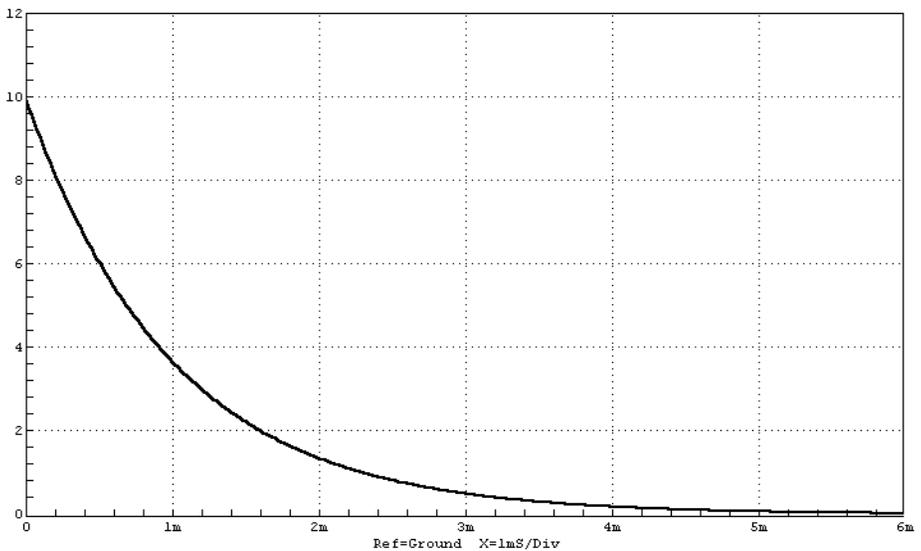


Abb. 3.13 Die Entladekurve eines Kondensators

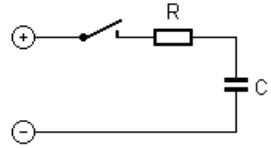
der Entladestrom mit der Zeit ab, wenn ein Kondensator an einem Widerstand entladen wird.

Die Kondensatorspannung beim Ausschalten folgt dem Exponentialgesetz. Die Entladung beginnt steil und nähert sich asymptotisch der Spannung Null an, erreicht sie aber theoretisch nie.

### 3 Der Wechselstromkreis

$$U = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{RC}}$$

Abb. 3.14 Aufladen eines Kondensators über einen Widerstand



Für einen Kondensator C und einen Widerstand R kann man die Zeitkonstante  $T = RC$  angeben. In dieser Zeit hat sich der Kondensator auf den Teil  $1/e = 0,368$  der Anfangsspannung entladen. Im Beispiel mit  $R = 1 \text{ k}\Omega$  und  $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$  beträgt die Zeitkonstante 1 ms. Ein Kondensator von  $10000 \text{ }\mu\text{F}$  mit einem Widerstand von  $10 \text{ k}\Omega$  hat entsprechend eine Zeitkonstante von 10 s.

$$T = R \cdot C$$

$$T = 10000 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot 10^3 \Omega$$

$$\underline{\underline{T = 10 \text{ s}}}$$

Der Kondensator entlädt sich in einer Zeit von 10 s von 10 V auf 3,68 V. Nach 100 s ist immer noch eine Spannung von  $50 \text{ }\mu\text{V}$  vorhanden. Die gleichen Verhältnisse finden sich umgekehrt auch beim Aufladevorgang. Die Kondensatorspannung folgt der Funktion

$$U = U_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right)$$

Bei Aufladen erreicht der Kondensator nach der Zeit t eine Spannung von 63,2% der Endspannung. Legt man eine periodische Rechteckspannung an das RC-Glied, dann erhält man die typische Spannungsform mit Teilästen der Exponentialfunktion.

Das RC-Glied ist hier wie ein Tiefpassfilter geschaltet. Die entstehende Kurvenform kann auch so gedeutet werden, dass aus dem Spektrum der in der

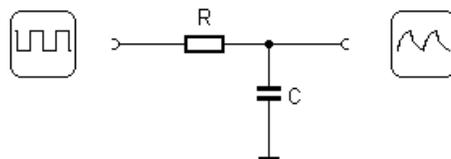


Abb. 3.15 Das RC-Glied als Tiefpass

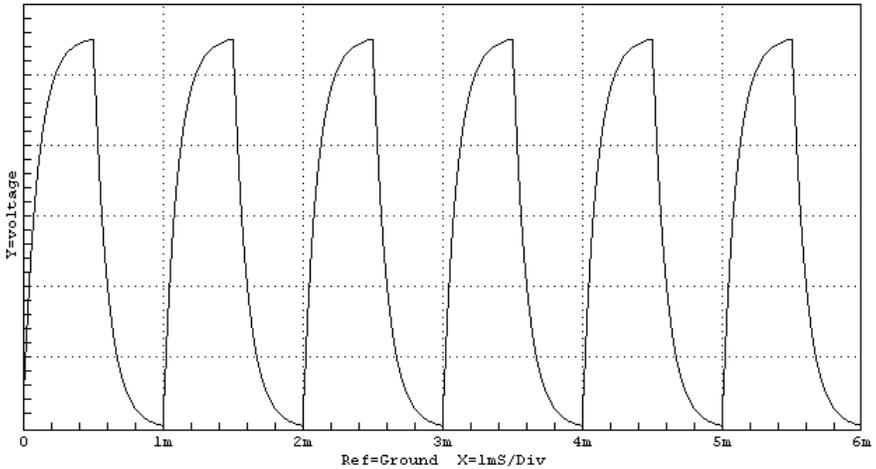


Abb. 3.16 Ausgangssignal des Tiefpassfilters

Rechteckfunktion vorkommenden Frequenzen die höheren geschwächt werden. Die Kurvenform wird abgerundet und nähert sich mehr der Sinusform an. Umgekehrt liegen die Verhältnisse, wenn man das RC-Glied wie ein Hochpassfilter schaltet. Nun treten typische Impulsspitzen auf, die gegenüber der Eingangsspannung eine geschwächte Grundschwingung enthalten.

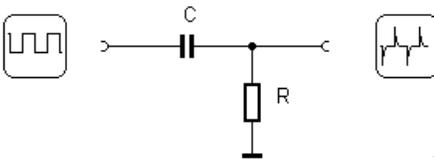


Abb. 3.17 Das RC-Glied als Hochpass

### 3.6 Kondensator-Bauformen

Kondensatoren erhält man in verschiedenen Bauformen, die sich hauptsächlich in der verwendeten Isolationsschicht (Dielektrikum) unterscheiden. Keramische Kondensatoren werden mit Kapazitäten von ca. 1 pF bis 0,1  $\mu\text{F}$  hergestellt. Folienkondensatoren bis ca. 10  $\mu\text{F}$  verwenden Kunststofffolien und halten Spannungen von ca. 60 V bis zu einigen kV aus. Die größten Kapazitäten von 1000  $\mu\text{F}$  und mehr erreicht man mit Elektrolytkondensatoren. Sie dürfen nur mit einer bestimmten Polung angeschlossen werden und eignen sich

### 3 Der Wechselstromkreis

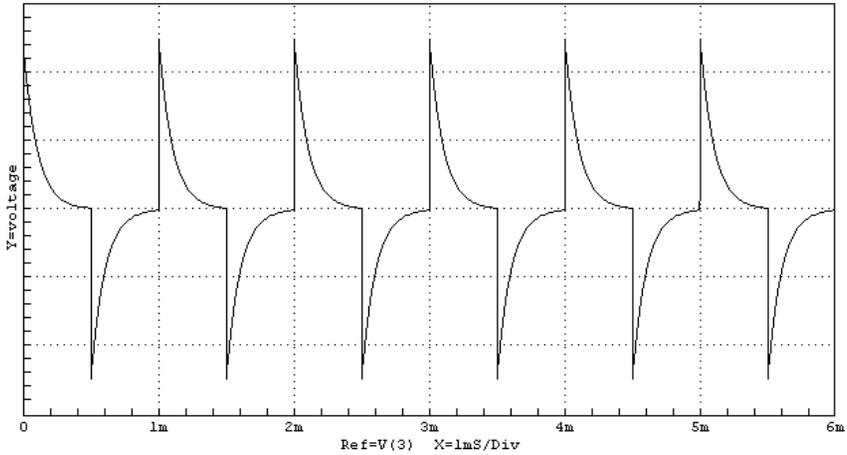


Abb. 3.18 Ausgangssignal des Hochpassfilters

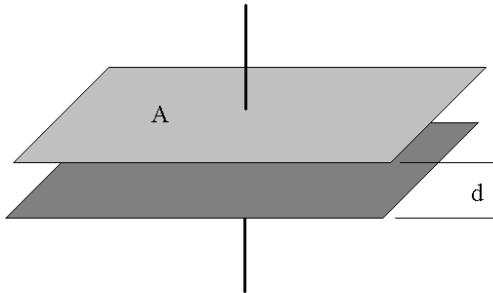


Abb. 3.19 Prinzipieller Aufbau eines Plattenkondensators

nicht für Wechselstrom. Grundsätzlich muss bei jedem Kondensator die höchste erlaubte Spannung beachtet werden, damit es nicht zu inneren Überschlängen und Kurzschlüssen kommt.

Die Kapazität eines Kondensators hängt von der Plattenfläche  $A$ , dem Abstand  $d$  und vom verwendeten Dielektrikum, also dem Material der Isolierschicht ab. Es kommt zwar nicht alle Tage vor, dass man sich einen Kondensator selbst baut. Wichtig ist es aber oft, Kapazitäten abschätzen zu können, die sich aus dem Aufbau einer Schaltung ergeben. Für einen Luftkondensator gilt allgemein

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

mit der elektrischen Feldkonstanten  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ . Die Fläche  $A$  muss in  $\text{m}^2$ , der Abstand  $d$  in  $\text{m}$  angegeben werden. Für einen Plattenkondensator mit einer Fläche  $A = 100 \text{ cm}^2 = 0,01 \text{ m}^2$  und einem Abstand  $d = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$  ergibt sich eine Kapazität von

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

$$C = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{0,01 \text{ m}^2}{0,001 \text{ m}}$$

$$C = 88,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{V}}$$

$$C = 88,5 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$\underline{\underline{C = 88,5 \text{ pF}}}$$

Für ein anderes Dielektrikum als Luft oder Vakuum vergrößert sich die Kapazität um die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$ .

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Die *Tabelle 3.3* zeigt  $\epsilon_r$  für einige wichtige Stoffe.

*Tabelle 3.3 Dielektrizitätskonstanten für einige Stoffe*

Stoff	$\epsilon_r$
Vakuum	1
Luft	1,00059
Papier	2...2,5
Glas	2...12
Glimmer	4...8
Epoxydharz	3,6
Keramische Werkstoffe	bis 8000

Eine zweiseitige Platine mit den Maßen  $160 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}$  und der Dicke  $d = 1,5 \text{ mm}$  aus Epoxydharz mit  $\epsilon_r = 3,6$  besitzt zwischen beiden Kupferschichten, wie man leicht nachrechnen kann, eine gesamte Kapazität von  $320 \text{ pF}$ . Pro Quadratzentimeter gegenüberliegender Kupferfläche hat man etwa  $2 \text{ pF}$ .

### 3.7 Induktivitäten

Ebenso wie Kondensatoren weisen auch Spulen ein besonderes Verhalten im Wechselstromkreis auf. Spulen mit einem Eisen- oder Ferritkern werden auch als Drosseln bezeichnet. An einer Spule treten zwei unterschiedliche physikalische Phänomene auf. Zum einen führt ein Strom durch die Spule zu einem Magnetfeld im Inneren der Spule. Zum anderen erzeugt jede Änderung des Magnetfelds in der Spule eine Spannung zwischen ihren Drahtenden (Induktion). Durch einen magnetisierbaren Kern aus Eisen oder Ferrit wird das Magnetfeld der Spule und damit auch die Induktion verstärkt.

Ändert man den Strom durch die Spule, dann tritt die sog. Selbstinduktion auf. Da sich gleichzeitig das Magnetfeld ändert, wird auch eine Spannung induziert. Für eine ideale Spule ohne ohmschen Widerstand gilt also: Die Spannung ist Null, solange der Strom konstant ist, und sie ist um so größer, je schneller sich der Strom ändert. Die charakteristische Größe der Spule ist die Induktivität  $L$  in Henry (H).

$$L = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta I}$$

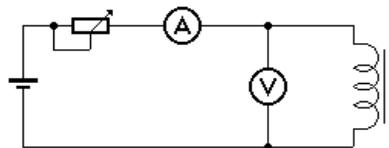


Abb. 3.20 Messung der Induktionsspannung bei Stromänderungen

Im Wechselstromkreis ist die Spule laufenden Änderungen des Stroms unterworfen. Es wird daher auch laufend eine Wechselspannung induziert. Der Strom eilt der Spannung in der Phase nach.

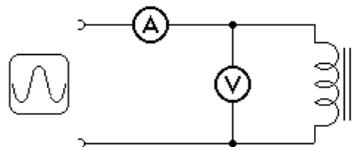


Abb. 3.21 Die Spule im Wechselstromkreis

Die Spule verhält sich im Wechselstromkreis ähnlich wie ein Widerstand. Sie verringert also den Strom in Abhängigkeit von der Frequenz und der Induktivität. Man kann der Spule einen induktiven Widerstand  $R_L$  zuordnen:

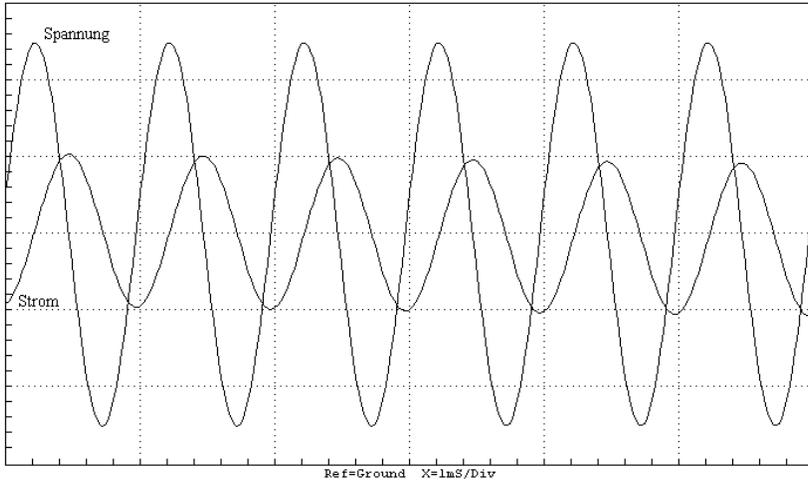


Abb. 3.22 Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

$$R_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Auch Spulen oder Drosseln lassen sich als Vorwiderstände einsetzen. Dass der induktive Widerstand frequenzabhängig ist, nutzt man in Frequenzweichen für Lautsprechersysteme aus. Der Tieftöner erhält eine Drossel als Vorwiderstand, so dass hohe Frequenzen nur abgeschwächt übertragen werden.

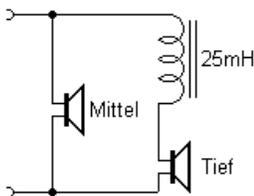


Abb. 3.23 Die Drossel in der Frequenzweiche

Viele Bauteile, die Spulen enthalten, also z.B. Transformatoren, Lautsprecher und Motoren, besitzen ebenfalls eine Induktivität, was oft zu unangenehmen Nebeneffekten führt. Typisch ist z.B. ein Spannungsstoß beim Ausschalten eines Stroms. Da hierbei die Stromänderung sehr schnell erfolgt, entsteht eine hohe Induktionsspannung bis zu einigen hundert Volt. Sie kann zu spürbaren elektrischen Schlägen führen oder Bauteile wie z.B. Transistoren zerstören, wenn man keine Vorsichtsmaßnahmen ergreift.

### 3 Der Wechselstromkreis

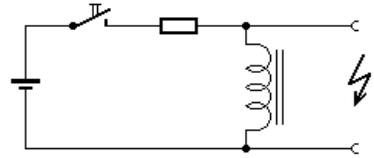


Abb. 3.24 Induktionsspannung beim Ausschalten eines Stroms

Ähnlich wie ein Kondensator zeigt auch eine Spule ein typisches Verhalten beim Einschalten einer Gleichspannung. Anders als beim Kondensator, der einen Stromstoß beim Einschalten zeigt, steigt der Strom in einer Spule mit dem Anlegen der Spannung erst allmählich an. Der erreichte Endwert hängt vom ohmschen Widerstand des gesamten Stromkreises ab. Es gibt also bei der Spule keinen Einschaltstromstoß, dafür aber einen Ausschalt-Spannungsstoß.

Beim Anlegen einer Rechteckspannung an ein RL-Glied erhält man ähnliche Kurvenformen wie bei einem RC-Glied, wobei allerdings die Tiefpass- und Hochpassfunktion vertauscht ist.

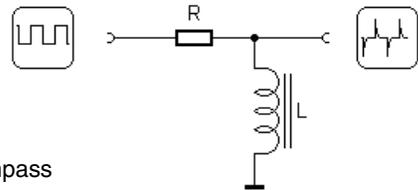


Abb. 3.25 Impulsformung durch einen RL-Hochpass

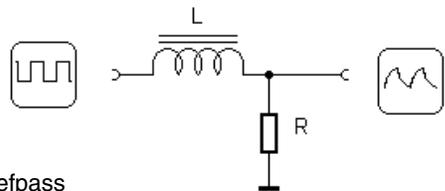


Abb. 3.26 Impulsformung durch einen RL-Tiefpass

Ebenso wie einer RC-Kombination kann man auch einer RL-Kombination eine Zeitkonstante  $T$  zuordnen. Der Strom durch eine Spule erreicht in der Zeit  $T$  gerade 63,2% seines Endwerts.

$$T = R \cdot L$$

Der manchmal bei großen Transformatoren beobachtete Einschaltstromstoß ist nicht auf das typische Verhalten einer Induktivität zurückzuführen, sondern hängt mit einer Vormagnetisierung des Eisenkerns zusammen, die unter ungünstigen Umständen dazu führt, dass der Kern in die magnetische Sättigung

gerät, so dass der Transformator kurzzeitig eine sehr viel geringere Induktivität aufweist. Ein vollständig magnetisierter Eisenkern trägt nicht mehr zur Induktivität der Spule bei, so dass die Induktivität etwa der der entsprechenden Luftspule entspricht. Die Vormagnetisierung und ihre Richtung wiederum hängt vom zufälligen Ausschaltmoment beim letzten Betrieb des Transformators ab.

### 3.8 Spulen-Bauformen

Vor allem bei Hochfrequenzanwendungen kommt es relativ häufig vor, dass man eine Spule bestimmter Induktivität herstellen muss. Allgemein muss unterschieden werden, ob die Spule auf einen magnetisierbaren Kern gewickelt wird oder ob sie als sogenannte Luftspule ganz ohne Wickelkern oder auf einen Isolierkörper gewickelt wird. Hier sollen zunächst Luftspulen betrachtet werden.

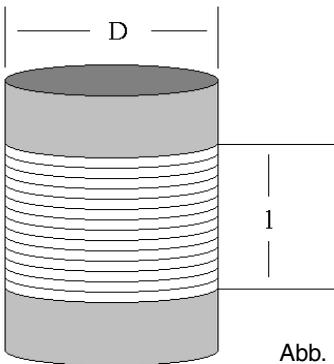


Abb. 3.27 Aufbau einer Luftspule

Allgemein gilt für eine lange Spule mit  $l > D$  mit der Windungszahl  $n$ , der Querschnittsfläche  $A$  in  $\text{m}^2$  und der Länge  $l$  in  $\text{m}$ :

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}$$

mit der magnetischen Feldkonstanten  $\mu_0 = 1,2466 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ . Die Formel gilt theoretisch nur für eine unendlich lange Spule, kann jedoch in brauchbarer Näherung bis zu einer Länge von  $l = D$  verwendet werden. Allgemein gilt, dass bei einer kurzen Spule mit gleicher Windungszahl die magnetische Kopplung zwischen den einzelnen Windungen steigt, womit sich eine höhere Induk-

# Sachverzeichnis

## **Numerics**

1N4148 63  
2N3055 80, 245

## **A**

Abschirmung 268  
Abwärtsregler 184  
AD594 237  
Akku 155  
Aktive Filter 277  
AI-Wert 51  
Amplitudenmodulation 144  
Anpassung 274  
Anzapfung 145  
Arbeitspunkt 71, 92, 99, 112  
Audion 146

## **B**

BA497 66  
Balance-Mischer 292  
Bandbreite 53, 146, 268  
Bandfilter 274  
Bandgap-Referenz 172  
Bandpass 271, 280  
Basisschaltung 104  
Batterie 154  
BC548 73, 78  
BD137 79  
BD678 79  
BF245 82, 93  
BF961 84, 288  
BFO 285  
BPW34 238  
Brückentreiber 262  
BS107 85, 216  
BU508 252  
Butterworth 278  
BUZ10 254  
Bypass-Kondensator 100

## **C**

CA3080 141  
CA3086 109  
CA3140 137  
CA3160 137  
CD4011 213  
CD4046 220  
CD4584 214  
CMOS 139, 213  
Cutoff-Spannung 82  
CW 284

## **D**

Dämpfung 52, 146, 191, 271,  
273  
Darlingtonschaltung 106  
Darlington-Transistor 79, 250  
Dehnungsmessstreifen 205,  
240  
Demodulation 144  
Dezibel, dB 32  
Dielektrikum 37, 43  
Dielektrizitätskonstante 45  
differentieller Widerstand 68  
Differenzverstärker 107  
Doppelgate-MOSFET 84  
Doppelsuper 286  
Drehkondensator 53, 145,  
283  
Dreieck 32  
Drossel 46, 267

## **E**

Eckfrequenz 271  
Effektivspannung 30, 200  
Eigenschwingungen 269  
Elektrolytkondensator 43  
Emitterfolger 102  
Emitterschaltung 87

Entkopplung 178  
exponentiell 61, 139

## **F**

Ferrit 46, 50  
Ferritantenne 147, 284  
Ferritstab 54  
FET 81  
Filter 267  
Flip-Flop 118  
Flußwandler 182  
Fotodiode 238  
Fototransistor 240  
Frequenzgang 98  
Frequenzmodulation 150,  
212  
Funktionsgenerator 217

## **G**

Gateschaltung 106  
Gegenkopplung 91  
Gegentaktverstärker 111  
Germanium 55, 77  
Germaniumdiode 62  
Gleichrichter 58  
Gleichstromkopplung 99  
Grenzfrequenz 39, 96, 270  
Güte 52, 273

## **H**

Halbleiter 55  
Hall-Element 242  
Hochfrequenz 77  
Hochfrequenzlitze 54  
Hochpass 39, 48, 270  
Hysterese 121

## **I**

Impedanz 39, 96  
Induktion 34, 46

## Sachverzeichnis

- Induktionsspannung 47, 259
- induktiver Widerstand 46
- Induktivität 46, 49
- Innenwiderstand 28, 63, 156
- Instrumentenverstärker 140
- Integrator 138, 208
- Intermodulation 288
- Inverter 132
- J**
- J-FET 82, 104
- K**
- Kaltwiderstand 22, 247
- Kapazität 37, 44, 79, 97
- Kapazitätsdiode 65
- kapazitiver Widerstand 37
- Kaskode-Schaltung 101
- Kennlinie 59, 73
- Keramikfilter 277
- KMZ10 243
- Kollektorschaltung 102
- Komparator 128, 207
- komplementär 112, 264
- komplexer Widerstand 38, 206
- Kondensator 36
- Konstantan 21
- Konstantstromquelle 115
- Kreuzmodulation 288
- KSY 10 242
- KTY10 231
- KTY81 231
- Kühlkörper 79, 245
- L**
- L165 264
- L272 263
- L293D 262
- Ladder-Filter 276
- Ladeelko 267
- Ladungspumpe 186
- Längsregler 166, 244
- Lattice-Filter 276
- LC-Filter 273
- LDR 237
- LED 68
- Leerlaufspannung 29, 35, 156
- Leistungstreiber 260
- LM13600 222, 280
- LM317 172
- LM324 132
- LM335 235
- LM336 174
- LM339 129
- LM358 132
- LM386 134
- LM741 127
- Logarithmierer 202
- LTC7660 187
- Luftspule 49
- M**
- Magnetisierung 35
- magneto-resistiv 243
- Masseleitung 16, 87, 178, 266
- Masseschleife 179
- MAX038 219
- MAX232 188
- MAX619 188
- MAX660 187
- MC1403 175
- MC1496 292
- Messbereich 190
- Messbrücke 204
- Messgleichrichter 199
- Miller-Effekt 97, 248
- Mischstufe 283
- Modulation 144
- Modulator 289
- Monoflop 120
- MOS-FET 137
- Multiplizierer 286
- Multivibrator 122
- N**
- NE555 209
- NE592 110
- NE612 293
- Niederfrequenz 36, 77
- NPN-Transistor 69
- NTC 227
- O**
- Oberschwingung 31
- Oberwellen 290
- Offset 109, 130
- Ohmmeter 195
- ON-Widerstand 85, 254
- Operationsverstärker 126
- Oszillator 283
- Oszilloskop 88
- OTA 141, 222, 280, 289
- P**
- Pegel 33
- Pendelaudion 150
- Phasenschieber 124
- Phasenverschiebung 38, 47
- Piezo-Sensor 241
- Pi-Filter 274
- PIN-Diode 66
- PNP-Transistor 71
- Potential 15
- Potentialtrennung 179
- Potentiometer 25
- Power-OPV 263
- Produkt-detektor 285
- Pt100 21, 231
- PTC 23, 231
- PWM-Regler 258
- Q**
- Quarzfilter 276
- Quarzoszillator 152, 214
- R**
- Rampengenerator 138
- Rauschen 163
- Rauschquelle 163
- RC-Filter 270
- RC-Oszillator 123
- Rechteck 32
- Rechteckgenerator 207
- REF02 175
- Regelschaltung 167, 215
- Regelschwingungen 216
- Resonanzfrequenz 51
- Resonanzüberhöhung 273
- Ringkerntransformator 178
- Ringmischer 291
- Rückkopplung 118, 147
- Ruhestrom 89

**S**

Sägezahn 32  
 Sättigung 50, 74, 88  
 Schaltregler 183  
 Schaltzeit 254  
 Schmitt-Trigger 121, 215  
 Schottkydiode 64, 291  
 Schrittmotor 261  
 Schwingkreis 51, 124, 145  
 Selbstinduktion 46  
 Selektion 145  
 Serienschwingkreis 273  
 Shunt 193  
 Siebkondensator 59  
 Siebung 267  
 Silizium 55, 77  
 Siliziumdiode 62  
 Sinus 30, 215  
 Sinus-Former 218  
 Skineffekt 54  
 Spannungsabfall 24  
 Spannungsregler 169  
 Spannungs-Vervielfachung  
 158  
 Spannungswandler 180  
 Speicherdrossel 182  
 Speicherzeit 248  
 Sperrschicht 57, 69  
 Sperrstrom 62, 76

Sperrwandler 182  
 spezifischer Widerstand 20  
 Spiegelfrequenz 284  
 Spule 46  
 SSB 284  
 Steilheit 62, 77, 82, 84, 94,  
 286  
 Stromspiegel 116, 142, 234  
 Stromverstärkungsfaktor 71  
 Superhet 283

**T**

TBA820M 112  
 Temperaturkoeffizient 20,  
 159, 173  
 Temperaturkompensation  
 204  
 Temperaturspannung 62, 76  
 thermischer Widerstand 245  
 Thermoelement 108, 235  
 Thyristor 119  
 Tiefpass 42, 48, 97, 270  
 TL081 135  
 TL431 175  
 TL497 184  
 Transformator 34  
 Transitfrequenz 78, 96  
 Trennschärfe 146  
 Trimmer 25

**U**

Überlagerung 284  
 Überlagerungsempfänger  
 283  
 ULN2803 260  
 Universalfilter 280

**V**

VCO 220  
 Verlustleistung 79, 168, 244  
 Verzerrung 88  
 Vierweggleichrichter 59, 155  
 VMOS 85, 254  
 Vorwiderstand 27, 68, 160

**W**

Wien-Brücken-Oszillator  
 215  
 Wirkungsgrad 162, 166, 245

**X**

XR2206 219  
 XR4151 221

**Z**

Zeitkonstante 42, 48, 120  
 Zenerdiode 67, 115, 159  
 zweiter Durchbruch 248, 252  
 Zweiweggleichrichter 155  
 Zwischenfrequenz 283

Teil 2

---

# Messtechnik

# Vorwort

Die messtechnische Erfassung der Umwelt ist für den Physiker und Ingenieur von jeher die Voraussetzung für seine Arbeit. Seit 1970 ist bei der immer umfangreicher werdenden Arbeit in der Praxis und im Betrieb auch für den Facharbeiter, Techniker und Meister die Anwendung der Messgeräte und die Kenntnis der Messverfahren unentbehrlich. Das Buch ist ideal für die Prüfungsvorbereitung. Der Autor hat sich bemüht, selbst für komplexe Vorgänge oder Formeln praktische, kurze Erklärungen bzw. Näherungsrechnungen zu entwickeln, ohne die Darstellungen zu simplifizieren.

Aus dieser Überlegung heraus entstand das vorliegende Buch, das im Unterricht an der Technikerschule und bei der IHK eingesetzt wird. Es soll jedem, der in der Elektrotechnik während der Ausbildungszeit oder in der Berufsausübung zu messen hat, behilflich sein, die Zusammenhänge zu verstehen und die richtigen Verfahren auszuwählen. Es soll den Auszubildenden in der Berufsschule, den Facharbeiter in der Praxis und den Meister beim Entwurf beraten. Es wird auch dem Techniker im Betrieb nützlich sein und in vielen Fällen sogar dem Fachmann anderer Berufe Hinweise auf die vielfältigen Möglichkeiten der elektrischen und elektronischen Messtechnik geben können.

Der Umfang des Buches reicht im Interesse der Vollständigkeit über das hinaus, was in der Berufs-, Meister- und Technikerschule zum Thema „Elektro-Messtechnik“ vermittelt werden kann. Dem Fachlehrer und Dozenten bleibt daher die Auswahl überlassen. Dafür kann aber das gleiche Buch in Fachkursen, Meisterkursen und Technikerschulen weiter verwendet werden.

Bei meiner Frau Brigitte möchte ich mich für die Erstellung der Zeichnungen bedanken.

München, Sommer 2010

Herbert Bernstein

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zeigerinstrumente (analoge Messtechnik)</b>	<b>11</b>
1.1	Analoge Messinstrumente	11
1.1.1	Messwerk, Messinstrument und Messgerät	16
1.1.2	Beschriftung der Messgeräte	18
1.1.3	Messinstrumentengehäuse	22
1.1.4	Skalen	23
1.1.5	Drehmomente und Einschwingen	27
1.1.6	Zeiger, Lager und Dämpfung	29
1.1.7	Genauigkeitsklassen und Fehler	32
1.1.8	Justierung (Eichung) von Betriebsmessgeräten	36
1.1.9	Bedienungsregeln und Beurteilung	46
1.2	Arbeitsweise von Zeigermessgeräten	49
1.2.1	Dreheisen-Messwerk	49
1.2.2	Drehmagnet- und Eisennadel-Messwerk	52
1.2.3	Drehspul-Messwerk	54
1.2.4	Zeiger-Galvanometer	57
1.2.5	Drehspul-Quotientenmesswerk	59
1.2.6	Elektrodynamisches Messwerk	60
1.2.7	Elektrodynamisches Quotienten-Messwerk	63
1.2.8	Elektrostatisches Messwerk	65
1.2.9	Induktions-Messwerk	67
1.2.10	Hitzdraht-Messwerk	70
1.2.11	Bimetall-Messwerk	70
1.2.12	Vibrations-Messwerk	71
1.2.13	Elektrizitätszähler	72
1.3	Messungen elektrischer Grundgrößen	74
1.3.1	Messwiderstände	74
1.3.2	Universal-Messinstrumente	76
1.3.3	Strommessung	79
1.3.4	Spannungsmessung	82
1.3.5	Widerstandsbestimmung durch Strom- und Spannungsmessung	84
1.3.6	Widerstandsmessung mit Ohmmetern	87
1.3.7	Brückenmessungen	88
1.3.8	Kompensationsmessungen	91
1.3.9	Kapazitätsmessung	92
1.3.10	Induktivitätsmessung	94

1.3.11	Wechselstrom-Messbrücken .....	97
1.4	Messverfahren in der Starkstromtechnik.....	100
1.4.1	Leistungsmessung im Einphasennetz .....	101
1.4.2	Leistungsmessung im Drehstromnetz .....	105
1.4.3	Blindleistungsmessung .....	107
1.4.4	Leistungsfaktormessung.....	108
1.4.5	Messen der elektrischen Arbeit .....	111
1.4.6	Isolationsmessung .....	113
1.4.7	Fehlerort-Bestimmung .....	116
1.4.8	Erdwiderstandsmessung .....	120
1.5	Vom elektrischen zum elektronischen Stromzähler .....	122
1.5.1	Umstellung auf elektronische Zähler.....	123
1.5.2	Arten von Stromzählern .....	124
1.5.3	Elektronische Stromzähler .....	124
1.5.4	Elektronischer Stromzähler mit Mikrocontroller .....	126
<b>2</b>	<b>Analoge und digitale Oszilloskope .....</b>	<b>130</b>
2.1	Aufbau eines analogen Oszilloskops.....	132
2.1.1	Elektronenstrahlröhre.....	133
2.1.2	Horizontale Zeitablenkung und X-Verstärker.....	140
2.1.3	Triggerung .....	143
2.1.4	Y-Eingangskanal mit Verstärker .....	146
2.1.5	Zweikanaloszilloskop .....	150
2.1.6	Tastköpfe .....	153
2.1.7	Inbetriebnahme des Oszilloskops .....	155
2.2	Praktische Handhabung eines Oszilloskops.....	159
2.2.1	Einstellen der Empfindlichkeit .....	160
2.2.2	Anschluss eines Oszilloskops an eine Messschaltung.....	164
2.2.3	Triggerverhalten an einer Messschaltung .....	170
2.3	Digitales Speicheroszilloskop .....	175
2.3.1	Merkmale eines digitalen Oszilloskops.....	175
2.3.2	Interne Funktionseinheiten .....	176
2.3.3	Digitale Signalspeicherung.....	177
2.3.4	Analog-Digital-Wandler.....	179
2.3.5	Zeitbasis und horizontale Auflösung.....	180
2.3.6	Möglichkeiten des Abtastbetriebs .....	184
2.3.7	Speicherung von Signalinformationen .....	188
2.4	Funktionen und Bedienelemente.....	192
2.4.1	Parametereinstellungen .....	192
2.4.2	Triggerfunktionen .....	194
2.4.3	Spezielle Triggerfunktionen .....	198
2.4.4	Triggermethoden für Störimpulse .....	202

2.4.5	Auswertung von Messsignalen . . . . .	204
2.4.6	Digitale Filterung . . . . .	208
2.4.7	Verarbeitung von Messsignalen . . . . .	211
2.4.8	Spezialfunktionen eines digitalen Speicheroszilloskops . . . . .	213
2.4.9	Automatische Messung mit der Cursorsteuerung . . . . .	217
2.4.10	Arbeiten mit dem Messcursor . . . . .	220
<b>3</b>	<b>Digitale Messgeräte . . . . .</b>	<b>225</b>
3.1	3½-stelliges Digital-Voltmeter mit LCD-Anzeige . . . . .	225
3.1.1	Arbeiten mit Flüssigkristall-Anzeigen . . . . .	228
3.1.2	Aufbau und Funktionen von Flüssigkristall-Anzeigen . . . . .	230
3.1.3	3½-stelliges Digital-Voltmeter ICL7106 LCD (und ICL7107 LED) . . . . .	232
3.1.4	Betriebsfunktionen ICL7106 und ICL7107 . . . . .	234
3.1.5	Auswahl der externen Komponenten für ICL7106 und ICL7107 . . . . .	239
3.1.6	Praktische Anwendungshinweise . . . . .	241
3.1.7	Schaltung für den ICL7106 . . . . .	247
3.1.8	Umschaltbares Multimeter mit dem ICL7106 . . . . .	249
3.1.9	Digital-Voltmeter mit elektronischer Bereichsumschaltung . . . . .	253
3.2	3½-stelliges Digitalvoltmeter mit LED-Anzeige . . . . .	262
3.2.1	Digitalvoltmeter mit LED-Anzeige . . . . .	263
3.2.2	3½-stelliges LED-Thermometer mit dem ICL7107 . . . . .	265
3.3	3½-stelliges Digitalvoltmeter mit dem ICL7116 und ICL7117 . . . . .	268
3.4	4½-stelliges Digitalvoltmeter mit dem ICL7129 . . . . .	268
3.4.1	Triplex-LCD-Anzeige für den ICL7129 . . . . .	271
3.4.2	Anwendungen mit dem ICL7129 . . . . .	274
3.5	4½-stelliges Digitalvoltmeter mit dem ICL7135 . . . . .	276
3.5.1	Betriebsarten des ICL7135 . . . . .	276
3.5.2	Anschlussbelegung des ICL7135 . . . . .	280
3.5.3	Auswahl der Komponenten für den ICL7135 . . . . .	281
3.5.4	Schaltungen mit dem ICL7135 . . . . .	287
3.6	3½-stelliges Digitalvoltmeter mit dem ICL7137 . . . . .	291
3.6.1	Messzyklen des ICL7137 . . . . .	292
3.6.2	Anschlussbelegung des ICL7137 . . . . .	294
3.6.3	Auswahl der Komponenten . . . . .	296
3.7	Vierstelliger Vor-Rückwärtszähler mit dem ICM7217 . . . . .	297
3.7.1	Vierstelliger Ereigniszähler mit dem ICM7217 . . . . .	299
3.7.2	Vierstelliger Tachometer mit dem ICM7217 . . . . .	304
3.7.3	IC-Zeitgeber 555 . . . . .	305
3.7.4	Vierstellige Uhr . . . . .	310
3.7.5	Vierstelliger Präzisionszähler bis 1 MHz . . . . .	314
3.8	Multifunktionszähler und Frequenzzähler . . . . .	320
3.8.1	Multifunktionszähler ICM7216A/B und Frequenzzähler ICM7216C/D . . . . .	320

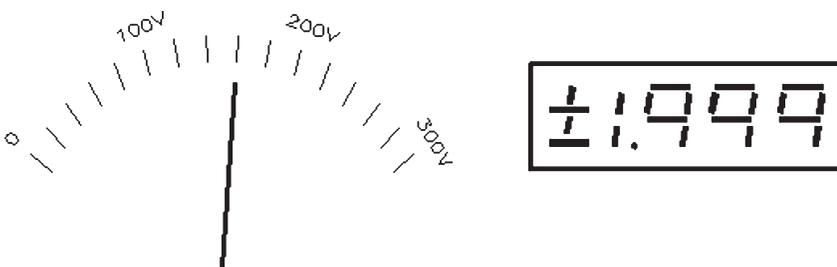
3.8.2	Funktionen des ICM7216A/B.....	323
3.8.3	Multifunktionszähler mit dem ICM7216A bis 10 MHz .....	327
3.8.4	Frequenzzähler bis 10 MHz mit dem ICM7216 .....	330
3.8.5	Erweiterte Schaltungen mit dem ICM7216 .....	333
3.8.6	Universalzähler ICM7226A/B.....	345
3.8.7	Steuerfunktionen des Universalzählers ICM7226A/B .....	349
3.8.8	Genauigkeit des Universalzählers ICM7226A/B.....	355
3.8.9	100-MHz-Universalzähler ICM7226A.....	355
3.8.10	100-MHz-Frequenzzähler ICM7226A.....	360
3.9	Funktionsgeneratoren.....	363
3.9.1	Funktionsgenerator ICL8038 .....	363
3.9.2	Funktionsgenerator und Wobbler.....	367
3.9.3	Schaltungen mit dem ICL8038.....	368
3.9.4	Funktionsgenerator mit Endstufe.....	373
3.10	Präzisions-Funktionsgenerator MAX038 .....	379
3.10.1	Blockschaltung des Funktionsgenerators MAX038.....	379
3.10.2	Funktionsgenerator mit dem MAX038.....	382
3.10.3	Wobbler mit dem MAX038 .....	387
3.11	Integrierter Funktionsgenerator XR2206 .....	391
<b>Sachverzeichnis.....</b>		<b>396</b>

# 1 Zeigerinstrumente (analoge Messtechnik)

In der praktischen Messtechnik (Messgeräte unter 200 €) unterscheidet man zwischen

- analogen Messgeräten
- digitalen Messgeräten

Analoge Messgeräte sind Zeigerinstrumente und bei diesen erfolgt die Anzeige auf einer Skala durch einen Zeiger. Digitale Messgeräte geben das Messergebnis über eine mehrstellige 7-Segment-Anzeige aus. Die digitalen Messgeräte werden im dritten Kapitel behandelt. *Abb. 1.1* zeigt den Unterschied zwischen analogen und digitalen Messgeräten.



**Abb. 1.1:** Unterschied zwischen analogen und digitalen Messgeräten

Das analoge Messgerät zeigt Messwerte zwischen 0 V und 300 V an. Bei dem digitalen Messgerät handelt es sich um eine 3½-stellige Anzeige und es zeigt einen Messwert von  $\pm 1.999$  an. Während für ein analoges Messgerät kaum eine Elektronik erforderlich ist, benötigt ein digitales Messgerät eine aufwendige Zusatzelektronik.

## 1.1 Analoge Messinstrumente

Bei elektrischen Größen wird stets eine Wirkung gemessen, da man die Elektrizität nicht unmittelbar mit den Sinnesorganen wahrnehmen kann wie etwa die Länge beim Messen eines Werkstückes. Die Wirkungen der Elektrizität sind vielfältig und dementsprechend sind es auch die elektrischen Messverfahren. Am häufigsten wird die Wechselwirkung zwischen Elektrizität und Magnetismus ausgewertet. Über 90 % aller praktisch eingesetzten Messgeräte beruhen auf der magnetischen Wirkung.

In der Praxis kann elektrische Energie in jede andere Energieform umgewandelt werden und mit ihrer Wirkung zur Ausführung von Messungen dienen:

- Magnetische Wirkung: Jeder Stromfluss ruft ein Magnetfeld hervor und somit wird dieses Verfahren in 90 % der elektrischen Messtechnik verwendet.
- Mechanische Wirkung: Beim elektrostatischen Prinzip stoßen sich gleichnamig elektrisch geladene Körper ab. Das Piezo-Kristall biegt sich, wenn eine Spannung angelegt wird.
- Wärmewirkung: Bei der direkten Wirkung erwärmt der Strom einen Hitzdraht und damit verändert sich die Längenausdehnung. Nutzt man die indirekte Wirkung, wird der erwärmte Draht mittels eines Thermoelements gemessen.
- Lichtwirkung: Man unterscheidet zwischen Gasentladung und Glühlampe. Die Art und Länge des Glimmlichts hängt von der Spannung ab und die Helligkeit des Glühfadens ist von der elektrischen Leistung abhängig.
- Chemische Wirkung: Die Menge der Gasentwicklung ist von der elektrischen Arbeit abhängig.

Alle Messgeräte dieser Art gehen auf die physikalische Tatsache zurück, dass ein elektrischer Strom ein Magnetfeld hervorruft, welches von der Stromstärke abhängig ist. Schickt man den zu messenden Strom durch eine Spule, dann wird ein Weicheisenstück in Abhängigkeit von der Stromstärke mehr oder weniger tief in die Spule hineingezogen (Abb. 1.2a).

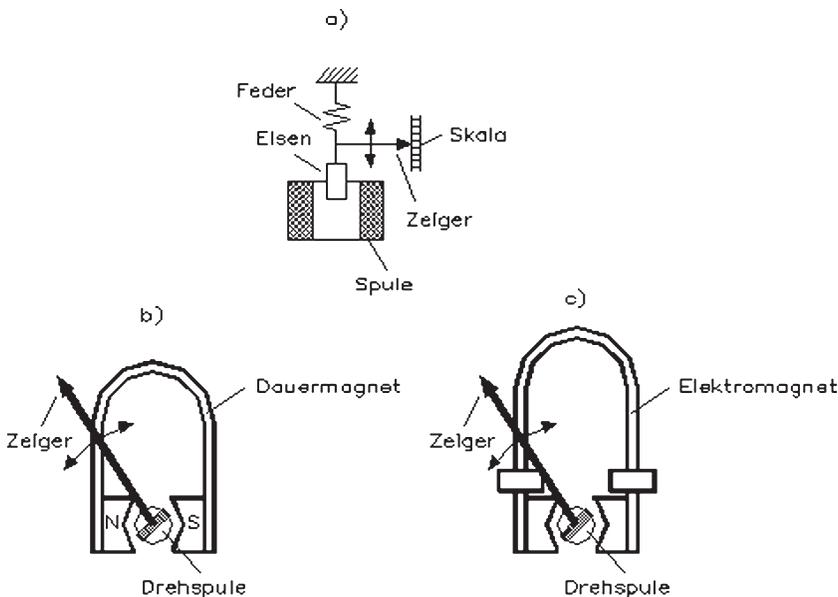
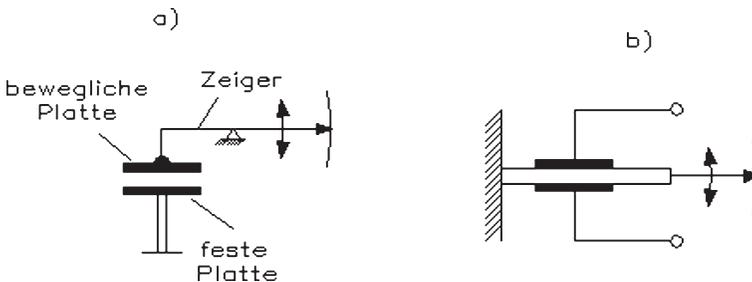


Abb. 1.2: Prinzip der magnetischen Wirkung

- Beim Dreheisen-Messwerk wird das Weicheisenstück in eine stromdurchflossene Spule hineingezogen.
- Beim Drehspul-Messwerk dreht sich die stromdurchflossene Spule im Feld eines Dauermagneten.
- Beim elektrodynamischen Messwerk dreht sich die stromdurchflossene Spule im Feld eines Elektromagneten.

Ist die stromdurchflossene Spule drehbar zwischen den Polen eines Dauermagneten gelagert, dann dreht sie sich gegen eine Spannfeder, je nach der Stromstärke (*Abb. 1.2b*). Die Abhängigkeit von zwei Strömen kann gemessen werden, wenn die Drehspule sich im Feld eines Elektromagneten bewegt (*Abb. 1.2c*). Spannungsmessungen werden ebenfalls meistens auf derartige Strommessungen zurückgeführt.

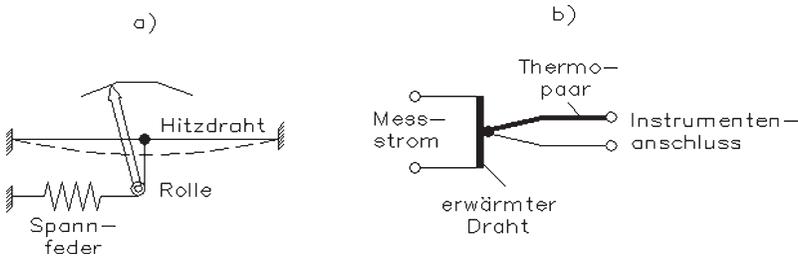
Reine Spannungsmessung ist mit elektrostatischen Verfahren möglich, bei denen sich zwei gleichnamig aufgeladene Platten abstoßen (*Abb. 1.3a*). Hierbei fließt, im Gegensatz zu den magnetischen Verfahren, kein Strom, die Messung wird also leistungslos durchgeführt. Ebenso kann eine mechanische Wirkung unmittelbar durch eine elektrische Spannung hervorgerufen werden, wenn man die Messspannung an ein besonderes Kristallplättchen, einem Piezo-Kristall, anlegt, der sich dann unter Einfluss der Spannung mechanisch verbiegt (*Abb. 1.3b*).



**Abb. 1.3:** Prinzip der mechanischen Wirkung

- Beim elektrostatischen Messwerk stoßen sich gleichnamig elektrisch geladene Körper ab.
- Ein Piezo-Kristall verformt sich, wenn Spannung angelegt wird.

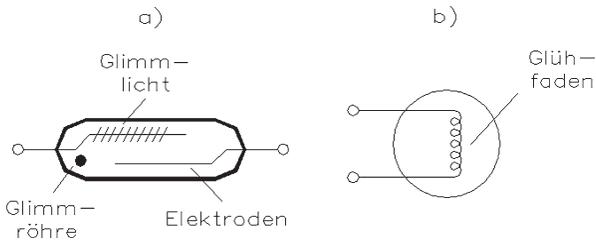
Durch den Stromfluss in einem elektrischen Leiter entsteht Wärme, die wiederum als ein Maß für die Stärke des Stroms verwendet werden kann. Entweder misst man die Längenausdehnung eines Drahts bei der Erwärmung infolge des durchfließenden Stroms (*Abb. 1.4a*), oder man misst die Durchbiegung eines Bimetallstreifens. Weiterhin kann die Erwärmung durch ein Thermoelement bestimmt werden (*Abb. 1.4b*). Der Messstrom wird durch einen Widerstandsdraht geleitet. Ein Thermoelement berührt den Draht oder sitzt ganz dicht daran. Die Thermospannung ist ein Maß für die Temperatur und damit für die Stromstärke.



**Abb. 1.4:** Prinzip der Wärmewirkung

- Beim Hitzdraht-Messwerk erwärmt der Strom den Hitzdraht und die Längenausdehnung bewirkt einen Zeigerausschlag.
- Beim Bimetall-Messwerk erwärmt der Strom den Draht und dieser wird mittels Thermoelement gemessen.

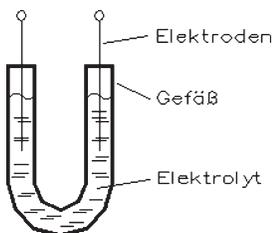
Lichtwirkung (*Abb. 1.5*) nutzt man bei manchen Messverfahren durch Feststellung der Länge einer Glimmentladung oder durch Messung der Helligkeit einer Glühlampe, beides als Maß für die angelegte Spannung oder den durchfließenden Strom.



**Abb. 1.5:** Prinzip der Lichtwirkung

- Bei der Gasentladung sind Art und Länge des Glimmlichts spannungsabhängig.
- Die Helligkeit des Glühfadens ist von der elektrischen Leistung abhängig.

Chemische Wirkungen werden genutzt durch Messung der Ausscheidung von Gasen oder Abscheidung von Metallen oder Salzen bei der Elektrolyse (*Abb. 1.6*).



**Abb. 1.6:** Bei der Elektrolyse ist die Menge der Gasentwicklung von der elektrischen Arbeit abhängig

In manchen Fällen erscheint das Messverfahren grundsätzlich umständlich und kompliziert, ist aber in der Praxis oft das einfachste Prinzip. Es ist vergleichbar mit der Energieumwandlung. So wird beispielsweise die chemische Energie der Kohle erst zur Verdampfung von Wasser verwendet, dann wird die Dampfturbine betrieben, dann in einem Generator mithilfe von magnetischen Feldern ein elektrischer Strom erzeugt. Trotzdem ist dies das wirtschaftlichere Verfahren gegenüber der unmittelbaren Umwandlung chemischer Energie in elektrischen Strom in einer Taschenlampenbatterie. Ähnlich verhält sich die Messtechnik. Das anscheinend einfachste Verfahren der unmittelbaren Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Bewegung im Piezo-Kristall wird nur äußerst selten angewendet, dagegen der Umweg über die magnetischen Verfahren am häufigsten. Welche Methode am besten geeignet ist, kann nur von Fall zu Fall entschieden werden. Hohe Anforderungen an die Genauigkeit oder geringe zur Verfügung stehende Energie können besondere, außergewöhnliche Messverfahren erforderlich machen.

Ein Messwert muss erkennbar werden, entweder angezeigt auf einer Skala oder aufgezeichnet auf einem Registrierstreifen oder auch unmittelbar in Ziffern ablesbar. Den größten Anteil aller elektrischen Messgeräte nehmen immer noch die Zeigergeräte ein, obwohl die elektronischen Messinstrumente zahlreiche Vorteile aufweisen.

Im Laufe der Zeit haben sich unterschiedliche Formen entwickelt, die den verschiedensten Bedürfnissen angepasst wurden. Diese Formen waren zum Teil bedingt durch das physikalische Verfahren, zum Teil durch den Aufstellungsort der Messgeräte, ob fest montiert in einer Schalttafel oder als transportables Tischgerät ausgeführt. Sie sind zum Teil auch bedingt durch den Preis des Geräts, da eine Verbesserung der Anzeige oft eine erhebliche Verteuerung mit sich bringt.

Bei den Messgeräten mit mechanischem Zeiger herrscht der Kreisbogenzeiger vor. In erster Linie ist das bedingt durch die Bauart des Messgeräts, da zum Beispiel bei den viel verwendeten Drehspulgeräten dies die einfachste Konstruktion ist. Die drehbare Spule ist unmittelbar mit dem mechanischen Zeiger zu einer Einheit verbunden. Fordert man in Sonderfällen eine gerade und ebene Skala, dann kann man durch Umlenkung oder Seilführung diese Forderung erfüllen. Wenn die Stirnfläche möglichst geringen Raum einnehmen soll, kann sich der Zeiger in einem Zylinderausschnitt drehen und das Gerät flach hinter der Schalttafel angeordnet werden.

Zur Bewegung eines mechanischen Zeigers benötigt man eine bestimmte Energie, die nicht in allen messtechnischen Fällen zur Verfügung steht.

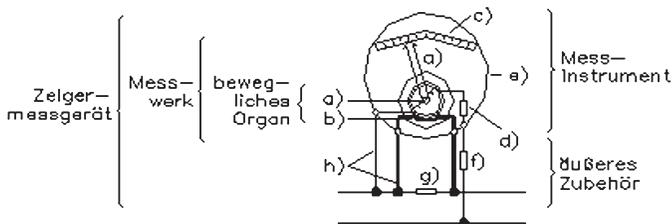
Eine fast trägheitslose Anzeige erhält man bei einem Oszilloskop oder bei den elektronischen Messgeräten. In der Elektronenstrahlröhre wird der Strahl magnetisch oder elektrisch abgelenkt. Mechanisch bewegte Teile existieren überhaupt nicht. Hier kann man sehr rasche Bewegungen ausführen lassen und das Messgerät als Schreiber für sehr schnell ablaufende Vorgänge oder Schwingungen benutzen. Für einfache Messungen ist das Verfahren zu teuer, für Laborzwecke dagegen heute allgemein in Benutzung.

Bei Registriergeräten ist die mechanische Aufzeichnung die einfachste. Der Energiebedarf (Eigenverbrauch) ist noch höher als bei dem mechanischen Zeigergerät. Der Schreibstift muss den Reibungswiderstand auf dem ablaufenden Papierstreifen überwinden können. Geringer Energiebedarf und die Möglichkeit zur Aufzeichnung rasch ablaufender Vorgänge ist kennzeichnend für die fotografisch registrierenden Lichtschreiber-Geräte.

### 1.1.1 Messwerk, Messinstrument und Messgerät

Um Verwechslungen und Irrtümer zu vermeiden, sollten nur genormte Bezeichnungen verwendet werden. Die Normen unterscheiden die drei wichtigen Begriffe Messwerk, Messinstrument und Messgerät. Zum Messwerk gehören nur das bewegliche Organ mit dem Zeiger, die Skala und weitere Teile, die für die Funktion ausschlaggebend sind, wie z. B. eine feste Spule oder der Dauermagnet. Durch eingebaute Vorwiderstände, Umschalter, Gleichrichter und das Gehäuse wird das Messwerk zum Messinstrument ergänzt. Das Messwerk allein ist also zwar funktionsfähig, aber nicht unmittelbar verwendbar, das Messinstrument dagegen kann in dieser Form schon endgültig benutzt werden, z. B. bei Tischgeräten. Kommen noch äußere Zubehörteile hinzu, wie etwa Messleitungen oder getrennte Vor- und Nebenwiderstände, getrennte Gleichrichter und andere, dann ist ein vollständiges Messgerät zusammengestellt. *Abb. 1.7* zeigt Teile und Zubehör elektrischer Messgeräte. *Tabelle 1.1* beinhaltet die Benennung der Messgeräte.

Telle und Zubehör elektrischer Zeigermessgeräte (nach VDE 0410):



a) bewegliches Organ mit Zeiger (z.B. mit Drehspule im Spannungspfad)

b) feste Spule (im Strompfad)

c) Skala

a + b + c = Messwerk

d) eingebautes Zubehör; z.B. Vorwiderstand im Spannungspfad

e) Gehäuse

a + b + c + d + e = Messinstrument

f) getrennter Vorwiderstand

g) getrennter Nebenwiderstand (Shunt)

h) Messleitungen

f + g + h = äußeres Zubehör

Messinstrument + äußeres Zubehör = a ... h = Zeigermessgerät

**Abb. 1.7:** Teile und Zubehör elektrischer Messgeräte

**Tabelle 1.1:** Benennung der Messgeräte

a) Nach Art des Messwerks:	
	Kennzeichnung
1. Drehspulinstrumente	Feststehender Dauermagnet, bewegliche Spulen
2. Drehmagnetinstrumente	Beweglicher Dauermagnet, feststehende Spulen
3. Dreheiseninstrumente	Bewegliche Eisenteile, feststehende Spulen
4. Eisennadelinstrumente	Bewegliche Eisenteile, fester Dauermagnet; feste Spule
5. Elektrodynamische Instrumente	Feststehende Stromspulen, bewegliche Messspulen
6. Elektrostatische Instrumente	Feststehende Platten, bewegliche Platten
7. Induktionsinstrumente	Feststehende Stromspulen, bewegliche Leiter (Scheiben)
8. Hitzdrahtinstrumente	Vom Stromdurchgang erwärmter Draht
9. Bimetallinstrumente	Vom Stromdurchgang erwärmter Draht
10. Vibrationsinstrumente	Schwingfähige bewegliche Organe
b) Nach Art der Messumformer	
1. Thermoumformer-Messgeräte	Thermopaar liefert Messspannung
2. Gleichrichter-Messgeräte	Gleichrichter formt Wechselstrom in Gleichstrom um
c) Nach Art von Sondermaßnahmen	
1. Quotientenmesser	Das Verhältnis elektrischer Größen wird gemessen
2. Summen- oder Differenzmesser	Mit zwei Wicklungen werden Ströme summiert
3. Astatiche Instrumente	Paarweise gekoppelte Messwerke mit entgegengerichteten Feldern
4. Eisengeschirmte Instrumente	Eisenabschirmung gegen Fremdfelder

Auch die Benennung der Messgeräte-Arten ist in den Normen festgelegt und soll der Beschreibung entsprechend verwendet werden. In erster Linie unterscheidet man die Geräte nach dem physikalischen Vorgang der Messung (*Tabelle 1.1*). Die Messwerke sind danach in zehn Gruppen eingeteilt. Die Reihenfolge und Einteilung ist kein Werturteil und gibt keine Auskunft über die Zweckmäßigkeit des Einsatzes. Sie besagt lediglich etwas über die grundsätzlichen Eigenschaften und damit über die

Verwendungsmöglichkeit. So kann beispielsweise ein Drehspulinstrument mit einem feststehenden Dauermagneten und einer beweglichen Spule nur für Messungen von Gleichströmen geeignet sein. Das Gleiche gilt bei der Umkehrung, dem Drehmagnetinstrument, bei der die stromdurchflossene Spule fest steht und ein Dauermagnet beweglich angeordnet ist. Dreheiseninstrumente wurden früher oft als Weicheiseninstrumente bezeichnet. Das ist inzwischen überholt, da heute das bewegliche Eisenteil stets drehbar gelagert ist. Die Eisennadelinstrumente unterscheiden sich von den Dreheiseninstrumenten durch den zusätzlich vorhandenen Dauermagneten, dessen Wirkung durch den Stromfluss in der Spule verstärkt oder geschwächt wird. Elektrodynamische Instrumente haben eine feststehende und eine bewegliche Spule und können damit das Produkt zweier Ströme anzeigen. Auch Instrumente mit mehreren Spulen im beweglichen Organ oder festen Teil tragen die gleiche Bezeichnung. Elektrostatische Instrumente bestehen aus festen und beweglichen Platten. Induktionsinstrumente arbeiten mit Strömen, die in beweglichen Leitern oder Metallscheiben induziert werden. Hitzdrahtinstrumente messen die Längenausdehnung eines vom Stromfluss erwärmten Drahts und Bimetallinstrumente die Bewegung des erwärmten Bimetallorgans. Die Vibrationsinstrumente schließlich besitzen mechanisch schwingfähige Teile, Zungen oder Platten, die in Resonanz kommen können.

Eine weitere Unterteilung wird nach Art der Zusatzgeräte zur Messwertumformung vorgenommen. Die Umformung ist häufig dann erforderlich, wenn Wechselströme mit Messwerken gemessen werden sollen, die ihrer Eigenschaft nach nur für Gleichströme geeignet sind. Schließlich kann man noch nach Sondermaßnahmen unterteilen. Durch Anbringung mehrerer Spulen im beweglichen Organ oder festen Teil ist die Bildung von Quotientenwerten möglich. Ebenso kann man eine Summen- oder Differenzbildung aus zwei Messwerten erreichen.

Bei Messverfahren der magnetischen Gruppe haben magnetische Fremdfelder einen starken verfälschenden Einfluss. Als Gegenmaßnahme kann man im astatischen Instrument zwei Messwerke paarweise koppeln, sodass die Fremdeinflüsse sich aufheben. Auch durch magnetische Abschirmung kann ein Fremdfeldeinfluss ausgeschaltet werden.

### 1.1.2 Beschriftung der Messgeräte

Für die Beschriftung von elektrischen Messgeräten sind ebenfalls VDE-Normen aufgestellt. Alle in Deutschland für den Inlandsbedarf hergestellten Messgeräte müssen diese Regeln befolgen. Auch bei Auslandslieferungen wird nur auf besondere Anforderung davon abgewichen. Für die Einheiten auf Messinstrumentenskalen sind Beispiele von Kurzzeichen angeführt (*Tabelle 1.2*). Diese umfassen nicht nur die Grundeinheiten, sondern auch die Teile und Vielfache davon, also zum Beispiel nicht nur A für die Einheit des Stroms in Ampere, sondern auch bei Bedarf mA für Milliampere,  $\mu\text{A}$  für Mikroampere oder selbst kA für Kiloampere. Bei elektrischer Messung nicht elektrischer Größen können die Anzeigergeräte auch mit diesen Einheiten unmittel-

telbar beschriftet werden, wie zum Beispiel für Temperaturanzeige in °C, Weglängen in mm oder Prozentanteile von Gasmischungen in % CO<sub>2</sub> oder % O<sub>2</sub>.

**Tabelle 1.2:** Kurzzeichen für Einheiten auf Messinstrumentenskalen

kA	Kiloampere	MW	Megawatt	MHz	Megahertz	cos φ	Leistungsfaktor
A	Ampere	kW	Kilowatt	kHz	Kilohertz	Ah	Amperestunden
mA	Milliampere	W	Watt	Hz	Hertz	kWh	Kilowattstunden
μA	Mikroampere	mW	Milliwatt	MΩ	Megaohm	Wh	Wattstunden
kV	Kilovolt	kvar	Kilovar	kΩ	Kilohm	Ws	Wattsekunden
V	Volt	var	var	Ω	Ohm		
mV	Millivolt	(var ≙ Volt-Ampere-reaktiv)					
μV	Mikrovolt						

Zur schnellen Orientierung über die Daten und Eigenschaften eines vorhandenen Messinstrumentes werden Kurzzeichen und Sinnbilder auf den Skalen eingetragen. Diese Sinnbilder dürfen nicht als Schaltbilder in Schaltungen und Stromlaufplänen verwendet werden. Die Sinnbilder sind meistens in einer Gruppe auf der Skala zusammengefasst und müssen beim Umgang mit Messgeräten vertraut und geläufig sein.

Die erste Gruppe gibt die Stromart an, für die das Messgerät verwendbar ist (*Abb. 1.8*). Unterschieden wird für reinen Gleichstrombetrieb (DC = Direct Current), für reinen Wechselstrombetrieb (AC = Alternating Current) und verwendbar für Gleich- und Wechselstrom (AC/DC). Bei Drehstrom wird durch Fettdruck gekennzeichnet, ob ein, zwei oder drei Messwerke in dem Messgerät eingebaut sind, die dann auf einem einzigen Zeiger mit einer Skala arbeiten.

Die Prüfspannung gibt an, wie der Aufbau, der Klemmenabstand und die Isolation geprüft sind. Meistens beträgt die Prüfspannung 2 kV, bei einfacheren Messgeräten vor allem auch in der Nachrichtentechnik 500 V. In diesem Falle enthält der Prüfspannungstern keine Zahlenangabe.

Die vorgeschriebene Gebrauchslage muss unbedingt eingehalten werden, da andernfalls die Anzeigenauigkeit leidet. Gewöhnlich wird nur angegeben, ob für senkrechten Einbau in einer Schalttafel oder waagerechten Gebrauch, bei Tischgeräten, geeignet. In Sonderfällen kann bei Präzisionsinstrumenten auch noch eine Einschränkung über die zulässige Abweichung gemacht werden.

<p><b>Skalenaufbilder</b></p> <p>— Für Gleichstrom (DC)</p> <p>~ Für Gleich- und Wechselstrom</p> <p>~ Für Wechselstrom (AC)</p> <p>~ Für Drehstrom mit einem Messwerk</p> <p>~ Für Drehstrom mit zwei Messwerken</p> <p>~ Für Drehstrom mit drei Messwerken</p> <p>1,5 Klassenzeichen, bezogen auf Messbereich-Endwert</p> <p>↙↘ Klassenzeichen, bezogen auf Skalenlänge bzw. Schreibbreite</p> <p>⊖ Klassenzeichen, bezogen auf richtigen Wert</p> <p>⊥ Senkrechte Nennlage</p> <p>□ Waagerechte Nennlage</p> <p>↙ Schräge Nennlage, (mit Neigungswinkelangabe)</p> <p>☆ Prüfspannung</p> <p>⏏ Hinweis auf getrennten Nebenwiderstand</p> <p>⏏ Hinweis auf getrennten Vorwiderstand</p> <p>○ Magnetischer Schirm (Eisenschirm)</p> <p>◇ Elektrostatischer Schirm</p> <p>⚡ Astatisches Messwerk</p> <p>⚠ Achtung (Gebrauchsanleitung beachten)!</p>	<p>⊖ Drehspulmesswerk</p> <p>⊖ } als Gleichrichter Zusatz zu Thermoumformer</p> <p>⊖ } isolierter Thermoumformer</p> <p>⊖ Drehspul-Quotientenmesswerk</p> <p>⊖ Drehmagnetmesswerk</p> <p>⊖ Drehmagnet-Quotientenmesswerk</p> <p>⊖ Drehleertmesswerk</p> <p>⊖ Drehleert-Quotientenmesswerk</p> <p>⊖ Elektrodynamisches Messwerk (eisenlos)</p> <p>⊖ Elektrodynamisches Quotientenmesswerk (eisenlos)</p> <p>⊖ Elektrodynamisches Messwerk (eisengeschlossen)</p> <p>⊖ Elektrodynamisches Quotientenmesswerk (eisengeschlossen)</p> <p>⊖ Induktionsmesswerk</p> <p>⊖ Induktions-Quotientenmesswerk</p> <p>⊖ Hitzdrahtmesswerk</p> <p>⊖ Bismallemesswerk</p> <p>⊖ Elektrostatisches Messwerk</p> <p>⊖ Vibrationsmesswerk</p> <p>⊖ Mit eingebautem Verstärker</p>
<p>Bei Messgeräten mit mehreren Messpfaden müssen die einzelnen Messpfade gegeneinander und gegen Erde geprüft werden. Die Größe der Prüfspannung ist abhängig von der Größe der Nennspannung des Messgerätes.</p> <p>Nennspannung bis 40V, Prüfspannung 500V; Stern, ohne Zahl</p> <p>Nennspannung 40V bis 850V, Prüfspannung 2kV; Stern, Zahl=2</p> <p>Nennspannung 850V bis 1000V, Prüfspannung 3kV; Stern, Zahl=3</p>	

Abb. 1.8: Sinnbilder für elektrische Messgeräte

Die Genauigkeitsklasse besteht aus einer Zahlenangabe, die zwischen 0,1 und 5 liegt. In der Regel wird auf den Skalenendwert bezogen. *Tabelle 1.3* zeigt die Messgeräteklassen.

Tabelle 1.3: Messgeräteklassen

	Feinmessgeräte			Betriebsmessgeräte			
Klasse	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2,5	5
Anzeigefehler $\pm$ %	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2,5	5

Die größte Gruppe der Sinnbilder gibt Daten über die Messgeräte-Arbeitsweise und das Zubehör. Die Sinnbilder sind leicht zu merken, da sie den Aufbau vereinfacht kennzeichnen. Die Hauptgruppen sind weiter unterteilt als in der Tabelle der Benennung. So gibt es getrennte Sinnbilder für einfache Drehspulmesswerke mit einer Drehspule und Drehspulmesswerke mit gekreuzten Spulen zur Messung von Verhältniswerten (Quotienten).

Die Angaben über Zubehör umfassen die Messumformer und die getrennten, zum Messgerät gehörenden Vor- und Nebenwiderstände. Elektrostatische oder magnetische Abschirmung wird angegeben, damit man den Einsatz richtig beurteilen kann. In manchen Fällen ist ein Schutzleiteranschluss vorgesehen und besonders gekennzeichnet. Ebenso ist die Nullstellung für die mechanische Einstellung des Zeigers auf die Nullmarke der Skala gekennzeichnet.

In besonderen Fällen wird auf die Gebrauchsanweisung verwiesen. Bei besonderen Einbauvorschriften werden diese angegeben, zum Beispiel durch die Vorschrift, das Messgerät in eine Eisentafel bestimmter oder beliebiger Dicke einzubauen. Messgeräte, die Erschütterungen ausgesetzt werden, sind einer Schüttelprüfung unterzogen worden.

Messinstrumente werden durch einen Kreis, Messwerke durch einen kleineren Kreis dargestellt. In den Kreis des Messinstruments wird die Einheit eingetragen oder das Kurzzeichen für die Messgröße oder ein Zeiger. Bei den Messwerken kann bei Bedarf zwischen Strom- und Spannungspfad durch eine dicke oder eine dünne Linie unterschieden werden. Zwei parallel gezeichnete Pfade bedeuten Summe- oder Differenzbildung, zwei senkrecht gekreuzte Pfade geben an, dass dieses Messwerk das Produkt aus zwei Messgrößen bildet. Schräg gekreuzte Pfade bedeuten Quotientenbildung.

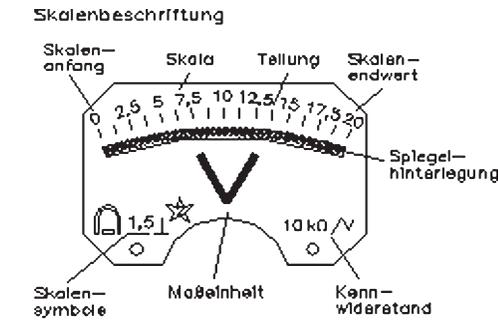
Die Art der Anzeige und der Registrierung sowie weitere Eigenschaften sind durch Kennzeichen anzugeben, so zum Beispiel auch die Stromart und die Schaltung. Diese Kennzeichen dürfen nur in Verbindung mit Schaltzeichen verwendet werden. *Abb. 1.9* zeigt ein Beispiel für eine Skalenbeschriftung.

Bei Zusatzgeräten sind die Messwandler wichtig. Sie sind dem allgemeinen Schaltzeichen für Transformatoren entsprechend darzustellen, bekommen aber vereinheitlichte Buchstaben für die Anschlüsse. Großbuchstaben kennzeichnen die Primärseite, Kleinbuchstaben die Sekundärseite. Die Buchstaben K und L sind für Stromwandler, die Buchstaben U und V für Spannungswandler vorgeschrieben.

Vor- und Nebenwiderstände werden wie gewöhnliche ohmsche Widerstände dargestellt. In Sonderfällen, wenn es sich um rein ohmsche Widerstände mit der Phasenverschiebung  $0^\circ$  handelt, kann dies mit dem Zusatz  $0^\circ$  angegeben werden. Bei reinen Blindwiderständen kann entsprechend  $90^\circ$  an das Schaltzeichen geschrieben werden.

Einige weitere Schaltzeichen müssen häufig in Verbindung mit Messgeräten verwendet werden. Hierzu gehören die Messgleichrichter oder als Messwertumformer der Hallgenerator, der Thermoumformer und temperatur- und beleuchtungsabhängige Widerstände oder Halbleiter.

Für vollständige Messanlagen benötigt man die allgemein verwendeten Schaltzeichen, zum Beispiel für Sicherungen, Relais, Leuchtmelder oder Schauzeichen. Bei den elektronischen Messgeräten kommen außerdem noch viele Schaltzeichen der Nachrichtentechnik, Röhren- und Halbleitertechnik hinzu. Dies gilt insbesondere für digitale Multimeter und Katodenstrahl-Oszilloskope.



Skalenbeschriftung enthält

Sinnbilder für:	und Angaben über:
Stromart	Messgerätekategorie
Messwerk	Innenwiderstand
Gebrauchsalage	Einheit der Messgröße
Prüfspannung	Ursprung

Messgeräteklassen

	Feinmess- geräte	Betriebs- messgeräte
Klasse	0,1 0,2 0,5	1 1,5 2,5 5
Anzeige- fehler $\pm\%$	0,1 0,2 0,5	1 1,5 2,5 5

Die Zahlenwerte geben den maximal zulässigen Fehler eines Zeigermessgerätes bezogen auf den Skalenendwert an.

Abb. 1.9: Skalenbeschriftung für ein Zeigermessgerät

Meldegeräte sind in vielen Fällen Messgeräte, bei denen ein Höchstwert oder ein Sollwert gemeldet wird. Man verwendet ein Quadrat, wie bei den registrierenden Messgeräten, und zeichnet die betreffende Ausführung ein. Beim Temperatur-Höchstwert-Melder deutet das Schaltzeichen ein Thermometer an, beim Thermoelement die Lötstelle und beim Lichtmelder den eingebauten Fotowiderstand.

### 1.1.3 Messinstrumentengehäuse

Die äußere Form eines Messinstruments wird durch das Gehäuse bestimmt. Grundsätzlich ist es möglich, fast jedes beliebige Messwerk in jede beliebige Gehäuseform einzubauen. Mit dem Größenverhältnis ist man natürlich begrenzt, da es nicht möglich ist, ein Messwerk für wenige Mikroampere in ein Großgehäuse zu setzen, da dann der Eigenbedarf für die Bewegung des großen Zeigers zu hoch wird. Der Eigenbedarf soll immer nur einen vernachlässigbar kleinen Anteil des Messwerts ausmachen. Grundsätzlich kann man sagen, dass bei Schalttafelgeräten der Eigenbedarf höher ist als bei Tischgeräten.

Bei Schalttafelinstrumenten ist die Normung wichtiger als bei Tischinstrumenten und daher auch wesentlich ausführlicher festgelegt, da die Gesamtanordnung auf der

# Sachverzeichnis

## A

Ablenkoeffizient 140  
Abschwächer 164  
Abtastintervall 180, 181  
Abtastrate 181, 191  
Abtasttakt 176  
AC-DC-Wandler 249  
Aderbruch 117  
Aderschluss 117  
Akquisitionsspeicher 207  
Aliasing 184  
AM-Verfahren 391  
Analogschalter 257  
Analysator 231  
Anstiegszeit 166  
Äquivalenzzeitabtastung 185  
ARB-Generator 212  
Aron-Schaltung 106  
Astabile Funktion 307  
Astatisches Messsystem 61  
Ausgleichswiderstand 79  
Autoset-Funktion 184  
Auto-Zero-Phase 277

## B

Bandbreite 147, 149, 166  
BCD-Code 256  
BCD-Schalter 300  
Bereichsumschalter 79  
Beschriftung 18  
Betriebsmessgerät 36  
Bifilar 76  
Binärcode 256  
Blindleistung 107  
Blindleistungsmesser 101  
Blindwiderstand 94  
Brückenschaltung 88

## C

Chopperbetrieb 151  
Crest-Faktor 227  
Cursor 217

## D

Dämpfung 29  
Darstellungsrage 191  
Decodierlogik 256  
Deintegration 234  
Digitale Filterung 208  
Digitalmultimeter 225  
Digitalvoltmeter 262  
Doppelbrücke 90  
Dot-Modus 203  
Dreheisen-Messwerk 13, 50  
Drehmagnet-Messwerk 52  
Drehmagnet-Quotienten-  
messwerk 54  
Drehmoment 27  
Drehspule 13  
Drehspul-Galvanometer 57  
Drehspul-Messwerk 13, 54  
Drehspul-Quotientenmess-  
werk 59  
Drehzahlmesser 304  
Dreieckfunktion 392  
Dreieckschwingung 379  
Dreileiternetz 105

## E

Echtzeit 130  
Eigenverbrauch 34, 48  
Einschwingvorgang 191  
Eisennadel-Galvanometer 52  
Eisennadel-Messwerk 52  
Elektrizitätszähler 72, 111  
Elektrodynamisches Mess-  
werk 13, 60  
Elektrodynamisches Quoti-  
enten-Messwerk 63  
Elektroskop 65  
Elektrostatisches Messwerk  
65  
Erdschluss 117  
Ereignisse 345

Ereigniszähler 302  
Ereigniszählung 320  
Externe Triggerung 143

## F

Fast-Fourier-Transformation  
209  
Fehlercharakteristik 42  
Fehlerfortpflanzung 45  
Fehlerkorrektur 37  
Fehlerkurve 36  
Fehlerort 116  
FFT-Spektrum 209  
Flüssigkristallanzeige 273  
Frequenz 345  
Frequenzjitter 283  
Frequenzmesser 64  
Frequenzmessgerät 314  
Frequenzmessung 71, 320,  
355  
Frequenzmodulation 363  
Frequenznormal 314  
Frequenzumtastung 393  
Frequenzverhältnis 345  
Frequenzverhältnismessung  
320  
Frequenzzähler 320, 333,  
355  
FSK-Eingang 393  
Fünfleiternetz 105  
Funktionsgenerator 363,  
379, 385, 391

## G

Galvanometer 57  
Gebrauchslage 19  
Geistersignal 184  
Genauigkeitsklasse 37  
Gesamttemperaturbeiwert 84  
Ghosting-Effekt 326, 352

- Gitterraster 156  
 Gleichtaktspannungsbereich 293  
 Glitch 194, 199, 202  
 Glockenkurve 41  
 Gütefaktor 48
- H**
- HF-Oszilloskop 148  
 HF-Tastkopf 154  
 HF-Wobbler 387  
 Hitzdraht-Messwerk 70, 71  
 Hüllkurven-Modus 207  
 Hystereseband 202
- I**
- IC-Zeitgeber 305  
 Induktionsmotor-Zähler 73  
 Induktivitätsmessungen 94  
 Integrationskondensator 282  
 Integrationswiderstand 282  
 Intensity 159  
 Interferenz 165  
 Interne Triggerung 143  
 Isolationsmessung 114
- J**
- Johnson-Zähler-Code 358  
 Justierung 37
- K**
- Kalibrieren 227  
 Kapazitätsmessbrücke 97  
 Kapazitätsmessung 65, 93  
 Kapazitätsvergleich 93  
 Kaskadierung 298  
 Katodenstrahloszilloskop 132  
 Kennwiderstand 48, 82  
 Kernmagnet-Messwerk 60  
 Kirchhoffsche Regeln 80  
 Klärpunkt 229  
 Kompensationsmessung 91  
 Kreisbogenzeiger 15  
 Kreuzfeld-Messwerk 63  
 Kreuzspul-Messwerk 59
- Kurbelinduktor-Isolationsmessgerät 114  
 Kurzzeichen 19
- L**
- Ladungsüberkopplungen 242  
 Lagefehler 32  
 Latch up 273, 314  
 LCD 225  
 Leistungsfaktormesser 65, 110  
 Leistungsmesser 102  
 Lichtzeiger-Galvanometer 58  
 Lissajous-Figur 146  
 Luftkammerdämpfung 32  
 Luftspalt 56
- M**
- Maxwell-Brücke 98, 100  
 Maxwell-Wien-Brücke 99  
 Messbereichserweiterung 74, 77, 82  
 Messdrehmoment 55  
 Messgerät 16  
 Messinstrument 16  
 Messumformer 21  
 Messwandler 21  
 Messwerk 16  
 Messwiderstand 75  
 Mittelwertbildung 207  
 Modulationssignal 368  
 Multifunktions-Stromzähler 126  
 Multifunktionszähler 320  
 Multiplexbetrieb 297  
 Multiplizierer 392
- N**
- Nachjustierung 36  
 Nebenwiderstand 75, 78, 80  
 NF-Oszilloskop 148  
 NF-Wobbler 387  
 Nominalfrequenz 382  
 Normalelement 92
- Normalverteilung 41  
 Normalwiderstand 87  
 Nullabgleich 234, 277, 292  
 Nulldurchgangsflipflop 284  
 Nullunterdrückung 299  
 N-Zyklus-Triggerung 201
- O**
- Offset 241  
 Ohmwandler 249, 252  
 Oktalcode 256  
 Oszillatorfrequenz 239  
 Oszillator-Zeitgeber 310  
 Oszilloskop 130
- P**
- Parallaxenfehler 30, 44  
 Periodendauer 345  
 Periodendauermessgerät 315  
 Periodendauermessung 320, 355  
 Phasendetektor 389  
 PLL 393  
 Polarisator 231  
 Polarisierer 273  
 Polschuhform 56  
 Post-Trigger 175, 186, 194  
 Präzisions-Funktionsgenerator 379  
 Präzisionszähler 314  
 Pre-Trigger 163, 175, 194  
 Prüfling 36  
 Prüfprotokoll 37  
 Prüfspannung 19  
 Pufferverstärker 282
- Q**
- Quarzfrequenz 314  
 Quellenleistung 102
- R**
- Random-Sampling 187  
 Rasterlinie 221  
 Ratiometrische Fehler 282  
 Rauschpegel 165  
 Rechteckschwingung 379

- Referenz-Integration 234  
 Referenzoszillator 321  
 Resonanz-Messmethode 94  
 Resonanzverfahren 96  
 Rogowskispulen 124  
 Rollmodus 197  
 Roll-Over-Fehler 235  
 Rückdrehmoment 27  
 Rücklaufunterdrückung 142  
 Rückstellmoment 55  
 Rückwärtsbetrieb 298  
 Runt-Trigger 203
- S**
- Sägezahnspannung 142  
 Sample&Hold 177  
 Samplingoszilloskop 148  
 Scheinleistung 95, 100, 108  
 Schering-Brücke 99  
 Schmelzpunkt 229  
 Schmitt-Trigger 327  
 Schutzring-Elektrometer 66  
 Schwellwertschalter 327  
 Schwellwerttriggerung 145  
 Selbsttriggerung 144  
 Shannonsches Abtasttheorem 181  
 S&H-Einheit 177  
 Shunt 124  
 Signalintegration 293  
 Signal-Integration 234  
 Single-Shot-Signal 188  
 Sinnbilder 19  
 Sinus-Interpolation 183, 203  
 Sinuskonverter 391  
 Sinusschwingung 379  
 Skala 24  
 Skalenbeschriftung 21  
 Skalenverlauf 50, 56  
 Skalierungsfaktor 240  
 Softkeys 192  
 Spannbandlagerung 31  
 Spannungspfad 38, 62  
 Spannungsvergleich 93  
 Speicheroszilloskop 130, 176  
 Spitzenlagerung 31  
 Spitzenwerterkennung 195  
 Standardabweichung 44  
 Stromartenumschalter 79  
 Strommesser 79  
 Strompfad 38, 62  
 Stufenabschwächer 146  
 Subharmonische 246
- T**
- Tachometer 304  
 Taktfrequenz 308  
 Tastkopf 153  
 Tastverhältnis 308  
 Temperaturdrift 307  
 Thermometer 265  
 Torsionsverdrehungsmoment 27  
 Transmissive Anzeige 231  
 Trigger 193  
 Triggerereignis 162  
 Triggerimpuls 141  
 Triggerpegel 215  
 Triggerquelle 171  
 Triggerung 200  
 Triplex-Anzeige 271  
 T-Spul-Messwerk 60  
 TV-Bild 173
- U**
- Universal-Messinstrument 76  
 Universalzähler 333, 345, 355  
 Unsicherheit 45
- V**
- Variable-Modus 221  
 VCO 391  
 VDE 0100 115  
 VDE 0410 32  
 VDE 0418 111  
 VDE-Norm 18  
 Verbraucherleistung 102  
 Verhältniswertmessgerät 69  
 Verzögerungsleitung 162  
 Vibrations-Messwerk 71  
 Vierleiternetz 105  
 Vorwärts zählen 298  
 Vorwiderstand 74
- W**
- Wahrscheinlichkeitsdichte 41  
 Wanderfeld-Messwerk 68, 73  
 Wattmeter 63, 104  
 Wattsekunde 111  
 Wechselstrom-Messbrücke 97  
 Wehnelt-Zylinder 134  
 Weicheisen-Messwerk 49  
 Weston-Normalelement 92  
 Wheatstone-Brücke 88  
 Wien-Brücke 98  
 Wien-Robinson-Brücke 98  
 Wirbelstromdämpfung 32  
 Wirkleistung 95, 101, 108  
 Wobbelhub 371  
 Wobbler 363
- X**
- X-Verstärker 140  
 X-Y-Modus 206
- Y**
- Y-Verstärker 140
- Z**
- Zeiger 29  
 Zeigerinstrument 11  
 Zeitablenkung 132  
 Zeitbasis 142, 162, 213  
 Zeitbasisdehnung 168, 198  
 Zeitbasisgenerator 140  
 Zeitbasisteiler 314  
 Zeitbasiszähler 321  
 Zeitgeber 305  
 Zeitintervall 345  
 Zeitintervallmessung 355  
 Zeitmessung 317  
 Z-Modulation 160  
 Zufälliger Fehler 42  
 Zweistrahloszilloskop 150

