



Elektronik in der Praxis

Die ELEKTRONIK der BAUELEMENTE und ihrer SCHALTUNGEN hat sich zu einer Elektronik spezialisierter SYSTEME und ihrer Anwendungen erweitert. So ist sie wichtiger Bestandteil aller Gebiete der Elektrotechnik wie: Kommunikationstechnik, Energietechnik, Meßtechnik, Automatisierungstechnik. Die vielfältige, schnell voranschreitende Technik der Bauelemente, Schaltungen und Systeme bietet dem Anwender immer neue Möglichkeiten. Sie zu nutzen wird nur jenen Fachleuten gelingen, die außer den Grundlagen ihres Faches stets die neue ELEKTRONIK IN DER PRAXIS beherrschen.

Unter diesem Leitgedanken führen unsere Autoren den Leser anschaulich und übersichtlich – wo möglich mit geringem mathematischen Aufwand – an die PRAXIS heran. Sie wollen es Fachleuten der Elektro- und Maschinentechnik, der Physik, Medizin und Verhaltensforschung wie dem Studenten ermöglichen, ELEKTRONIK IN DER PRAXIS kennenzulernen.

Formelsammlung für die elektronische Schaltungstechnik

von
Ulrich Dietmeier

10., korrigierte Auflage

Mit 314 Bildern und 26 Tabellen

Oldenbourg Verlag München Wien

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

© 2003 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH
Rosenheimer Straße 145, D-81671 München
Telefon: (089) 45051-0
www.oldenbourg-verlag.de

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Lektorat: Sabine Krüger
Herstellung: Rainer Hartl
Umschlagkonzeption: Kraxenberger Kommunikationshaus, München
Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier
Druck: R. Oldenbourg Graphische Betriebe Druckerei GmbH

ISBN 3-486-27358-2

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	14
1. Nützliche Rechenregeln	16
2. Zählpfeilsystem	16
2.1 Stromzählpfeil	16
2.2 Spannungszählpfeil	17
2.3 Masse-Nullpotential	17
2.4 Erzeuger – Verbraucher	17
3. Periodische Spannungen und Ströme	18
3.1 Sinusförmige Wechselspannung	18
3.2 Effektivwerte phasenangeschnittener sinusförmiger Wechselgrößen	19
3.3 Effektivwerte periodischer sinusförmiger Schwingungspakete	21
3.4 Zweiweg-Gleichrichtung	22
3.5 Einweg-Gleichrichtung	22
3.6 Dreieckschwingung	22
3.7 Sägezahnschwingung	23
3.8 Rechteck-Wechselspannungen, Pulse	23
3.9 Scheitelfaktor, Formfaktor, Welligkeit	24
3.10 Arithmetischer Mittelwert sinusförmiger Wechselspannungen	24
3.11 Bezeichnung der Impulszeiten	24
4. Grundgesetze der Elektrotechnik	26
4.1 Widerstände und deren Schaltungen	26
4.1.1 Ohm'sches Gesetz	26
4.1.2 Drahtwiderstand	26
4.1.3 Stromdichte	26
4.1.4 Widerstandsänderung bei Erwärmung	27
4.1.5 Reihenschaltung von Widerständen	27
4.1.6 Spannungsteiler	28
4.1.7 Parallelschaltung von Widerständen	28
4.1.8 Kirchhoff'sche Gesetze	28
4.1.9 Elektrische Leistung, Elektrische Arbeit	29
4.1.10 Wirkungsgrad	30
4.1.11 Belastete Spannungsquelle, Anpassung	30
4.2 Elektrisches Feld	31

4.2.1	Kapazität von Plattenkondensatoren	31
4.2.2	Ladung von Kondensatoren	31
4.2.3	Reihenschaltung von Kondensatoren	32
4.2.4	Parallelschaltung von Kondensatoren	32
4.2.5	Energie eines geladenen Kondensators	32
4.3	Magnetisches Feld	33
4.3.1	Induktionsgesetz	33
4.3.2	Induktivität von Spulen	33
4.3.3	Induktivität von Bauteilen	33
4.3.4	Selbstinduktionsspannung	35
4.3.5	Reihenschaltung von Spulen	35
4.3.6	Parallelschaltung von Spulen	36
4.3.7	Gegeninduktivität	36
4.3.8	Reihenschaltung magnetisch gekoppelter Spulen	36
4.3.9	Energie einer stromdurchflossenen Spule	36
4.3.10	Transformator, Übertrager	36
4.3.11	Spartransformator	37
4.4	Blindwiderstände	37
4.4.1	Kapazitiver Blindwiderstand	37
4.4.2	Induktiver Blindwiderstand	37
4.5	Analoge, passive Schaltungen	38
4.5.1	R und C an Wechselspannung	38
4.5.2	R und L an Wechselspannung	39
4.5.3	R, L und C an Wechselspannung	40
4.5.4	Komplexe Darstellung	41
4.5.5	Schwingkreise, Resonanzbedingungen	44
4.5.6	Reihenschwingkreis	45
4.5.7	Parallelschwingkreis	46
4.5.8	Schwingkreisabstimmung	47
4.5.9	Bandspreizung durch Serienkondensator	47
4.5.10	Bandspreizung durch Parallelkondensator	47
4.5.11	Bandfilter	48
4.5.12	Tiefpaßkettenschaltung	49
4.5.13	Hochpaßkettenschaltung	49
4.5.14	Doppel-T-Filter	50
4.5.15	Wien-Halb-Brücke	50
4.5.16	Wien-Robinson-Brücke	51
4.5.17	Klangeinsteller („Kuhschwanz“)	51
4.5.18	Phasenschieber-Brücke	52
4.5.19	RC-Tiefpaß	53
4.5.20	RC-Hochpaß	53
4.5.21	Reihenschaltung von n-Filtern	54
4.5.22	LC-Tiefpässe	54
4.5.23	LC-Hochpässe	55
4.5.24	LC-Bandpässe	56

4.5.25	LC-Bandsperren	57
4.5.26	Anpassungsglieder	58
4.5.27	Dämpfungsglieder	59
4.5.28	Dämpfung und Verstärkung	60
4.5.29	Pegel	61
4.5.30	Skineneffekt	62
4.5.31	Rauschen	63
4.5.32	Verstärkerrauschen	63
4.5.33	Fremdspannungsabstand	64
4.5.34	Klirrfaktor periodischer Vorgänge	64
4.5.35	Wellenwiderstand	65
4.5.36	Überlagerung und Schwebung	66
4.5.37	Amplitudenmodulation AM	66
4.5.38	Frequenzmodulation FM	67
4.6	Starkstromschaltungen	67
4.6.1	Drehstrom	67
4.6.2	Leistung bei Wechsel- und Drehstrom	68
4.6.3	Leitungsverluste	69
4.6.4	Synchrondrehzahlen von Elektromotoren	70
4.6.5	L-Kompensation	70
5.	Halbleiter und Röhren	71
5.1	Dioden und deren Schaltungen	71
5.2	Gleichrichterschaltungen	72
5.2.1	Einwegschaltung	72
5.2.2	Mittelpunktsschaltung	73
5.2.3	Brückenschaltung	73
5.2.4	Mittelpunktsschaltung für zwei symmetrische Ausgangsspannungen	74
5.2.5	Vervielfacherschaltung	75
5.3	Unstabilisiertes Netzteil	75
5.3.1	Transformator	75
5.3.2	Drahtdurchmesser	76
5.3.3	Wickelraum	77
5.3.4	Siebung mit RC-Glied	77
5.3.5	Siebung mit LC-Glied	77
5.4	Z-Dioden zur Stabilisierung	78
5.4.1	Spannungs-Stabilisierung mit Z-Dioden	79
5.4.2	Siebfaktor	79
5.4.3	Glättungsfaktor, Stabilisierungsfaktor	80
5.5	Kapazitätsdiode	80
5.6	Bipolare Transistoren	80
5.6.1	Transistor-Vierpol	80
5.6.2	Kennlinie (Emitterschaltung)	81

5.6.3	Transistor-Vierpolparameter (h-Parameter)	82
5.7	Analoge, aktive Schaltungen mit bipolaren Transistoren	84
5.7.1	Arbeitspunkteinstellung mit Stromgegenkopplung	84
5.7.2	Arbeitspunkteinstellung mit Spannungsgegenkopplung	85
5.7.3	Transistor als Verstärker (Emitterschaltung)	86
5.7.4	Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung	88
5.7.5	Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung	89
5.7.6	Kollektorschaltung	90
5.7.7	Basisschaltung	91
5.7.8	Bootstrap-Schaltung	91
5.7.9	Darlington-Schaltung	93
5.7.10	Optokoppler	94
5.8	Feldeffekt-Transistoren	96
5.8.1	Schaltzeichen, Eingangskennlinien und Spannungen	96
5.8.2	Kennlinie	97
5.9	Analoge, aktive Schaltungen mit Feldeffekt-Transistoren	98
5.9.1	Automatische Gate-Vorspannungserzeugung	98
5.9.2	Gate-Vorspannungserzeugung durch Spannungsteiler	99
5.9.3	Source-Schaltung	100
5.9.4	Source-Schaltung mit Gegenkopplung	100
5.9.5	Drain-Schaltung	101
5.9.6	Gate-Schaltung	101
5.10	Operationsverstärker	102
5.10.1	Schaltungssymbole	102
5.10.2	Grundsaltungen und Kennlinien	102
5.10.3	Leerlaufspannungsverstärkung	103
5.10.4	Gleichtaktverstärkung	103
5.10.5	Arbeitspunkteinstellung	104
5.11	Analoge, aktive Schaltungen mit Operationsverstärkern	105
5.11.1	Komparatoren	105
5.11.2	Invertierender Verstärker	106
5.11.3	Inverter	106
5.11.4	Nichtinvertierender Verstärker	107
5.11.5	Spannungsfolger	107
5.11.6	Summierer	107
5.11.7	Differenzverstärker (Addierer – Subtrahierer)	108
5.12	Unijunktion-Transistor	108
5.12.1	Sägezahngenerator mit UJT	109
5.13	Thyristor und Triac	110
5.13.1	Zündmethoden und Zündschaltungen	112
5.13.2	Anwendung von Thyristoren und Triacs	113
5.13.3	Phasenanschnittsteuerung	114
5.13.4	Nullspannungsschalter	116
5.13.5	Schutzbeschaltung	117
5.14	Röhren	118

5.14.1	Triode	118
5.14.2	Triode als Verstärker	119
5.14.3	Pentode	119
5.14.4	Pentode als Verstärker	120
5.15	Kondensatoren für NF-Verstärker	120
5.15.1	Koppel- und Emitterkondensatoren	120
5.15.2	Koppel- und Source- bzw. Katodenkondensatoren	121
6.	Schaltungen	122
6.1	Analogtechnik	122
6.1.1	Stabilisierungsschaltungen für Spannung und Strom	122
6.1.2	Differenzverstärker	124
6.1.3	Groß-Signal-Verstärker	125
6.1.4	Eintakt-Endstufe mit Übertrager im A-Betrieb	127
6.1.5	Gegentakt-Endstufe mit Übertrager im B- (AB-) Betrieb	128
6.1.6	Lautsprecherimpedanz	129
6.1.7	Lautsprecher-Weichen	129
6.1.8	Übertrager	130
6.1.9	Transformatorlose Endstufen im B- (AB-) Betrieb	131
6.1.10	Gesamtleistungsverstärkung	132
6.1.11	Wärmeableitung bei Halbleitern	133
6.1.12	Oszillatorschaltungen, allgemeine Bedingungen	134
6.1.13	LC-Schaltungen	135
6.1.14	RC-Schaltungen	136
6.1.15	Gegenkopplung	136
6.2	Impulstechnik	138
6.2.1	RC-Integrier-Glied	138
6.2.2	RL-Integrier-Glied	139
6.2.3	RC-Differenzier-Glied	140
6.2.4	RL-Differenzier-Glied	141
6.2.5	Ausgangsimpulsformen mit $\tau = f(t_i)$	142
6.2.6	Integrierer mit Operationsverstärker	143
6.2.7	Differenzierer mit Operationsverstärker	143
6.2.8	Diode als Schalter	144
6.2.9	Transistor als Schalter	145
6.2.10	Astabile Multivibratoren	146
6.2.11	Spezielle astabile Multivibratoren	148
6.2.12	Monostabile Multivibratoren	150
6.2.13	Schmitt-Trigger	152
6.2.14	Impulsbelastbarkeit von Halbleitern	153
7.	Meßtechnik	154
7.1	Meßfehler	154
7.2	Fehlerfortpflanzung	155

7.2.1	Systematische Fehler	155
7.2.2	Zufällige Fehler	156
7.3	Meßwerke	156
7.3.1	Genauigkeitsklassen und zulässiger Anzeigefehler	157
7.3.2	Skalenableserung bei Vielfachmeßgeräten	157
7.4	Meßbereichserweiterung	157
7.4.1	Spannungsmesser	157
7.4.2	Strommesser	158
7.5	Widerstandsmessung	158
7.5.1	Stromfehlerschaltung	158
7.5.2	Spannungsfehlerschaltung	158
7.5.3	Meßbrücken	159
7.6	Kapazitäts-Messung durch Spannungs-Strom-Messung	160
7.7	Induktivitäts-Messung durch Spannungs-Strom-Messung	161
7.8	Messungen mit dem Oszilloskop	161
7.8.1	Spannungsmessung	161
7.8.2	Zeitmessung	162
7.8.3	Phasenmessung mit Lissajous-Figuren	162
8.	Regelungstechnik	163
8.1	Grundbegriffe	163
8.1.1	Blockschaltbild einer Regelung	163
8.1.2	Signalflußpläne	164
8.1.3	Zeitverhalten von Übertragungsgliedern	165
8.1.4	Frequenzgangverhalten von Übertragungsgliedern	166
8.2	Elementare Regelglieder	167
8.2.1	P-Glied	167
8.2.2	I-Glied	168
8.2.3	D-Glied	169
8.2.4	Verzögerungsglied 1. Ordnung	170
8.2.5	Totzeit-Glied	170
8.2.6	Regelverstärker mit Vergleichen	171
8.3	Zusammengesetzte Regelglieder	171
8.3.1	P-T ₁ -Glied	171
8.3.2	D-T ₁ -Glied	173
8.3.3	PI-Glied	174
8.3.4	PD-Glied	175
8.3.5	PD-T ₁ -Glied	176
8.3.6	PID-T ₁ -Glied	177
8.4	Dynamische Kenngrößen der Regelstrecke	179
9.	Digitaltechnik	180
9.1	Zahlensysteme	180
9.1.1	Zahlendarstellung	180

9.1.2	Zahlenaufbau	180
9.1.3	Vorrat an Elementen	181
9.1.4	Entscheidungsinhalt	181
9.1.5	Redundanz	181
9.1.6	Rechenregeln für Dualzahlen	181
9.2	Schaltalgebra	182
9.2.1	Verknüpfungszeichen	182
9.2.2	Gegenüberstellung der Schaltsymbole	182
9.2.3	TTL- und CMOS-Pegel und Kompatibilität	183
9.2.4	Gesetze und Rechenregeln	184
9.2.5	Wichtige Grundverknüpfungen in NAND- und NOR-Technik	185
9.2.6	Optimale Form von Schaltfunktionen (KV-Diagramm)	186
9.3	Kippschaltungen (Flip-Flop's)	187
9.3.1	RS-Flip-Flop	187
9.3.2	D-Kippglied (D-Flip-Flop)	188
9.3.3	Flankengetriggertes JK-Kippglied (JK-Flip-Flop)	189
9.3.4	Flankengetriggertes MS-JK-Kippglied (MS-JK-Flip-Flop)	189
9.3.5	T-Flip-Flop	189
9.4	Komparator	190
9.5	Addierer	190
9.5.1	Halbaddierer	190
9.5.2	Volladdierer	190
9.6	Datenübertragung	191
9.6.1	Multiplexer	191
9.6.2	Demultiplexer	191
9.7	Codeumsetzer	192
9.7.1	BCD ↔ Dezimal	192
9.7.2	Dezimal → Sieben-Segment	192
9.7.3	BCD → Sieben-Segment	193
9.8	Zähler-Teiler	193
9.8.1	Asynchronzähler – Teiler (Modulo-x-Zähler)	194
9.8.2	Zählrichtungsumschalter: Vor- Rückwärts	194
9.8.3	Synchron-Zähler	195
9.9	Schieberegister	196
9.9.1	Betriebsarten	196
9.9.2	Schaltung	196
10.	Mathematischer Anhang	197
10.1.1	Mathematische Zeichen	197
10.1.2	Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten	197
10.1.3	Griechisches Alphabet	198
10.1.4	Runden von Zahlen	198

10.1.5	Interpolieren	198
10.1.6	Näherungen	198
10.1.7	Entwurf von logarithmischen Leitern	199
10.2.	Arithmetik und Algebra	199
10.2.1	Vorzeichenregeln	199
10.2.2	Brüche	199
10.2.3	Klammern	199
10.2.4	Verhältnisgleichungen (Proportionen)	199
10.2.5	Binome, Polynome	200
10.2.6	Mittelwerte	200
10.2.7	Potenzen mit ganzzahligen Exponenten	200
10.2.8	Potenzen mit Brüchen als Exponenten, Wurzeln	201
10.2.9	Potenzen mit Dezimalbrüchen als Exponenten, Logarithmen	201
10.2.10	Lösen von Exponentialgleichungen	202
10.2.11	Arithmetische Folge	202
10.2.12	Endliche arithmetische Reihe	202
10.2.13	Arithmetische Reihe höherer Ordnung	202
10.2.14	Geometrische Folge	202
10.2.15	Endliche geometrische Reihe	203
10.2.16	Geometrische Reihe	203
10.3	Quadratische Gleichungen	203
10.3.1	Allgemeine Form	203
10.3.2	Normalform	203
10.4	Funktionen	204
10.4.1	Häufige Funktionen	204
10.4.2	Logarithmusfunktionen	206
10.4.3	Exponentialfunktionen	206
10.4.4	Trigonometrische Funktionen	206
10.4.5	Vorzeichen der trigonometrischen Funktionen	207
10.4.6	Beziehungen zwischen den trigonometrischen Funktionen	208
10.4.7	Trigonometrische Funktionen zusammengesetzter Winkel	208
10.4.8	Trigonometrische Funktionen in der Gauß'schen Zahlenebene	209
10.4.9	Bogenmaß	210
10.4.10	Arcusfunktion	210
10.5	Differentialrechnung	211
10.5.1	Differenzenquotient	211
10.5.2	Differentialquotient	211
10.5.3	Differentiationsregeln	211
10.5.4	Ableitungen	212
10.5.5	Kurvendiskussion	213
10.5.6	Fehler-Rechnung	214
10.5.7	Graphische Differentiation	214
10.6	Integralrechnung	215

10.6.1	Integrationsregeln	215
10.6.2	Integralformeln	215
10.6.3	Flächenberechnung	216
10.6.4	Mittelwertsatz	216
10.6.5	Rotationskörper und Oberfläche	217
10.6.6	Graphische Integration	217
10.7	Geometrie	218
10.7.1	Ebene Geometrie	218
10.7.2	Raumgeometrie	219
11.	Tabellen	221
11.1	Umrechnung von physikalischen Einheiten	221
11.2	HF-Tapete	224
11.3	Leistungs-, Spannungs-, Strom-Diagramm für Widerstände	226
11.4	Normreihen E6, E12, E24	226
11.5	Transformatorkerne	227
11.6	Drahttabellen	228
11.7	Verwendete Formelzeichen	230
11.7.1	Lateinische Buchstaben	230
11.7.2	Griechische Buchstaben	231
11.7.3	Sonderzeichen	232
11.7.4	Indizierung	232
Literatur		234
Sachregister		235

Vorwort zur 1. Auflage

Die Formelsammlung soll sowohl dem Auszubildenden wie dem Schaltungsentwickler schnell und übersichtlich helfen, ein elektrotechnisches Problem mathematisch anzugehen und zu lösen. Sie enthält die in der Praxis meistgebrauchten Bauteile, Schaltungen und Formeln der Gebiete: Elektrotechnik, Nachrichtentechnik, Informatik und Elektronik. In der Regel wird nur ein Ausdruck einer bestimmten Formel angegeben, weil ohne weiteres zu erwarten ist, daß auch ein Auszubildender nach kurzer Zeit Formeln sicher umstellen kann. Der Gewinn ist offensichtlich: Die Formelsammlung bleibt übersichtlich; der Lernende wird gezwungen das Umstellen von Formeln zu üben.

In der zeichnerischen wie formelmäßigen Darstellung wurden für gleiche Sachverhalte unter Berücksichtigung der einschlägigen Normen auch dieselben Bezeichnungen gewählt (z.B.: Betriebsspannung U_S , obwohl auch andere wie U_{Batt} , U_B , U_N , U_{DD} , V_{DD} , usw. üblich sind). Es war mir ein besonderes Anliegen die Materie möglichst einfach, übersichtlich und praktikabel darzustellen. Deshalb wurden – wo möglich – auch technisch-mathematische Vereinfachungen vorgenommen.

Durchwegs sind Grundeinheiten angegeben, die bekanntlich noch mit Vorsatzzeichen zur dekadischen Vergrößerung oder Verkleinerung versehen werden können. In jedem Abschnitt werden die Legenden nur im Hauptabschnitt aufgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Ing. Gottwald für wertvolle Anregungen.

Rastatt im März 1979 und im September 1980

Ulrich Dietmeier

Vorwort zur 8., 9. und 10. Auflage

Seit der Erstauflage im Jahre 1979 waren in regelmäßiger Folge Neuauflagen in unveränderter Form erschienen. Aus dem Leserkreis kamen immer wieder Anregungen, noch weitere Bauteile und deren Schaltungen in die Formelsammlung aufzunehmen. In dieser Auflage sind infolgedessen Halbleiter zur Leistungssteuerung und deren wichtigste Schaltungen, sowie eine Anzahl spezieller elektronischer Bauteile neu aufgenommen worden. Die Digitaltechnik wurde durch wesentliche Schaltungen ergänzt; die Regelungstechnik ist überarbeitet und durch praktikable elektronische Schaltungen vervollständigt worden.

Auf komplexere Schaltungen wurde nach wie vor verzichtet, um das bewährte Konzept beizubehalten. Das Buch soll dem Auszubildenden und dem Praktiker helfen, die Elektronik und deren typische Schaltungen kennen- und verstehenzulernen. Dazu sind klare Vorstellungen von den Spannungs- und Stromverhältnissen im Stromkreis; sowie Kenntnisse über dessen Beschreibung durch Symbole und Vereinbarungen unerlässlich.

Das Buch enthält vorwiegend Schaltungen die sich relativ einfach entwerfen, berechnen und nachbauen lassen. Dies scheint mir didaktisch sinnvoller zu sein, als ein Sammelsurium möglichst vieler – oft auch aufwendiger oder mathematisch bzw. theoretisch sehr anspruchsvoller – Schaltungen anzubieten. Wer über das Dargestellte hinaus weiter arbeiten will oder muß, wird ohnehin entsprechende Literatur verwenden. Erfolgserlebnisse zu haben, Freude und Selbstsicherheit durch den Umgang mit relativ einfach zu realisierenden Schaltungen zu bekommen, erscheint mir sachdienlicher.

Dem Verlagslektor und dem Verlag danke ich für die langjährige gute Zusammenarbeit bei der Realisierung des Buches.

Rastatt

Ulrich Dietmeier

1. Nützliche Rechenregeln

1.1 Zahlen mit Hilfe von 10er-Potenzen anschreiben

$$\begin{aligned}\text{Beispiel: } 25\,000 &= 25 \cdot 10^3 \\ 0,025 &= 25 \cdot 10^{-3}\end{aligned}$$

1.2 10er-Potenzen mit Exponenten von 3, 6, 9, 12 bevorzugen, weil für diese auch Vorsatzzeichen vorhanden sind.

$$\text{Beispiel: } 10^{\pm 3}, 10^{\pm 6}, 10^{\pm 9}, 10^{\pm 12}$$

1.3 Brüche mit einem oder mehreren Faktoren im Zähler und Nenner mit Hilfe von 10er-Potenzen so verwandeln, daß der Zähler möglichst größer als der Nenner wird, und die Zahlenwerte trotzdem möglichst klein sind.

$$\text{Beispiel: } x = \frac{0,0123 \cdot 4500 \cdot 6,72}{321 \cdot 0,04} = \frac{12,3 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \cdot 10^3 \cdot 6,72}{0,321 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}$$

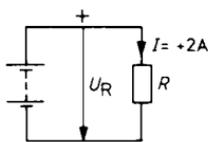
1.4 Nie mit 6,28 sondern immer mit $2 \cdot \pi$ rechnen, weil π als Konstante auf dem Rechenschieber oder im Rechner vorhanden ist und man oft mit 2 vervielfachen oder teilen kann.

1.5 Am Schluß der Rechnung immer einen Überschlagn machen (auch beim Rechner). Möglichst geschickt auf- bzw. abrunden, damit der Fehler klein wird.

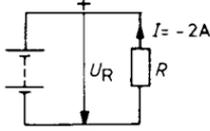
$$\text{Beispiel: } x = \frac{0,84 \cdot 325 \cdot \pi}{69 \cdot 0,009} \approx \frac{1 \cdot 300 \cdot 3}{60 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 1,5 \cdot 10^3$$

2. Zählfeilsystem

2.1 Stromzählfeil



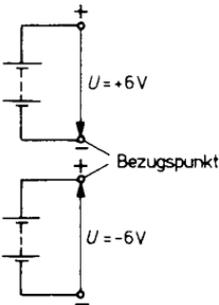
In einer Schaltung ist der Stromzählfeil frei wählbar. Der Zahlenwert des Stromes erhält ein positives Vorzeichen, wenn der Zählfeil in dieselbe Richtung zeigt, in der positive Ladungsträger transportiert werden (Technische Stromrichtung).



Fließt der Strom seinem Zählfeil entgegen, erhält der Zahlenwert ein negatives Vorzeichen.

Durch das Vorzeichen wird ausgedrückt, ob der Strom in die Richtung des Stromzählfeiles fließt (+), oder umgekehrt (-).

2.2 Spannungszählpfeil

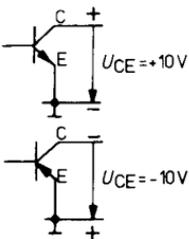


Dieser ist wie der Stromzählpfeil in seiner Richtung frei wählbar. Er zeigt mit seiner Spitze auf den Bezugspunkt, gegen den die Polarität der betreffenden Spannung gesehen werden muß. Zeigt er vom positiveren zum negativeren Potential, so erhält der Zahlenwert der Spannung ein positives Vorzeichen.

Zeigt er vom negativeren zum positiveren Potential, so erhält der Zahlenwert ein negatives Vorzeichen.

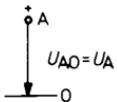
Durch die Vorzeichen wird ausgedrückt, ob die Spannung an der betrachteten Stelle gegenüber dem Bezugspunkt positiv oder negativ ist.

Wird die Spannung mit einem Doppelindex versehen (z.B.: in der Transistortechnik U_{CE}), so bedeutet das, daß der Spannungszählpfeil (gebundener Zählpfeil) von dem mit dem ersten



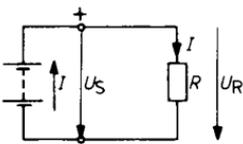
Index bezeichneten Anschluß zu dem mit dem zweiten Index bezeichneten weist. Dieser ist dann Bezugspunkt.

2.3 Masse – Nullpotential



Bezieht man das Potential gegen Masse oder Null, so kann der Nullindex weggelassen werden.

2.4 Erzeuger – Verbraucher

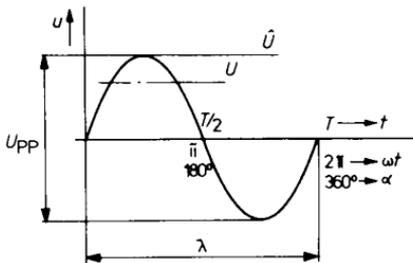


Der Verbraucher nimmt Leistung auf; Spannungs- und Stromzählpfeil haben dieselbe Richtung.

Der Erzeuger gibt Leistung ab; Zählpfeile sind entgegengesetzt gerichtet.

3. Periodische Spannungen und Ströme

3.1 Sinusförmige Wechselspannung



$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{PP}}{2\sqrt{2}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$S = \sqrt{2}$$

$$F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

$$u = \hat{U} \cdot \sin(\omega t \pm \varphi)$$

$$u = \hat{U} \cdot \sin \alpha$$

Komplexe Darstellung

$$\underline{\hat{U}} = \hat{U} \cdot e^{\pm j\varphi}$$

$$\underline{u}_t = \underline{\hat{U}} \cdot e^{j\omega t} = \hat{U} \cdot e^{\pm j\varphi} \cdot e^{j\omega t}$$

$$\underline{U} = U \cdot e^{\pm j\varphi} = \frac{\underline{\hat{U}}}{\sqrt{2}}$$

U_{PP} = Doppelte Spitzenspannung (Schwingungsbreite) in V

\hat{U} = \hat{u} = Spitzenspannung (Scheiteltwert) in V

U = Effektivwert in V

λ = Wellenlänge in m

f = Frequenz in Hz

ω = $2\pi f$ = Kreisfrequenz in s^{-1}

T = Periodendauer in s

c = Ausbreitungsgeschwindigkeit in $m s^{-1}$

$c \approx 300 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$

S = Scheitelfaktor s. 3.8

F = Formfaktor s. 3.8

u = Augenblickswert der Wechselspannung in V

φ = Nullphasenwinkel in Grad

α = Winkel des Zeigers \hat{U} in Grad

$\underline{\hat{U}}$ = Komplexe Amplitude in V

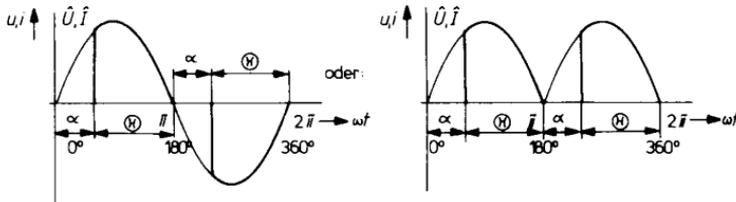
\underline{u}_t = Komplexer Augenblickswert in V

\underline{U} = Komplexer Effektivwert in V

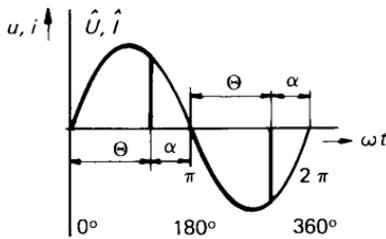
Komplexe Rechnung s. 4.5.4 und 10.4.8.

3.2 Effektivwerte phasenangeschnittener sinusförmiger Wechselgrößen

3.2.1 Phasenanschnitt



3.2.2 Phasenabschnitt



$$U' = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\pi - \hat{\alpha} + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

$$I' = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\pi - \hat{\alpha} + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

$$P' = U' \cdot I'$$

α = Phasenanschnittwinkel in Grad
 $0^\circ \leq \alpha^\circ \leq 180^\circ$

$\hat{\alpha}$ = Phasenanschnittwinkel in rad
 (Bogenmaß)

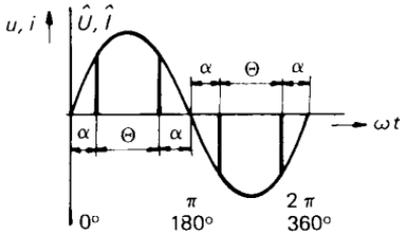
Θ = Stromflußwinkel in Grad
 (= Dauer des Stromflusses,
 gemessen in Winkelgraden)

n = Normierung in %

U', I', P' = Effektivwerte der phasen-
 angeschnittenen Größe

U, I, P = Effektivwerte der nicht-
 angeschnittenen Größe

3.2.3 Sektor

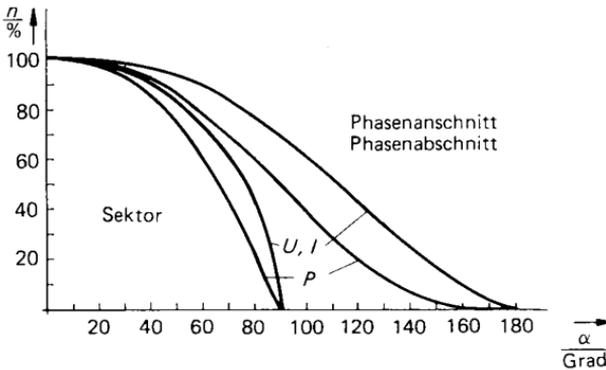


$$0^\circ \leq \alpha^\circ \leq 90^\circ$$

$$U' = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - 2\hat{\alpha} + \sin 2\alpha}$$

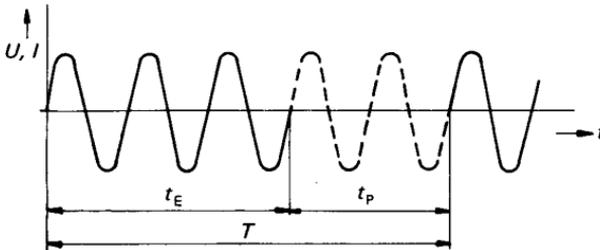
$$I' = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - 2\hat{\alpha} + \sin 2\alpha}$$

3.2.4 Steuerkennlinien von Wechselstromstellern



$$n = \frac{U'}{U} = \frac{I'}{I} = \frac{P'}{P}$$

3.3 Effektivwerte periodischer sinusförmiger Schwingungspakete



$$P' = P_T \frac{t_E}{T} = \frac{U^2}{R_L} \cdot \frac{t_E}{T}$$

t_E = Einschaltdauer in s

t_P = Pausendauer in s

T = Schaltperiodendauer in s

P' = Schaltleistung am Lastwiderstand R_L in W

$$U' = U \cdot \sqrt{\frac{t_E}{T}}$$

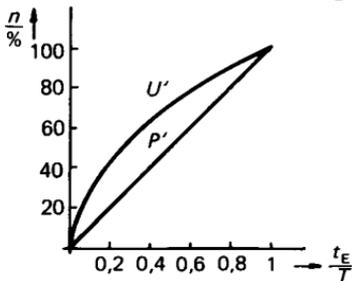
$$I' = \frac{U}{R_L} \cdot \sqrt{\frac{t_E}{T}}$$

P_T = Maximalleistung am Lastwiderstand R_L in W

U' = Schaltspannung in V

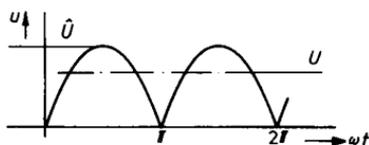
U = Netzspannung in V

I' = geschalteter Strom in A



$$n = \frac{U'}{U} = \frac{P'}{P_T}$$

3.4 Zweiweg-Gleichrichtung



$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

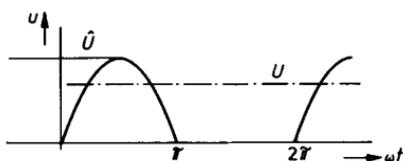
$$S = \sqrt{2}$$

$$F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

Fourier-Gleichung

$$u = \hat{U} \cdot \frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{2}{1 \cdot 3} \cdot \cos 2 \cdot \omega t - \frac{2}{3 \cdot 5} \cdot \cos 4 \cdot \omega t + \frac{2}{5 \cdot 7} \cdot \cos 6 \cdot \omega t - + - \dots \right)$$

3.5 Einweg-Gleichrichtung



$$U = \frac{\hat{U}}{2}$$

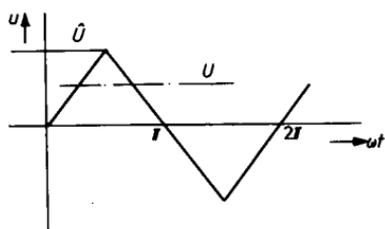
$$S = 2$$

$$F = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2,22$$

Fourier-Gleichung

$$u = \hat{U} \cdot \frac{1}{\pi} \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \cos \omega t + \frac{2}{1 \cdot 3} \cdot \cos 2 \cdot \omega t - \frac{2}{3 \cdot 5} \cdot \cos 4 \cdot \omega t + - + \dots \right)$$

3.6 Dreieckschwingung



$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$$

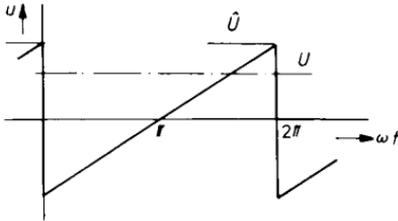
$$S = \sqrt{3}$$

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155$$

Fourier-Gleichung

$$u = \hat{U} \cdot \frac{8}{\pi^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{3^2} \cdot \sin 3 \cdot \omega t + \frac{1}{5^2} \cdot \sin 5 \cdot \omega t - + - \dots \right)$$

3.7 Sägezahnspannung



$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$$

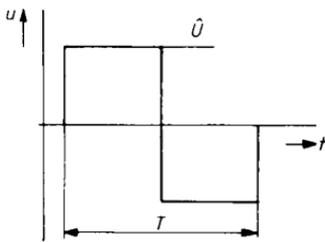
$$S = \sqrt{3}$$

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155$$

Fourier-Gleichung

$$u = -\hat{U} \cdot \frac{2}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{\sin 2 \cdot \omega t}{2} + \frac{\sin 3 \cdot \omega t}{3} + \dots \right)$$

3.8 Rechteck-Wechselspannungen, Pulse



$$\hat{U} = U$$

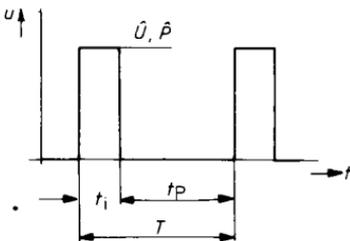
$$f = \frac{1}{T}$$

$$S = 1$$

$$F = 1$$

Fourier-Gleichung

$$u = \hat{U} \cdot \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \cdot \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \cdot \omega t + \dots \right)$$



$$v = \frac{T}{t_i} = \frac{1}{g}$$

$$g = \frac{t_i}{T}$$

$$U = \hat{U} \cdot \sqrt{\frac{t_i}{T}}$$

$$P = \hat{P} \cdot \frac{t_i}{T}$$

v = Tastverhältnis

g = Tastgrad

t_i = Impulsdauer in s

t_p = Pausendauer in s

P = Effektivwert der Impulsleistung in W

\hat{P} = Spitzenwert der Impulsleistung in W

3.9 Scheitelfaktor, Formfaktor, Welligkeit

$$S = \frac{\text{Maximalwert}}{\text{Effektivwert}}$$

$$F = \frac{\text{Effektivwert}}{\text{arithmetischer Mittelwert}}$$

$$s_w = \frac{\text{Effektivwert der Brummspannung}^*}{\text{arithmetischen Mittelwert}}$$

3.10 Arithmetischer Mittelwert (Gleichrichtwert) sinusförmiger Wechselspannungen

$$|\overline{u}| = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{U} = 0,637 \cdot \hat{U}$$

$$|\overline{i}| = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{I} = 0,637 \cdot \hat{I}$$

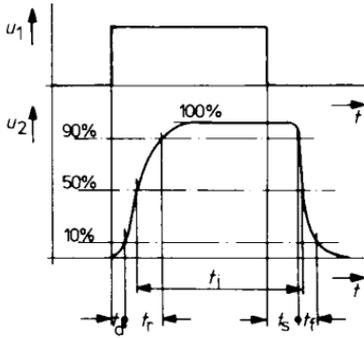
3.11 Bezeichnung der Impulszeiten



u_1 = Eingangsspannung am Vierpol in V

u_2 = Ausgangsspannung am Vierpol in V

* Brummspannung s. 5.2.



t_d = Verzögerungszeit in s

t_r = Anstiegszeit in s

t_s = Speicherzeit in s

t_f = Abfallzeit in s

t_i = Impulsdauer in s

Maximale Impulsfrequenz (für $t_i \approx t_p$)

$$f_{\max} \leq \frac{0,3}{t_r}$$

f_{\max} = Maximale Impulsfrequenz
in Hz

$$t_r \leq \frac{0,3}{f_{\max}}$$

für $t_i \approx 2 t_r$ wird:

$$f_{\max} \leq \frac{0,6}{t_i}$$