

# Inhalt

Vorwort . . . . .	5
Inhaltsverzeichnis . . . . .	6

## I. Grundgesetze des Wechselstromes

1. Einleitung . . . . .	11
2. Stromarten . . . . .	11
a) Gleichstrom . . . . .	11
b) Zerhackter Gleichstrom . . . . .	12
c) Kommutierter Gleichstrom . . . . .	13
d) Dreieckförmiger Wechselstrom . . . . .	13
e) Sinusförmiger Wechselstrom . . . . .	14
3. Die zweckmäßigste Kurvenform des Wechselstromes . . . . .	15
4. Die sinusförmige Wechselspannung . . . . .	16
a) Erzeugung einer sinusförmigen Wechsel-EMK durch Drehen einer Leiterschleife im homogenen Magnetfeld . . . . .	16
b) Erzeugung einer EMK mit Hilfe einer sinusförmig schwingenden Tauchspule . . . . .	23
c) Zusammenfassung zur Erzeugung einer sinusförmigen EMK in einer Spule . . . . .	26
5. Der sinusförmige Wechselstrom . . . . .	27
a) Ohmscher Widerstand . . . . .	28
b) Induktiver Widerstand . . . . .	30
c) Kapazitiver Widerstand . . . . .	32
d) Gegeninduktiver Widerstand . . . . .	35
6. Meßwerte des Wechselstromes . . . . .	37
a) Der arithmetische Mittelwert . . . . .	38
b) Der quadratische Mittelwert und der Effektivwert . . . . .	40
7. Der Wechselstromkreis mit Reihen- und Parallelwiderständen . . . . .	42
a) Reihenschaltung . . . . .	43
b) Parallelschaltung . . . . .	50
8. Leistung und Arbeit des Wechselstromes . . . . .	57
a) Leistung . . . . .	57
b) Arbeit . . . . .	62



## II. Symbolische Rechnung

A. Grundlagen . . . . .	65
1. Komplexe Zahlen . . . . .	65
a) Reelle Zahlen . . . . .	65
b) Imaginäre Zahlen . . . . .	65
c) Komplexe Zahlen . . . . .	65
2. Die Gaußsche Zahlenebene . . . . .	65
3. Darstellung eines Zeigers in der Gaußschen Zahlenebene . . . . .	66
a) Durch eine komplexe Zahl . . . . .	66
b) Die trigonometrische Darstellungsform . . . . .	67
c) Die Exponentialform . . . . .	67
d) $j$ als Symbol einer Drehung . . . . .	70
4. Symbolische Darstellung von Wechselstromgrößen mit konstanter Amplitude . . . . .	72
a) Drehzeiger . . . . .	72
b) Übergang vom Drehzeiger zur trigonometrischen Darstellung . . . . .	73
c) Differentiation eines Drehzeigers nach der Zeit . . . . .	76
d) Integration eines Drehzeigers . . . . .	76
B. Praktische Anwendung der symbolischen Rechnung auf Wechselgrößen mit konstanter Amplitude . . . . .	77
1. Vorbemerkungen . . . . .	77
2. Einzelwiderstände . . . . .	78
a) Rein Ohmscher Widerstand . . . . .	78
b) Rein induktiver Widerstand . . . . .	78
c) Rein kapazitiver Widerstand . . . . .	79
d) Gegeninduktiver Widerstand . . . . .	80
3. Zusammengesetzte Widerstände . . . . .	80
a) Vorbemerkungen . . . . .	80
b) Ohmscher und induktiver Widerstand in Reihe . . . . .	80
c) Ohmscher und kapazitiver Widerstand in Reihe . . . . .	85
d) Ohmscher, induktiver und kapazitiver Widerstand in Reihe . . . . .	91
e) Spule mit Verlusten und Kondensator parallel . . . . .	97
4. Induktive Kopplung zweier Stromkreise (allgemeiner Transformator) . . . . .	105
a) Die Grundgleichungen . . . . .	105
b) Umformung der Grundgleichungen . . . . .	111
c) Ersatzschaltung des Transformators . . . . .	113
d) Bemerkungen zu den Strom- und Spannungsbezugspfeilen . . . . .	123
e) Formelzusammenstellung für den allgemeinen Transformator . . . . .	126
f) Formelzusammenstellung für die Ersatzschaltung des Transformators . . . . .	126
5. Der eisengeschlossene Transformator . . . . .	127
a) Vorbemerkungen . . . . .	127
b) Leerlauf . . . . .	128



c) Belastung . . . . .	132
d) Zusammenhang zwischen der Scheinleistung und den Kern- abmessungen . . . . .	134

### III. Erweiterte symbolische Rechnung

A. Grundlagen . . . . .	138
1. Vorbemerkungen . . . . .	138
2. Der Drehstrecker . . . . .	138
3. Die Zeitfunktion als Summe von zwei Drehstreckern . . . . .	147
a) Die Summe $\mathfrak{A}_1$ und $\mathfrak{A}_2$ . . . . .	147
b) Die Differenz von $\mathfrak{A}_1$ und $\mathfrak{A}_2$ . . . . .	148
4. Differentiation und Integration eines Drehstreckers . . . . .	150
a) Differentiation . . . . .	150
b) Integration . . . . .	151
5. Anwendung des Drehstreckers auf Einzelwiderstände . . . . .	151
a) Vorbemerkungen . . . . .	151
b) Ohmscher Widerstand . . . . .	152
c) Induktiver Widerstand . . . . .	152
d) Kapazitiver Widerstand . . . . .	152
e) Gegeninduktiver Widerstand . . . . .	153
6. Rechenschema für die Berechnung von Schaltvorgängen . . . . .	153
a) Voraussetzung . . . . .	153
b) Spannungsgleichung . . . . .	154
c) Beseitigung der Amplituden . . . . .	154
d) Ausrechnung der komplexen Winkelgeschwindigkeiten . . . . .	155
e) Die Drehstrecker . . . . .	156
f) Der zeitliche Verlauf . . . . .	157
g) Bestimmung der Amplituden . . . . .	158
B. Anwendungen . . . . .	159
1. Ein Kondensator wird über einen Widerstand an eine Gleichspannung geschaltet . . . . .	159
2. Ein auf die Spannung $U$ aufgeladener Kondensator wird über einen Widerstand entladen . . . . .	161
3. Ein Kondensator mit Parallelwiderstand wird über einen Widerstand an eine Gleichspannung gelegt . . . . .	162
4. Eine Selbstinduktion mit Widerstand wird an eine Gleichspannung geschaltet . . . . .	167
5. Eine vom Gleichstrom $I = \frac{U}{R}$ durchflossene Selbstinduktion wird kurz- geschlossen . . . . .	168
6. Eine Selbstinduktion mit dem Widerstand $R_1$ , zu der der Widerstand $R_2$ parallel liegt, wird über den Widerstand $R_3$ an eine Gleichspannung geschaltet . . . . .	170



7. Ein Kondensator wird über eine Selbstinduktion mit Widerstand an eine Gleichspannung gelegt . . . . .	175
a) Der periodische Fall . . . . .	177
b) Der aperiodische Fall . . . . .	180
c) Der aperiodische Grenzfall . . . . .	181
8. Ein Kondensator wird über eine Selbstinduktion mit Widerstand entladen . . . . .	188
a) Periodischer Entladungsfall . . . . .	191
b) Aperiodischer Fall . . . . .	191
c) Aperiodischer Grenzfall . . . . .	192
9. Eine Wechselspannung wird auf einen Reihenschwingkreis geschaltet	200
10. Stromverdrängung bei hohen Frequenzen (Skineffekt) . . . . .	212
a) Vorbemerkungen . . . . .	212
b) Ansatz . . . . .	213
c) Lösung . . . . .	214
d) Leistungsverlust im Leiter . . . . .	219
e) Effektive Eindringtiefe, wirksamer Widerstand und Widerstandserhöhung . . . . .	221

#### IV. Mehrwellige Wechselströme

A. Harmonische Analyse . . . . .	224
1. Grundsätzlicher Aufbau mehrwelliger Wechselströme . . . . .	224
a) Allgemeine Darstellung . . . . .	224
b) Beispiel eines verzerrten Wechselstromes . . . . .	225
2. Analyse eines verzerrten Wechselstromes . . . . .	227
a) Grundsätzliche Ermittlung der Konstanten . . . . .	227
b) Praktische Ermittlung der Konstanten aus einer zeichnerisch vorliegenden Wechselstromkurve . . . . .	234
c) Analyse einer formal gegebenen periodischen Strom- oder Spannungs-kurve . . . . .	264
B. Das Verhalten mehrwelliger Ströme in frequenzabhängigen Stromkreisen . . . . .	273
1. Vorbemerkungen . . . . .	273
a) Frequenzspektrum . . . . .	274
b) Effektivwert . . . . .	275
c) Klirrfaktor . . . . .	277
d) Leistung . . . . .	277
2. Die Spannung an Widerständen mit verzerrten Wechselströmen . . . . .	278
a) Ohmscher und induktiver Widerstand in Reihe . . . . .	279
b) Gleichstromwiderstand $R_0$ und beliebiger komplexer Widerstand $\Re_n$ . . . . .	283



## V. Gemodelte Wechselströme

Vorbemerkungen . . . . .	286
A. Amplitudengemodelte Schwingung . . . . .	286
1. Der zeitliche Verlauf . . . . .	286
2. Zeigerdarstellung . . . . .	288
3. Das Frequenzspektrum . . . . .	289
B. Frequenz- und Phasenmodellung . . . . .	290
1. Frequenzmodellung . . . . .	290
2. Phasenmodellung . . . . .	292
3. Darstellung der periodischen Phasenschwankung durch Pendelzeiger . . . . .	296
4. Fourieranalyse der Funktion $\sin(m \cdot \sin x)$ und $\cos(m \cdot \sin x)$ . . . . .	299
5. Der Pendelzeiger wird durch Drehzeiger dargestellt . . . . .	304
6. Frequenzspektrum der frequenz- und phasengemodelten Schwingung . . . . .	307

## VI. Mathematischer Anhang

1. Die binomische Reihe . . . . .	310
2. Einige Reihenentwicklungen . . . . .	313
3. Exponentialreihe . . . . .	316
4. $e^x$ -Reihe . . . . .	318
5. $e^{jx}$ -Reihe . . . . .	319
6. Kosinus- und Sinusreihe . . . . .	320
7. Reihenentwicklung der Funktion des Pendelzeigers $\tilde{g} = e^{jm \cdot \sin x}$ . . . . .	321
a) Reihenentwicklung mit Hilfe der e-Funktion . . . . .	321
b) Umwandlung der Potenzen von $\sin x$ in Vielfache des Winkels . . . . .	321
c) Ordnen der Koeffizienten der $\sin nx$ - und $\cos nx$ -Glieder . . . . .	323
d) Einführung der Besselfunktion . . . . .	324
e) Darstellung von $e^{jm \cdot \sin x}$ durch Besselfunktionen . . . . .	324
f) Zerlegung von $e^{jm \cdot \sin x}$ in zwei harmonische Reihen . . . . .	325
g) Numerische Berechnung der Besselfunktion $J_n(m)$ . . . . .	325
h) Einige Nullstellen der Besselfunktionen . . . . .	328