

# Grundlagen der Elektrotechnik

0	Einleitung . . . . .	19
1	Elektrische Grundgrößen . . . . .	20
1.0	Elektrizität und Elektrotechnik . . . . .	20
1.1	Elektrischer Strom . . . . .	21
1.1.1	Elektrische Ladung als Ursprung der Elektrizität . . . . .	21
1.1.1.1	Das Elektron im Atomaufbau . . . . .	22
1.1.1.2	Das Elektron als kleinste elektrische Ladung . . . . .	23
1.1.1.3	Das Modell des elektrischen Feldes um eine elektrische Ladung . . . . .	24
1.1.2	Stromfluss als gerichtete bewegte Ladung . . . . .	25
1.1.2.1	Elektrischer Stromfluss . . . . .	25
1.1.2.2	Elektronengeschwindigkeit und Stromgeschwindigkeit . . . . .	26
1.1.2.3	Stromdichte . . . . .	27
1.1.2.4	Wirkungen des elektrischen Stromes . . . . .	29
1.1.3	Stromarten . . . . .	30
1.2	Elektrische Spannung . . . . .	30
1.2.1	Energieniveau zwischen getrennten Ladungen . . . . .	31
1.2.2	Spannungsgewinnung durch Energieumwandlung . . . . .	33
1.2.3	Spannungsarten . . . . .	34
1.3	Elektrischer Widerstand . . . . .	35
1.3.1	Stromleitung in Metallen . . . . .	35
1.3.1.1	Aufbau und Gitterstruktur von Metallen . . . . .	35
1.3.1.2	Das Bändermodell bei Metallen . . . . .	36
1.3.1.3	Vorgang der Stromleitung . . . . .	37
1.3.2	Elektrischer Widerstand als Strombegrenzer . . . . .	37
1.3.2.1	Spezifischer elektrischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit . . . . .	38
1.3.2.2	Bemessungsgleichung des Widerstandes . . . . .	40
1.3.2.3	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes . . . . .	41
1.3.3	Stromleitung in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen . . . . .	45
2	Elektrischer Stromkreis . . . . .	46
2.1	Aufbau des technischen Stromkreises . . . . .	46
2.2	Strömungsgesetze im elektrischen Stromkreis . . . . .	47
2.2.1	Ohm'sches Gesetz . . . . .	47
2.2.2	Widerstandsdiagramme . . . . .	49
2.2.2.0	Einführung . . . . .	49
2.2.2.1	Lineare Widerstände . . . . .	50
2.2.2.2	Nichtlineare Widerstände . . . . .	53
2.3	Messung von Strom und Spannung . . . . .	56
2.3.1	Strommessung . . . . .	56
2.3.2	Spannungsmessung . . . . .	56
2.4	Aktive und passive Zwei- und Vierpole . . . . .	57
2.4.0	Einführung . . . . .	57
2.4.1	Zweipole . . . . .	58
2.4.1.0	Definitionen . . . . .	58
2.4.1.1	Spannungsquelle als aktiver Zweipol . . . . .	58
2.4.1.2	Widerstand und andere „Verbraucher“ als passiver Zweipol . . . . .	58

2.4.2	Vierpole . . . . .	59
2.4.2.0	Definitionen . . . . .	59
2.4.2.1	Ausgewählte aktive Vierpole . . . . .	59
2.4.2.2	Ausgewählte passive Vierpole . . . . .	60
3	Grundsaltungen für Gleichstrom . . . . .	62
3.1	Reihenschaltung von Widerständen . . . . .	62
3.1.1	Gesamtstrom, Gesamtspannung, Gesamtwiderstand . . . . .	62
3.1.2	Verhältnissbildung zwischen Teilspannung und Teilwiderständen — Spannungsteilung . . . . .	65
3.1.3	Der feste bzw. fest eingestellte unbelastete Spannungsteiler . . . . .	66
3.1.4	Der stellbare unbelastete Spannungsteiler (Potenziometerschaltung) . . . . .	67
3.1.5	Vergleich von Spannungspotenzialen . . . . .	69
3.1.6	Grafische Lösung einer Reihenschaltung . . . . .	71
3.2	Parallelschaltung von Widerständen . . . . .	73
3.2.1	Gesamtspannung, Gesamtstrom, Gesamtwiderstand . . . . .	73
3.2.2	Verhältnissbildung zwischen Teilströmen und Widerständen — Stromteilung . . . . .	76
3.2.3	Ersatzwiderstand = Gesamtwiderstand parallel geschalteter Widerstände . . . . .	78
3.2.4	Ersatzleitwert . . . . .	80
3.2.5	Grafische Lösung einer Parallelschaltung . . . . .	80
3.3	Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle . . . . .	82
3.3.1	Ersatzspannungsquelle. . . . .	82
3.3.1.0	Einführung . . . . .	82
3.3.1.1	Schaltung . . . . .	82
3.3.1.2	Kennlinie und Kenngrößen. . . . .	83
3.3.2	Ersatzstromquelle. . . . .	87
3.3.2.0	Einführung . . . . .	87
3.3.2.1	Schaltung . . . . .	87
3.3.2.2	Kennlinie und Kenngrößen. . . . .	87
3.4	Gemischte Schaltungen von Widerständen . . . . .	89
3.4.1	Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen in einer Schaltung . . . . .	89
3.4.2	Belasteter Spannungsteiler . . . . .	93
3.4.2.0	Einführung . . . . .	93
3.4.2.1	Fester belasteter Spannungsteiler . . . . .	93
3.4.2.2	Stellbarer belasteter Spannungsteiler (Potenziometerschaltung) . . . . .	95
3.4.3	Brückenschaltung. . . . .	97
3.4.3.0	Einführung . . . . .	97
3.4.3.1	Die abgegliche Brückenschaltung . . . . .	97
3.4.3.2	Die unabgegliche Brückenschaltung . . . . .	99
3.5	Netzwerke und ihre Berechnungsmethoden . . . . .	99
3.5.0	Einführung . . . . .	99
3.5.1	Stern-Dreieck-Umwandlung . . . . .	99
3.5.2	Maschen- und Knotenpunktgleichungen . . . . .	107
3.5.3	Ersatzspannungs- und Ersatzstromquellen — Umwandlung . . . . .	110
3.5.4	Überlagerungssatz . . . . .	115
3.5.5	Passive Vierpole aus Widerstandsnetzwerken . . . . .	122
3.5.5.0	Einführung . . . . .	122
3.5.5.1	Aufstellung von Vierpolgleichungen . . . . .	123
3.5.5.2	Definition und Kennzeichnung der Vierpolparameter . . . . .	126
3.5.5.3	Ermittlung der Bauelementdaten einer Vierpol-Innenschaltung aus den Daten der Vierpolparameter . . . . .	129
3.6	Elektrische Arbeit und Leistung . . . . .	132
3.6.1	Elektrische Arbeit . . . . .	132

3.6.2	Elektrische Leistung . . . . .	134
3.6.2.1	Leistungshyperbel . . . . .	137
3.6.2.2	Nutzleistung und Verlustleistung . . . . .	140
3.6.2.3	Wirkungsgrad . . . . .	143
3.6.2.4	Leistungsanpassung . . . . .	144
3.7	Umwandlung elektrischer Energie in andere Energien und umgekehrt . . . . .	148
3.7.0	Einführung . . . . .	149
3.7.1	Elektrische Energie in mechanische Energie . . . . .	150
3.7.2	Elektrische Energie in thermische Energie . . . . .	151
3.7.3	Elektrische Energie in optische Energie . . . . .	152
3.7.4	Elektrische Energie in chemische Energie . . . . .	153
3.7.4.0	Einführung. . . . .	153
3.7.4.1	Elektrolyse und Leitungsmechanismus in Flüssigkeiten . . . . .	153
3.7.4.2	Elektrochemische Spannungsquellen. . . . .	157
3.7.4.2.1	Galvanische Elemente (Primärelemente) . . . . .	157
3.7.4.2.2	Akkumulatoren (Sekundärelemente) . . . . .	161
	Praxisorientierte Lernaufgaben . . . . .	168
4	Das elektrische Feld und der Kondensator . . . . .	172
4.0	Einführung . . . . .	172
4.1	Erscheinungsformen des elektrischen Feldes . . . . .	172
4.1.1	Elektrische Felder zwischen elektrischen Ladungen – elektrostatische Felder . . . . .	172
4.1.2	Elektrische Felder in und zwischen Strom führenden Leitern . . . . .	173
4.1.2.0	Einführung. . . . .	173
4.1.2.1	Felder in Strom führenden Leitern . . . . .	173
4.1.2.2	Felder zwischen Strom führenden Leitern. . . . .	174
4.2	Die elektrische Feldstärke als Kenngröße des elektrischen Feldes . . . . .	175
4.3	Kräfte im elektrischen Feld und das Coulomb'sche Gesetz . . . . .	177
4.4	Spannungspotenziale in elektrischen Feldern . . . . .	179
4.4.1	Spannung im elektrischen Feld . . . . .	179
4.4.2	Spannung zwischen getrennten Ladungen . . . . .	180
4.5	Ladungsspeicherung und Kondensator . . . . .	181
4.6	Isolierstoffe im elektrischen Feld . . . . .	185
4.6.1	Ladungsverschiebung in Isolierstoffen oder die elektrische Influenz. . . . .	185
4.6.2	Feldkonstante des elektrischen Feldes . . . . .	186
4.6.3	Bemessungsgleichung der Kapazität . . . . .	188
4.7	Schaltungen von Kondensatoren . . . . .	190
4.7.1	Reihenschaltung von Kondensatoren . . . . .	190
4.7.2	Parallelschaltung von Kondensatoren. . . . .	192
4.7.3	Reihen- und Parallelschaltungen von Kondensatoren in einer Schaltung . . . . .	193
4.8	Schaltvorgänge am Kondensator . . . . .	194
4.8.1	Einschalt- oder Ladevorgang am Kondensator . . . . .	194
4.8.2	Ausschalt- oder Entladevorgang am Kondensator . . . . .	201
4.9	Gespeicherte Energie eines geladenen Kondensators und die Energie des elektrischen Feldes . . . . .	205
	Praxisorientierte Lernaufgaben . . . . .	209
5	Das magnetische Feld . . . . .	210
5.1	Erscheinungsformen des magnetischen Feldes. . . . .	210
5.1.1	Das magnetische Feld eines Natur- oder Dauermagneten . . . . .	210
5.1.2	Das magnetische Feld eines stromdurchflossenen Leiters . . . . .	211

5.1.3	Das magnetische Feld einer stromdurchflossenen Spule oder eines Elektromagneten . . . . .	212
5.1.4	Eigenschaften magnetischer Felder . . . . .	212
5.2	Kenngrößen des magnetischen Feldes . . . . .	213
5.2.1	Magnetfluss oder magnetischer Fluss . . . . .	213
5.2.2	Magnetflussdichte oder magnetische Flussdichte . . . . .	213
5.2.3	Elektrische Durchflutung . . . . .	214
5.2.4	Magnetische Feldstärke . . . . .	215
5.2.5	Magnetischer Widerstand und magnetischer Leitwert . . . . .	217
5.3	Magnetisierungskennlinien . . . . .	222
5.3.1	Die Magnetflussdichte als Funktion der magnetischen Feldstärke . . . . .	222
5.3.2	Magnetisierungskennlinie einer Luftspule . . . . .	222
5.3.3	Magnetisierungskennlinie einer Spule mit Kern aus ferromagnetischen Werkstoffen . . . . .	223
5.3.3.1	Aufbau der Magnetisierungskennlinien ferromagnetischer Werkstoffe . . . . .	223
5.3.3.2	Magnetisierungskennlinien magnetischer Werkstoffe beim Ummagnetisierungsvorgang oder die magnetische Hysteresis . . . . .	226
5.3.3.3	Arten und Aussteuerung von Hystereseschleifen . . . . .	227
5.4	Magnetisierungsarbeit und Magnetisierungsverluste . . . . .	229
5.4.1	Magnetisierungsarbeit . . . . .	229
5.4.2	Magnetisierungsverluste . . . . .	230
5.5	Der magnetische Kreis . . . . .	231
5.6	Kräfte im Magnetfeld . . . . .	235
5.6.1	Kräfte an magnetischen Polen . . . . .	236
5.6.2	Kräfte zwischen magnetischen Feldern . . . . .	239
5.6.2.1	Magnetflussdichte und Feldstärke des magnetischen Feldes eines stromdurchflossenen Leiters . . . . .	239
5.6.2.2	Überlagerung von magnetischen Feldern parallel verlaufender stromdurchflossener Leiter . . . . .	242
5.6.2.3	Kräfte zwischen dem magnetischen Feld eines stromdurchflossenen Leiters oder einer Spule und dem magnetischen Feld eines Dauermagneten – Motorprinzip . . . . .	243
5.6.2.4	Kräfte zwischen den magnetischen Feldern stromdurchflossener Leiter . . . . .	246
5.7	Magnetische Induktion oder Spannungserzeugung durch Veränderung magnetischer Felder . . . . .	248
5.7.1	Bewegung eines stromlosen Leiters im konstanten magnetischen Feld – Generatorprinzip . . . . .	249
5.7.2	Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im konstanten magnetischen Feld – Generatorprinzip . . . . .	250
5.7.3	Induktionsgesetz bei bewegten Leitern und Spulen im konstanten magnetischen Feld . . . . .	251
5.7.3.0	Einführung . . . . .	251
5.7.3.1	Induktionsgesetz bei geradliniger Bewegung eines Leiters oder einer Spule . . . . .	251
5.7.3.2	Induktionsgesetz bei Rotationsbewegung eines Leiters oder einer Spule . . . . .	254
5.7.4	Induktionsgesetz bei ruhenden Leitern oder Spulen im zeitlich veränderlichen magnetischen Feld . . . . .	255
5.7.4.1	Induktivität, die magnetische Kenngröße einer Spule . . . . .	257
5.7.4.2	Energie des Magnetfeldes . . . . .	260
5.7.4.3	Reihen- und Parallelschaltung von Induktivitäten . . . . .	261
5.7.4.4	Schaltvorgänge an Spulen . . . . .	262

5.7.5 Transformatorprinzip . . . . .	264
Praxisorientierte Lernaufgabe . . . . .	270
6 Grundsaltungen für Wechselspannungen . . . . .	271
6.1 Darstellung und Kenngrößen von Wechselspannung und Wechselstrom . . . . .	271
6.1.0 Einführung . . . . .	271
6.1.1 Zeiger- und Liniendiagramme . . . . .	271
6.1.2 Kenngrößen von Wechselspannung und Wechselstrom . . . . .	273
6.1.3 Zeitliche Betrachtung von Wechselspannungen und Wechselströmen . . . . .	278
6.1.4 Überlagerung von Wechselspannungen und die Fourier-Analyse . . . . .	281
6.2 Verhalten der idealen Grundschaltelemente an Wechselspannung . . . . .	285
6.2.1 Idealer Wirkwiderstand an Wechselspannung . . . . .	285
6.2.2 Idealer Kondensator an Wechselspannung . . . . .	286
6.2.3 Ideale Spule an Wechselspannung . . . . .	293
6.3 Komplexe Rechnung und die Anwendung im Wechselstromkreis . . . . .	298
6.3.1 Komplexe Zahlen – Komplexe Zahlenebene – Rechenregeln . . . . .	298
6.3.2 Elektrische Größen in komplexer Schreibweise . . . . .	301
6.4 Reihenschaltungen im Wechselstromkreis . . . . .	302
6.4.1 Widerstand und Kondensator . . . . .	307
6.4.2 Widerstand und Spule . . . . .	307
6.4.3 Kondensator und Spule . . . . .	310
6.4.4 Widerstand, Kondensator und Spule . . . . .	312
6.5 Parallelschaltungen im Wechselstromkreis . . . . .	316
6.5.1 Widerstand und Kondensator . . . . .	316
6.5.2 Widerstand und Spule . . . . .	320
6.5.3 Kondensator und Spule . . . . .	323
6.5.4 Widerstand, Kondensator und Spule . . . . .	325
6.6 Gemischte Schaltungen im Wechselstromkreis – Impedanzschaltungen . . . . .	328
6.7 Resonanz im Wechselstromkreis . . . . .	337
6.7.1 Begriff der Grenzfrequenz . . . . .	337
6.7.2 Begriff der Resonanz und der Resonanzfrequenz . . . . .	340
6.7.3 Reihenresonanzkreis . . . . .	341
6.7.3.0 Einführung . . . . .	341
6.7.3.1 Idealer Reihenresonanzkreis . . . . .	341
6.7.3.2 Realer Reihenresonanzkreis . . . . .	343
6.7.4 Parallelresonanzkreis . . . . .	345
6.7.4.0 Einführung . . . . .	345
6.7.4.1 Idealer Parallelresonanzkreis . . . . .	345
6.7.4.2 Realer Parallelresonanzkreis . . . . .	346
6.8 Impedanzschaltungen und das Verhalten bei variablen Frequenzen – Ortskurven . . . . .	348
6.8.0 Einführung . . . . .	348
6.8.1 Ortskurven von Reihenschaltungen . . . . .	349
6.8.2 Ortskurven von Parallelschaltungen . . . . .	351
6.8.3 Ortskurve einer gemischten Impedanzschaltung . . . . .	353
6.9 Elektrische Arbeit und elektrische Leistung im Wechselstromkreis . . . . .	357
6.9.1 Leistung im Wechselstromkreis . . . . .	357
6.9.1.0 Einführung . . . . .	357
6.9.1.1 Wirkleistung . . . . .	357
6.9.1.2 Blindleistung . . . . .	360
6.9.1.3 Wirk-, Blind- und Scheinleistung im Wechselstromkreis . . . . .	361
6.9.2 Blindleistungskompensation oder Leistungsfaktorverbesserung . . . . .	367
6.9.3 Arbeit im Wechselstromkreis . . . . .	370
Praxisorientierte Lernaufgaben . . . . .	372

7 Mehrphasenwechselspannung — Mehrphasenwechselstrom (Drehstrom) . . . . .	378
7.1 Erzeugung von Mehrphasenwechselspannung . . . . .	378
7.2 Dreiphasenwechselspannung . . . . .	379
7.2.1 Spannungserzeuger in Sternschaltung . . . . .	381
7.2.2 Spannungserzeuger in Dreieckschaltung . . . . .	382
7.2.3 Verbraucher in Sternschaltung . . . . .	382
7.2.4 Verbraucher in Dreieckschaltung . . . . .	385
7.3 Spannungsnetze — öffentliche Netze . . . . .	389
Praxisorientierte Lernaufgaben . . . . .	392

## Bauelemente der Elektrotechnik — Grundschaltelemente

Vorbemerkung zu den Kapiteln 8 bis 10 . . . . .	395
8 Lineare technische Widerstände . . . . .	397
8.0 Einleitung . . . . .	397
8.1 Bauarten technischer Widerstände . . . . .	397
8.1.0 Einführung . . . . .	397
8.1.1 Festwiderstände . . . . .	397
8.1.1.0 Einführung . . . . .	397
8.1.1.1 Schichtwiderstände . . . . .	398
8.1.1.2 Drahtwiderstände . . . . .	399
8.1.2 Stellbare Widerstände (Potenziometer) . . . . .	400
8.1.2.0 Einführung . . . . .	400
8.1.2.1 Schichtpotenziometer . . . . .	400
8.1.2.2 Drahtpotenziometer . . . . .	401
8.2 Daten und Normen technischer Widerstände . . . . .	402
8.2.1 Technische Daten . . . . .	402
8.2.2 Normung . . . . .	403
8.2.2.1 Normung der Widerstandswerte . . . . .	403
8.2.2.2 Normung der Kennzeichnung . . . . .	404
9 Technische Kondensatoren . . . . .	409
9.1 Bauarten technischer Kondensatoren . . . . .	409
9.1.0 Einführung . . . . .	409
9.1.1 Wickelkondensatoren . . . . .	409
9.1.1.0 Einführung . . . . .	409
9.1.1.1 MP-Kondensatoren . . . . .	409
9.1.1.2 MK-Kondensatoren . . . . .	410
9.1.2 Keramik Kondensatoren . . . . .	411
9.1.3 Elektrolytkondensatoren . . . . .	411
9.1.3.0 Einführung . . . . .	411
9.1.3.1 Aluminium-Elektrolytkondensatoren . . . . .	411
9.1.3.2 Tantal-Elektrolytkondensatoren . . . . .	412
9.1.4 Stellbare Kondensatoren (Drehko) . . . . .	413
9.2 Daten und Normen technischer Kondensatoren . . . . .	413
9.2.1 Technische Daten . . . . .	413
9.2.2 Normung . . . . .	415
9.2.2.1 Normung der Kapazitätswerte . . . . .	415
9.2.2.2 Normung der Kennzeichnung . . . . .	416

10 Technische Spulen . . . . .	419
10.1 Bauarten technischer Spulen . . . . .	419
10.1.0 Einführung. . . . .	419
10.1.1 Luftspulen . . . . .	419
10.1.2 Spulen mit Kern aus magnetischem Werkstoff . . . . .	424
10.2 Daten technischer Spulen . . . . .	426
Praxisorientierte Lernaufgaben. . . . .	426
Lösungen aller Übungen und Lernaufgaben . . . . .	428
Literaturhinweise:	
I. Fachschulen für Technik. . . . .	471
II. Fachhochschulen. . . . .	471
Sachwortverzeichnis. . . . .	473