

HANSER



Leseprobe

zu

„Elektrotechnik für Ingenieure – Übungsbuch“

von Rainer Ose

Print-ISBN: 978-3-446-46444-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46502-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46444-5>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Übungsbuch wurde als studienbegleitendes Material für Studierende aller technischen Studienrichtungen an Hochschulen/Fachhochschulen konzipiert. Es ist nach Vorbild des Lehrbuchs [14] aufgebaut und gliedert sich in die drei klassischen Grundlagenbereiche: Gleichstromlehre – Wechselstromtechnik – Elektrische und magnetische Felder.

Im Vordergrund stehen Betrachtungen zu Vorgängen in elektrischen Stromkreisen aus der Sicht der Schaltungstechnik. Damit soll das Ziel verfolgt werden, das in den Vorlesungen „Grundlagen der Elektrotechnik“ und im Lehrbuch vermittelte Grundlagenwissen in anwendungsbereiter Form für die nachfolgenden Lehrveranstaltungen bereitzustellen.

In jedem Kapitel befinden sich Beispiele zur Erklärung typischer Erscheinungen der Elektrotechnik sowie zur Demonstration von Berechnungsmethoden und -verfahren. Sie werden in allgemeiner Form vorgerechnet und in vielen Fällen mit Zahlenwerten und einer Probe erweitert. Damit gelingt es den Anwendern, den Lösungsweg nachzuvollziehen und den Aufgabentyp selbstständig zu bearbeiten.

Zur Unterstützung der selbstständigen Bearbeitung dienen Modelle und Analogien, die komplizierte Sachverhalte in möglichst einfacher und leicht verständlicher Form darlegen. Ausgewählte Funktionsverläufe, Prinzipskizzen und Ersatzschaltungen sollen zur Erhöhung der Anschaulichkeit beitragen.

Die 1. Auflage des Übungsbuchs entstand infolge der vollständigen Überarbeitung und Erweiterung der 5. Auflage des Lehrbuchs. Alle Berechnungsbeispiele befinden sich jetzt in erweiterter Form im vorliegenden Übungsbuch und wurden durch viele neue Beispiele ergänzt. Das Übungsbuch enthält zusätzlich einen Anhang mit Übungsaufgaben. Die Lösungen sind über das Internet zugänglich.

Wolfenbüttel, im August 2020

Rainer Ose
e-mail: r.ose@ostfalia.de

Hinweise zur Arbeit mit diesem Buch

Das vorliegende Übungsbuch sollte in Kombination mit dem Lehrbuch bearbeitet werden. Aus diesem Grund wurde am Anfang jedes Kapitels eine kurze Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen dargestellt. Es folgen Fragen, die sich die Bearbeiter selbst beantworten sollten. Machen Sie sich zunächst mit den theoretischen Grundlagen vertraut. Dann können Sie die Beispiele des Übungsbuchs durcharbeiten. Diese Beispiele tragen zur Erhöhung des Verständnisses für die betrachteten Stoffgebiete bei. Das gilt auch für die selbstständige Bearbeitung der Übungsaufgaben im Anhang.

• Berechnungsbeispiele:

Die Berechnungsbeispiele dienen dazu, ein grundlegendes Verständnis für den im Lehrbuch behandelten Sachverhalt mit einem praxisnahen und überschaubaren Beispiel bzw. mit einer Verständnis-aufgabe zu entwickeln. Sie wurden für jedes Kapitel des Lehrbuchs erstellt und behandeln ausgewählte Themen, zu denen es eventuell zusätzlichen Erklärungsbedarf geben könnte. Dazu zählen das Aufstellen allgemeiner Lösungsansätze und die Durchführung einfacher Berechnungen sowie die Vermittlung von Vorstellungen über ausgewählte Erscheinungen der Elektrotechnik.

• Übungsaufgaben: (Lösungen: https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/ose/Buch_ET_6A/)

Im Anhang des Buches befinden sich Übungsaufgaben. Sie sollen von den Studierenden möglichst selbstständig abgearbeitet werden. Übungsaufgaben werden im Sinne einer zielgerichteten Prüfungsvorbereitung mit der folgenden Kennzeichnung dem jeweiligen Grundlagenbereich zugeordnet:

ÜA_1 = Gleichstromlehre, ÜA_2 = Wechselstromtechnik und ÜA_3 = Felder.

Die meisten Beispiele und Übungsaufgaben können mit Simulationsprogrammen nachvollzogen werden. Entsprechende Hinweise zur Arbeit mit PSpice findet man bei Bedarf in [11] – Kap. 1.

Inhaltsverzeichnis

I Gleichstromlehre

1	Elektrische Grundgrößen	12
1.1	Berechnung Leitungsquerschnitt	13
1.2	Vergleich Leiterwerkstoffe	13
1.3	Quellen- und Verbraucher-Charakteristik	14
1.4	Belastete Spannungsquelle	15
1.5	Temperaturabhängigkeit von Leiterwerkstoffen	16
2	Gesetze zur Berechnung elektrischer Stromkreise	18
2.1	Lastfälle im Grundstromkreis	19
2.2	Unabhängigkeit von Knotengleichungen	20
2.3	Vollständige Leistungsbilanz	21
3	Lineare elektrische Gleichstromkreise	22
3.1	Abgleich eines Widerstandswertes	23
3.2	Einstellung Spannungsverhältnis	23
3.3	Berechnung einer gemischten Schaltung A	24
3.4	Berechnung einer gemischten Schaltung B	25
3.5	Einstellung Spannungsabfall	25
3.6	Gleicher Leistungsumsatz	27
3.7	Überlastung von Widerständen	27
3.8	Leistungsaufnahme eines Lastwiderstandes	28
3.9	Leistung und Wirkungsgrad	29
3.10	Lampe im Nennbetrieb	30
3.11	Funktionsverläufe im Grundstromkreis	31
4	Grundschaltungen der elektrischen Messtechnik	32
4.1	Erweiterung des Strommessbereichs	33
4.2	Austausch von Messinstrumenten	33
4.3	Belastungskennlinie eines Akkumulators	34
4.4	Abgleich einer Brückenschaltung	36
4.5	Gesamtwiderstand einer nicht abgeglichenen Brücke	36
4.6	Nicht abgeglichene Brückenkonfiguration	38
5	Verfahren zur Berechnung linearer Netzwerke	41
5.1	Masche eines Netzwerkes	42
5.2	Zweigströme über KIRCHHOFF	42
5.3	Gleichungssystem nach KIRCHHOFF	43
5.4	Dimensionierung Emitterschaltung	44

5.5	HELMHOLTZscher Überlagerungssatz A	45
5.6	HELMHOLTZscher Überlagerungssatz B	46
5.7	HELMHOLTZscher Überlagerungssatz C	46
5.8	Zweipoltheorie A	47
5.9	Spannungsquellen-Ersatzschaltung	47
5.10	Leerlaufspannung	48
5.11	Kettenschaltung – Zweipoltheorie	49
5.12	Brückenschaltung – Zweipoltheorie	50
5.13	Zweipoltheorie B	51
5.14	Zweipoltheorie C	52
5.15	Umlaufanalyse	53
5.16	Umlaufanalyse – Leistungsbilanz	55
5.17	Vergleich der Analyseverfahren	56
5.18	Knotenanalyse	58
5.19	Komplexbeispiel	59
6	Stromkreise mit nichtlinearen Bauelementen	64
6.1	Bestimmung des Arbeitspunktes	65
6.2	Brücke mit Dioden	66
6.3	Leistungsumsatz in Glühlampen	66
6.4	Arbeitspunkt von Glühlampe und Diode	67
6.5	Brückenschaltung zur Temperaturmessung	68
II	Wechselstromtechnik	
7	Beschreibung von Wechselgrößen	70
7.1	Symmetrische Dreieck-Impulsfolge	71
7.2	Sägezahn-Impulsfolge	72
7.3	Periodische Rechteck-Impulsfolge	73
8	Widerstände im Wechselstromkreis	75
8.1	Kapazitätsbestimmung	76
8.2	Phasenverschiebung	76
8.3	Güte einer realen Spule	77
8.4	Zeigerbilder eines realen Reihenschwingkreises	78
8.5	Zeigerbilder eines realen Parallelschwingkreises	78
8.6	Anwendung des THALES-Kreises	79
8.7	Zeigerbilder einer allgemeinen Wechselstromschaltung	80
8.8	Maßstäbliches Spannungszeigerbild	82
8.9	Prinzipzeigerbilder einer Freileitung	83
9	Berechnung von Stromkreisen bei sinusförmiger Einspeisung	85
9.1	Konstruktion eines Leitwertzeigers	86

9.2	Zeigerbild der Widerstände/Leitwerte	86
9.3	Berechnung einer allgemeinen Wechselstromschaltung A	88
9.4	Ortskurve des komplexen Widerstandes	89
9.5	Berechnung einer allgemeinen Wechselstromschaltung B	90
9.6	Berechnung eines Lastzweipols A	90
9.7	Berechnung eines Lastzweipols B	91
9.8	Anwendung der Teilerregeln	92
9.9	Ortskurve des Stromes	93
9.10	RC-Phasenschiebekette	94
9.11	HUMMEL-Schaltung	95
9.12	Wechselstrom-Paradoxon	96
9.13	Erzeugung einer definierten Phasenverschiebung A	97
9.14	Erzeugung einer definierten Phasenverschiebung B	98
9.15	Umrechnungen	99
9.16	Abgleichbarkeit einer Brücke A	100
9.17	Induktivitätsmessbrücke	100
9.18	Abgleichbarkeit einer Brücke B	101
9.19	Maßstäbliches Spannungszeigerbild	102
9.20	Einstellung gleicher Spannungszeiger	103
9.21	Anwendung des Überlagerungssatzes	104
9.22	Anwendung der Zweipoltheorie	106
9.23	Anwendung der Analyseverfahren	108
9.24	RC-Phasenschiebekette mit Analyseverfahren	109
10	Frequenzabhängigkeit der Wechselstromkreise	112
10.1	RL-Tiefpass	113
10.2	RL-Hochpass	114
10.3	Vergleich von RC- und RL-Gliedern	116
10.4	RC-Tiefpass mit Parallelwiderstand	117
10.5	Anwendung der Zweipoltheorie	118
10.6	RC-Tiefpass mit Reihenwiderstand	118
10.7	RC-Hochpass mit Parallelwiderstand	120
10.8	RC-Hochpass mit Reihenwiderstand	121
10.9	RL-Tiefpass mit Reihenwiderstand	123
10.10	RC-Tiefpass 2. Ordnung	125
10.11	Reihenschwingkreis mit realen Bauelementen	128
10.12	Parallelschwingkreis mit realen Bauelementen	129
10.13	Spannungsüberhöhung	130
10.14	Elementarer Reihenschwingkreis	130
10.15	LC-Übertragungsvierpol	133
10.16	CR-RC-Übertragungsvierpol	135
10.17	Vergleich der Berechnungsverfahren (Komplexbeispiel)	137

11	Leistungsbetrachtungen im Wechselstromkreis	141
11.1	Zeitfunktion der Leistung	142
11.2	Blindstromkompensation	142
11.3	Blindleistungskompensation	144
11.4	Maximaler Umsatz von Wirkleistung	145
11.5	Komplexe Anpassung	145
11.6	Leistungsbilanz eines Lastzweipols	146
11.7	Vollständige Leistungsbilanz A	147
11.8	Vollständige Leistungsbilanz B	149
12	Dreiphasensysteme	151
12.1	Sternschaltung Elektroherd	152
12.2	Umrechnung Dreieck – Stern	153
12.3	Verbraucher-Dreieckschaltung A	155
12.4	Verbraucher-Dreieckschaltung B	156
12.5	Verbraucher-Dreieckschaltung C	158
12.6	Symmetrierung einer Verbraucher-Dreieckschaltung	159
12.7	Stromzeigerbild einer Verbraucher-Dreieckschaltung	161
12.8	Betriebskapazität eines Gürtelkabels	163
III	Elektrische und magnetische Felder	
13	Feldbegriff	165
13.1	Elektrisches Potential – Potentialbezugspunkt	166
13.2	Elektrisches Potential – Bezugswert	168
13.3	Wert einer Äquipotentiallinie	170
14	Stationäres elektrisches Strömungsfeld	171
14.1	Messtechnische Beschreibung von Feldmodellen	172
14.2	Einfache Feldstärkemessung	173
14.3	Leitfähiger Bügel	174
14.4	Bezugspunkt im zylindersymmetrischen Feld	176
14.5	Übergangswiderstand eines Halbkugelerders	177
14.6	Zusammenwirken von zwei Halbkugelerdern	178
14.7	Schrittspannung eines Vollkugelerders	180
14.8	Feldstärkeverlauf eines Vollkugelerders	181
15	Elektrostatisches Feld	183
15.1	Übung zur Kapazitätsberechnung	184
15.2	Koaxialleitung	185
15.3	Zylinderkondensator mit geschichtetem Dielektrikum	186
15.4	Maximale Feldstärke	187

15.5	Drei Punktladungen im Raum	187
15.6	Gespeicherte Energie	188
15.7	Kapazität einer Freileitung	189
15.8	Kräfte auf Schichtflächen	191
16	Elektrisches Verhalten des Kondensators	192
16.1	Dimensionierung eines Kondensators	193
16.2	Gemischte Kondensatorschaltung	193
16.3	Laden eines Kondensators	194
16.4	Laden und Entladen	195
16.5	Ausgleichsvorgänge in einer Reihenschaltung	196
16.6	Kapazitives Netz A	198
16.7	Kapazitives Netz B	200
16.8	Kapazitives Netz C	201
16.9	Kapazitives Netz D	202
16.10	Brückenähnliches kapazitives Netz	203
16.11	Kapazitives Netz mit zwei Quellen	205
17	Stationäres magnetisches Feld	207
17.1	Permeabilität nichtferromagnetischer Stoffe	208
17.2	Induktivität einer Zylinderspule	208
17.3	Vergleich unterschiedlicher Kernmaterialien	209
17.4	Ringspule mit Kunststoffkern	210
17.5	Ringspule aus Dynamoblech	212
17.6	Geteilter ferromagnetischer Ring	213
17.7	Berechnung eines Rechteckkerns	214
17.8	Verzweigter magnetischer Kreis A	217
17.9	Verzweigter magnetischer Kreis B	218
17.10	Verzweigter magnetischer Kreis C	219
17.11	Feldstärke eines stromdurchflossenen Rohrs	221
17.12	Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern	222
17.13	Messung mit einer HALL-Sonde	223
17.14	Berechnung der Magnetisierungskennlinie	225
17.15	Induktivität einer Doppelleitung	226
17.16	Dimensionierung eines Ferritropfkerns	227
18	Zeitlich veränderliches magnetisches Feld	229
18.1	Bewegungsinduktion – Radialfeld	230
18.2	Bewegungsinduktion – induzierte Spannung	231
18.3	Ruheinduktion	233
18.4	Leiter im Magnetfeld	235
18.5	Selbst- und Gegeninduktivität	235
18.6	Wicklungssinn	237

18.7	Induktivität einer Freileitung	237
18.8	Speicherung magnetischer Energie	240
18.9	Hystereseschleife – Oszilloskop	240
18.10	Hystereseschleife – Simulation	242
19	Elektrisches Verhalten der Spule	243
19.1	Verkoppelte Induktivitäten	244
19.2	Reihen- und Parallelschaltung	246
19.3	Induktivitätsberechnung	246
19.4	Schaltvorgänge in einer RL-Kombination	248
19.5	Umschalten bei Vormagnetisierung	249
19.6	Leerlauf -Eingangswiderstand	252
19.7	Leerlauf und Kurzschluss beim Trafo	253
19.8	Lastfälle beim Transformator	254
19.9	Zeigerbild des Transformators	256
20	Wechselwirkungen	257
20.1	Ladungsbewegungen im pn-Übergang	258
20.2	Plattenkondensator – Verschiebungsstrom	260
20.3	Wirbelströme	262
20.4	Grundbeziehungen	265
	Übungsaufgaben	266
	Literaturverzeichnis	289
	Sachwortverzeichnis	290
	Formelzeichenverzeichnis	

1 Elektrische Grundgrößen

• **Schwerpunkte:**

- ⇒ Alle physikalischen Zustände, Prozesse und Erscheinungen, die in der Elektrotechnik auftreten, werden durch ruhende oder bewegte elektrische Ladungen verursacht.
- ⇒ Die elektrische Stromstärke i beschreibt einen Ladungstransport pro Zeiteinheit.
- ⇒ Die Richtung des elektrischen Stromes ist mit $I > 0$ A gegen die Bewegungsrichtung der Elektronen definiert und wird mit einem Richtungspfeil gekennzeichnet.
- ⇒ Der elektrische Strom ist eine in sich geschlossene Erscheinung.
- ⇒ Das elektrische Potential φ ist ein Maß für das auf die Ladung bezogene Energieniveau eines Punktes in einem elektrischen Stromkreis.
- ⇒ Die elektrische Spannung beschreibt die Differenz der Potentiale zweier Punkte in einem elektrischen Stromkreis.
- ⇒ In einem elektrischen Stromkreis muss zwischen zwei verschiedenen Zählpfeilsystemen unterschieden werden: Quellen-Zählpfeilsystem und Verbraucher-Zählpfeilsystem.
- ⇒ Der ohmsche Widerstand R beschreibt die Fähigkeit eines stofflichen Gebildes zur Begrenzung des elektrischen Stromes.
- ⇒ Der elektrische Leitwert G ergibt sich aus dem Kehrwert des ohmschen Widerstandes R .

• **Lernziele:**

Entwickeln Sie zu den genannten Schwerpunkten ein grundlegendes Verständnis. Machen Sie sich die verwendeten Fachbegriffe klar. Formulieren Sie sich einfache Fragen als Selbsttest und beantworten Sie diese Fragen mit eigenen Formulierungen.

Beispiele zu Fragen zum Kapitel 1:

- ☞ Warum werden für den Strom verschiedene Schreibweisen (Klein- oder Großbuchstabe) verwendet?
- ☞ Warum ist der elektrische Strom eine in sich geschlossene Erscheinung?
- ☞ Warum ist das elektrische Potential keine Spannung? Wie groß ist die Spannung in einem Punkt?
- ☞ Was ist aus der Sicht des Stromes der Unterschied zwischen einem offenen und einem geschlossenen Stromkreis?
- ☞ In welchem Zählpfeilsystem haben die Pfeile von U und I die gleiche Richtung?
- ☞ Was ist der Unterschied zwischen einem Widerstand und einem Leitwert?

Arbeiten Sie die folgenden Berechnungsbeispiele und Übungsaufgaben durch. Versuchen Sie zunächst, einen eigenen Lösungsweg zu finden. Vergleichen Sie dann Ihren Ansatz mit dem vorgegebenen Lösungsweg. Häufig sind mehrere Lösungswege möglich.

Berechnungsbeispiel 1.1: Berechnung Leitungsquerschnitt

Für ein Starter-Hilfskabel soll ein geeigneter Leitungsquerschnitt gewählt werden. Es besteht die Forderung, dass der Gesamtwiderstand des Kabels (ohne die Polzangen) einen Wert von 10 mΩ nicht überschreiten darf. Die beiden Einzelkabel haben eine Länge von je 3,5 m (also: $l_{\text{ges}} = 7$ m). Es steht Aluminium-Kabel mit folgenden Querschnitten zur Verfügung: 6 mm², 10 mm², 16 mm², 25 mm² und 35 mm².

Zur Berechnung verwenden wir Gleich. (1.6). Tabelle B_1.1 liefert die erforderliche Information zum spezifischen elektrischen Widerstand von Aluminium: $\rho = \rho_{\text{Al}} = 0,028 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

$$A_1 = 6 \text{ mm}^2: \quad R_1 = \rho \cdot \frac{l}{A_1} = 0,028 \cdot \frac{2 \cdot 3,5}{6} \Omega = 32,67 \text{ m}\Omega$$

$$A_2 = 10 \text{ mm}^2: \quad R_2 = \rho \cdot \frac{l}{A_2} = 0,028 \cdot \frac{2 \cdot 3,5}{10} \Omega = 19,6 \text{ m}\Omega$$

$$A_3 = 16 \text{ mm}^2: \quad R_3 = \rho \cdot \frac{l}{A_3} = 0,028 \cdot \frac{2 \cdot 3,5}{16} \Omega = 12,25 \text{ m}\Omega$$

$$A_4 = 25 \text{ mm}^2: \quad R_4 = \rho \cdot \frac{l}{A_4} = 0,028 \cdot \frac{2 \cdot 3,5}{25} \Omega = 7,84 \text{ m}\Omega$$

$$A_5 = 35 \text{ mm}^2: \quad R_5 = \rho \cdot \frac{l}{A_5} = 0,028 \cdot \frac{2 \cdot 3,5}{35} \Omega = 5,6 \text{ m}\Omega$$

Der Querschnitt $A_4 = 25 \text{ mm}^2$ erfüllt bereits die Forderung der Aufgabenstellung. Der Querschnitt mit $A_5 = 35 \text{ mm}^2$ würde bei einer technischen Realisierung zusätzliche Kosten verursachen.

Berechnungsbeispiel 1.2: Vergleich Leiterwerkstoffe

Für eine Energie-Übertragungsleitung soll eine Vergleichsrechnung angestellt werden. Solche Leitungen werden in der Praxis als Bündel realisiert. Sie bestehen aus Stahlseilen, die mit Aluminiumadern umseilt werden (Verbundseile). In der Vergleichsrechnung geht es lediglich um den Materialeinsatz. Somit kann von einem vollen Leiterbündel aus gleichem Material ausgegangen werden.

Bestimmen Sie den ohmschen Widerstand eines Leiters mit 1 km Länge und $A = 100 \text{ mm}^2$ für Kupfer, Aluminium und Eisen bei Raumtemperatur.

Zur Berechnung verwenden wir wieder Gleich. (1.6). Tabelle B_1.1 liefert die erforderliche Information zur spezifischen elektrischen Leitfähigkeit des verwendeten Leitermaterials.

$$R_{\text{Cu}} = \frac{l}{\kappa_{\text{Cu}} \cdot A} = \frac{1000}{56 \cdot 100} \Omega = \frac{10}{56} \Omega \approx 178,6 \text{ m}\Omega$$

$$R_{\text{Al}} = \frac{l}{\kappa_{\text{Al}} \cdot A} = \frac{1000}{36 \cdot 100} \Omega = \frac{10}{36} \Omega \approx 277,8 \text{ m}\Omega \quad \text{und:} \quad R_{\text{Fe}} = \frac{l}{\kappa_{\text{Fe}} \cdot A} = \frac{1000}{10 \cdot 100} \Omega = 1 \Omega$$

Tabelle B_1.1 zeigt in einer kleinen Übersicht die Werte von ρ und κ für bekannte Werkstoffe.

Tabelle B_1.1: Spezifische elektrische Leitfähigkeit ausgewählter Werkstoffe bei 20 °C

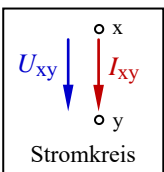
Werkstoff ($T = 293 \text{ K}$)	ρ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	κ in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Silber	0,016	62
Gold	0,022	44
Kupfer	0,018	56
Aluminium	0,028	36
Zink	0,06	16,7
Messing	0,07	14,3
Eisen	0,1	10

Es ist deutlich erkennbar, dass für die technische Realisierung eines Leiters (Spezialfälle ausgeschlossen) aus wirtschaftlicher Sicht nur Kupfer und Aluminium infrage kommen können. Der Einsatz entsprechender Legierungen ist zur Lösung spezieller Aufgabenstellungen denkbar.

Das Stahlseil eines Verbundseils trägt nicht maßgeblich zur Leitfähigkeit bei. Sein Einsatz dient lediglich zur mechanischen Verfestigung des Übertragungssystems.

Berechnungsbeispiel 1.3: Quellen- und Verbraucher-Charakteristik

In einem elektrischen Stromkreis befindet sich zwischen den Punkten x und y ein beliebiges Element. Für dieses Element werden Zählpfeile (also willkürliche Festlegung der Richtung) zugeordnet. Interpretieren Sie die folgenden Messwerte / Werte einer Berechnung bezüglich des Verhaltens des betrachteten Bauelementes (Quellen- oder Verbraucher-Charakteristik):



a) $U_{xy} = +5 \text{ V}$ und $I_{xy} = +12 \text{ mA}$

b) $U_{xy} = +5 \text{ V}$ und $I_{xy} = -12 \text{ mA}$

c) $U_{xy} = -5 \text{ V}$ und $I_{xy} = +12 \text{ mA}$

d) $U_{xy} = -5 \text{ V}$ und $I_{xy} = -12 \text{ mA}$

Bild B_1.1: Zählpfeilsituation im Berechnungsbeispiel 1.3

Fall a): Verbraucher-Charakteristik. Das Element nimmt Leistung auf. Die Zählpfeile von Spannung und Strom sind zugleich Richtungspfeile.

Fall b): Quellen-Charakteristik. Das Element gibt Leistung ab. Der Zählpfeil der Spannung ist zugleich ein Richtungspfeil.

Fall c): Quellen-Charakteristik. Das Element gibt Leistung ab. Der Zählpfeil des Stromes ist zugleich ein Richtungspfeil.

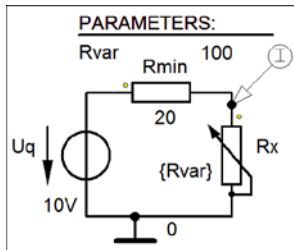
Fall d): Verbraucher-Charakteristik. Das Element nimmt Leistung auf. Die Zählpfeile von Spannung und Strom sind keine Richtungspfeile.

Wir erkennen, dass die willkürliche Festlegung eines Richtungssinnes (Zählpfeil) für die Auswertung des Ergebnisses einer Berechnung / Messung völlig ausreicht. Man muss lediglich die Vorzeichen im Zusammenhang mit den Zählpfeilen richtig interpretieren.

Berechnungsbeispiel 1.4: Belastete Spannungsquelle

Eine Spannungsquelle mit $U_q = 10\text{ V}$ wird mit einem veränderlichen Widerstand R_a belastet. Der Widerstand ändert seinen Wert von $R_{\min} = 20\ \Omega$ bis $R_{\max} = 420\ \Omega$ ($R_a = R_{\min} + R_{\text{var}}$). Stellen Sie den Verlauf des Stromes als Funktion des Widerstandes $I = f(R_a)$ grafisch dar. Verwenden Sie dazu ein geeignetes Simulationsprogramm.

Wir entscheiden uns für den Einsatz von PSPICE. Die Simulationsschaltung besteht aus einer Spannungsquelle (VDC), einem Festwiderstand R_{\min} und einem variablen Widerstand R_x {Rvar}. Zunächst legen wir die Festwerte für die Bauelemente fest ($U_q = 10\text{ V}$ und $R_{\min} = 20\ \Omega$).



Der variable Widerstand $R_x = R_{\text{var}}$ wird in seiner PartName-Liste mit $\text{VALUE}=\{\text{Rvar}\}$ festgelegt. In der Parameter-Liste ordnen wir ihm einen Namen ($\text{NAME1}=\text{Rvar}$) und einen Wert aus seinem Wertevorrat ($\text{VALUE1}=100$) zu. Nun können wir den Sweep festlegen. Im Analysis-Setup-Fenster wählen wir DC-Sweep () und nehmen folgende Einstellungen vor:

⊙ Global Parameter; ⊙ Linear; Name: Rvar

Start Value: 0; End Value: 400; Increment: 0.1 (OK).

Zur Strommessung setzen wir den Current Marker an Pin 1 von R_x .

Bild B_1.2: Simulationsschaltung zum Berechnungsbeispiel 1.4

Nun kann die Simulation gestartet werden. PSPICE berechnet jetzt 4000 Funktionswerte (400/0,1).

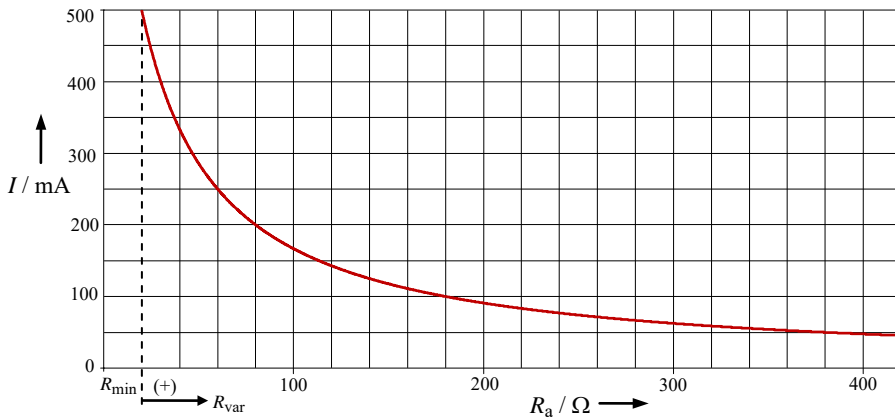


Bild B_1.3: Stromverlauf im Berechnungsbeispiel 1.4

Die Simulation des Stromverlaufs läuft von $R_a = R_{\min}$ bis $R_a = R_{\min} + R_{\text{var}}$. Der Strom bei $R_a = R_{\min}$ beträgt 500 mA. Bei $R_a = 60\ \Omega = 3R_{\min}$ ist er auf den halben Wert abgesunken.

Wir erkennen, dass mit Zunahme des Wertes des Lastwiderstandes der Strom immer kleiner wird. Bei $R_a = 400\ \Omega$ beträgt er noch ca. 50 mA. Er wird null, wenn der Lastwiderstand gegen unendlich strebt.

Wir hätten die Simulation auch ohne den zusätzlichen Widerstand R_{\min} durchführen können. Dann müssen im Analysis-Setup-Fenster folgende Einstellungen geändert werden:

Start Value: 20; End Value: 420

Berechnungsbeispiel 1.5: Temperaturabhängigkeit von Leiterwerkstoffen

Vergleichen Sie die Temperaturabhängigkeit verschiedener Widerstandswerkstoffe miteinander. Als Referenzobjekt dient der Leiterwerkstoff Kupfer mit $TK_{Cu} = 3,82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Für den Vergleich verwenden wir wieder PSPICE. Zur Simulation der Temperaturabhängigkeit eines Widerstandes dient das Element Rbreak aus der *Part*-Liste der Library BREAKOUT.SLB.

Nach der Positionierung in der Simulationsschaltung und der Festlegung des Widerstandswertes R_{20} (z.B. $R_{20} = 100 \text{ } \Omega$) wird das Element durch einen Mausklick markiert. Danach öffnet man über die Menüfolge *Edit* → *Model* das *Edit-Model*-Fenster. Durch Betätigung der Schaltfläche > Edit Instance Model (Text) < gelangt man in den Modelleditor von PSPICE, der folgende Einstellungen anzeigt:

.model Rbreak-RES

R=1

*§

TC1=3.82m

Der aktuelle Temperaturkoeffizient wird nicht angezeigt (Default: TC1=0). Durch Einfügen eines neuen Temperaturkoeffizienten in eine neue Zeile nach R=1 (z.B. für Kupfer: $TK_{Cu} = 3,82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) wird der alte TC1-Wert mit > OK < überschrieben. Nun besitzt dieses Element den neuen Temperaturkoeffizienten von Kupfer. Zur Simulation der Kennlinie $R = f(\vartheta)$ werden im *DC-Sweep*-Fenster (Main-Sweep) z.B. folgende Einstellungen vorgenommen:

- Temperature Start Value: -20
- Linear End Value: 50
- Increment: 0.1 (OK)

Der Temperatur-Sweep durchläuft jetzt in der °C-Skala einen Temperaturbereich von $\vartheta_{\min} = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$ in Schritten von 0,1 °C bis zu einem Endwert von $\vartheta_{\max} = +50 \text{ } ^\circ\text{C}$ (oder: $\Delta T = 343 \text{ K} - 273 \text{ K} = 70 \text{ K}$).

Wenn mehrere Widerstände mit unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten miteinander verglichen werden sollen, kann man zusätzlich einen DC-Nested-Sweep einfügen. Dazu werden im *DC-Nested-Sweep*-Fenster folgende Einstellungen vorgenommen (Res steht für Resistor):

- Model Parameter Model Type: Res
- Value List Model Name: Rbreak
- Param. Name: TC1
- Values: -0.6m_ -0.03m_ 0.2m (Unterstrich = Leerzeichen)

Der vorher gesetzte TC1-Wert für Kupfer wird jetzt ignoriert. Dafür gelten die folgenden Werte für den Temperaturkoeffizienten ($TK = \alpha$):

$$TK_{1,1} = -0,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad \text{für Kohle}$$

$$TK_{1,2} = -0,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad \text{für Konstantan}$$

$$TK_{1,3} = +0,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad \text{ca. für Nickelin (Nickelin: 67 % Cu; 30 % Ni; 3 % Mn).}$$

Bild B_1.4 zeigt die Simulationsergebnisse für $\vartheta_{\text{Bezug}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Das muss in PSPICE eingestellt werden.

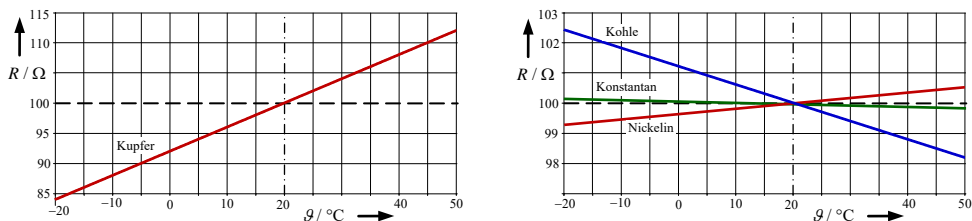


Bild B_1.4: Simulationsergebnisse zum Berechnungsbeispiel 1.5

Das simulierte Temperaturverhalten weist auf Temperaturkoeffizienten mit unterschiedlichen Vorzeichen hin. Kupfer und Nickelin haben einen positiven Temperaturkoeffizienten (PTC). Bei Kupfer ändert sich der Widerstand $R_{Cu} = f(\vartheta)$ im Vergleich zu Nickelin so stark, dass im Bild B_1.4 (links) ein anderer Widerstandsmaßstab gewählt werden musste.

Kohle und Konstantan haben einen negativen Temperaturkoeffizienten (NTC). Hier nimmt der Widerstandswert mit steigender Temperatur ab. Bei Konstantan ändert sich der Widerstandswert allerdings kaum. Konstantan (oder auch Manganin) sind demzufolge für die technische Realisierung von Messwiderständen gut geeignet, da sie ihren Widerstandswert unabhängig von Temperaturänderungen nahezu beibehalten.

Für spezielle Einsatzfälle (z.B. in einer Temperaturmessbrücke) bevorzugt man dagegen Widerstandswerkstoffe mit einem betragsmäßig großen TK -Wert, um bereits bei kleinen Temperaturänderungen eine auswertbare Widerstandsänderung zu erreichen.

Wir wollen die Eckwerte des Widerstandsverlaufes berechnen. Mit Gleich. (1.9) gilt:

$$\text{Kupfer: } R_{Cu}(-20^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 + 3,82 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (273 - 293)\text{K}] = 84,72\Omega$$

$$R_{Cu}(+50^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 + 3,82 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (323 - 293)\text{K}] = 111,46\Omega$$

$$\text{Kohle: } R_{Ko}(-20^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 - 0,6 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (273 - 293)\text{K}] = 102,4\Omega$$

$$R_{Ko}(+50^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 - 0,6 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (323 - 293)\text{K}] = 98,2\Omega$$

$$\text{Konstantan: } R_{Konst}(-20^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 - 0,03 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (273 - 293)\text{K}] = 100,12\Omega$$

$$R_{Konst}(+50^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 - 0,03 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (323 - 293)\text{K}] = 99,91\Omega$$

$$\text{Nickelin: } R_{Ni}(-20^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 + 0,2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (273 - 293)\text{K}] = 99,2\Omega$$

$$R_{Ni}(+50^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 + 0,2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (323 - 293)\text{K}] = 100,6\Omega$$

Die Berechnungsergebnisse stimmen (wie erwartet) mit den Simulationsergebnissen überein. Dabei gilt Gleich. (1.9) eigentlich nur näherungsweise. PSpice simuliert aber hier das Element Rbreak mit einem konstanten TC1-Wert.

Streng genommen müssten wir bei größeren Temperaturänderungen einen weiteren Temperaturkoeffizienten (TK_2 oder β) berücksichtigen. Gleich. (1.9) stellt lediglich eine lineare Näherung des eigentlichen nichtlinearen Verlaufes der Widerstands-Temperatur-Kennlinie dar. Exakt gilt:

$$R(T) = R_{20} \cdot [1 + TK_1 \cdot \Delta T + TK_2 \cdot (\Delta T)^2] = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot (\Delta T)^2] \quad (1.9.a)$$

Den Unterschied wollen wir anhand der Widerstandsrechnung für Kupfer mit (1.9.a) überprüfen. Es gilt: $\beta_{Cu} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-2}$.

$$R_{Cu}(-20^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 + 3,82 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (-20)\text{K} + 0,6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-2} \cdot 400\text{K}^2] = 84,96\Omega$$

$$R_{Cu}(+50^\circ\text{C}) = 100\Omega \cdot [1 + 3,82 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot (+30)\text{K} + 0,6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-2} \cdot 900\text{K}^2] = 112,0\Omega$$

Die Abweichung von unserer Näherungsrechnung liegt in der Größenordnung von +0,3% bis +0,5%. Bei kleinen Temperaturänderungen ist es demzufolge durchaus vertretbar, mit der linearen Näherung gemäß Gleich. (1.9) zu arbeiten.

2 Gesetze zur Berechnung elektrischer Stromkreise

• **Schwerpunkte:**

- ⇒ Das OHMSche Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der elektrischen Spannung und dem elektrischen Strom.
- ⇒ Dieser Zusammenhang kann über die Strom-Spannungs-Kennlinie $I = f(U)$ grafisch dargestellt werden. Im Falle eines ohmschen Widerstandes ist die Kennlinie eine Gerade.
- ⇒ Man unterscheidet zwischen einem Gleichstromwiderstand R und einem differentiellen Widerstand r .
- ⇒ Der Maschensatz sagt aus, dass die Summe aller vorzeichenbehafteten Spannungen längs eines geschlossenen Umlaufs gleich null ist.
- ⇒ Der Knotenpunktsatz sagt aus, dass die Summe aller vorzeichenbehafteten Ströme in einem Knotenpunkt gleich null ist.
- ⇒ Unter Energie versteht man das Vermögen, Arbeit zu verrichten.
- ⇒ Die Summe aller Energien in einem in sich geschlossenen System ist konstant.
- ⇒ Eine vollständige Leistungsbilanz sagt aus, dass die Summe aller vorzeichenbehafteten Leistungen in einem abgeschlossenen System gleich null ist.

• **Lernziele:**

Entwickeln Sie zu den genannten Schwerpunkten ein grundlegendes Verständnis. Machen Sie sich die verwendeten Fachbegriffe klar. Formulieren Sie sich einfache Fragen als Selbsttest und beantworten Sie diese Fragen mit eigenen Formulierungen.

Beispiele zu Fragen zum Kapitel 2:

- ☞ Warum ist bei einem ohmschen Widerstand der Gleichstromwiderstand identisch mit dem differentiellen Widerstand?
- ☞ Warum fließt in einem Zweig immer nur ein Strom?
- ☞ Warum ist in einem Knotenpunkt die Summe aller zufließenden Ströme gleich der Summe aller abfließenden Ströme?
- ☞ Warum kann man Gleich. (2.7) in der Form $P = I^2 R$ nicht direkt zur Berechnung einer Quellenleistung verwenden?
- ☞ Woran erkennt man, dass eine Quelle Leistung aufnimmt?
- ☞ Welche Vorzeichenregel repräsentiert die Gleich. (2.9) im Vergleich zur Gleich. (2.8)? Warum trägt demzufolge Gleich. (2.9) eine allgemein gültige Information?

Arbeiten Sie die folgenden Berechnungsbeispiele und Übungsaufgaben durch. Versuchen Sie zunächst, einen eigenen Lösungsweg zu finden. Vergleichen Sie dann Ihren Ansatz mit dem vorgegebenen Lösungsweg. Häufig sind mehrere Lösungswege möglich.

Berechnungsbeispiel 2.1: Lastfälle im Grundstromkreis

Ein Grundstromkreis ($U_q = 24 \text{ V}$ und $R_i = 10 \text{ }\Omega$) wird mit unterschiedlichen Widerständen belastet. Skizzieren Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie für folgende Lastwiderstände und zeichnen Sie die unterschiedlichen Arbeitspunkte ein.

Geg.: $R_{a1} = 10 \text{ }\Omega$, $R_{a2} = 20 \text{ }\Omega$, $R_{a3} = 50 \text{ }\Omega$ und $R_{a4} = 100 \text{ }\Omega$.

Wir wollen zunächst die vier Arbeitspunkte berechnen. Die Kennlinien der ohmschen Widerstände sind ja Geraden, die vom Koordinatenursprung durch den jeweiligen Arbeitspunkt verlaufen müssen.

$$R_{a1}: \quad I_1 = \frac{U_q}{R_i + R_{a1}} = \frac{24 \text{ V}}{20 \text{ }\Omega} = 1,2 \text{ A} = 1200 \text{ mA} \quad \text{und:} \quad U_{a1} = I_1 \cdot R_{a1} = 1,2 \text{ A} \cdot 10 \text{ }\Omega = 12 \text{ V}$$

$$R_{a2}: \quad I_2 = \frac{U_q}{R_i + R_{a2}} = \frac{24 \text{ V}}{30 \text{ }\Omega} = 0,8 \text{ A} = 800 \text{ mA} \quad \text{und:} \quad U_{a2} = I_2 \cdot R_{a2} = 0,8 \text{ A} \cdot 20 \text{ }\Omega = 16 \text{ V}$$

$$R_{a3}: \quad I_3 = \frac{U_q}{R_i + R_{a3}} = \frac{24 \text{ V}}{60 \text{ }\Omega} = 0,4 \text{ A} = 400 \text{ mA} \quad \text{und:} \quad U_{a3} = I_3 \cdot R_{a3} = 0,4 \text{ A} \cdot 50 \text{ }\Omega = 20 \text{ V}$$

$$R_{a4}: \quad I_4 = \frac{U_q}{R_i + R_{a4}} = \frac{24 \text{ V}}{110 \text{ }\Omega} \approx 218,2 \text{ mA} \quad \text{und:} \quad U_{a4} = I_4 \cdot R_{a4} = 21,82 \text{ V}$$

Nun können wir die Kennlinien zeichnen.

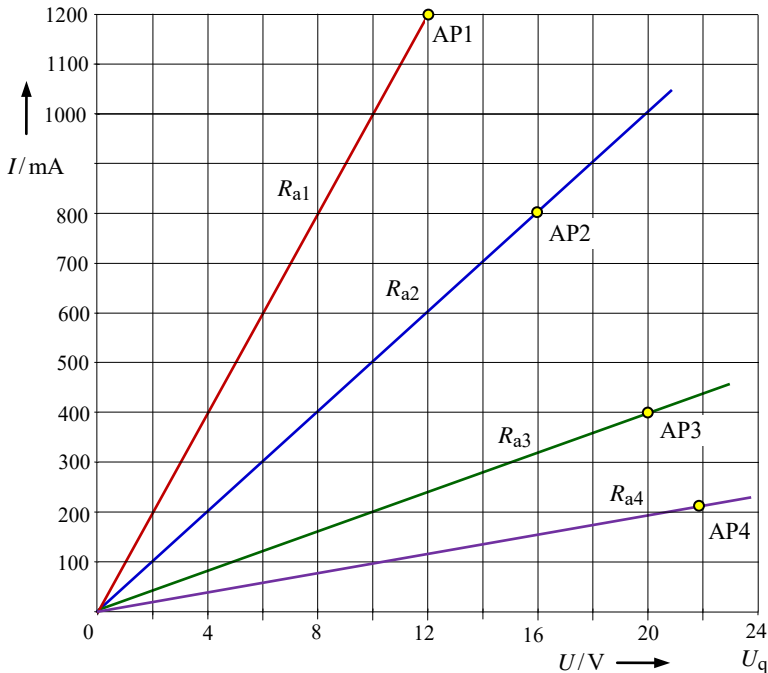


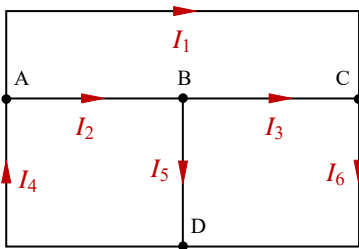
Bild B_2.1: Kennlinien zum Berechnungsbeispiel 2.1

Bild B_2.1 zeigt, dass der Anstieg der Kennlinien mit zunehmendem Lastwiderstand kleiner wird. Somit nimmt der Kehrwert des Anstieges (Lastwiderstand) zu. Es gilt: $R_{a1} < R_{a2} < R_{a3} < R_{a4}$.

Berechnungsbeispiel 2.2: Unabhängigkeit von Knotengleichungen

Weisen Sie am Beispiel des Bildes B_2.2 nach, dass bei der Anwendung des Knotenpunktsatzes nur $(k - 1)$ Gleichungen voneinander linear unabhängig sind. In diesem Bild wird lediglich die Grundstruktur (sog. Graph) der schaltungstechnischen Realisierung angegeben.

Zur Beantwortung der Frage, welche Gleichungen in das Gleichungssystem einbezogen werden (und welche nicht), wenden wir auf alle Knoten den Knotenpunktsatz an. Um Verwechslungen auszuschließen, werden die Knoten gekennzeichnet (hier: A bis D).



Mit dem Knotenpunktsatz gilt:

Knoten A: $I_4 - I_1 - I_2 = 0$

Knoten B: $I_2 - I_3 - I_5 = 0$

Knoten C: $I_1 + I_3 - I_6 = 0$

Knoten D: $I_5 + I_6 - I_4 = 0$

Bild B_2.2: Struktur zum Berechnungsbeispiel 2.2

Wenn man diese Gleichungen sortiert, entsteht folgende Übersicht:

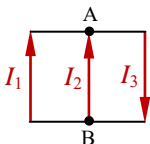
A	$-I_1$	$-I_2$		$+I_4$			0
B		$+I_2$	$-I_3$		$-I_5$		0
C	$+I_1$		$+I_3$			$-I_6$	0
D				$-I_4$	$+I_5$	$+I_6$	0

Die mit null belegten Koeffizienten wurden aus Übersichtsgründen nicht mit eingetragen. Nun ist deutlich zu sehen, dass jeder Strom zweimal (einmal positiv und einmal negativ) auftritt. Die Summe aller vier Gleichungen ergibt somit null. Eine Gleichung trägt redundante Information.

- Warum muss das so sein? Begründen Sie kurz Ihre Aussage.

Aus der Aussage „Summe aller Knotenpunktgleichungen ist gleich null“ lässt sich folgende Aussage ableiten: Diese Summe beschreibt einen Großknoten. Jede Gleichung stellt die Linearkombination mehrerer Gleichungen dieses Großknotens dar. Es sind demzufolge immer nur $(k - 1)$ Gleichungen voneinander unabhängig. Beim Aufstellen des Gleichungssystems zur Berechnung aller Zweigströme müssen wir somit einen Knoten (egal, welchen) weglassen.

Ein elementares Beispiel soll diesen Sachverhalt noch einmal verdeutlichen. Wir betrachten eine Struktur mit zwei Knoten. Von einem Knoten (z.B. A) fließt ein Strom ab – dann kann er beim zweiten Knoten (B) nur zufließen (und umgekehrt).



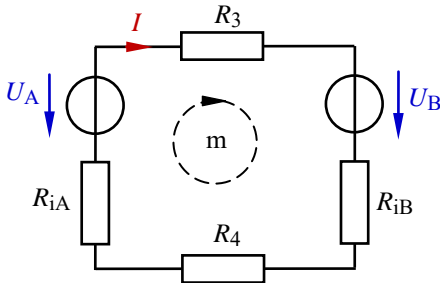
Knoten A: $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

Knoten B: $-I_1 - I_2 + I_3 = 0$

Die Gleichung (B) ist eine Linearkombination zur Gleichung (A). Durch die Multiplikation von (B) mit (-1) erhalten wir die Gleichung (A).

Berechnungsbeispiel 2.3: Vollständige Leistungsbilanz

Stellen Sie für die Schaltung im Bild B_2.3 die vollständige Leistungsbilanz (dargestellt im Quellen-Zählpfeilsystem) auf.



$$\begin{aligned} \text{Geg.: } U_A &= 24 \text{ V und } U_B = 12 \text{ V} \\ R_{iA} &= R_{iB} = 1 \Omega \\ R_3 &= R_4 = 5 \Omega \end{aligned}$$

Bild B_2.3: Schaltung zum Berechnungsbeispiel 2.3

Bei diesem Beispiel handelt es sich um eine gegenseitige Reihenschaltung zweier realer Spannungsquellen (vgl. auch Abschn. 3.4). Für den eingezeichneten Umlauf m gilt:

$$I \cdot R_3 + U_B + I \cdot R_{iB} + I \cdot R_4 + I \cdot R_{iA} - U_A = 0$$

Daraus kann der Strom I berechnet werden:

$$I = \frac{U_A - U_B}{R_{iA} + R_{iB} + R_3 + R_4} = \frac{12 \text{ V}}{12 \Omega} = 1 \text{ A}$$

Der in dieser Reihenschaltung fließende Strom wird in seiner Richtung durch die Quelle A bestimmt ($U_A > U_B$). Er fließt gegen den Spannungszählpfeil von U_A (Quellenwirkung) und in Richtung des Spannungszählpfeils von U_B . Die Quelle B nimmt demzufolge Leistung auf und wirkt im vorliegenden Fall wie ein Verbraucher. Es ergeben sich folgende Leistungen:

$$P_1 = I^2 \cdot R_{iA} = -1 \text{ W}$$

$$P_2 = I^2 \cdot R_{iB} = -1 \text{ W}$$

$$P_3 = I^2 \cdot R_3 = -5 \text{ W}$$

$$P_4 = I^2 \cdot R_4 = -5 \text{ W}$$

$$P_A = U_A \cdot (+I) = +24 \text{ W} \quad (\text{Quellenleistung})$$

$$P_B = U_B \cdot (-I) = -12 \text{ W} \quad (\text{Verbraucherleistung})$$

$$\Sigma P = 0 \text{ W} \quad \text{Die Summe aller Leistungen ist gleich null.}$$

Bei einer Darstellung im Verbraucher-Zählpfeilsystem ändern sich die Vorzeichen aller Leistungen. In diesem Fall würden wir folgende Leistungsbilanz erhalten:

$$\Sigma P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_A + P_B = 1 \text{ W} + 1 \text{ W} + 5 \text{ W} + 5 \text{ W} - 24 \text{ W} + 12 \text{ W} = 0$$

Oder nach Gleich. (2.8): $\Sigma P_q = P_A = 24 \text{ W}$ (Q-ZPS) und ΣP_v im V-ZPS:

$$\Sigma P_v = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_B = 1 \text{ W} + 1 \text{ W} + 5 \text{ W} + 5 \text{ W} + 12 \text{ W} = 24 \text{ W}$$

$$\Sigma P_q = \Sigma P_v$$

3 Lineare elektrische Gleichstromkreise

• **Schwerpunkte:**

- ⇒ Elektrische Stromkreise können eine unverzweigte Struktur (Reihenschaltung) oder eine verzweigte Struktur (Parallelschaltung bzw. gemischte Schaltung) aufweisen.
- ⇒ In einer Reihenschaltung gilt die Spannungsteilerregel: Die Spannungen verhalten sich proportional zu den Widerständen, über denen diese Spannungen abfallen.
- ⇒ In einer Parallelschaltung gilt die Stromteilerregel: Die Ströme verhalten sich umgekehrt proportional zu den Widerständen, durch die diese Ströme fließen.
- ⇒ Elektrische Quellen sind in der Lage, durch innere physikalische Effekte Ladungen zu beschleunigen.
- ⇒ Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung. Er gilt nur für eine festgelegte Trennstelle zwischen Quelle und Verbraucher.
- ⇒ Im Anpassungsfall nimmt ein Verbraucher maximale Leistung auf. Dazu ist der Lastwiderstand an den Innenwiderstand der Quelle anzupassen.
- ⇒ Bei Variation des Lastwiderstandes ändern sich lastseitig Spannung, Strom und Leistung nach nichtlinearen Funktionen, obwohl ein linearer Stromkreis betrachtet wird.
- ⇒ Ein belasteter Spannungsteiler sollte so dimensioniert werden, dass er möglichst linear arbeitet. Dazu muss der Lastwiderstand viel größer als der Stellwiderstand sein.

• **Lernziele:**

Entwickeln Sie zu den genannten Schwerpunkten ein grundlegendes Verständnis. Formulieren Sie sich einfache Aufgaben als Selbsttest und bearbeiten Sie diese Aufgaben durch Anwendung der bisher behandelten Berechnungsvorschriften.

Beispiele zu Fragen zum Kapitel 3:

- ☞ Warum ist ein zu einer Reihenschaltung parallel geschalteter Widerstand nicht an der aktuellen Spannungsteilung beteiligt?
- ☞ Warum ist ein zu einer Parallelschaltung in Reihe geschalteter Widerstand nicht an der aktuellen Stromteilung beteiligt?
- ☞ Warum fließt der Strom in einem geschlossenen Stromkreis auch durch die Quelle?
- ☞ Wie groß sind Spannung, Strom und Leistung im Anpassungsfall?
- ☞ Wie ist das Verhalten eines elektrischen Stromkreises für folgende Fälle zu interpretieren: a) Leerlauf fall b) Anpassungsfall c) Kurzschlussfall?

Arbeiten Sie die folgenden Berechnungsbeispiele und Übungsaufgaben durch. Versuchen Sie zunächst, einen eigenen Lösungsweg zu finden. Vergleichen Sie dann Ihren Ansatz mit dem vorgegebenen Lösungsweg. Jetzt sind immer mehrere Lösungswege möglich.

Sachwortverzeichnis

- Abfallzeit 234
 Abgleich 23, 36
 Abgleichbarkeit 100
 Akkumulator 34
 Amplitudenfrequenzgang 113, 130
 Amplitudenspektrum 74
 Analogie 116
 Analogietabelle 265
 Analyseverfahren 56, 108
 Anpassung, komplexe 145
 Anpassungsfall 29
 Anstiegszeit 234
 Äquipotentialfläche 175
 Äquipotentiallinie 170, 172
 Arbeitspunkt 19, 65, 212, 217
 ARON-Schaltung 152, 157, 161
 Ausgangsspannung, maximal mögliche 113
 Ausgleichsstrom 196
 Ausgleichsvorgang 196
- Bandpass-Charakteristik** 136
 Baum, vollständiger 54
 Belastungskennlinie 34
 Betriebs-Eingangswiderstand 254
 Betriebskapazität 163
 Bewegungsinduktion 230
 Bezugsknoten 58, 62, 109, 139, 166, 199, 205
 Bezugsphase 163
 Bezugspotential 172
 Bezugspunkt 172
 Bezugszeiger 76, 78, 256
 Bildbereich 104
 Blätterung 263
 Blindleistung 150
 Blindleistung, induktive 144
 Blindleistung, kapazitive 144
 Blindleistungsanteil 142
 Blindleistungskompensation 144
 Blindstrom 142
 Blindstromkompensation 142
 Brücke, abgegliche 204
 Brückenabgleich 69
 Brückengleichung 36, 149
 Brückenschaltung 36, 50, 68
 Brückenschaltung, nicht abgeglichen 36, 50
 Bügel, leitfähiger 174
- CR-RC-Übertragungsvierpol** 135
- Dämpfung** 84, 136
 Dämpfung, frequenzabhängige 114
 Dielektrikum 184, 260
 Dielektrikum, geschichtetes 186, 191
 Dielektrizitätskonstante 191
 Diffusionsspannung 259
 Diffusionsstrom 259
 Diode 66
 Doppelleitung 226
 Drehkondensator 184
 Drehstromleitung, symmetrische 164
 Dreieck-Impulsfolge, symmetrische 71
 Dreieckschaltung 37, 245
 Dreieckschaltung, symmetrische 154
 Dreieck-Stern-Transformation 36, 245
 Dreiecksverlauf, symmetrischer 233
 Dreiphasensystem 154
 Durchflutung 220, 230
 Durchflutungsgesetz 209
 Dynamoblech 212
- Effektivwert** 71, 104, 236
 Eingrabbtiefe 181
 Eisenkreis, magnetischer 209
 Eisenweglänge, mittlere 209, 217
 Eisenwiderstand 252
 Elektrolech 214
 Elementarschaltung, innere 81
 Elementarvierpol 125
 Emitterschaltung 44
 Energie, gespeicherte 188
 Energie, magnetische 209, 237, 240
 Erdkapazität 163
 Erregerstrom 214, 220, 237
 Erregerwicklung 225
 Ersatzkapazität, vorgeladene 203
 Ersatzschaltbild 106, 220
 Ersatzschaltbild, reduziertes 256
 Erweiterung, konjugiert komplexe 123
 Exponentialform 90, 105, 154
- Feld, elektrostatisches** 189
 Feld, zeitlich veränderliches magnetisches 229
 Feldbild, komplementäres 173, 175
 Feldmodell 172
 Feldpunkt 170, 190
 Feldstärke, elektrische 173, 181, 187, 259, 265

- Feldstärke, magnetische 208, 221, 225, 237, 240, 261, 265
Feldstärke, maximale 187
Feldstärkekomponente 180
Feldstärkelinie 173, 191
Feldstärkemessung 173
Feldstärkevektor 187
Feldstrom 259
Ferritopfkern 227
Flächenverhältnis 223
Flankensteilheit 125
Fluss, elektrischer 189
Fluss, magnetischer 211, 219f, 224, 230, 237, 256
Fluss, verketteter 238
Flussdichte 191
Flussdichte, elektrische 261, 265
Flussdichte, magnetische 212, 223f, 230, 233, 237, 240, 265
Flussröhre, magnetische 237
Flussverbreiterung 224
Form, kartesische 91, 128
Formfaktor 71
FOURIER-Reihe 72
Freileitung 83, 189, 237
Freileitung, leerlaufende 163
Frequenz, normierte 116
Frequenzgang, komplexer 113, 118, 134, 137
Funktion, asymmetrische 72
Funktionsverlauf 31
- Gamma-Ersatzschaltbild** 83
Gamma-Vierpol 125
Gegeninduktivität 233, 235
Generatorleistung, komplexe 157
Generatorstrang 162
Generator-Strangspannung 164
Gesamtinduktivität 244
Geschwindigkeitsvektor 231
Gleichanteil 72
Gleichrichtwert 71
Gleichstromwiderstand 30, 66
Glühlampe 65
Graph 54
Grenzfrequenz 113, 128
Grenzkreisfrequenz 116
Großknoten 20, 42, 162
Grunddämpfung 117, 122
Grundstromkreis 19, 31
Gürtelkabel 163
Güte 77, 131
- Halbkugelerder** 177
HALL-Sonde 223
HALL-Spannung 224
Hauptfeldspannung 256
Heißleiter 69
HELMHOLTZscher Überlagerungssatz 45, 61, 104
HOPKINSONSches Gesetz 218
HUMMEL-Schaltung 95
Hystereseschleife 240
- Imaginärteil** 89, 127
Impulsdauer 249
Induktionsgesetz 238
Induktivität 76, 208, 226, 237
Induktivität, äußere 238
Induktivität, innere 238
Induktivität, längenbezogene 227
Induktivität, verkoppelte 244
Induktivitätsbelag 83, 227
Induktivitätsmessbrücke 100
Innenwiderstand 31, 33, 61, 106, 152, 195
Integrierglied 241
Inversionskreis 86
- Kapazität** 98, 117, 185, 189
Kapazität, längenbezogene 185
Kapazität, variable 184
Kapazitätsbelag 83
Kapazitätsberechnung 184
Kapazitätsbestimmung 76
Kapazitätsmessbrücke 101
Kennlinie, idealisierte 68
Kernquerschnitt 209, 219
Kettenparameter 140
Kettenschaltung 49, 111, 125
KIRCHHOFFSche Sätze 43
Klemmenspannung 35
Klirrfaktor 73
Knoten 166
Knoten, virtueller 139, 170
Knotenanalyse 57, 109, 139, 166, 199, 205
Knotengleichung 20
Knotenleitwert 58
Knotenpotential 57, 63, 199
Knotenpotentialverfahren 139
Knotenpunkt 43, 53
Knotenpunktsatz 20, 40, 59, 78, 146, 155, 161, 194, 220
Koaxialleitung 185

- Koeffizientenschema 54, 108, 139, 166, 199, 204
 Kompensationskondensator 142
 Kondensator 76, 188, 193, 201
 Kondensatorschaltung, gemischte 193
 Kondensatorspannung 202
 Kontinuitätsgleichung 260
 Koppelleitwert 58
 Kopplungsfaktor 235, 254
 Kraft 191, 222
 Kreis, verzweigter magnetischer 217
 Kreuzschaltung 244
 Kunststoffkern 210
 Kurzschluss-Eingangswiderstand 253
 Kurzschlussstrom 31, 47, 65, 107, 148, 152

L
 Ladestrom, kapazitiver 163
 Ladung 197, 258
 Ladung, verschobene 201
 Ladungsausgleich 197
 Ladungsbewegung 258
 Ladungsmenge 193, 199
 Ladungsträgerkonzentration 259
 Lastfälle 19
 Lastkennlinie 65
 Laststrom 45
 Lastwiderstand 15, 19, 28, 50, 106
 Lastzweig 90, 146, 156
 LC-Übertragungsvierpol 133
 Leerlauf-Eingangswiderstand 252
 Leerlaufspannung 31, 48, 65, 107, 152, 195
 Leistung 29
 Leistung, komplexe 142, 154, 161
 Leistung, maximal zulässige 27
 Leistung, maximale 29
 Leistungsaufnahme 28
 Leistungsbilanz 163
 Leistungsbilanz, vollständige 21, 53, 63, 146
 Leistungsfaktor 143
 Leistungshyperbel 67
 Leistungsumsatz 27, 65, 152
 Leiter, stromdurchflossener 213, 222, 238
 Leiterkapazität 163
 Leiterschleife, rechteckförmige 233
 Leiterspannung 153
 Leiterstab 231
 Leiterstrom 154, 159
 Leiterwerkstoff 13
 Leitfähigkeit, spezifische elektrische 13
 Leitungsquerschnitt 13
 Leitwert, differenzieller 174
 Leitwert, komplexer 143
 Leitwert, magnetischer 228
 Leitwertbelag 83
 Leitwertzeiger 86
 LORENTZ-Kraft 223
 Luftspalt 212, 224, 228
 Luftspaltgerade 213
 Luftspaltlänge 212

M
 Magnetfeld, zeitinvariantes 230, 235
 Magnetisierungskennlinie 212, 220, 224
 Magnetisierungsstrom 256
 Masche 42, 66, 84
 Masche, unabhängige 43
 Maschensatz 40, 78, 103, 107, 147, 198, 220, 236
 Maschenstrom 55, 108, 138
 Maschenstromanalyse 138
 Matrizenmultiplikation 125, 140
 Messgerät 33
 Messstromkreis 224
 Mischgröße 73
 Mittelpunktleiter 152
 Mittelsteg 217
 Mittenfrequenz 134

N
 Nennleistung 152
 Nennwiderstand 68
 Netz, kapazitives 198
 Netzwerk 42, 104
 Normalwiderstand 69
 Normierung 116
 Nullphasenwinkel 104

O
 Offset-Spannung 223f
 OHMSches Gesetz 34, 90, 138, 152, 174, 194
 Ortskurve 89, 113, 132

P
 Pakethöhe 214
 Parallelschaltung 99
 Parallelschaltung, gleichsinnige 245
 Parallelschwingkreis 129
 Parallelschwingkreis, realer 78
 Parallelwiderstand 120
 Pegel 130
 Periodendauer 71
 Permeabilität 208, 221, 228
 Permeabilität, relative 214
 Phasenfrequenzgang 113, 132
 Phasenverschiebung 76, 94, 97

- Phasenwinkel 81
Plattenkondensator 184, 260
pn-Übergang 258
Polschuh 230
Potential 166, 172, 177, 188
Potential, elektrisches 259
Potentialbezugspunkt 166, 176, 187
Potentialbezugswert 169
Potentialdifferenz 167, 173
Potentialfeld, elektrisches 166
Potentialverteilung 172
Prinzipzeigerbild 76, 96
Punktladung 187
- Quellen-Charakteristik** 14
Quellenkennlinie 65
Quellen-Zählpfeilsystem 21, 54, 198
Querstrom 45
Querzweig 100
- Radialfeld** 230
Raumladung 259
RC-Hochpass 120
RC-Kombination 125
RC-Phasenschiebekette 94, 109, 125
RC-Tiefpass 117
Realteil 89, 127
Rechteck-Impulsfolge, periodische 73
Rechteck-Impulsfolge, positive 249
Rechteckkern 214
Rechteckspule 262
Rechtsschrauben-Regel 231, 261
Reihenschaltung 21, 99
Reihenschaltung, gegensinnige 236, 245
Reihenschaltung, gleichsinnige 236
Reihenschwingkreis 128
Reihenschwingkreis, elementarer 130
Reihenschwingkreis, realer 78
Resonanzfall 88
Resonanzfrequenz 128
Richtungspfeil 14
Ring, ferromagnetischer 213
Ringspule 210
RL-Hochpass 114
RL-Kombination 113, 248
RL-Tiefpass 113
Rohr, stromdurchflossenes 221
Rotor 230
Ruheinduktion 233
- Sägezahn-Impulsfolge 72
Schalenkern 227
Schaltung, gemischte 24, 25
Schaltvorgang 248
Scheinleistung 143
Scheinwiderstand 97
Scheitelfaktor 72
Schichtfläche 191
Schleifenfläche 233
Schrittspannung 177
Sekundärspannung 254
Selbstinduktivität 235
Simulationsschaltung 15
Skalierung, logarithmische 132
Spannung, induzierte 231, 234
Spannungsabfall, magnetischer 220
Spannungseinspeisung, konstante 130
Spannungsquelle, belastete 15
Spannungsquelle, ideale 167
Spannungsquelle, reale 53, 57, 65
Spannungsquellen-Ersatzschaltung 47, 50, 67, 107, 118, 194
Spannungsteiler, kapazitiver 193, 204
Spannungsteiler, ohmscher 121
Spannungsteilerregel 23, 77, 88, 103, 119, 130, 150, 241, 252
Spannungsüberhöhung 130
Spannungsübertragungsfaktor 133
Spannungsverhältnis 23, 39
Spannungszeigerbild 80
Spannungszeigerbild, maßstäbliches 82, 102
Spiegelladung 189
Spiegelungsprinzip 189
Spule 77, 95, 228
Spulen, miteinander verkoppelte 235
Steilheit 125
Stern-Dreieck-Transformation 36
Sternschaltung 37, 152, 245
Sternschaltung, äquivalente 154
Steuerstrom 223
Steuerstromkreis 223
Stoff, diamagnetischer 208
Stoff, ferromagnetischer 209
Stoff, nichtferromagnetischer 208
Stoff, paramagnetischer 208
Stromänderungsgeschwindigkeit 234
Stromdichte 174, 181, 239
Stromdichte, elektrische 265
Strommessbereich 33
Stromquelle, reale 57
Stromquellen-Ersatzschaltbild 62, 107
Strom-Spannungs-Kennlinie 19

- Stromstärke, elektrische 223
 Stromteilerregel 24, 47, 90
 Strömungsfeld, elektrisches 172
 Strömungsfeld, zylindersymmetrisches 176
 Strömungslinie 172
 Stromverlauf 15
 Stromzeigerbild 81, 161
 Symmetrierung 159
- Tastverhältnis** 73, 249
 Teilerregel 92
 Teilverhältnis 24
 Temperaturabhängigkeit 16
 Temperaturkoeffizient 16
 Temperaturmessung 68
 T-Ersatzschaltung 247
 THALES-Kreis 79, 102
 THOMSONSche Schwingungsgleichung 88
 Tiefpass zweiter Ordnung 125
 Transformator, realer 256
 Transformator, verlustloser 246, 254
 Transformatorgleichungen 235
 Trennfläche 191
 Trennstelle 29, 106, 194
- Übergangswiderstand** 177
 Überkompensation 144
 Überlagerung 45, 73, 164, 188
 Überlagerungssatz 104, 179, 189
 Überlastung 27
 Übersetzungsverhältnis 254
 Umlaufanalyse 53, 108, 138
 Umlaufspannung 263
 Umlaufstrom 108
 Umrechnung 99, 129, 153
 Unabhängigkeit 20
- Vektor-Basisssystem** 231
 Verbindungsweig 54, 57
 Verbraucher, induktiver 143
 Verbraucher-Charakteristik 14
 Verbraucher-Dreieckschaltung 155, 156
 Verbraucher-Dreieckschaltung,
 unsymmetrische 161
 Verbraucherleistung, komplexe 157
 Verbraucherstrang 163
 Verbraucher-Strangstrom 155, 160
 Verbraucher-Zählpfeilsystem 21, 54, 197
 Verkopplung 245
 Verlustleistung 262
 Verlustwiderstand 77
- Verschiebungsfluss 260
 Verschiebungsstrom 164, 260
 Vierpoltheorie 140
 Vollausschlagspannung 33
 Vollausschlagstrom 33
 Vollkugelerder 180
 Vorladung 199
 Vorwiderstand 67
- Wechselgröße** 71
 Wechselstrom-Paradoxon 96
 Wechselstromschaltung, allgemeine 80, 88
 Wellenlänge 83
 WHEATSTONESche Brückenschaltung 68
 Wickelkondensator 185
 Wicklung 230
 Wicklungsrichtung 237
 Wicklungssinn 237, 245
 Wicklungssinn, gegensinniger 237
 Wicklungssinn, gleichsinniger 237
 Wicklungsverluste 228
 Widerstand, komplexer 128
 Widerstand, magnetischer 211, 215, 219, 230
 Widerstand, spezifischer elektrischer 13
 Widerstandsbelag 83
 Widerstandswert 23
 Widerstandszeiger 87
 Windungszahl 216, 227
 Wirbelstrom 262
 Wirbelstromdichte 262
 Wirkleistung 142, 150, 156
 Wirkleistungsumsatz 145
 Wirkungsgrad 29
- Zählpfeil** 14, 164, 197, 202
 Zeiger, konjugiert komplexer 86
 Zeigerbild 161, 236, 256
 Zeigerbild, maßstäbliches 147, 156
 Zeigerbild, qualitatives 79
 Zeitkonstante 194, 202, 248
 Zweig 43, 53
 Zweigstrom 42, 55
 Zweipol, aktiver 29
 Zweipolmaschine 230
 Zweipoltheorie 47, 106, 118, 137, 152, 248
 Zylinderkondensator 187
 Zylinderspule 208, 262
- II-Ersatzschaltbild** 83, 246