

Helmut Haase und Heyno Garbe

Grundlagen der Elektrotechnik
Übungsaufgaben mit Lösungen

Zweite korrigierte Auflage
Mit 168 Aufgaben und 405 Abbildungen

Verlag Schöneworth Hannover

Professor Dr.-Ing. Helmut Haase
Professor Dr.-Ing. Heyno Garbe
Leibniz Universität Hannover
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik
Appelstraße 9A
30167 Hannover
www.geml.uni-hannover.de

Die Deutsche Bibliothek

Grundlagen der Elektrotechnik - Übungsaufgaben mit Lösungen
Helmut Haase, Heyno Garbe
Verlag Schöneworth Hannover
168 Aufgaben 405 Abbildungen - 2007
ISBN 3-9808805-3-2

Verlag Schöneworth Hannover
Weidendamm 30B
30167 Hannover

Bestelladresse für eilige Fälle: Fax 05261 87470. Die Bestellung ist angenommen, wenn Sie am gleichen Tag eine Bestätigung per Fax erhalten.

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

©Helmut Haase 2004/2007

Einbandentwurf: Helmut Haase

Satzherstellung mit \LaTeX

Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier

Druck: Interdruck Berger und Herrmann GmbH, Hannover

Vorwort

Dieser Band wendet sich an Studierende im Fach *Grundlagen der Elektrotechnik* an Technischen Hochschulen und Universitäten. Er bietet Ihnen 163 Übungsaufgaben samt ausführlichen Lösungen und ist als Vorbereitungshilfe für die unvermeidlichen Klausuren gedacht.

Die Autoren tragen die Grundlagen der Elektrotechnik seit Anfang der neunziger Jahre an der Universität Hannover in einem dreisemestrigen Kurs vor. Die Vorlesungen und Übungen umfassen insgesamt 200 Unterrichtsstunden.

Die hier zusammengefassten Aufgaben bieten Ihnen zusätzlichen Übungsstoff zum selbstständigen Lernen. Zu jeder Aufgabe ist das entsprechende Kapitel des Lehrbuchs¹ angegeben. Sie können diesen Übungsband aber auch unabhängig vom Lehrbuch nutzen.

Die Aufgaben umfassen den einschlägigen Lehrstoff des Grundstudiums, nämlich Felder und Netzwerke. Dazu gehören das elektrische, das magnetische und das Strömungsfeld sowie Gleichstrom-, Wechselstrom-, Drehstrom- und nichtlineare Netzwerke sowie Einschaltvorgänge. Die spektrale Behandlung periodischer Abläufe ist eingeschlossen.

Falls Sie Fehler in diesem Buch entdecken, wenden Sie sich bitte an einen der Autoren. Seine E-Mail-Anschrift finden Sie unter der links genannten Internetadresse.

Die Autoren danken allen, die zur Aufgabensammlung beigetragen haben. Hervorzuheben sind H. Frohne, E. Ueckert und E. Barke, auf deren Vorarbeit sie beruht. Die Aufgaben und Lösungen wurden bis zur heutigen Fassung mehrfach überarbeitet, erweitert und aktualisiert. Wissenschaftliche Mitarbeiter des Instituts für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik der Universität Hannover haben viele Jahre mitgeholfen. Besonderer Dank gebührt H. Gerth, der Form und Inhalt der Sammlung wesentlich beeinflusst hat und C. Schröder, die das Manuskript getippt und die Bilder gezeichnet hat.

Hannover, im Oktober 2007

Helmut Haase und Heyno Garbe

¹ Haase, Garbe, Gerth: Grundlagen der Elektrotechnik - Verlag Schöneworth Hannover

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe und Gleichstromnetzwerke	1
1.1	Rechnen mit SI-Einheiten, formale Kontrollen	1
1.2	Zugeschnittene Größengleichung	3
1.3	Bezugspfeile, Richtungssinn und Bezugssinn	4
1.4	Ladungserhaltungsgesetz	5
1.5	Faraday'sches Gesetz	6
1.6	Verbraucher- und Erzeugerpfilsystem	7
1.7	Spannung, Leistung, Pfeilsysteme	8
1.8	Lineare Temperaturabhängigkeit von Widerständen	9
1.9	Quadratische Temperaturabhängigkeit von Widerständen	10
1.10	Nichtlinearer Widerstand	12
1.11	Differentieller Widerstand	14
1.12	Energie und Leistung	16
1.13	Serien- und Parallelschaltung von Widerständen	16
1.14	Ersatzschaltbild, Serien- und Parallelschaltung	17
1.15	Spannungsquelle und Leistung	18
1.16	Stromquelle und Leistung	20
1.17	Spannungsteilerregel	22
1.18	Spannungs- und Stromteilerregel	24
1.19	Pfeilsysteme und Leistung	26
1.20	Zweigstromverfahren (1)	29
1.21	Zweigstromverfahren (2)	33
1.22	Zweigstromverfahren (3)	35
1.23	Knotenpotenzialverfahren (1)	38
1.24	Knotenpotenzialverfahren (2)	39
1.25	Maschenstromverfahren	40
1.26	Zweigstrom-, Maschenstrom- und Knotenpotenzialverfahren	42

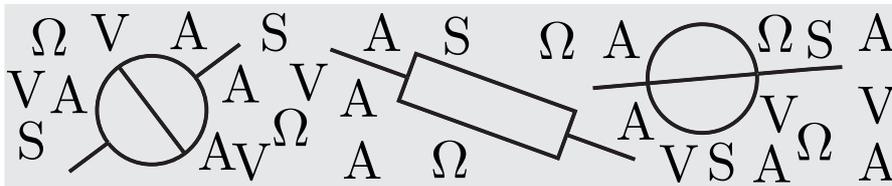
1.27	Überlagerungssatz und Leistung	46
1.28	Überlagerungssatz und Stromteilerregel	50
1.29	Kirchhoff'sche Sätze und Überlagerungssatz	52
1.30	Ersatzzweipole	53
1.31	Ersatzspannungsquelle	55
1.32	Ersatzstromquelle und innere Verluste	57
1.33	Ersatzquellen und Wirkungsgrad	58
1.34	Netzwerkberechnung mit Ersatzzweipolen (1)	60
1.35	Netzwerkberechnung mit Ersatzzweipolen (2)	62
1.36	Netzwerkberechnung mit Ersatzzweipolen (3)	64
1.37	Netzwerkumwandlung	66
1.38	Maximale Leistung (Anpassungsfall)	69
1.39	Leistung, Wirkungsgrad und Anpassungsfall	70
1.40	Netzwerk mit gesteuerter Quelle (1)	72
1.41	Netzwerk mit gesteuerter Quelle (2)	75
1.42	Gleichstromnetzwerk (1)	77
1.43	Gleichstromnetzwerk (2)	79
1.44	Gleichstromnetzwerk (3)	82
1.45	Gleichstromnetzwerk (4)	85
1.46	Würfelnetzwerk	89
1.47	Nichtlineares Gleichstromnetzwerk	92
2	Mathematische Begriffe der Feldtheorie	93
2.1	Hüllenfluss und Divergenz	93
2.2	Gradient	95
2.3	Rotation	97
2.4	Hüllenfluss, Divergenz, Rotation, Potenzial und Gradient	99
2.5	Divergenz und Rotation (1)	105
2.6	Divergenz und Rotation (2)	108
3	Elektrostatistisches Feld	109
3.1	Coulomb'sches Kraftgesetz	109
3.2	Coulomb-Kraft und Überlagerungssatz	111
3.3	Überlagerungssatz	114
3.4	Geladene Scheibe	117
3.5	Elementare Feldformen	120
3.6	Elektrische Dipole	122
3.7	Gauß'scher Satz	124
3.8	Potenzial und Spannung	127
3.9	Skalares Potenzial und Coulomb-Integral	130
3.10	Kapazität	132

3.11	Methode der virtuellen Verschiebung	134
3.12	Elektrische Feldgrößen an Permittivitäts- Grenzflächen	136
3.13	Die elektrischen Feldgrößen an Grenzflächen	141
3.14	Grenzflächenkräfte und mechanische Spannungen	145
3.15	Praktische Berechnung elektrostatischer Felder	147
3.16	Gauß'scher Satz zur Feldberechnung	151
3.17	Rückführung des gesuchten Feldes auf ein bekanntes	156
3.18	Graphische Ermittlung des Feldbildes	160
3.19	Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren	162
3.20	Teil- und Betriebskapazitäten bei mehr als zwei Elektroden	165
3.21	Influenz	167
3.22	Zwei parallele Linienladungen über leitender Ebene	170
3.23	Hohlkugel mit Raumladung	174
3.24	Zylinderkondensator	177
3.25	Kapazitiver Dickensensor	179
3.26	Kräfte im Plattenkondensator	182
3.27	Influenz, Schirmung	184
3.28	Feldbildskizze	185
3.29	Dipol und Kugelkondensator	187
3.30	Räumlich harmonische Linienladung (1)	189
3.31	Räumlich harmonische Linienladung (2)	191
3.32	Potenzial einer kreisförmigen Linienladung	194
3.33	Drei-Platten-Anordnung	196
3.34	Kondensator mit großem Plattenabstand	198
4	Stationäres elektrisches Strömungsfeld	199
4.1	Ladungsströmung und Stromdichte	199
4.2	Driftgeschwindigkeit	201
4.3	Kugelerder	202
4.4	Halbkugelerder	204
4.5	Kugelförmige Elektrodenanordnung	205
4.6	Zylinderanordnung mit variabler Leitfähigkeit	207
4.7	Tiefenerderpaar	208
4.8	Leiter mit ortsabhängiger Leitfähigkeit	213
4.9	Drei Elektrodenanordnungen	214
4.10	Zylinderkondensator mit nichtidealem Dielektrikum	215
5	Magnetisches Feld	221
5.1	Überlagerung von Magnetfeldern, Koordinatensysteme	221
5.2	Magnetfeld langer, gerader Linienleiter	225
5.3	Magnetfeld eines Leiters mit Rechteckquerschnitt	230

5.4	Magnetische Spannung	232
5.5	Magnetisches Skalarpotenzial und magnetische Feldstärke	235
5.6	Magnetischer Fluss zwischen zwei Linienleitern	238
5.7	Gesetz von Biot und Savart für Linien-Leiterschleifen	239
5.8	Magnetfeld und Selbstinduktivität einer Zylinderspule	243
5.9	Gegeninduktivität zweier Ringkernspulen	248
5.10	Die äußere Selbstinduktivität eines langen Koaxialkabels	251
5.11	Gesamtinduktivität eines Koaxialkabels	253
5.12	Magnetischer Eisenkreis	255
5.13	Eisenkreis mit Luftspalt	257
5.14	Elektrisches Ersatzschaltbild eines magnetischen Eisenkreises	261
5.15	Hubmagnet	262
5.16	Kraft auf Leiter im Magnetfeld	266
5.17	Kraft auf bewegte Punktladung im Magnetfeld	269
5.18	Ruhende Leiterschleife	270
5.19	Bewegte rechteckige Leiterschleife	273
5.20	Bewegte runde Leiterschleife	276
5.21	Permanentmagnet (1)	278
5.22	Permanentmagnet (2)	280
5.23	Permanentmagnet (3)	282
5.24	Kraft zwischen Stromschienen	285
6	Netzwerke mit harmonischer Erregung und Ortskurven	289
6.1	Effektivwert	289
6.2	Scheitel- und Formfaktor (1)	290
6.3	Scheitel- und Formfaktor (2)	292
6.4	Mischspannung	293
6.5	Wechselstromnetzwerk mit zwei Spannungsquellen	295
6.6	Leistung im Resonanzkreis	298
6.7	Wechselstromnetzwerk und Zeigerdiagramm (1)	303
6.8	Wechselstromnetzwerk und Zeigerdiagramm (2)	304
6.9	Potenzialrichtiges Zeigerbild	305
6.10	Spannungsteilerregel	307
6.11	Maschen- und Knotengleichungssystem	309
6.12	Netzwerk mit zwei Spannungsquellen	310
6.13	Magnetisch gekoppeltes Netzwerk	312
6.14	Netzwerk mit magnetischer Kopplung	313
6.15	Parallel-Reihen-Umwandlung	315
6.16	Reihen-Parallel-Umwandlung	317
6.17	Ortskurven mit Widerstand als Parameter	318

6.18 Ortskurven mit Induktivität als Parameter	321
6.19 Ortskurven mit Kreisfrequenz als Parameter	323
6.20 Reihenschwingkreis	326
6.21 Parallelschwingkreis	329
6.22 Netzwerk mit zwei Resonanzfrequenzen.....	332
6.23 Einseitige Stromverdrängung.....	336
7 Drehstrom.....	341
7.1 Symmetrischer Verbraucher	341
7.2 Stern-Dreieck-Umwandlung	343
7.3 Dreieck-Stern-Umwandlung	346
7.4 Unsymmetrischer Verbraucher mit Mittelpunktleiter	348
7.5 Unsymmetrischer Verbraucher ohne Mittelpunktleiter	352
8 Netzwerke mit periodischer Erregung.....	357
8.1 Harmonische Analyse einer rechteckförmigen Spannung	357
8.2 Harmonische Analyse einer trapezförmigen Spannung	359
8.3 Harmonische Analyse einer angeschnittenen Sinusfunktion	363
8.4 Bifrequente Erregung eines Netzwerkes	368
9 Nichtlineare Widerstandsnetzwerke	373
9.1 Gleichstromnetzwerk.....	373
9.2 Zweipolzerlegung und Verlustleistung	374
9.3 Graphische, analytische und numerische Lösung	379
9.4 Magnetisches Netzwerk - Spule mit Eisen	381
10 Instationäre Vorgänge in Netzwerken	385
10.1 Gleichstromnetzwerk mit einem Kondensator	385
10.2 Gleichstromnetzwerk mit einer Induktivität	388
10.3 Wechselstromnetzwerk mit einer Spule und zwei Quellen.....	390
10.4 Gleichstromnetzwerk mit zwei Kondensatoren	394
10.5 Netzwerk ohne Quellen.....	398
10.6 Gleichstromnetzwerk mit Induktivität und Kapazität	402
10.7 Wechselstromnetzwerk mit einem Kondensator	406
10.8 Netzwerk mit gesteuerter Quelle (3)	408
10.9 Einschalten ohne Ausgleichsvorgang	410
10.10 Supraleitende Spulen	411
10.11 Entladung eines Akkumulators	413
Literaturauswahl	415
Sachverzeichnis	417

Grundbegriffe und Gleichstromnetzwerke



1.1 Rechnen mit SI-Einheiten, formale Kontrollen

Aufgabe zum Vorspann „Symbole und Hinweise“ und Tab. [17.4] oder [B.4]¹ Kontrollieren Sie, ob die folgenden Gleichungen und Terme, insbesondere auf Grund der Einheiten, richtig sein können. Nicht erklärte Symbole haben die Bedeutung laut Tab. [17.4] oder [B.4].

a $U = \frac{1}{G} I$

b $R = \frac{\rho A}{l}$ mit l : Länge

c $v = \frac{1}{m} \int F dt$ mit v : Geschwindigkeit, m : Masse, F : Kraft, t : Zeit

d $W = mv^3$

e $U \cos(\omega t + x)$ mit x : Positionsordinate

f $U = C \frac{di}{dt}$

¹ Nummern in eckigen [] Klammern (Kap., Abschn., Gl., Tab.) beziehen sich auf das Lehrbuch H. Haase, H. Garbe, H. Gerth: Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag Schöneworth Hannover

g $\vec{D} = \mu \vec{E}$

h Stellen Sie g ausschließlich mit SI-Basiseinheiten dar!

i $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ mit φ : Winkel

j $U^2 + I^2 = P^2$

k $\sin(I)$

l $U + U^2 + U^3$

m $\Omega + \Omega^2 + \Omega^4$ mit Ω : Raumwinkel

n $\vec{B} = \mu H$

Lösung a $V = \frac{1}{S}A$. Mit $S = \frac{1}{\Omega} = \frac{A}{V}$ folgt $V = A \frac{V}{A}$: Einheiten sind verträglich.

Lösung b $\Omega = \frac{\Omega m \cdot m^2}{m}$: Falsch!

Lösung c $\frac{m}{s} = \frac{1}{kg}Ns = \frac{1}{kg} \frac{kgm}{s^2}$: Einheiten sind verträglich.

Lösung d $J = kg \frac{m^3}{s^3}$. Mit $J = Nm$ und $N = \frac{kgm}{s^2}$ folgt $\frac{kgm^2}{s^2} = \frac{kgm^3}{s^3}$: Falsch!

Lösung e $[\omega t] = [x]$ oder $\frac{rad}{s}s = m$ oder $1 = m$: Falsch!

Lösung f $V = F \frac{A}{s}$. Mit $F = \frac{As}{V}$ folgt $V = \frac{As}{V} \frac{A}{s}$: Falsch!

Lösung g $\frac{C}{m^2} = \frac{H V}{m m}$. Mit $C = As$ und $H = \frac{Vs}{A}$ folgt $\frac{As}{m^2} = \frac{Vs}{A} \frac{1}{m m}$ oder $A^2 = V^2$: Falsch!

Lösung h $\frac{As}{m^2} = \frac{kgm}{s^2 A^2} \frac{kgm}{s^3 A} \frac{1}{m}$: Falsch!

Lösung i $\frac{rad}{s} = \frac{rad}{s}$: Einheiten sind verträglich.

Lösung j $V^2 + A^2 = W^2$ $A \neq V$, Summanden erfordern dieselbe Einheit: Falsch!

Lösung k Falsch! Im Argument der Sinusfunktion muss ein Winkel stehen (Einheit 1).

Lösung l Falsch, da U in Volt gemessen wird und daher nicht in verschiedenen Potenzen addiert werden darf!

Lösung m Einheiten sind verträglich, da der Raumwinkel die Einheit $\text{sr} = \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} = 1$ hat.

Lösung n Falsch, weil die linke Seite ein Vektor und die rechte Seite ein Skalar ist.

Diskussion Wenn man bei der Einheitenkontrolle unsicher ist, geht man auf das Basiseinheiten-Potenzprodukt zurück (Tab. [17.4] oder [B.4], rechte Spalte).

Die Einheitenkontrolle ist ein bewährtes Mittel, um Fehler bei Termumformungen zu erkennen. Sie wird für Endergebnisse dringend empfohlen.

Wenn Sie zum Thema Einheiten noch unsicher sind, ist folgende Lektüre ratsam: O. Höfling: Physik, Formeln und Einheiten Sekundarstufe II, Aulis-Verlag, ca. 5,00 €.

1.2 Zugeschnittene Größengleichung

Aufgabe zum Vorspann „Symbole und Hinweise“, Nr. [1] des Lehrbuchs Formen Sie die Gleichung $P = Fv$ für die Leistung als Produkt von Kraft und Geschwindigkeit so um, dass

a die Größen in angelsächsischen Maßeinheiten eingesetzt werden können! Es gelten die Äquivalenzen $1 \text{ hp} = 745,7 \text{ W}$, $1 \text{ lb} = 4,448 \text{ N}$ und $1 \text{ mph} = 0,447 \text{ m/s}$.

b Werten Sie die gewonnene Gleichung für $F = 100 \text{ lb}$ und $v = 85 \text{ mph}$ aus!

Lösung a Man dividiert jede Größe durch die gewünschte Einheit und multipliziert sie zum Ausgleich mit demselben Wert in SI-Einheiten:

$$\frac{P}{\text{hp}} 745,7 \text{ W} = \frac{F}{\text{lb}} 4,448 \text{ N} \cdot \frac{v}{\text{mph}} 0,447 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

oder

$$\frac{P}{\text{hp}} = \frac{F}{\text{lb}} \frac{v}{\text{mph}} \frac{4,448 \text{ N} 0,447 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{745,7 \text{ W}}.$$

Mit $\text{N} \frac{\text{m}}{\text{s}} / \text{W} = 1$ erhält man

$$\frac{P}{\text{hp}} = \frac{F}{\text{lb}} \frac{v}{\text{mph}} 2,67 \cdot 10^{-3}.$$

Lösung b Durch Einsetzen erhält man

$$\frac{P}{\text{hp}} = \frac{100 \text{ lb}}{\text{lb}} \frac{85 \text{ mph}}{\text{mph}} 2,67 \cdot 10^{-3} = 100 \cdot 85 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3}$$

oder

$$\underline{P = 22,695 \text{ hp.}}$$

Diskussion Man bezeichnet die Ergebnisgleichung in a als zugeschnittene Größengleichung. In ihr bezeichnen die Symbole P, F und v weiterhin die physikalischen Größen als Produkt von Zahlenwert und Einheit. Die Brüche sind gleich den Zahlenwerten in der betreffenden angelsächsischen Einheit. Es gilt also $\frac{P}{\text{hp}} = \{P\}_{\text{hp}}$, $\frac{F}{\text{lb}} = \{F\}_{\text{lb}}$ und $\frac{v}{\text{mph}} = \{v\}_{\text{mph}}$. Ferner wird auf die Diskussion zu Aufgabe 1.1 hingewiesen.

1.3 Bezugspfeile, Richtungssinn und Bezugssinn

Aufgabe zu Kap. [1] des Lehrbuchs Zwei handelsübliche Batteriezellen mit der Leerlaufspannung von je 1,5 V seien in Reihe geschaltet (**Bild 1.1**). Geben Sie für die vorgegebenen Modelle a bis e die Spannungen und eingepprägten Spannungen an. Letztere sind durch den vorangestellten Hochindex e bezeichnet.

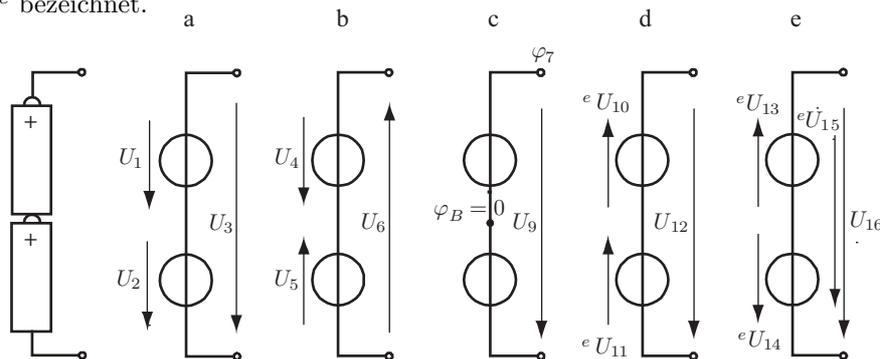


Bild 1.1

Lösung a $U_1 = 1,5 \text{ V}$, $U_2 = 1,5 \text{ V}$, $U_3 = U_1 + U_2 = 3 \text{ V}$

Lösung b $U_4 = 1,5 \text{ V}$, $U_5 = -1,5 \text{ V}$, $U_6 = U_5 - U_4 = -3 \text{ V}$

Lösung c $\varphi_7 = U_1 = 1,5 \text{ V}$, $\varphi_8 = -U_2 = -1,5 \text{ V}$, $U_9 = \varphi_7 - \varphi_8 = 3 \text{ V}$

Lösung d $^e U_{10} = U_1 = 1,5 \text{ V}$, $^e U_{11} = U_2 = 1,5 \text{ V}$, $U_{12} = ^e U_{10} + ^e U_{11} = 3 \text{ V}$, Gl. [3.4c]

Zur Lösung der linearen³ DGL wird zunächst die erzwungene Lösung aus der Überlegung ermittelt, dass nach langer Zeit die Spannung $u = 0$ erreicht wird. Dann fließt kein Strom mehr und die Ladung (eigentlich der Ladungsdurchsatz) erreicht mit $dq/dt = 0$ einen konstanten Wert. Aus der DGL folgt damit

$$0 = -\frac{k}{R}q(\infty) - \frac{U_A}{R} \quad \text{oder} \quad q(\infty) = -\frac{U_A}{k}. \quad (10.46)$$

Beim Wert $q(\infty)$ schneidet die (in **Bild 10.21a** gestrichelt dargestellte) Kennlinengerade die q -Achse. $q(\infty)$ ist die partikuläre oder erzwungene Lösung der DGL.

Mit der Lösungsformel [15.15c] des Lehrbuchs ergibt sich die vollständige Lösung zu

$$q(t) = \left(q_1 + \frac{U_A}{k}\right)e^{\lambda t} - \frac{U_A}{k} \quad \text{mit} \quad \lambda = -\frac{k}{R}. \quad (10.47)$$

Die Lösung gilt im Intervall $q_0 \leq q \leq q_1$.

Die gesuchte Entladezeit t_0 folgt aus

$$q_0 = \left(q_1 + \frac{U_A}{k}\right)e^{\lambda t_0} - \frac{U_A}{k} \quad (10.48)$$

zu

$$t_0 = \frac{R}{k} \ln \frac{U_A + kq_1}{U_A + kq_0} \quad \text{mit} \quad R = R_i + R_L. \quad (10.49)$$

Lösung b Die Entladezeit für $k = 0$ kann nicht einfach durch Nullsetzen von k in der letzten Gl. ermittelt werden, weil dann ein unbestimmter Ausdruck entsteht. Vielmehr wird die Regel des Marquis de L'Hospital benötigt, oder man nutzt die Näherungsgleichung $\ln(1+x) \approx x$. Man erhält damit

$$t_0 = \frac{q_1 - q_0}{U_A/R}, \quad (10.50)$$

was zu erwarten war.

Diskussion Bei welchem Punkt der $u(q)$ -Kennlinie ein Akkumulator vollständig entladen ist ($\text{SOC}^4=0$, hier bei q_0), unterliegt einem vom Hersteller gern nach unten genutzten Ermessensspielraum. Die Nennladung („Kapazität“) kann dann höher deklariert werden. Die tatsächliche Entladung bis zu diesem Punkt kann (z. B. bei Bleiakkus) die Lebensdauer verkürzen.

³ Die DGL „weiß“ nicht, dass die Kennlinie außerhalb des nutzbaren Bereichs nicht-linear ist.

⁴ SOC = state of charge, 0 $\hat{=}$ vollständig entladen, 1 $\hat{=}$ vollständig geladen

A

Literaturauswahl

Grundlagen der Elektrotechnik

- [Alba] Albach: Grundlagen der Elektrotechnik, Pearson Studium, 3 Bände zusammen ca. 800 Seiten
- [Boss] Bosse, Hagauer: Grundlagen der Elektrotechnik, VDI-Verlag, 4 Bände zusammen 594 Seiten
- [Busc] Busch: Elektrotechnik und Elektronik, Grundlagen und Anwendungen für Ingenieure, Teubner, 509 Seiten
- [ClWi] Clausert, Wiesemann: Grundgebiete der Elektrotechnik, Oldenbourg, 2 Bände zusammen 607 Seiten
- [Fro1] Moeller, Frohne, Löcherer, Müller: Grundlagen der Elektrotechnik, Teubner, 680 Seiten
- [Fro2] Frohne: Elektrische und magnetische Felder, Teubner, 482 Seiten
- [FüHeNe] Führer, Heidemann, Nerreter: Grundgebiete der Elektrotechnik, Hanser, 2 Bände zusammen ca. 604 Seiten
- [HaGaGe] Haase, Garbe, Gerth: Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag Schöneworth Hannover, 379 Seiten
(Lehrbuch zum vorliegenden Übungsbuch)
- [Hagm] Hagmann: Grundlagen der Elektrotechnik, AULA, 339 Seiten
- [Lunz] Lunze: Einführung in die Elektrotechnik, Verlag Technik, 320 Seiten
- [Phil] Philippow: Grundlagen der Elektrotechnik, Hüthig, 830 Seiten
- [Preg] Pregla: Grundlagen der Elektrotechnik, Hüthig, 518 Seiten
- [Weiß] Weißgerber: Elektrotechnik für Ingenieure, 3 Bände, Vieweg, zusammen 1131 Seiten

Fächer des Elektrotechnik-Grundstudiums

- [Hütt] Hütte, Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, Springer, ca. 1570 Seiten
- [Hamb] Hambley: Electrical Engineering - Principles and Application¹, Prentice Hall, 846 Seiten

Mathematik

- [MeVa] Meyberg, Vachenaer: Höhere Mathematik, Springer, 2 Bände zusammen 986 Seiten
- [MATL] Mathematiksoftware - The Student Edition of MATLAB, Computation, Visualisation, Programming. The Math Works Inc.

Physik

- [Feyn] Feynman, Leighton, Sands: The Feynman Lectures on Physics², Addison-Wesley Publishing Comp., 2 Bände zusammen ca. 1060 Seiten
- [BeSc] Bergmann, Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2, Elektromagnetismus, de Gruyter, 976 Seiten

Theoretische Elektrotechnik

- [KüMaRe] Küpfmüller, Mathis, Reibiger: Theoretische Elektrotechnik, Springer, 733 Seiten
- [Lehn] Lehner: Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker, Springer, 670 Seiten
- [Simo] Simonyi: Theoretische Elektrotechnik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 973 Seiten

Normen

- [DIN1] DIN-Taschenbuch 22: Einheiten und Begriffe für physikalische Größen, Beuth, 539 Seiten
- [DIN2] DIN-Taschenbuch 202: Formelzeichen, Formelsatz, Mathematische Zeichen und Begriffe, Beuth, 478 Seiten

¹ Zum Erlernen der englischen Fachbegriffe empfohlen

² Enthält eine ausgezeichnete Darstellung der Felder aus Sicht der Physik.

Sachverzeichnis

- [], 1
- Akkumulator
 - Entladung, 413
- Algebra-Software, 406
- Amplitudengang, 324
- Amplitudenzeiger, 298, 310, 311, 368
- Anlaufstrom, 343
- Anpassung, *siehe* Leistungsanpassung
- aperiodische Lösung, 398
- Arc-Funktion, 352
- Auftriebskraft, 96
- Batterie, 79
 - Entladung, 413
- Betriebskapazität, 165
- Bezugspfeil, 4
- Bezugspotenzial, 196
- Bezugssinn, 4
- Bifrequente Erregung, 368
- Biot und Savart
 - Gesetz von, 239
- Blindleistung
 - Vorzeichenkonvention, 302
- charakteristische Gleichung, 393
- Coulomb'sches Kraftgesetz, 109
- Coulomb-Integral, 117, 130
- Coulomb-Kraft, 111
- DGL.
 - erster Ordnung, 385
 - System, 395
- Dickensensor
 - kapazitiver, 179
- Dimensionskontrolle, 1
- Dimmer, 367
- Dipol
 - elektrischer, 122, 187
- Divergenz, 93, 99, 105, 108
- Doppelintegral, 230
- Drehstrom, 341
- Drei-Platten-Anordnung, 196
- Dreieck-Stern-Umwandlung, 346
- Driftgeschwindigkeit, 199, 201
- Durchflutungssatz, 257
- Effektivwert, 289, 295
- Effektivwertzeiger, 298
- Eigendämpfung, 406
- Eigenfrequenz, 406
- Eigenschwingung
 - gedämpfte, 406
- Eigenvektor, 395
- Eigenwert, 393, 395
- Eigenwertpaar, 335
- Eigenzeitkonstante, 394
- Einheitenkontrolle, 1
- Eisenkreis, 261
 - magnetischer, 255
 - mit Luftspalt, 257
- Eisenspule, 381
- Energie, 16
- Energieerhaltungssatz, 165
- Energiezähler, 8

- Entladung
 - eines Akkumulators, 413
- Ersatzquelle, 58
- Ersatzschaltbild
 - elektrisches
 - eines magnetischen Eisenkreises, 261
- Ersatzspannungsquelle, 55, 57, 85, 374
- Ersatzzweipol, 53, 60, 62, 64
- Erzeugerpeilsystem, 7, 28
- Erzwungene Lösung, 392, 408
- ES, *siehe* Erzeugerpeilsystem

- Faraday'sches Gesetz, 6
- Feldbild
 - graphische Ermittlung, 160
- Feldlinie
 - Differentialgleichung, 221
- FEM, *siehe* Finite-Elemente-Methode, *siehe* Finite-Elemente-Methode
- Finite-Elemente-Methode, 232
- Fluss
 - magnetischer, 238
- Formfaktor, 290, 292
- Fourieranalyse, 357
- Fourierkoeffizient
 - komplexer, 360
 - reeller, 360
- Fundamentalmatrix, 395

- Galvanisierbad, 6
- Gauß'scher Satz, 124, 151
- Gegeninduktivität, 312, 313
 - Vorzeichen, 313
 - zweier Ringkernspulen, 248
- Gesamtinduktivität
 - eines Koaxialkabels, 253
- Gradient, 95, 99
- Gravitationsfeld
 - einer Platte, 108
- Grenzfläche
 - der Permittivität, 136, 141
- Grenzflächenkraft
 - elektrische, 145
- Größengleichung
 - zugeschnittene, 3

- Halbkugelerder, 204
- Harmonische Analyse, 357, 359, 363
- Hochspannungskabel, 141
- Hohlkugel
 - mit Raumladung, 174
- Hohlleiter
 - rechteckiger, 185
- Homogene Lösung, 392
- Hubmagnet, 262
- Hüllenfluss, 93, 99

- Influenz, 167, 184
- Instationärer Vorgang, 385
- Integration
 - numerische, 193

- Kabel, 156
- Kapazität, 132
- Kapazitätsformel
 - bei großem Plattenabstand, 198
- Kennfrequenz, 328
- Kirchhoff'sche Sätze, 29
- Klausur, IX
 - Zeitnot, 75
- Knotenpotenzial-Verfahren, 38, 39, 42, 89, 375
- Koaxialkabel, 160, 253
- Kochplatte, 16
- Kompensationsfrequenz, 328, 335
- Kondensator, 145
 - Parallel- und Reihenschaltung, 162
- Koordinatensystem
 - Positionierung, 189
- Kopplung
 - magnetische, 312
- Kraft
 - auf Leiter im Magnetfeld, 266
- Kreisscheibe, 117
- Kugelerder, 202, 208
- Kugelkondensator, 151, 187
- Kugelwiderstand, 205
- Kupferscheibe, 167

- Ladungserhaltungsgesetz, 5
- Ladungsmesser, 8
- Ladungsströmung, 199
- Leistung, 16, 18, 20, 70

- Leistungsanpassung, 69, 70
- Leistungsbilanz, 28
- Leiter
 - im Magnetfeld, 221
 - mit Rechteckquerschnitt, 230
 - rechteckiger, 213
- Leiterschleife
 - halbkreisförmige, 266
 - quadratische, 239
 - rechteckige
 - bewegte, 273
 - ruhend, 270
 - runde
 - bewegte, 276
- Linienladung, 130
 - kreisförmige, 194
 - parallele, 170
 - räumlich harmonische, 189, 191
- Linienleiter, 225
- Lorentzkraft, 269
- Lufteinschluss, 145
- Lösung
 - DGl. 1. Ordnung, 385
 - System DGl. 1. Ordnung, 395
- Magnetisierungskurve, 257
- Maschenstromverfahren, 40, 42
- Matlab, 38, 193, 212, 367
- Matrizeneigenwertproblem, 395
- Maxwell'sche Spannung, *siehe* Spannung, Maxwell'sche
- Messfehler, 89
- Metallkugel
 - geladene, 184
- Mischspannung, 293
- Mittelpunktleiter, 348
- Naturmagnet, *siehe* Permanentmagnet
- Netzwerkumwandlung, 66
- Newton-Verfahren, 380
- Nichtlineares Gleichstromnetzwerk, 92
- Nichtlineares Widerstandsnetzwerk, 373
- Oberleitung, 156
- Oberwelle, 362
- Ortskurve, 318, 321, 323
- Parallelschaltung, 16
 - Umwandlung in Reihenschaltung, 315
- Parallelschwingkreis, 329
- Permanentmagnet, 278, 280, 282
- Pfeilsystem, 8
 - und Leistung, 26
- Phasenanschnittsteuerung, 367
- Phasengang, 324
- Plattenkondensator, 132, 136
 - Kraft, 182
- Potenzial, 99, 127, 130
- Potenziallinie, 121
- Potenzialrichtigkeit
 - des Zeigerbildes, 305, 352
- Punkt
 - bei Gegeninduktivität, 313
- Punktladung
 - im Magnetfeld, 269
- Quelle
 - gesteuerte, 72, 75, 408
- Raumladung
 - in Hohlkugel, 174
- Reihenschaltung
 - Umwandlung in Parallelschaltung, 317
- Reihenschwingkreis, 326
- Resonanzfrequenz, 328, 335
- Resonanzkreis
 - Leistung im, 298
- Richtungssinn, 4
- Ringkernspule, 248
- Ringschaltung, 345
- Rotation, 97, 99, 105, 108
- Schaltvorgang, 385
- Scheibe
 - geladene, 117
- Scheinleistung, 302
- Scheitelfaktor, 290, 292
- Schirmung, 184
- Schlüsselvariable, 133, 219
- Schnittkraft, 147
- Selbstinduktivität
 - äußere
 - eines Koaxialkabels, 251
 - einer Zylinderspule, 243

- eines Koaxialkabels, 251
- innere, 253
- Serienschaltung, 16
- SI-Einheit, 1, 177
- Skalarpotenzial
 - magnetisches, 235
- Skinneffekt, 252
- Spannung, 127
 - fiktive mechanische
 - im Magnetfeld, 285
 - magnetische, 232, 261
 - Maxwell'sche
 - im Magnetfeld, 285
 - motorisch induzierte, 273
 - transformatorische induzierte, 273
- Spannungsquelle, 18
- Spannungsstabilisierung, 12
- Spannungsteiler
 - phasenrichtiger, 308
- Spannungsteilerregel, 22, 24
- Spektrum, 367
- Spiegelladung, 173
- Spiegelungsmethode, 159
- Spitze, 185
- Sprungstellenverfahren, 357, 360
- Spule
 - mit Eisen, 381
- Stern-Dreieck-Anlauf, 343
- Stern-Dreieck-Umwandlung, 343
- Sternpunkt, 40, 355
- Stromdichte, 199
- Stromquelle, 20
- Stromteilerregel, 24, 50
- Stromverdrängung, 252, 336
- Superposition, *siehe* Überlagerungssatz
- Supraleitung, 411
- Symmetrie, 114, 151
 - eines Netzwerks, 89
- Systemmatrix, 395
- Teilkapazität, 165
- Temperaturabhängigkeit
 - des Widerstands, 9, 10
- Tiefenerderpaar, 208
- Tiefpassfilter, 362
- Transistorverstärker, 17
- Überlagerungssatz, 46, 50, 52, 111, 114, 373
- var, 302
- Verbraucherpfailsystem, 7, 28
- Verlustleistung, 77
- Verschiebung
 - virtuelle, 134
- Verschiebungsblindleistung, 371
- Vierleiteranordnung, 165
- virtuelle Verschiebung, *siehe* Verschiebung
- VS, *siehe* Verbraucherpfailsystem
- Wassermolekül, 122
- Wasserstoffion, 109
- Wheatstone-Brücke, 45
- Widerstand
 - differentieller, 14
 - nichtlinearer, 12
- Wirbel, 103
- Wirbelstrom, 337
- Wirkleistung
 - Vorzeichenkonvention, 302
- Wirkungsgrad, 58, 70
- Würfelnetzwerk, 89
- Zählpfeil, *siehe* Bezugspfeil
- Zeigerbild, 303, 304
 - potenzialrichtiges, 305
- Zeitnot
 - in Klausur, 75
- Zirkulation, 99
- Zustandsgröße
 - eines Speichers, 304
- Zweigstromverfahren, 29, 33, 35, 42
- Zweipolzerlegung, 374
- Zylinderkondensator, 147, 177
 - mit nichtidealem Dielektrikum, 215
- Zylinderspule, 243
- Zylinderwiderstand, 207