



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Elektrotechnik

Formeln für Elektrotechniker

19., überarbeitete Auflage

Bearbeitet von Ingenieuren und Lehrern
an beruflichen Schulen (siehe Rückseite)

Lektorat: Klaus Tkotz

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL • Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorf Straße 23 • 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 30105

Autoren: Isele, Dieter	Lauterach
Klee, Werner	Mehlingen
Tkotz, Klaus	Kronach
Winter, Ulrich	Kaiserslautern

Leitung des Arbeitskreises und Lektorat: Klaus Tkotz

Bildbearbeitung: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Betreuung der Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

19. Auflage 2019

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-3792-3

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2019 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Druck: mediaprint solutions GmbH, 33100 Paderborn

Wegweiser Formeln für Elektrotechniker

Inhaltsverzeichnis Kurzform

1	Mathematische Grundlagen	6
2	Längen- und Flächenberechnungen	9
3	Körper-, Volumen- und Masseberechnungen	11
4	Mechanik	12
5	Wärmelehre	13
6	Elektrotechnische Grundlagen	14
7	Elektrisches Feld, Kondensator	19
8	Magnetisches Feld	20
9	Wechselstrom und Drehstrom	22
10	Elektrische Maschinen	29
11	Elektrische Anlagen	35
12	Digitaltechnik	48
13	Elektronik	50
14	Regelungstechnik	58
15	Messtechnik	59
16	Tabellen	60

Nützliches

	Griechisches Alphabet (Tabelle 6)	60
	Mathematische Zeichen (Tabelle 4)	60
	E-Reihen von Widerständen und Kondensatoren (Tabelle 21)	65
	Widerstände Farbkennzeichnung (Tabelle 23)	65
	Wichtige Formelzeichen	Innenumschlagseiten
	Arbeiten mit Formeln	hintere Innenumschlagseite

1
Mathematische
Grundlagen

2
Längen- und
Flächenbe-
rechnungen

3
Körper-, Volumen-
und Masse-
berechnungen

4
Mechanik

5
Wärme-
lehre

6
Elektrotechnische
Grundlagen

7
Elektrisches Feld,
Kondensator

8
Magnetisches
Feld

9
Wechselstrom und
Drehstrom

10
Elektrische
Maschinen

11
Elektrische
Anlagen

12
Digital-
technik

13
Elektronik

14
Regelungs-
technik

15
Mess-
technik

16
Tabellen

Arbeiten mit Formeln		hintere Innenumschlagseite	7	Elektrisches Feld, Kondensator	19
1	Mathematische Grundlagen	6	7.1	Elektrische Feldstärke	19
1.1	Summieren, Multiplizieren	6	7.2	Kondensator	19
1.2	Rechnen mit Brüchen	6	7.3	Zeitkonstante bei RC-Schaltung, Ladezeit und Entladezeit	19
1.3	Potenzen, Wurzeln, Logarithmen	7	8	Magnetisches Feld	20
1.4	Winkel, Winkeleinheiten	7	8.1	Magnetische Größen	20
1.5	Rechnen am Dreieck	8	8.2	Haltekraft von Elektromagneten	20
1.6	Zahlensysteme, BCD-Code, Rechenregeln	8	8.3	Magnetische Feldkräfte	21
2	Längen- und Flächenberechnungen	9	8.4	Induktion	21
2.1	Drahtlängen von Rundspulen und von Rechteckspulen	9	9	Wechselstrom und Drehstrom	22
2.2	Flächen	9	9.1	Grundgrößen des Wechselstroms	22
3	Körper-, Volumen- und Masseberechnungen	11	9.2	Wechselstromwiderstände	22
3.1	Volumen und Oberflächen	11	9.3	Ohmsches Gesetz für den Wechselstromkreis	24
3.2	Masse und Gewichtskraft	11	9.4	Resonanz (Parallel- und Reihenschwingkreis)	25
4	Mechanik	12	9.5	Leistung bei Wechselstrom	25
4.1	Kräfte	12	9.6	Kompensation der Blindleistung	25
4.2	Wirkungsgrad, Arbeitsgrad	13	9.7	Sinus- und nichtsinusförmige Spannungen	26
5	Wärmelehre	13	9.8	Hoch- und Tiefpässe	27
5.1	Temperatur	13	9.9	Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom)	28
5.2	Wärmedehnung	13	10	Elektrische Maschinen	29
5.3	Wärmemenge	13	10.1	Transformator	29
6	Elektrotechnische Grundlagen	14	10.2	Antriebstechnik	30
6.1	Grundgesetze	14	10.2.1	Bewegungen	30
6.2	Anpassung	14	10.2.2	Mechanische Arbeit, mechanische Energie	31
6.3	Schaltungen von Widerständen	15	10.2.3	Riementrieb, Zahnradtrieb, Schneckenrieb	32
6.4	Spannungsteiler	16	10.2.4	Rollen und Flaschenzug	32
6.5	Widerstandsbestimmung	16	10.2.5	Drehmomente	32
6.6	Unabgegliche Brückenschaltung (Dreieck-Stern-Umwandlung)	16	10.2.6	Mechanische Leistung	33
6.7	Elektrische Arbeit und elektrische Leistung	17	10.3	Umlaufende elektrische Maschinen	33
6.8	Kosten der elektrischen Arbeit (Arbeitspreis)	17	10.3.1	Wechselstrommotor und Drehstrommotor	33
6.9	Elektrowärme	17	10.3.2	Schrittmotor	33
6.10	Elektrochemie	18	10.3.3	Gleichstrommaschinen	34
6.11	Schaltung von gleichartigen Spannungserzeugern	18	11	Elektrische Anlagen	35
			11.1	Schutzmaßnahmen	35
			11.1.1	Fehlerstromkreis	35
			11.1.2	Schutzmaßnahmen im TN-System	35
			11.1.3	Schutzmaßnahmen im TT-System	35
			11.1.4	Maximale Abschaltzeiten im TN-System und im TT-System	35

11.1.5	Schutzmaßnahmen im IT-System	36
11.1.6	Messen des Isolationswiderstandes	36
11.1.7	Messen der Isolationsimpedanz	36
11.1.8	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD)	36
11.1.9	Auslösekennlinien von Überstrom-Schutzeinrichtungen	37
11.2	Leitungsberechnungen	38
11.2.1	Unverzweigte Leitungen	38
11.2.2	Verzweigte Leitungen	39
11.2.3	Ringleitung	40
11.2.4	Bestimmung des Leiterquerschnittes A	41
11.2.5	Bestimmung des Leiterquerschnittes A bei Oberschwingungen	42
11.3	Licht und Beleuchtung	43
11.3.1	Lichttechnische Größen	43
11.3.2	Berechnung von Beleuchtungsanlagen	43
11.4	Antennen	44
11.4.1	Frequenzbereiche	44
11.4.2	Wellenlänge, Empfangsspannung, Wellenwiderstand	44
11.4.3	Verstärkungen, Dämpfungen, Pegel	45
11.4.4	Mechanische Sicherheit von Antennenanlagen	47
12	Digitaltechnik	48
12.1	Grundfunktionen	48
12.2	Zusammengesetzte Funktionen	48
12.3	Spezielle zusammengesetzte Funktionen	48
12.4	Rechengesetze der Schaltalgebra	49
13	Elektronik	50
13.1	Halbleiterdioden	50
13.2	Bipolarer Transistor	50
13.3	Feldeffekttransistor in Sourceschaltung	51
13.4	Transistor als Schalter	52
13.5	Kippschaltungen	52
13.6	Gleichrichterschaltungen	53
13.7	Glättung und Siebung	54
13.8	Spannungsstabilisierung	55
13.9	Kühlung von elektronischen Halbleiterbauelementen	55
13.10	Leistungselektronik	56
13.11	Operationsverstärker	57
14	Regelungstechnik	58
14.1	Regelstrecken	58
14.2	Unstetiges Regeln	58
14.3	Stetiges Regeln	58

15	Messtechnik	59
15.1	Messfehler von Zeigermessgeräten	59
15.2	Messfehler von digitalen Messgeräten	59
15.3	Messwertbestimmung sinusförmiger Größen mit dem Oszilloskop	59
i	Info und Tabellenteil	60
Tab. 1:	Wichtige Formelzeichen, Größen und Einheiten*	60
Tab. 2:	SI-Basisgrößen und SI-Basiseinheiten (Grundeinheiten)	60
Tab. 3:	Vielfache und Teile von Einheiten	60
Tab. 4:	Mathematische Zeichen	60
Tab. 5:	Wichtige physikalische Konstanten	60
Tab. 6:	Griechisches Alphabet	60
Tab. 7:	Werkstoffwerte von Metallen (und Kohle)	61
Tab. 8:	Werkstoffwerte von Legierungen	61
Tab. 9:	Elektrochemische Äquivalente und Wertigkeit	61
Tab. 10:	Verlegearten von Kabeln und isolierten Leitungen	62
Tab. 11:	Bemessungswerte der Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung	62
Tab. 12:	Zuordnung von Leitungsschutzsicherungen gG und LS-Schaltern Typ B, C und D	63
Tab. 13:	Umrechnungsfaktoren f_1 für abweichende Umgebungstemperaturen	63
Tab. 14:	Umrechnungsfaktoren f_2 für Häufung von Kabeln oder Leitungen	63
Tab. 15:	Umrechnungsfaktoren f_3 für die Anzahl der belasteten Adern bei Verlegung in Luft	63
Tab. 16:	Typische Verbraucher- und Verzerrungsströme elektronischer Verbraucher	64
Tab. 17:	Belastbarkeit von Kabeln und Leitungen für Verlegearten mit Berücksichtigung der Oberschwingungen	64
Tab. 18:	Umrechnungsfaktor f_4 für Verbraucher, die Oberschwingungen erzeugen	64
Tab. 19:	Leiternennquerschnitte in mm ²	65
Tab. 20:	Bemessungsströme von Leitungsschutzschaltern	65
Tab. 21:	Fertigungswerte für Widerstände und Kondensatoren (E-Reihen)	65
Tab. 22:	Bemessungsleistung von Widerständen	65
Tab. 23:	Farbkennzeichnung von Widerständen	65
Tab. 24:	Wertkennzeichnung von Widerständen durch Buchstaben	66
Tab. 25:	Schutzarten elektrischer Betriebsmittel	66
	Sachwortverzeichnis	67
	*siehe vordere bzw. hintere Umschlag-Innenseite	

6 Elektrotechnische Grundlagen

6.1 Grundgesetze

Ohmsches Gesetz

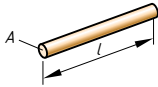


U Spannung
I Stromstärke
R Widerstand

$[U] = V$
 $[I] = A \quad 1 A = 1 \frac{V}{\Omega}$
 $[R] = \Omega$

$I = \frac{U}{R}$

Leiterwiderstand



* Nach DIN 1304:
für Querschnitt auch S oder q, für elektr. Leitfähigkeit auch σ oder χ .

R Leiterwiderstand
A* Leiterquerschnitt
l Leiterlänge
 γ^* elektr. Leitfähigkeit
 ϱ spezifischer Widerstand
 $1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{m}$
 $= 10^{-4} \Omega \text{cm}$
Bei Nichtleitern und Halbleitern: $[\varrho] = \Omega \cdot \text{m}$

$[\gamma] = \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
 $\gamma_{\text{Cu}} = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
 $\gamma_{\text{Al}} = 36 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
 $[\varrho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
 $\varrho_{\text{Cu}} = 0,0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
 $\varrho_{\text{Al}} = 0,0278 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

$R = \frac{l}{\gamma \cdot A^*}; R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$

$l = R \cdot \gamma \cdot A$

$A = \frac{l}{\gamma \cdot R}$

$\gamma = \frac{1}{\varrho}$

Widerstand und Leitwert

R Widerstand (Widerstandswert)
G Leitwert

$[G] = \frac{1}{\Omega} = S$

$G = \frac{1}{R}$

Widerstand und Temperatur

Metall	α in $1/K$
Kupfer	0,0039
Aluminium	0,004
Nickelin	0,00015
Konstantan	0,00004

ΔR Widerstandsänderung
 R_{ϑ} Widerstand bei der Temperatur ϑ
 R_{20} Widerstand bei der Temperatur 20 °C
 ϑ Temperatur
 ϑ_1 Anfangstemperatur
 ϑ_2 Endtemperatur
 $\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz
 α Temperaturkoeffizient (Temperaturbeiwert)

$[\Delta R] = \Omega$
 $[\Delta \vartheta] = K = ^\circ C$
 $\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$
 $\Delta R = R_{\vartheta} - R_{20}$
 $[\alpha] = \frac{1}{K} = \frac{1}{^\circ C}$

$\Delta R = \alpha \cdot R_{20} \cdot \Delta \vartheta$

$R_{\vartheta} = R_{20} + \Delta R$

$R_{\vartheta} = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$

$\Delta \vartheta = \frac{R_{\vartheta} - R_{20}}{\alpha \cdot R_{20}}$

i Weitere Werte für α , γ und ϱ : Seite 61.

Stromdichte

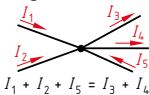
Strombelastbarkeit von isolierten Leitungen: Seite 62.
*Nach DIN 1304: statt J auch S.

J* Stromdichte
I Stromstärke
A Leiterquerschnitt

$[J] = \frac{A}{\text{mm}^2}$

$J = \frac{I}{A}$

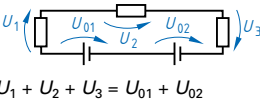
Knotenregel (1. Kirchhoff'sche Regel)



$\sum I_{\text{zu}}$ Summe der zufließenden Ströme
 $\sum I_{\text{ab}}$ Summe der abfließenden Ströme
 I_1, I_2, I_5 zufließende Ströme
 I_3, I_4 abfließende Ströme

$\sum I_{\text{zu}} = \sum I_{\text{ab}}$

Maschenregel (2. Kirchhoff'sche Regel)

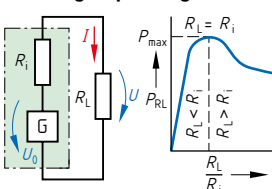


$\sum U_{\text{erz}}$ Summe der Erzeugerspannungen
 $\sum U_{\text{verbr}}$ Summe der Verbraucherspannungen
 U_{01}, U_{02} Erzeugerspannungen (U_{erz})
 U_1, U_2, U_3 Verbraucherspannungen (U_{verbr})

$\sum U_{\text{erz}} = \sum U_{\text{verbr}}$

6.2 Anpassung

Leistungsanpassung



R_L Lastwiderstand
 R_i Innenwiderstand
U Lastspannung
 U_0 Leerlaufspannung, Quellenspannung
I Laststrom
 I_k Kurzschlussstrom
 P_{max} größte Leistung an R_L

Leistungsanpassung:

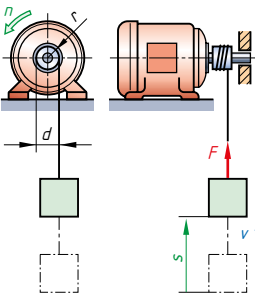
$R_L = R_i \quad U = \frac{U_0}{2} \quad I = \frac{I_k}{2}$

$P_{\text{max}} = \frac{U_0 \cdot I_k}{2 \cdot 2} \quad P_{\text{max}} = \frac{U_0^2}{4 \cdot R_i}$

Stromanpassung: $R_L \ll R_i$
Spannungsanpassung: $R_L \gg R_i$

10.2.6 Mechanische Leistung

Leistung bei geradliniger Bewegung und bei Drehbewegung



- P Leistung
- W Arbeit
- t Arbeitszeit
- F Kraft
- s Kraftweg
- v Umfangsgeschwindigkeit
- n Umdrehungsfrequenz, Drehzahl
- r Radius
- M Drehmoment
- ω Winkelgeschwindigkeit, Drehgeschwindigkeit

$$[P] = \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

$$1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ W}$$

$$v = 2\pi \cdot n \cdot r$$

$$M = F \cdot r$$

$$\omega = 2\pi \cdot n$$

$$[\omega] = \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{1}{\text{s}}$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t}$$

$$P = F \cdot v$$

$$P = F \cdot 2\pi \cdot n \cdot r$$

$$P = M \cdot \omega$$

$$P = M \cdot 2\pi \cdot n$$



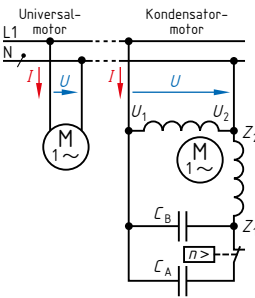
In der Praxis häufig verwendet: P in kW, M in Nm, n in $\frac{1}{\text{min}}$ \implies

$$P = \frac{M \cdot n}{9549}$$

10.3 Umlaufende elektrische Maschinen

10.3.1 Wechselstrommotor und Drehstrommotor

Wechselstrommotor



- P_1 zugeführte Leistung
- P_2 abgegebene Leistung
- U Leiterspannung
- I Leiterstrom
- $\cos \varphi$ Wirkfaktor
- η Wirkungsgrad
- Q_{CB} Blindleistung des Betriebskondensators
- C_A Kapazität des Anlaufkondensators
- C_B Kapazität des Betriebskondensators
- ω Kreisfrequenz
- U_C Kondensatorbemessungsspannung

- Universalmotor
- Kondensatormotor

$$P_1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_2 = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Kondensatormotor

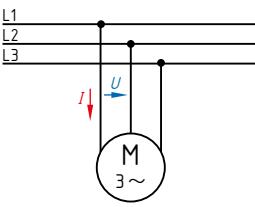
$$Q_{CB} = 1,3 \frac{\text{kvar}}{\text{kW}} \cdot P_2$$

$$C_B = \frac{Q_{CB}}{\omega \cdot U^2}$$

$$C_A = 3 \cdot C_B$$

$$U_C = 1,35 \cdot U$$

Drehstrommotor



- P_1 zugeführte Leistung
- P_2 abgegebene Leistung
- U Leiterspannung
- I Leiterstrom
- $\cos \varphi$ Wirkfaktor
- η Wirkungsgrad
- n Läuferdrehzahl
- n_s Drehfeld Drehzahl
- s Schlupf (in %)
- f_L Frequenz der Läuferspannung
- f Netzfrequenz
- p Polpaarzahl

- Drehstromasynchronmotor
- Drehstromsynchronmotor

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Drehstromasynchronmotor

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \%$$

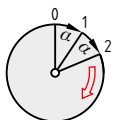
$$f_L = \frac{f \cdot s}{100 \%$$

$$f_L = f \cdot \frac{n_s - n}{n_s}$$

Drehstromsynchronmotor

$$n = n_s = \frac{f}{p}$$

10.3.2 Schrittmotor



- α Schrittwinkel
- p Polpaarzahl
- m Strangzahl (Phasenzahl)
- z_u Schrittzahl/Umdrehung
- n Drehzahl
- f_{sch} Schrittfrequenz

Vollschrittbetrieb

$$z_u = 2 \cdot p \cdot m$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{z_u}$$

$$n = \frac{f_{sch}}{z_u}$$