



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
Düsselberger 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
2	Längen- und Flächenberechnungen
3	Körper-, Volumen- und Masseberechnungen
4	Mechanik
5	Wärmelehre
6	Elektrotechnische Grundlagen
7	Elektrisches Feld, Kondensator
8	Magnetisches Feld
9	Wechselstrom und Drehstrom
10	Elektrische Maschinen
11	Elektrische Anlagen
12	Digitaltechnik
13	Elektronik
14	Regelungstechnik
15	Messtechnik
16	Tabellen

○ 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 Flächenberechnungen
- 3 Körper-, Volumen- und Masseberechnungen
- 4 Mechanik
- 5 Wärmelehre
- 6 Elektrotechnische Grundlagen
- 7 Elektrisches Feld, Kondensator
- 8 Magnetisches Feld
- 9 Wechselstrom und Drehstrom
- 10 Elektrische Maschinen
- 11 Elektrische Anlagen
- 12 Digitaltechnik
- 13 Elektronik
- 14 Regelungstechnik
- 15 Messtechnik
- 16 Tabellen

Arbeiten mit Formeln	hintere Innenumschlagseite	
1	Mathematische Grundlagen	6
1.1	Summieren, Multiplizieren	6
1.2	Rechnen mit Brüchen	6
1.3	Potenzen, Wurzeln, Logarithmen	7
1.4	Winkel, Winkeleinheiten	7
1.5	Rechnen am Dreieck	8
1.6	Zahlensysteme, BCD-Code, Rechenregeln	8
2	Längen- und Flächenberechnungen	9
2.1	Drahtlängen von Rundspulen und von Rechteckspulen	9
2.2	Flächen	9
3	Körper-, Volumen- und Masseberechnungen	11
3.1	Volumen und Oberflächen	11
3.2	Masse und Gewichtskraft	11
4	Mechanik	12
4.1	Kräfte	12
4.2	Wirkungsgrad, Arbeitsgrad	13
5	Wärmelehre	13
5.1	Temperatur	13
5.2	Wärmedehnung	13
5.3	Wärmemenge	13
6	Elektrotechnische Grundlagen	14
6.1	Grundgesetze	14
6.2	Anpassung	14
6.3	Schaltungen von Widerständen	15
6.4	Spannungsteiler	16
6.5	Widerstandsbestimmung	16
6.6	Unabgeglichene Brückenschaltung (Dreieck-Stern-Umwandlung)	16
6.7	Elektrische Arbeit und elektrische Leistung	17
6.8	Kosten der elektrischen Arbeit (Arbeitspreis)	17
6.9	Elektrowärme	17
6.10	Elektrochemie	18
6.11	Schaltung von gleichartigen Spannungsgerzeugern	18
7	Elektrisches Feld, Kondensator	19
7.1	Elektrische Feldstärke	19
7.2	Kondensator	19
7.3	Zeitkonstante bei RC-Schaltung, Ladezeit und Entladzeit	19
8	Magnetisches Feld	20
8.1	Magnetische Größen	20
8.2	Haltekraft von Elektromagneten	20
8.3	Magnetische Feldkräfte	21
8.4	Induktion	21
9	Wechselstrom und Drehstrom	22
9.1	Grundgrößen des Wechselstroms	22
9.2	Wechselstromwiderstände	22
9.3	Ohmsches Gesetz für den Wechselstromkreis	24
9.4	Resonanz (Parallel- und Reihenschwingkreis)	25
9.5	Leistung bei Wechselstrom	25
9.6	Kompensation der Blindleistung	25
9.7	Sinus- und nichtsinusförmige Spannungen	26
9.8	Hoch- und Tiefpässe	27
9.9	Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom)	28
10	Elektrische Maschinen	29
10.1	Transformator	29
10.2	Antriebstechnik	30
10.2.1	Bewegungen	30
10.2.2	Mechanische Arbeit, mechanische Energie	31
10.2.3	Riementrieb, Zahnradtrieb, Schneckentrieb	32
10.2.4	Rollen und Flaschenzug	32
10.2.5	Drehmomente	32
10.2.6	Mechanische Leistung	33
10.3	Umlaufende elektrische Maschinen	33
10.3.1	Wechselstrommotor und Drehstrommotor	33
10.3.2	Schrittmotor	33
10.3.3	Gleichstrommaschinen	34
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	15	Messtechnik	59
11.1.6	Messen des Isolationswiderstandes	36	15.1	Messfehler von Zeigermessgeräten	59
11.1.7	Messen der Isolationsimpedanz	36	15.2	Messfehler von digitalen Messgeräten	59
11.1.8	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD)	36	15.3	Messwertbestimmung sinusförmiger Größen mit dem Oszilloskop	59
11.1.9	Auslösekennlinien von Überstrom-Schutzeinrichtungen	37	i	Info und Tabellenteil	60
11.2	Leitungsberechnungen	38	Tab. 1:	Wichtige Formelzeichen, Größen und Einheiten*	60
11.2.1	Unverzweigte Leitungen	38	Tab. 2:	SI-Basisgrößen und SI-Basiseinheiten (Grundeinheiten)	60
11.2.2	Verzweigte Leitungen	39	Tab. 3:	Vielfache und Teile von Einheiten	60
11.2.3	Ringleitung	40	Tab. 4:	Mathematische Zeichen	60
11.2.4	Bestimmung des Leiterquerschnittes A	41	Tab. 5:	Wichtige physikalische Konstanten	60
11.2.5	Bestimmung des Leiterquerschnittes A bei Oberschwingungen	42	Tab. 6:	Griechisches Alphabet	60
11.3	Licht und Beleuchtung	43	Tab. 7:	Werkstoffwerte von Metallen (und Kohle)	61
11.3.1	Lichttechnische Größen	43	Tab. 8:	Werkstoffwerte von Legierungen	61
11.3.2	Berechnung von Beleuchtungsanlagen	43	Tab. 9:	Elektrochemische Äquivalente und Wertigkeit	61
11.4	Antennen	44	Tab. 10:	Verlegearten von Kabeln und isolierten Leitungen	62
11.4.1	Frequenzbereiche	44	Tab. 11:	Bemessungswerte der Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung	62
11.4.2	Wellenlänge, Empfangsspannung, Wellenwiderstand	44	Tab. 12:	Zuordnung von Leitungsschutzsicherungen gG und LS-Schaltern Typ B, C und D	63
11.4.3	Verstärkungen, Dämpfungen, Pegel	45	Tab. 13:	Umrechnungsfaktoren f_1 für abweichende Umgebungstemperaturen	63
11.4.4	Mechanische Sicherheit von Antennenanlagen	47	Tab. 14:	Umrechnungsfaktoren f_2 für Häufung von Kabeln oder Leitungen	63
12	Digitaltechnik	48	Tab. 15:	Umrechnungsfaktoren f_3 für die Anzahl der belasteten Adern bei Verlegung in Luft	63
12.1	Grundfunktionen	48	Tab. 16:	Typische Verbraucher- und Verzerrungsströme elektronischer Verbraucher	64
12.2	Zusammengesetzte Funktionen	48	Tab. 17:	Belastbarkeit von Kabeln und Leitungen für Verlegearten mit Berücksichtigung der Oberschwingungen	64
12.3	Spezielle zusammengesetzte Funktionen	48	Tab. 18:	Umrechnungsfaktor f_4 für Verbraucher, die Oberschwingungen erzeugen	64
12.4	Rechengesetze der Schaltalgebra	49	Tab. 19:	Leiternennquerschnitte in mm ²	65
13	Elektronik	50	Tab. 20:	Bemessungsströme von Leitungsschutzschaltern	65
13.1	Halbleiterdioden	50	Tab. 21:	Fertigungswerte für Widerstände und Kondensatoren (E-Reihen)	65
13.2	Bipolarer Transistor	50	Tab. 22:	Bemessungsleistung von Widerständen	65
13.3	Feldeffekttransistor in Sourceschaltung	51	Tab. 23:	Farbkennzeichnung von Widerständen	65
13.4	Transistor als Schalter	52	Tab. 24:	Wertkennzeichnung von Widerständen durch Buchstaben	66
13.5	Kippschaltungen	52	Tab. 25:	Schutzarten elektrischer Betriebsmittel	66
13.6	Gleichrichterschaltungen	53		Sachwortverzeichnis	67
13.7	Glättung und Siebung	54			
13.8	Spannungsstabilisierung	55			
13.9	Kühlung von elektronischen Halbleiterbauelementen	55			
13.10	Leistungselektronik	56			
13.11	Operationsvertärker	57			
14	Regelungstechnik	58			
14.1	Regelstrecken	58			
14.2	Unstetiges Regeln	58			
14.3	Stetiges Regeln	58			

*siehe vordere bzw. hintere Umschlag-Innenseite

6 Elektrotechnische Grundlagen

6.1 Grundgesetze

Ohmsches Gesetz

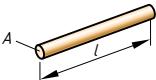


U Spannung
 I Stromstärke
 R Widerstand

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

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

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: $[\varrho] = \Omega \cdot \text{m}$

$$[\gamma] = \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$$

$$\gamma_{\text{Cu}} = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$$

$$\gamma_{\text{Al}} = 36 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$$

$$[\varrho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\varrho_{\text{Cu}} = 0,0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\varrho_{\text{Al}} = 0,0278 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$[\Delta R] = \Omega$$

$$[\Delta\vartheta] = K = {}^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$$

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

$$[\alpha] = \frac{1}{K} = \frac{1}{{}^\circ\text{C}}$$

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

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

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

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

Stromdichte

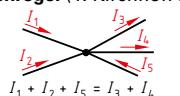
Strombelastbarkeit von isolierten Leitungen: Seite 62.
*Nach DIN 1304: statt J auch S .

J^* Stromdichte
 I Stromstärke
 A Leiterquerschnitt

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

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

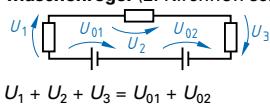
Knotenregel (1. Kirchhoff'sche Regel)



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

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

Maschenregel (2. Kirchhoff'sche Regel)

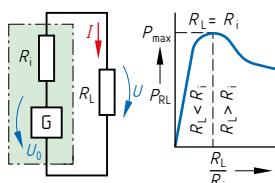


$\sum U_{erz}$ Summe der Erzeugerspannungen
 $\sum U_{verbr}$ Summe der Verbraucherspannungen
 U_{erz}, U_{verbr} Erzeugerspannungen (U_{erz})
 U_1, U_2, U_3 Verbraucherspannungen (U_{verbr})

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

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:

$$R_L = R_i$$

$$U = \frac{U_0}{2}$$

$$I = \frac{I_k}{2}$$

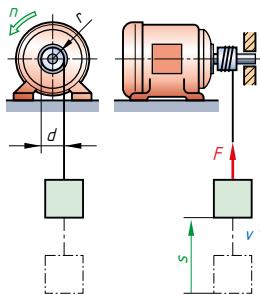
$$P_{max} = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{I_k}{2}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 [P] &= \frac{Nm}{s} \\
 1 \frac{Nm}{s} &= 1 \frac{J}{s} \\
 &= 1 W \\
 v &= 2\pi \cdot n \cdot r \\
 M &= F \cdot r \\
 \omega &= 2\pi \cdot n \\
 [\omega] &= \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{1}{s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} \\
 P &= F \cdot v \\
 P &= F \cdot 2\pi \cdot n \cdot r \\
 P &= M \cdot \omega \\
 P &= M \cdot 2\pi \cdot n
 \end{aligned}$$

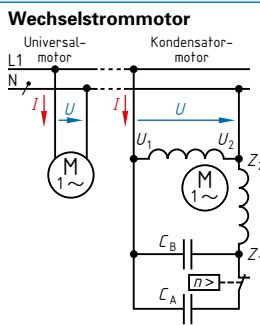


In der Praxis häufig verwendet: P in kW, M in Nm, n in $\frac{1}{\text{min}}$

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

10.3 Umlaufende elektrische Maschinen

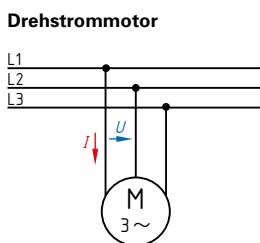
10.3.1 Wechselstrommotor und Drehstrommotor



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 Kondensatormessspannung

- Universal-motor
- Kondensatormotor

$$\begin{aligned}
 P_1 &= U \cdot I \cdot \cos \varphi \\
 P_2 &= U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta \\
 \eta &= \frac{P_2}{P_1}
 \end{aligned}$$



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

- Drehstrom-asynchron-motor
- Drehstrom-synchron-motor

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \\
 P_2 &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta \\
 \eta &= \frac{P_2}{P_1}
 \end{aligned}$$

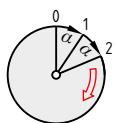
- Drehstrom-asynchron-motor
- Drehstrom-synchron-motor

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \% \\
 f_L &= \frac{f \cdot s}{100 \%} \\
 f_L &= f \cdot \frac{n_s - n}{n_s}
 \end{aligned}$$

- Drehstrom-synchron-motor

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

10.3.2 Schrittmotor



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

Vollschritt-betrieb

$$\begin{aligned}
 z_u &= 2 \cdot p \cdot m \\
 \alpha &= \frac{360^\circ}{z_u} \\
 f_{sch} &= \frac{f_u}{z_u}
 \end{aligned}$$