



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  
Düsseldorfer Straße 23 • 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 30105**

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

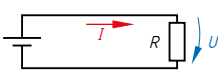
11.1.5	Schutzmaßnahmen im IT-System	36
11.1.6	Messen des Isolationswiderstandes	36
11.1.7	Messen der Isolationsimpedanz	36
11.1.8	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD)	36
11.1.9	Auslösekennlinien von Überstrom-Schutzeinrichtungen	37
11.2	Leitungsberechnungen	38
11.2.1	Unverzweigte Leitungen	38
11.2.2	Verzweigte 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
<b>12</b>	<b>Digitaltechnik</b>	<b>48</b>
12.1	Grundfunktionen	48
12.2	Zusammengesetzte Funktionen	48
12.3	Spezielle zusammengesetzte Funktionen	48
12.4	Rechengesetze der Schaltalgebra	49
<b>13</b>	<b>Elektronik</b>	<b>50</b>
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
<b>14</b>	<b>Regelungstechnik</b>	<b>58</b>
14.1	Regelstrecken	58
14.2	Unstetiges Regeln	58
14.3	Stetiges Regeln	58

<b>15</b>	<b>Messtechnik</b>	<b>59</b>
15.1	Messfehler von Zeigermessgeräten	59
15.2	Messfehler von digitalen Messgeräten	59
15.3	Messwertbestimmung sinusförmiger Größen mit dem Oszilloskop	59
<b>i</b>	<b>Info und Tabellenteil</b>	<b>60</b>
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 <sup>2</sup>	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

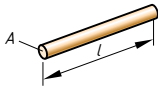


$U$  Spannung  
 $I$  Stromstärke  
 $R$  Widerstand

$$\begin{aligned} [U] &= \text{V} \\ [I] &= \text{A} & 1 \text{ A} &= 1 \frac{\text{V}}{\Omega} \\ [R] &= \Omega \end{aligned}$$

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

#### Leiterwiderstand



\* Nach DIN 1304:  
 für Querschnitt auch  $S$  oder  
 $q$ , für elektr. Leitfähigkeit auch  
 $\sigma$  oder  $\chi$ .

$R$  Leiterwiderstand  
 $A^*$  Leiterquerschnitt  
 $l$  Leiterlänge  
 $\gamma^*$  elektr. Leitfähigkeit  
 $\varrho$  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:  $[\varrho] = \Omega \cdot \text{m}$

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

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

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

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

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

#### Widerstand und Leitwert

$R$  Widerstand  
 (Widerstandswert)  
 $G$  Leitwert

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

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

#### Widerstand und Temperatur

Metall	$\alpha$ in $1/\text{K}$
Kupfer	0,0039
Aluminium	0,004
Nickelin	0,00015
Konstantan	0,00004

$\Delta R$  Widerstandsänderung  
 $R_\vartheta$  Widerstand bei der  
 Temperatur  $\vartheta$   
 $R_{20}$  Widerstand bei der  
 Temperatur  $20^\circ \text{C}$   
 $\vartheta$  Temperatur  
 $\vartheta_1$  Anfangstemperatur  
 $\vartheta_2$  Endtemperatur  
 $\Delta \vartheta$  Temperaturdifferenz  
 $\alpha$  Temperaturkoeffizient  
 (Temperaturbeiwert)

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

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

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

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

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

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

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

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



Weitere Werte für  
 $\alpha$ ,  $\gamma$  und  $\varrho$ : Seite 61.

#### Stromdichte

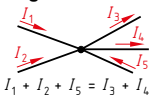
Strombelastbarkeit von iso-  
 lierten Leitungen: Seite 62.  
 \*Nach DIN 1304: statt  $J$  auch  $S$ .

$J^*$  Stromdichte  
 $I$  Stromstärke  
 $A$  Leiterquerschnitt

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

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

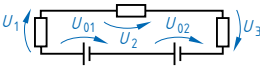
#### Knotenregel (1. Kirchhoff'sche Regel)



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

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

#### Maschenregel (2. Kirchhoff'sche Regel)



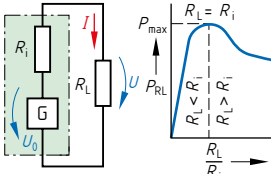
$$U_1 + U_2 + U_3 = U_{01} + U_{02}$$

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

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

### 6.2 Anpassung

#### Leistungsanpassung



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

Leistungsanpassung:

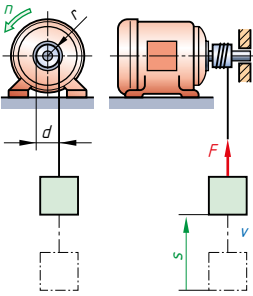
$$R_L = R_i \quad U = \frac{U_0}{2} \quad I = \frac{I_k}{2}$$

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

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  
 $\omega$  Winkelgeschwindigkeit, Drehgeschwindigkeit

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

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

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

$$M = F \cdot r$$

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

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

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

$$P = F \cdot v$$

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

$$P = M \cdot \omega$$

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



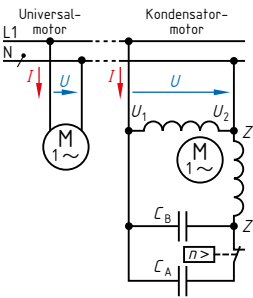
In der Praxis häufig verwendet:  $P$  in kW,  $M$  in Nm,  $n$  in  $\frac{1}{\text{min}}$   $\implies$

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

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  
 $\eta$  Wirkungsgrad  
 $Q_{CB}$  Blindleistung des Betriebskondensators  
 $C_A$  Kapazität des Anlaufkondensators  
 $C_B$  Kapazität des Betriebskondensators  
 $\omega$  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

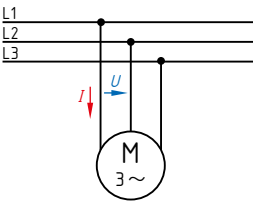
$$Q_{CB} = 1,3 \frac{\text{kvar}}{\text{kW}} \cdot P_2$$

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

$$C_A = 3 \cdot C_B$$

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

Drehstrommotor



$P_1$  zugeführte Leistung  
 $P_2$  abgegebene Leistung  
 $U$  Leiterspannung  
 $I$  Leiterstrom  
 $\cos \varphi$  Wirkfaktor  
 $\eta$  Wirkungsgrad  
 $n$  Läuferdrehzahl  
 $n_s$  Drehfeldrehzahl  
 $s$  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

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

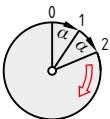
$$f_L = \frac{f \cdot s}{100 \%}$$

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

Drehstromsynchronmotor

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

10.3.2 Schrittmotor



$\alpha$  Schrittwinkel  
 $p$  Polpaarzahl  
 $m$  Strangzahl (Phasenzahl)  
 $z_u$  Schrittzahl/Umdrehung  
 $n$  Drehzahl  
 $f_{sch}$  Schrittfrequenz

Vollschrittbetrieb

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

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

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