

Heinrich Hübscher, Jürgen Klaue

# **Grundlagen elektrischer Betriebsmittel**

2. Auflage

Bestellnummer 222569

***westermann***

Diesem Buch wurden die bei Manuskriptabschluss vorliegenden neuesten Ausgaben der DIN-Normen, VDI-Richtlinien und sonstigen Bestimmungen zu Grunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die neuesten Ausgaben der DIN-Normen und VDI-Richtlinien und sonstigen Bestimmungen selbst.

Die DIN-Normen wurden wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Maßgebend für das Anwenden der Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth-Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Die in diesem Werk aufgeführten Internetadressen sind auf dem Stand zum Zeitpunkt der Drucklegung. Die ständige Aktualität der Adressen kann vonseiten des Verlages nicht gewährleistet werden. Darüber hinaus übernimmt der Verlag keine Verantwortung für die Inhalte dieser Seiten.

Druck: westermann druck GmbH, Braunschweig

**service@westermann-berufsbildung.de**  
**www.westermann-berufsbildung.de**

Bildungshaus Schulbuchverlage Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH, Postfach 33 20,  
38023 Braunschweig

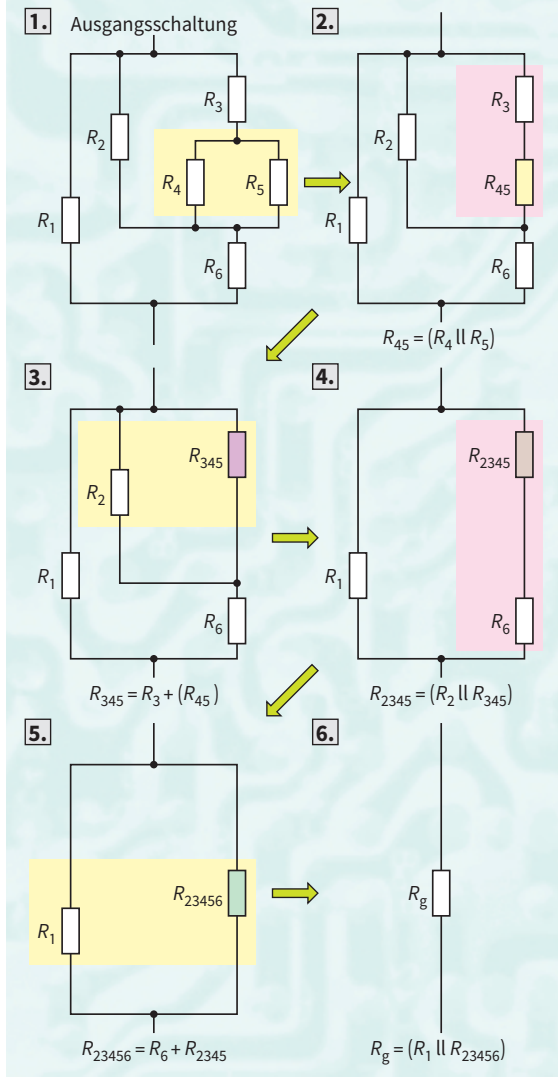
ISBN 978-3-14-**222569-2**

**westermann** GRUPPE

© Copyright 2018: Bildungshaus Schulbuchverlage Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH, Braunschweig  
Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Nutzung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages.  
Hinweis zu § 52a UrhG: Weder das Werk noch seine Teile dürfen ohne eine solche Einwilligung eingescannt und in ein Netzwerk eingestellt werden. Dies gilt auch für Intranets von Schulen und sonstigen Bildungseinrichtungen.

<b>1</b>	<b>Stromkreis</b> .....	5	3.2.2	Entstehung der Spannungen.....	45
1.1	<b>Aufbau</b> .....	5	<i>Aufgaben</i> .....	46	
1.2	<b>Elektrische Spannung</b> .....	6	3.3	Gleichspannung.....	47
1.3	<b>Elektrischer Strom</b> .....	7	3.3.1	Kenndaten von Batterien .....	47
	<i>Aufgaben</i> .....	8	3.3.2	Akkumulatoren .....	49
1.4	<b>Messen von Stromstärke und Spannung</b> .....	9	<i>Aufgaben</i> .....	49	
1.5	<b>Elektrischer Widerstand</b> .....	11	3.3.3	Fotovoltaikanlagen.....	51
	<i>Aufgaben</i> .....	11	<i>Aufgaben</i> .....	51	
1.6	<b>Leistung und Arbeit</b> .....	2	3.3.4	Spannungsverhalten .....	52
	<i>Aufgaben</i> .....	13	<i>Aufgaben</i> .....	52	
<b>2</b>	<b>Abhängigkeiten im Stromkreis</b> .....	14	3.3.5	Schaltungen von Spannungsquellen.....	53
2.1	<b>Spannung und Stromstärke</b> .....	14	<i>Aufgaben</i> .....	53	
	<i>Aufgaben</i> .....	17	<b>4</b>	<b>Spulen und Kondensatoren</b> .....	55
2.2	<b>Widerstand und Stromstärke</b> .....	17	4.1	Spulen in Leuchtstofflampen-Schaltungen .....	55
	<i>Aufgaben</i> .....	18	<i>Aufgaben</i> .....	55, 57	
2.3	<b>Widerstand und Leistung</b> .....	19	4.2	Widerstand der Spule.....	58
	<i>Aufgaben</i> .....	21	<i>Aufgaben</i> .....	59	
2.4	Schaltungen mit Widerständen .....	22	4.3	Reihenschaltungen mit Spulen und Wirkwiderständen .....	59
2.4.1	Grundschaltungen.....	22	<i>Aufgaben</i> .....	63	
2.4.2	Gesamtwiderstände.....	24	4.4	Parallelschaltungen mit Spulen und Wirkwiderständen .....	64
	<i>Aufgaben</i> .....	25	<i>Aufgaben</i> .....	65	
2.4.3	Gruppenschaltungen.....	26	4.5	Kondensatoren .....	66
	<i>Aufgaben</i> .....	27	<i>Aufgaben</i> .....	68	
2.4.4	Messung von Widerständen.....	28	4.6	Widerstand des Kondensators .....	69
	<i>Aufgaben</i> .....	29, 30	<i>Aufgaben</i> .....	70	
2.5	Widerstand von Leitern .....	31	4.7	Schaltung mit Kondensatoren und Wirkwiderständen .....	70
	<i>Aufgaben</i> .....	33	<i>Aufgaben</i> .....	72	
<b>3</b>	<b>Spannungserzeugung</b> .....	35	4.8	Reihenschaltungen mit <b>Spulen, Kondensatoren</b> und Wirkwiderständen .....	72
3.1	Wechselspannung.....	35	<i>Aufgaben</i> .....	73	
3.1.1	Darstellung .....	35	4.9	Parallelschaltungen mit Spulen, Kondensatoren und Wirkwiderständen .....	74
3.1.2	Entstehung.....	36	<i>Aufgaben</i> .....	75	
3.1.3	Grundgrößen .....	37	<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	76	
3.1.4	Leistung .....	38	<b>Bildquellenverzeichnis</b> .....	84	
	<i>Aufgaben</i> .....	39			
3.1.5	<b>Darstellung von Wechselgrößen</b> ... ..	40			
	<i>Aufgaben</i> .....	41, 42			
3.2	<b>Drei-Phasen-Wechselspannung</b> ....	43			
3.2.1	<b>Spannungen in Verbraucheranlagen</b> .....	43			

**Beispiel für die Ermittlung des Gesamtwiderstandes einer Gruppenschaltung**



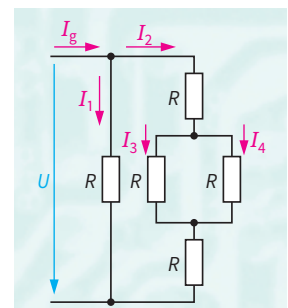
■ Schritte bei der Ermittlung des Gesamtwiderstandes einer Gruppenschaltung:

1. Eine Grundschaltung (Parallel- oder Reihenschaltung) aus zwei oder mehreren Widerständen ( $R_1 \dots R_n$ ) suchen und zu einem einzelnen Widerstand ( $R_{1n}$ ) zusammenfassen.
2. Neuen Stromlaufplan der Gruppenschaltung mit dem zusammengefassten Widerstand ( $R_{1n}$ ) zeichnen.
3. Im Stromlaufplan eine weitere neu entstandene Grundschaltung suchen, diese zu einem einzelnen Widerstand zusammenfassen usw., bis nur noch der Gesamtwiderstand vorhanden ist.

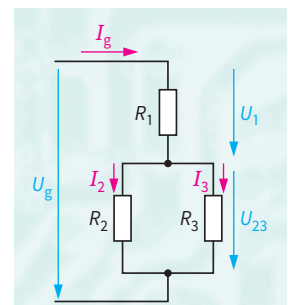
**Aufgaben**

1. Berechnen Sie für die Gruppenschaltung 1a (S. 26)
  - a) die Spannungen an  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$ ,
  - b) die Stromstärken durch  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$ ,
  - c) die Leistungen der einzelnen Widerstände!
2. Berechnen Sie für die Gruppenschaltung 2a (S. 26)
  - a) die Spannungen an  $R_2$  und an  $R_3$ ,
  - b) die Stromstärken durch  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$ ,
  - c) die Leistungen der einzelnen Widerstände!
3. Zeichnen Sie die Gruppenschaltung 1a (S. 26) ab und kennzeichnen Sie durch Pfeile:
  - $U$  (Gesamtspannung),
  - $U_1$  (Spannung an  $R_1$ ),
  - $U_{23}$  (Spannung an  $R_2$  und  $R_3$ ),
  - $I_1$  (Stromstärke durch  $R_1$ ),
  - $I_2$  (Stromstärke durch  $R_2$ ),
  - $I_3$  (Stromstärke durch  $R_3$ ) und  $I_g$ .
 Die Schaltung liegt weiterhin an 230 V. Der Widerstand  $R_3$  wird jetzt verkleinert. Wie wirkt sich diese Änderung auf folgende Größen aus (größer, kleiner oder konstant angeben)?
  - a)  $R_{23}$ ,  $R_g$
  - b)  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_g$
  - c)  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$
  - d)  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_g$
4. Zeichnen Sie die Gruppenschaltung 2a (S. 26) ab und kennzeichnen Sie die Größen durch Strom- und Spannungspfeile (s. Aufgabe 3). Die Schaltung liegt weiterhin an 230 V. Der Widerstand  $R_3$  wird jetzt vergrößert. Wie wirkt sich diese Änderung auf folgende Größen aus (größer, kleiner oder konstant angeben)?
  - a)  $R_{23}$ ,  $R_g$
  - b)  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_g$
  - c)  $U_2$ ,  $U_3$
  - d)  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_g$

5. Für die Widerstands-schaltung sind folgende Größen gegeben:
  - $R = 50 \Omega$ ,  $U = 115 \text{ V}$ .
 Berechnen Sie  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$  und  $I_g$ !



6. Für die Widerstands-schaltung sind folgende Größen gegeben:
  - $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 15 \Omega$ ,
  - $U_1 = 115 \text{ V}$ ,  $I_2 = 2 \text{ A}$ .
 Berechnen Sie  $I_g$ ,  $I_3$ ,  $U_{23}$ ,  $U_g$ ,  $R_3$  und  $R_g$ !



## 3.2 Drei-Phasen-Wechselspannung



1: Wohnhaus mit Dachständer

### 3.2.1 Spannungen in Verbraucheranlagen

Die Versorgung mit Drei-Phasen-Wechselspannung erfolgt vom VNB über das **Drehstromnetz**.

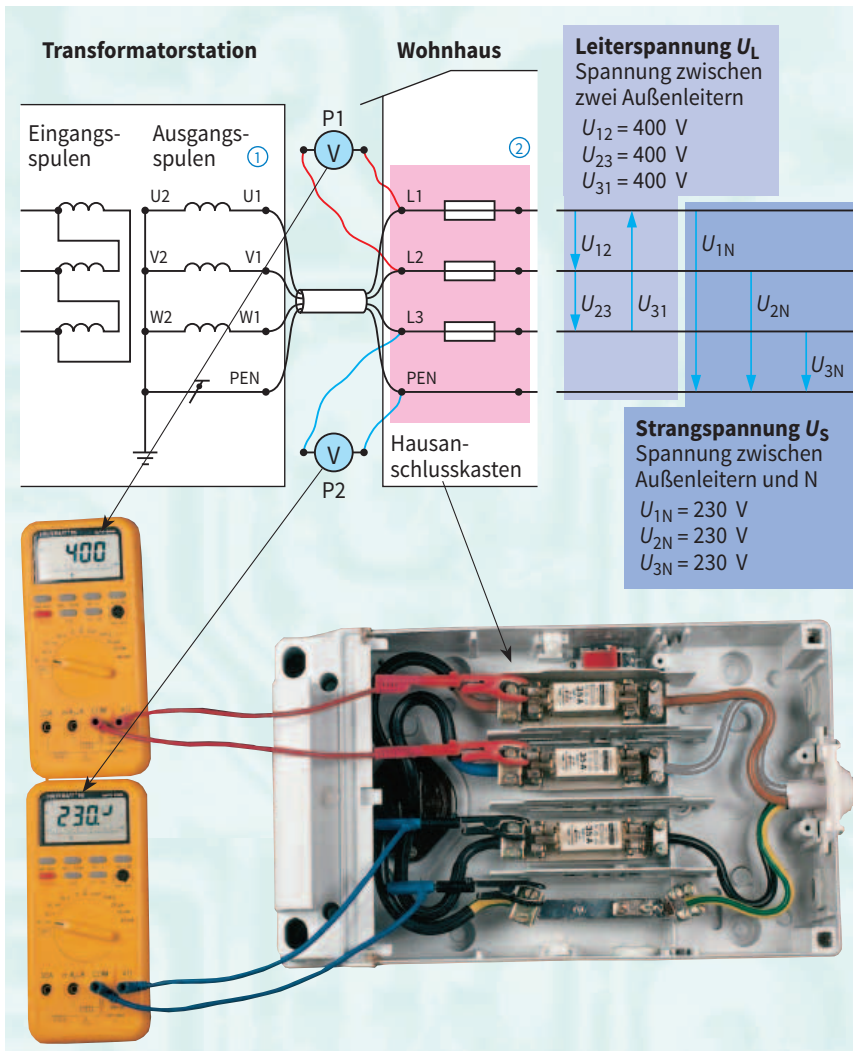
Die elektrische Versorgungsleitung zu den meisten Häusern besteht aus vier Leitern (Abb. 1):

- den **Außenleitern L1, L2, L3** und
- dem **Nullleiter PEN**.

Der **PEN-Leiter** hat zwei Funktionen:

- aktiver Leiter N (Neutralleiter) und
- Schutzleiter (PE).

Als PE-Leiter wird er bei vielen Maßnahmen zum „Schutz gegen elektrischen Schlag“ benutzt. Hier wird er jedoch nur als aktiver Leiter **N** betrachtet.



2: Spannungsversorgung eines Hauses

#### Welche Spannungen sind vorhanden?

Wir messen in einem Hausanschlusskasten (HAK) (Abb. 2 ②) zwei Spannungen. Mit dem Messgerät P1 wird zwischen den Außenleitern L1 und L2 die Spannung von 400 V und zwischen L3 und PEN (Messgerät P2) die Spannung von 230 V gemessen.

Wir beschäftigen uns zuerst mit der vereinfachten Darstellung des Versorgungsnetzes (Abb. 2). Die Anlagenanteile vor dem Transformator sind nicht dargestellt. Ein Transformator besteht aus zwei Spulen je Phase, nämlich der Eingangsspule und der Ausgangsspule ① (Fachwort: Strang). In der dargestellten Transformatorstation werden die Eingangsspannungen heruntertransformiert. Für unsere Betrachtung müssen wir lediglich wissen, dass in den Ausgangsspulen jeweils eine Spannung von 230 V erzeugt wird.

Da sich die Leiterspannung  $U_L$  aus zwei Strangspannungen zusammensetzt, erwartet man vielleicht die doppelte Spannung oder 0 V. Es sind aber 400 V! Daraus lässt sich ableiten, dass die Strangspannungen offensichtlich nicht einfach addiert oder subtrahiert werden können.

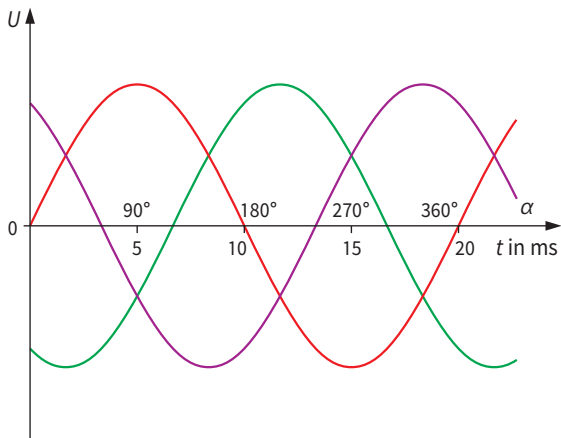
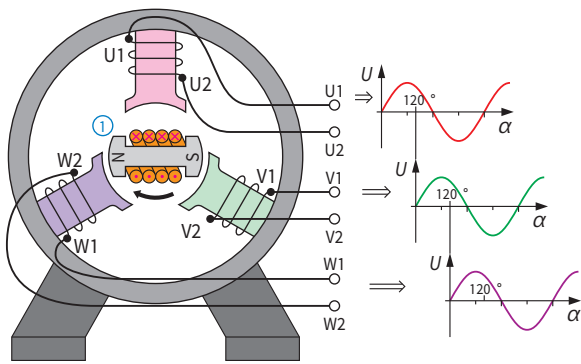
- Die Außenleiter im Drehstromnetz haben die Bezeichnungen L1, L2 und L3.
- Die Spannung zwischen zwei Außenleitern heißt Leiterspannung  $U$  (oder  $U_L$ ).
- Die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter N heißt Strangspannung  $U_S$ .

### 3.2.2 Entstehung der Spannungen

Ein drehender Magnet induziert in einer Spule eine Wechselspannung. Bei einem Drehstrom-Generator dreht sich der Anker ① an drei Spulen vorbei. Diese sind um  $120^\circ$  versetzt auf einem Stator angeordnet. Es entstehen dadurch drei Wechselspannungen.

Diese Spannungen entstehen nacheinander. Wenn sich der Magnet 50-mal in der Sekunde dreht ( $f = 50 \text{ Hz}$ ), werden für einen Umlauf 20 ms benötigt. Für  $1/3$  Umlauf sind also 6,67 ms notwendig, d. h. die Spannungen sind um 6,67 ms verschoben. Das entspricht  $120^\circ$ .

Die drei Spannungskurven haben wir in ein Diagramm eingetragen. Es ergibt sich das Bild von drei verschobenen sinusförmigen Wechselspannungen (Abb. 4).



4: Drei-Phasen-Wechselspannungen

Ein Drehstrom-Generator hat drei Statorspulen. Es müssten demnach sechs Klemmen vorhanden sein. Wir wissen aber, dass im VNB-Netz nur vier Leiter geführt werden. Die sechs Anschlüsse der Generatorspulen sind demnach zusammengeschaltet.

- Wir wollen mit den folgenden Versuchen erklären,
- wie die Anschlüsse zusammengeschaltet sind und
  - warum diese Schaltungen möglich sind.

**Versuch 1**  
 $U_S = 230 \text{ V}$        $P_{\text{Lampe}} = 15 \text{ W}$

The circuit diagram shows three parallel branches connected to a generator. Each branch contains a lamp (represented by a circle with an X) and an ammeter (represented by a circle with A). The generator terminals are labeled U1, U2, V1, V2, W1, W2 on the left and X1, X2 on the right. Currents are labeled  $I_{11}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{21}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{31}$ , and  $I_{32}$ .

**Messergebnisse:**

$I_{11} = 65,2 \text{ mA}$	$I_{12} = 65,2 \text{ mA}$
$I_{21} = 65,2 \text{ mA}$	$I_{22} = 65,2 \text{ mA}$
$I_{31} = 65,2 \text{ mA}$	$I_{32} = 65,2 \text{ mA}$

**Versuch 2**

Die Spulenden U2, V2 und W2 werden miteinander verbunden (Generator-Sternpunkt ②), ebenso die Ausgänge X2 der Lampen (Verbraucher-Sternpunkt ③).

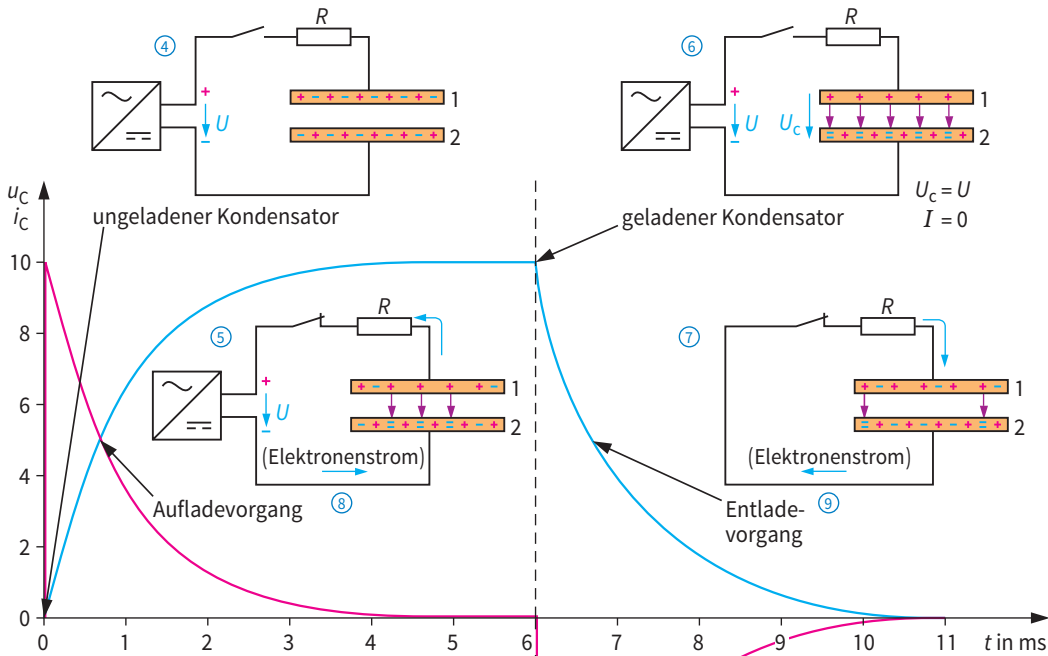
The circuit diagram shows the generator windings connected in a star configuration. The star point is labeled ②. The lamps are also connected in a star configuration, with their star point labeled ③. The generator terminals U1, V1, W1 and X1, X2 are shown. Currents are labeled  $I_{11}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{21}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{31}$ , and  $I_{32}$ .

**Beobachtung:**  
 Die Lampen leuchten genauso hell wie vorher.

**Messergebnisse:**

$I_{11} = 65,2 \text{ mA}$	$I_{12} = 0$
$I_{21} = 65,2 \text{ mA}$	$I_{22} = 0$
$I_{31} = 65,2 \text{ mA}$	$I_{32} = 0$

**Folgerung:**  
 Da in den "Rückleitern" jetzt kein Strom mehr fließt, muss die Summe der zum Knotenpunkt fließenden Ströme gleich null sein. Demnach können die "Rückleiter" entfernt werden.



2: Auf- und Entladevorgang

• **Entladevorgang ⑦**

Der Kondensator wird jetzt von der Spannungsquelle getrennt. Damit die Stromstärke nicht zu groß wird und der Vorgang langsamer abläuft, wird der Kondensator über einen Widerstand  $R$  entladen. Es kommt jetzt zu einem Ausgleich der Ladungen zwischen den Platten. Die frei beweglichen Ladungen (Elektronen) fließen solange von Platte 2 zur Platte 1, bis beide Platten wieder elektrisch neutral sind. Das elektrische Feld baut sich ab.

**Stromrichtung**

Wir betrachten zunächst die Platte 2. Beim Aufladen sind Elektronen auf die Platte geflossen ⑧, beim Entladen fließen sie wieder herunter. Entsprechendes gilt für die Platte 1. Die Stromrichtung kehrt sich also um ⑨.

- Ein Kondensator besteht aus zwei elektrischen Leitern (Folien, Platten), zwischen denen sich ein Isolator (Dielektrikum) befindet.
- Ein Kondensator ist ein Ladungsspeicher. Sein Fassungsvermögen wird als Kapazität  $C$  bezeichnet.
- Die Ladung eines Kondensators steigt mit der Spannung und der Kapazität.
- Beim Laden eines Kondensators steigt die Spannung an, beim Entladen sinkt sie bis auf null.
- Beim Entladen des Kondensators ist die Richtung des Stromes im Vergleich zum Aufladen umgekehrt.

**Kapazität des Plattenkondensators**

Die Kapazität eines Kondensators kann durch seine Baugrößen  $A$ ,  $d$  und  $\epsilon$  verändert werden.

**Fläche  $A$**

Je größer die Plattenfläche, desto mehr Ladungen lassen sich unterbringen. Es gilt:

$$A \uparrow \Rightarrow C \uparrow \quad C \sim A$$

**Plattenabstand  $d$**

Wenn wir den Plattenabstand vergrößern, verringert sich die Wirkung auf die Ladungen. Beide Größen sind umgekehrt proportional.

$$d \uparrow \Rightarrow C \downarrow \quad C \sim \frac{1}{d}$$

**Dielektrikum**

Die Kapazität von Kondensatoren lässt sich erheblich vergrößern, wenn an Stelle von Luft besondere Materialien zwischen die Platten eingefügt werden. Die Materialeigenschaften werden in der Permittivität  $\epsilon$  zusammengefasst.

$$\epsilon \uparrow \Rightarrow C \uparrow \quad C \sim \epsilon$$

Zusammenfassend ergeben sich folgende Formeln:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

$\epsilon_0$  = Elektrische Feldkonstante  
 $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{As}{V}$   
 $\epsilon_r$  = Permittivitätszahl

Beispiele für Permittivitätszahlen:

- Tantaldioxid: 26
- Keramik: 10 bis 50000

Wenn in Schaltungen kapazitive und induktive Blindwiderstände vorhanden sind, können sie sich in ihrer Wirkung teilweise oder vollständig aufheben. Es werden in den einzelnen Schaltungen die folgenden drei Fälle unterschieden:

Reihenschaltung aus $R$ , $X_L$ und $X_C$		
$X_L > X_C$	$X_L = X_C$	$X_L < X_C$
Gesamtspannung eilt der Stromstärke um weniger als $90^\circ$ voraus.	Gesamtspannung und Stromstärke sind in Phase.	Gesamtspannung eilt der Stromstärke um weniger als $90^\circ$ nach.
Parallelschaltung aus $R$ , $X_L$ und $X_C$		
$X_L > X_C$	$X_L = X_C$	$X_L < X_C$
Gesamtstromstärke eilt der Spannung um weniger als $90^\circ$ voraus.	Gesamtstromstärke ist mit der Spannung in Phase.	Gesamtstromstärke eilt der Spannung um weniger als $90^\circ$ nach.

## Aufgaben

1. Zeichnen Sie das Stromstärkendreieck einer Parallelschaltung, wenn folgende Größen gegeben sind:  $I_C = 50 \text{ mA}$ ;  $I_L = 120 \text{ mA}$ ;  $I_R = 250 \text{ mA}$ ; Ermitteln Sie aus der Zeichnung  $I$  und  $\varphi$ !

2. In einer Parallelschaltung aus  $R$ ,  $X_L$  und  $X_C$  wird der Kondensator entfernt.

Wie verändern sich bei konstant bleibender Spannung die Stromstärken und der Phasenverschiebungswinkel (größer, kleiner oder konstant angeben)?

3. Zeichnen Sie das Leistungsdreieck der Parallelschaltung aus  $R$ ,  $X_L$  und  $X_C$ , wenn  $X_L$  größer als  $X_C$  ist!

4. Welche Größen werden in der Parallelschaltung aus  $R$ ,  $X_L$  und  $X_C$  maximal bzw. minimal, wenn bei konstanter Spannung  $X_L = X_C$  ist?

5. Von einer Parallelschaltung aus  $R$ ,  $X_L$  und  $X_C$  sind folgende Größen gegeben:

$R = 200 \Omega$ ;  $I_L = 100 \text{ mA}$ ;  $I_C = 60 \text{ mA}$ ;  $I_R = 30 \text{ mA}$ . Berechnen Sie  $U$ ,  $I$ ,  $X_L$ ,  $X_C$  und  $Z$ !

6. Ein Wirkwiderstand von  $300 \Omega$ , eine Induktivität von  $63,3 \text{ mH}$  und ein Kondensator von  $1 \mu\text{F}$  sind parallel geschaltet.

Wie groß sind bei einer Frequenz von  $1 \text{ kHz}$  der Scheinwiderstand und der Phasenverschiebungswinkel zwischen der anliegenden Spannung und der Gesamtstromstärke?

7. Die Leistung eines an  $230 \text{ V}$  ( $50 \text{ Hz}$ ) betriebenen Gerätes beträgt  $680 \text{ W}$ . Es fließt ein Strom von  $4,3 \text{ A}$ . In der Schaltung befinden sich ein induktiver Blindwiderstand.

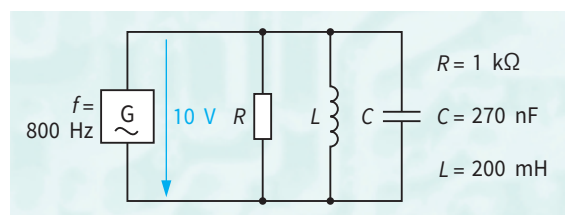
a) Berechnen Sie die Scheinleistung und den Leistungsfaktor!

b) Wie groß sind der Wirk- und der Blindwiderstand?

c) Wie groß muss die Kapazität eines zuzuschaltenden Kondensators sein, damit er die Wirkung der Induktivität gerade aufhebt?

8. Wie groß sind im abgebildeten Stromlaufplan

a) die Stromstärken,  
b) der Gesamtleitwert und  
c) die Leistungen?





akg-images GmbH, Berlin: 6, 8, 11, bilwissedition 12;

Asea Brown Boveri, Mannheim: 34;

CHAUVIN ARNOUX GmbH, Kehl: 21.4;

Druwe & Polastri, Cremlingen/Weddel: 5, 6, 11, 12, 29, 47;

EGO Elektrogeräte GmbH, Oberedingen: 19;

fotolia.com, New York: by-studio 51 (oben links);

Klaue, Jürgen, Bad Kreuznach: 7, 9 (beide), 28, 30, 35 (alle), 43, 44, 48, 49;

Lithos, Wolfenbüttel: alle Grafiken 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75;

Rixe, Dieter, Braunschweig: 6 (sechs Fotos, oben);

Shutterstock.com, New York: pbombaert 12 (oben rechts);

Siemens AG, München: 6 (oben rechts), 66 (unten);

Uwe Brandes Fotografie & EBV, Vechelde / Klein Gleidingen: 4;

Wickert, Harald, Emmelshausen: 43.