



7.3.4 Widerstands-dreieck

In der Reihenschaltung **Bild 1a** kann man die Widerstände berechnen, wenn die Teilspannungen und der Strom bekannt sind. Der Scheinwiderstand Z von Reihenschaltungen kann zeichnerisch durch das Widerstands-dreieck (**Bild 1b**) ermittelt werden. Bei der Berechnung von R , X_L und Z werden die jeweiligen Spannungen durch dieselbe Stromstärke dividiert. Deshalb sind die Widerstände den zugehörigen Spannungen verhältnismäßig und das Widerstands-dreieck ist dem Spannungsdreieck ähnlich.

Beispiel:

In einer Reihenschaltung aus Wirkwiderstand $R = 1 \text{ k}\Omega$ und induktivem Blindwiderstand X_L fließt bei $U = 24 \text{ V}$ ein Strom $I = 4,8 \text{ mA}$. Berechnen Sie **a)** den Scheinwiderstand Z , **b)** den induktiven Blindwiderstand X_L und **c)** die Teilspannungen U_w und U_{bl} .

Lösung:

$$\text{a) } Z = \frac{U}{I} = \frac{24 \text{ V}}{4,8 \text{ mA}} = 5000 \Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

$$\text{b) } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \Rightarrow X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{(5000 \Omega)^2 - (1000 \Omega)^2} = 4900 \Omega$$

$$\text{c) } U_w = I \cdot R = 4,8 \text{ mA} \cdot 1000 \Omega = 4,8 \text{ V} \\ U_{bl} = I \cdot X_L = 4,8 \text{ mA} \cdot 4900 \Omega = 23,5 \text{ V}$$

7.3.5 Verlustwinkel, Verlustfaktor und Gütefaktor einer Spule

Bei einer idealen Spule (**Seite 135, Bild 3**) beträgt der Phasenverschiebungswinkel φ zwischen dem Strom und der Spannung 90° . Da eine reale Spule (**Bild 1a**) immer einen Wirkwiderstand (ohmschen Spulenwiderstand) hat, ist der Phasenverschiebungswinkel φ immer kleiner als 90° (**Bild 1b und Bild 2**).

Gegenüber dem Winkel φ liegt der **Verlustwinkel** δ^1 . Er beträgt $\delta = 90^\circ - \varphi$ (**Bild 2**). Der ohmsche Widerstand R ist auch ein Maß für die Verluste der Spule. Je größer der Wirkwiderstand (Verlustwiderstand) R ist, desto größer ist der Verlustwinkel δ und somit auch die Spulenverluste (**siehe auch Seite 143**).

Der Tangens des Verlustwinkels δ ist das Verhältnis von Wirkwiderstand (Verlustwiderstand) R zum induktiven Blindwiderstand X_L (**Bild 2**) und wird auch **Verlustfaktor** d genannt. Der Kehrwert des Verlustfaktors d ist der **Gütefaktor** Q .

Je höher der Gütefaktor Q , desto geringer die Spulenverluste.

Der Gütefaktor Q wird z. B. bei einer Entstördrossel bei 50 MHz in der Praxis mit 40 bis 80 angegeben.

Beispiel:

Eine Entstördrossel zur Filterung von Störimpulsen hat die Angaben: $L = 100 \mu\text{H}$ bei $f = 1 \text{ kHz}$, Verlustwiderstand $R = 40 \text{ m}\Omega$.

Berechnen Sie **a)** den Verlustfaktor d , **b)** den Verlustwinkel δ und **c)** die Güte Q .

Lösung:

$$\text{a) } d = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{2\pi \cdot f \cdot L} = \frac{40 \text{ m}\Omega}{2\pi \cdot 1 \text{ kHz} \cdot 100 \mu\text{H}} = \frac{0,04 \Omega}{2\pi \cdot 100 \frac{1}{\text{s}} \cdot 0,1 \text{ mH}} = 0,0637$$

$$\text{b) } \tan \delta = d = 0,0637 \Rightarrow \delta = 3,6^\circ \quad \text{c) } Q = \frac{1}{d} = \frac{1}{0,0637} = 15,7$$

¹ δ griech. Kleinbuchstabe delta

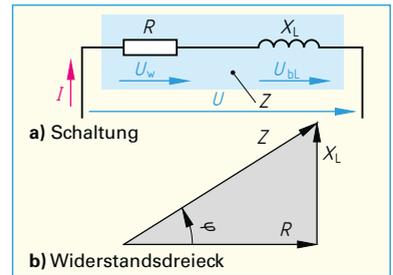


Bild 1: Widerstände einer realen Spule

Widerstände in Reihenschaltung

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

$$X_L = \frac{U_{bl}}{I}$$

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi$$

$$X_L = Z \cdot \sin \varphi$$

X_L induktiver Blindwiderstand
 Z Scheinwiderstand
 U_{bl} induktive Blindspannung
 U_w Wirkspannung
 I Strom
 U Gesamtspannung
 φ Phasenverschiebungswinkel

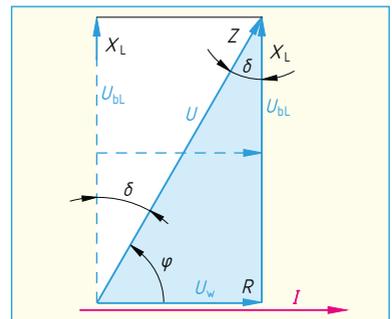


Bild 2: Spannungsdreieck mit Verlustwinkel δ

Verlustwinkel und Gütefaktor

$$\tan \delta = \frac{R}{X_L} = \frac{U_w}{U_{bl}} = d$$

$$Q = \frac{1}{d} \Rightarrow Q = \frac{X_L}{R}$$

φ Phasenverschiebungswinkel
 U Gesamtspannung
 U_w Wirkspannung
 U_{bl} induktive Blindspannung
 I Strom
 R Verlustwiderstand (Wirkwiderstand)
 X_L induktiver Blindwiderstand
 d Verlustfaktor
 Q Gütefaktor
 δ Verlustwinkel



7.10 Kompensation

Versuch: Schließen Sie eine Leuchtstofflampe 58 W über das Vorschaltgerät ohne Kompensationskondensator an die Netzspannung 230 V, 50 Hz. Messen Sie die Stromstärke und die Leistung. Schalten Sie dann einen Kompensationskondensator C_k von etwa $7 \mu\text{F}$ parallel zur Reihenschaltung von Drossel und Lampe (**Bild 1**).

Mit dem Zuschalten des Kondensators nimmt die Stromaufnahme ab, der Leistungsmesser zeigt dagegen dieselbe Wirkleistung an.

Die Reihenschaltung von Lampe und Vorschaltgerät nimmt sowohl Wirkleistung P als auch induktive Blindleistung Q_L auf, der zugeschaltete Kondensator dagegen kapazitive Blindleistung Q_C (**Bild 2**). Induktive Blindleistung und kapazitive Blindleistung sind gegeneinander um 180° phasenverschoben. Der Kondensator liefert immer dann Blindenergie in das Netz, wenn die Induktivität der Drossel Blindenergie aufnimmt. Die gesamte Blindleistungsaufnahme Q aus dem Netz verringert sich. Bei gleicher Wirkleistung P werden die aus dem Netz aufgenommene Scheinleistung S und die Stromstärke I kleiner.

Das Ausgleichen der induktiven Blindleistung durch kapazitive Blindleistung nennt man kompensieren¹.

Die induktive Blindleistung Q_L , z.B. für das Vorschaltgerät, wird vom Netz geliefert. Erzeugeranlagen, Leitungen und Übertragungseinrichtungen werden dadurch zusätzlich belastet (**Bild 3a**). Bei Kompensation verringert sich der Anteil der Blindleistung Q_L im Netz um die Blindleistung Q_C des Kompensationskondensators oder der Kompensationsanlage (**Bild 3b**).

Durch Kompensation werden Leitungen und Transformatoren entlastet, da die Scheinleistung sinkt. Die Blindstromkosten, die der Netzbetreiber verrechnet, werden dadurch reduziert.

Die Kompensation der induktiven Blindleistung Q_L bewirkt eine Verkleinerung des Phasenverschiebungswinkels φ zwischen Wirkleistung P und der Scheinleistung S (**Bild 2**) und damit eine Vergrößerung des Wirkfaktors $\cos \varphi$.

Auf nahezu $\cos \varphi = 1$ kompensiert, pendelt der größte Teil der Blindleistung nur noch zwischen Verbraucher und der Kompensationsanlage hin und her (**Bild 3b**). Die für die Kompensation benötigte kapazitive Blindleistung Q_C ermittelt man rechnerisch (**Seite 166**) oder grafisch mithilfe des Zeigerbildes (**Bild 2**).

¹ von compensare (lat). = ausgleichen

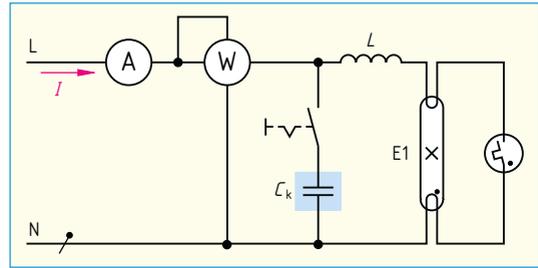


Bild 1: Versuchsschaltung: Kompensation bei einer Leuchtstofflampe

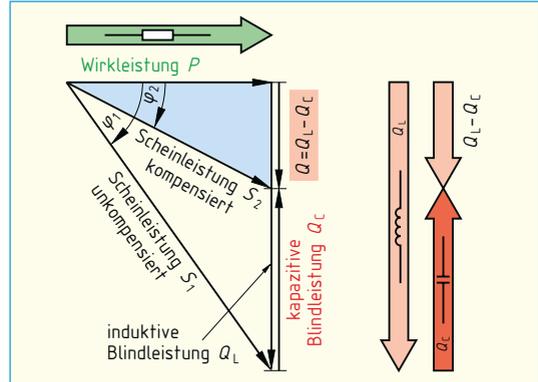


Bild 2: Zeigerbild der Leistungen bei Parallelkompensation

Kapazitive Blindleistung

$$Q_C = Q_L - Q = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_L}{P} \quad \tan \varphi_2 = \frac{Q_L - Q_C}{P}$$

P	Wirkleistung
Q_L	induktive Blindleistung
Q_C	kapazitive Blindleistung
φ_1	Phasenverschiebungswinkel, unkompensiert
φ_2	Phasenverschiebungswinkel, kompensiert

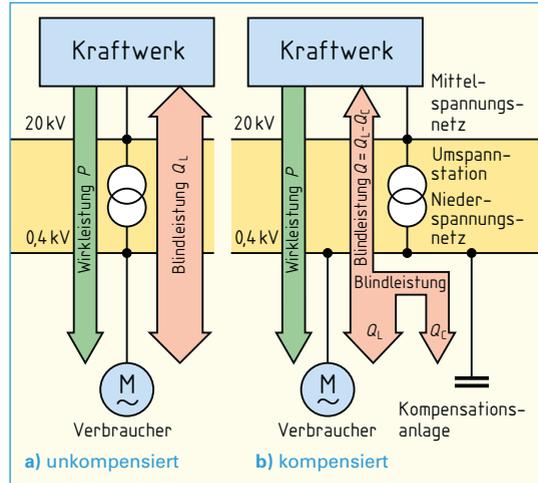


Bild 3: Kompensation der Blindleistung



Situationsbeschreibung:

Zur Fehlersuche in Anlagen, z.B. einer Niedervolt-Halogen-Beleuchtungsanlage (**Bild 1**), und Geräten werden Spannungen und Ströme meist als Effektivwert gemessen.

Um Fehlmessungen zu vermeiden, muss der Prüfer wissen, ob die zu messenden Wechselströme und -spannungen reine 50-Hz-Sinusgrößen sind oder ob die Messgrößen nicht sinusförmig sind (**Bild 2**).

Nicht sinusförmige Spannungen und Ströme entstehen z.B. in Anlagen und Geräten mit Dimmersteuerung, in Niedervolt-Halogen-Beleuchtungsanlagen (**Bild 1**), in Anlagen mit Frequenzumrichtern, mit Gleichrichtern oder in Geräten, die mit Schaltnetzteilen versorgt werden.

Messgerätewahl:

Um Fehlmessungen (**Bild 3a** und **3b**) zu vermeiden, müssen Effektivwerte nicht sinusförmiger Spannungen oder Ströme mit Messgeräten gemessen werden, die für eine **Echt-Effektivwertmessung (TRMS)**¹ geeignet sind.

Die **Bandbreite** (Frequenzbereich) des Messgerätes bzw. die höchstmögliche Frequenz, die das Messgerät noch richtig auswerten kann, muss mindestens der Frequenz (38 kHz) der zu messenden Größe (**Bild 2**) entsprechen. Ist die Bandbreite kleiner als die Frequenz der zu messenden Wechselspannung (**Bild 3b**), dann wird die Messgröße falsch angezeigt.

Der **Crestfaktor** F_C (**Seite 174**) des Messgerätes sollte 3 bis 5 betragen. In den meisten Fällen wird der Effektivwert dann richtig angezeigt (**Bild 3c**).

Beispiel zum Crestfaktor:

Eine Strommesszange mit Crestfaktor $F_C = 4$ kann im Messbereich 10 A (Effektivwert) ein Signal mit $\hat{I} = 40$ A Scheitelwert noch richtig messen. Je nach Ausführung des Messgerätes kann dies auch bedeuten, dass die Stromzange ein Signal von $I = 5$ A mit Crestfaktor $F_C = 8$ messen kann, also mit einem Scheitelwert $\hat{I} = 5 \text{ A} \cdot 8 = 40$ A.

i Kurzbezeichnungen für Effektivwertanzeigen von Messgeräten (nicht genormt)

Bezeichnung	Erklärung
TRMS AC+DC	Es wird der Echt-Effektivwert (quadratische Mittelwert) angezeigt. Neben der 50-Hz-Grundschwingung werden auch Oberschwingungen (Seite 310) und Gleichanteile berücksichtigt.
TRMS oder TRMS AC	Anzeige wie bei TRMS AC+DC, aber eventuelle Gleichanteile werden nicht berücksichtigt.



Bild 1: Spannungsmessung an einer Niedervolt-Halogen-Beleuchtungsanlage

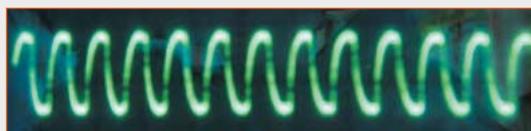


Bild 2: Ausgangsspannung eines elektronischen Transformators (Frequenz $f = 38$ kHz)



Oberschwingungen: **Seite 310**

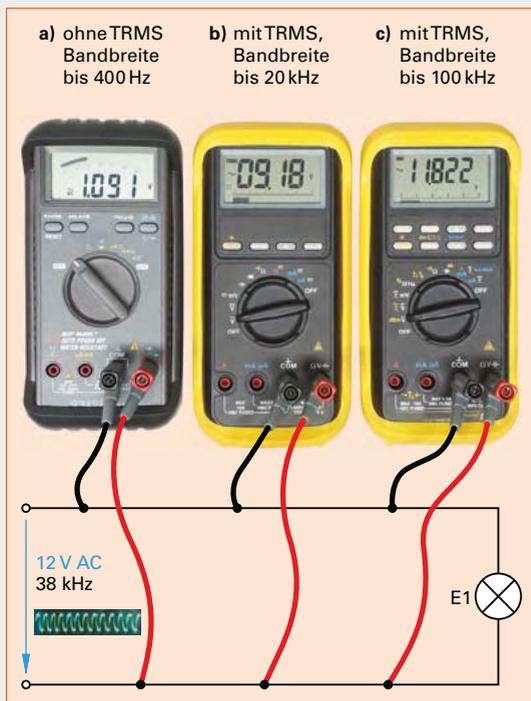


Bild 3: Unterschiedliche Messergebnisse bei gleicher Ausgangsspannung an einem elektronischen Transformator

¹ TRMS, Abk. für: True Root Mean Square (engl.) = wahrer quadratischer Mittelwert (Echt-Effektivwert)



Thyristoren kann man als Gleichrichter oder als kontaktlose Schalter verwenden. Ist durch den Steuerstrom die mittlere Sperrschicht abgebaut, so verhindern die Ladungsträger des Laststromes eine erneute Sperrung, auch wenn Gatestrom und Laststrom zurückgehen. Die Sperrschicht bildet sich erst wieder, wenn der Gatestrom ganz ausbleibt und der Laststrom kleiner wird als der **Haltestrom I_H** (**Bild 1 und Tabelle**). Haltestrom nennt man den kleinsten Vorwärtsstrom, bei dem der Thyristor bei $I_G = 0$ A noch im leitenden Zustand bleibt.

Bei Betrieb mit Wechselstrom wird bei ohmschen Verbrauchern am Ende jeder Halbperiode der Haltestrom I_H unterschritten. Dadurch sperrt der Thyristor.

Zünden von Thyristoren

Die übliche Zündart bei Thyristoren ist das Zünden durch einen Stromimpuls am Gate. Bei Richtungs-umkehr des Laststromes, z.B. bei Wechselstrom, sperrt der Thyristor. Danach ist eine erneute Zündung innerhalb der positiven Halbwelle erforderlich.

Durch diesen erneuten Zündimpuls am Gate wird der Thyristor wieder leitend. Dabei kann der Zündstrom mit steigender Anodenspannung geringer werden.

Wird ein Thyristor mit einem Gatestrom angesteuert, der gerade dem Mindestwert entspricht, so wird zunächst nur die unmittelbare Umgebung des Gate-Kontaktes leitend. Der übrige Teil des Thyristors wird erst mit zunehmender Stromstärke in der Anoden-Katoden-Strecke leitend. Dieses allmähliche Zünden eines Thyristors ist schädlich, weil es den PN-Übergang zu stark erwärmt. Deshalb verwendet man zum Zünden Stromimpulse, deren Höchstwerte weit über dem zulässigen Wert eines Gate-Gleichstromes liegen.

Zum schnellen Zünden eines Thyristors wird das Gate mit hohen Stromimpulsen angesteuert.

Wegen Exemplarsteuerungen kann man die erforderliche Stromstärke für den Steuerstrom nicht exakt angeben. Man unterscheidet jedoch die Bereiche des sicheren Zündens, des nicht sicheren Zündens und des sicheren Nichtzündens (**Bild 2**). Um ein unerwünschtes, fehlerhaftes Zünden des Thyristors zu vermeiden, ist die **Freiwerdezeit** zu beachten. Die Freiwerdezeit (10 μ s bis 100 μ s) ist die Mindestzeit, die zwischen dem Nulldurchgang des Durchlassstromes bis zur Wiederkehr der positiven Spannung vergehen muss, damit der Thyristor mit Sicherheit nicht wieder in den Durchlasszustand kippt. Die Spannung U_{GK} und der Strom I_G , die zum Zünden eines Thyristors an Gleichspannung nötig sind, können mit einer Messschaltung ermittelt werden (**Bild 3**).

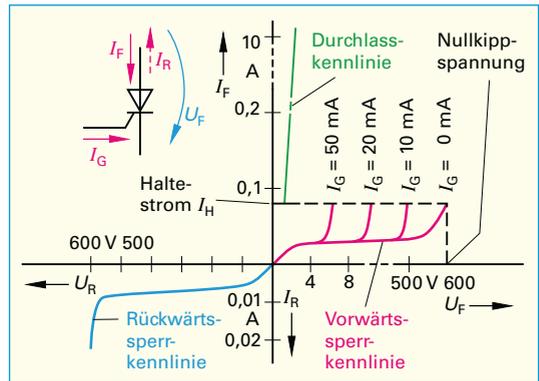


Bild 1: Kennlinie eines Thyristors

Tabelle: Kenn- und Grenzwerte des Thyristors TIC 106 D

	Kennwerte:	
	Zündspannung U_{GK}	0,8 V
	Zündstrom I_G	0,2 mA
	Haltestrom I_H	5 mA
	Grenzwerte:	
	Sperrspannung U_R	400 V
	Durchlassstrom I_F	5 A

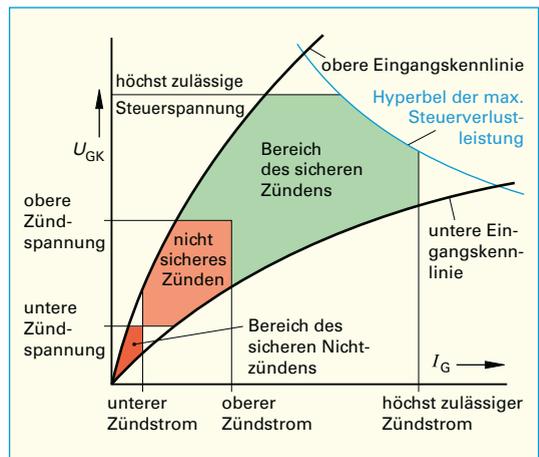


Bild 2: Zünddiagramme eines Thyristors

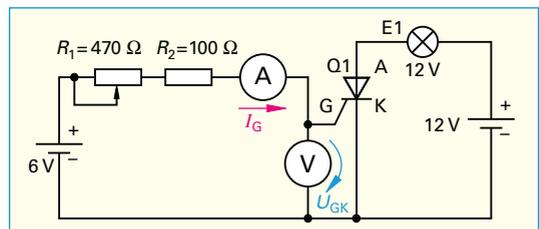


Bild 3: Thyristor-Messschaltung zur Ermittlung von Zündspannung und Zündstrom

10.1.1.1 Wärmekraftwerke

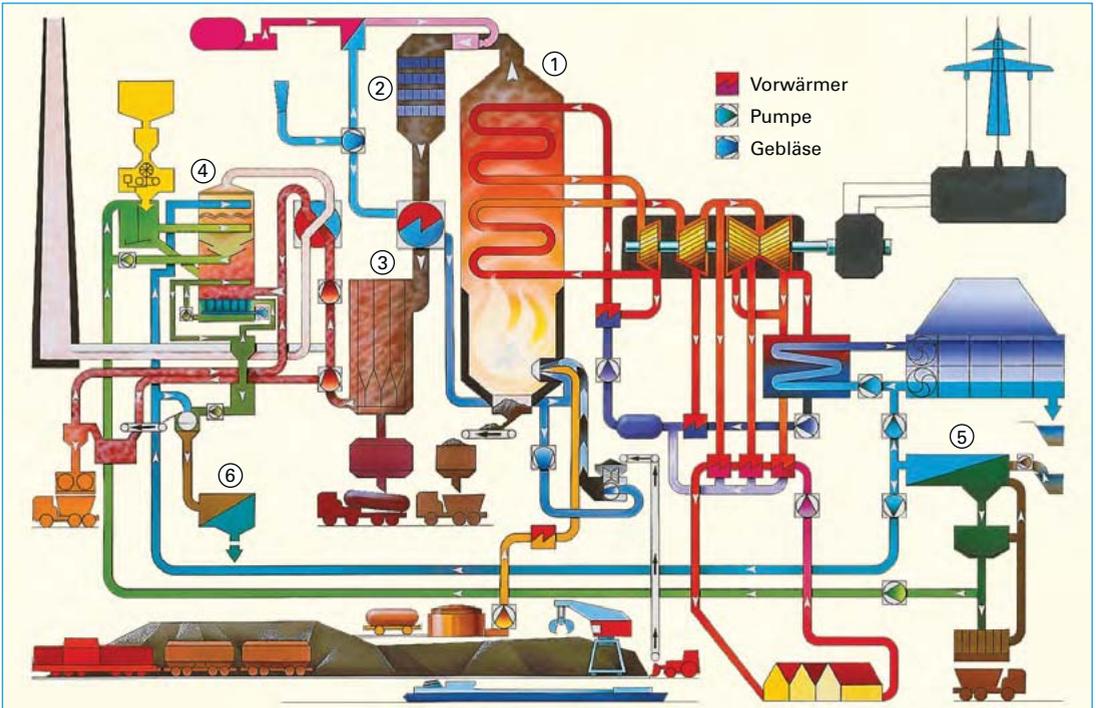


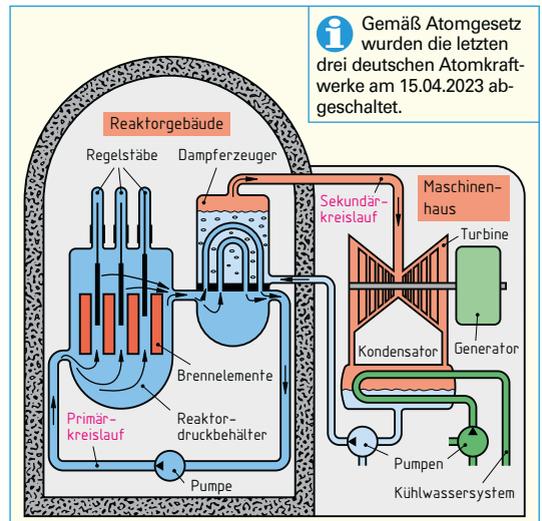
Bild 1: Prinzip eines modernen Heizkraftwerkes (Steinkohlekraftwerk); ① Kessel, ② Entstickung, ③ Entstaubung, ④ Rauchgasentschwefelung, ⑤ Wasseraufbereitung, ⑥ Abwasseraufbereitung

Dampfkraftwerke erzeugen in der Kesselanlage überhitzten, hochgespannten Dampf, der mit einem Druck von etwa 20 MPa (≈ 200 bar) und einer Temperatur von 530 °C der Turbine zugeführt wird. Ein Generator wandelt die in der Dampfturbine erzeugte Bewegungsenergie in elektrische Energie um. Der Energieumwandlung sind Grenzen gesetzt, da sich nur ein Teil der Wärme in Bewegungsenergie umformen lässt. Dampfkraftwerke, deren Abwärme nicht in Heizungsanlagen genutzt wird, haben Wirkungsgrade bis zu 45%.

Heizkraftwerke (Bild 1) sind wirtschaftlicher. Sie arbeiten nach dem Prinzip der sogenannten **Kraft-Wärme-Kopplung**. Dabei entzieht man dem Dampfkreislauf nach den Turbinen Wärmeenergie, die über ein Fernwärmesystem Heizungsanlagen zugeführt wird.

In **Kernkraftwerken** liefert spaltbares Uran die Wärmeenergie. Im Inneren des Reaktorbehälters befinden sich Brennelemente, die mit den Regelstäben den Reaktorkern (**Bild 2**) bilden. **Siedewasserreaktoren** verdampfen das Wasser im Reaktorkern und führen den Dampf der Turbine direkt zu. **Druckwasserreaktoren (Bild 2)** nehmen durch das Kühlmittel des **Primärkreislaufes** die erzeugte Wärme auf und geben sie dann an den Dampferzeuger ab, der mit der Turbine den **Sekundärkreislauf** bildet.

Gasturbinenkraftwerke betreibt man mit Heizöl oder Erdgas. Sie können innerhalb von zwei bis drei Minuten ihre volle Leistung abgeben und decken damit nur den Spitzenlastbereich ab.



i Gemäß Atomgesetz wurden die letzten drei deutschen Atomkraftwerke am 15.04.2023 abgeschaltet.

Bild 2: Prinzip des Druckwasserreaktors



10.6.8.2 Ladebetriebsarten und Ladesteckeinrichtungen

Für das Laden der Akkumulatoren von Elektro-Fahrzeugen unterscheidet man vier **Ladebetriebsarten** (DIN EN 61851-1). Diese unterscheiden sich durch die verwendete Ladestromquelle (AC oder DC) und die energieseitigen Anschlüsse z. B. Schutzkontakt-Steckdose, CEE-Steckdose, Typ 2-Ladesteckeinrichtung oder DC-Ladesteckeinrichtung) sowie die maximale Ladeleistung und die Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Elektro-Fahrzeug und Anschlusspunkt. Man unterscheidet die Ladebetriebsarten 1 bis 4. Zurzeit werden die Ladebetriebsarten 2 und 3 angewendet. In Zukunft sollen auch mehr DC-Ladestationen für kürzere Ladezeiten nach Ladebetriebsart 4 installiert werden. Die Akkumulatoren der Elektro-Fahrzeuge werden meist über eine Ladeleitung mit genormtem **Typ 2-Ladestecker (Bild 1)** nach DIN EN 62196 aufgeladen. Die Typ 2-Ladesteckeinrichtung (**Bild 2, Seite 345**) wird für das Laden an allen üblichen Ladestationen benötigt. Zum Schnellladen wird das CCS¹-Stecker-System genutzt, welches zusätzlich zu den Typ 2-Kontakten noch zwei Gleichstromkontakte besitzt.

10.6.8.3 Installationsvorschriften

Zur Installation von Stromversorgungen (**Bild 2**) für Elektro-Fahrzeuge schreiben die DIN VDE 0100-722, die VDE-AR-N 4100 und die DIN 18015-1 vor:

- Bei einer Bemessungsleistung > 4,6 kVA ist ein Drehstromanschluss notwendig.
- Die Drehstromversorgung für die Ladestation muss eine Strombelastbarkeit von mindestens 32 A haben.
- Ein Elektroinstallationsrohr für eine Kommunikationsleitung, z. B. Netzwerkkabel, ist von der Verteilung bis zur Ladestation zu legen.
- Jeder Anschlusspunkt ist durch einen eigenen Stromkreis mit nur einer Steckdose oder einer Ladeleitung mit Typ 2-Stecker zu versorgen.
- Jeder Anschlusspunkt ist durch einen eigenen 30 mA-RCD Typ A oder F zu schützen. Ist in der Wallbox keine integrierte Fehlergleichstromabschaltung (DC \geq 6 mA) installiert, so wird ein RCD Typ A-EV², F-EV oder B benötigt.
- Der Anschlusspunkt soll möglichst mit einem Überspannungsableiter Typ 2 geschützt werden.
- Die Auswahl von Zuleitungsquerschnitt und Leitungsschutzelementen erfolgt bei maximalem Ladestrom und dem Gleichzeitigkeitsfaktor 1.
- Verlängerungen der Ladeleitungen sind verboten.

¹ CCS von Combined Charging System (engl.) = kombiniertes Ladesystem
² EV, Abk. für: Electric Vehicle (engl.) = Elektrofahrzeug

Spannung wird erst zugeschaltet, wenn der Stecker gesteckt ist und der PP¹-Kontakt erkannt wird.



Über den CP²-Kontakt wird der Aufladevorgang kontrolliert und gesteuert.

¹ PP, Abk. für: Proximity Pilot (engl.) = Näherungskontakt
² CP, Abk. für: Control Pilot (engl.) = Überprüfungskontakt

Bild 1: Kontaktbelegung des Typ 2-Ladesteckers

i Ladebetriebsarten (Auswahl)

Ladebetriebsart 2

- AC-Ladung an einer Schutzkontakt- oder CEE-Steckdose mit max. 16 A am 1 ~ AC-Netz oder max. 32 A am 3 ~ AC-Netz (Ladeleistung \leq 22 kW)
- mit Kontroll-, Steuer- und Schutzfunktion in der Ladeleitung (ICCB)³,
- Ladegerät ist im Fahrzeug eingebaut.

Ladebetriebsart 3

- AC-Ladung an einer typgeprüften Ladestation mit max. 20 A am 1 ~ AC- oder 63 A am 3 ~ AC-Netz (Ladeleistung \leq 44 kW)
- Kontroll-, Steuer- und Schutzgerät in der Ladestation
- Ladegerät mit Ladeführungsfunktion im Fahrzeug.

³ ICCB, Abk. für: In-Cable Control Box. (engl.) Steuerkasten in der Leitung

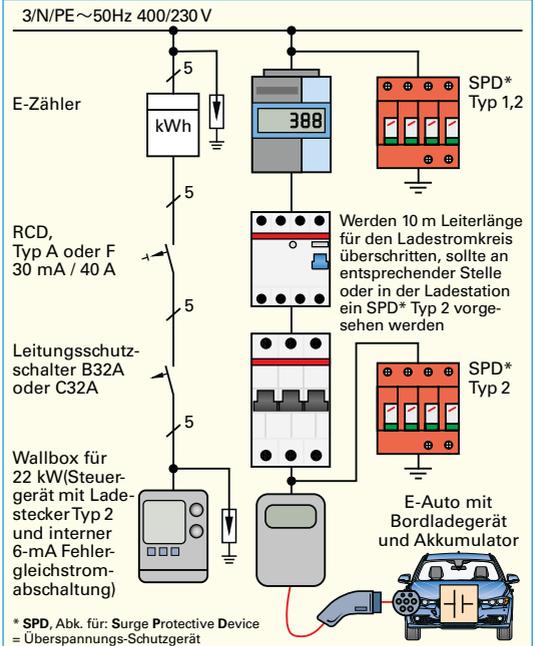


Bild 2: Prinzip Netzanschluss für Ladebetriebsart 3 am Dreiphasen-Wechselstromnetz

Fahrzeug-Akkumulatoren sollen nicht an bereits vorhandenen haushaltsüblichen Steckdosen-Stromkreisen geladen werden. Infolge der langen Ladezeit, mit z. B. 16 A, können hohe Temperaturen an den Klemmstellen und somit eine Brandgefahr entstehen.

**Situationsbeschreibung:**

Elektrische Betriebsmittel oder Geräte, z. B. Verlängerungsleitungen oder Haushaltsgeräte, müssen im Anschluss an eine Reparatur nach DIN EN 50678 (VDE 0701) geprüft werden (Seite 425). Die Prüfung besteht aus mehreren Schritten, die in einer genau festgelegten Reihenfolge durchgeführt wird.

Der Ablauf der Prüfung wird auch von der Schutzklasse des zu prüfenden Gerätes bestimmt.

Forderungen nach DGUV Vorschrift 3

- Prüfung durch befähigte Personen (Seite 354) nach TRBS 1203 (Technische Regeln für Betriebssicherheit).
- Verwendung eines geeigneten Mess- und Prüfgerätes.



Messgerät zur Prüfung nach VDE 0701 und VDE 0702

1. Sichtprüfung (Seite 425). Nur bei bestandener Sichtprüfung erfolgt der nächste Schritt mit der Messung.

2. Messungen (Schutzklasse des Prüflings beachten)

Schutzklasse I 
Betriebsmittel mit angegeschlossenem Schutzleiter.

Schutzklasse II 
Betriebsmittel ohne Schutzleiter.

Schutzklasse III 
Betriebsmittel mit Schutzkleinspannung.

2.1 Messung des Schutzleiterwiderstandes R_{PE} der Anschlussleitung

- Grenzwerte abhängig vom Leiterquerschnitt (Seite 425).
- Bewegung der Leitung während der Messung erforderlich.

Schutzleiterwiderstand bei Leiterquerschnitt $\leq 1,5 \text{ mm}^2$

- Kleiner 5 m: $\leq 0,3 \Omega$
- Größer 5 m: pro weitere 7,5 m zusätzlich $0,1 \Omega$
- Maximalwert: 1Ω

2.2 Messung des Isolationswiderstandes R_{iso} (Seite 425) ohne Netzspannung im eingeschalteten Zustand.

Zwei Bedingungen müssen erfüllt sein:

- Die Prüfung gefährdet nicht das zu prüfende Gerät und/oder
- das Gerät enthält eine netzspannungsunabhängige Einschaltvorrichtung.

Messung R_{iso} möglich?

Messung R_{iso} möglich?

Messung R_{iso} möglich?

Isolationswiderstand

- Ohne Heizelemente: $\geq 1 \text{ M}\Omega$
- Mit Heizelementen: $\geq 0,3 \text{ M}\Omega$
Ausnahme für Geräte $> 3,5 \text{ kW}$ (Tabelle 2, Seite 425)
- Berührbare leitfähige Teile, die nicht mit PE verbunden sind: $\geq 2 \text{ M}\Omega$

Isolationswiderstand

$R_{iso} \geq 2 \text{ M}\Omega$
Messung gefährlicher aktiver Teile der Netzversorgung gegen berührbare und leitfähige Teile.

Isolationswiderstand

$R_{iso} \geq 0,25 \text{ M}\Omega$
Messung gefährlicher aktiver Teile mit Schutzmaßnahme SELV/PELV (Seite 368) gegen berührbare und leitfähige Teile.

2.3 Messung des Schutzleiterstromes I_{PE} und Berührungsstroms I_B (Seiten 426, 427)

Messung mit Netzspannung, ausgenommen alternative Methode, durch eine der folgenden Möglichkeiten:

- Direkte Methode, Prüfling isoliert zur Erde aufstellen,
- Differenzstrommethode,
- Alternative Methode (wenn vorher R_{iso} gemessen).

Schutzleiterstrom

- Allgemein: $\leq 3,5 \text{ mA}$
- Mit Heizelementen $> 3,5 \text{ kW}$: $\leq 1 \text{ mA/kW}$, maximal 10 mA!

Berührungsstrom

Maximalwert: $0,5 \text{ mA}$
Messung an berührbaren und leitfähigen Teilen.

Berührungsstrom

Messung ist nicht notwendig, wegen der geringen Betriebsspannung von $\leq 50 \text{ V AC}$ oder $\leq 120 \text{ V DC}$.

3. Prüfen der Wirksamkeit weiterer Schutzeinrichtungen, z. B. eingebaute RCD.

4. Funktionsprüfung, wenn es zum Nachweis der Sicherheit erforderlich ist.

5. Auswertung, Beurteilung, Dokumentation (Seite 427). Das Gerät hat die Prüfung erfolgreich bestanden, wenn alle notwendigen Teilprüfungen bestanden wurden. Anschließend ist ein Prüfprotokoll mit den Messergebnissen zu erstellen und das Gerät erhält eine Prüfplakette (Seite 427, Bild 2). Hat das Gerät die Prüfung nicht bestanden, ist es als nicht sicher zu kennzeichnen. Der Betreiber ist zu informieren.



Schaltgruppen. Die Schaltgruppe, die auf dem Leistungsschild des Drehstromtransformators (**Bild 1, Seite 491**) angegeben wird, besteht mindestens aus zwei Buchstaben und einer Zahl, z. B. Yd 5 (**Tabelle**).

- Der erste Buchstabe kennzeichnet die Verkettung der Oberspannungswicklungen.
- Der zweite Buchstabe kennzeichnet die Verkettung der Unterspannungswicklungen.
- Die Zahl nennt man Kennzahl des Drehstromtransformators. Multipliziert man die Kennzahl mit 30° , so erhält man die Phasenverschiebung (**Bild 1**), mit der die gleiche Außenleiterspannung der Unterspannungsseite gegenüber der Oberspannungsseite nacheilt.
- Wird der Sternpunkt der Unterspannungsseite herausgeführt, wird dem Kleinbuchstaben y ein n angefügt.

Beispiel:

Erklären Sie die Schaltgruppenangabe Dyn 5 (**Bild 2**).

Lösung:

D = Oberspannungswicklung in Dreieck geschaltet
 y = Unterspannungswicklung in Stern geschaltet
 n = Sternpunkt (Neutralleiteranschluss) herausgeführt
 5 (Kennzahl): Phasenverschiebung $5 \times 30^\circ = 150^\circ$

Schaltungsmerkmale. Bei Oberspannungswicklungen wird durch Sternschaltung die erforderliche Windungszahl zwar kleiner, aber der Leiterquerschnitt größer als bei Dreieckschaltung. Die OS-seitige Sternschaltung bevorzugt man daher bei Versorgungsstrafos kleinerer Leistung (etwa 500 kVA) und bei sehr hohen Spannungen. Unterspannungswicklungen können bei Verteiltransformatoren (**Bild 1, Seite 490**) für TN-Systeme nicht in Dreieck geschaltet werden, da kein Neutralleiteranschluss möglich ist.

Als **Übersetzungsverhältnis \ddot{u}** wird bei Drehstromtransformatoren das ungekürzte Verhältnis der Außenleiterspannungen angegeben, z. B. $\ddot{u} = 20\,000\text{ V} / 400\text{ V}$. Die Außenleiterspannungen liegen nur in Dd-Schaltung an den Strängen. In der Yy-Schaltung sind die Strangspannungen um den Faktor $1/\sqrt{3} = 0,577$ geringer als die Außenleiterspannungen.

Die Übersetzungsformel $\ddot{u} = N_1/N_2$ gilt für Drehstromtransformatoren nur bei gleicher Schaltung von Ober- und Unterspannungsseite.

Sind OS- und US-Seite verschieden geschaltet, z. B. in Dy, gilt $\ddot{u} = N_1/N_2$ nur für die Strangspannungen.

Dreiphasenwechselspannung lässt sich auch mit zwei Einphasentransformatoren in V-Schaltung transformieren (**Bild 3**). Die Ausgangsseite liefert Dreiphasenwechselspannung in ein Dreileiternetz. Bei Höchstspannungen über 380 kV werden Transformatorgruppen aus drei Einphasentransformatoren aufgebaut, da einzelne Transformatoren leichter zu transportieren sind.

Tabelle: Buchstaben zur Schaltgruppenkennzeichnung

Schaltung	Oberspannungsseite	Unterspannungsseite
Stern	Y	y
Dreieck	D	d
Zickzack	-	z

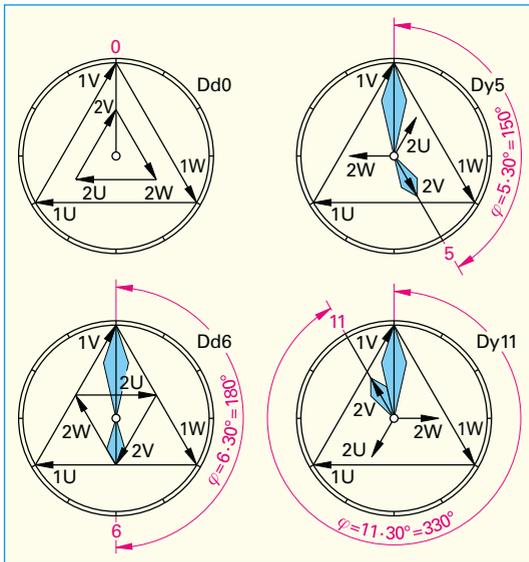


Bild 1: Phasenverschiebungen zwischen Ober- und Unterspannung

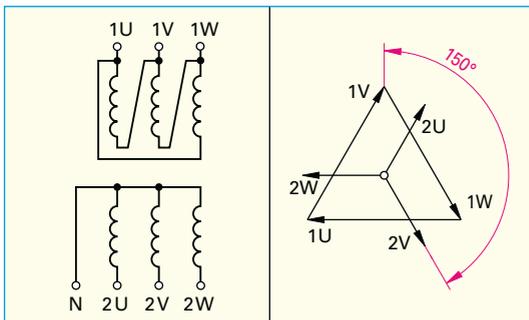


Bild 2: Schaltung und Kennzahlmittlung Dyn 5

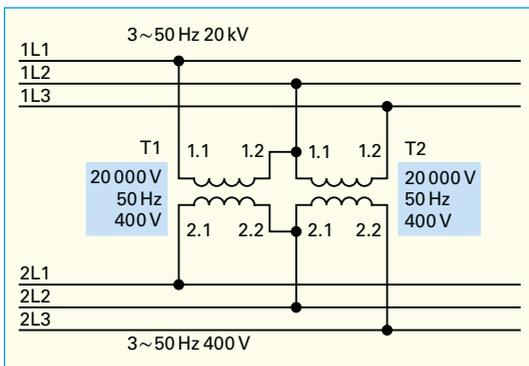


Bild 3: V-Schaltung