

westermann



Holger Kampen, Gabriele Kosaca, Detlev Müller

Herausgeber: Detlev Müller

Zukunft Elektrotechnik

Energie- und Gebäudetechnik
Lernfelder 5–8

1. Auflage

Nur zu Prüfzwecken - Eigentum der Westermann Gruppe

Bestellnummer 49677

Zusatzmaterialien zu Zukunft Elektrotechnik Energie- und Gebäudetechnik Lernfelder 5–8

Für Lehrerinnen und Lehrer



BiBox Einzellizenz für Lehrer/-innen (Dauerlizenz)
BiBox Klassenlizenz Premium für Lehrer/-innen und
bis zu 35 Schüler/-innen (1 Schuljahr)
BiBox Kollegiumslizenz für Lehrer/-innen (Dauerlizenz)
BiBox Kollegiumslizenz für Lehrer/-innen (1 Schuljahr)

Für Schülerinnen und Schüler



BiBox Einzellizenz für Schüler/-innen (1 Schuljahr)
BiBox Einzellizenz für Schüler/-innen (4 Schuljahre)
BiBox Klassensatz PrintPlus (1 Schuljahr)

© 2024 Westermann Berufliche Bildung GmbH, Ettore-Bugatti-Straße 6-14, 51149 Köln
www.westermann.de

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Nutzung in anderen als den gesetzlich zugelassenen bzw. vertraglich zugestanden Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages. Nähere Informationen zur vertraglich gestatteten Anzahl von Kopien finden Sie auf www.schulbuchkopie.de.

Für Verweise (Links) auf Internet-Adressen gilt folgender Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Sollten Sie daher auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

Druck und Bindung: Westermann Druck GmbH, Georg-Westermann-Allee 66, 38104 Braunschweig

ISBN 978-3-427-49677-9

Vorwort

„Zukunft Elektrotechnik“ ist eine Fachbuchreihe mit neuem Lernkonzept für Auszubildende in elektrotechnischen Berufen in Industrie und Handwerk. Die Reihe besteht aus einem Grundstufenangebot und dazugehörigen Fachstufen für die fortgeschrittene Ausbildung. Zu allen Schülerbüchern werden umfangreiche editierbare BiBoxen mit Material vor allem mit fertig vorbereiteten Unterrichtsplänen zum sofortigen Einsatz in der Klasse angeboten.

Die Fachstufe Energie- und Gebäudetechnik LF 5-8 umfasst alle Inhalte der Lernfelder 5-8 nach Rahmenlehrplan 2020 für die Berufsausbildung für Elektroniker und Elektronikerinnen für Energie- und Gebäudetechnik in verständlicher Sprache, mit vielen Visualisierungen und lernfeldorientierten Inhalten. Neben dieser erscheinen weitere Fachstufenbände für das zweite und dritte Ausbildungsjahr für den Bereich Betriebstechnik sowie Fachstufen der Lernfelder 5-13 für die Bereiche Automatisierungs- und Geräte- und Systemtechnik.

Die Fachstufe zeichnet sich durch eine durchdachte Kombination aus aktuellem Lehrbuchwissen und einer umfangreichen digitalen Erweiterung in der BiBox aus. Ein weiterer Pluspunkt ist die klare Struktur und die Kompaktheit des Buches, welches dennoch alle prüfungsrelevanten Inhalte und Anforderungen beinhaltet, die sowohl die IHK als auch die HWK an Auszubildende stellen. Durch die fachsystematische Darstellung innerhalb der Lernfelder kann das Buch ebenfalls als Nachschlagewerk genutzt werden. Das Lernen wird durch gut gekennzeichnete Formelboxen, Merksätze und Infokästen erleichtert.

Das Ziel, den Auszubildenden eine umfassende Handlungs- und Entscheidungskompetenz zu vermitteln, wird durch das umfangreiche und zielgruppengerechte Zusatzmaterial in der BiBox ermöglicht. Für jedes Lernfeld stehen in der BiBox u.a. eine Vielzahl an didaktisch-methodisch aufgearbeiteten und in Unterrichtspläne eingebunden Lernsituationen, mit entsprechenden Materialien zu Verfügung. Diese stehen als editierbare Worddokumente inkl. Lösungen zur Verfügung, ermöglichen eine Anpassung an individuelle Unterrichtsvoraussetzungen von Auszubildenden und ersetzen klassische Arbeitshefte, die SuS im Unterricht häufig nicht zur Hand haben. Verpackt in digitale Jahrespläne wird Ihnen somit nicht nur die Unterrichtsplanung erleichtert, sondern ebenfalls eine effektive und kurzfristige Unterrichtsvertretung ermöglicht, wovon vor allem SuS profitieren. Die von erfahrenen Lehrkräften entwickelten Lernsituationen starten mit einer konkreten und praxisnahen Ausgangssituation, benennen wesentliche zu erlernende Kompetenzen, konkretisieren Inhalte und zählen methodische Umsetzungsmöglichkeiten auf, die individuell auf Ihre SuS angewendet werden können.

Perfekt ergänzt wird das digitale Zusatzmaterial in der BiBox durch fächerübergreifende digitale Lerneinheiten, mit der auch Grundlagen- und Zusatzwissen zeitgemäß vermittelt werden können.

Der Plattformcharakter der BiBox ermöglicht Ihnen einen intuitiven und ortsunabhängigen Zugriff von unterschiedlichen Endgeräten, der Ihnen sowohl mehr Freiraum als auch Flexibilität in der Unterrichtsplanung gibt. Dank der Upload Funktion können Sie bewährtes Material hochladen und weiterhin für einen spannungsgeladenen Elektrotechnikunterricht nutzen.

5

1 Wechselstrom	12
1.1 Kenngrößen der Wechselstromtechnik	12
1.2 Erzeugung von Wechselstrom	14
1.3 Verbraucher im Wechselstromkreis	14
1.3.1 Widerstand im Wechselstromkreis (ohmscher Verbraucher)	15
1.3.2 Spule im Wechselstromkreis (induktiver Verbraucher)	15
1.3.3 Kondensator im Wechselstromkreis (kapazitiver Verbraucher)	16
1.4 Phasenverschiebungswinkel φ („Phi“)	16
1.5 Zeigerdarstellung von Wechselgrößen	17
1.6 Leistung im Wechselstromkreis	18
1.6.1 Leistungsfaktor $\cos \varphi$	19
1.7 Verbraucherschaltungen im Wechselstromkreis	20
1.7.1 Grundsaltungen mit idealen Bauelementen	20
1.7.2 Resonanz	21
1.8 Schwingkreise	21
1.8.1 Reihenschwingkreis	21
1.8.2 Parallelschwingkreis	21
1.9 Messen von Wechselgrößen (Oszilloskop)	22
2 Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom)	23
2.1 Spannungserzeugung und Spannungsarten	23
2.2 Verbraucher im Drehstromnetz	25
2.2.1 Sternschaltung (Y-Schaltung)	25
2.2.2 Dreieckschaltung (Δ -Schaltung)	26
2.2.3 Unsymmetrische Belastung im Drehstromsystem	27
2.2.4 Leiterbruch im Drehstromsystem	28
2.3 Drehstromleistung	29
3 Planen von Energieversorgungen	30
3.1 Spannungsebenen	30
3.2 Netzsysteme (Verteilungssysteme)	35
3.3 Schutz durch automatische Abschaltung im Fehlerfall	32
3.3.1 Schutz im TN-System	32
3.3.2 Schutz im TT-System	33
3.3.3 Schutz im IT-System	34
3.4 Planen von Niederspannungs-Energieverteilungen	35
3.4.1 Hausanschluss	36
3.4.2 Hausanschlusskasten (HAK)	37
3.4.3 Hauptleitung	37
3.4.4 Zählerplätze	38
3.4.5 Stromkreisverteiler	39
3.4.6 Planung von Verteilstromkreisen	41

3.4.7	Kurzschlusschutz	43
4	Betriebsstätten und Anlagen besonderer Art	44
4.1	Baustellen	44
4.2	Landwirtschaftliche und gartenbauliche Betriebsstätten	45
4.3	Feuergefährdete Betriebsstätten	45
4.4	Gesetzliche Vorschriften zur Sicherheit von Anlagen	46
4.5	Bestimmungen der DGUV Vorschrift 3	47
4.6	Prüfungen nach DIN VDE	48
4.6.1	Prüfung ortsfester Anlagen (Anlagenprüfung DIN VDE 0100-600)	48
4.6.2	Wiederholungsprüfung elektrischer Anlagen (wiederkehrende Prüfung DIN VDE 0105-100)	52
4.6.3	Prüfung ortsveränderlicher Betriebsmittel (Geräteprüfung DIN VDE 0701 und DIN VDE 0702)	52
4.6.4	Prüfung elektrischer Maschinen DIN EN 60204-1 (VDE 0113-1)	55
4.6.5	Zugelassene Messgeräte	55
4.6.6	Dokumentation der Prüfergebnisse	57

6

1	Halbleiterbauelemente	60
1.1	Grundsätzlicher Aufbau	60
1.2	Halbleiterwiderstände	60
1.3	PN-Übergang	62
1.4	Dioden	63
1.4.1	Aufbau und Kenndaten	63
1.4.2	Leuchtdioden (LEDs)	65
1.4.3	Z-Dioden	66
1.5	Transistoren	67
1.5.1	Bipolare Transistoren	67
1.5.2	Transistor als Schalter	69
1.5.3	Unipolare Transistoren (Feldeffekttransistoren)	70
1.6	Optokoppler	72
2	Leistungselektronik	73
2.1	Bauelemente der Leistungselektronik	73
2.1.1	Leistungsdioden	73
2.1.2	Diac	74
2.1.3	Thyristoren	75

2.1.4	Triacs	76
2.1.5	IGBTs	78
2.2	Gleichrichter	79
2.2.1	Prinzip der Gleichrichtung	79
2.2.2	Ungesteuerte Gleichrichterschaltungen	79
2.2.3	Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1U)	80
2.2.4	Zweipuls-Brückenschaltung (B2U)	81
2.2.5	Dreipuls-Mittelpunkt-Schaltung (M3U)	81
2.2.6	Sechspuls-Brückenschaltung (B6U)	82
2.2.7	Glättung von gleichgerichteten Spannungen	83
2.2.8	Gesteuerte Gleichrichterschaltungen	83
2.3	Wechselrichter	85
2.3.1	Pulsweitenmodulation (PWM)	86
2.4	Netzteile	87
2.4.1	Lineares Netzteil (Trafonetzteil)	87
2.4.2	Schaltnetzteile	89
3	Digitale Baugruppen	90
3.1	Flipflops	90
3.1.1	RS-Flipflop	91
3.1.2	D-Flipflop	91
7	1 Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	94
1.1	Aufbau einer SPS	94
1.2	Signalformen	95
1.3	Arbeitsweise einer SPS	95
1.4	Bauarten von speicherprogrammierbaren Steuerungen	96
1.5	Herstellerspezifische Merkmale	96
1.6	Programmiersprachen	97
2	Kleinsteuerungen	97
2.1	Anschlussplan und Zuordnungsliste	98
2.2	Funktionale Sicherheit	99
2.2.1	Not-Halt-Abschaltung mit Sicherheitsschaltgerät	100
2.3	Programmieren von Kleinsteuerungen	101
2.3.1	Kontaktplan KOP	101
2.3.2	Programmieren im Kontaktplan (KOP) mit Eaton easySoft 8	103

2.3.3	Easy Device Programmierung (EDP) mit EATON easySoft 8	105
2.3.4	Funktionsplan (FUP)	107
2.3.5	Programmieren im Funktionsplan (FUP) mit EATON easy Soft 8	108
2.3.6	Programmieren im Funktionsplan (FUP) der Siemens LOGO!	110

3 Sensoren 112

3.1 Einteilung von Sensoren 112

3.2 Näherungsschalter 113

3.2.1 Induktive Sensoren (Näherungsschalter) 113

3.2.2 Kapazitive Sensoren (Näherungsschalter) 114

3.2.3 Optische Sensoren (Näherungsschalter) 115

3.2.4 Magnetfeldsensoren 116

3.2.5 Akustische Sensoren (Ultraschallsensoren) 116

3.3 Analoge Sensoren 117

3.3.1 Messung von Temperaturen 117

3.3.2 Widerstandsthermometer 117

3.3.3 Thermistoren 118

3.3.4 Thermoelemente 118

3.4 Messung von Kraft, Druck, Dehnung und Drehmoment 119

3.5 Analoge und digitale Sensoren zur Weg- und Winkelmessung 120

3.5.1 Linearpotentiometer 120

3.5.2 Drehpotentiometer 120

3.5.3 Lasersensoren 120

3.5.4 Inkrementalgeber 121

3.5.5 Absolutwertgeber 121

4 Einführung in die Regelungstechnik 122

4.1 Steuern und Regeln 122

4.2 Regelstrecken 123

4.2.1 Übertragungsbeiwert und Regelbarkeit 124

4.3 Regler 125

4.3.1 Zweipunktregler 125

4.3.2 PID-Regler 126

4.3.3 Ziel der Regelung 127

1 Elektrische Maschinen 130

1.1 Physikalische Grundlagen 130

1.1.1	Strom- und Magnetfeld	130
1.1.2	Magnetfeld und Induktion	131
1.2	Transformator	132
1.2.1	Einphasentransformator	132
1.2.2	Übersetzungsverhältnis	134
1.2.3	Transformator Kenngrößen	136
1.2.4	Verluste und Wirkungsgrad (Realer Transformator)	137
1.2.5	Sondertransformatoren	138
1.2.6	Kleintransformatoren	140
1.3	Grundlagen elektrischer Motoren	141
1.3.1	Physikalische Grundlagen	141
1.3.2	Leistung und Drehmoment	142
1.3.3	Arbeitspunkt eines Motors mit Last	143
1.3.4	Verluste und Wirkungsgrad	144
1.3.5	Bauformen und Baugrößen	145
1.3.6	Betriebsarten	146
1.3.7	Kühlung und Isolierstoffklassen	147
1.4	Drehstrommotoren	148
1.4.1	Funktionsprinzip eines Drehstrommotors (Drehfeldmotor)	148
1.4.2	Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer (Käfigläufermotor)	150
1.4.3	Anlassverfahren	151
1.4.4	Drehzahlsteuerung von Drehstrommotoren	155
1.5	Wechselstrommotoren	156
1.5.1	Kondensatormotor	156
1.5.2	Spaltnotor	157
1.6	Gleichstrommotor	158
1.6.1	Universalmotor	159
1.7	Bremsverfahren	160
1.8	Motorschutz	160
1.8.1	Thermisches Überlastrelais (Motorschutzrelais)	161
1.8.2	Motorschutzschalter	162
1.8.3	Motorvollschutz (Thermistorschutz)	163
1.9	Elektrische Ausrüstung von Maschinen	164
1.9.1	Querschnitte, Farben und Symbole	164
1.9.2	Not-Halt und Stopp-Kategorien	165
1.9.3	Schutz von Steuerstromkreisen	165
1.10	Betriebsstörungen	166
1.11	Antriebsauslegung	166
2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	168
2.1	Störquellen und Störsenken	160
2.2	Störmechanismen	169
2.3	Praktische EMV-Maßnahmen	170
2.3.1	EMV-Maßnahmen bei der Leitungsverlegung	170
2.3.2	EMV-Maßnahmen im Schaltschrank	170

Anhang	171
Sachwortverzeichnis	177
Bildquellenverzeichnis	183

Nur zu Prüfzwecken - Eigentum der Westermann Gruppe

LERNFELD 5

**Elektroenergieversorgung
und Sicherheit von Anlagen
und Geräten konzipieren**

Nur zu Prüfzwecken Erlaubt im Eigentum der Westermann Gruppe



Handlungskompetenzen

- Elektroenergieversorgungen für Anlagen planen
- Anlagen unter Berücksichtigung von Netzsystemen und Schutzmaßnahmen dimensionieren
- Vorschriften zum Schutz gegen elektrischen Schlag einhalten
- Ortsfeste und ortsveränderliche elektrische Betriebsmittel prüfen

1 Wechselstrom

In den Energieverteilungsnetzen in Gebäuden und Anlagen wird **sinusförmiger Wechselstrom** verwendet. Der Unterschied zwischen Gleichstrom und Wechselstrom ist in den Abb. 1 a) bis d) am Beispiel einer einfachen Schaltung mit Spannungsquelle und Lampe dargestellt.

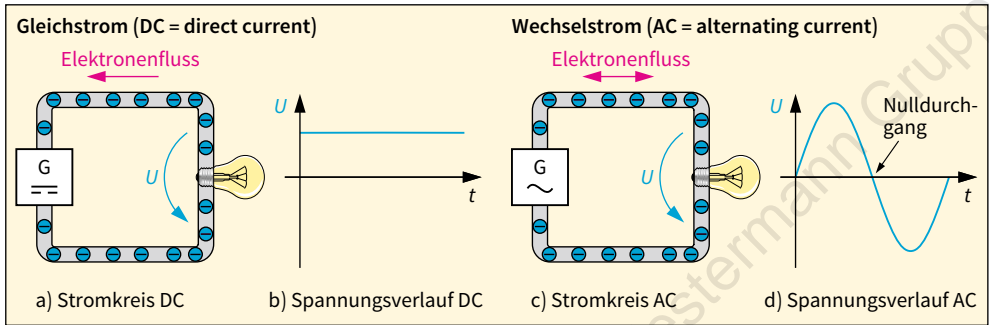


Abb. 1 a) bis d): Gleichstromkreis und Wechselstromkreis im Vergleich

Im **Gleichstromkreis** (Abb. 1 a) fließt der Strom immer nur in eine Richtung. Die Elektronen bewegen sich hier also von der Spannungsquelle durch die Lampe und wieder zurück zur Spannungsquelle. Wenn man die Spannung U an der Lampe misst und den zeitlichen Verlauf in einem Diagramm darstellt, so ergibt sich eine gerade Linie (Abb. 1 b).

Im **Wechselstromkreis** (Abb. 1 c) wechselt der Strom immer seine Richtung. Die Elektronen ändern also immer ihre Bewegungsrichtung und durchlaufen nie den ganzen Stromkreis. Die Leuchtwirkung der Lampe ist jedoch gleich, da der Lampendraht glüht, sobald sich Elektronen in ihm bewegen. Die Spannung hat einen sinusförmigen Verlauf (Abb. 1 d). Bei jedem Richtungswechsel werden Spannung und Stromstärke für einen kurzen Augenblick gleich Null (**Nulldurchgang**). In diesem Moment leuchtet die Lampe nicht. Dies wird jedoch nicht wahrgenommen, da das menschliche Auge dafür zu träge ist. (Bei der üblichen Netzspannung von 230 V/50 Hz gibt es 100 Nulldurchgänge pro Sekunde.)

1.1 Kenngrößen der Wechselstromtechnik

Die Kenngrößen einer Wechsellspannung können mithilfe des **Liniendiagramms** bestimmt werden. Dieses kann z. B. durch Messung mit einem Oszilloskop erzeugt werden. Folgende Größen können direkt abgelesen werden (Abb. 2):

- Der **Scheitelwert \hat{u}** (auch Spitzenwert, Maximalwert oder Amplitude) ist der Höchstwert der Spannung. Sein Betrag ist im positiven und im negativen Bereich gleich groß. Die Differenz von positivem und negativem Scheitelwert wird als **Spitze-Spitze-Wert u_{SS}** (auch Spitze-Tal-Wert \hat{u}) bezeichnet.
- Die **Periodendauer T** gibt die Dauer einer ganzen Schwingung in Sekunden an. Eine Schwingung (Periode) besteht immer aus zwei **Halbperioden**.

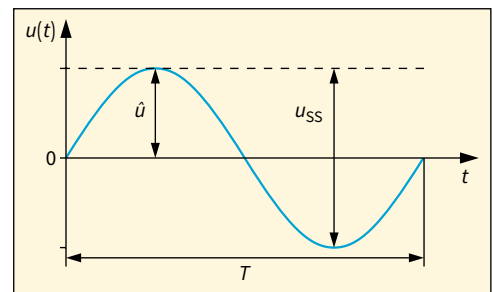


Abb. 2: Liniendiagramm mit Kenngrößen

Weitere Kenngrößen können aus den abgelesenen Werten berechnet werden:

- Die **Frequenz f** gibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde an. Die Frequenz wird in **Hertz (Hz)** gemessen und aus der Periodendauer T berechnet.
- Der **Effektivwert U** (auch U_{eff} oder U_{RMS}) ist ein **Mittelwert**, der über die Wechselstromleistung definiert ist (siehe Kap 1.5). Er beträgt ca. 70 % vom Scheitelwert \hat{u} (Abb. 1).

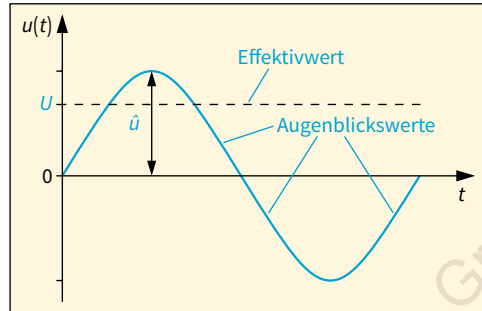


Abb. 1: Effektivwert und Augenblickswerte

Die Glühlampen in den Beispielschaltungen (vorige Seite) erscheinen gleich hell, wenn der Effektivwert der Wechselspannung U gleich groß ist wie der Gleichspannungswert U .

In der Praxis werden meist die Effektivwerte von Spannung, Stromstärke und Leistung verwendet.

Heinrich Hertz:
Deutscher Physiker
(1857–1894). Er erforschte
elektromagnetische Wellen.

Frequenz f in Hz	Effektivwert der Spannung U in V	Effektivwert der Stromstärke I in A
$f = \frac{1}{T}$	$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$	$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$
T : Periodendauer in s	\hat{u} : Scheitelwert der Spannung in V	\hat{i} : Scheitelwert der Stromstärke in A
f : Frequenz in Hz	U : Effektivwert der Spannung in V	I : Effektivwert der Stromstärke in A
\hat{u} : Scheitelwert der Spannung in V		

Der **Augenblickswert** (Momentanwert) ist der genaue Wert einer sinusförmigen Wechselgröße zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Er kann mithilfe von Scheitelwert und Frequenz berechnet werden. Dabei wird meist die Darstellung mit der **Kreisfrequenz ω** (sprich: „Omega“) verwendet:

Kenngrößen der Wechselspannung in Deutschland:
 $U = 230 \text{ V}$ $f = 50 \text{ Hz}$
 $\hat{u} = 325 \text{ V}$ $T = 20 \text{ ms}$

Augenblickswerte von Spannung und Strom	
$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) = \hat{u} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
$i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t) = \hat{i} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$	$\omega = \text{Kreisfrequenz in } \frac{1}{\text{s}}$
Hinweis: Bei Verwendung dieser Formeln muss der Taschenrechner auf RAD umgestellt werden oder π durch 180° ersetzt werden!	

Augenblickswerte und Effektivwerte:

Augenblickswerte werden immer mit Kleinbuchstaben bezeichnet (z. B. u , i oder $u(t)$, $i(t)$). Im Gegensatz dazu werden Effektivwerte mit Großbuchstaben bezeichnet (z. B. U , I). Sie sind als Mittelwerte unabhängig von der Zeit.

1.2 Erzeugung von Wechselstrom

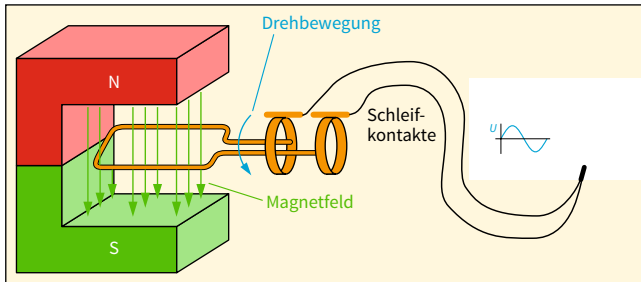


Abb. 1: Funktionsprinzip eines Generators

Induktion:

Erzeugung von Spannung mit Hilfe eines Magnetfeldes.

In Abb. 1 ist das Prinzip eines Wechselstromgenerators dargestellt. Eine Leiterschleife wird in einem Magnetfeld in Drehung versetzt.

Durch **Induktion** entsteht in der Leiterschleife eine sinusförmige Spannung. Die Frequenz der Spannung hängt von der Drehgeschwindigkeit der Leiterschleife ab. Eine Frequenz von 50 Hz erreicht man, wenn der Generator mit 3000 Umdrehungen pro Minute dreht. Dieses Funktionsprinzip wird auch beim Fahrraddynamo oder bei der Lichtmaschine eines Autos verwendet.

1.3 Verbraucher im Wechselstromkreis

Das Verhalten von Strom und Spannung im Wechselstromkreis hängt von der **Art des Verbrauchers** ab. Man unterscheidet zwischen drei Arten von Verbrauchern (Abb. 2):

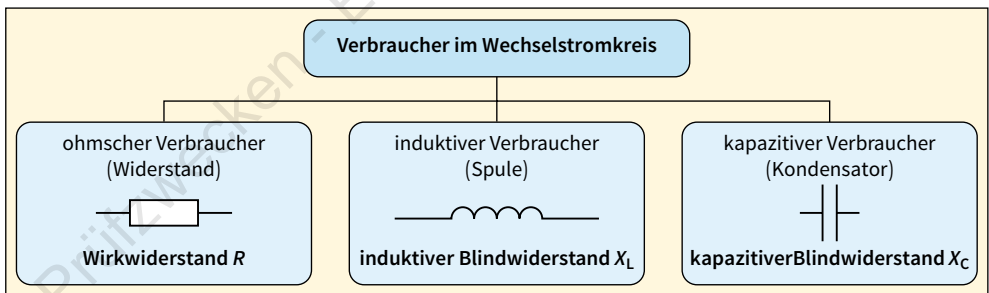


Abb. 2: Arten von Verbrauchern im Wechselstromkreis

Wirkwiderstand R :

In einem Wirkwiderstand wird durch den Stromfluss elektrische Energie in eine andere Energieform umgewandelt (z. B. Wärme).

Der Wirkwiderstand ist an AC und DC gleich.

Blindwiderstand X :

Ein Blindwiderstand entsteht nur an AC, z. B. durch das magnetische Feld in der Spule.

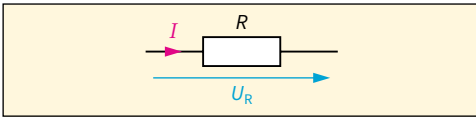
Im idealen Blindwiderstand entsteht keine Wärme.

Scheinwiderstand (Impedanz) Z :

Er bezeichnet den Gesamtwiderstand im Wechselstromkreis und besteht aus Wirk- und Blindanteil:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

1.3.1 Widerstand im Wechselstromkreis (ohmscher Verbraucher)



Der zeitliche Verlauf von Spannung und Stromstärke an einem ohmschen Widerstand ist in Abb. 1 dargestellt.

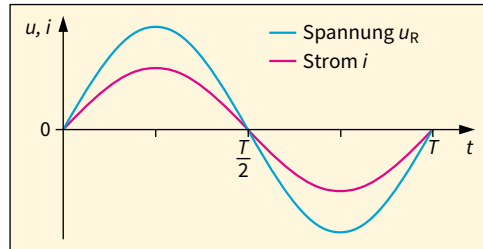
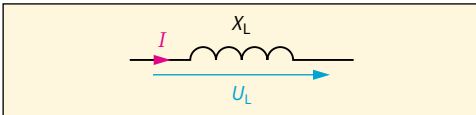


Abb. 1: Spannungs- und Stromverlauf am Wirkwiderstand

Beide Größen erreichen zur gleichen Zeit ihren Maximalwert und der Nulldurchgang findet im gleichen Augenblick statt. **Strom und Spannung sind phasengleich**. Der Widerstand R wird auch als **Wirkwiderstand** bezeichnet.

1.3.2 Spule im Wechselstromkreis (induktiver Verbraucher)



Bei einer Spule ergibt sich an Wechselspannung eine zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Strom. **Der Strom eilt der Spannung um die Zeit Δt nach** (Abb. 2). Diese „Verspätung“ des Stroms entsteht durch die Induktionswirkung des magnetischen Feldes in der Spule (Selbstinduktion). Die Induktivität L der Spule beschreibt die Größe dieser magnetischen Wirkung.

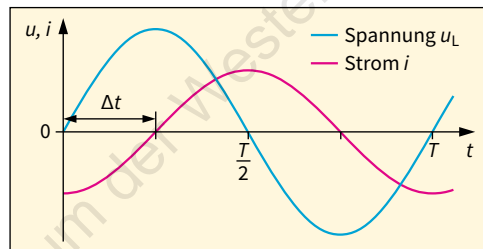


Abb. 2: Spannungs- und Stromverlauf an der idealen Spule

Bei einer **idealen Spule** (ohne Wirkwiderstand) beträgt die zeitliche Differenz $\Delta t = \frac{T}{4}$. Dies ist gleichbedeutend mit einer **Phasenverschiebung von $+90^\circ$** (siehe Kap.1.4).

Die ideale Spule stellt im Wechselstromkreis einen **induktiven Blindwiderstand X_L** dar, der von der Frequenz abhängig ist.

Eine **reale Spule** (z. B. Netzdrossel, Abb. 4) hat einen Drahtwiderstand, der einen Wirkwiderstand R darstellt. Bei Wechselspannung entsteht zusätzlich der Blindwiderstand X_L . Der Gesamtwiderstand besteht daher aus einem Wirkanteil R und einem Blindanteil X_L (Abb. 3). Es ergibt sich der Scheinwiderstand Z mit $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$. Die Phasenverschiebung ist hier kleiner als 90° . (siehe auch Kap. 1.7, RL-Schaltung)

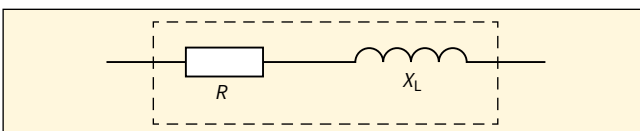


Abb. 3: Ersatzschaltbild der realen Spule

Induktiver Blindwiderstand X_L in Ω

$$X_L = \omega \cdot L = (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot L$$

ω : Kreisfrequenz in $\frac{1}{s}$

L : Induktivität in Henry (H)

f : Frequenz in Hz

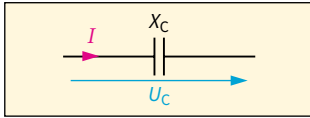
Merksatz:

„Induktivitäten: Ströme verspäten sich!“



Abb. 4: Reale Spule (Netzdrossel)

1.3.3 Kondensator im Wechselstromkreis (kapazitiver Verbraucher)



Im Wechselstromkreis wird der Kondensator ständig ge- und entladen. Dadurch tritt eine zeitliche Verschiebung zwischen Strom und Spannung auf.

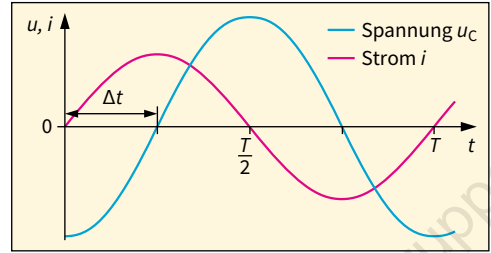


Abb. 1: Spannungs- und Stromverlauf am idealen Kondensator

Hier eilt der der Strom der Spannung um Δt voraus (Abb. 1).

Die zeitliche Differenz beträgt beim idealen Kondensator (ohne Wirkwiderstand) $\Delta t = -\frac{T}{4}$. Dies entspricht einer Phasenverschiebung von -90° .

Der Kondensator stellt im Wechselstromkreis einen **kapazitiven Blindwiderstand** X_C dar, der von der Frequenz abhängig ist.

Beim realen Kondensator (Abb. 2) wird durch das Dielektrikum auch ein Wirkwiderstand verursacht. Der Gesamtwiderstand besteht daher aus einem Wirkanteil R und einem Blindanteil X_C (Abb. 3). Der Wirkanteil kann in der Praxis aber fast immer vernachlässigt werden.

Kapazitiver Blindwiderstand X_C in Ω

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f) \cdot C}$$

ω : Kreisfrequenz in $\frac{1}{s}$

C : Kapazität in F

f : Frequenz in Hz



Abb. 2: Realer Kondensator

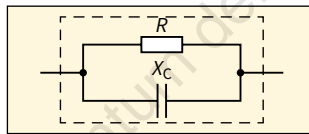


Abb. 3: Ersatzschaltbild realer Kondensator

Merksatz:
„Kondensator: Strom eilt vor!“

1.4 Phasenverschiebungswinkel φ ("Phi")

Die Phasenverschiebung zwischen zwei Wechselgrößen kann auf mehrere Arten dargestellt werden. Neben der zeitlichen Darstellung ist die Winkeldarstellung üblich (Abb. 4).

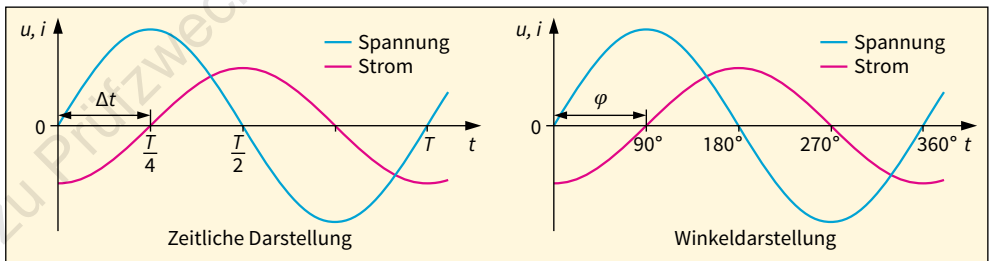


Abb. 4: Darstellungsarten einer Phasenverschiebung (hier: $\varphi = 90^\circ$)

Die Periodendauer T entspricht immer einem Winkel von 360° . Der Phasenverschiebungswinkel (kurz: Phasenwinkel) φ in Grad kann aus der gemessenen zeitlichen Verschiebung Δt einfach berechnet werden:

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ$$

Reale Spulen und Kondensatoren besitzen auch einen Wirkwiderstand. Daher ist die **Phasenverschiebung bei realen Bauelementen immer kleiner als 90°** .

1.5 Zeigerdarstellung von Wechselgrößen

Bei Berechnungen an Wechselstromkreisen ist zu beachten, dass phasenverschobene Größen nicht wie Gleichstromgrößen berechnet werden können.

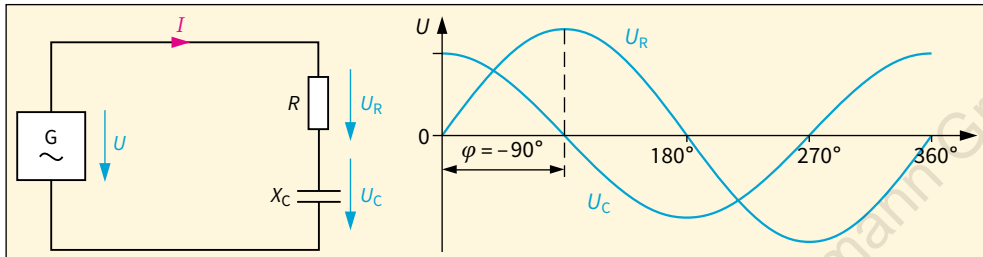


Abb. 1: Spannungen im Wechselstromkreis

Abb. 1 zeigt eine Reihenschaltung eines Widerstandes und eines idealen (verlustfreien) Kondensators. Addiert man die Effektivwerte der Spannungen U_R und U_C nach den Regeln der Reihenschaltung, so führt dies zu einem falschen Ergebnis: $U_R + U_C \neq U$. Dies liegt daran, dass die Spitzenwerte der Spannungen nicht zur gleichen Zeit auftreten (Kondensatorspannung eilt der Spannung am Widerstand um 90° nach).

Das richtige Ergebnis erhält man durch die **geometrische Addition** mithilfe eines **Zeigerdiagramms**.

Hierzu werden die Spannungen U_R und U_C maßstabsgerecht als Pfeile gezeichnet, die durch den Phasenverschiebungswinkel verschoben sind. Die Länge der Pfeile entspricht der Größe der Spannungen. Die Gesamtspannung U ergibt sich aus der Länge des resultierenden Pfeils im sogenannten **Spannungsdreieck** (Abb. 2).

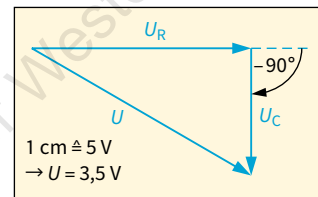


Abb. 2: Spannungsdreieck zur Berechnung der Gesamtspannung U (Beispiel)

Regeln zum Zeichnen der Zeigerdiagramme:

- Nicht phasenverschobene Größen werden waagrecht gezeichnet.
- Die einzelnen Pfeile werden aneinandergesetzt.
- Die Richtung der Pfeile ergibt sich aus dem Phasenverschiebungswinkel.
- Der Phasenverschiebungswinkel wird gegen den Uhrzeigersinn positiv gezählt.

Die Größe der Gesamtspannung U kann nach den Regeln der Geometrie auch mithilfe des Satzes des Pythagoras berechnet werden.

$$U^2 = U_R^2 + U_C^2 \rightarrow U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$$

Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung

Am Widerstand R sind Spannung und Strom nicht phasenverschoben (U_R und I sind phasengleich). Daher kann aus dem Spannungsdreieck auch der **Phasenverschiebungswinkel** φ in Grad zwischen dem Strom I und der Gesamtspannung U abgelesen werden (Abb. 3).

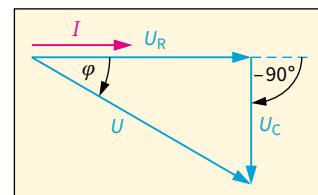


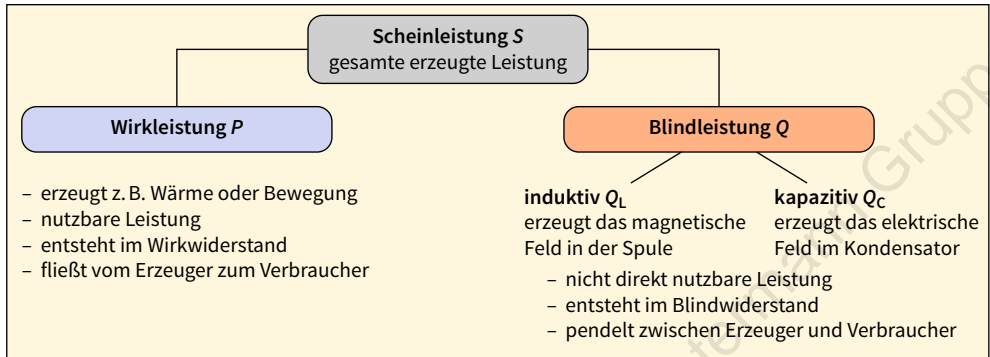
Abb. 3: Phasenverschiebung φ zwischen Gesamtspannung U und Strom I

Vektordarstellung:

Phasenverschobene Größen können als Vektoren dargestellt werden. Vektoren haben immer einen Betrag und eine Richtung. Sie werden mit einem Pfeil gekennzeichnet. Schreibweise: $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_C$

1.6 Leistung im Wechselstromkreis

In einem Wechselstromkreis unterscheidet man zwischen drei Leistungsarten:



An einem **Wirkwiderstand** sind Spannung und Strom phasengleich. Wenn man Spannung und Strom zu jedem Zeitpunkt multipliziert, erhält man den zeitlichen Verlauf der Leistung: $p(t) = u(t) \cdot i(t)$.

Die Fläche unter der Leistungskurve entspricht der **Wirkarbeit**. Abb. 1 zeigt den Verlauf in der Winkeldarstellung. Die Leistung ist immer **positiv**.

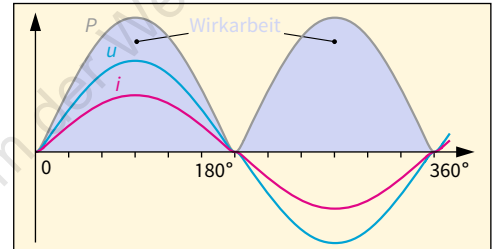


Abb. 1: Verlauf der Leistung am Wirkwiderstand

An einem **Blindwiderstand** sind Spannung und Strom phasenverschoben. Abb. 2 zeigt den Verlauf der Leistung an einer idealen Spule ($\varphi = 90^\circ$). Das Produkt von Spannung und Strom ist immer dann negativ, wenn Spannung und Strom nicht das gleiche Vorzeichen haben.

Die Fläche unter der Kurve entspricht der induktiven **Blindarbeit**. Der negative Bereich bedeutet, dass die Blindleistung auch zum Erzeuger zurückfließt.

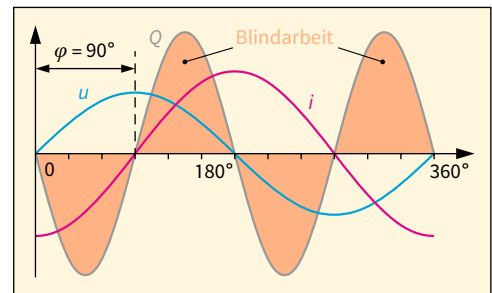


Abb. 2: Verlauf der Leistung am Blindwiderstand (induktiv)

Abb. 3 zeigt den Leistungsverlauf an einer **realen Spule**. Die Phasenverschiebung ist hier kleiner als 90° , da die Spule neben dem induktiven Blindwiderstand auch einen Wirkwiderstand besitzt. Der Wirkwiderstand entsteht durch den Leiterwiderstand der Spulenwicklung. Die gesamte erzeugte **Scheinleistung S** enthält daher Wirkleistung P und Blindleistung Q.

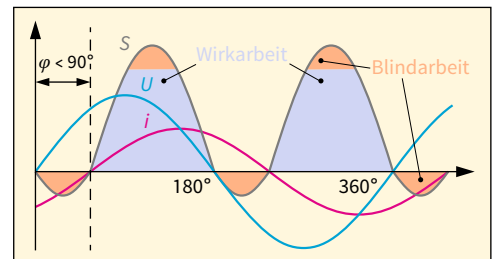
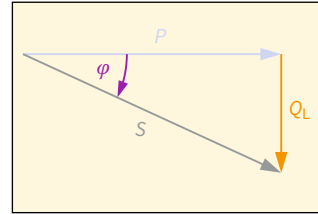


Abb. 3: Verlauf der Leistung am Scheinwiderstand der realen Spule

i + Q_L und - Q_C :
Induktive und kapazitive Blindleistungen haben unterschiedliche Vorzeichen. Die Blindleistung einer Spule kann daher durch Zuschalten eines Kondensators verringert (kompensiert) werden.

Anhand des **Leistungsdreiecks** (Abb. 1) lassen sich die Bestandteile der **Scheinleistung S** gut darstellen. Die **Wirkleistung P** wird immer waagrecht gezeichnet. Die **Blindleistung Q** steht dazu immer senkrecht (induktiv: nach unten, kapazitiv: nach oben). Der **Phasenwinkel φ** entspricht der zeitlichen Verschiebung zwischen Spannung und Strom.



Die Regeln der Geometrie führen zu den **allgemeinen Berechnungsformeln** für Leistungen im Wechselstromkreis. Zur leichteren Unterscheidung haben die verschiedenen Leistungsarten auch **unterschiedliche Einheiten**:

Abb. 1: Leistungsdreieck einer realen Spule (realer induktiver Verbraucher)

Wirkleistung P in W	Blindleistung Q in var	Scheinleistung S in VA
$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ $S = U \cdot I$
Einheit: Watt (W)	Einheit: Volt Ampere Reaktiv (var)	Einheit: Volt Ampere (VA)
<i>U</i> : Spannung in V <i>I</i> : Stromstärke in A φ : Phasenverschiebungswinkel in °		

1.6.1 Leistungsfaktor $\cos \varphi$

Der $\cos \varphi$ ist ein wichtiger Kennwert von Betriebsmitteln. Er wird auch als **Wirkfaktor**, **Wirkleistungsfaktor** oder **Verschiebungsfaktor** bezeichnet.

Der $\cos \varphi$ bezeichnet das **Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung**. Je größer der Leistungsfaktor ist, desto kleiner ist die Phasenverschiebung φ und desto mehr der eingespeisten Gesamtleistung wird in Wirkleistung umgesetzt.

3~ Motor	Δ 400 V
10 kW	20 A $\cos \varphi = 0,8$

Leistungsfaktor

Abb. 2: Leistungsschild eines Drehstrommotors (Beispiel)

Bei Betriebsmitteln ohne Phasenverschiebung ist $\varphi = 0$, daher ist der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$. Der Leistungsfaktor wird dann nicht extra angegeben. Bei Motoren befindet sich die Angabe jedoch immer auf dem Leistungsschild (Abb. 2).

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ darf nicht mit dem Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$ verwechselt werden, der die Verluste in den Betriebsmitteln beschreibt.

Die Berechnungsformel des $\cos \varphi$ leitet sich aus den Leistungsformeln ab:

Leistungsfaktor $\cos \varphi$
$\cos \varphi = \frac{P}{S}$
Einheit: ohne

cos φ und λ :
Der $\cos \varphi$ ist der Leistungsfaktor bei rein sinusförmigem Spannungsverlauf. Weicht die Spannung von der Sinusform ab (z. B. bei Netzen mit Oberschwingungen), wird das Verhältnis von P zu S als Leistungsfaktor λ (sprich: Lambda) bezeichnet.

Das Verhältnis von Blindleistung zu Scheinleistung wird auch als **Blindfaktor** $\sin \varphi$ bezeichnet: $\sin \varphi = \frac{Q}{S}$

1.7 Verbraucherschaltungen im Wechselstromkreis

1.7.1 Grundsaltungen mit idealen Bauelementen

Reihenschaltung: Hier fließt der gleiche Strom I durch alle Bauteile. I ist immer phasengleich mit der Spannung U_R am Widerstand R . Die Gesamtspannung U ist gegenüber dem Strom I um den Winkel φ phasenverschoben.

RC-Reihenschaltung		RL-Reihenschaltung (reale Spule)	
Spannungsverlauf			
	Der Strom eilt der Gesamtspannung vor: I vor U $\rightarrow U_R$ vor U		Der Strom eilt der Gesamtspannung nach: I nach U $\rightarrow U_R$ nach U
Spannungen und Strom			
	$U_R = U \cdot \cos \varphi$ $U_C = U \cdot \sin \varphi$ $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$ $I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_C}{X_C} = \frac{U}{Z}$		$U_R = U \cdot \cos \varphi$ $U_L = U \cdot \sin \varphi$ $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$ $I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_L}{X_L} = \frac{U}{Z}$

Parallelschaltung: Die Spannung U ist an allen Bauelementen gleich. U ist immer phasengleich mit dem Strom I_R im Widerstand R . Der Gesamtstrom I ist gegenüber der Spannung U um den Winkel φ phasenverschoben.

RC-Parallelschaltung (realer Kondensator)		RL-Parallelschaltung	
Stromverlauf			
	Der Strom I_C am Kondensator eilt vor $\rightarrow I$ vor I_R		Der Strom I_L an der Spule eilt vor $\rightarrow I_R$ vor I
Ströme und Spannung			
	$I_R = I \cdot \cos \varphi$ $I_C = I \cdot \sin \varphi$ $I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$ $I_R = \frac{U}{R} \quad I_C = \frac{U}{X_C}$ $I = \frac{U}{Z}$		$I_R = I \cdot \cos \varphi$ $I_L = I \cdot \sin \varphi$ $I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$ $I_R = \frac{U}{R} \quad I_L = \frac{U}{X_L}$ $I = \frac{U}{Z}$

1.7.2 Resonanz

Die Wirkungen von Kondensator und Spule sind entgegengesetzt. Wenn sich in einem Stromkreis die kapazitiven und induktiven Anteile gegenseitig genau aufheben, wirkt die Schaltung wie ein Wirkwiderstand R . Diesen Sonderfall nennt man **Resonanz** (siehe auch Kap. 1.8).

Im Resonanzfall können in einer Anlage Spannungen und Ströme auftreten, die wesentlich höher sind als die durch das Netz vorgegebenen Nennwerte. Es ist daher vorher zu prüfen, ob die Betriebsmittel dafür geeignet sind!

Gefahren durch Resonanz

Wenn es in Energieverteilungsanlagen ungewollt zu Resonanzen kommt, entstehen Überspannungen und Überströme, die Betriebsmittel beschädigen können! Resonanzen können z. B. durch Oberschwingungen verursacht werden.

1.8 Schwingkreise

Liegen ein Kondensator und eine Spule zusammen in einem Stromkreis, so bilden sie einen Schwingkreis.

Wenn ein Schwingkreis einmal durch eine äußere Wechselspannung angeregt ist, erfolgt ein fortlaufender Austausch der magnetischen Energie der Spule mit der elektrischen Energie des Kondensators. Immer, wenn sich der Kondensator entlädt, lädt sich die Spule auf.

Im verlustfreien (ungedämpften) Schwingkreis **pendelt die Energie** über den Stromfluss mit einer bestimmten Frequenz f_r hin und her (Abb. 1). Diese sogenannte **Resonanzfrequenz f_r** wird durch die Größe der Bauelemente bestimmt.

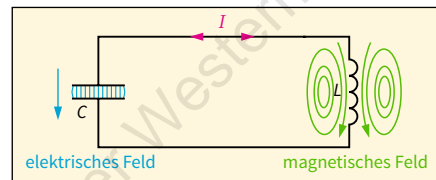


Abb. 1: Energieaustausch im Schwingkreis

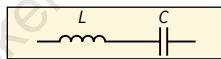
Resonanzfrequenz f_r in Hz

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

L : Induktivität der Spule in Henry (H)

C : Kapazität des Kondensators in Farad (F)

1.8.1 Reihenschwingkreis



Der **Gesamtwiderstand (Impedanz Z)** eines Reihenschwingkreises hängt von der Frequenz ab. Bei der Resonanzfrequenz gilt: $X_L = X_C$. Die **Impedanz Z wird minimal** und entspricht im Wesentlichen dem ohmschen Widerstand der realen Spule. Dadurch kommt es zu sehr großen Strömen (Abb. 2).

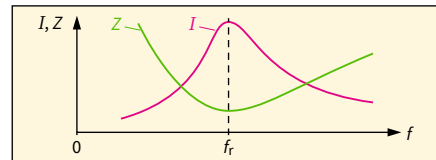
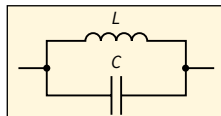


Abb. 2: Impedanz Z und Stromstärke I im Reihenschwingkreis

1.8.2 Parallelschwingkreis



Auch im Parallelschwingkreis gilt bei Resonanz $X_L = X_C$. Der **Gesamtwiderstand (Impedanz Z)** wird in diesem Fall jedoch **maximal** (Abb. 3).

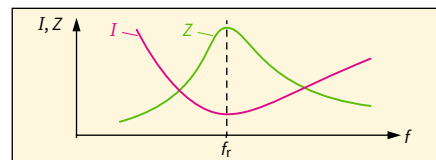


Abb. 3: Impedanz Z und Stromstärke I im Parallelschwingkreis

Schwingkreise als Filter

Schwingkreise werden verwendet, um störende Frequenzen aus dem Netz zu entfernen. In der Energietechnik werden z. B. **OberschwingungsfILTER** verwendet.

1.9 Messen von Wechselgrößen (Oszilloskop)

Ein Oszilloskop stellt den zeitlichen Verlauf einer Wechselgröße dar. Oszilloskope können nur Spannungen messen. Um Stromstärken zu messen nutzt man eine Spannungsmessung an einem Hilfswiderstand. Mehrkanal-Oszilloskope können mehrere Spannungen gleichzeitig darstellen. So kann man z.B. Phasenverschiebungen bestimmen.

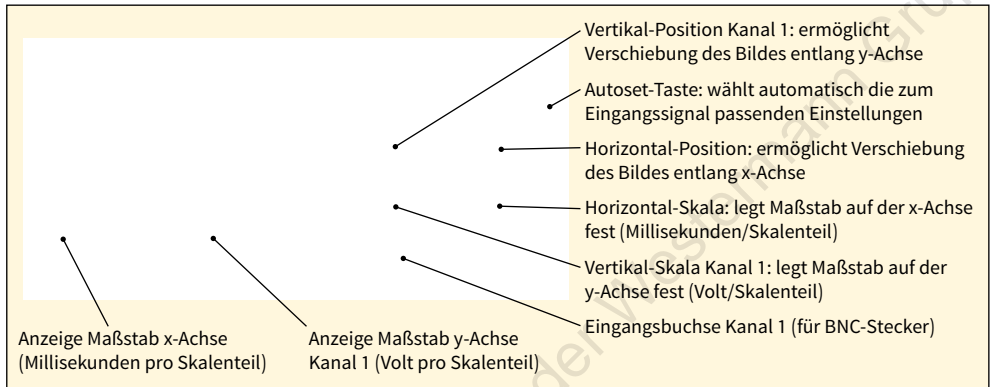
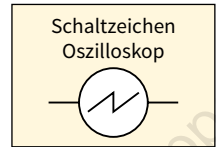


Abb. 1: Bedienelemente eines Zweikanal-Oszilloskops

Beispiele für Messschaltungen

Anschlusschema	Anzeige	Ablesebeispiel
Messen von Gleichspannung		
		<p>Maßstab y-Achse: 3 V/Skalenteil</p> $U_1 = 3 \text{ Skalenteile} \cdot \frac{3 \text{ V}}{\text{Skalenteil}} = 9 \text{ V}$ <p>(1 Skalenteil = Abstand zwischen zwei Markierungslinien auf dem Bildschirm)</p>
Bestimmen der Frequenz f einer Wechselspannung		
		<p>Maßstab x-Achse: 2 ms/Skalenteil</p> $T = 10 \text{ Skalenteile} \cdot \frac{2 \text{ ms}}{\text{Skalenteil}} = 20 \text{ ms}$ <p>Berechnung von f:</p> $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,020 \text{ s}} = 50 \text{ Hz}$
Zweikanalmessung zum Bestimmen der Phasenverschiebung φ		
		<p>Maßstab x-Achse: 2 ms/Skalenteil</p> $\Delta t = 2 \text{ Skalenteile} \cdot \frac{2 \text{ ms}}{\text{Skalenteil}} = 4 \text{ ms}$ <p>Umrechnung in Grad:</p> $\varphi = \frac{\Delta t \cdot 360^\circ}{T} = \frac{4 \text{ ms} \cdot 360^\circ}{20 \text{ ms}} = 72^\circ$
<p>Bei Zweikanalmessung immer beide Spannungen gegen gleiches Bezugspotential messen!</p>		

2 Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom)

2.1 Spannungserzeugung und Spannungsarten

Im Drehstromnetz werden drei um 120° phasenverschobene Wechselspannungen verwendet (**Dreiphasenwechselspannung**). Die Spannungen werden von einem Drehstromgenerator mit drei räumlich um 120° versetzten Wicklungen erzeugt.

Funktionsprinzip eines Drehstromgenerators (Abb. 2):

- Ein drehbar gelagerter Dauermagnet wird von einer äußeren Kraft angetrieben.
- Das Magnetfeld des Dauermagneten dreht sich mit und wird daher **Drehfeld** genannt.
- Das Drehfeld erzeugt in jeder Wicklung eine Spannung durch **Induktion**.
- Da die Wicklungen räumlich versetzt sind, entstehen die Spannungen zeitlich versetzt und sind um genau 120° phasenverschoben.



Abb. 1: Drehstromgenerator mit Dieselantrieb

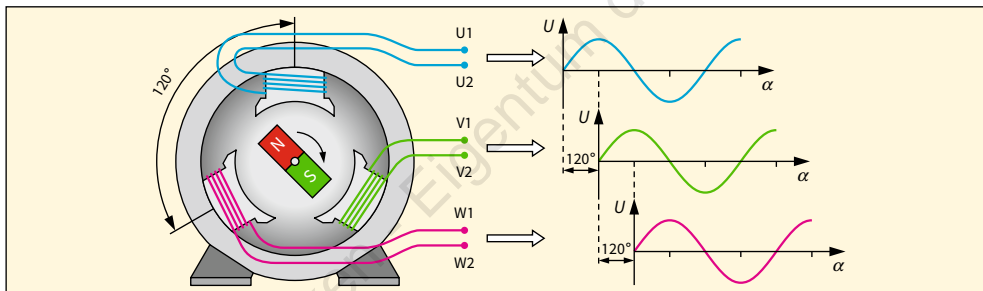


Abb. 2: Erzeugung von Dreiphasenwechselspannung

Verkettung

Für die drei Wechselspannungen werden eigentlich 6 Leiter (jeweils L und N) benötigt. Man kann jedoch 2 Leiter einsparen, wenn man die Spulenden im sogenannten **Sternpunkt** zusammenschaltet (Abb. 3).

Die drei Spannungen heißen nun **verkettete Spannungen**. Im Drehstromnetz werden die Phasen mit L1, L2 und L3 bezeichnet und haben einen gemeinsamen Neutraleiter, der im Sternpunkt angeschlossen ist (Abb. 4).

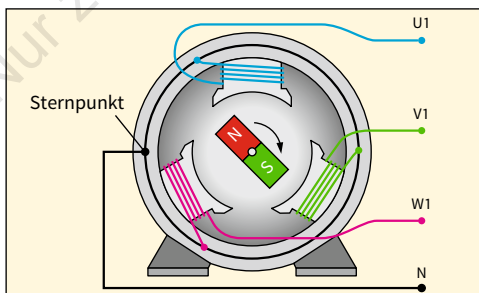


Abb. 3: Verkettung im Sternpunkt des Generators

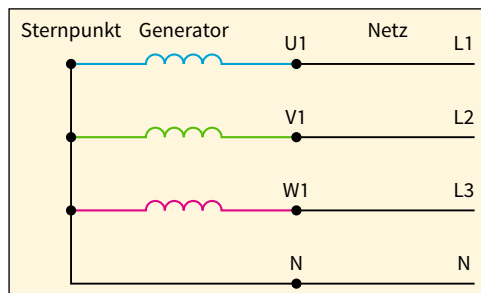


Abb. 4: Schaltbild eines Drehstromnetzes

Die drei verketteten Spannungen werden üblicherweise in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt (Abb. 1). Bei einer Netzfrequenz von 50 Hz (dies entspricht einer Generator-Drehzahl von 50 Umdrehungen pro Sekunde) beträgt die zeitliche Verschiebung der Spannungen jeweils 6,67 ms.

Durch die Verkettung sind im Drehstromnetz zwei unterschiedliche Spannungen nutzbar (Abb. 2):

- Die **Leiterspannung** U (Außenleiterspannung) ist die Spannung zwischen zwei Außenleitern:

$$U = 400 \text{ V} = U_{12} = U_{23} = U_{31}$$

- Die **Strangspannung** U_{Str} ist die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter:

$$U_{\text{Str}} = 230 \text{ V} = U_{1N} = U_{2N} = U_{3N}$$

Meist wird der Sternpunkt des Netzes geerdet.

Dann wird statt des N-Leiters ein PEN-Leiter mitgeführt.

Die Strangspannung ist dann gleich der **Spannung gegen Erde** U_0 :

$$U_{\text{Str}} = U_0 = 230 \text{ V}$$

Das Verhältnis von Leiterspannung zu Strangspannung wird **Verkettungsfaktor** genannt und beträgt im Dreiphasennetz $\sqrt{3}$.

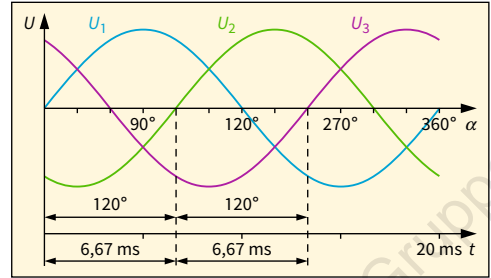


Abb. 1: Phasenverschiebung der Leiterspannungen

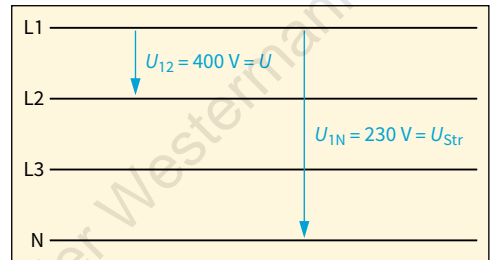


Abb. 2: Leiterspannung U und Strangspannung U_{Str}

Verkettungsfaktor

$$\frac{U}{U_{\text{Str}}} = \sqrt{3} \approx \frac{400 \text{ V}}{230 \text{ V}}$$

U : Leiterspannung in Volt
 U_{Str} : Strangspannung in Volt
 $\sqrt{3}$: Verkettungsfaktor

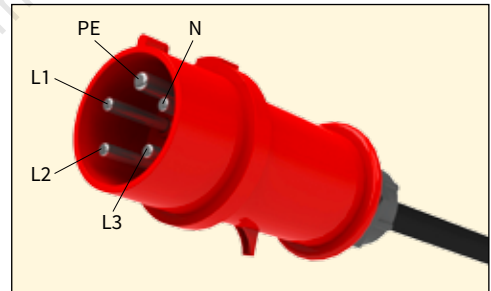


Abb. 3: CEE-Steckvorrichtung für Drehstrom

Berechnung der Leiterspannung

Eine Leiterspannung kann aus der Differenz zweier Strangspannungen ermittelt werden. Dies kann durch Subtraktion der Augenblickswerte im Liniendiagramm oder mithilfe des Zeigerdiagramms geschehen (Abb. 4).

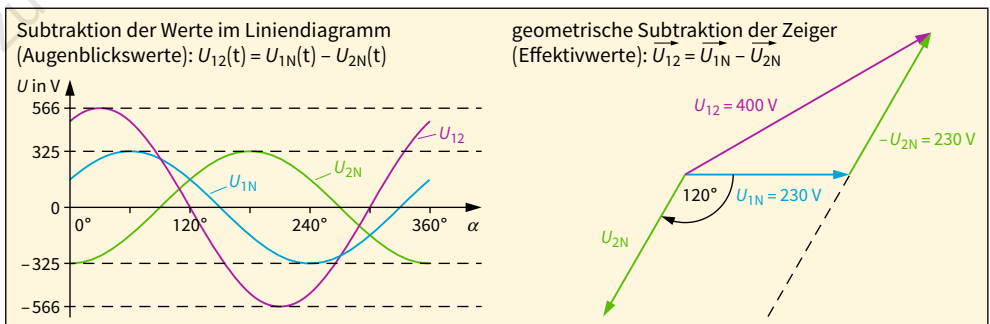
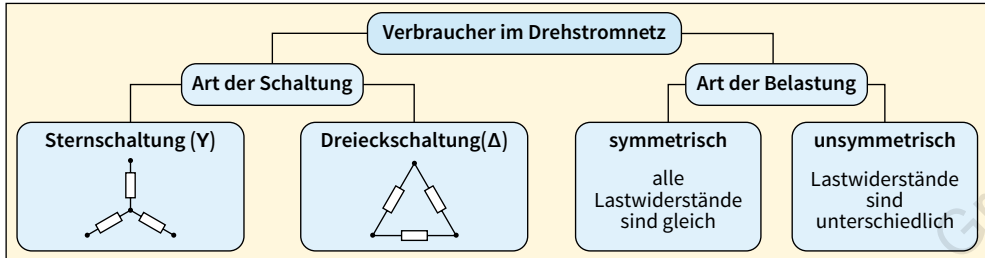


Abb. 4: Beispiel der Berechnung der Leiterspannung U_{12} aus den Strangspannungen U_{1N} und U_{2N} .

2.2 Verbraucher im Drehstromnetz



Verbraucher können entweder in Sternschaltung (Y) oder in Dreieckschaltung (Δ) an das Drehstromnetz angeschlossen werden. Die Last sollte möglichst gleichmäßig auf die drei Phasen verteilt werden. Wenn die Lastwiderstände **genau gleich** sind, spricht man von **symmetrischer Belastung**.

2.2.1 Sternschaltung (Y-Schaltung)

Abb.1 zeigt eine Sternschaltung mit drei gleichen Verbraucherwiderständen (symmetrische Last). Die Spannung an den Widerständen heißt **Strangspannung** U_{Str} . Sie ist um den Faktor $1/\sqrt{3}$ kleiner als die **Leiterspannung** U :
$$U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

Die Ströme in den Widerständen werden **Strangströme** genannt. Sie sind alle gleich groß:
$$I_{Str} = \frac{U_{Str}}{R}$$

Außerdem sind sie auch gleich den **Leiterströmen** I : $I = I_{Str} = I_1 = I_2 = I_3$

Die drei Leiterströme fließen im Sternpunkt zusammen. Aufgrund der Phasenverschiebung im Drehstromnetz ergibt die Summe der Ströme jedoch Null. **Der Neutralleiter führt daher keinen Strom** und kann entfallen. Dies kann durch Addition der Augenblickswerte im Liniendiagramm oder mithilfe des Zeigerdiagramms gezeigt werden (Abb. 3).

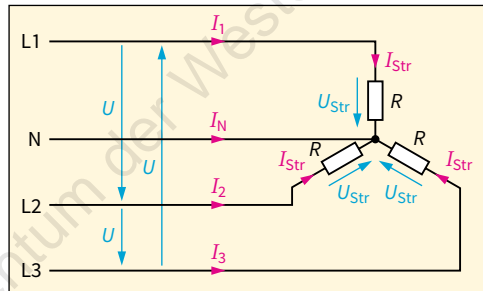


Abb. 1: Spannungen und Ströme in der Sternschaltung

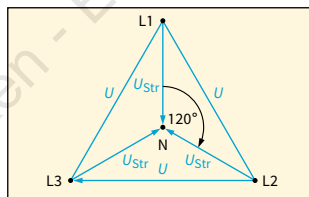


Abb. 2: Zeigerdiagramm der Spannungen in der Sternschaltung

Sternschaltung (symmetrische Last)

$$U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad I = I_{Str} \quad I_{Str} = \frac{U_{Str}}{R}$$

U : Leiterspannung in V
 U_{Str} : Strangspannung in V
 I : Leiterstrom in A
 I_{Str} : Strangstrom in A
 R : Strangwiderstand in Ω

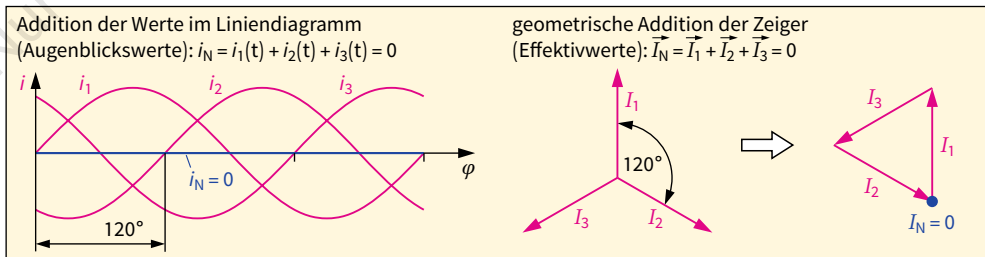


Abb. 3: Verfahren zur Berechnung des Neutralleiterstromes

2.2.2 Dreieckschaltung (Δ -Schaltung)

Abb. 1 zeigt eine Dreieckschaltung mit drei gleichen Verbraucherwiderständen (symmetrische Last).

Eine Dreieckschaltung besitzt keinen Neutralleiter (= Dreileitersystem).

Aufgrund der Anordnung sind die Strangspannungen hier immer gleich den Leiterspannungen:

$$U_{Str} = U$$

Die Leiterströme sind alle gleich groß:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

Wenn die Verbraucher Wirkwiderstände sind, haben die Ströme die gleiche Phasenlage wie die durch das Netz vorgegebenen Spannungen.

Die Summe der Ströme ist an jedem Knotenpunkt gleich Null (Knotenregel).

Ein Leiterstrom lässt sich daher durch geometrische Addition der Ströme am Knoten ermitteln (Abb. 2).

Ein Leiterstrom ist immer größer als ein Strangstrom.

In Abb. 3 sind alle Ströme in richtiger Phasenlage dargestellt.

Hier ergibt sich für den Strom I_1 aus der Geometrie des Zeigerdiagramms:

$$\frac{I_1}{2} = I_{Str} \cdot \cos 30^\circ = I_{Str} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\rightarrow I_1 = \sqrt{3} \cdot I_{Str} \text{ oder } I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

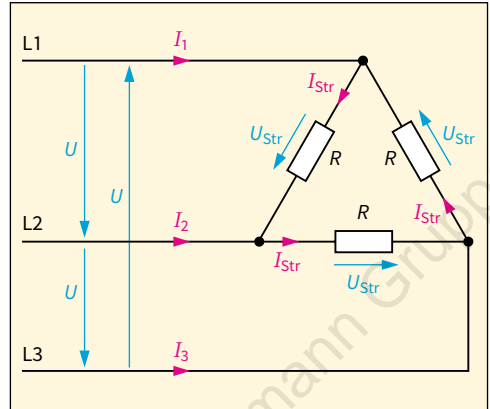


Abb. 1: Spannungen und Ströme in der Dreieckschaltung

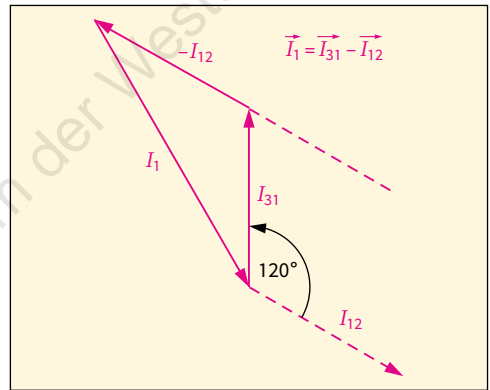


Abb. 2: Beispiel zur Ermittlung des Stromes I_1

Dreieckschaltung (symmetrische Last)

$U_{Str} = U$

$I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}}$

$I_{Str} = \frac{U_{Str}}{R}$

U : Leiterspannung in Volt
 U_{Str} : Strangspannung in Volt
 I : Leiterstrom in A
 I_{Str} : Strangstrom in A
 R : Strangwiderstand in Ω

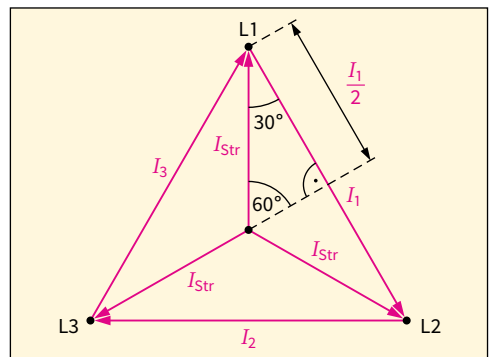


Abb. 3: Zeigerdiagramm der Ströme in der Dreieckschaltung

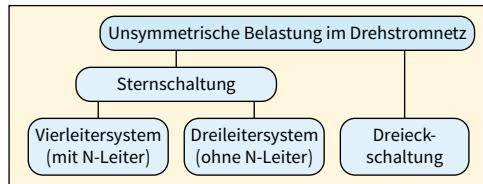


Abb. 4: Drehstrommotor

i Ein Drehstrommotor ist eine symmetrische Last, da er drei gleiche Spulen besitzt. Er wird meist in Dreieckschaltung betrieben. Er braucht auch in der Sternschaltung keinen Neutralleiter.

2.2.3 Unsymmetrische Belastung im Drehstromsystem

Unsymmetrische Belastung entsteht, wenn an den drei Leitern unterschiedliche Wirkwiderstände oder auch Verbraucher mit unterschiedlichem Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) angeschlossen werden (z. B. Spulen oder Kondensatoren).



Sternschaltung im Vierleitersystem

Abb. 1 zeigt ein Vierleitersystem mit drei unterschiedlichen Verbrauchern. Die Stromstärken lassen sich mit den gegebenen Widerstandswerten und der Strangspannung (230 V) berechnen. Da die Phasenverschiebung von 120° vom Netz vorgegeben ist, lässt sich der Neutralleiterstrom I_N mithilfe des Zeigerdiagramms bestimmen (Abb. 2). Der **Neutralleiterstrom ist ungleich Null**. Er ist umso größer, je unterschiedlicher die Widerstandswerte sind.

Unsymmetrisch belastetes Vierleitersystem:
 Neutralleiterstrom $I_N \neq 0$
 $U_{Str} = 230 \text{ V}$

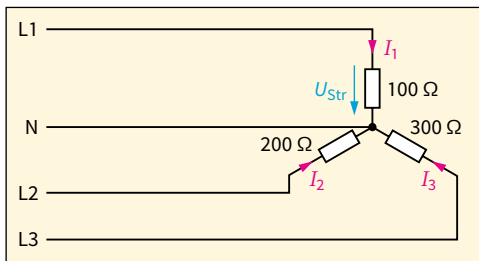


Abb. 1: Unsymmetrisch belastetes Vierleitersystem

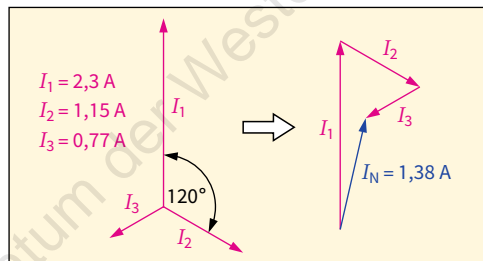


Abb. 2: Bestimmung des Neutralleiterstromes

In elektrischen Anlagen sollten die Wechselstromverbraucher möglichst gleichmäßig auf die drei Phasen (L1, L2, L3) verteilt werden, damit der Neutralleiterstrom möglichst klein bleibt. Trotzdem ist z. B. in Hausinstallationen die unsymmetrische Belastung die Regel, da nie alle Verbraucher gleichzeitig eingeschaltet sind.

Sternschaltung im Dreileitersystem

Im Dreileitersystem (Abb. 3) sind die Leiterspannungen U in Größe und Phasenlage vom Netz vorgegeben (400 V , 120°). Die unsymmetrische Belastung führt zu einer **Veränderung der Größe und Phasenlage der Strangspannungen**. Es können Unter- oder Überspannungen auftreten. Im Zeigerdiagramm treffen sich die Strangspannungen nicht mehr im Mittelpunkt. Dies bezeichnet man als **Sternpunktverschiebung** (Abb. 4).

Unsymmetrisch belastetes Dreileitersystem:
 Verbraucherspannung ändert sich:
 $U_{Str} \neq 230 \text{ V}$
 Phasenverschiebung:
 $\varphi \neq 120^\circ$
 Verkettungsfaktor $\sqrt{3}$ gilt nicht mehr.

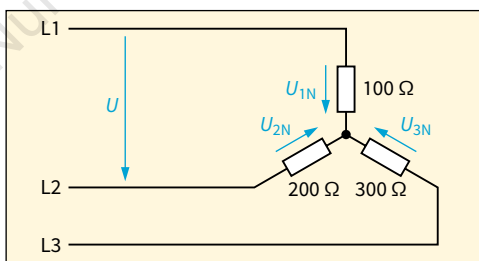


Abb. 3: Unsymmetrisch belastetes Vierleitersystem

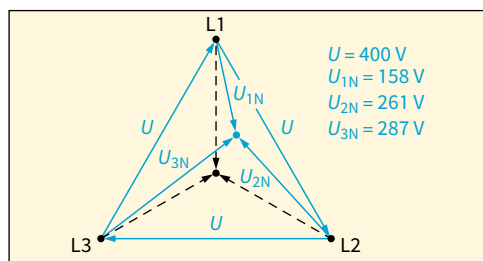
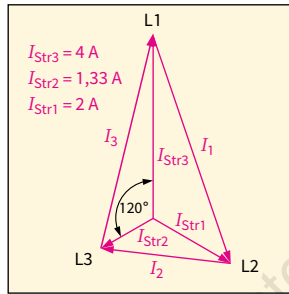
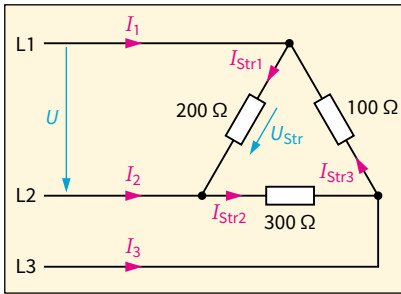


Abb. 4: Sternpunktverschiebung (Beispiel)

Unsymmetrisch belastete Dreieckschaltung

Abb. 1 zeigt ein Beispiel einer unsymmetrisch belasteten Dreieckschaltung. Die Strangspannungen U_{Str} sind in Größe und Phasenlage vom Netz vorgegeben ($400\text{ V}/120^\circ$).

Die Strangströme sind unterschiedlich groß und in ihrer Phasenlage gleich den Strangspannungen. Die geometrische Addition der Strangströme ergibt jedoch eine **abweichende Phasenlagen für die Leiterströme** (Abb. 3).



Unsymmetrisch belastete Dreieckschaltung:
Phasenlage der Leiterströme ändert sich: $\varphi \neq 120^\circ$

Abb. 1: Unsymmetrisch belastete Dreieckschaltung

Abb. 2: Zeigerdiagramm der Ströme

2.2.4 Leiterbruch im Drehstromsystem

Fallen ein Außenleiter oder ein Lastwiderstand aus, entsteht ein Wechselstromsystem. Es kann dann die Strangspannung oder die Leiterspannung anliegen. Die Gesamtleistung P sinkt. Beispiele möglicher Fehler:

Auswirkungen von Leiterbruch im Drehstromsystem		
Sternschaltung mit Neutralleiter: Ausfall eines Außenleiters		
		$P_{\text{Neu}} = \frac{2}{3} \cdot P$
Sternschaltung ohne Neutralleiter: Ausfall eines Außenleiters		
		$P_{\text{Neu}} = \frac{1}{2} \cdot P$
Dreieckschaltung: Ausfall eines Außenleiters		
		$P_{\text{Neu}} = \frac{1}{2} \cdot P$
Dreieckschaltung: Ausfall eines Verbrauchers		
		$P_{\text{Neu}} = \frac{2}{3} \cdot P$
Sternschaltung: Neutralleiterbruch		
	<ul style="list-style-type: none"> • symmetrische Last: keine Auswirkung • unsymmetrische Last: Sternpunktverschiebung. Gefahr durch Überspannungen! 	

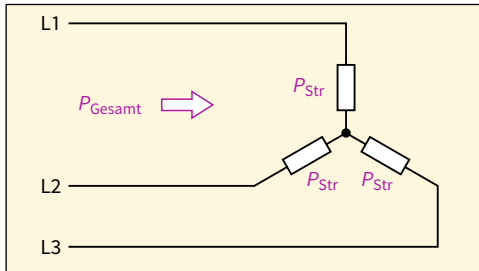
Gefahr bei Neutralleiterbruch in der Zuleitung einer elektrischen Anlage:
Geräte können durch Überspannungen beschädigt werden!

2.3 Drehstromleistung

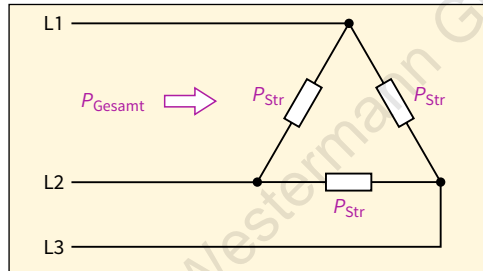
Die Gesamtleistung ergibt sich unabhängig von der Schaltungsart immer aus der Summe der drei Strangleistungen: $P_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot P_{\text{Str}}$

Da die Strangwerte U_{Str} und I_{Str} meist schwer zu messen sind, ist es üblich für Leistungsberechnungen die Leiterwerte U und I zu verwenden. Zum Vergleich von Stern- und Dreieckschaltung betrachten wir im Folgenden reine Wirkwiderstände:

Sternschaltung (Y)



Dreieckschaltung (Δ)



$$P_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot P_{\text{Str}} = 3 \cdot U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}}$$

mit $U_{\text{Str}} = U$ und $I_{\text{Str}} = \frac{I}{\sqrt{3}}$ folgt:

$$P_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} \leftrightarrow P_{\text{Gesamt}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$P_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot P_{\text{Str}} = 3 \cdot U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}}$$

mit $U_{\text{Str}} = \frac{U}{\sqrt{3}}$ und $I_{\text{Str}} = I$ folgt:

$$P_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I \leftrightarrow P_{\text{Gesamt}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Zur Berechnung der Gesamtleistung kann also bei beiden Schaltungen die gleiche Formel verwendet werden. Allgemeingültig wird die Formel, wenn sie durch den Leistungsfaktor des Verbrauchers ergänzt wird:

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

Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Leistung in beiden Schaltungen gleich groß ist. Bei gleichen Widerständen ergibt sich:

Sternschaltung:

$$P_{\text{Str}} = U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}} = \frac{U_{\text{Str}}^2}{R}$$

$$\rightarrow P_{\text{Str}} = \frac{U^2}{3 \cdot R} \text{ (mit } U_{\text{Str}} = \frac{U}{\sqrt{3}} \text{)}$$

$$\rightarrow P_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot P_{\text{Str}} = \frac{U^2}{R}$$

Dreieckschaltung:

$$P_{\text{Str}} = U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}} = \frac{U_{\text{Str}}^2}{R}$$

$$\rightarrow P_{\text{Str}} = \frac{U^2}{R} \text{ (mit } U_{\text{Str}} = U \text{)}$$

$$\rightarrow P_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot P_{\text{Str}} = 3 \cdot \frac{U^2}{R}$$

Die Leistung ist also in der Dreieckschaltung dreimal so groß wie in der Sternschaltung.

Das gleiche gilt auch für die Stromstärke: $I_{\Delta} = 3 \cdot I_Y$

Drehstromleistung bei symmetrischer Last

$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$	$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$
$P_{\Delta} = 3 \cdot P_Y$	$I_{\Delta} = 3 \cdot I_Y$	

S: Scheinleistung in VA φ : Phasenverschiebungswinkel
 P: Wirkleistung in W P_{Δ} : Wirkleistung in Dreieckschaltung
 Q: Blindleistung in var P_Y : Wirkleistung in Sternschaltung
 U: Leiterspannung in V I_{Δ} : Stromstärke in Dreieckschaltung
 I: Leiterstrom in A I_Y : Stromstärke in Sternschaltung

Stern-Dreieck:
 In der Dreieckschaltung sind Leistung und Stromstärke dreimal so groß wie in der Sternschaltung.

3 Planen von Energieversorgungen

3.1 Spannungsebenen

Elektrische Anlagen und Betriebsmittel werden an einer Netzspannung von 230 V oder 400 V betrieben (Niederspannung). Zur Übertragung von Energie über weite Strecken werden jedoch höhere Spannungen benutzt. Dies hat den Vorteil, dass bei gleicher Leistung die Stromstärke kleiner ist und weniger Leitungsverluste auftreten. Abb. 1 zeigt die Spannungsebenen mit Beispielen für Erzeuger- und Verbraucheranlagen.

Spannungen unter 1000 V werden als **Niederspannung** bezeichnet.

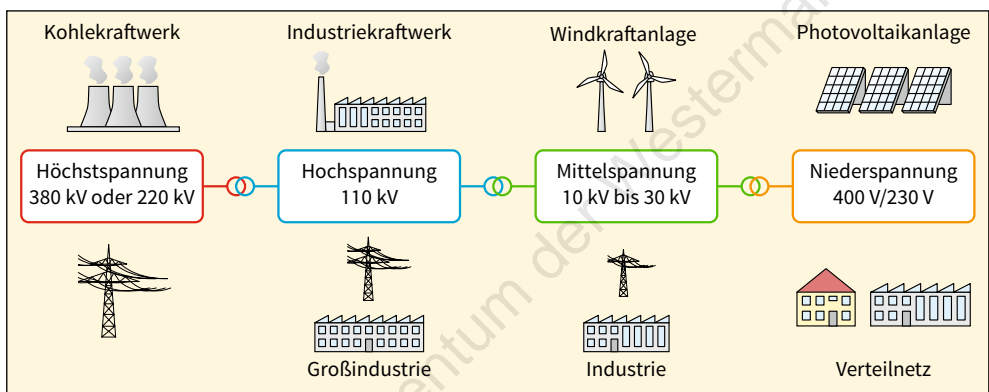
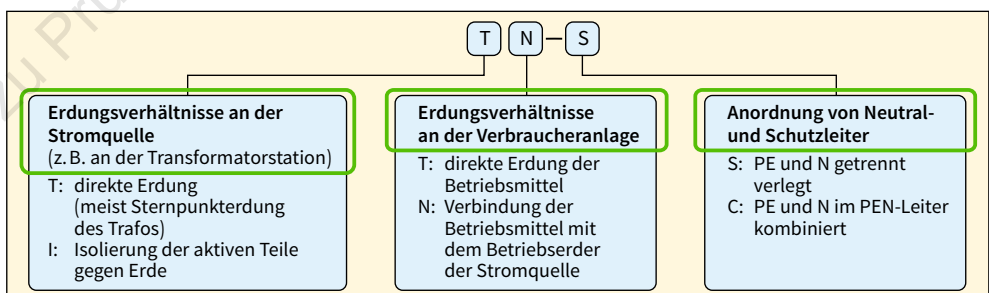


Abb. 1: Spannungsebenen mit Erzeugern und Verbrauchern (Beispiel)

3.2 Netzsysteme (Verteilungssysteme)

Die Energieversorgung von elektrischen Anlagen erfolgt grundsätzlich mit Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom). Daher werden immer die drei Außenleiter L1, L2, L3 verwendet. Die Art der Erdung und der Anschluss von Neutralleiter N und Schutzleiter PE sind je nach Netzsystem unterschiedlich. Dementsprechend wird auch der Schutz durch automatische Abschaltung im Fehlerfall je nach Netzsystem unterschiedlich realisiert.

Die Kennzeichnung der Netzsysteme ist international festgelegt und erfolgt mit drei bis vier Buchstaben:

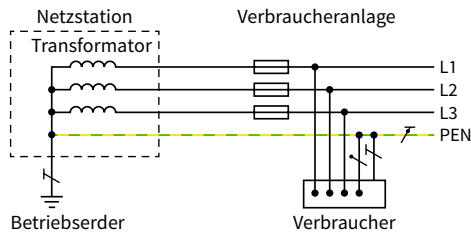


Bedeutung der Buchstaben (aus dem Französischen):

T: Erde (terre) – N: neutral (neutre) – S: getrennt (séparé) – C: kombiniert (combiné) – I: isoliert (isolé)

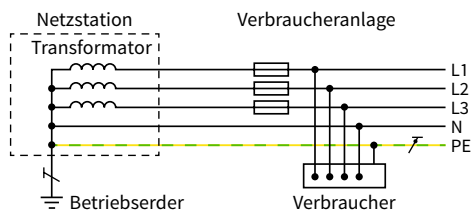
Übersicht über die Netzsysteme (Darstellung mit dreiphasigem Verbraucher)

TN-C-System



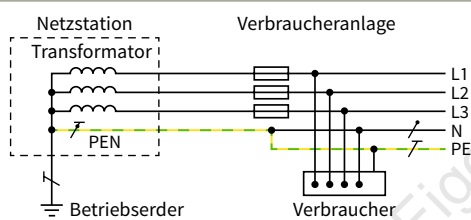
- Schutzleiter und Neutraleiter sind gemeinsam als PEN-Leiter geführt. → Dies hat einen geringeren Materialaufwand zur Folge.
- Gefahr bei PEN-Bruch: Gehäuse von Verbrauchern kann Spannung führen.
- RCD ist nicht einsetzbar.
- Schlechte EMV-Eigenschaften*
- Wird im Wohnungsbau nicht mehr verwendet.
- In Altbauten noch vorhanden (klassische Nullung).

TN-S-System



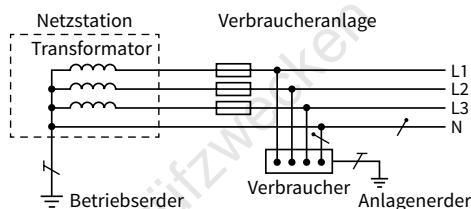
- Schutzleiter und Neutraleiter sind getrennt geführt → hoher Materialaufwand.
- Überschutzsicherungen (z. B. LS-Schalter) und RCD sind einsetzbar.
- Gute EMV-Eigenschaften.

TN-C-S-System



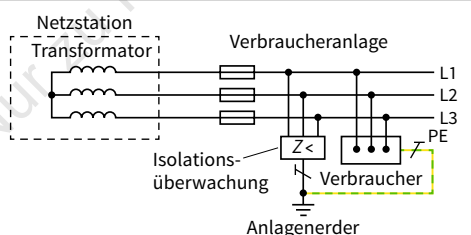
- Kombination aus TNC und TNS.
- Der PEN-Leiter wird meist im Hausanschlusskasten in N und PE aufgeteilt.
- Überschutzsicherungen (z. B. LS-Schalter) und RCD sind einsetzbar.
- Häufigstes System bei Neuanlagen.
- Mäßige EMV-Eigenschaften.

TT-System



- Keine PE-Verbindung zwischen Netz und Verbraucheranlage.
- Die Verbraucher müssen extra geerdet werden.
- Für den Schutz durch automatische Abschaltung ist meist ein RCD zusätzlich zur Überschutzsicherungs-einrichtung erforderlich.
- Gute EMV-Eigenschaften.

IT-System



- Die Stromquelle ist nicht (bzw. nur über einen hochohmigen Widerstand) geerdet.
- Eine Isolationsüberwachungseinrichtung meldet das Auftreten eines Fehlers, es erfolgt jedoch keine Abschaltung, diese erfolgt erst beim zweiten Fehler.
- Überschutzsicherungen (z. B. LS-Schalter) und RCD sind einsetzbar.
- Gute EMV-Eigenschaften.

*EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit

Maß für die gegenseitige Beeinflussung von elektrischen Geräten, z. B. durch elektromagnetische Felder.

3.3 Schutz durch automatische Abschaltung im Fehlerfall

Die automatische Abschaltung der Stromversorgung soll verhindern, dass am Körper eines Betriebsmittels eine gefährliche Berührungsspannung anliegt, wenn in der Anlage ein Isolationsfehler (Körperschluss) auftritt. Eine schnelle Abschaltung ist nur gewährleistet, wenn der **Fehlerstrom** I_F größer oder gleich dem **Abschaltstrom** I_a der Schutzeinrichtung ist.

Ein großer Fehlerstrom fließt jedoch nur, wenn der Widerstand auf dem gesamten Stromweg (der Fehlerschleife) klein ist. Dieser Gesamtwiderstand wird als **Schleifenimpedanz** Z_S bezeichnet (auch: Fehlerschleifenimpedanz). Die sogenannte **Abschaltbedingung** stellt sicher, dass die Schleifenimpedanz klein genug ist und somit die Abschaltung schnell erfolgt.

Der Stromweg ist abhängig von der Art der Erdung im Netzsystem. Die maximal zulässigen Abschaltzeiten hängen nach DIN-VDE 0100-410 vom Netzsystem und der Art des Stromkreises ab.

3.3.1 Schutz im TN-System

Im TN-System sind alle Betriebsmittel über den PE oder den PEN mit dem geerdeten Punkt des Versorgungsnetzes verbunden. In Abb. 1 ist ein Körperschluss im TN-C-S-System dargestellt. Der Fehlerstromkreis schließt sich über Außenleiter, PE und PEN bis zum Netztransformator. Die Abschaltbedingung gilt für alle TN-Systeme (auch TNC und TNS).

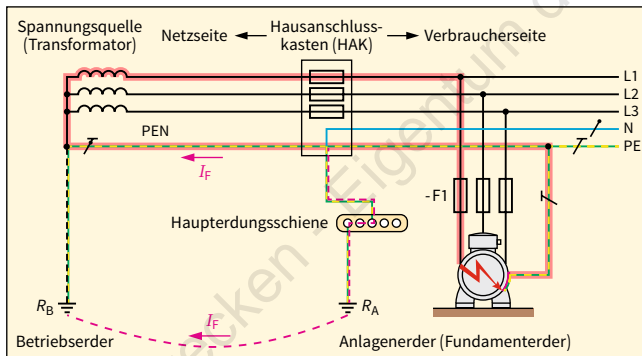


Abb. 1: Fehlerstromschleife im TN-C-S-System

Um die Abschaltbedingung zu überprüfen, muss der Abschaltstrom der Schutzeinrichtung bekannt sein. Dieser ist bei **LS-Schaltern** durch die Auslösecharakteristik gegeben.

Abschaltbedingung im TN-System

$$Z_S \leq \frac{U_0}{I_a}$$

Z_S : Schleifenimpedanz in Ω

U_0 : Spannung gegen Erde in V

I_a : Abschaltstrom der Schutzeinrichtung in A
(z. B. für LS-Schalter Typ B:
 $I_a = 5 \cdot I_n$)

Maximal zulässige Abschaltzeiten im TN-System bei $U_0 \leq 230$ V

DIN VDE 0100-410: 2018-10

Endstromkreise bis 63 A und fest angeschlossene Verbraucher bis 32 A	0,4 s
Verteilstromkreise und sonstige Stromkreise	5 s

i Beispiele für Abschaltströme und zulässige Schleifenimpedanzen von LS-Schaltern (sofortiges Abschalten beim x-fachen Nennstrom):

$$B \ 16 \text{ A} \rightarrow \text{sofortiges Abschalten bei } I_a = 5 \cdot I_n = 5 \cdot 16 \text{ A} = 80 \text{ A} \rightarrow Z_S \leq \frac{U_0}{I_a} = \frac{230 \text{ V}}{80 \text{ A}} = 2,88 \ \Omega$$

$$C \ 20 \text{ A} \rightarrow \text{sofortiges Abschalten bei } I_a = 10 \cdot I_n = 10 \cdot 20 \text{ A} = 200 \text{ A} \rightarrow Z_S \leq \frac{U_0}{I_a} = \frac{230 \text{ V}}{200 \text{ A}} = 1,15 \ \Omega$$

Bei **Schmelzsicherungen** muss der Abschaltstrom passend zur zulässigen Abschaltzeit aus der Kennlinie abgelesen werden. Der Abschaltstrom einer Schmelzsicherung Typ gG liegt bei einer Abschaltzeit von 0,4 s beim Sieben- bis Zehnfachen des Nennstroms.

3.3.2 Schutz im TT-System

Im TT-System gibt es **keine PE-Verbindung** zwischen Netztransformator und Verbraucheranlage. Die Verbraucher müssen einzeln geerdet werden oder gemeinsam über den **Anlagenerder** geerdet werden.

Im Falle eines Körperschlusses fließt daher der Fehlerstrom I_F über die Erde zum Betriebserder des Netztransformators (Abb. 1).

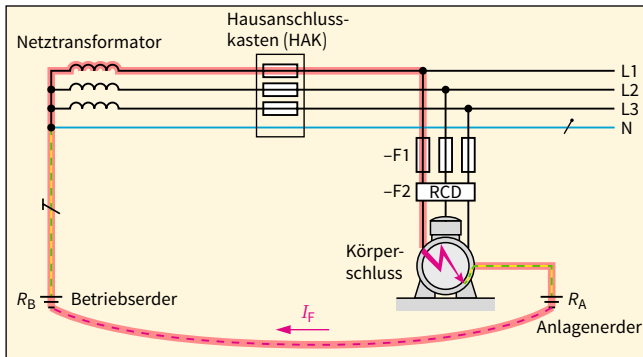


Abb. 1: Fehlerstromschleife im TT-System

Maximal zulässige Abschaltzeiten im TN-System bei $U_0 \leq 230 \text{ V}$

DIN VDE 0100-410: 2018-10

Endstromkreise bis 63 A und fest angeschlossene Verbraucher bis 32 A	0,2 s
Verteilstromkreise und sonstige Stromkreise	1 s

Der Gesamtwiderstand auf dieser Fehlerschleife (Schleifenimpedanz) ist stark vom Erdungswiderstand abhängig.

Je nach Bodenbeschaffenheit ist es oft schwierig, einen kleinen Erdungswiderstand zu erreichen. Die Schleifenimpedanz ist daher meist zu groß, um die Abschaltbedingung $Z_s \leq \frac{U_0}{I_a}$ für Überstromschutzeinrichtungen (LS-Schalter oder Schmelzsicherungen) zu erfüllen.

Daher werden beim TT-System in der Regel RCDs (Fehlerstromschutzeinrichtungen) zum Fehlerschutz eingesetzt. Statt der Schleifenimpedanz ist dann der **Erdungswiderstand R_a** zu prüfen:

Beispiele für den erforderlichen Erdungswiderstand je nach RCD-Typ:

$$\text{RCD } 300 \text{ mA} \rightarrow R_a \leq \frac{50 \text{ V}}{I_{\Delta N}} = \frac{50 \text{ V}}{0,3 \text{ A}} = 166 \Omega$$

$$\text{RCD } 30 \text{ mA} \rightarrow R_a \leq \frac{50 \text{ V}}{I_{\Delta N}} = \frac{50 \text{ V}}{0,03 \text{ A}} = 1666 \Omega$$

Erdungswiderstand im TT-System

$$R_a \leq \frac{50 \text{ V}}{I_{\Delta N}}$$

R_a : Erdungswiderstand in Ω

50 V: zulässige Berührungsspannung (bei AC)

$I_{\Delta N}$: Bemessungsdifferenzstrom des RCD in A

Da hier das Ziel nicht der Personenschutz ist, dürfen auch RCDs mit einem Auslösestrom größer als 30 mA eingesetzt werden. Die Überstromschutzeinrichtungen werden auch weiterhin für den Schutz vor **Überlast und Kurzschluss** benötigt.

Anwendung

Das TT-System wird wegen des einfachen Aufbaus z. B. auf Baustellen oder in landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt.

3.3.3 Schutz im IT-System

Im IT-System ist der **Sternpunkt des Netztransformators isoliert** (d. h. nicht geerdet oder nur über eine hochohmige Impedanz geerdet). Beim Auftreten eines Fehlers kommt kein geschlossener Stromkreis zustande, da es keine Verbindung zwischen PE oder Erde und dem Netztransformator gibt (Abb. 1).

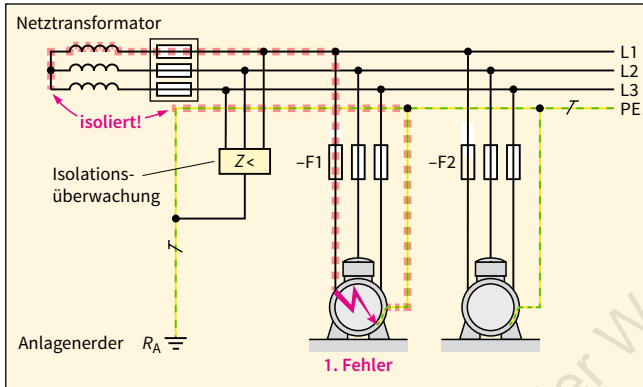


Abb. 1: Kein geschlossener Stromkreis beim ersten Fehler.

IT-System:

Keine Abschaltung beim ersten Fehler.

Es gelten die Abschaltzeiten des TN-Systems.



Abb. 2: Isolationsüberwachung

Die Überstromschutzeinrichtungen lösen daher auch nicht aus. Eine **Isolationsüberwachungseinrichtung** (Abb. 2) meldet jedoch den Fehler.

Wenn jedoch ein zweiter Fehler auf einem anderen Außenleiter auftritt, bildet sich ein geschlossener Stromkreis über beide Fehlerstellen (Abb. 3). Der Fehlerstrom I_F führt dann zum Abschalten von mindestens einer der vorhandenen Überstromschutzeinrichtungen.

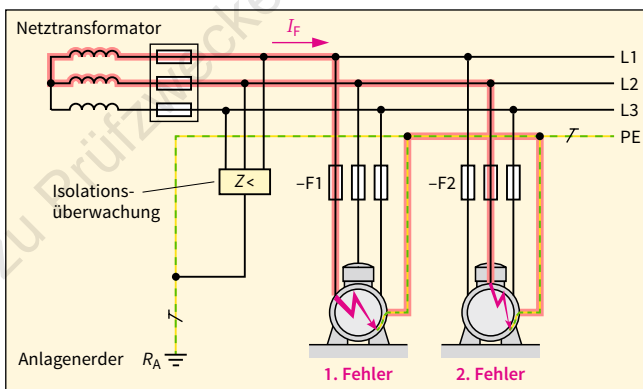


Abb. 3: Geschlossener Stromkreis bei zwei gleichzeitigen Fehlern.

Abschaltbedingung im IT-System

Bei gemeinsamem PE für alle Verbraucher.

Anlagen ohne Neutralleiter:

$$Z_S \leq \frac{U}{2 \cdot I_a}$$

Anlagen mit Neutralleiter:

$$Z_S \leq \frac{U_0}{2 \cdot I_a}$$

Z_S : Schleifenimpedanz in Ω

U : Außenleiterspannung in V

U_0 : Spannung gegen N in V

I_a : Abschaltstrom der Schutzeinrichtung in A

Anwendung

Das IT-System wird beispielsweise in Operationssälen in Krankenhäusern verwendet, damit lebenswichtige Systeme beim ersten elektrischen Fehler nicht abschalten. Eine Operation kann dann beispielsweise noch beendet werden, bevor die Anlage zur Fehlerbehebung abgeschaltet wird.

3.4 Planen von Niederspannungs-Energieverteilungen

In Abb. 1 ist der grundsätzliche Aufbau einer Energieverteilung für ein Wohngebäude beispielhaft dargestellt.

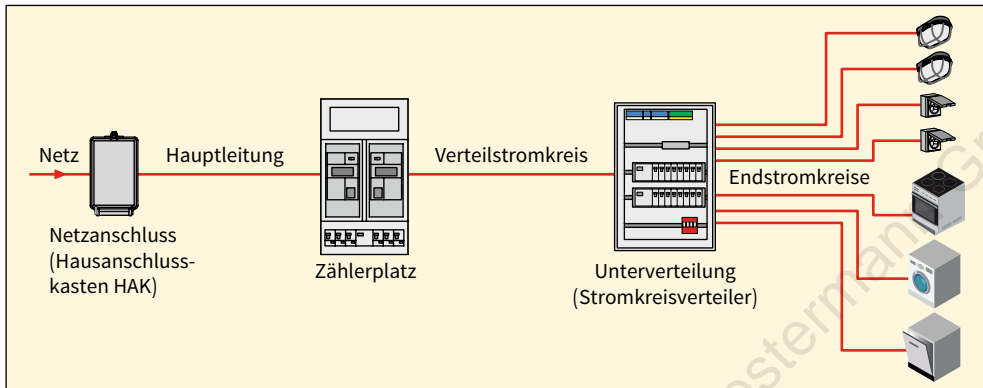


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Energieverteilung (Beispiel)

Die wesentlichen Bestandteile sind

- **Hausanschlusskabel:** wird als Zuleitung von außen meist als Erdkabel verlegt.
- **Netzanschluss:** Übergabestelle des Netzbetreibers (Hausanschlusskasten HAK).
- **Hauptleitung:** die Leitung zwischen Netzanschluss und Zähler.
- **Zählerplatz:** enthält einen oder mehrere Energiezähler.
- **Stromkreisverteiler:** verteilt die Energie auf die Endstromkreise; bei größeren Anlagen sind auch eine **Hauptverteilung (HV)** und mehrere **Unterverteilungen (UV)** üblich.
- **Verteilstromkreise:** die Leitungen über die die Stromkreisverteiler gespeist werden.

Alle Betriebsmittel bis einschließlich Zählerplatz bezeichnet man auch als **Hauptstromversorgungssystem**.

Da dies nicht gemessene Energie führt, wird es vom Netzbetreiber durch Plomben verschlossen.

Im Wohnungsbau sind Zählerplatz und Unterverteilung auch oft in einem gemeinsamen Zählerschrank in getrennten Feldern untergebracht. Ein zu Abb. 1 passender Übersichtsschaltplan ist in Abb. 2 dargestellt.

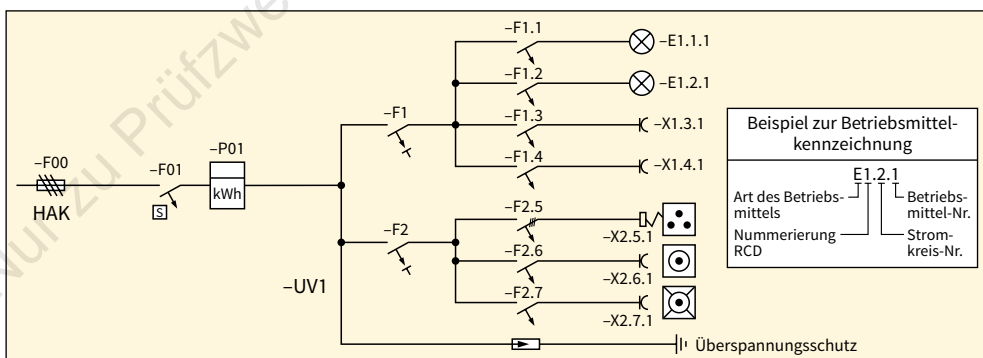


Abb. 2: Übersichtsschaltplan der Energieverteilung aus Abb. 1

Die Bedingungen für den Anschluss einer Kundenanlage an das öffentliche Netz sind in den **Technischen Anschlussbedingungen (TAB)** des Verteilungsnetzbetreibers (VNB) festgelegt. Die technische Ausführung ist in den VDE-Anwendungsregeln (VDE-AR-N 4100) beschrieben.

3.4.1 Hausanschluss

Das Hausanschlusskabel endet am Hausanschlusskasten (HAK). Dieser kann nach DIN 18015 an drei Orten installiert werden:

- im Hausanschlussraum,
- in der Hausanschlussnische (für nicht unterkellerte Einfamilienhäuser),
- an der Hausanschlusswand (im Gebäude, für Häuser mit maximal 5 Wohneinheiten).

Hausanschlussraum

- Vorgeschrieben für Gebäude mit mehr als 5 Wohneinheiten.
- Mindestabmessungen:
Länge: 2 m, Höhe: 2 m, Breite: 1,8 m (1,5 m bei Belegung von nur einer Wand).

- ① Hauseinführungsleitung
- ② Hausanschlusskasten (HAK)
- ③ Hauptleitung
- ④ Telekommunikationseinrichtung
- ⑤ Erdniveau
- ⑥ Haupterdungsschiene
- ⑦ Anschlussfahne des Fundamenterders
- ⑧ Anschluss des Schutzpotenzialausgleichs an Gas- und Wasserleitung

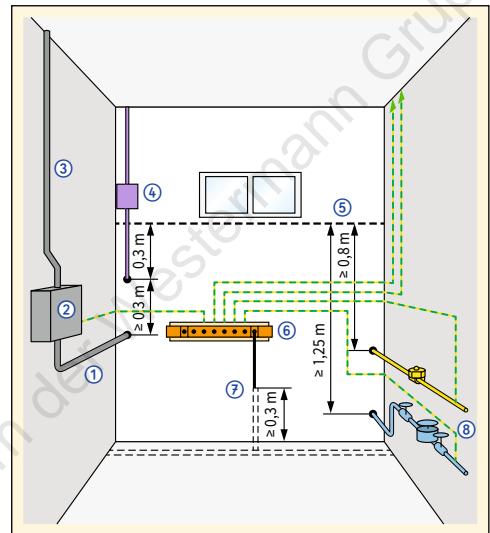


Abb. 1: Hausanschlussraum

Hausanschlussnische

- Für nicht unterkellerte Einfamilienhäuser.
- Maximal 3 m von Außenwand entfernt.
- Durch Tür verschließbar.
- Mindestabmessungen:
Höhe: 2 m, Breite: 0,875 m; Tiefe: 0,25 m

- ① Zählerschrank
- ② Hausanschlusskasten (HAK)
- ③ Raum für Telekommunikationseinrichtungen
- ④ Haupterdungsschiene
- ⑤ Gaszähler
- ⑥ Wasserzähler

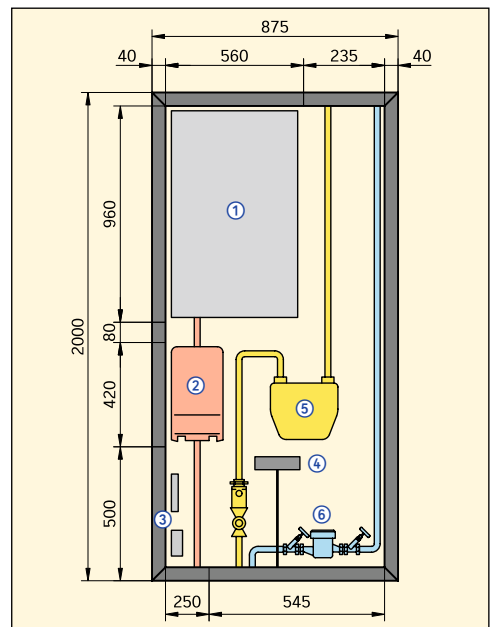


Abb. 2: Hausanschlussnische

3.4.2 Hausanschlusskasten (HAK)

Der HAK bildet die **Übergabestelle vom öffentlichen Netz** zur Kundenanlage.

Der HAK enthält die Hausanschluss Sicherungen (meist NH-Sicherungen). Die Größe der Sicherungen wird vom Netzbetreiber je nach Anlagengröße festgelegt. Für Gebäude ist eine Mindestgröße von 63 A üblich.

Der HAK darf nicht in feuer- oder explosionsgefährdeten Räumen oder in Räumen mit andauernder Raumtemperatur über 30° montiert werden. Im TN-System wird der PEN-Leiter meist schon im HAK aufgeteilt (Abb. 2).



Abb. 1: HAK mit NH-Sicherungen

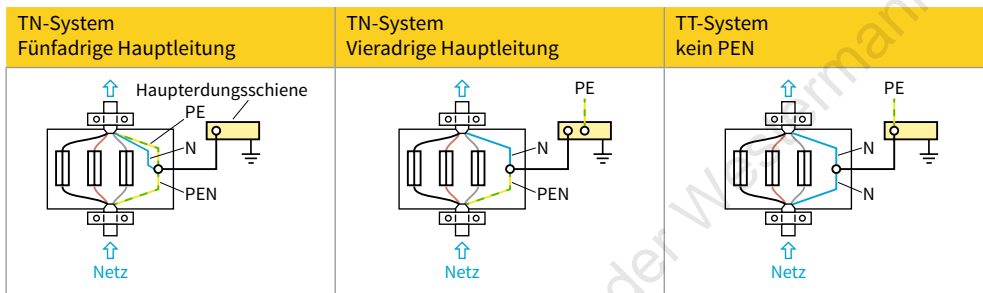


Abb. 2: PE-Anschlüsse im HAK (Beispiele)

3.4.3 Hauptleitung

Hauptleitungen führen die nicht gemessene Energie des Netzbetreibers zwischen HAK und Zähler.

Anforderungen:

- Drehstromleitung mit einer Mindestbelastbarkeit von 63 A
- Mindestquerschnitt 10 mm²
- Oberhalb der Kellerdecke ist geschützte Verlegung erforderlich (Rohre, Schächte, Kanäle oder unter Putz)
- Maximal zulässiger Spannungsfall von HAK zum Zähler: $\Delta u = 0,5\%$ (§13 NAV = Niederspannungsanschlussverordnung)

Für Mehrfamilienhäuser ist die Absicherung der Hauptleitung in der DIN 18015 in Abhängigkeit von der Anzahl der Wohnungen vorgegeben (Abb. 3).

Ablesebeispiel:

Für ein Haus mit 5 Wohnungen mit elektrischen Durchlauferhitzern soll die Zuleitung dimensioniert werden.

Mit welcher Leistungsaufnahme ist zu rechnen und welche Absicherung muss die Hauptleitung mindestens haben?

Antwort: mit $P = 80$ kW und $I_n = 125$ A

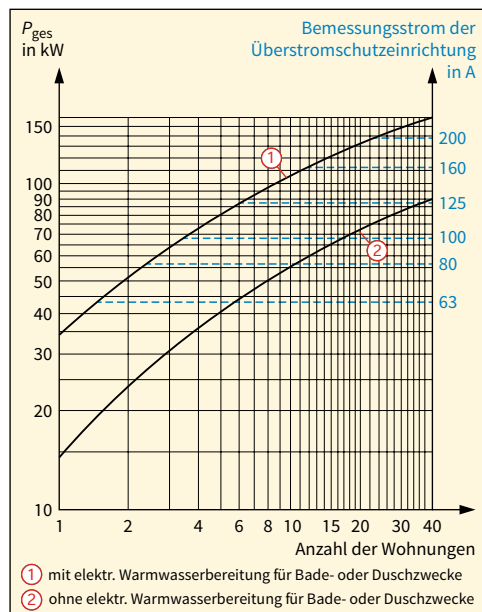


Abb. 3: Bemessungsgrundlage für Hauptleitungen nach

DIN 18015

3.4.4 Zählerplätze

Elektrizitätszähler (Stromzähler) werden üblicherweise in Zählerschränken installiert. Diese dürfen nicht in feuer- oder explosionsgefährdeten Bereichen, feuchten Räumen oder Räumen mit dauerhaften Temperaturen über 30 °C installiert werden.

Der Abstand zur Decke muss mindestens 20 cm und der Abstand zum Fußboden muss mindestens 40 cm betragen.

Der Zählerschrank enthält neben einem oder mehreren Elektrizitätszählern auch eine **Trennvorrichtung** zur Freischaltung der Kundenanlage (z. B. bei Zählerwechsel).

Als Trennvorrichtung wird bis 100 A Maximalstrom ein **SH-Schalter** (Selektiver Hauptleitungsschutzschalter, auch SLS) verwendet (Abb. 1).

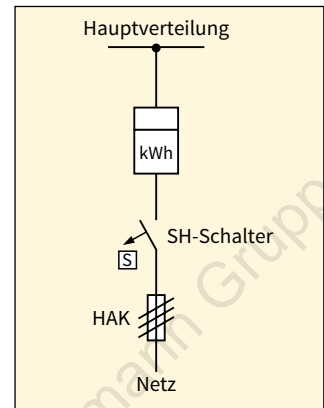


Abb. 1: Zählerplatz mit SH-Schalter

Zulässige Betriebsmittel im Zählerschrank

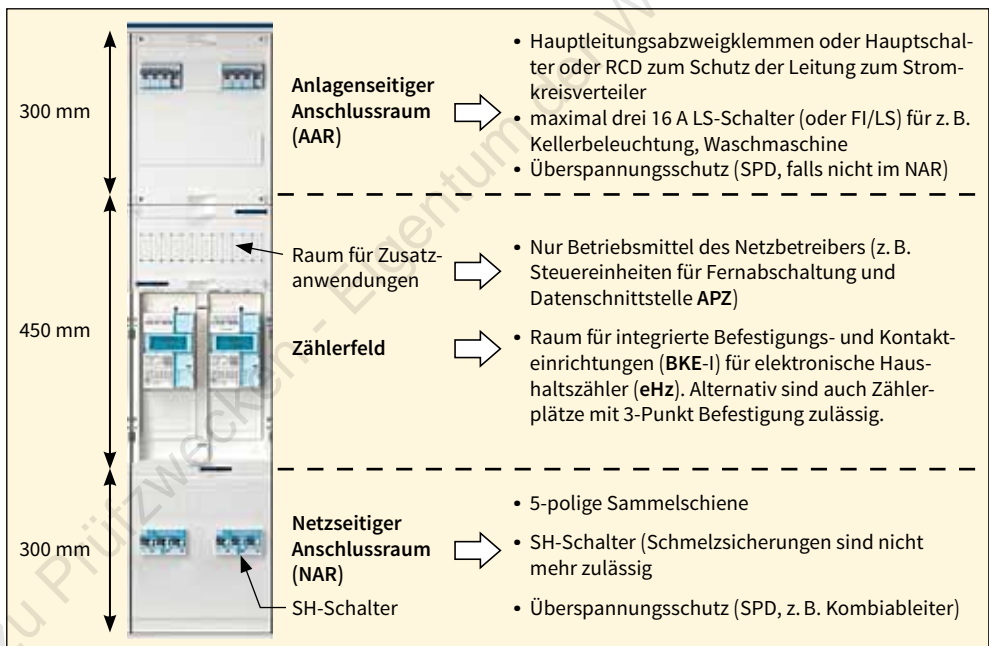


Abb. 2: Zulässige Betriebsmittel im Zählerschrank nach VDE AR-N 4100

Belastung von Zählerplätzen

Bei **haushaltsüblichem Aussetzbetrieb** werden Zählerplätze mit 63 A abgesichert und mit flexiblen Leitungen H07V-K 10 mm² verdrahtet. Bei der Dimensionierung wird davon ausgegangen, dass große Belastungen nur kurzzeitig auftreten.

Beim Betrieb von Anlagen mit großen **Dauerbetriebsströmen** für Bezug oder Einspeisung (z. B. Erzeugungsanlagen oder Ladestationen für Elektrofahrzeuge) sind bei 10 mm² Querschnitt nur SH-Schalter mit 35 A oder unter besonderen Bedingungen bei 16 mm² SH-Schalter mit 50 A zulässig (Details siehe VDE-AR-N 4100).

Elektrizitätszähler

Die früher üblichen mechanischen Induktionszähler (Ferraris-Zähler) werden zunehmend durch digitale Elektrizitätszähler (elektronische Haushaltszähler, eHz) ersetzt. Diese haben den Vorteil, dass sie außer der Wirkenergie (elektrische Wirkarbeit W) auch weitere Kenngrößen messen können (z. B. Stromstärke I , Wirkleistung P , Blindleistung Q und Leistungsfaktor $\cos \varphi$). Außerdem können sie als Zweirichtungszähler sowohl den Verbrauch als auch die Einspeisung elektrischer Energie (z. B. durch eine PV-Anlage) messen.

Über digitale Schnittstellen lassen sich digitale Energiezähler problemlos an ein Energiemanagementsystem anbinden. Üblich ist hier eine Anbindung über KNX, Modbus oder den M-Bus (Meter-Bus), der als europäischer Standard für Verbrauchszähler genormt ist (EN13757).



Abb. 1: Elektronischer Haushaltszähler, eHz



Ein „Stromzähler“ misst die elektrische Arbeit W (elektrische Energie) indem er gleichzeitig die Stromstärke I und die Spannung U erfasst.

$$W = U \cdot I \cdot t$$

3.4.5 Stromkreisverteiler

In Stromkreisverteilern (Unterverteilungen) wird die elektrische Energie auf die Endstromkreise (Verbraucherstromkreise) aufgeteilt.

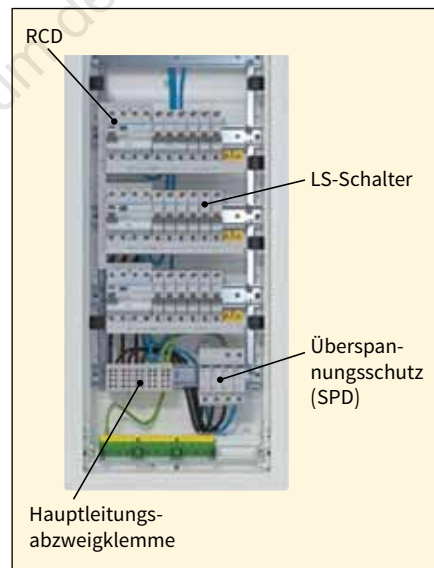
Stromkreisverteiler sind mit Hutschienen bestückt, auf die verschiedene Betriebsmittel aufgesteckt werden können. Dazu zählen die Leitungsschutzeinrichtungen (LS-Schalter), Fehlerstromschutzeinrichtungen (RCD), Überspannungsschutz (SPD) und sonstige Schalt- und Steuergeräte.

Anforderungen an Stromkreisverteiler (DIN 18015):

- in der Nähe des Belastungsschwerpunktes zu installieren (meist im Flur, im Einfamilienhaus auch als Verteilerfeld im Zählerschrank)
- in Mehrraumwohnungen mindestens 4-reihig
- in Einraumwohnungen mindestens 3-reihig
- Bei Wohnungen über mehrere Etagen sind mindestens 2 Verteiler vorzusehen (zweiter Verteiler mindestens 2-reihig).

Anzahl Stromkreise in Stromkreisverteilern (DIN 18015):

- Die Mindestanzahl der Stromkreise richtet sich nach der Wohnungsgröße (siehe Tabelle).
- eigene Stromkreise für Großverbraucher über 2 kW
- für Durchlauferhitzer Drehstromleitung mit $I_n \geq 35$ A
- für Elektroherd Drehstromleitung mit $I_n \geq 20$ A
- getrennte Stromkreise für Waschmaschine und Trockner
- zusätzliche Stromkreise für Keller und Dachboden



Wohnfläche in m ²	Mindestanzahl der Stromkreise für Steckdosen und Beleuchtung
bis 50	3
über 50 bis 75	4
über 75 bis 100	5
über 100 bis 125	6
über 125	7

In Einfamilienhäusern ist der Stromkreisverteiler meist zusammen mit dem Kommunikationsverteiler (Telefon und Datenzentrale) im Zählerschrank untergebracht (Abb. 1).

Einsatz von Fehlerstromschutzschaltern (RCD):

- Mindestens 2 RCDs pro Wohnung ($I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$)
- Maximal 6 einphasige Endstromkreise je 4-poligem RCD
- Maximal 2 einphasige Endstromkreise je 2-poligem RCD
- Alternativ ist Einsatz von FI/LS-Schaltern (RCBO) für höchstmögliche Verfügbarkeit möglich



Abb. 1: Zählerschrank mit Verteilerfeld und Kommunikationsverteiler (Einfamilienhaus)

Überspannungsschutz

Nach DIN VDE 0100-443 ist ein Überspannungsschutz vorzusehen, wenn in Gebäuden Betriebsmittel der Überspannungskategorie I oder II verwendet werden. Das ist in Wohngebäuden immer der Fall.

i Betriebsmittel werden nach ihrer Empfindlichkeit (Festigkeit gegen Spannungstoß) in **Überspannungskategorien** eingeteilt. Beispiele:
 Kategorie I: sehr empfindlich, maximale Stoßspannung 800 V, z. B. elektronische Geräte wie Computer
 Kategorie II: normal empfindlich, maximale Stoßspannung 1500 V, z. B. Haushaltsgeräte wie Kühlschrank
 Kategorie III: gering empfindlich, maximale Stoßspannung 4000 V, z. B. Schalter und Steckdosen

Als Überspannungsschutz werden verschiedene Arten von Überspannungsschutzgeräten (SPD = surge protection device) verwendet. Sie sollen so nah wie möglich am Einspeisepunkt installiert werden sollen.

Installationsbeispiel:

- SPD Typ 1 oder Typ 2 in der Hauptverteilung oder im Zählerschrank.
- SPD Typ 2 oder Typ 3 im Stromkreisverteiler.

Alternativ sind auch Kombibleiter Typ 1-3 im Zählerschrank üblich.

Die erforderliche Anzahl und die Einbauorte der SPDs richtet sich auch nach den Leitungslängen in der Energieverteilung.



Abb. 2: Montage eines Kombibleiters im Zählerschrank

3.4.6 Planung von Verteilstromkreisen

Bestimmung der Strombelastbarkeit einer Zuleitung

Die Zuleitung zu einem Stromkreisverteiler muss die Stromaufnahme aller vom Verteiler abgehenden Endstromkreise bewältigen können. Da nie alle Verbraucher gleichzeitig eingeschaltet sind, wird die Zuleitung aber nicht auf den Maximalstrom dimensioniert. Der Maximalstrom wird mit einem **Gleichzeitigkeitsfaktor** multipliziert, der von der Art der Anlage abhängt. Insbesondere bei Steckdosenstromkreisen in Wohngebäuden wird von einer erheblich geringeren Belastung ausgegangen (z. B. $g = 0,1$).

Gleichzeitigkeitsfaktoren g (Beispiele)	
Anlagenart	g
Beleuchtung	0,9 ... 1
Büros	0,4 ... 0,8
Druckerei	0,2 ... 0,4
Holzverarbeitung	0,2 ... 0,6
Schulen	0,6 ... 0,9
Metallverarbeitung	0,2 ... 0,4

Beispiel: Abb. 1 zeigt den Übersichtsschaltplan eines Stromkreisverteilers einer Wohnung, für den die Zuleitung und die Größe der RCDs bestimmt werden soll.

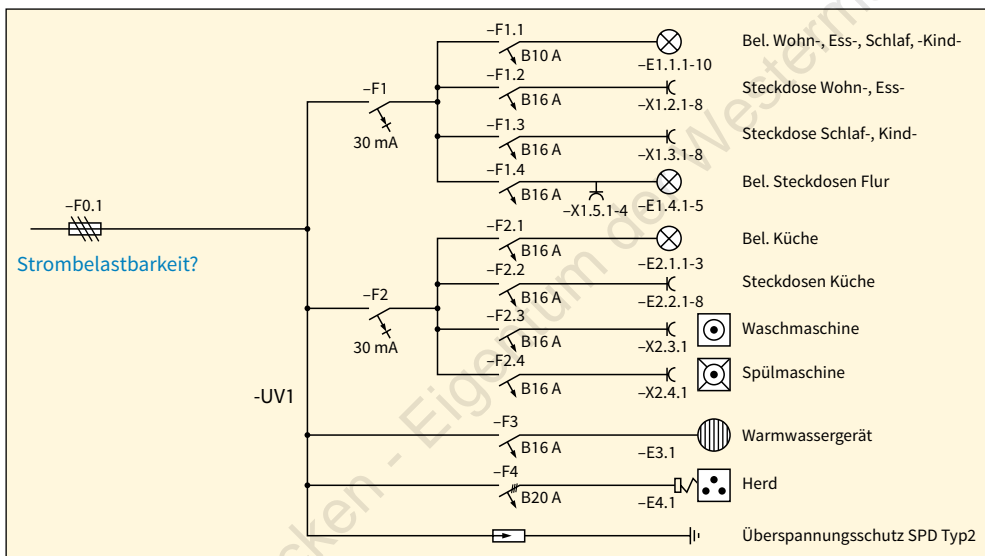


Abb. 1: Übersichtsschaltplan eines Stromkreisverteilers

Die Endstromkreise werden möglichst gleichmäßig auf die drei Außenleiter verteilt (annähernd **symmetrische Verteilung**).

Zur Dimensionierung der Zuleitung wird die **Summe der Ströme** für jeden Außenleiter ermittelt (s. Tabelle). Die Zuleitung müsste demnach auf einen Maximalstrom von 68 A dimensioniert werden. Dies ist aber überdimensioniert, da niemals alle Geräte gleichzeitig eingeschaltet sind. Nimmt man z. B. einen Gleichzeitigkeitsfaktor $g = 0,5$ für alle Betriebsmittel an, reduziert sich die Gesamtstromstärke auf $I = 0,5 \cdot 68 \text{ A} = 34 \text{ A}$. Die Zuleitung könnte also mit 63 A oder sogar mit 40 A abgesichert werden. Aufgrund der Phasenaufteilung sind RCDs mit jeweils 40 A Bemessungsstrom ausreichend.

Stromkreis	Betriebsmittel	Stromstärke I in A		
		L1	L2	L3
1.1	Beleuchtung	10		
1.2	Steckdosen		16	
1.3	Steckdosen			16
1.4	Bel./Steckd.	16		
2.1	Beleuchtung		10	
2.2	Steckdosen			16
2.3	Waschmasch.	16		
2.4	Spülmasch.		16	
3	Heißwasser			16
4	Herd	20	20	20
Summe		62	62	68

Eine **Vorsicherung zum RCD** ist nicht erforderlich, wenn nicht mehr als 6 einphasige Endstromkreise angeschlossen sind (maximal 2 Endstromkreise pro Phase ergibt einen Maximalstrom von $I = 2 \cdot 16 \text{ A} = 32 \text{ A}$). Die Leitungsdimensionierung der Zuleitung wird nun wie üblich nach Verlegeart und Umgebungsfaktoren durchgeführt (siehe LF2).

Gesamter Spannungsfall

Es ist zu beachten, dass der Spannungsfall über alle Teilstücke der Verteilung prozentual addiert werden muss (Abb.1).

Für Wohngebäude gilt hier nach DIN 18015-1:

$$\Delta u = \Delta u_{\text{Endstromkreis}} + \Delta u_{\text{Verteilstromkreis}} \leq 3\%$$

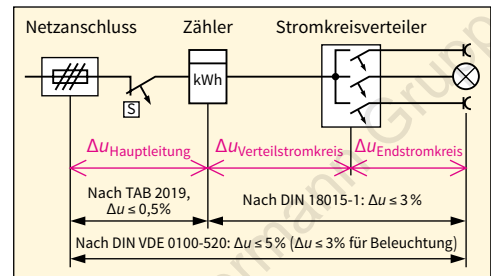


Abb. 1: Zulässiger Spannungsfall in Prozent

Selektivität

Um zu gewährleisten, dass immer nur die dem Fehler am nächsten gelegene Überstromschutzeinrichtung auslöst, muss die Kurzschlussselektivität der Schutzeinrichtungen zueinander sichergestellt sein (Abb. 2).

Schmelzsicherungen sind zueinander selektiv, wenn die Bemessungsstromstärken sich mindestens um den **Faktor 1,6** unterscheiden. Für Kombinationen von LS-Schaltern und Schmelzsicherungen nutzt man die **Selektivitätstabellen** der Hersteller. Hier kann man ablesen, bis zu welchem maximalen Kurzschlussstrom der nachgeschaltete LS-Schalter zur Schmelzsicherung selektiv ist.

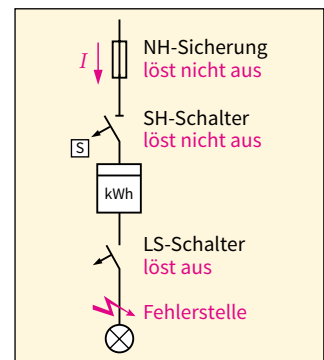


Abb. 2: Selektivität

Beispiel einer Selektivitätstabelle:

Grenzwerte der Selektivität in kA						
LS-Schalter	Vorgeschaltete Sicherung der Betriebsklasse gG					
	20	25	35	50	63	80
B10A	0,4	0,6	1,0	2,2	3,0	5,0
B13A	-	0,5	1,0	2,2	3,0	5,0
B16A	-	-	1,0	2,0	2,4	4,0
B20A	-	-	-	2,0	2,4	4,0
B25A	-	-	-	-	2,0	3,5



Ablesebeispiel:

Ist eine 50 A Schmelzsicherung zu einem B20A LS-Schalter selektiv?

Antwort: Ja, bis zu einem Kurzschlussstrom von 2 kA.

Ist eine 25 A Schmelzsicherung zu einem B16A LS-Schalter selektiv?

Antwort: Nein.

3.4.7 Kurzschlusschutz

Der Kurzschlusschutz eines Stromkreises ist im Allgemeinen gegeben, wenn die Überstromschutzeinrichtung nach der Tabelle der Strombelastbarkeit (DIN VDE 0298-4, siehe Anhang) ausgewählt wurde und am Anfang der Leitung installiert wird.

Dazu muss jedoch das **Schaltvermögen der Schutzeinrichtung** mindestens so groß sein wie der maximal zu erwartende Kurzschlussstrom in der Anlage. Bei einem Standard LS-Schalter mit einem Schaltvermögen von $\leq 6 \text{ kA}$ ist dies in fast allen Fällen gegeben.

Berechnung des Kurzschlussstromes

Der Kurzschlussstrom einer Anlage kann durch Messen der Schleifenimpedanz Z_S bestimmt werden. Es gilt die Abschaltbedingung für den **einpoligen Kurzschluss** (Abb. 1 und Kap. 3.3.1):

$Z_S \leq \frac{U_0}{I_k} \rightarrow$ Daraus ergibt sich als Kurzschlussstrom im kalten Zustand:

$$I_k \leq \frac{U_0}{Z_S}$$

Der maximale Kurzschlussstrom in einer Anlage entsteht jedoch bei einem dreipoligen Kurzschluss (Abb. 2). Er ist dann näherungsweise doppelt so groß wie beim einpoligen Kurzschluss.

Bei sehr großen Kurzschlussströmen ist zu prüfen, ob die Leitungsisolierung der thermischen Belastung standhält.

Thermische Belastung der Leitung

Um sicherzustellen, dass die Abschaltung erfolgt, bevor die Leitung zu heiß wird und die Isolierung Schaden nimmt, kann die **höchstzulässige Abschaltzeit der Leitung** ermittelt werden. Hierzu müssen die Materialangaben der Leitung bekannt sein:

Materialkoeffizient k in $\frac{\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}$				
Leiterwerkstoff	Isolierwerkstoff			
	PVC thermoplastisch	PVC wärmefest thermoplastisch	EPR XLPE vernetzt	Gummi vernetzt
CU	115	100	143	141
Al	76	66	94	93

Diese Berechnung ist jedoch bei Verwendung von Schmelzsicherungen bis 63 A und Querschnitten von mindestens $1,5 \text{ mm}^2$ Cu normalerweise nicht erforderlich.

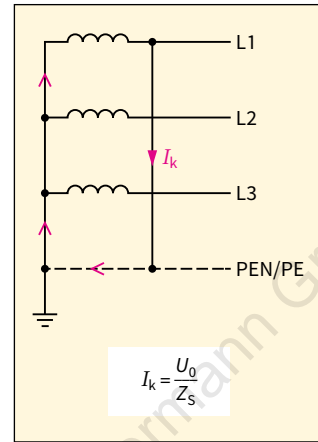


Abb. 1: Einpoliger Kurzschlussstrom

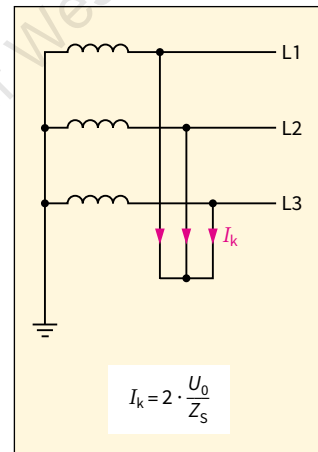


Abb. 2: Dreipoliger Kurzschlussstrom

Höchstzulässige Abschaltzeit t in s

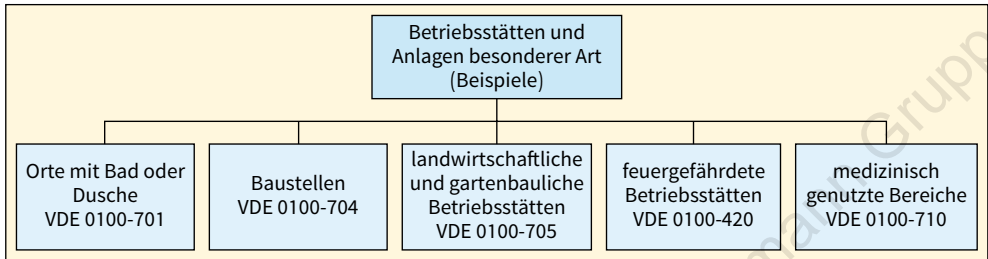
$$t \leq \left(k \cdot \frac{A}{I_k} \right)^2$$

A: Leiterquerschnitt
 k: Materialkoeffizient
 I_k : Zu erwartender Kurzschlussstrom

i Auf den Schutz bei Kurzschluss muss verzichtet werden, wenn durch Abschalten der Anlage eine größere Gefahr entsteht als durch den Kurzschluss!

4 Betriebsstätten und Anlagen besonderer Art

Besondere Anlagentypen haben erhöhte Anforderungen an die Sicherheit der Energieverteilung. Diese sind in den VDE-Normen gesondert beschrieben:



4.1 Baustellen

Baustellen müssen von einem besonderen Speisepunkt versorgt werden (Baustromverteiler). Die Versorgung über eine Hausinstallation ist nicht zulässig. Als Netzsysteme sind TN-, TT- und IT-Systeme zulässig.

Anforderungen an Baustromverteiler:

- Gehäuse Schutzart IP44
- Abschließbarer Hauptschalter
- Anschlussleitungen Gummischlauchleitung H07RN-F oder gleichwertig
- Fehlerstromschutzeinrichtungen für Stromkreise:
 - Wechselstromkreise bis 32 A: RCD Typ A (oder F), $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$.
 - Drehstromkreise bis 32 A: RCD Typ B, $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$
 - Drehstromkreise bis 63 A: RCD Typ B, $I_{\Delta n} \leq 500 \text{ mA}$
- Schutztrennung ist mit nur einem angeschlossenen Betriebsmittel zulässig

Der Baustromverteiler wird meist über einen Erdspieß geerdet. Im TT-System ist der Erdungswiderstand nach VDE 0100-600 zu prüfen (Kap. 4.6.1). Vor der Benutzung ist eine Inbetriebnahmeprüfung nach VDE 0100-600 durchzuführen.

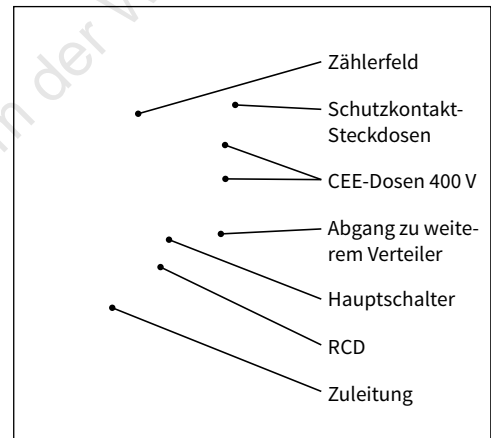


Abb. 1: Baustromverteiler (Anschlussverteilerschrank)

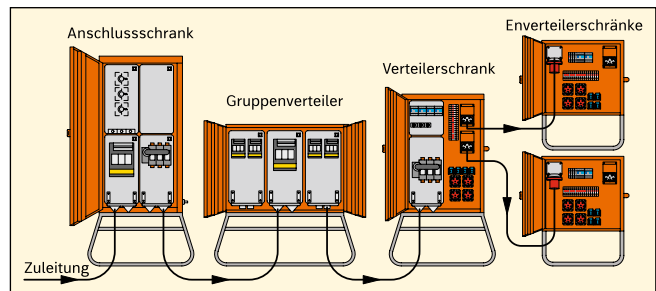


Abb. 2: Versorgung einer Großbaustelle (Beispiel)

i Die RCDs eines Baustromverteilers sind arbeitstäglich zu prüfen (Prüftaste). Die Prüfungen müssen dokumentiert werden.

4.2 Landwirtschaftliche und gartenbauliche Betriebsstätten

In landwirtschaftlichen Betriebsstätten bestehen besondere Risiken z. B. durch Feuchtigkeit, Staub und mechanische Beanspruchung der Betriebsmittel. Außerdem besteht oft eine erhöhte Brandgefahr durch die Lagerung von Heu oder Stroh. Dementsprechend sind in der DIN VDE 0100-705 besondere Anforderungen definiert:

Schutz gegen elektrischen Schlag und Brandschutz

- RCD mit $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$ in allen Steckdosenstromkreisen unabhängig vom Bemessungsstrom
- RCD mit $I_{\Delta n} \leq 300 \text{ mA}$ als Brandschutz in allen anderen Stromkreisen (Ausnahme: Verteilstromkreise außerhalb von feuergefährdeten Bereichen)
- Die zulässige Berührungsspannung beträgt wie üblich 50 V AC bzw. 120 V DC

Zusätzlicher Schutzpotentialausgleich

In Räumen mit Nutztieren sind alle berührbaren Metallteile mit einem Schutzpotentialausgleich zu verbinden. Dazu zählen z. B. Gitter, Futteranlagen und Melkanlagen (Abb. 1).

Betriebsmittel und Leitungen

- Mindestschutzart IP 44, bei brennbaren Stäuben oder Fasern IP 5X, für Leuchten oder bei Feuchtigkeit IP54
- Zusätzlicher mechanischer Schutz ist oft erforderlich
- Stromkreise im Außenbereich sollten als Kabel in der Erde verlegt werden: Mindesttiefe 0,6 m mit zusätzlichem mechanischem Schutz, 1 m Tiefe bei Ackerland

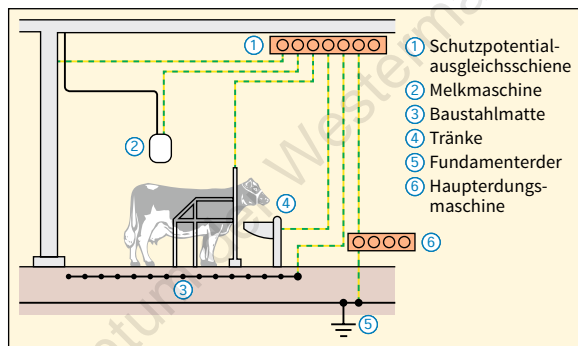


Abb. 1: Zusätzlicher Schutzpotentialausgleich

Schalt- und Trenneinrichtungen

Jedes Gebäude oder Gebäudeteil muss über eine einzige Trenneinrichtung abschaltbar sein. Nur gelegentlich genutzte Stromkreise müssen allpolig (mit Neutralleiter) abschaltbar sein (z. B. durch RCD).

4.3 Feuergefährdete Betriebsstätten

Ein Brandrisiko liegt vor, wenn brennbares Material hergestellt, verarbeitet oder gelagert wird. Hierzu zählt auch das Vorhandensein von brennbarem Staub. Um zu beurteilen, ob es sich um eine feuergefährdete Betriebsstätte handelt, ist folgendes zu prüfen (VdS 2033):

- Gibt es leicht entzündliche Stoffe in größeren Mengen (z. B. in mehreren Räumen)?
- Können diese Stoffe mit elektrischen Betriebsmitteln in Kontakt kommen?

Stoffe gelten als **leicht entzündlich**, wenn sie weiterbrennen, nachdem sie für 10 s Kontakt mit einer Zündholzflamme hatten.

Als besondere Maßnahme sind RCD mit $I_{\Delta n} \leq 300 \text{ mA}$ als Brandschutz in allen Stromkreisen zu verwenden (oder Isolationsüberwachung im IT-System). Der Einsatz von Brandschutzschaltern (AFDD) ist nicht grundsätzlich vorgeschrieben. Ihre Verwendung als anlagentechnische Maßnahme muss im Rahmen einer Risikobewertung geprüft werden.

4.4 Gesetzliche Vorschriften zur Sicherheit von Anlagen

Die Sicherheit von Anlagen und Arbeitsmitteln wird in verschiedenen Vorschriften beschrieben:

- Das **Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)** enthält die gesetzlichen Anforderungen zur Unfallverhütung am Arbeitsplatz.
- Die **Betriebsicherungsverordnung (BetrSichV)** regelt die Verantwortlichkeiten, deren Missachtung strafrechtliche Auswirkungen haben kann.
- Die Vorschriften der **Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)** regeln die Verantwortlichkeiten aus versicherungstechnischer Sicht.
- Die **Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)** konkretisieren die Anforderungen der BetrSichV bezüglich Bewertung von Gefährdungen und Anforderungen an Schutzmaßnahmen. Sie geben den aktuellen Stand der Technik und Arbeitsmedizin wieder.



Abb. 1: Prüfung einer elektrischen Anlage

- Grundsätzlich gilt: Die Gefahren, die vom Betrieb einer Anlage ausgehen, sind vom Betreiber durch eine **Gefährdungsbeurteilung** zu ermitteln. Der Betreiber muss nachweisen, dass er hinreichende **Schutzmaßnahmen** ergriffen hat, um die Gefahren zu reduzieren. Diese Maßnahmen können **technische Maßnahmen** (z. B. Schutzeinrichtungen), **organisatorische Maßnahmen** (z. B. Unterweisungen) oder **persönliche Schutzmaßnahmen** (z. B. Schutzausrüstung, wenn technische Maßnahmen nicht ausreichen) sein.

Die Wirksamkeit der technischen Schutzmaßnahmen ist durch eine Prüfung nachzuweisen.

Die **Rahmenbedingungen** der Prüfung von elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln sind in der **DGUV Vorschrift 3** festgelegt. Die genaue **technische Durchführung** der Prüfungen wird in den **VDE-Normen** beschrieben.

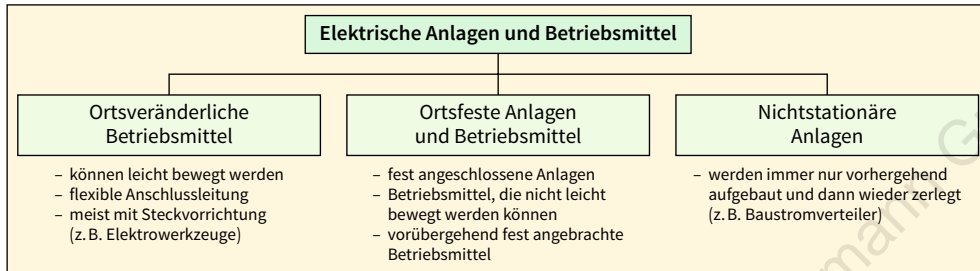


Elektrische Anlagen und Betriebsmittel **müssen** zu verschiedenen Zeitpunkten auf ihren ordnungsgemäßen Zustand **geprüft werden** (DGUV-Vorschrift 3):

- Vor Inbetriebnahme,
- nach Instandsetzung oder Änderung sowie
- in regelmäßigen Zeitabständen.

4.5 Bestimmungen der DGUV Vorschrift 3

Bei elektrischen Prüfungen wird grundsätzlich zwischen ortsfesten und ortsveränderlichen Anlagen und Betriebsmitteln unterschieden:



Prüffristen für Wiederholungsprüfungen

Die Fristen sind so zu bemessen, dass entstehende Mängel, mit denen zu rechnen ist, rechtzeitig erkannt werden können. Anlagen werden auf ordnungsgemäßen Zustand geprüft, Schutzmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit.

Die maximalen Prüffristen sind in den folgenden Tabellen angegeben:



Prüffristen für ortsfeste elektrische Anlagen und Betriebsmittel

Art	Prüffrist	Prüfung durch
Anlagen und ortsfeste Betriebsmittel	4 Jahre	Elektrofachkraft
Anlagen und ortsfeste Betriebsmittel in Betriebsstätten und Räumen besonderer Art (DIN VDE 0100-700)	1 Jahr	Elektrofachkraft
Schutzmaßnahmen mit Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen in nichtstationären Anlagen	1 Monat	Elektrofachkraft oder elektrotechnisch unterwiesene Person
Fehlerstrom-, Differenzstrom- und Fehlerspannungsschalter (z. B. RCD)	In stationären Anlagen	Benutzer (Betätigen der Prüftaste)
	In nicht stationären Anlagen	

Wiederholungsprüfungen können entfallen, wenn die Anlage ständig von Elektrofachkraft überwacht wird. Dies erfordert neben der Instandhaltung auch eine messtechnische Überwachung (z. B. Isolationswiderstand).

Prüffristen für ortsveränderliche elektrische Betriebsmittel

Art	Prüffrist	Prüfung durch
Ortsveränderliche Betriebsmittel, Verlängerungs- und Anschlussleitungen mit Stecker, Bewegliche Leitungen mit Stecker und Festanschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemein 6 Monate • auf Baustellen 3 Monate • Prüffrist kann verlängert werden, wenn bei Prüfungen die Fehlerquote < 2 % ist, jedoch maximal auf 2 Jahre für Büros und 1 Jahr für Baustellen, ... 	Elektrofachkraft oder elektrotechnisch unterwiesene Person

Prüffristen für Schutz- und Hilfsmittel

Art	Prüffrist	Prüfung durch
Isolierende Schutzbekleidung	vor jeder Benutzung	Benutzer (Sichtprüfung)
	12 Monate 6 Monate für isolierende Handschuhe	Elektrofachkraft (Einhaltung der Grenzwerte)
Isolierte Werkzeuge isolierende Schutzvorrichtungen Spannungsprüfer bis 1 kV	vor jeder Benutzung	Benutzer (Sichtprüfung und Funktion)

4.6 Prüfungen nach DIN VDE

Die Durchführung der geforderten Prüfungen wird in den VDE-Normen beschrieben. Die Prüfung von elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln hat vor allem den Zweck, die **Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen** nachzuweisen.

Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Prüfungsarten:

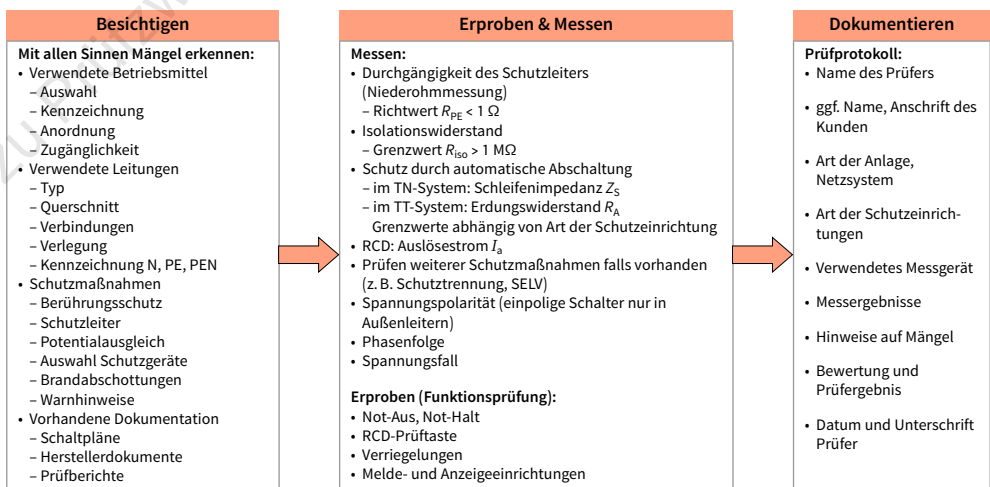
- **Prüfung vor Inbetriebnahme:** Sie muss vor dem ersten Einschalten der Anlage erfolgen.
- **Prüfung nach Instandsetzung oder Änderung:** Sie ist erforderlich, wenn z. B. ein Gerät repariert oder eine Anlage erweitert wurde.
- **Wiederholungsprüfung:** Sie ist mit den Fristen gemäß DGUV Vorschrift 3 regelmäßig durchzuführen.

Für die **Auswahl der richtigen Prüfvorschrift** ist es wichtig zu erkennen, um welche Art von Betriebsmitteln es sich handelt. Im Bereich der Energie- und Gebäudetechnik sind vor allem zwei Bereiche zu unterscheiden:



4.6.1 Prüfung ortsfester Anlagen (Anlagenprüfung DIN VDE 0100-600)

Prüfablauf für die Erstprüfung und die Prüfung nach Instandsetzung oder Änderung der Anlage:



Durchgängigkeit des Schutzleiters (Niederohmmessung)

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass alle Schutzleiter richtig angeschlossen sind (vorgeschriebene Messspannung 4–24 V, Messstrom ≥ 200 mA).

Ablauf der Messung (Abb. 1):

- Anlage **spannungsfrei** schalten.
- Die Länge der Messleitung muss mit berücksichtigt werden. (Widerstand der Messleitung am Messgerät kompensieren.)
- Bei allen Betriebsmitteln (z. B. Motoren, Steckdosen) den Widerstand zwischen den PE-Anschlüssen und der Haupterdungsschiene messen.
- Alle Schutzpotenzialausgleichsleiter (z. B. an Wasserrohren) ebenfalls vom PE-Anschluss zur Haupterdungsschiene messen.

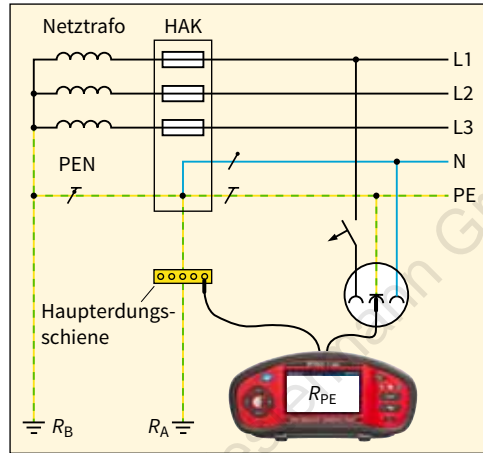


Abb. 1: Niederohmmessung an einer Steckdose (Beispiel)

Der Messwert muss mit dem zu erwartenden Wert nach Leiterlänge und Leiterquerschnitt übereinstimmen (Beispiele siehe Tabelle).

Beispiele: Leiterwiderstand einer Cu-Leitung bei 40 m Länge und 30 °C

Leiterquerschnitt	Leiterwiderstand
1,5 mm ²	0,5 Ω
2,5 mm ²	0,3 Ω
4,0 mm ²	0,02 Ω

Richtwerte für Schutzleiterwiderstand:

- Schutzleiter $R_{PE} < 1 \Omega$
- Schutzpotenzialausgleichsleiter $R_{PE} < 0,1 \Omega$

Isolationswiderstand (R_{iso})

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass die Isolation an keiner Stelle fehlerhaft ist.

Ablauf der Messung (Abb. 2):

- Anlage **spannungsfrei** schalten (z. B. Schmelzsicherungen in der Unterverteilung herausnehmen).
- N-PE-Brücken herausnehmen (falls vorhanden).
- Motor abklemmen (sonst wird dieser mit gemessen).
- Elektronische Betriebsmittel (z. B. SPS, AFDD) abklemmen, da sie durch die Messspannung beschädigt werden können.

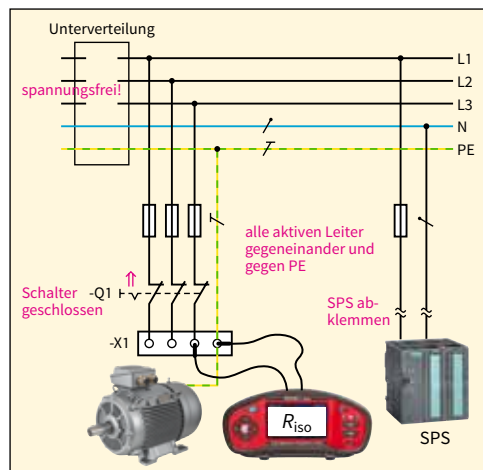


Abb. 2: Isolationsmessung an einem Motorstromkreis (Beispiel)

(Fortsetzung auf Folgeseite)

- Falls Überspannungsschutzrichtungen (SPD) vorhanden sind, diese abklemmen oder ggfs. die Messspannung auf 250 V reduzieren.
- Schalter und Schütze der Betriebsmittel schließen oder vor und hinter dem Schütz messen.
- Alle aktiven Leiter gegeneinander und gegen PE messen.
Typischer Ablauf:
 - Erst PE gegen N,
 - dann PE gegen L1, L2, L3,
 - dann L1, L2, L3 und N-Leiter untereinander.

Stromkreis	Messspannung	Isolationswiderstand
Kleinspannung (SELV, PELV)	250 V DC	$\geq 0,5 \text{ M}\Omega$
bis einschließlich 500 V	500 V DC	$\geq 1,0 \text{ M}\Omega$
über 500 V	1000 V DC	$\geq 1,0 \text{ M}\Omega$

Grenzwert des Isolationswiderstands: $R_{\text{iso}} = 1 \text{ M}\Omega$

Der Messwert sollte bei Neuanlagen deutlich über dem Grenzwert liegen. Üblich sind Messwerte von weit **über 100 M Ω** . Bei einem Messwert von beispielsweise nur 10 M Ω sollte die Ursache der Abweichung genau untersucht werden!

Schleifenimpedanz (Z)

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass der Schutz durch automatische Abschaltung gegeben ist. Dafür **muss die Schleifenimpedanz klein genug sein** (Abschaltbedingung, Kap. 3.2.1.).

Ablauf der Messung (Abb. 1):

- Verbraucher abklemmen.
- Anlage **einschalten** (Die Messung erfolgt unter Spannung!).
- Schalter schließen.
- Alle Außenleiter gegen PE messen.
- Bei Anlagen immer an der Stelle mit der größten Entfernung zur Verteilung messen (z. B. an der am weitesten entfernten Steckdose).
- Das Prüfgerät zeigt dann den Kurzschlussstrom oder die Schleifenimpedanz an.

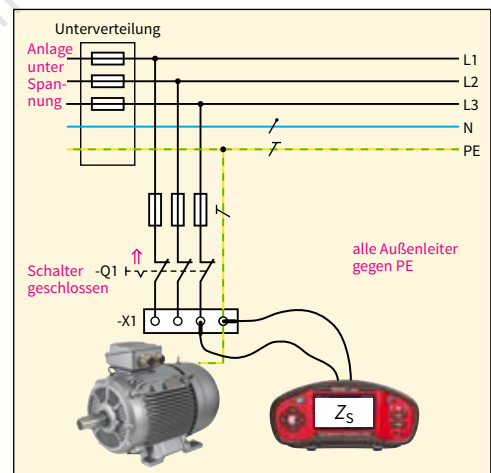


Abb. 1: Schleifenimpedanzmessung an einem Motorstromkreis

Der Grenzwert der Schleifenimpedanz hängt von der Art der Überstromschutzeinrichtung ab und kann mit der Formel der Abschaltbedingung berechnet werden.

Bei der Prüfung ist jedoch noch ein **Sicherheitsfaktor** $2/3$ einzufügen (DIN VDE 0100-600 Anhang D). Dieser berücksichtigt, dass die **Leitung sich im Kurzschlussfall stark erwärmt** und dadurch die Schleifenimpedanz größer wird als bei der Messung bei Raumtemperatur.

Grenzwert der Schleifenimpedanz

$$Z_S \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{U_0}{I_a}$$

Z_S : Schleifenimpedanz in Ω

U_0 : Spannung gegen Erde in V

I_a : Abschaltstrom der Schutzeinrichtung in A
(z. B. für LS-Schalter Typ B: $I_a = 5 \cdot I_n$)

Messprinzip der Schleifenimpedanzmessung

Abb. 1 zeigt den Ablauf im Inneren eines Prüfgerätes. Zur Ermittlung der Schleifenimpedanz wird der Spannungsfall unter Last ermittelt.

Dazu wird zuerst die Spannung U_0 im unbelasteten Zustand gemessen. Dann wird durch Schließen des Schalters Q_1 der Prüf Widerstand R_p in den Stromkreis geschaltet und die Spannung U unter Last und die Stromstärke I gemessen.

Die gemessene Schleifenimpedanz Z_{Smess} wird dann nach folgender Formel berechnet:

$$Z_{\text{Smess}} = \frac{U_0 - U}{I}$$

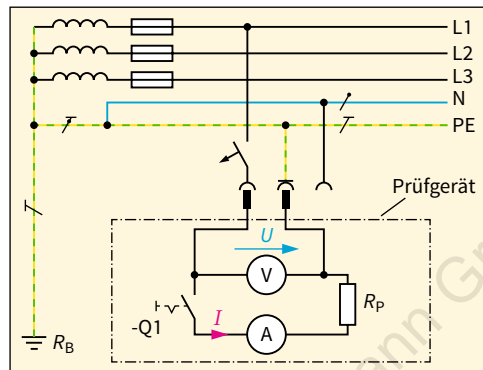


Abb. 1: Prinzip der Schleifenimpedanzmessung

Erdungswiderstand (nur im TT-System gefordert)

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass der Schutz durch automatische Abschaltung gegeben ist. Dafür **muss der Erdungswiderstand klein genug sein** (Abschaltung im TT-System, Kap. 3.2.1.2). Verschiedene Messverfahren sind möglich. Die Messwerte sind oft unterschiedlich, da sie stark von den Umgebungsbedingungen abhängen (z. B. Erdfeuchte oder Bebauung der Umgebung). Abb. 2 zeigt die Erdungsmessung am Beispiel des Dreipunkt-Messung (Strom-Spannungsmessverfahren).

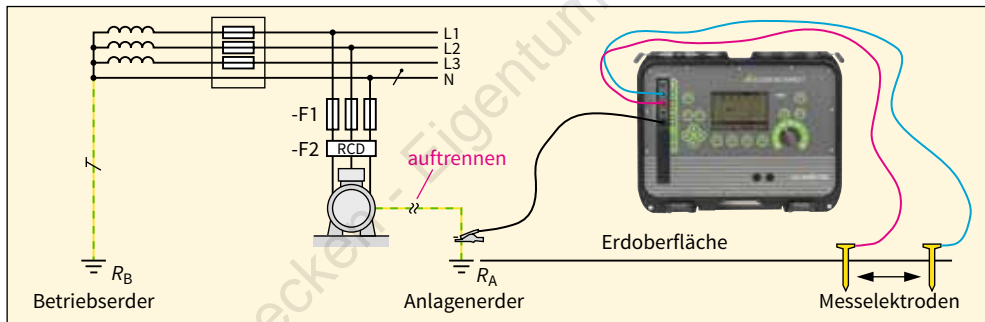


Abb. 2: Beispiel: Erdungsmessung im TT-System mit dem Dreipunktverfahren

Ablauf:

- Die Länge der Messleitung muss mit berücksichtigt werden (Widerstand der Messleitung zuerst am Messgerät kompensieren).
- Das Messgerät muss am aufgetrennten Anlagenerder angeschlossen werden, zwei Messelektroden müssen in den Erdboden eingeschlagen werden (bei trockenem Boden ggfs. Einschlagstelle mit Wasser befeuchten).
- Die drei Messpunkte müssen sich in einer Linie befinden.
- Es müssen mehrere Messungen mit in der Linie versetzten Messelektroden durchgeführt werden.

Beispiel:
Zulässiger Erdungswiderstand bei einem RCD mit $I_{\Delta N} = 300 \text{ mA}$:
 $R_a = 166 \Omega$

Zulässiger Erdungswiderstand im TT-System

$$R_a \leq \frac{50 \text{ V}}{I_{\Delta N}}$$

R_a : Erdungswiderstand in Ω

50 V: zulässige Berührungsspannung U_L (bei AC)

$I_{\Delta N}$: Bemessungsdifferenzstrom des RCD in A

4.6.2 Wiederholungsprüfung elektrischer Anlagen (wiederkehrende Prüfung DIN VDE 0105-100)

Die Wiederholungsprüfung entspricht in ihrem Ablauf und den geforderten Grenzwerten der Erstprüfung nach DIN VDE 0100-600.

Ein Unterschied besteht nur bei der **Messung des Isolationswiderstandes**:

- Um den Aufwand zu reduzieren und Beschädigungen an Betriebsmitteln durch die Prüfspannung zu vermeiden, dürfen alle aktiven Leiter (L1, L2, L3, N) miteinander verbunden werden, um sie gemeinsam gegen PE zu messen.
- Die Messwerte können mit oder ohne Verbraucher ermittelt werden.
- Die Grenzwerte sind in Ohm pro Volt angegeben und müssen auf die entsprechende Nennspannung umgerechnet werden. Dies ergibt kleinere Mindestwerte als bei der Erstprüfung (siehe Tabelle).

Grenzwerte für Isolationswiderstand R_{iso}			
Anlagenart	Grenzwert	Mindestwert bei $U_N = 230\text{ V}$	Mindestwert bei $U_N = 400\text{ V}$
trockener Raum, mit Verbraucher	300 Ω/V	69 k Ω	120 k Ω
trockener Raum, ohne Verbraucher	1000 Ω/V	230 k Ω	400 k Ω
Anlage im Freien, mit Verbraucher	150 Ω/V	34,5 k Ω	60 k Ω
Anlage im Freien, ohne Verbraucher	500 Ω/V	115 k Ω	200 k Ω
SELV/PELV	250 k Ω	–	–

Die Fristen der Wiederholungsprüfung sind in der DGUV geregelt (siehe Kap. 4.2).

4.6.3 Prüfung ortsveränderlicher Betriebsmittel (Geräteprüfung DIN VDE 0701 und DIN VDE 0702)

Durch die Geräteprüfung soll die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen bei Elektrogeräten sichergestellt werden. Hierbei sind zwei Bereiche zu unterscheiden:

- Prüfung nach Reparatur nach DIN VDE 0701 (DIN EN50678)
- Wiederholungsprüfung nach DIN VDE 0702 (DIN EN 50699)

Die Normen gelten für Elektrogeräte mit Stecker oder Festanschluss und Strömen bis 63 A.

Sie gelten z. B. **nicht** für:

- Geräte, die Teil einer Anlage sind,
- Geräte mit Sondernormen wie z. B. für medizinische oder explosionsgefährdete Bereiche,
- unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV),
- Stromrichter,
- Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

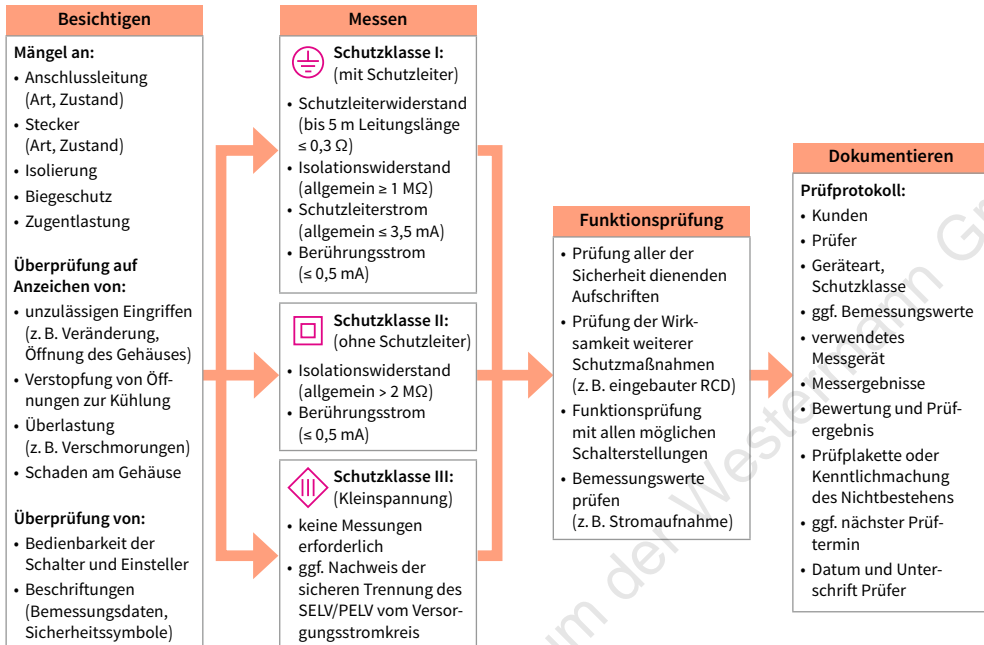


Abb. 1: Geräteprüfung an einem Elektrowerkzeug

Der Prüfablauf ist für beide Normen im Wesentlichen gleich. Wichtig ist, dass sich die durchzuführenden Messungen unterscheiden, je nachdem welche **Schutzklasse (SKI – SK III)** das Gerät hat.

Heutige Messgeräte führen die erforderlichen Messungen meist automatisch aus. Benutzerinnen und Benutzer müssen nur noch die richtige Schutzklasse auswählen. Viele Messgeräte haben auch eine extra Einstellung für die Messung von Verlängerungsleitungen (Kabeltrommeln).

Prüfblauf Geräteprüfung:



Messen des Schutzleiterwiderstands R_{PE} (nur bei SK I)

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass der Schutzleiter an allen leitfähigen Teilen richtig angeschlossen ist. Dazu müssen die berührbaren leitfähigen Teile (z. B. das Metallgehäuse des Gerätes) mit der Messsonde abgetastet werden (Abb. 1).

Ablauf:

- Gerätestecker in die Prüfbuchse des Messgerätes einstecken,
- Messsonde an Metallteilen des Prüflings platzieren, (an blanken, rostfreien Stellen),
- Leitung des Prüflings während der Messung bewegen.

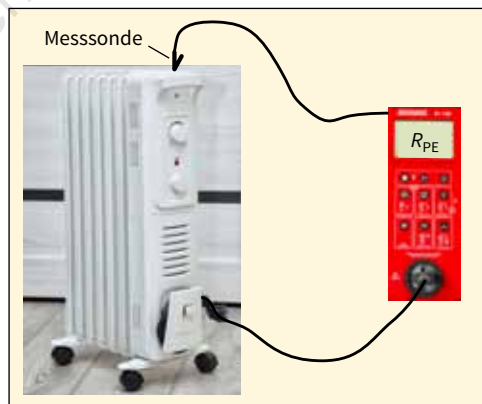


Abb. 1: Messung des Schutzleiterwiderstandes an einem elektrischen Heizgerät der SK I.

Grenzwert des Schutzleiterwiderstandes:
 $R_{PE} < 0,3 \Omega$ (bis 5 m Leitungslänge) + $0,1 \Omega$ je Meter Leitungslänge, maximal jedoch 1Ω .

Maximal zulässiger Schutzleiterwiderstand R_{PE}							
Leitungslänge in m	5	12,5	20	35	42,5	50	> 50
Grenzwert in Ω	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1

Messen des Isolationswiderstands R_{ISO}

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass die Isolation an keiner Stelle fehlerhaft ist (Messspannung 500 V DC).

- Die Messung darf nur durchgeführt werden, wenn die Schutzleitermessung erfolgreich war.
- Prüfling einschalten.
- Bei Heizgeräten der SK I über 3,5 kW Anschlussleistung darf der Grenzwert unterschritten werden, wenn die Messung des Schutzleiterstroms erfolgreich ist.
- Bei Geräten der Informationstechnik darf diese Messung entfallen.

Minimal erforderlicher Isolationswiderstand R_{ISO}	
Gerät	Grenzwert
Schutzklasse I	$\geq 1 \text{ M}\Omega$
Schutzklasse I mit Heizelement	$\geq 0,3 \text{ M}\Omega$
Schutzklasse II	$\geq 2 \text{ M}\Omega$
Schutzklasse III	$\geq 0,25 \text{ M}\Omega$

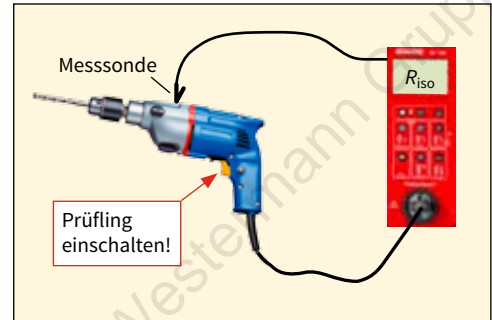


Abb. 1: Messung des Isolationswiderstandes an einer Bohrmaschine der SK II.

Messen des Schutzleiterstroms (nur SK I)

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass im Betrieb kein unzulässiger Strom über den Schutzleiter fließt.

- Die Messung darf nur durchgeführt werden, wenn die Schutzleitermessung erfolgreich war.
- Der Prüfling wird an die Prüfbuchse angeschlossen und eingeschaltet. Die meisten Prüfgeräte verwenden hier ein automatisches Messverfahren (Differenzstrommessung).

Maximal zulässiger Schutzleiterstrom	
allgemein	$\leq 3,5 \text{ mA}$
bei Heizgeräten über 3,5 kW	1 mA pro kW bis maximal 10 mA

Messen des Berührungsstroms/Ersatzableitstroms

Durch die Messung soll nachgewiesen werden, dass im Betrieb kein unzulässiger Strom fließt, wenn ein Mensch leitfähige Teile des Gehäuses berührt. Bei SK I ist die Messung nur gefordert, wenn es berührbare Metallteile gibt, die nicht mit dem PE verbunden sind.

- Der Prüfling wird an Netzspannung angeschlossen und eingeschaltet.

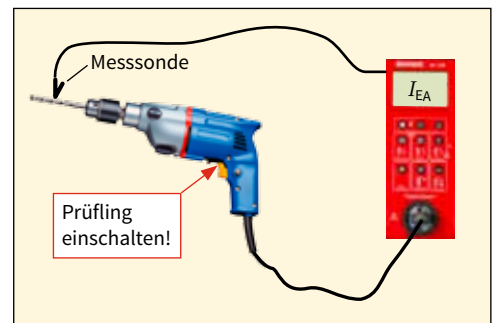


Abb. 2: Messung des Ersatzableitstromes an einer Bohrmaschine der SK II.

Ersatzableitstrom

Für die Messung von Schutzleiterstrom und Berührungsstrom muss der Prüfling an Netzspannung angeschlossen werden. Dies kann unter Umständen zur Gefährdung der Prüfperson führen. Die Messung des Ersatzableitstroms ist **eine Alternative, die ohne Netzspannung funktioniert**. Sie kann jedoch nur angewendet werden, wenn im Prüfling keine netzspannungsabhängigen Schalteinrichtungen (z. B. Relais) eingebaut sind.

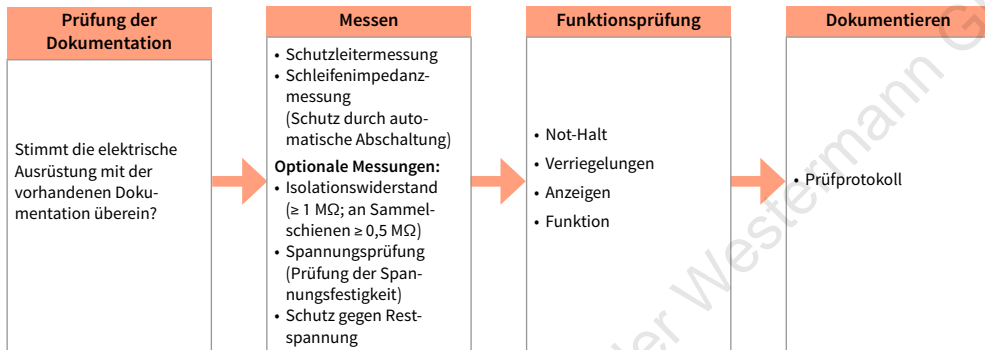
Maximal zulässiger Berührungsstrom/ Ersatzableitstrom	
Gerät	Grenzwert
Schutzklasse II	$I \leq 0,5 \text{ mA}$
Schutzklasse I (berührbare leitfähige Teile nicht mit PE verbunden)	$I \leq 0,5 \text{ mA}$
Schutzklasse III	nicht gefordert

4.6.4 Prüfung elektrischer Maschinen DIN EN 60204-1 (VDE 0113-1)

Elektrische Maschinen sind elektrische Ausrüstungen, die nicht von Hand getragen werden können und in Systemen abgestimmt zusammenarbeiten, so etwa Maschinen zur Bearbeitung von Holz oder Metall (z. B. Fräsen), Fördertechnik, Pumpen und Kompressoren.

Der **Umfang der Prüfungen** für eine bestimmte Maschine ist in der **jeweiligen Produktnorm** angegeben. Wenn für die betreffende Maschine keine Produktnorm existiert, ist grundsätzlich folgender Ablauf vorgesehen:

Prüfablauf bei elektrischen Maschinen:



Die Messungen werden grundsätzlich wie bei der Anlagenprüfung nach VDE 0100-600 (Kap. 4.3.1) durchgeführt. Im TN-System kann die Messung der Schleifenimpedanz durch geeignete Berechnungen ersetzt werden.

Messung der Restspannung:

- Die Messung ist nur erforderlich, wenn die Maschine kapazitive Komponenten enthält.
- Die maximal zulässige Restspannung von $U \leq 60 \text{ V}$ muss 5 s nach dem Abschalten erreicht sein (nach 1 s bei berührbaren Teilen wie z. B. Stecker).

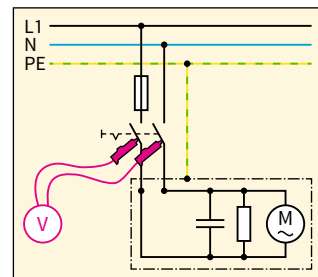


Abb. 1: Messung der Restspannung nach dem Abschalten der Maschine.

4.6.5 Zugelassene Messgeräte

Für die Prüfungen von Anlagen und Betriebsmitteln dürfen nur Messgeräte verwendet werden, die nach **DIN VDE 0413 zugelassen** sind. Dadurch ist sichergestellt, dass die Geräte nur Messströme erzeugen, die für Personen oder Betriebsmittel ungefährlich sind.

Außerdem ist darauf zu achten, dass Messgeräte und auch Messleitungen für den passenden **Spannungsbereich** geeignet sind. Dazu sind vier **Messkategorien (Überspannungskategorien)** definiert:

Messkategorien (DIN EN 61010; VDE 0411-031)		
Kategorie	Anwendungsbereich	Zur Messung an (Beispiele)
CAT I	Messungen an Stromkreisen, die nicht mit dem Stromnetz verbunden sind.	Batteriebetriebenen Geräten
CAT II	Messungen an Stromkreisen, die mittels Stecker mit dem Niederspannungsnetz verbunden sind.	Elektrowerkzeugen oder Hausgeräten
CAT III	Messungen an Stromkreisen der Gebäudeinstallation.	Steckdosen oder Verteilerkästen
CAT IV	Messungen an Stromkreisen, die direkt mit der Quelle der Niederspannungsinstallation verbunden sind.	Hausanschlusskasten, Zählerfeld, Hauptleitung

Für die Messungen an Anlagen und Betriebsmitteln werden meist **Vielfachmessgeräte** verwendet. Diese können alle für die jeweilige Prüfung relevanten Messwerte ermitteln. Dementsprechend gibt es getrennte Vielfachmessgeräte für die Anlagenprüfung und für die Geräteprüfung:

Messgeräte zur Prüfung ortsfester Anlagen (Installationstester)



Abb. 1: Messgerät zur Anlagenprüfung (Beispiel)

Diese Vielfachmessinstrumente werden für folgende Prüfungen verwendet:

- Anlagenprüfung nach DIN VDE 0100-600 (Erstprüfung und Prüfung nach Änderung und Instandsetzung)
- Anlagenprüfung nach DIN VDE 0105-100 (Wiederholungsprüfung)
- Prüfen elektrischer Maschinen nach DIN EN 60204 (VDE 0113)

Sie ermöglichen z. B. die Messung folgender Größen:

- Durchgängigkeit der Leiter (Leiterwiderstand, Niederohmmessung),
- Isolationswiderstand (R_{iso}),
- Schleifenimpedanz (Z_S) oder
- RCD-Messung (Auslösezeit, Auslösestrom), Phasenlage (Drehfeld)...

Messgeräte zur Prüfung ortsveränderlicher Betriebsmittel (Geräteprüfung)

Diese Vielfachmessinstrumente werden für folgende Prüfungen verwendet:

- VDE 0701 (DIN EN 50678) (Prüfung nach Reparatur) und VDE 0702 (DIN EN 50699) (Wiederholungsprüfung)

Sie ermöglichen z. B. die Messung folgender Größen:

- Schutzleiterwiderstand (R_{PE}),
- Isolationswiderstand (R_{iso}),
- Berührungsstrom oder Ersatzableitstrom sowie
- RCD Messung (PRCD), Laststrom...



Abb. 2: Messgerät zur Geräteprüfung (Beispiel)

4.6.6 Dokumentation der Prüfergebnisse

Für die Dokumentation der Prüfergebnisse ist keine feste Form vorgeschrieben. Man kann fertige Vordrucke verschiedener Hersteller benutzen oder eigene Formulare erstellen. Zunehmend wird auch Software verwendet, die die Prüfergebnisse bei der Messung automatisch erfasst.

Beispiel für ein Formular zur Anlagenprüfung:

Prüfung elektrischer Anlagen
Prüfprotokoll¹⁾ Nr.: 35-2024

Kunden-Nr.: 1234 Blatt 1 von 2	Auftrag-Nr.: 321
Auftraggeber (Anlagenbetreiber) ²⁾ Muster GmbH 3451 Musterhausen	Auftragnehmer: ³⁾ Elektro Schmidt GmbH 3451 Musterhausen

Anlage: Energieverteilung Werkstatt 3

Prüfung¹⁾ nach: DIN VDE 0100-600 Neuanlage Änderung Erweiterung DIN VDE 0105-100 Wiederholungsprüfung Instandsetzung

E-CHECK DGUV Vorschrift 3 BetrSichV

Beginn der Prüfung: 11.02.2024 Uhrzeit: 14:00 Ende der Prüfung: 11.02.2024 Uhrzeit: 15:00

Netz: 230 / 400 V 50 Hz Netzbetreiber: Nord Netz Netzsystem: TN-C TN-S XI TN-C-S TT IT

	i. O.	n. i. O.		i. O.	n. i. O.
Besichtigen					
Auswahl der Betriebsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schutz-, Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trenn- und Schaltgeräte	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brandabschaltungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zugänglichkeit (HAK/Verteiler)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gebäudesystemtechnik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schutzpotentialausgleich	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kabel, Leitungen, Stromschienen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zw. Schutzpotentialausgleich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kennzeichnung Stromkreis, Betriebsmittel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Funktionspotentialausgleich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kennzeichnung N- und PE-Leiter	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dokumentation ⁴⁾ siehe Ergänzungsblätter	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Leitungsverbindungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
Erproben					
Funktionsprüfung der Anlage	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rachschreibfeld (Drehstrommessdosen)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
RCO (FI-Schutzschalter)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Überprüfung Spannungsfall	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Funktion der Schutz-, Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Spannungspolarität	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Spannungsfall nachgewiesen⁵⁾ 1.5 % Erdungswiderstand: R_E -----

Durchgängigkeit Potentialausgleichsystem⁶⁾ (≤ 1 Ω nachgewiesen)

Fundamenterdor <input type="checkbox"/>	Hauptwasserleitung <input type="checkbox"/>	Klimaanlage <input type="checkbox"/>	Blitzschutzanlage <input type="checkbox"/>
Ringerdor <input type="checkbox"/>	Hauptschutzleiter <input checked="" type="checkbox"/>	Aufzugsanlage <input type="checkbox"/>	Antennenanlage/BK <input type="checkbox"/>
Haupterdungsschiene <input checked="" type="checkbox"/>	Gesamtleitung <input type="checkbox"/>	HIV-Anlage <input type="checkbox"/>	Gebäudekonstruktion <input type="checkbox"/>
Wasserzweischleifer <input type="checkbox"/>	Heizungsanlage <input type="checkbox"/>	Telefonanlage <input type="checkbox"/>	

Verwendete Messgeräte nach VDE 0413

Herst./Typ: GMC Metrahit	Herst./Typ: _____	Herst./Typ: _____
kalibriert bis: 01.09.2024	kalibriert bis: _____	kalibriert bis: _____

Messen Stromkreisverteiler Nr.: 03 (siehe Folgeseite/n)

Nr.	Stromkreis	Leitung/Kabel	Durchgängigkeit Schutzleiter	R _{pe}	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (FICD)										Überspannung-Schutzeinrichtung	
					U _{res} bei F _{pe}	I _{res}	Typ	U _{res}	I _{res}	U _{res}	I _{res}	U _{res}	I _{res}	U _{res}	I _{res}	U _{res}
1	Zuleitung UV 3 NYM	5 × 10	0,2		85	A	25	30	35	10	20	B	16	0,6		
2	Steckdosen X1 NYM	3 × 2,5	0,3	500	90	A	25	30	30	10	20	B	10	0,6		
3	Licht E1.1-1.10 NYM	3 × 1,5	0,3	500												

Nr.	Stromkreis	Leitung/Kabel	Durchgängigkeit Schutzleiter	U _{res} bei F _{pe}	I _{res}	Isolationenmessung												
						Detailmessung zur Isolationsmessung R _{iso}												
4	Motor M1	NYM	5 × 4	0,1	500	x	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

keine Mängel festgestellt Prüfl. Plakette Ja Nein Nächster Prüftermin: 11.02.26 Unterschrift Prüfer:

Mängel festgestellt: (Siehe separater Mängelbericht) (Osman Schmidt)

© Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke (ZVEH) - Stand 05/2018

[ABB, Friedberg: 163.4, 163.6. |ABB STOTZ-KONTAKT GmbH, Heidelberg: 152.4. |Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Verl: 96.4. |BENDER GmbH & Co. KG, Grünberg: 34.2. |Benning Elektrotechnik und Elektronik GmbH & Co. KG, Bocholt: Vogel, Robert 49.2, 49.6, 50.3, 52.1, 53.5, 54.2, 54.4, 56.1, 56.2. |DEHN SE, Neumarkt: 40.2. |Di Gaspare, Michele (Bild und Technik Agentur für technische Grafik und Visualisierung), Bergheim: 35.1, 36.2, 44.2, 115.2, 115.5, 150.2, 168.1, 170.2, 171.1, 171.2, 171.3, 171.4, 171.5, 171.6, 171.7, 171.8, 171.9. |DIN Media GmbH, Berlin: 175.6, 175.7, 175.8, 175.9, 175.10, 175.11, 175.12, 175.13, 175.14, 175.15, 175.16, 175.17, 175.18, 175.19, 175.20, 175.21, 175.22, 175.23, 175.24, 175.25, 175.26, 175.27, 175.28, 175.29, 175.30, 175.31, 175.32, 175.33, 175.34, 175.35. |Druwe & Polastri, Cremlingen/Weddel: 60.4, 60.5, 60.6, 65.1. |EA Elektro-Automatik GmbH & Co. KG, Viersen: 140.6. |Eaton Industries GmbH, Bonn: 15.5, 96.1, 97.4, 103.1, 108.3. |ebm-papst, Muldingen: 157.4. |Gossen Metrawatt GmbH, Nürnberg: 51.3. |hager.de, Blieskastel: 38.2, 39.1, 39.2, 40.1, 162.2, 162.3. |jfm electronic gmbh, Essen: 94.4, 112.2, 112.5, 112.7, 113.4, 114.3, 114.4, 115.1, 115.4, 115.6, 116.5, 117.2. |JUMO GmbH & Co. KG, Fulda: 122.9, 126.3. |Kampen, Holger, Hennef (Sieg): 102.6, 103.2, 103.3, 103.4, 103.5, 103.6, 104.1, 104.2, 104.3, 104.4, 105.1, 105.3, 105.4, 105.5, 106.1, 106.2, 106.3, 106.4, 106.5, 106.6, 108.2, 109.1, 109.2, 109.3, 109.4, 109.5, 110.1, 110.2. |Klaue, Jürgen, Bad Kreuznach: 37.1. |Kosaca, Gabriele, Hagen: 70.1, 72.1, 87.1. |Leine & Linde AB, Strängnäs: 121.2, 121.3, 121.6. |Lithos, Wolfenbüttel: 12.1, 12.2, 13.1, 14.1, 14.3, 14.4, 15.1, 15.2, 15.3, 15.4, 15.6, 16.1, 16.2, 16.4, 16.5, 17.1, 17.2, 17.3, 18.1, 18.2, 18.3, 18.4, 19.1, 19.2, 20.1, 20.2, 20.3, 20.4, 20.5, 20.6, 20.7, 20.8, 20.9, 20.10, 20.11, 20.12, 21.1, 21.2, 21.3, 21.4, 21.5, 22.1, 22.3, 22.4, 22.5, 22.6, 22.7, 22.8, 23.2, 23.3, 23.4, 24.1, 24.2, 24.4, 25.1, 25.2, 25.3, 25.4, 26.1, 26.2, 26.3, 27.1, 27.2, 27.3, 27.4, 27.5, 28.1, 28.2, 28.3, 28.4, 28.5, 28.6, 28.7, 28.8, 28.9, 28.10, 28.11, 29.1, 29.2, 30.1, 30.2, 31.1, 31.2, 31.3, 31.4, 31.5, 32.1, 33.1, 34.1, 34.3, 35.2, 36.1, 37.2, 37.3, 37.4, 37.5, 38.1, 41.1, 42.1, 42.2, 43.1, 43.2, 44.1, 45.1, 47.1, 48.1, 49.1, 49.3, 50.1, 51.1, 51.2, 53.1, 53.2, 53.3, 55.1, 60.1, 60.2, 60.3, 61.1, 61.2, 61.3, 61.4, 61.5, 61.6, 61.7, 61.8, 62.1, 62.2, 62.3, 63.1, 63.3, 63.4, 63.5, 64.1, 64.2, 64.3, 64.4, 65.2, 65.3, 65.4, 65.5, 66.1, 66.2, 66.3, 67.2, 67.3, 67.4, 67.5, 68.1, 68.2, 68.3, 69.1, 69.2, 69.3, 70.2, 70.3, 70.4, 70.5, 71.1, 72.2, 72.3, 72.4, 72.5, 73.1, 73.2, 73.3, 73.4, 73.5, 73.6, 73.7, 74.1, 74.2, 74.4, 75.1, 75.2, 75.3, 75.5, 75.6, 76.1, 76.2, 76.3, 76.4, 76.5, 76.6, 77.1, 77.2, 77.3, 77.4, 78.2, 78.3, 78.4, 78.5, 78.6, 78.7, 79.1, 79.2, 79.3, 79.5, 80.1, 80.2, 80.3, 81.1, 81.2, 81.3, 81.4, 82.1, 82.2, 82.3, 82.4, 83.1, 83.2, 83.3, 83.4, 84.1, 84.2, 84.3, 84.4, 85.1, 85.2, 85.3, 85.4, 85.5, 86.1, 86.2, 86.3, 87.2, 87.3, 88.1, 88.2, 88.3, 88.4, 88.5, 88.6, 88.7, 89.1, 89.3, 89.4, 90.1, 90.2, 90.3, 91.1, 91.2, 91.3, 91.4, 91.5, 91.6, 91.7, 91.8, 91.9, 94.1, 94.2, 94.6, 95.1, 95.2, 95.3, 97.1, 97.2, 97.3, 98.1, 98.2, 99.1, 99.2, 100.1, 100.2, 101.1, 101.2, 101.3, 101.4, 101.5, 101.6, 101.7, 101.8, 101.9, 102.1, 102.2, 102.3, 102.4, 102.5, 105.2, 107.1, 107.2, 107.3, 107.4, 107.5, 107.6, 107.7, 111.1, 112.1, 112.3, 112.4, 113.1, 113.2, 113.3, 114.1, 114.2, 115.3, 115.7, 115.8, 115.9, 116.1, 116.2, 116.4, 117.1, 118.2, 118.3, 119.1, 119.2, 119.3, 119.4, 119.5, 120.2, 120.3, 120.4, 121.1, 121.4, 121.5, 121.7, 122.1, 122.2, 122.5, 122.6, 122.10, 123.1, 123.2, 123.3, 123.4, 123.5, 123.6, 123.7, 123.8, 123.9, 123.10, 123.11, 123.12, 123.13, 123.14, 123.15, 123.16, 123.17, 124.1, 124.2, 125.1, 125.2, 125.3, 125.4, 126.1, 126.2, 126.4, 127.1, 127.2, 127.3, 127.4, 127.5, 130.1, 130.2, 130.4, 131.1, 131.2, 131.3, 132.1, 132.3, 132.4, 133.1, 133.2, 133.3, 134.2, 134.3, 135.1, 135.2, 135.3, 136.1, 136.2, 137.1, 137.2, 138.1, 138.2, 138.3, 138.4, 139.1, 139.3, 139.4, 139.6, 140.2, 140.3, 140.5, 140.7, 141.1, 141.2, 141.3, 142.2, 142.3, 143.4, 143.5, 143.6, 143.7, 143.8, 144.2, 144.3, 145.1, 145.2, 145.3, 146.1, 146.2, 147.1, 147.2, 147.3, 147.4, 148.1, 148.2, 148.4, 149.1, 149.2, 149.3, 149.4, 150.3, 151.1, 151.2, 152.1, 152.2, 152.3, 152.5, 153.1, 153.2, 153.3, 153.4, 153.6, 154.1, 154.2, 154.3, 155.1, 155.2, 155.3, 155.4, 155.5, 156.1, 156.2, 156.4, 156.5, 157.1, 157.2, 157.3, 158.4, 159.1, 159.2, 159.3, 159.4, 159.5, 159.6, 160.1, 160.2, 161.1, 161.3, 161.4, 162.1, 162.4, 163.1, 163.5, 164.1, 164.2, 164.3, 164.4, 164.5, 164.6, 164.7, 164.8, 164.9, 165.2, 165.3, 166.1, 166.2, 168.2, 169.1, 169.2, 169.3, 169.4, 170.1, 173.1, 173.2, 173.3, 173.4, 173.5, 173.6, 173.7, 173.8, 173.9, 173.10, 173.11, 173.12, 173.13, 173.14, 173.15, 173.16, 173.17, 173.18, 173.19, 173.20, 173.21, 173.22, 173.23, 173.24, 173.25, 173.26, 173.27, 173.28, 173.29, 174.1, 174.2, 174.3, 174.4, 174.5, 174.6, 174.7, 174.8, 174.9, 174.10, 174.11, 174.12, 174.13, 174.14, 174.15, 174.16, 174.17, 174.18, 174.19, 174.20, 174.21, 174.22, 174.23, 174.24, 174.25, 174.26, 174.27, 174.28, 174.29, 174.30, 174.31, 174.32, 174.33, 175.1, 175.2, 175.3, 175.4, 175.5. |MBS AG, Sulzbach–Laufen: 139.2, 139.5. |Menzel Elektromotoren GmbH, Hennigsdorf: 158.3. |Müller, Detlev, Hennef (Sieg): 46.1, 57.1, 60.7, 74.3, 79.4, 87.4, 89.2, 108.1, 109.6, 110.4, 111.2, 111.3, 111.4, 158.2. |Shutterstock.com, New York: A_stockphoto 11.1; aquatarko 78.1; Gumbariya 59.1; Khotenko, Vladymyr 75.4; Kuzmin, Sergiy 67.1; panuwat phimpfa 93.1; Party people studio 129.1. |Siemens AG: 16.3, 49.4, 49.5, 50.2, 94.3, 94.5, 96.2, 96.3, 110.3, 122.3, 122.4, 122.7, 122.8, 140.1, 140.4, 153.5, 161.2, 165.1. |SMA Solar Technology AG, Niestetal: 85.6. |StandexMeder Electronics GmbH, Engen-Welschingen: 116.3. |stock.adobe.com, Dublin: alexlmx 134.1; Alexlmx 143.1, 143.2, 143.3, 144.4, 144.5, 144.6; beermedia 24.3; Dehlzeit, Markus 142.1; jamestehardt Titel, Titel; janvier 48.2, 54.1, 54.3; KirillLutz 158.1; Kostuchenko, Olexsandr 148.3, 163.3; mipan 132.2; mrdeeds 48.3; Natascha 23.1; Pakin 47.2; pgottschalk 26.4, 142.4, 144.1; Serhii 156.3; Trik 159.7; Uzzal, Arifur Rahman 130.3; Wongsakorn 63.2; Yemelyanov, Maksym 150.1; Yuli 53.4. |TDK Electronics AG, München: 118.1, 163.2. |TiTEC Temperaturmesstechnik GmbH, Bräunlingen: <https://www.sensorshop24.de/> 112.6. |WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Brühl: www.waycon.de 120.1. |wgr-logo, Braunschweig: Titel.