EUROPA-FACHBUCHREIHE
für informationstechnische und
kommunikationstechnische Berufe

IKT-Fachkunde

Bearbeitet von Lehrern und Ingenieuren an beruflichen Schulen

6. Auflage

Elektrotechnik

(Auszug)

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 36519

6.2 Elektrotechnische Grundkenntnisse 208
6.2.1 Elektrotechnische Grundgrößen 208
6.2.2 Bauformen und Kennzeichnung der Widerstände 211
6.2.3 Leistung, Arbeit, Wirkungsgrad 211
6.2.4 Schaltungen mit Widerständen 212
6.2.5 Wechselgrößen 213
6.2.6 Kondensator, Spule, Transformator 214
6.2.7 Dioden und Transistoren 217
6.2.8 Operationsverstärker 219
6.3 Elektrostatik 220
6.3.1 Entstehung elektrostatischer Aufladung 220
6.3.2 Auswirkungen elektrostatischer Entladungen 221
6.3.3 Mittel zur ESD-Vermeidung 221
6.4 Elektronische Schaltungen mit Strom versorgen 223
6.4.1 Lineare Netzteile und Schaltnetzteile 223
6.4.2 PC-Netzteile 224
6.4.3 Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme USV 225
6.4.4 Batterien 227
6.5 Schutzmaßnahmen 228
6.5.1 Elektrischer Schlag 228
6.5.2 Basisschutz 229
6.5.3 Fehlerschutz 229
6.5.3.1 Netzunabhängiger Fehlerschutz 230
6.5.3.2 Netzabhängiger Fehlerschutz 231
6.6 Elektromagnetische Verträglichkeit EMV 234
6.6.1 EMV-Störungen 234
6.6.2 Grenzwerte und Normen zum Schutz der Gesundheit bei technisch erzeugten Feldern 235
6.6.3 Überspannungsschutz bei einer IT-Anlage 236
Testen Sie Ihre Fachkompetenz! 237

6.2 Elektrotechnische Grundkenntnisse

6.2.1 Elektrotechnische Grundgrößen

Ladung

Jeder Körper ist im normalen Zustand an der Oberfläche elektrisch neutral. Durch Reiben des Körpers kann dieser Zustand geändert werden.

Stäbe aus Isolierstoffen, wie z. B. Hartgummi, Acrylglas, Polystyrol, die man mit einem Wolltuch reibt, üben aufeinander Abstoßungskräfte **(Bild 1)** oder Anziehungskräfte **(Bild 2)** aus. Dafür sind die *elektrischen Ladungen* verantwortlich **(Bild 3)**.

> Gleichartige Ladungen stoßen sich ab, ungleichartige Ladungen ziehen sich an.

Die elektrische Ladung z. B. eines Kondensators ist von der Stromstärke und von der Stromflusszeit abhängig. Sie hat die Einheit Amperesekunde (As) mit dem besonderen Einheitennamen Coulomb[1] (C).

Spannung

Zwischen positiven und negativen Ladungen wirkt eine Anziehungskraft. Werden diese Ladungen voneinander entfernt, so muss gegen die Anziehungskraft eine Arbeit verrichtet werden. Diese Arbeit ist nun als Energie in den Ladungen gespeichert. Dadurch besteht zwischen den Ladungen eine elektrische *Spannung* **(Bild 4)**.

> Elektrische Spannung entsteht durch Trennung unterschiedlicher Ladungen.

Je höher die erzeugte Spannung ist, desto größer ist das Bestreben der Ladungen sich auszugleichen (Bild 4). Die elektrische Spannung (Formelzeichen U) misst man mit dem *Spannungsmessgerät*, das parallel zum Spannungserzeuger geschaltet wird.

Einheit der elektrischen Spannung U ist das Volt[2] (V). Im Schaltzeichen des Spannungsmessgeräts steht V oder U.

$[U] = \text{V}$ sprich: Einheit von U ist gleich Volt.

Potenziale nennt man eine auf einen Bezugspunkt bezogene Spannung, z. B. die Spannung gegen Masse. Jede Spannung kann als Differenz zweier *Potenziale* aufgefasst werden.

Elektrischer Strom

Die Spannung ist die Ursache für den *elektrischen Strom*. Elektrischer Strom fließt nur im geschlossenen Stromkreis. Der *Stromkreis* besteht aus dem Erzeuger, dem Verbraucher, der Leitung und z. B. einem zusätzlichen Strommessgerät **(Bild 5)**.

[1] Charles Augustin de Coulomb, franz. Physiker, 1736 bis 1806
[2] Alessandro Volta, ital. Physiker, 1745 bis 1827

> **!** + **positive** Ladung Q
> – **negative** Ladung Q

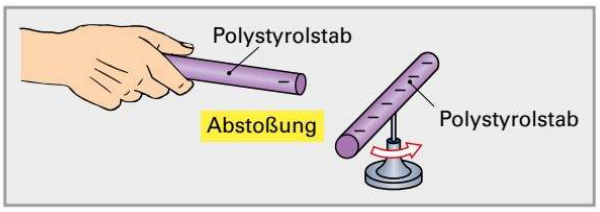


Bild 1: Abstoßung gleichartiger Ladungen

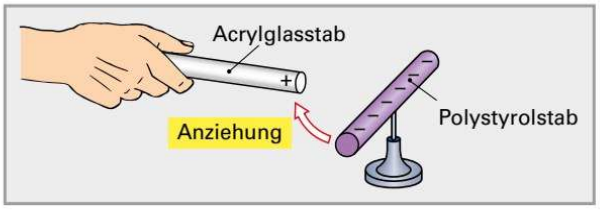


Bild 2: Anziehung ungleichartiger Ladungen

Bild 3: Ladungswirkungen

$[Q] = \text{As} = \text{C}$

$$Q = I \cdot t$$

Q Ladung I Stromstärke t Zeit

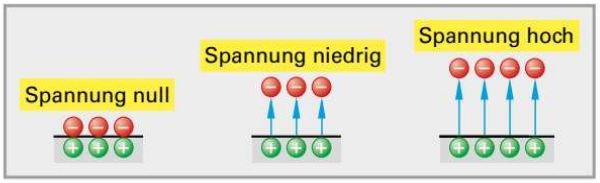


Bild 4: Spannungserhöhung durch Ladungstrennung

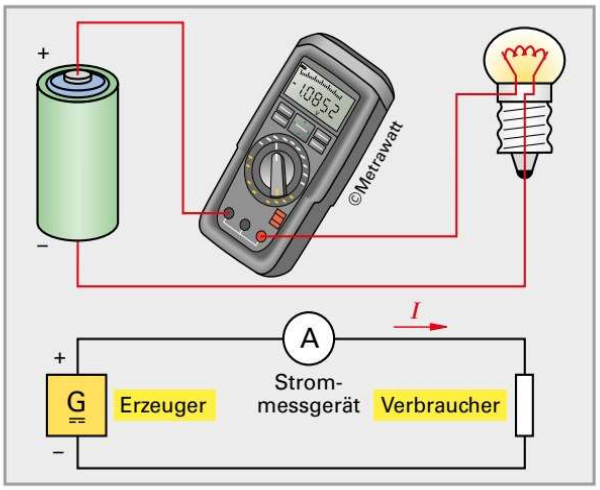
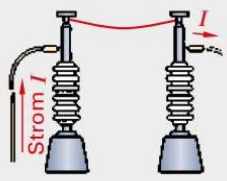
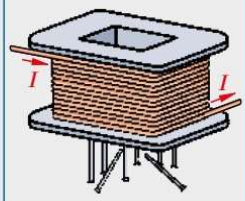
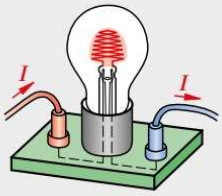
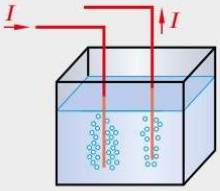
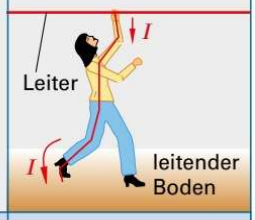


Bild 5: Strommessung

Tabelle 1: Stromwirkungen

Wärmewirkung	Magnetwirkung	Lichtwirkung	Chemische Wirkung	Wirkung auf Lebewesen
immer vorhanden	immer vorhanden	in Gasen, in manchen Halbleitern	in leitenden Flüssigkeiten, Gelen	bei Menschen und Tieren
				
Heizung, Lötkolben, Schmelzsicherung	Relaisspule, Türöffner	Glimmlampe, LED, Leuchtstofflampe	Ladevorgang bei Akkumulatoren, belastete Elemente	Negativ: Unfälle, Positiv: Herzschrittmacher

Mit einem Schalter kann man den Stromkreis öffnen und schließen. Bewegen sich im Stromkreis alle freien Elektronen eine Zeit lang in eine Richtung, spricht man vom elektrischen Strom.

> Elektrischer Strom ist die gerichtete Bewegung von Elektronen.

Die *elektrische Stromstärke* (Formelzeichen I) misst man mit dem Strommessgerät (Bild 5, vorhergehende Seite). Die Einheit der elektrischen Stromstärke I ist das Ampere[1] (A). Im Schaltzeichen des Strommessgerätes steht A oder I.

$[I]$ = A, sprich: Einheit von I ist gleich Ampere.

> Zur Messung der Stromstärke wird das Strommessgerät in den Stromkreis geschaltet.

Der elektrische Strom hat verschiedene Wirkungen **(Tabelle 1)**. Die Wärmewirkung und die Magnetwirkung treten bei elektrischem Strom immer auf. Lichtwirkung, chemische Wirkung und die Wirkung auf Lebewesen treten nur in bestimmten Fällen auf.

Bei *Gleichstrom* bleibt der Strom bei gleicher Spannung und konstantem Widerstand konstant **(Bild 1, oben)**. Die Elektronen fließen im Verbraucher entgegen der technischen Stromrichtung vom Minuspol zum Pluspol. Das Kurzzeichen für *Gleichstrom* ist *DC* (von *Direct Current* = Einrichtungsstrom).

In Schaltbildern wird die technische Stromrichtung verwendet (Bild 5, vorhergehende Seite). Der Strom fließt also vom Pluspol zum Minuspol des Generators.

Bei *Wechselstrom* ändert die Spannung die Polarität und damit der Strom ständig die Richtung. Das

[1] André Marie Ampère, franz. Physiker, 1775 bis 1836

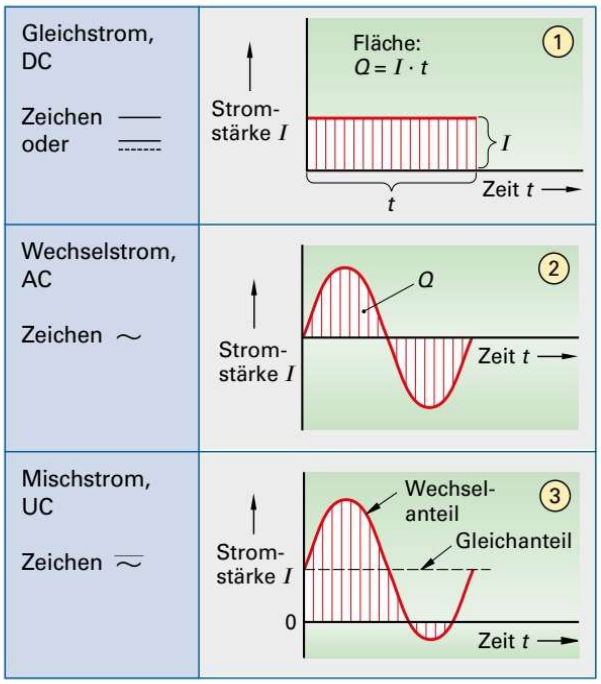


Bild 1: Stromarten

Kurzzeichen für Wechselstrom ist *AC* (von *Alternating Current* = wechselnder Strom, Bild 1, Mitte).

Mischstrom entsteht durch die Addition (Überlagerung) von Gleichstrom und Wechselstrom. Wird der Gleichstrom ① zu dem Wechselstrom ② addiert, so erhält man den Stromverlauf ③ Bild 1.

> Mischstrom enthält einen Gleichstromanteil und einen Wechselstromanteil.

Das Kurzzeichen für Mischstrom ist *UC* (von *Universal Current* = allgemeiner Strom). Ein gleichgerichteter Wechselstrom enthält Gleichstrom und Wechselstrom.

Elektrischer Widerstand

Der Widerstand, auch *Resistanz* genannt (Formelzeichen R), hat die Einheit Ohm (Ω), $[R] = \Omega$. Den Kehrwert des Widerstandes nennt man Leitwert. Der Leitwert (Formelzeichen G) hat die Einheit Siemens (S), $[G] = S$.

Beispiel 1: Leitwert berechnen

Ein Widerstand beträgt 200 Ω. Wie groß ist sein Leitwert?

Lösung:

$$R = \frac{1}{G} \Rightarrow G = \frac{1}{R} = \frac{1}{200\ \Omega} = \mathbf{5\ mS}$$

Leiterwiderstand

Der Widerstand eines Leiters hängt von der Länge, vom Querschnitt und vom Werkstoff des Leiters ab. Der *spezifische (= arteigene) Widerstand* ϱ gibt den Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt für ein bestimmtes Leitermaterial an.
Der spezifische Widerstand ϱ wird meist für 20 °C angegeben. Die *Leitfähigkeit* γ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ϱ.
Der spezifische Widerstand ϱ von Drähten hat die Einheit $\Omega \cdot mm^2/m$. Bei Isolierstoffen und Halbleiterwerkstoffen wird die Einheit $\Omega \cdot cm^2/cm = \Omega\ cm$ verwendet. Dies entspricht dem Widerstand eines Würfels mit der Kantenlänge 1 cm.

Beispiel 2: Leiterwiderstand berechnen

Ein Kupferdraht einer Netzwerkleitung ist 20 m lang (einfache Entfernung) und hat 0,1 mm Durchmesser. Berechnen Sie den Widerstand.

Lösung:

$$R = \frac{l}{\gamma_{cu} \cdot A} = \frac{2 \cdot 20\ m}{56\ \frac{m}{\Omega\ mm^2} \cdot 0{,}00785\ mm^2} = \mathbf{91\ \Omega}$$

Ohm'sches Gesetz

Bei konstantem Widerstand nimmt die Stromstärke proportional mit der Spannung zu. Zeichnet man I in Abhängigkeit von U auf, so erhält man eine Gerade **(Bild 1)**. Wenn $I \sim U$ (sprich: I proportional U) ist, so spricht man von einem linearen Widerstand. Die Widerstandsgerade verläuft umso steiler, je kleiner der Widerstand ist. Mit zunehmendem Widerstand nimmt dagegen die Stromstärke bei gleicher Spannung ab.

Das Ohm'sche Gesetz beschreibt den Zusammenhang von Stromstärke, Spannung und Widerstand.

! **Georg Simon Ohm**, deutscher Physiker, 1789 bis 1854
Werner von Siemens, deutscher Erfinder, 1816 bis 1892
James Watt, engl. Ingenieur, 1736 bis 1819

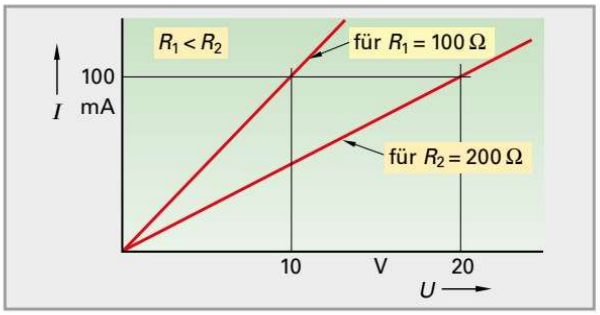


Bild 1: I als Funktion von U bei konstantem Widerstand

$[R] = \Omega$; $[G] = S$

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

$$\gamma = \frac{1}{\varrho} \qquad R = \frac{\varrho \cdot l}{A} \qquad R = \frac{l}{\gamma \cdot A}$$

R Widerstand (Resistanz)
G Leitwert
γ Leitfähigkeit (γ griech. Kleinbuchstabe Gamma)
$\gamma_{Cu} = 56\ \frac{m}{\Omega\ mm^2}$; $\gamma_{AL} = 35{,}38\ \frac{m}{\Omega\ mm^2}$;
ϱ spezifischer Widerstand (ϱ griech. Kleinbuchstabe Rho)
l Länge des Leiters
A Querschnitt des Leiters

Stromdichte

In einem Stromkreis fließt die gleiche Stromstärke durch jeden Leiterquerschnitt. Bei verschieden großen Querschnitten, z. B. in der Leitung zu einer Glühlampe und im Glühfaden in der Glühlampe, müssen sich deshalb die Elektronen im kleinen Querschnitt schneller als im großen Querschnitt bewegen. Dadurch ist dort die Stromdichte J größer.

$$[I] = \frac{[U]}{[R]} = \frac{V}{\Omega} = A \qquad I = \frac{U}{R} \qquad [J] = \frac{A}{mm^2} \qquad J = \frac{I}{A}$$

I Stromstärke
U Spannung
J Stromdichte
R Widerstand

Beispiel 3: Stromdichte berechnen

Durch eine Glühlampe fließt eine Stromstärke von 0,2 A. Wie groß ist die Stromdichte in der Zuleitung mit 1,5 mm² Querschnitt?

Lösung:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{0{,}2\ A}{1{,}5\ mm^2} = \mathbf{0{,}133\ A/mm^2}$$

6.2.2 Bauformen und Kennzeichnung der Widerstände

Festwiderstände

Als Träger der Widerstandsschicht aus z. B. kristalliner Kohle dient ein zylindrischer, keramischer Körper, z. B. aus Porzellan.

Widerstand und Toleranz können durch Zahlen oder durch eine Farbkennzeichnung in Form von Ringen, Strichen oder Punkten angegeben sein **(Tabelle 1)**. Die Farbkennzeichnung ist so angebracht, dass der erste Ring näher bei dem einen Ende des Schichtwiderstandes liegt als der letzte Ring bei dem anderen Ende.

Sofern Widerstände mit 5 Farbringen gekennzeichnet werden, bilden die ersten 3 Ringe die Ziffern des Widerstandswertes, der 4. Ring gibt den Multiplikator und der 5. Ring die Widerstandstoleranz an.

Veränderbare Widerstände

Als veränderbare (einstellbare) Widerstände werden hauptsächlich Drehwiderstände (Potenziometer, Trimmer) verwendet (siehe TablGSA).

6.2.3 Leistung, Arbeit, Wirkungsgrad

Die **elektrische Leistung** ist umso größer, je höher die Spannung und je größer die Stromstärke ist. Die Einheit der Leistung ist das Watt[1] (W). $[P] = \text{W}$.

> 1 W ist die Leistung eines Gleichstromes von 1 A bei einer Gleichspannung von 1 V.

Mit einem Spannungsmessgerät und einem Strommessgerät kann man die Leistung bestimmen **(Bild 1)**.

Bei Glühlampen und bei anderen elektrischen Betriebsmitteln, z. B. Lötkolben, Rundfunkgeräten, Motoren, stimmt die tatsächlich aufgenommene Leistung meist nicht mit der angegebenen Leistung (Bemessungsleistung) überein, weil bei der Herstellung Maßschwankungen (Toleranzen) auftreten oder auch Abgabeleistungen angegeben werden. Diese betreffen eine bestimmte Energieform, z. B. die Lichtenergie bei Glühlampen.

Elektrische Arbeit *W*. Sie ist das Produkt aus Leistung P und Zeit t, also $W = P \cdot t$. Elektrische Arbeit wird z. B. mit dem kWh-Zähler ermittelt.

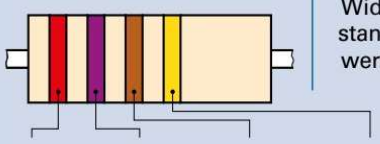
Wirkungsgrad η. Er ist das Verhältnis von abgegebener Leistung P_{ab} zu aufgenommener Leistung P_{zu}, also $\eta = P_{ab}/P_{zu}$.

Beispiel 1: Leistungsaufnahme

Wie groß ist die Leistungsaufnahme P der Glühlampe E1 (Bild 1)?

Lösung: $P = U \cdot I = 230\ \text{V} \cdot 0{,}43\ \text{A} = \mathbf{98{,}9\ W}$

Tabelle 1: Farbschlüssel für Widerstände



Kennfarbe	Widerstand in Ω: 1. Ziffer	2. Ziffer	Multiplikator	Toleranz des Widerstandswertes
Keine	–	–	–	± 20 %
Silber	–	–	10^{-2}	± 10 %
Gold	–	–	10^{-1}	± 5 %
Schwarz	–	0	10^{0}	–
Braun	1	1	10^{1}	± 1 %
Rot	2	2	10^{2}	± 2 %
Orange	3	3	10^{3}	–
Gelb	4	4	10^{4}	–
Grün	5	5	10^{5}	± 0,5 %
Blau	6	6	10^{6}	–
Violett	7	7	10^{7}	–
Grau	8	8	10^{8}	–
Weiß	9	9	10^{9}	–

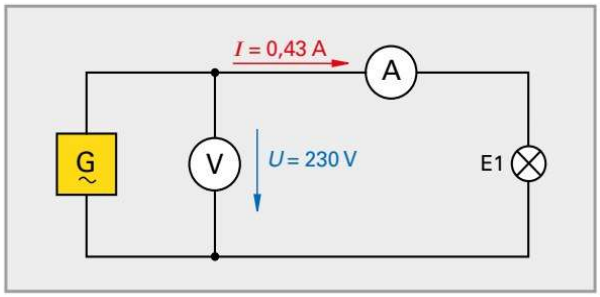


Bild 1: Schaltung zur indirekten Leistungsbestimmung von E1

$[P] = \text{V} \cdot \text{A} = \text{VA} = \text{W}$

$$P = U \cdot I$$

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$[P] = \text{A}^2 \cdot \Omega = \text{W}$

$[P] = \text{V}^2/\Omega = \text{W}$

$$W = P \cdot t$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

P Leistung
R Widerstand
W Arbeit
I Stromstärke
U Spannung
η Wirkungsgrad

6.2.4 Schaltungen mit Widerständen

Reihenschaltung

Bei der Reihenschaltung sind Erzeuger und Widerstände hintereinander geschaltet **(Bild 1)**. Alle Widerstände durchfließt der gleiche Strom, da keine Verzweigungen vorhanden sind. Die Teilspannungen verhalten sich proportional zu den Widerständen.

> Bei der Reihenschaltung teilt sich die Gesamtspannung auf die einzelnen Widerstände auf.

Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung sind die gleichartigen Anschlüsse von Verbrauchern oder Erzeugern miteinander verbunden **(Bild 2)**.

> Alle parallel geschalteten Widerstände sind an dieselbe Spannung angeschlossen.

Die Teilstromstärken verhalten sich bei der Parallelschaltung umgekehrt wie die zugehörigen Widerstandswerte.

Verzweigungspunkte der Ströme werden Knoten genannt (Bild 2). Auf den Knoten fließt der Strom I zu. Vom Knoten weg fließen die Ströme I_1 und I_2. Der Zusammenhang zwischen zufließenden und abfließenden Strömen wird als 1. Kirchhoff'sches[1] Gesetz bezeichnet.

> Bei der Parallelschaltung ist die Gesamtstromstärke gleich der Summe der Teilstromstärken.

Einen geschlossenen Umlauf entlang des Leiters eines Stromkreises bezeichnet man als Masche (Bild 2). Bei einem Maschenumlauf ist die Summe aller Spannungen gleich null (2. Kirchhoff'sches Gesetz).

Gemischte Schaltungen

Eine Schaltung, in der die Verbraucher zum Teil in Reihe und zum Teil parallel geschaltet sind, bezeichnet man als gemischte Schaltung (Gruppenschaltung). Im einfachsten Fall besteht die gemischte Schaltung aus drei Widerständen.

Spannungsteiler

Ein Spannungsteiler besteht aus zwei in Reihe geschalteten Widerständen R_1 und R_2 (Bild 1, rechts). Diese sind an die Gesamtspannung U angeschlossen. Am Widerstand R_2 wird im unbelasteten Zustand die Teilspannung U_{20} abgegriffen.

Unbelasteter Spannungsteiler. Ein Spannungsteiler ist *unbelastet,* wenn ihm kein Strom entnommen wird (Bild 1, rechts). Beim unbelasteten Spannungsteiler teilt sich die Gesamtspannung U in dieTeilspannungen U_1 und U_{20} auf. Die Spannungen verhalten sich wie die zugehörigen Widerstände.

[1] Robert Kirchhoff, deutscher Physiker, 1824 bis 1887

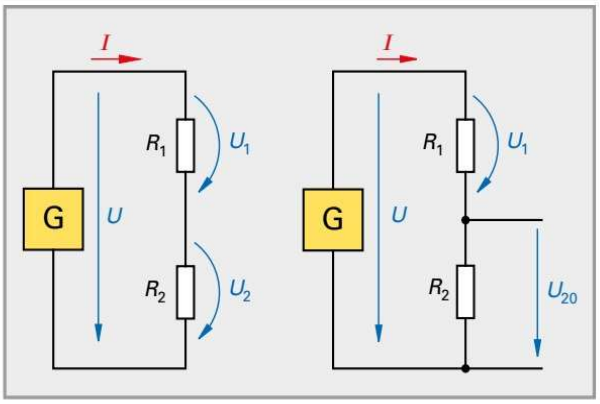


Bild 1: Reihenschaltung zweier Widerstände und Verwendung als Spannungsteiler

Reihenschaltung:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots \qquad R = R_1 + R_2 + \ldots$$

$$\frac{U_{20}}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

U	Gesamtspannung	U_1, U_2, U_{20}	Teilspannungen
R	Ersatzwiderstand	R_1, R_2	Einzelwiderstände

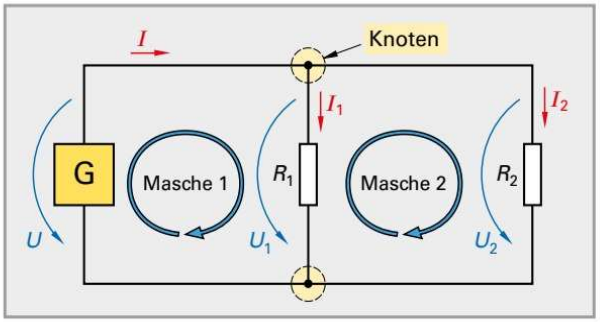


Bild 2: Parallelschaltung

Parallelschaltung:

$$I = I_1 + I_2 + \ldots \qquad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{G_1}{G_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots \qquad G = G_1 + G_2 + \ldots$$

n gleiche Widerstände:

$$R = \frac{R_1}{n}$$

2 Widerstände:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

I	Gesamtstromstärke	I_1, I_2	Teilstromstärken
R	Ersatzwiderstand	$R_1, R_2, \ldots$	Einzelwiderstände
G	Ersatzleitwert	$G_1, G_2, \ldots$	Einzelleitwerte
n	Anzahl der gleichen Widerstände		

6.2.5 Wechselgrößen

Periodendauer *T* und Frequenz *f*

Bei einer Wechselspannung ändern sich die Richtung und die Höhe der Spannung *periodisch* (sich wiederholend). Eine vollständige Schwingung nennt man eine *Periode* (griech. Periode = Zeit der Wiederkehr). Die Zeit dafür ist die Periodendauer *T* **(Bild 1).** Die Anzahl der Perioden in einer Sekunde ist die Frequenz *f* (lat. frequentia = Häufigkeit). Die Einheit der *Frequenz* ist das *Hertz*[1] (Hz). Im Amerikanischen wird c/s (cycles/sec) verwendet. Jede Wechselgröße erreicht einen *positiven Scheitelwert* (Höchstwert) + $\hat{u}$ und einen *negativen Scheitelwert* - $\hat{u}$ (Bild 1). Der Abstand zwischen beiden ist der *Spitze-Tal-Wert* oder die Schwingungsbreite $\hat{\hat{u}}$, im Amerikanischen mit u_{pp} (von peak-to-peak) abgekürzt.

Sinuslinie und Zeiger

Unter einem Zeiger verstehen wir eine Pfeilstrecke. Dreht sich ein Zeiger mit gleich bleibender Geschwindigkeit entgegen dem Uhrzeigersinn, so ändert sich dauernd der Abstand der Pfeilspitze von der Waagrechten. Trägt man diesen Abstand in Abhängigkeit vom Drehwinkel in ein Schaubild ein, so erhält man eine Sinuslinie (von lat. sinus = Bucht, Busen, **Bild 2).**

> Sinusförmige Wechselspannungen lassen sich auch durch rotierende Zeiger darstellen.

Kreisfrequenz ω

Die Drehzahl (Umdrehungsfrequenz) eines Zeigers ist so groß wie die Frequenz der von ihm dargestellten Sinusgröße. Bei der Drehung des Zeigers nimmt der von ihm überstrichene Winkel zu. Der Zeiger hat also je nach Umdrehungsfrequenz eine *Winkelgeschwindigkeit.* Die genormte Einheit ist 1/s. Die Winkelgeschwindigkeit des Zeigers bezeichnet man als *Kreisfrequenz* ω.

Phasenverschiebung φ

Gehen zwei Sinusgrößen gleicher Frequenz im Liniendiagramm an derselben Stelle in gleicher Richtung durch null, so sagt man, die beiden Größen sind *phasengleich* oder *in Phase* (von griech. phasis = Zustand) oder *ohne Phasenverschiebung* **(Bild 3).** Ersetzt man die Sinuslinien durch Zeiger, so liegt in diesem Zeigerbild zwischen den Zeigern der Winkel $\varphi = 0°$ (griech. Kleinbuchstabe Phi). Der Winkel φ zwischen Zeigern ist ein Maß für die Phasenverschiebung. Man nennt ihn den *Phasenverschiebungswinkel.*

Gehen zwei Sinusgrößen gleicher Frequenz nicht an derselben Stelle durch null, so sagt man, die beiden Größen sind *phasenverschoben* oder haben eine *Phasenverschiebung* **(Bild 4).**

[1] Heinrich Hertz, deutscher Physiker, 1857 bis 1894

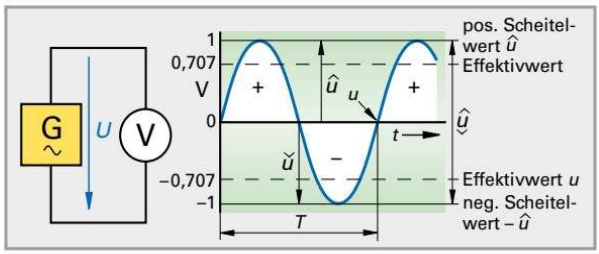


Bild 1: Bezeichnungen bei Wechselgrößen

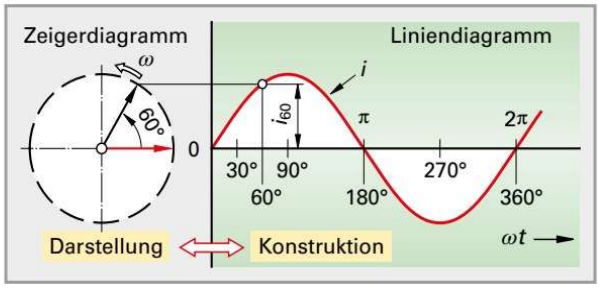


Bild 2: Konstruktion der Sinuslinie aus einem Zeiger und Darstellung einer Sinuslinie durch einen Zeiger

$[f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$ $\boxed{f = \frac{1}{T}}$ $[\omega] = \frac{1}{s}$ $\boxed{\omega = 2 \cdot \pi \cdot f}$

f Frequenz *T* Periodendauer

ω Kreisfrequenz (griech. Kleinbuchstabe Omega)

$[f] = 1\,\frac{c}{s}$ (c von cycle = Kreis, Periode) = 1 Hz

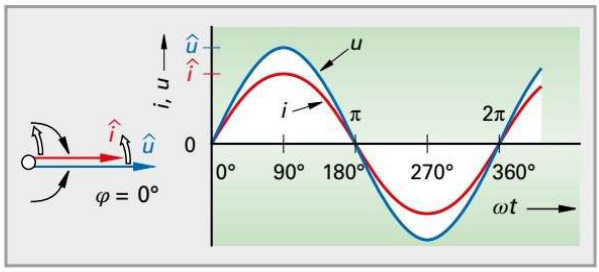


Bild 3: Sinusgrößen ohne Phasenverschiebung

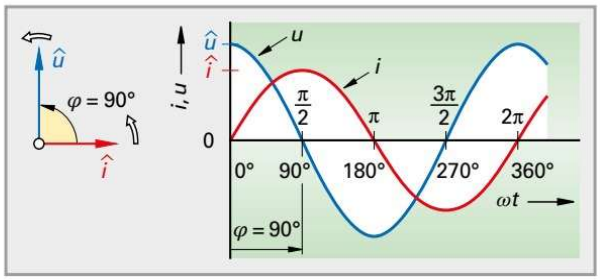


Bild 4: Sinusgrößen mit Phasenverschiebung

Effektivwert sinusförmiger Größen

Messgeräte für Wechselgrößen (Bild 1) zeigen meist *Effektivwerte* an. Der Zusammenhang zwischen dem Maximalwert $\hat{u}$ und dem Effektivwert *U* ist bei sinusförmigen Wechselgrößen $\hat{u} = 1{,}41 \cdot U$.

Nichtsinusförmige Wechselgrößen und Pulse
Es gibt auch rechteckförmige, dreieckförmige und sägezahnförmige Spannungen und Ströme. Diese können als symmetrische oder unsymmetrische Spannungen (Impulse) auftreten **(Bild 1)**.

Rechteckförmige Wechselspannungen oder rechteckförmige *Pulsspannungen* werden z. B. für die Übertragung von Informationen auf Leitungen verwendet. Pulsspannungen haben eine *Periodendauer T*. Für die *Impulsdauer* t_i wird auch der griechische Buchstabe τ verwendet, für die *Impulspausendauer* t_p auch τ_p.

Das Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer ist der *Tastgrad g*.

$g = \frac{t_i}{T}$	g	Tastgrad
	t_i	Impulsdauer (auch τ)
	T	Periodendauer

6.2.6 Kondensator, Spule, Transformator

Kondensator
Ein *Kondensator* (von lat. condensus = dicht gedrängt) besteht grundsätzlich aus zwei leitenden Platten, zwischen denen sich ein Isolierstoff (*Dielektrikum*, von lat. di = weg, d. h. ohne elektrische Leitfähigkeit) befindet. Wird der Kondensator an Spannung gelegt, so fließt kurzzeitig ein Ladestrom. Dabei fließen Elektronen auf die eine Platte, während gleich viele Elektronen durch Abstoßung von der anderen Platte abfließen. Beide Platten sind nun entgegengesetzt elektrisch geladen. Zwischen den beiden Platten ist ein elektrisches Feld aufgebaut. Der Kondensator speichert Energie in Form von Ladungen. **Bild 2** zeigt den Aufbau eines Folienkondensators.

Kapazität
Das Fassungsvermögen der Kondensatoren für elektrische Ladung kann bei gleich hoher Spannung verschieden sein. Man nennt die Ladung je Volt angelegter Spannung die *Kapazität* (Aufnahmevermögen) des Kondensators (Formelzeichen *C*). Die Einheit der Kapazität ist die Amperesekunde je Volt (As/V). Diese Einheit hat den Einheitennamen Farad (Einheitenzeichen F, nach Faraday[1]).

Beispiel 1: Kondensatorladung berechnen

Wie groß ist die Ladung eines Kondensators mit einer Kapazität von 16 µF, wenn er an eine Gleichspannung von 300 V gelegt wird?

Lösung:

$Q = C \cdot U = 16 \cdot 10^{-6}\,\text{F} \cdot 300\,\text{V} = 48 \cdot 10^{-4}\,\text{C} = \mathbf{4{,}8\ mC}$

[1] Michael Faraday, engl. Physiker, 1791 bis 1867

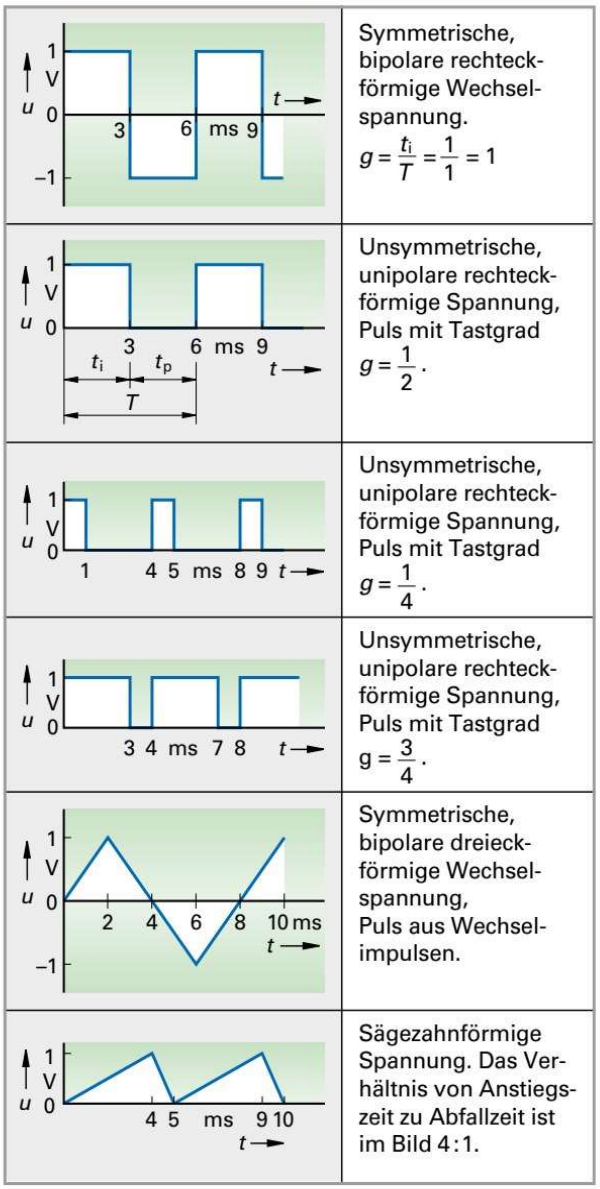


Bild 1: Nichtsinusförmige Spannungsformen

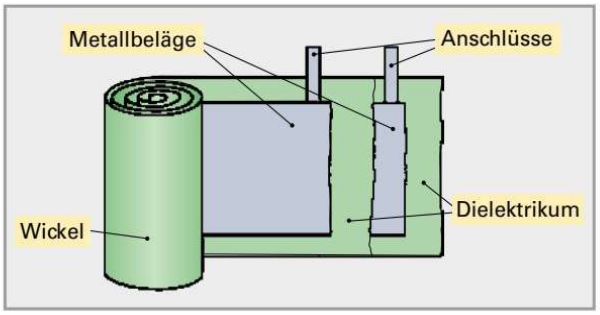


Bild 2: Aufbau eines Folienkondensators

Kapazität eines Plattenkondensators
Je größer die Plattenfläche ist, umso mehr Ladung kann der Kondensator bei gleicher Spannung aufnehmen und um so größer ist deshalb seine Kapazität. Die Kapazität ist proportional zur Plattenfläche *A*.

Die in den Kondensator fließende Ladung wird aber auch größer, wenn man den Plattenabstand verkleinert, weil dadurch die elektrische Feldstärke zunimmt. Die Kapazität ist also umgekehrt proportional zum Plattenabstand l.
Die Kapazität kann man außerdem durch ein geeignetes isolierendes Material zwischen den Platten erhöhen. Diese Isolierschicht wird als Dielektrikum bezeichnet.

Beispiel 1: Kapazität berechnen

Ein Plattenkondensator besteht aus zwei Platten mit je 200 cm² Fläche. Der Plattenabstand beträgt 2 mm. Welche Kapazität hat der Kondensator, wenn das Dielektrikum Hartpapier ($\varepsilon_r = 4$) ist?

Lösung: $C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{l} =$

$$= \frac{8{,}85\ \text{pAs/(Vm)} \cdot 4 \cdot 200\ \text{cm}^2}{2\ \text{mm}} = \mathbf{354\ pF}$$

Beim Folienkondensator verdoppelt sich die durch das Wickeln der Folien wirksame Fläche und somit die Kapazität.

Kapazitiver Blindwiderstand

Wird ein Folienkondensator an eine sinusförmige Wechselspannung angeschlossen, so werden seine Platten abwechselnd positiv und negativ geladen.
In der Leitung fließt abwechselnd ein Ladestrom und ein Entladestrom, also ein Wechselstrom.
Wird eine Glühlampe in Reihe zu einem Kondensator an Wechselspannung angeschlossen, so hat die Glühlampe erst bei einer wesentlich höheren Spannung die gleiche Helligkeit wie bei direktem Anschluss der Glühlampe an die Spannung.
Wechselt man den Kondensator gegen einen Kondensator mit kleinerer Kapazität aus, so nimmt die Helligkeit der Glühlampe ab. Der Kondensator wirkt im Wechselstromkreis also als Widerstand. Dieser nimmt mit steigender Frequenz und größer werdender Kapazität ab, da der Kondensator häufiger umgeladen wird und ein größerer Strom fließt **(Bild 1)**.

Der kapazitive Blindwiderstand ist umso größer, je niedriger die Frequenz und je kleiner die Kapazität ist.

Zum Aufbau des elektrischen Feldes benötigt der Kondensator Leistung. Beim Abbau des elektrischen Feldes wird die gleiche Leistung wieder an den Spannungserzeuger abgegeben. Im Mittel ist die Leistung null. Die zwischen Kondensator und Erzeuger hin und herpendelnde Leistung nennt man *Blindleistung* (siehe folgende Seite). Der ideale Kondensator nimmt nur Blindleistung auf. Er ist deshalb ein *kapazitiver Blindwiderstand.*

Kondensatoren, die an Spannungen angeschlossen waren, sind aus Sicherheitsgründen vor Arbeitsaufnahme oder nach einem Versuch über einen Widerstand zu entladen. Das gilt auch bei Reparaturen an Netzteilen.

$[Q] = \text{As} = \text{C}$

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$

$[C] = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$

$$C = \frac{Q}{U}$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{l}$$

Q Ladung C Kapazität U Spannung
ε Permittivität
ε_0 elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8{,}85\ \text{pC/(Vm)} = 8{,}85\ \frac{\text{pF}}{\text{m}}$
ε_r Permittivitätszahl (materialabhängig)
A gleichartig geladene Plattenoberfläche
l Plattenabstand

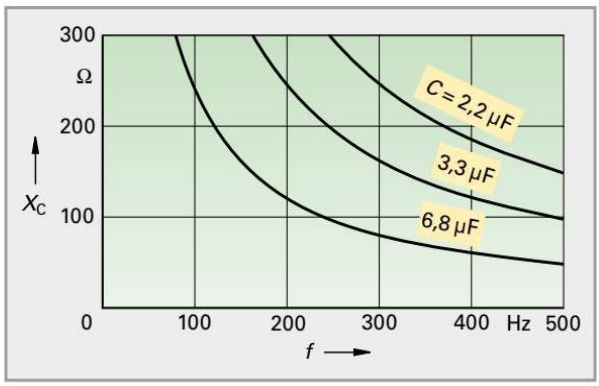


Bild 1: Abhängigkeit des kapazitiven Blindwiderstands von der Frequenz und der Kapazität

$$[X_C] = \frac{\text{s}}{\text{F}} = \frac{\text{s} \cdot \text{V}}{\text{As}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega \qquad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

X_C kapazitiver Blindwiderstand ω Kreisfrequenz
C Kapazität

Beispiel 2: Kapazität berechnen

Welche Kapazität hat ein Kondensator, dessen Blindwiderstand bei 1000 Hz 1591,5 Ω beträgt?

Lösung:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000\ \text{1/s} \cdot 1591{,}5\ \Omega} = \mathbf{0{,}1\ \mu F}$$

Phasenverschiebung

Die Ladestromstärke und die Entladestromstärke sind der Änderungsgeschwindigkeit der Spannung proportional. Damit eilt der Strom der Spannung *phasenverschoben* um 90° voraus.

Spule

Eine Spule besteht aus dem Spulenkörper, der Wicklung sowie einem Kern. Beim Schließen und Öffnen eines Stromkreises mit einer Spule ändert sich der magnetische Fluss in der Spule. Beim Öffnen wird in ihr eine Spannung induziert. Man nennt diesen Vorgang *Selbstinduktion.*

Wird der Stromkreis durch Betätigen des Schalters geöffnet, leuchtet die Glimmlampe kurz auf **(Bild 1)**. Durch die schnelle Flussänderung entsteht eine hohe Induktionsspannung u_i von z. B. 80 V. Angewendet werden Induktionsspannungen z. B. als Zündspannung für Leuchtstoffröhren oder zur Spannungserzeugung in Schaltnetzteilen. Zu hohe Induktionsspannungen können den Transistor zerstören.

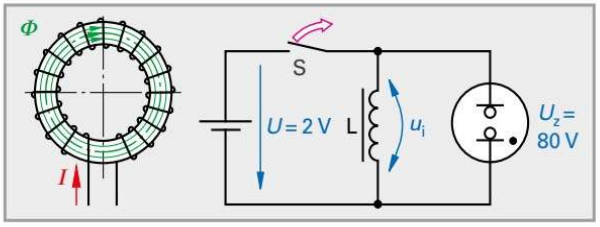


Bild 1: Ring-Kernspule und Spule mit Kern im Gleichstromkreis bei Schalteröffnung

$$u_i = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \qquad L = N^2 \cdot A_L$$

$[L] = \text{Vs/A} = \text{H}$

u_i	induzierte Spannung
Δi	lineare Änderung der Stromstärke
Δt	Zeit, in der die Änderung der Stromstärke erfolgt
A_L	Spulenkonstante
L	Induktivität der Spule
N	Windungszahl

Induktivität

Die Größe der Flussänderung, durch die in einer Spule durch Selbstinduktion eine Spannung induziert wird, hängt neben der Stromänderung von den Spulendaten ab. Die Spulendaten sind in der *Spulenkonstanten* A_L zusammengefasst. Das Produkt $N^2 \cdot A_L$ nennt man die *Induktivität L* der Spule. Ihre Einheit ist Voltsekunde/Ampere mit dem besonderen Einheitennamen Henry[1] (H).

Induktive Blindleistung

Liegt eine Spule an Wechselspannung, so steigt infolge der Selbstinduktion die Stromstärke durch die Spule nur langsam an und fällt anschließend langsam ab. Erfolgt die Umpolung genügend rasch, so kann die Stromstärke ihren Endwert nicht erreichen. Die mittlere Stromstärke nimmt ab. Sie wird umso kleiner, je rascher die Umpolung erfolgt.

Im Mittel ist die Leistung für den Aufbau und den Abbau des magnetischen Feldes null. Die zwischen Spule und Erzeuger hin und her pendelnde Leistung nennt man Blindleistung. Die Spule hat deshalb einen induktiven *Blindwiderstand* X_L, der von der Kreisfrequenz ω und der Induktivität L abhängt. Es gilt bei sinusförmiger Spannung $X_L = \omega \cdot L$.

Reale Spulen nehmen die Blindleistung Q und Wirkleistung P auf und geben die Blindleistung wieder ab. Das Produkt aus gemessener Spannung und Strom nennt man Scheinleistung S.

Transformator

Transformatoren werden meist für die Energieübertragung verwendet. Der Transformator trennt die Wechselspannungen U_1 und U_2 **(Bild 2)**. Dies nennt man galvanische[2] Trennung. Transformatoren übertragen keine Gleichspannungen.

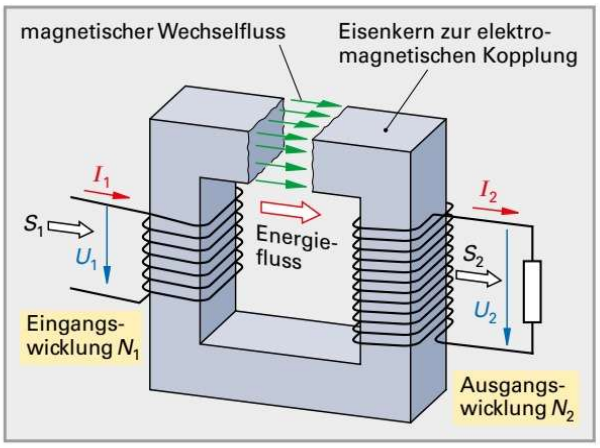


Bild 2: Energiefluss beim Transformator

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} \qquad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

N	Windungszahl	$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis
U_1	Eingangsspannung	U_2	Ausgangsspannung
N_1	Windungszahl der Eingangswicklung		
N_2	Windungszahl der Ausgangswicklung		

Beim idealen Transformator ist die Eingangsscheinleistung S_1 so groß wie die Ausgangsscheinleistung S_2 und die Spannungen verhalten sich wie die Windungszahlen

$S_1 = S_2 \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

$\Rightarrow I_1/I_2 = U_2/U_1 \Rightarrow I_1/I_2 = N_2/N_1$

[1] Joseph Henry, amerikanischer Physiker, 1797 bis 1878

[2] Luigi Galvani, italienischer Physiker, 1737 bis 1798

6.2.7 Dioden und Transistoren

Die Grenze zwischen zwei Halbleiterzonen mit verschiedenen Dotierungen nennt man *PN-Übergang*.

Ein PN-Übergang wirkt als Halbleiterdiode **(Bild 1)**. Entsprechend den Stromrichtungen unterscheidet man bei der *Diode* die *Vorwärtsrichtung* und die *Rückwärtsrichtung*. Unabhängig von diesen Stromrichtungen bezeichnet man die Betriebszustände als Durchlasszustand und Sperrzustand.

Die Spannung U_s, bei welcher der Vorwärtsstrom merklich anzusteigen beginnt, wird *Schleusenspannung* genannt **(Bild 2)**. Sie beträgt bei Silicium etwa 0,7 V.

Die Diodenanschlüsse werden *Anode* und *Katode* genannt (Bild 2). Die Anode ist die positive Elektrode (P-Schicht) und die Katode ist die negative Elektrode (N-Schicht) einer in Vorwärtsrichtung gepolten Diode.

> Die Pfeilspitze des Diodenschaltzeichens gibt die Stromrichtung in Vorwärtsrichtung an.

Gleichrichterdioden

Netzanschlussgeräte für elektronische Schaltungen enthalten meist Gleichrichterschaltungen. Diese bestehen z. B. aus einem Transformator, einer Diode und einem Siebkondensator **(Bild 3, oben)**. Die Diode lässt den Vorwärtsstrom nur fließen, wenn die Wechselspannung so gepolt ist, dass die Diode in Vorwärtsrichtung geschaltet und die Spannung größer als die Schleusenspannung ist. Ist die Diode in Rückwärtsrichtung geschaltet, so fließt nur der sehr schwache Rückwärtsstrom.

Leuchtdioden (LED)

Leuchtdioden (*LED*, von Light Emitting Diode) werden in Vorwärtsrichtung betrieben **(Bild 3, Mitte)**. Je nach Halbleiterwerkstoff ist die Strahlung im Infrarotbereich oder im sichtbaren Bereich. LEDs haben Schleusenspannungen von z. B. 1,3 V (Farbe rot), 2,2 V (Farbe grün), 3,5 V (Farbe weiß). Der Vorwiderstand muss so gewählt werden, dass die LED mit ihrem Bemessungsstrom, z. B. 10 mA, betrieben wird. Die Sperrspannung U_{Rmax} ist $\approx$ 5 V.

Z-Diode

Z-Dioden bestehen aus Silicium und sind durch starke Dotierung für den Betrieb in Sperrrichtung (Durchbruchsbereich) ausgelegt. In Vorwärtsrichtung verhalten sie sich wie gewöhnliche Siliciumdioden. Erreicht die Rückwärtsspannung den Wert der Durchbruchspannung, so bewirkt eine kleine Spannungserhöhung eine große Stromerhöhung. In diesem Bereich bleibt die Spannung an der Z-Diode fast konstant. Dies wird für die Spannungsstabilisierung und Spannungsbegrenzung ausgenützt **(Bild 3, unten)**.

> **!** Nach der Betriebsmittelkennzeichnung werden Dioden und Z-Dioden auch mit R bezeichnet, wenn sie zur Strombegrenzung dienen (DIN EN 61-342-2).

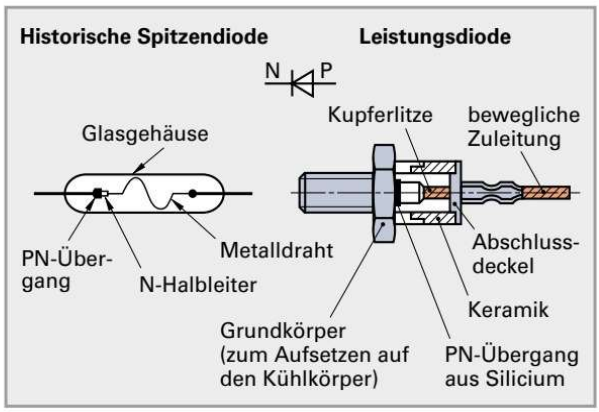


Bild 1: Aufbau von Dioden

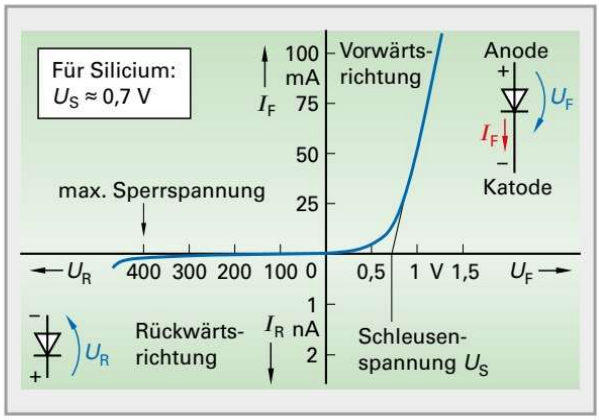


Bild 2: Kennlinie einer Diode

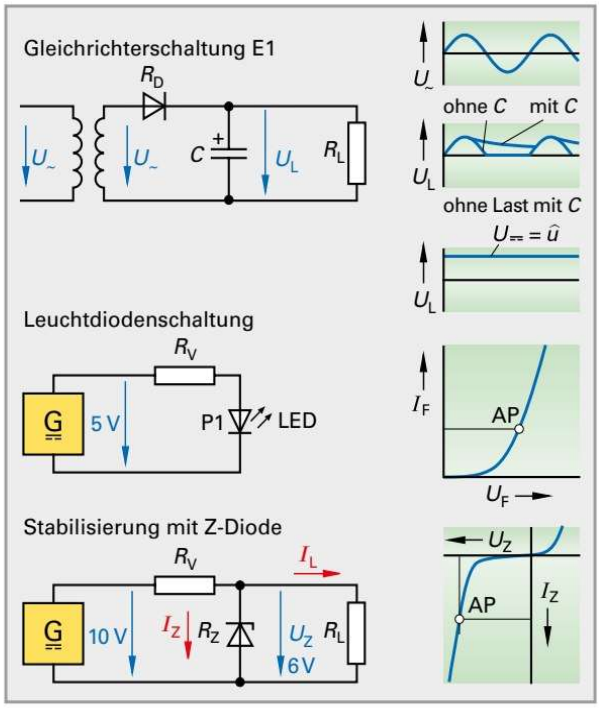


Bild 3: Schaltungen mit Dioden

Transistoren
Transistoren (Kunstwort aus Transfer und Resistor) haben drei Anschlüsse. Transistoren gibt es in verschiedenen Bauformen **(Bild 1)**.

Bipolare Transistoren. Die Anschlüsse sind die Basis B, der Kollektor C (von lat. collectus = gesammelt) und der Emitter E (von emittieren = aussenden). Sie erhalten drei Halbleiterschichten. N-Leiter und P-Leiter wechseln ab. Es gibt entsprechend der Schichtfolge PNP-Transistoren und NPN-Transistoren.

Transistoren sind Halbleiterbauelemente, die mit einem kleinen Steuerstrom I_B einen großen Laststrom I_C schalten oder verändern können. Der Anschluss, durch den Steuerstrom und Laststrom fließen, gibt der Schaltung ihren Namen, z. B. Emitterschaltung **(Bild 2)**. So kann man z. B. mit dem Basisstrom I_B = 8 mA mit I_C = 183 mA eine Lampe oder einen PC-Lüftermotor einschalten oder mit I_B = 0 mA ausschalten. Mit der Höhe des Basisstroms kann die Helligkeit der Lampe verändert werden. Der Transistor verhält sich dabei wie ein steuerbarer Widerstand. In dieser Betriebsart nennt man den Transistor Steller oder Stellglied, z.B. in der Regelungstechnik.

Feldeffekttransistoren (FET). Bei den FET nennt man die Halbleiterstrecke für den Laststrom Kanal. Man unterscheidet FET mit N-Kanal und P-Kanal. Die Anschlüsse des FET heißen Gate G (Tor), Source S (Quelle) und Drain D (Senke, Bild 1). FETs haben einen sehr großen Eingangswiderstand und damit keinen Steuerstrom, d. h. die Steuerung ist leistungslos. Je nach Isolierung des Gates vom Kanal unterscheidet man PN-FET (= J-FET) und IG-FET (von IG Insulated Gate = isoliertes Gate, **Bild 3**).

Insulated Gate Bipolar Transistor. In einem IGBT ist ein isoliertes Gate (IG) enthalten, zur Ansteuerung eines bipolaren Transistors **(Bild 4)**. Die Anschlüsse heißen Gate G, Kollektor C und Emitter E. Die Steuerleistung ist wie beim FET. IGBTs werden für Sperrspannungen bis 6500 V, Bemessungsströme von 1400 A und Schaltfrequenzen von 500 kHz gefertigt.

Darlington-Schaltung. Die Darlington[1]-Schaltung besteht aus zwei bipolaren Transistoren **(Bild 5)**. Der erste Transistor steuert mit seinem Emitter direkt die Basis des zweiten Transistors an. Die Kollektoren sind verbunden. Die Darlington-Schaltung kann große Ströme mit einer kleinen Leistung schalten. Anwendungen sind z. B. Relaistreiber. Die Verstärkungen der beiden Einzeltransistoren multiplizieren sich, B = B1 · B2.

[1] Sydney Darlington, amerikan. Ingenieur 1906 bis 1997

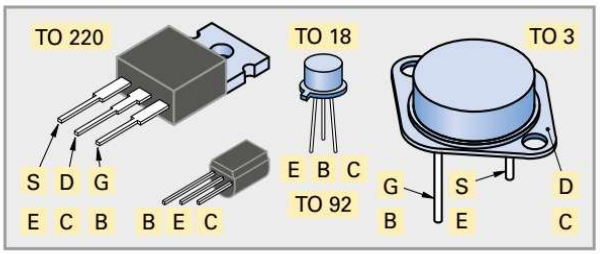


Bild 1: Anschlüsse, Gehäuse und Gehäusebezeichnungen von Transistoren

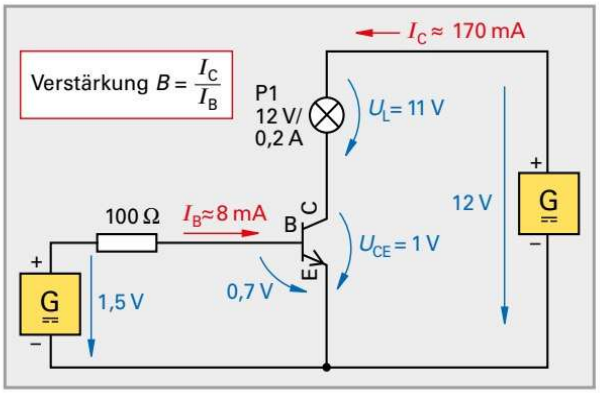


Bild 2: Emitterschaltung mit NPN-Transistor

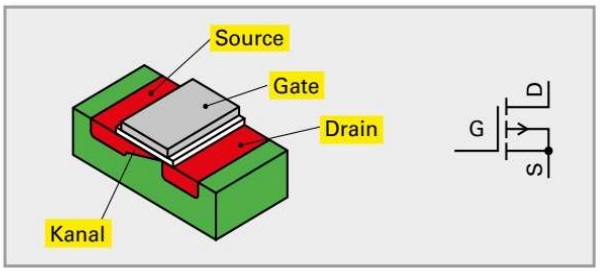


Bild 3: IG-FET mit N-Kanal und Schaltzeichen

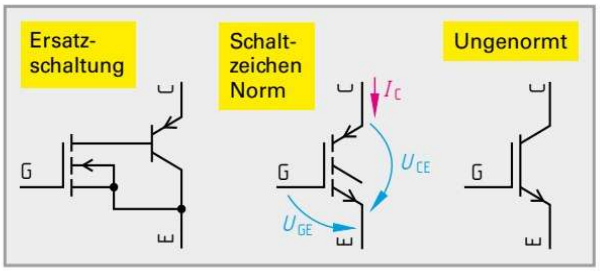


Bild 4: Ersatzschaltung und Schaltzeichen von IGBT

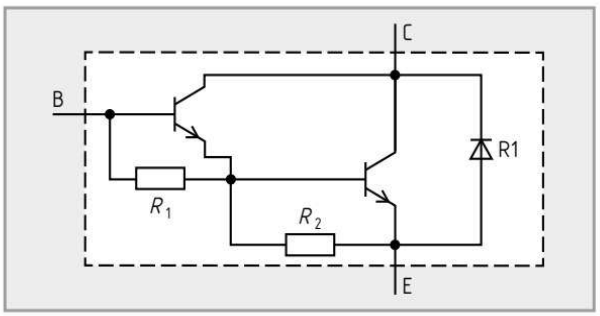


Bild 5: Darlington-Transistor-Schaltung

6.2.8 Operationsverstärker

Operationsverstärker sind lineare integrierte Schaltkreise. Mit Operationsverstärkern können sowohl Gleichspannungen als auch Wechselspannungen verstärkt werden **(Bild 1)**. Besondere Eigenschaften sind ein sehr großer *Spannungsverstärkungsfaktor*, z. B. $V_0 = 10^6$, ein großer Leistungsverstärkungsfaktor, ein sehr großer Eingangsinnenwiderstand, z. B. $R_e = 1\ \text{G}\Omega$, und ein kleiner Ausgangsinnenwiderstand. V_0 sinkt mit steigender Frequenz der Spannung U_1.

Bei den meisten Operationsverstärkern erreicht die Ausgangsspannung U_a nicht ganz den Wert der Betriebsspannungen $-U_b$ und $+U_b$. Rail-to-Rail-Operationsverstärker können am Ausgang bis an die Grenzen der Betriebsspannungen gesteuert werden.

Operationsverstärker werden z. B. mit den Betriebsspannungen $U_b = +15$ V und $-U_b = -15$ V oder $U_b = 18$ V und $-U_b = 0$ V versorgt.

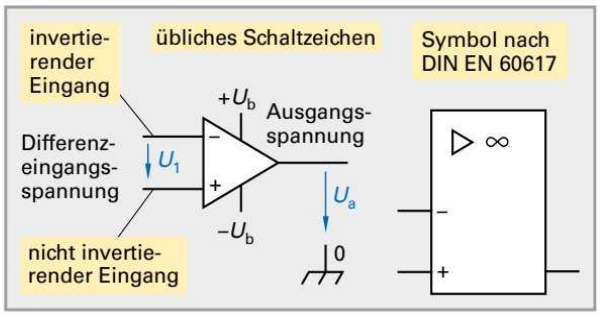


Bild 1: Schaltzeichen und Symbol für Operationsverstärker

Invertierender Verstärker (Umkehrverstärker)

Mit der Schaltung wird eine Spannung U_e im Vorzeichen umgekehrt und im Betrag vergrößert oder verkleinert. Hierzu beschaltet man den Operationsverstärker mit einem Gegenkopplungswiderstand R_K und einem Eingangswiderstand R_e **(Bild 2)**. Der Eingangsstrom I_e fließt über R_K zum Verstärkerausgang. Mit $U_a = -U_K$ wird $U_a = -I_e \cdot R_K$, und mit $I_e = U_e/R_e$ die Ausgangsspannung $U_a = -(R_K/R_e) \cdot U_e$.

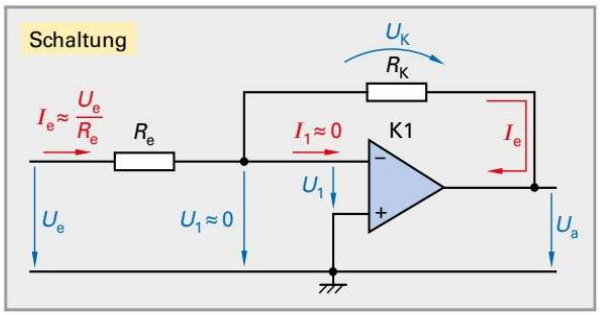


Bild 2: Invertierender Verstärker

Beispiel 1: Spannungsverstärkungsfaktor

Berechnen Sie den Spannungsverstärkungsfaktor V für einen invertierenden Verstärker mit $R_e = 1\ \text{k}\Omega$ und $R_K = 10\ \text{k}\Omega$.

Lösung:

$V = -R_K/R_e = -10\ \text{k}\Omega/1\ \text{k}\Omega = \mathbf{-10}$

Nicht invertierender Verstärker

Beim nicht invertierenden Verstärker haben Eingangsspannung und Ausgangsspannung gleiches Vorzeichen. Die Eingangsspannung U_e wird an den nicht invertierenden Eingang angeschlossen **(Bild 3)**. Der Eingangsstrom I_e ist wegen des hochohmigen Eingangsinnenwiderstandes des Operationsverstärkers sehr klein. Die Ausgangsspannung U_a wird zum invertierenden Eingang über den Rückkopplungswiderstand R_K zurückgeführt.

Die Schaltung arbeitet als Impedanzwandler, d.h. R_{ein} ist sehr groß und R_{aus} ist sehr klein.

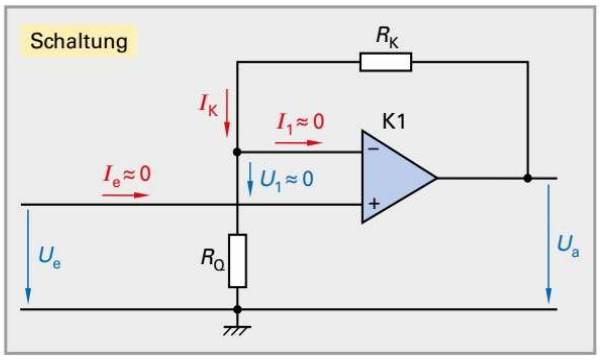


Bild 3: Nicht invertierender Verstärker

Beim invertierenden Verstärker:

$$U_a = -\left(\frac{R_K}{R_e}\right) \cdot U_e \qquad U_a = V \cdot U_e \qquad V = -\frac{R_K}{R_e}$$

Beim nicht invertierenden Verstärker:

$$U_a = \left(1 + \frac{R_K}{R_Q}\right) \cdot U_e \qquad V = 1 + \frac{R_K}{R_Q}$$

U_a Ausgangsspannung
U_e Eingangsspannung
R_Q Eingangsquerwiderstand
R_S Schutzwiderstand
R_K Rückkopplungswiderstand
R_e Eingangswiderstand
V Spannungsverstärkungsfaktor

Anwendungen von Operationsverstärkern

- Signalverstärker, Messverstärker,
- P-Regler,
- Pegel- und Impedanzanpassung.

6.3 Elektrostatik

Geräte mit elektronischen Bauelementen sind empfindlich gegen elektrostatische Entladungen (ESD = Electro Statical Discharge). Es handelt sich vor allem um hochohmige Bauteile wie MOSFETs, integrierte Schaltungen in CMOS-Technologie, Computer-Boards, Laserdioden und blau emittierende Leuchtdioden.

6.3.1 Entstehung elektrostatischer Aufladung

Werden zwei verschiedene Werkstoffe, von denen einer wenigstens nicht leitend ist, in engen Kontakt gebracht, entsteht der tribo-elektrische Effekt (von griech. Tribos = Reibung): An der gemeinsamen Grenzschicht wandern bei hinreichender Temperatur Elektronen mit der kleineren Austrittsenergie zu dem Material mit der größeren Austrittsenergie und laden es negativ auf **(Bild 1)**. Hält die übertragene Ladung der Austrittsenergie das Gleichgewicht, so ist an der elektrischen Doppelschicht eine Spannung im Millivoltbereich wirksam. Erfolgt zusätzlich eine Gegeneinanderbewegung der beiden aneinanderliegenden Werkstoffe durch Pressen oder Reiben, verringert sich der Abstand und die Zahl der austretenden Elektronen wird stark erhöht (Bild 1).

Bei einer Trennung der beiden aneinanderliegenden Materialien kommt es zur Abstandsvergrößerung der Ladungen um mehrere Zehnerpotenzen. Dadurch verringert sich die wirkende Kapazität ähnlich wie bei einem geladenen Plattenkondensator, der an keine Spannungsquelle angeschlossen ist und dessen Plattenabstand vergrößert wird. Ohne Ladungsausgleich führt dies zum Anwachsen der Spannung um mehrere Zehnerpotenzen.

Beispiel 1: Ladungsspannung berechnen

Wie groß ist die entstehende Spannung U_2 ohne Ladungsausgleich, wenn der Materialabstand bei U_1 = 1 mV von d_1 = 1 nm auf d_2 = 0,1 m erhöht wird?

Lösung:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{0{,}1\ \text{m}}{1\ \text{nm}} = 10^8$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{C_1 \cdot U_1}{C_2} = 10^8 \cdot 1\ \text{mV} = \mathbf{100\ kV}$$

Beim Trennen der Ladungen findet in der Praxis sofort ein Ladungsausgleich über den Kontaktwiderstand statt. Wie beim Entladevorgang eines Kondensators über einen Widerstand (Zeitkonstante) benötigt die zurückfließende Ladung aber Zeit. Sie ist abhängig vom Materialwiderstand, dem Kontaktwiderstand und der Schnelligkeit der Trennung.

! **Electrostatic Sensitive Devices** (ESD) sind Halbleiterbauelemente, die durch elektrostatische Entladungen beschädigt oder zerstört werden können. ESD-Bauteile werden für den Transport in leitende Folien oder Verschäumungsmaterial verpackt, damit sie weder beim Transport noch beim Entpacken durch elektrostatische Entladungen beschädigt werden können.

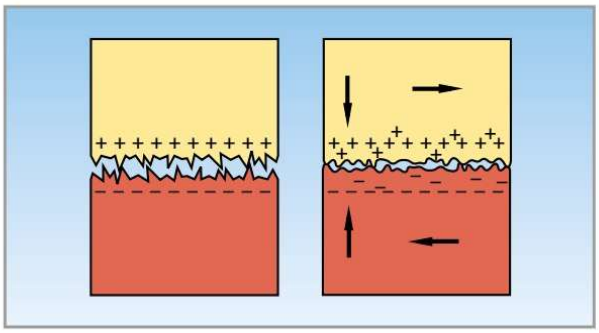


Bild 1: Trennflächenladung und Reibung

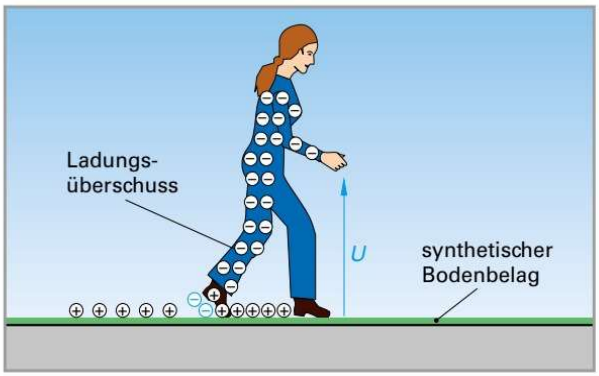


Bild 2: Aufladung beim Gehen

Zwischen berührenden Festkörperoberflächen findet ein Ladungsträgeraustausch statt.

Wenn z. B. beim gehenden Menschen die Entladung vorzeitig unterbrochen wird, entsteht ein Potenzial von bis zu 20 kV gegen Erde, da sich bei gut isolierenden Schuhen mit jedem Tritt eine immer höhere Spannung aufbaut. Eine elektrostatische Entladung des aufgeladenen Menschen ist jedoch ungefährlich, da die gesamte übertragene Ladung gering ist. Der Mensch kann sie nur deshalb spüren, weil der Entladungskanal (kleiner Blitz) einen sehr kleinen Durchmesser hat. An der Eintrittsstelle ist die Stromdichte so hoch, dass die Nervenzellen durch den Strom angeregt werden.

Beispiel 2: Ladungsmenge berechnen

Der menschliche Körper hat eine Eigenkapazität von 150 pF. Welche elektrische Ladung besitzt er, wenn er auf 20 kV aufgeladen ist?

Lösung:

$Q = C \cdot U$ = 150 pF · 20 kV = **3 µAs**

6.3.2 Auswirkungen elektrostatischer Entladungen

Elektrostatische Entladungen bewirken in elektronischen Bauteilen die Zerstörung von leitenden Verbindungen, isolierenden Schichten und von Halbleiterstrukturen **(Bild 1)**. Im Verhältnis zur Masse verhält sich die Energie einer statischen Entladung in einem Halbleiter wie ein Blitzschlag in einem Baum. Dies kann zu sofortigem Ausfall der Bauelemente führen. Empfindliche Bauelemente werden deshalb mit integrierten ESD-Schutzschaltungen versehen **(Bild 2)**. Sie schützen aber nur bis zu einer bestimmten Spannung und dienen hauptsächlich zur Ableitung von Aufladungen, die z. B. beim Gleiten durch die Verpackung aus dem Stangenmagazin entstehen. Elektrostatisch gefährdete Bauteile sind besonders gekennzeichnet **(Bild 3)**.

Zerstörte Schutzdioden wirken wie Widerstände und lassen bei Weiterbestehen der logischen Funktion die Stromaufnahme der IC bis auf das 500-fache steigen, z. B. von 2 µA auf 1 mA bei CMOS-Logik. Wurden viele Bauelemente beschädigt, kann es im Betrieb zur zeitweisen Überlastung der Stromversorgung kommen, was mit einem Absinken der Versorgungsspannung verbunden ist. Dadurch arbeiten solche Systeme plötzlich unzuverlässig, ohne dass der Fehler leicht zu lokalisieren ist.

Eine weitere Gefahr entsteht durch Ladungsverschiebungen. Ursache ist hier die elektrostatische Aufladung durch Influenz (Beeinflussung).

6.3.3 Mittel zur ESD-Vermeidung

Bereits eine ausreichend hohe relative Luftfeuchtigkeit kann statische Aufladung stark vermindern **(Tabelle 1)**. Gefährlich sind schnelle Temperaturveränderungen z. B. durch Lüften im Winter. So sinkt die relative Luftfeuchtigkeit von 80 % bei –10 °C auf 7 % bei +25 °C.

Es muss also dafür gesorgt werden, dass zerstörende Entladungen nicht entstehen können. Unfälle durch erschreckende Entladungen müssen vermieden werden. Dies wird erreicht, indem alle Beteiligten durch elektrisch ableitfähige Systeme miteinander verbunden werden. Sie haben dann dasselbe elektrische Potenzial.

Maßnahmen gegen statische Aufladungen und elektrische Felder sind in der DIN EN 61340-5-1 beschrieben.

Elektrostatisch geschützte Arbeitsplätze (EPA) umfassen die Raumausstattung, die Personenausstattung, die Verpackungen, die Werkzeuge und die Messgeräte.

! Zum Schutz gegen elektrostatische Entladungen sind die Arbeitsplätze als Electrostatic Protected Areas (EPA) mit Erdpotenzialbezugsflächen (ERP = earth reference plane) ausgestattet.

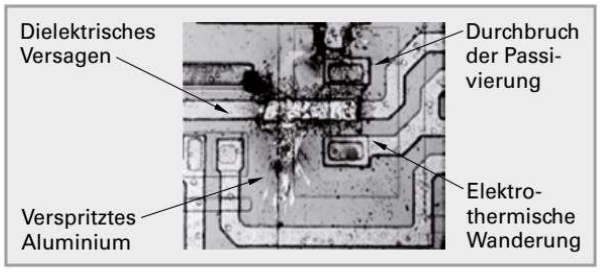


Bild 1: Zerstörung von IC-Strukturen durch ESD

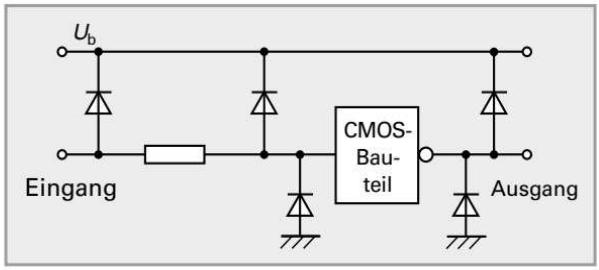


Bild 2: CMOS-Schutzbeschaltung

Bild 3: Warnzeichen elektrostatisch gefährdeter Bauteile

Tabelle 1: Spannungswerte bei elektrostatischer Aufladung

Ereignis/Tätigkeit	relative Feuchtigkeit		
	10 %	40 %	55 %
Gehen über einen Teppichboden	35 kV	15 kV	7,5 kV
Gehen über einen Kunststoffboden	12 kV	5 kV	3 kV
Bewegung am Arbeitsplatz	6 kV	800 V	400 V
Entnahme von Dual in-Line Gehäusen (DIPs) aus Kunststangen	2 kV	700 V	400 V
Entnahme von DIPs aus Kunststofftrays	11,5 kV	4 kV	2 kV
Entnahme von DIPs aus Styroporverpackungen	14,5 kV	5 kV	3,5 kV
Entfernen der Luftpolsterverpackung von Platinen	26 kV	20 kV	7 kV
Verpacken von Platinen in tiefgezogene Kunststoffschachteln	21 kV	11 kV	5,5 kV

Zum Schutz von IT-Anlagen und Geräten tragen die Mitarbeiter beim Arbeiten leitendes Schuhwerk und Arbeitskleidung aus Baumwolle (keine Kunstfasern). Der Umgang mit elektronischen Bauteilen erfordert eine Schulung der Mitarbeiter. Folgende Maßnahmen müssen beachtet werden:

Handgelenk-Erdungsband

Ein Handgelenk-Erdungsband ist die Hauptschutzmaßnahme für den ESDS-Schutz und die sicherste Methode Personenaufladungen gegen einen EPA-Erdungsanschlusspunkt abzuleiten (**Bild 1**).

Erdungs-/Anschlussysteme

Bei den Erdungs-/Anschlusssystemen ist die bevorzugte Erdungsmethode der Schutzleiter. Erdungs-/Anschlusssysteme müssen verwendet werden, damit ESD-empfindliche Komponenten und Personen das gleiche elektrische Potenzial besitzen. Die Erdungseinrichtung muss mechanisch widerstandsfähig und korrosionsbeständig sein z. B. durch Löten, Verschrauben oder Einrast-Stecksysteme 6,3 mm.

Handhabung

Elektrostatisch gefährdete Geräte (ESDS) und elektrostatisch empfindliche Bauteile dürfen nur in ESD-Schutzzonen (EPAs) gehandhabt und verarbeitet werden (**Bild 2**). Um einen umfassenden Schutz gegen elektrostatische Auf- und Entladungen zu erreichen, müssen im gesamten Arbeitsprozess die Handhabungsvorschriften für elektrostatisch gefährdete Bauelemente konsequent beachtet und angewendet werden.

Kennzeichnung und Abgrenzung

Alle dauerhaften ESD-Schutzzonen (EPAs) müssen festgelegte Grenzen haben. Die Kennzeichnung erfolgt durch Warnmarkierungsbänder auf den Bodenbelägen. Eine zusätzliche Kennzeichnung erfolgt durch Warnschilder (**Bild 3**).

Verpackungen

In einer ESD-Schutzzone dürfen keinerlei elektrostatisch aufladbare Materialien, z. B. PVC, Styropor, verwendet werden. In diesem Bereich dürfen nur leitfähige Materialien verwendet werden, welche die Ladungen zur EPA-Erde abfließen lassen.

Luftfeuchte

Durch das Einhalten einer relativen Luftfeuchte von > 65 % wird der Oberflächenwiderstand vieler aufladbarer Stoffe ausreichend verringert. Die Leitfähigkeit der Luft wird dadurch nicht erhöht.

!

ESD	von Electrostatic Discharge = elektrostatische Entladung
ESDS	von Electrostatic Discharge Sensitive Devices = Elektrostatisch empfindliche Geräte
EPA	von Electrostatic Protected Areas = elektrostatische Schutzzone
ERP	von Earth Reference Plane = Erdpotenzial-Bezugsflächen

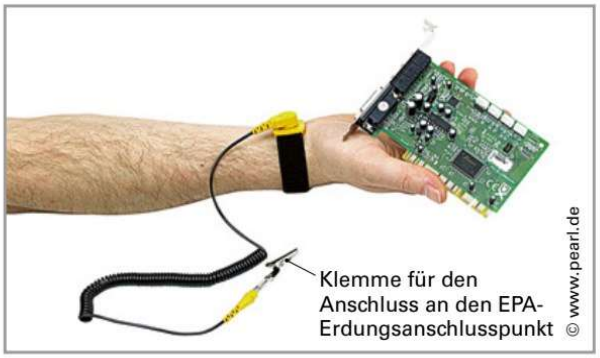


Bild 1: Arbeiten mit dem Handgelenk-Erdungsband

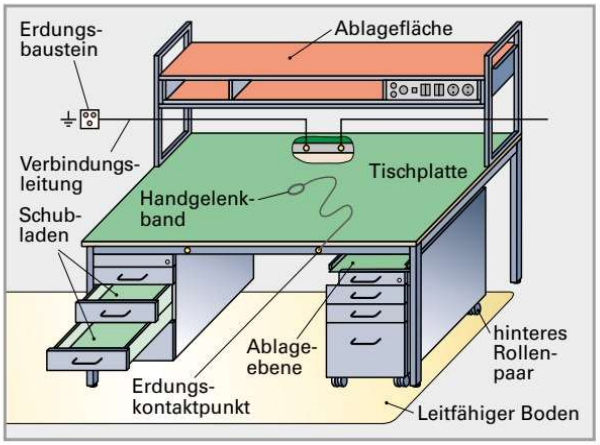


Bild 2: ESD-Arbeitsplatz

Bild 3: Warnhinweise in einer ESD-Schutzzone

K **Kompetenzorientierung**

1. **Erklären Sie den tribo-elektrischen Effekt.**
2. **Wie wirkt sich die relative Luftfeuchtigkeit auf die statischen Aufladungen aus?**
3. **Welche Maßnahmen werden zur ESD-Vermeidung an Arbeitsplätzen ergriffen?**

6.4 Elektronische Schaltungen mit Strom versorgen

6.4.1 Lineare Netzteile und Schaltnetzteile

Elektronische Geräte erfordern meist Gleichspannungen. Aber oft steht nur die Netzwechselspannung mit 230 V zur Verfügung. Für derartige Geräte sind deshalb Netzgeräte (Netzteile) erforderlich **(Bild 1)**. Netzgeräte enthalten zur Anpassung der Wechselspannung von 230 V an die benötigte meist kleinere Spannung oft Transformatoren.

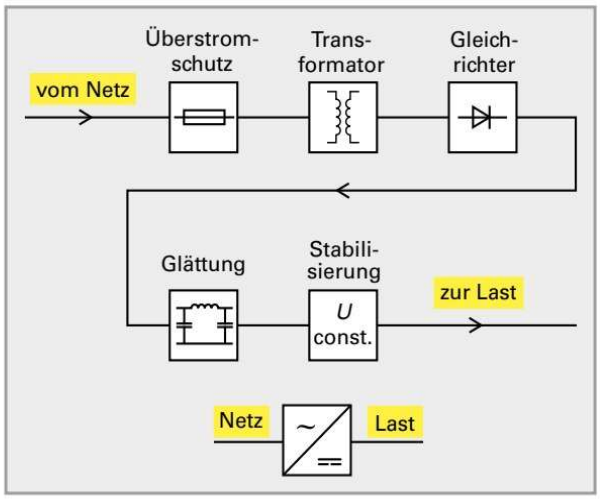


Bild 1: Übersichtsschaltplan und Schaltzeichen eines Netzanschlussgerätes

Schaltnetzteile

In Schaltnetzteilen wird die Ausgangsspannung durch Impulsbetrieb bei hoher Frequenz erzeugt. Dadurch haben sie einen hohen Wirkungsgrad. Schaltnetzteile benötigen wenige Siebmittel zur Spannungsglättung. Häufig werden IC als elektronische Schalter verwendet, die von Regler-ICs gesteuert werden.

> **!** Bei Netzteilen mit Leistungen über 75 W muss eine Leistungsfaktorkorrektur (PFC) erfolgen (siehe Seite 225).

Aufbau von Schaltnetzteilen

Schaltnetzteile für den Betrieb an der Netzspannung von 230 V bestehen aus mehreren Baugruppen **(Bild 2)**.

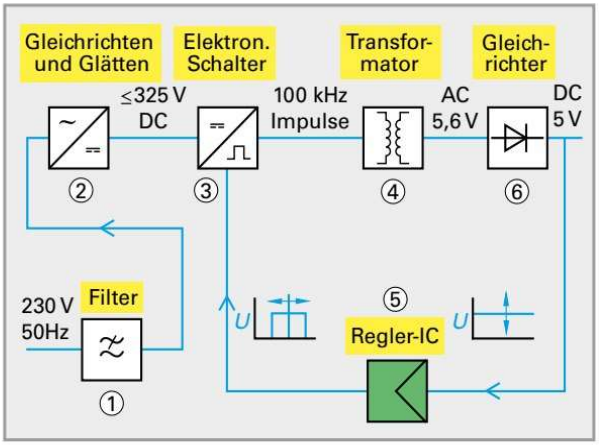


Bild 2: Übersichtsschaltplan eines primär getakteten Schaltnetzteils

Die Netzspannung wird über ein Tiefpassfilter ① dem Gleichrichter zugeführt. Der Filter soll verhindern, dass Störspannungen des Impulsgenerators in das Netz gelangen. Der Gleichrichter ② richtet die Netzspannung gleich und glättet diese. Es steht nach dem Gleichrichter eine Gleichspannung mit Spannungswerten bis 325 V zur Verfügung. Aus dieser Gleichspannung erzeugt der elektronische Schalter ③ z. B. Impulse verschiedener Länge mit einer Taktfrequenz von z. B. 100 kHz. Diese Impulsspannung wird auf der Eingangsseite einem Transformator ④ mit Ferritringkernen zugeführt. Durch die hohe Frequenz wird die induzierte Spannung größer. Dadurch sind größere Ströme durch dickere Wickeldrähte möglich. Auf der Ausgangsseite erhält man die gewünschte Spannung von z. B. 5,6 V als Wechselspannung. Nach dem Gleichrichten ⑥ der Wechselspannung steht als Ausgangsspannung eine Gleichspannung von 5 V zur Verfügung. Für die Siebung genügt wegen der hohen Schaltfrequenz ein kleiner Kondensator von z. B. 0,5 µF. Die Ausgangsspannung wird einem Regler-IC ⑤ zugeführt. Der Regler-IC erzeugt die Steuerimpulse für den elektronischen Schalter und regelt Spannungsschwankungen aus.

Schaltnetzteile haben einen hohen Wirkungsgrad, sind leicht und haben ein kleines Bauvolumen **(Bild 3)**.

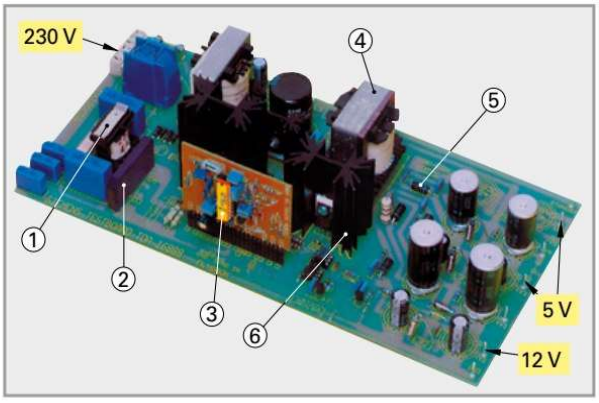


Bild 3: Schaltnetzteil

6.4.2 PC-Netzteile

Netzteile für PCs haben allseits geschlossene Metallgehäuse **(Bild 1)**. Das Metallgehäuse ist mit dem Anschluss des Schutzleiters verbunden und verhindert so ein Berühren spannungsführender Teile. Die meisten Netzteile stellen sich automatisch auf die vorhandene Netzspannung 110 V/60 Hz in den USA oder 230 V/50 Hz in Europa ein. Vorhandene Netzschalter (Ein-/Ausschalter) sind oft nur einpolig ausgeführt (Bild 1).

> PC-Netzteile sind erst sicher spannungslos, wenn der Netzstecker gezogen wurde.

PC-Netzteile gibt es für Bemessungsleistungen von 230 W bis 700 W. Netzteile sollten eine Leistungsreserve von 20 % für Erweiterungen, z. B. durch Erweiterungskarten, besitzen.

Die abgebbaren Ströme und Spannungen sind in der ATX-Spezifikation festgelegt **(Tabelle 1)**. ATX-Netzteile haben bis zu fünf Stecker zur Versorgung der PC-Komponenten.

> **!** Zum Einschalten von ATX-Netzteilen müssen der Netzschalter und dann der Taster am PC betätigt werden.

Der Hauptstecker (= Main Power Connector) hat 20 Anschlüsse **(Bild 2, links)**. Für die Spannungen 5 V und 3,3 V mit großer Stromstärke sind mehrere Kontakte parallel geschaltet, ebenso für die Masse. Für leistungsstarke Prozessoren ist ein ATX12V-Anschluss für 12 V vorgesehen **(Bild 2, rechts)**. Für die Versorgung von Geräten mit der Größe 5¼ Zoll, wie DVD/CD-Laufwerke oder Festplatten, wird der PPC-Stecker (Peripheral Power Connector) verwendet **(Bild 3, links)**. Der SATA-Stromversorgungsstecker hat 15 Pins **(Bild 3, rechts)**.

80-PLUS-Netzteil für 230 V

Netzteile für PC und Server müssen bei den Lastpunkten 10%, 20%, 50% und 100% je einen Wirkungsgrad von 80% erreichen **(Tabelle 2)**. Die Netzteile werden für den entsprechenden Wirkungsgrad mit einem 80-PLUS-Logo gekennzeichnet **(Bild 4)**. Der Typ Titanium muss für alle Lastpunkte einen Leistungsfaktor $\lambda = P/S$ von 95% erreichen.

Bild 4: Logos von 80-PLUS-Netzteilen

Bild 1: PC-Netzteil

Tabelle 1: ATX-Festlegung

Ausgang	U_n/V	U_{min}/V	U_{max}/V	I_{min}/A	I_{max}/A
12	+12	11,4	12,6	0,0	12,0
5	+ 5	4,75	5,25	1,0	30,0
3,3	+ 3,3	3,14	3,47	0,3	20,0
– 5	– 5	– 4,5	– 5,5	0,0	0,3
–12	–12	–10,8	–13,2	0,0	0,8
+ 5 SB	+ 5	4,75	5,25	0,0	1,5

ATX von **A**dvanced **T**echnology e**X**tended = Fortgeschrittene, erweiterte Technologie.

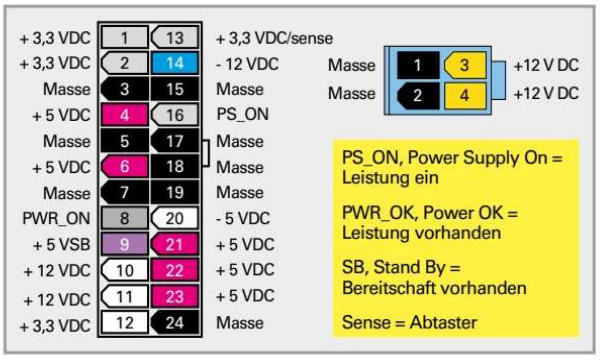


Bild 2: Hauptstecker und ATX12V-Stecker

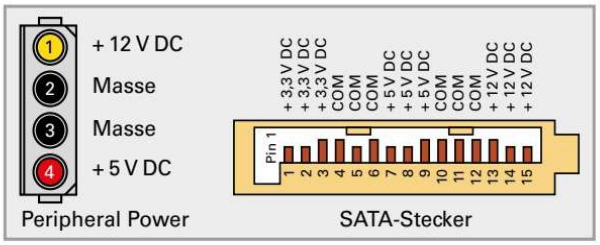


Bild 3: PPC-Stecker und SATA-Stecker

Tabelle 2: Wirkungsgrade bei 80-PLUS-Netzteilen

Mindestwirkungsgrad η bei	10% Last	20% Last	50% Last	100% Last
80 PLUS Bronze	–	81%	85%	81%
80 PLUS Silver	–	85%	89%	85%
80 PLUS Gold	–	88%	92%	88%
80 PLUS Platinum	–	90%	94%	91%
80 PLUS Titanium	90%	94%	96%	91%

Leistungsfaktorkorrektur

Da PC-Netzteile als Schaltnetzteile arbeiten, entnehmen sie dem 230-V-Netz nur zu bestimmten Zeiten Strom in Form von Impulsen **(Bild 1)**. Solche Impulse führen zu Störspannungen mit teilweise hohen Frequenzen bis > 100 kHz. Aus diesem Grund wird eine *Leistungsfaktorkorrektur* (PFC von Power Factor Correction) vorgenommen. Durch schaltungstechnische Maßnahmen versucht man, dem Strom einen sinusförmigen Verlauf zu geben.

Die Leistungsfaktorkorrektur verhindert eine Belastung des 230-V-Netzes durch Blindleistung.

Bei der *passiven Leistungsfaktorkorrektur* wird eine Spule in den Eingangskreis des Netzteiles geschaltet **(Tabelle 1)**. Nachteilig sind die großen Abmessungen der Spule und ihr großes Gewicht.

Bei der *aktiven Leistungsfaktorkorrektur* wird in den Eingangskreis des Netzteiles ein zusätzlicher Schaltregler zur Regelung der Impulsbreite und der Impulsform des Eingangsstromes geschaltet. Dadurch wird erreicht, dass Netzteile 100 % Wirkleistung aufnehmen.

Meist wird ein Leistungsfaktorvorregler (Power Factor Preregulator) dem eigentlichen Netzteil vorgeschaltet **(Bild 2, oben)**. Der Transistor regelt den Strom in der Induktivität so, dass er proportional zur Eingangsspannung ist. Es wird ein Aufwärtswandler verwendet, dessen Transistor so gesteuert wird, dass der Eingangsstrom sinusförmig wird **(Bild 2, unten)**. Die Ausgangsspannung ist nahezu konstant.

Aktive Leistungsfaktorkorrekturschaltungen erreichen Korrekturfaktoren von 100 %.

Da der zusätzliche Schaltregler mit hohen Frequenzen arbeitet, muss ein zusätzliches Entstörfilter in den 230-V-Eingang eingefügt werden.

Der Wirkungsgrad η der Netzteile wird durch die Leistungsfaktorkorrektur nicht wesentlich beeinflusst. Netzteile nach dem 80-Plus-Standard arbeiten z. B. mit η = 90 % bei 20 % Last, η = 94 % bei 50 % Last und η = 91 % bei 100 % Last.

6.4.3 Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme USV

Ausfall des Stromnetzes

Schon kurzzeitige Unterbrechungen oder Störungen im 230-V-Netz können zu Datenverlusten im PC führen **(Tabelle 2)**. So sollten Unterbrechungen von bis zu 20 ms, Spannungseinbrüche auf 70 % der Netzspannung oder Störspannungsimpulse vom Netzteil ausgeglichen werden.

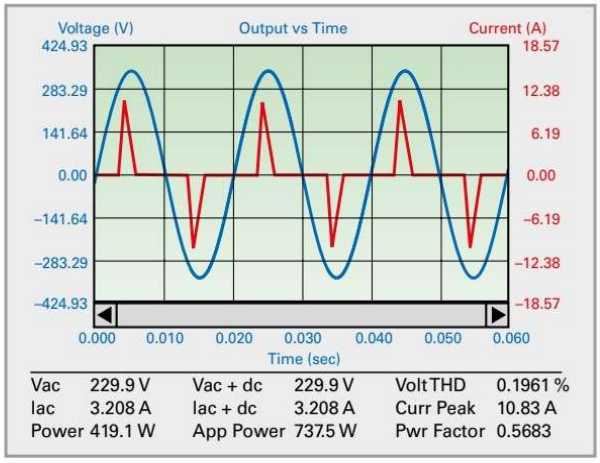


Bild 1: Spannungen und Ströme im PC-Netzteileingang

Tabelle 1: Leistungsfaktorkorrektur (PFC)

	Art der Korrektur		
	Ohne	passiv	aktiv
Baugruppe	–	Induktivität zwischen Netz- und Gleichrichterschaltung.	Zusätzlicher Schaltregler mit Pulsweitenmodulation.
Korrekturfaktor	0,5 ... 0,6	0,7 ... 0,8	0,8 ... 1,00

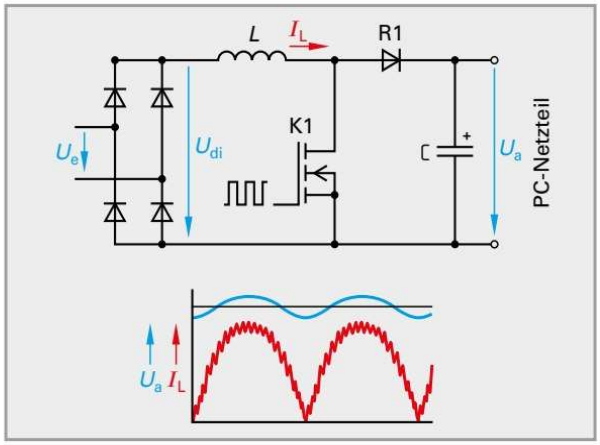


Bild 2: Leistungsfaktorvorregler

Tabelle 2: Netzausfallarten

Art	Erklärung
Blackout (= Verdunkelung)	Ausfall der Netzspannung, für eine oder mehrere Schwingungen mit der Frequenz 50 Hz.
Brownout (= milde Verdunkelung)	Einbruch der Versorgungsspannung auf 70 %. Tritt z. B. beim Anlaufen großer Maschinen auf.
Surge (= Woge, Brandung)	Überlagerung der Netzspannung mit Spannungsimpulsen. Z. B. bei Blitzschlag oder auch Ausschalten von Niedervolt-Halogen-Beleuchtungen (induktive Verbraucher).

Zum Schutz vor Netzausfällen verwendet man z. B. für Server Zusatzgeräte, die eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) sicherstellen. Solche Geräte enthalten als Energiespeicher meist einen Akkumulator (Batterie). Je nach Aufbau unterscheidet man Offline-USV-Geräte und Online-USV-Geräte. Bei Offline-Geräten wird bei Netzausfall auf den Wechselrichter umgeschaltet, bei Online-Geräten sind Gleichrichter und Wechselrichter dauernd in Betrieb.

Im Englischen werden USV mit UPS von Uninterruptable Power Supply bezeichnet.

Klassifizierung und Kennzeichnungen von USV

Die Spannungsqualität wird zur Klassifizierung in drei Kategorien eingeteilt **(Tabelle 1)**. In der Kategorie 1 werden die USV-Arten VFD, VI und VFI unterschieden.

VFD

Die einfachste USV-Art ist die VFD **(Bild 1)**. Sie schützt bei einem totalen Netzausfall durch Umschalten auf den Akkumulatorbetrieb.

VI

VI-USVs schützen zusätzlich gegen Netzspannungsschwankungen durch einen Regler **(Bild 2)**.

VFI

Den besten Schutz bietet eine USV vom Typ VFI. Sie kann Schwankungen der Netzfrequenz und der Netzspannung ausgleichen **(Bild 3)**. Der Verbraucher wird immer über den Akkumulator gespeist. Da beim VFI die Betriebsart nicht gewechselt werden muss, treten keine Umschaltzeiten auf. Kategorie 2 gibt an, ob die Ausgangsspannung z. B. sinusförmig ist (Tabelle 1).

Kategorie 3 charakterisiert das Verhalten der USV bei unterschiedlichen Belastungen und Änderung der Betriebsart (Tabelle 1).

Beispiel 1: USV-Art bestimmen

Welche Eigenschaften hat eine USV mit dem Klassifizierungscode **VFI-SS-122**?

Lösung:

V F I → Die USV ist unabhängig von Frequenz- und Spannungsänderungen des Netzes.

S S → Sinusförmige Ausgangsspannung bei Netzbetrieb und bei Batteriebetrieb.

1 2 2
- → Unterbrechungsfreie USV
- → Nichtlineare Lastsprünge mit Spannungsänderungen < 1 ms.
- → Lineare Lastsprünge mit Spannungsänderungen < 1 ms.

!

VFD **V**oltage and **F**requency **D**ependent = spannungs- und frequenzabhängig
VI **V**oltage **I**ndependent = spannungsunabhängig
VFI **V**oltage and **F**requency **I**ndependent = spannungs- und frequenzunabhängig

Tabelle 1: USV-Klassifizierung nach DIN EN 62040-3

Kategorie	Kategorie Aufbau	Code	Erklärungen
1	zwei oder drei Buchstaben	VFD VI VFI	Ausgangsspannung ist • netzfrequenzabhängig und netzspannungsabhängig, • netzfrequenzabhängig und netzspannungsunabhängig, • netzfrequenzunabhängig und netzspannungsunabhängig.
2	Batteriebetrieb Netzbetrieb	S X Y	sinusförmig nichtsinusförmig, $d < 8\,\%$ nichtsinusförmig, Grenzwerte werden überschritten.
3	Betriebsart Lineare Lastsprünge Nichtlineare Lastsprünge	1 2 3 4	unterbrechungsfrei Spannungsabweichungen[1] < 1 ms Spannungsabweichungen[1] < 10 ms Eigenschaften werden vom Hersteller festgelegt.

d Verzerrungsfaktor, gibt die Abweichung von der Sinusform an. [1] durch Einschwingvorgänge

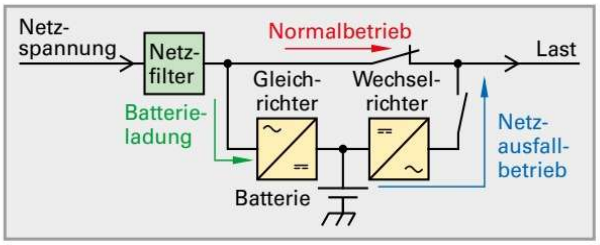


Bild 1: VFD-USV

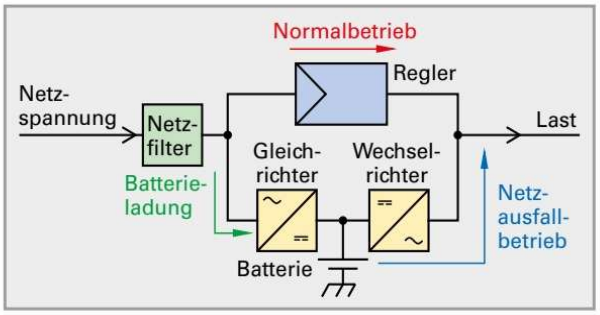


Bild 2: VI-USV

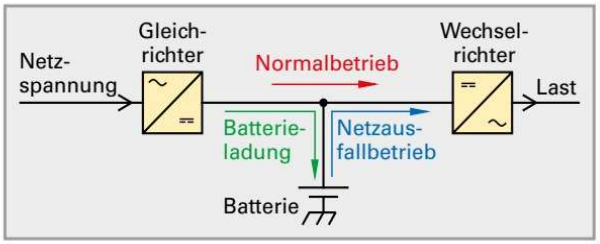


Bild 3: VFI-USV

6.4.4 Batterien

Batterie ist der Oberbegriff für elektrische Energiespeicher, eigentlich System aus mehreren Primärzellen, meist in Reihe geschaltet.

Primärbatterien
Primärbatterien (Primärelemente) sind nicht wieder aufladbar. Die Zellenspannungen, z. B. 1,5 V und 3 V, entstehen durch die verwendeten Werkstoffe **(Bild 1)**. Oft werden Rundzellen oder Knopfzellen verwendet **(Bild 2)**.

Sekundärbatterien
Sekundärbatterien (Sekundärelemente, Akkumulatoren) können wieder geladen werden. Bei der Ladung kehren sich die chemischen Vorgänge gegenüber der Entladung um.

Bleiakkumulator. Bleiakkumulatoren haben eine Zellenbemessungsspannung von 2 V, eine hohe Strombelastbarkeit, hohe Wirtschaftlichkeit und sind gut recycelbar **(Tabelle 1)**. Sie sind meist kastenförmig aufgebaut **(Bild 3)**. Anwendung finden sie als Starterbatterien in Kraftfahrzeugen und zur Notstromversorgung.

Nickel-Cadmium-Akkumulator. Ni-Cd-Akkumulatoren sind umweltschädlich und durch andere Typen zu ersetzen.

Nickel-Metall-Hybrid-Akkumulator. NiMH-Zellen haben eine hohe Selbstentladung (Tabelle 1).

Lithium-Akkumulatoren

Lithium-Ionen-Akkumulator. Li-Ionen-Zellen verwenden einen festen, organischen Elektrolyt. Sie haben eine Zellenbemessungsspannung von 3,7 V.

Lithium-Polymer-Akkumulator. Der Elektrolyt verwendet als Basis eine feste oder gelartige Folie, die z. B. weniger als 100 µm stark ist. Die Akkumulatoren enthalten eine elektronische Schutzschaltung gegen Überlastung, sowie eine Ladeausgleichsregelung für jede Zelle. Die Ladegeräte müssen eine entsprechende Ladekennlinie aufweisen.

Es lassen sich beliebige Bauformen herstellen. Angewendet werden sie z. B. in Laptops, Tablets, Smartphones, im Modellbau, bei E-Bikes und Elektrofahrzeugen.

! **Batterie**
BattG = Batteriegesetz von 2009 muss beachtet werden (Entsorgungsnachweis).
www.umweltbundesamt.de
Elektrolyt = durch entgegengesetzt geladene bewegliche Ionen elektrisch leitfähige Substanz
Polymer = gleiche Makromoleküle

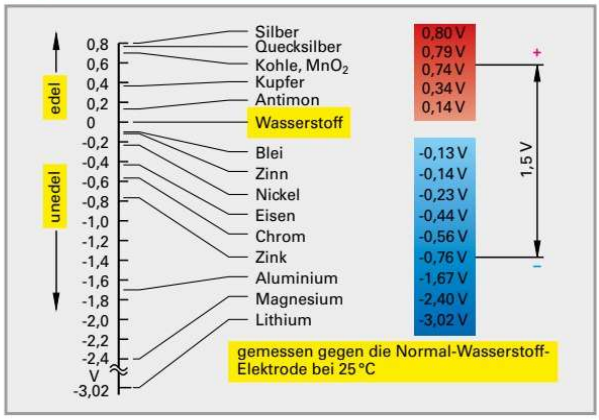


Bild 1: Elektrochemische Spannungsreihe

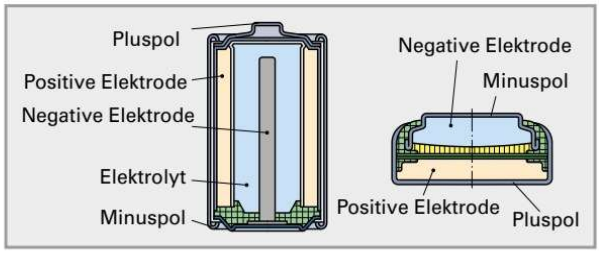


Bild 2: Zellenarten

Tabelle 1: Kennwerte von Akkumulatoren

Werkstoff	U_N in V je Zelle	Entladung in % je Monat	Ladezyklen	Energiedichte W/kg
Blei[1]	2	6	1000	25
NiCd[1]	1,2	15	1000	35
NiMH[2]	1,2	25 bis 30	800	60
Lithium-Ionen[3]	3,7	< 2	bis 1000	bis 150
Lithium-Polymer[3]	3,6	nicht messbar	bis 1200	bis 300
Umweltproblematik: [1] hoch, [2] gering, [3] keine				

Bei unsachgemäßer Aufladung können Lithium-Akkumulatoren explodieren oder brennen.

Blei(Pb)-Akku NiMH-Akkus Li-Ion-Akku Li-Ion-Akku-Pack

Bild 3: Bauformen von Akkumulatoren

6.5 Schutzmaßnahmen

6.5.1 Elektrischer Schlag

An einem PC-Arbeitsplatz ist ein Metallregal an der Wand befestigt. Eine Befestigungsschraube geht durch die Isolation der Stromleitung in der Wand und verursacht den Fehlerstrom I_F gegen Erde **(Bild 1)**. Der Fehlerstrom ist jedoch so gering, dass kein Abschalten durch den Leitungsschutzschalter (Sicherungsautomaten) erfolgt. Bei gleichzeitigem Berühren des unter Spannung stehenden Regals und des über die Steckdose geerdeten PC-Gehäuses bildet sich der Körperstrom I_K, der über den Schutzleiter zurück ins Netz fließt (Bild 1). Geht man von einem Körperwiderstand von z. B. 1 kΩ aus, beträgt wegen der Berührspannung U_B von 230 V der Körperstrom 230 mA. Bei einer Einwirkdauer von 0,5 s kann dieser Strom bereits Herzkammerflimmern auslösen **(Bild 2)**, ab 1 s ist Herzstillstand möglich. Beim Herzkammerflimmern „flimmert" das Herz mit der Frequenz des Stromes.

Der körperliche Schaden bei elektrischem Schlag hängt von der Stromstärke, der Stromart, der Einwirkdauer und dem Stromweg durch den Körper ab.

Um das Risiko körperlicher Schäden zu minimieren, sind bei der Einrichtung elektrischer Anlagen, z. B. eines PC-Arbeitsraumes, Sicherheitsvorschriften einzuhalten. Zu diesen zählen z. B. die

- Bestimmungen nach DIN VDE (von Deutsches Institut für Normungen und Verband Deutscher Elektriker), vor allem die Schutzmaßnahmen (VDE 0100 Teil 410),
- Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften,
- Arbeitsstättenrichtlinien und die
- TAB (von Technische Anschlussbedingungen).

Eine Elektrofachkraft ist verpflichtet, diese Vorschriften einzuhalten.

Missachtung der Sicherheitsvorschriften können mit Ordnungsstrafen geahndet werden.

Verletzt sich eine Person bei einem Elektrounfall, muss die Erste Hilfe schnell und in der richtigen Reihenfolge durchgeführt werden **(Tabelle 1)**. Dabei darf man nicht den Verletzten zuerst berühren, um den eigenen Körper vor elektrischem Schlag zu schützen. Bei Übelkeit des Verletzten wird dieser wegen der Gefahr des Erbrechens in die stabile Seitenlage gebracht. Bei Brandverletzungen dürfen keine Mittel auf die Wunden aufgetragen werden.

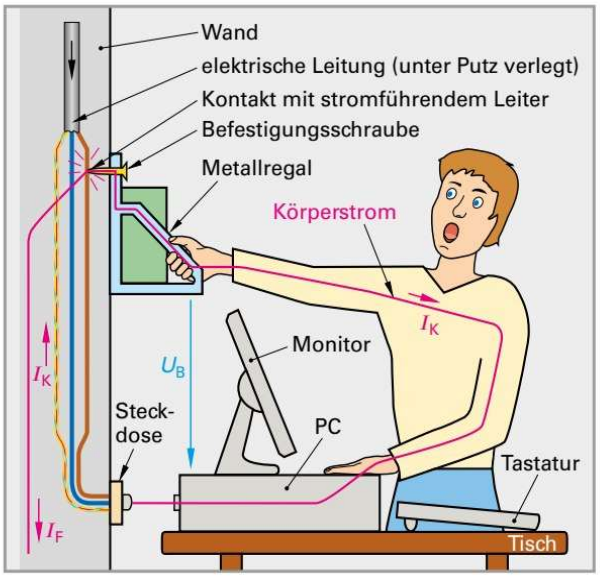


Bild 1: Berühren von spannungsführenden Teilen

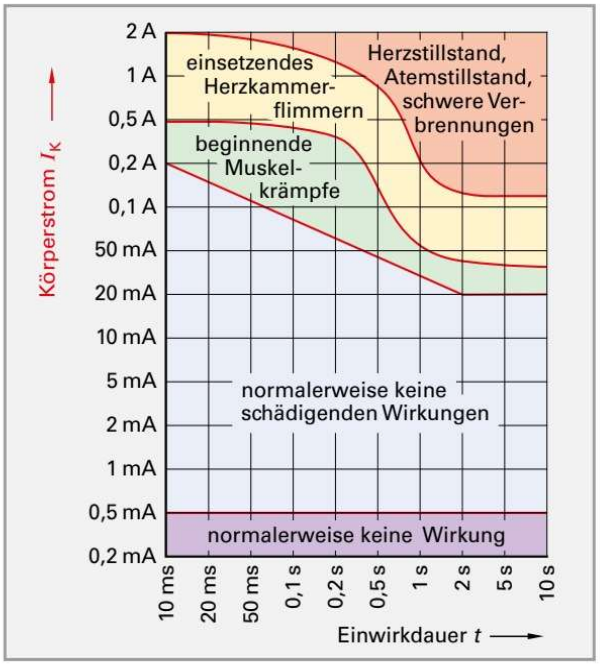


Bild 2: Stromwirkung auf den menschlichen Körper

Tabelle 1: Vorgehensweise bei einem Elektrounfall

Schritt	Maßnahme	Beispiel
1	Stromkreis sofort unterbrechen.	NOT-AUS-Schalter drücken. Sicherung ziehen.
2	Vor Wiedereinschalten sichern.	Sicherung mitnehmen.
3	Arzt benachrichtigen.	Betriebsarzt, Rettungswagen.
4	Art der Verletzung feststellen.	Herz-, Atemstillstand, Verbrennungen, Übelkeit.
5	Verletzungen behandeln.	Künstliche Beatmung, äußere Herzmassage, stabile Seitenlage.

Eine begonnene Atemspende oder Herzmassage darf bis zur Wiederbelebung oder Eintreffen des Notarztes nicht unterbrochen werden.

Unterlassene Hilfeleistung ist strafbar.

6.5.2 Basisschutz

Der Basisschutz nach VDE 0100 ist der Schutz vor elektrischem Schlag unter normalen Bedingungen, d. h. wenn in einer elektrischen Anlage kein Fehler vorliegt. Der Mensch wird davor geschützt, unter Spannung stehende Teile direkt zu berühren.

Der Basisschutz wird erreicht durch

- vollständigen Schutz, d. h. Isolierung, Abdeckung, Umhüllung,
- teilweisen Schutz, d. h. Abstand, Hindernisse oder
- zusätzlichen Schutz, z. B. RCD bzw. FI-Schalter (RCD von residual current protective device = Reststromschutzschaltkreis).

Der Basisschutz verhindert direktes Berühren unter Spannung stehender Teile.

Schutz durch Isolation wird z. B. bei Leitungen und Kabeln eingesetzt **(Bild 1)**. Die stromführenden Außenleiter L1, L2 oder L3 können dabei farblich unterschiedlich gekennzeichnet sein, während der stromrückführende Neutralleiter N stets blau und der Schutzleiter PE (von Protected Earth = geschützte Erde) stets grüngelb ist. Dieser Leiter darf *nur* im Fehlerfall Strom führen. In manchen Stromnetzen sind die Leiter PE und N zu einem Leiter, dem Nulleiter PEN, zusammengefasst.

Schutz durch Abdeckung oder Umhüllung wird z. B. erreicht, wenn eine Verdrahtungsstelle von Leitungen durch eine Abzweigdose geschützt ist. Diese enthält neben dem VDE-Prüfzeichen eine IP-Kennzeichnung, z. B. IP 54 **(Bild 2)**. Ist die erste der beiden Ziffern 2 oder größer, liegt Basisschutz vor, weil ein Zugang mit einem Finger von 12 mm Durchmesser ausgeschlossen wird.

6.5.3 Fehlerschutz

Der Fehlerschutz ist nach VDE 0100 der Schutz vor elektrischem Schlag unter Fehlerbedingungen in einer elektrischen Anlage (Bild 1, vorhergehende Seite und **Bild 3**). Beim Fehlerschutz werden netzunabhängige Maßnahmen und netzabhängige Maßnahmen unterschieden **(Bild 4)**.

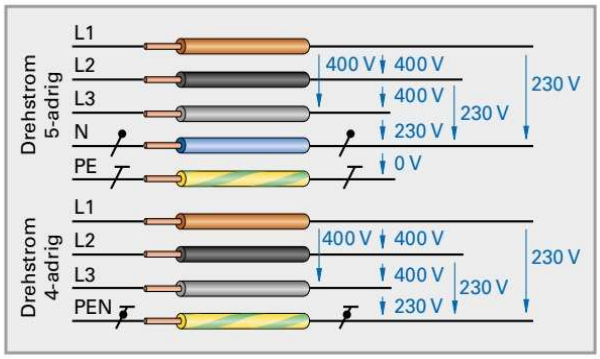


Bild 1: Schutz durch Isolation bei Leitungen und Kabeln

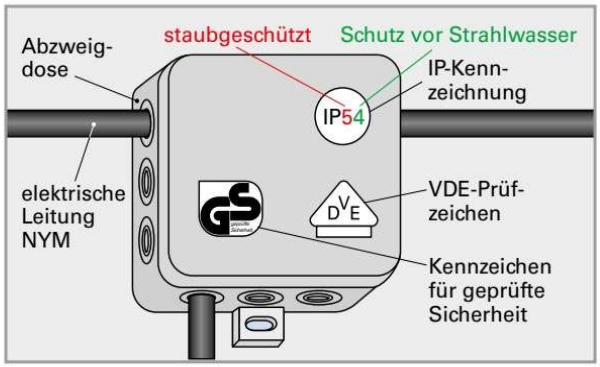


Bild 2: Schutz durch Abdeckung und Umhüllung

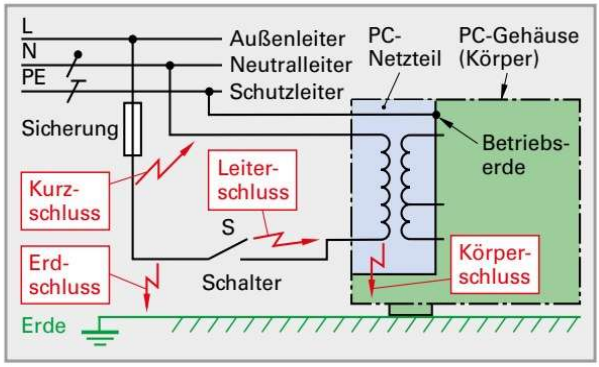


Bild 3: Fehlerarten an einem PC-Netzanschluss

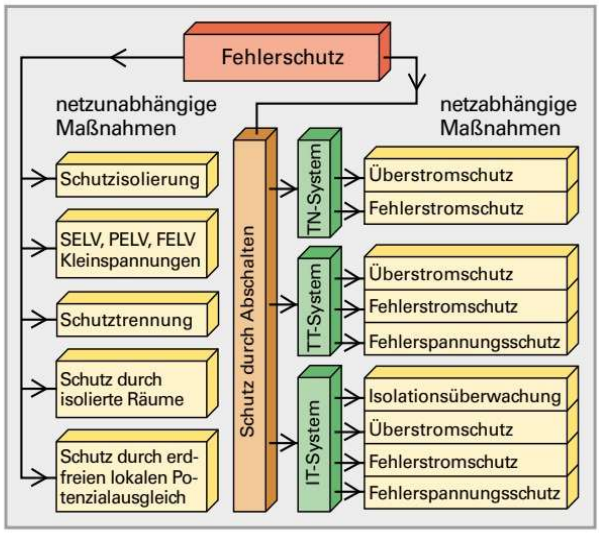


Bild 4: Fehlerschutzarten

6.5.3.1 Netzunabhängiger Fehlerschutz

Netzunabhängiger Fehlerschutz funktioniert ohne Schutzleiter und schützt Personen vor indirektem Berühren, z. B. über das Gehäuse eines elektrischen Gerätes bei einem Körperschluss. Der Begriff Körper wird nicht nur beim Mensch und beim Tier verwendet, sondern auch für berührbare, leitfähige Teile von elektrischen Geräten verwendet.

Schutzisolierung

Schutzisolierte Geräte, z. B. das Netzteil eines Laptops, sind mit dem Symbol für Schutzisolierung gekennzeichnet **(Bild 1)**. Das Gehäuse (Körper) schutzisolierter Geräte ist vom elektrischen Teil vollständig isoliert und besteht meist ganz aus Kunststoff. Die Netzstecker der Geräte verfügen über keinen Schutzkontakt und die Netzleitung ist 2-adrig. Bei Gehäuseschäden dürfen die Geräte nicht mehr benutzt werden.

Schutzisolierte Geräte dürfen nicht mit dem Schutzleiter PE des Netzes verbunden werden.

Schutztrennung

Bei der Schutztrennung werden Verbraucher über Trenntrafos (VDE 0550 und 0551) vom Netz galvanisch getrennt. Die Trenntrafos führen das Symbol für Schutztrennung **(Bild 2)**.

Die Ausgangsseite des Trenntrafos enthält die gegen Erde potenzialfreien Leiter L1 und L2.

Ortsveränderbare Trafos müssen schutzisoliert sein. Ist Schutztrennung zwingend vorgeschrieben, z. B. in Laborräumen, darf nur ein Verbraucher an den Trenntransformator angeschlossen werden. Sonst können mehrere Verbraucher angeschlossen werden, wobei ein ungeerdeter Schutzpotenzialausgleichsleiter PA die Körper der Verbraucher verbindet. So werden im Fehlerfall (Bild 2) die Sicherungen ausgelöst. Dadurch wird eine unzulässige Berührspannung zwischen den Körpern der Verbraucher verhindert.

SELV, PELV, FELV

Bei diesen Schutzmaßnahmen handelt es sich um Kleinspannungen bis 50 V Wechselspannung oder bis 120 V Gleichspannung. **SELV**, früher Schutzkleinspannung, verwendet Sicherheitstransformatoren nach VDE 0551 oder Akkumulatoren **(Bild 3)**, z. B. bei der Stromversorgung eines Laptops.

Das SELV-Netz darf nicht geerdet werden.

!
SELV Safety Extra Low Voltage = Sicherheitskleinspannung
PELV Protected Extra Low Voltage = Schutzkleinspannung
FELV Functional Extra Low Voltage = Funktionskleinspannung

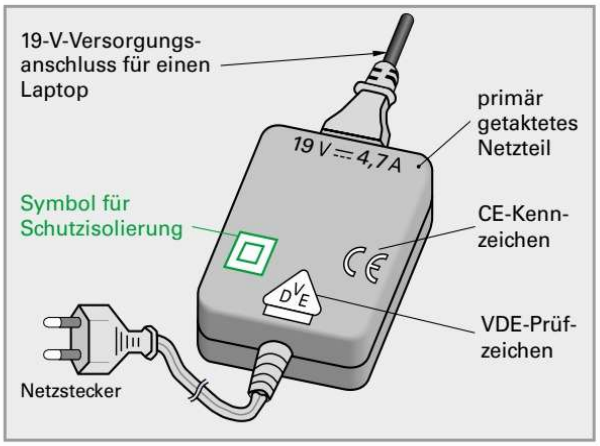


Bild 1: Schutzisoliertes Netzteil

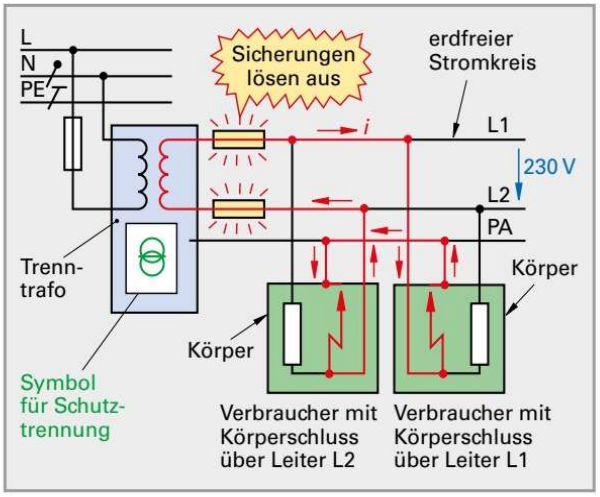


Bild 2: Schutztrennung mit 2 Verbrauchern im Fehlerfall

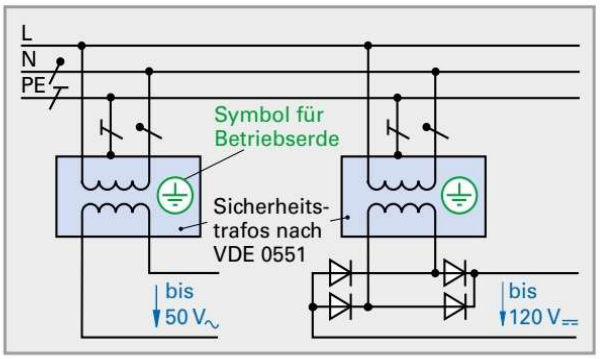


Bild 3: SELV (Sicherheitskleinspannung)

Bei Spannungen über 25 V Wechselspannung oder 60 V Gleichspannung muss das SELV-Netz Basisschutz besitzen, d.h. vor direktem Berühren schützen.

Die Schutzmaßnahmen PELV (P von Protected = geschützt), also Schutzkleinspannung, und FELV (F von funktional), also Funktionskleinspannung unterscheiden sich gegenüber SELV-Netzen bezüglich der galvanischen Trennung vom Versorgungsnetz und der Erdung im Kleinspannungsnetz. Bei PELV darf der Stromkreis und die Körper der Verbraucher geerdet sein, d.h. mit einem Schutzleiter verbunden werden. Deshalb ist bei PELV für alle Spannungen Basisschutz erforderlich. FELV-Netze haben keine galvanische Trennung gegenüber dem Versorgungsnetz **(Bild 1)**. Die Schutzmaßnahmen des Versorgungsnetzes müssen deshalb auch auf das Kleinspannungsnetz angewendet werden.

Die Steckvorrichtungen für das Versorgungsnetz, SELV, PELV und FELV dürfen untereinander nicht zusammenpassen.

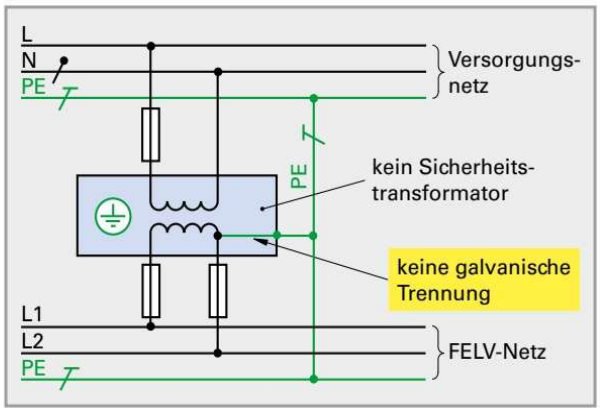


Bild 1: Schutzmaßnahme FELV

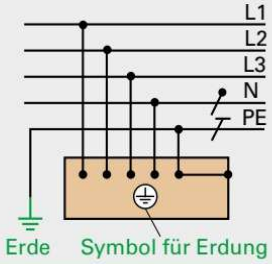
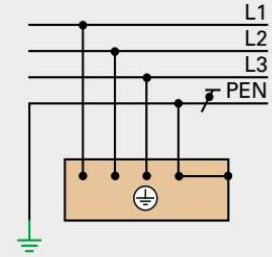
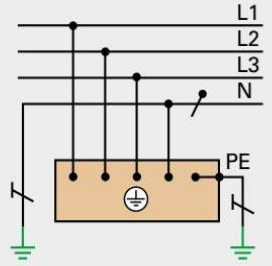
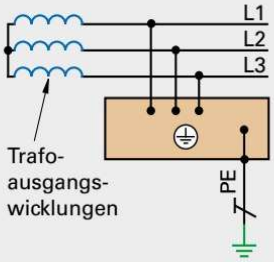
6.5.3.2 Netzabhängiger Fehlerschutz

Beim netzabhängigen Fehlerschutz wird indirektes Berühren durch Abschalten im Fehlerfall verhindert. Die Abschaltung muss in Stromkreisen mit Steckdosen bei Spannungen bis 400 V innerhalb von 0,2 s erfolgen. Die Schutzeinrichtungen sind Überstromschutzorgane, z. B. Leitungsschutzschalter (LS) oder Schmelzsicherungen, und Fehlerstromschutzorgane, z. B. RCD (FI-Schalter). Da RCD defekt werden können und da bei Leitungsschutzschaltern die Kontakte verschleißen können, bilden diese Organe allein keinen sicheren Schutz. Ihnen muss immer eine Schmelzsicherung vorgeschaltet sein, z. B. in einem Hausanschlusskasten oder in einer Unterverteilung.

Leistungsschutzschalter (LS) und RCD (FI-Schalter) müssen über eine Schmelzsicherung abgesichert werden.

Beim Schutz durch Abschalten müssen alle leitfähigen Körper an einen Schutzleiter angeschlossen und geerdet werden. Ob die Erdung über das Netz (Betriebserde) oder direkt mit der Erde erfolgt, hängt von dem Verteilungssystem (Netzform) ab **(Tabelle 1)**. In jedem Gebäude muss ein Hauptpotenzialausgleich stattfinden, damit z. B. bei einem

Tabelle 1: Verteilungssysteme (Netzformen)

Art	Aufbau	Beschreibung
TN-S		Neutralleiter und Schutzleiter sind netzseitig geerdet, z. B. an der Trafostation des Elektrizität-Versorgungsunternehmens). Die Körper sind an den Schutzleiter (Betriebserde) angeschlossen.
TN-C		Der Nullleiter PEN übernimmt die Stromrückführung des Neutralleiters N und die Schutzfunktion des Schutzleiters PE. Sonst liegt derselbe Aufbau wie beim TN-S-System vor.
TT		Der Neutralleiter ist netzseitig geerdet wie bei den TN-Systemen. Körper werden mit einem Schutzleiter PE über Erder direkt mit der Erde verbunden. Fehlerströme fließen über den Erder, z. B. bei Körperschluss.
IT		Das System besteht nur aus den Außenleitern L1, L2 und L3. Der Sternpunkt der Ausgangswicklungen des Netztransformators ist gegen Erde isoliert. Körper werden mit einem Schutzleiter direkt geerdet.

1. Buchstabe für Netzseite: T = direkt geerdet, I = isoliert.
2. Buchstabe für Körper: T = direkt geerdet, N = über das Netz geerdet.
3. Buchstabe für PE und N: S = separat, getrennt, C = kombiniert.

Körperschluss alle geerdeten Gegenstände, z. B. auch Rohrleitungen, Heizkörper oder Badewannen, ungefähr das Potenzial des Schutzleiters annehmen und keine Potenzialdifferenz gegen Erde auftritt. Die Schutzpotenzialausgleichsschiene ist mit einem Fundamenterder verbunden **(Bild 1)**. Der früher vorgeschriebene Anschluss an die Badewanne ist noch oft vorhanden und kann bleiben.

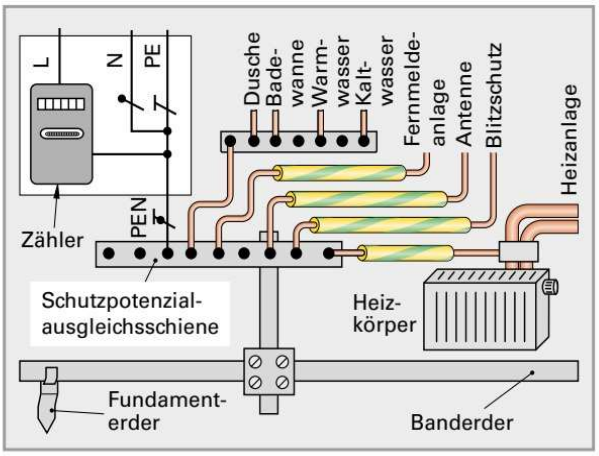


Bild 1: Schutzpotenzialausgleich

Schutz im TN-System

In einem TN-System ist ein PC-Labor mit 8 PCs und einem Datennetz einzurichten. Für den Laborraum ist neben dem Überstromschutzorgan ein RCD (FI-Schalter) vorgeschrieben **(Bild 2)**. Der Fehlerstrom darf 30 mA nicht überschreiten.

Bei einem Körperschluss, z. B. im PC 8, fließt der Strom I_F vom Außenleiter L1 über das PC-Gehäuse und den Schutzleiter PE direkt ins Netz zurück. Der Strom würde aufgrund des geringen elektrischen Widerstandes auf einen hohen Wert ansteigen. Der RCD (FI-Schalter) mit einem Nennfehlerstrom von 30 mA schaltet innerhalb von 0,2 s ab, sodass am PC-Gehäuse keine gefährliche Berührspannung auftreten kann.

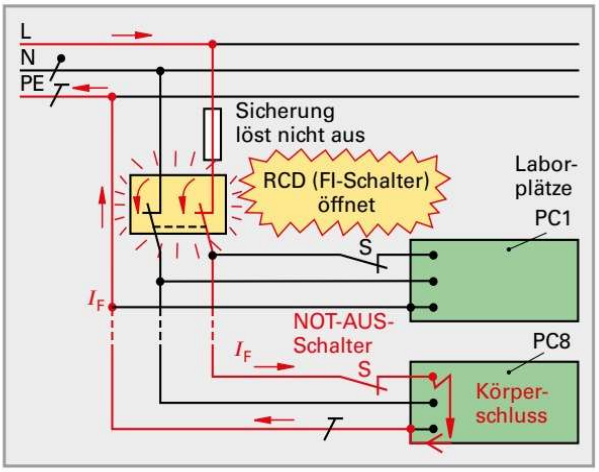


Bild 2: Schutz im TN-S-System bei Körperschluss

Der RCD ist ein Summenstromwandler **(Bild 3)**. Er vergleicht den zufließenden Strom durch den Leiter L1 mit dem rückfließenden Strom durch den Leiter N. Tritt eine Stromdifferenz auf, wird in dem die Leiter umschließenden Eisenkern ein Magnetfeld aufgebaut. Ist die Stromdifferenz so groß wie der Nennfehlerstrom des RCD oder größer, wird in der Induktionswicklung eine ausreichende Spannung induziert, um den RCD allpolig abzuschalten.

> Damit der Fehlerstrom erkannt wird, muss der Leiter PE außerhalb des RCD (FI-Schalter) vom Netz zum Verbraucher führen.

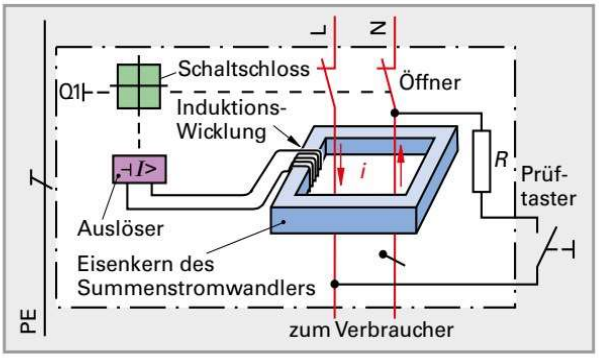


Bild 3: Aufbau des RCD (FI-Schalter)

Eine Prüftaste erzeugt einen gewollten Fehlerstrom, der den RCD auslöst. Mit dem Prüftaster wird in regelmäßigen Zeitabständen die Funktion des Schutzorgans getestet.

Bei einem Kurzschluss, z. B. im PC 1, fließt der Strom über den Leiter N durch den RCD ins Netz zurück **(Bild 4)**. Da die Stromsumme im RCD null ist, löst dieser nicht aus. Der Strom steigt auf ein Vielfaches des Bemessungsstromes (Nennstromes) des Leitungsschutzschalters. Dieser unterbricht dadurch den Stromkreis durch Abschalten.

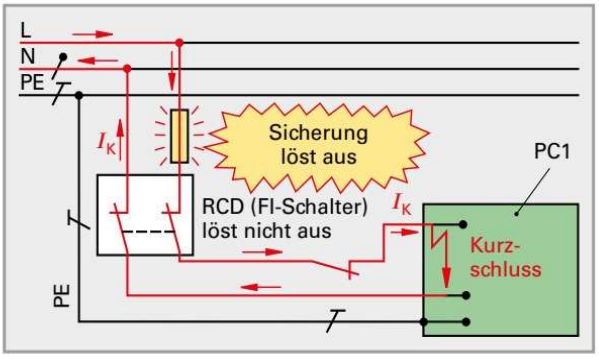


Bild 4: Abschalten bei Kurzschluss im TN-S-System

> RCD (FI-Schalter) ersetzen nicht die Schutzfunktion von Überstromschutzorganen.

Ist im TN-System der Schutzleiter defekt (Bruchstelle) und liegt ein Körperschluss vor, liegt am PC-Gehäuse die volle Netzspannung **(Bild 1)**. Sobald das Gehäuse von dem PC-Benutzer berührt wird, löst der RCD aus. Dazu darf der Widerstand gegen Erde aber nicht zu groß sein.

Beispiel 1: Auslösewiderstandswert berechnen

Welchen Wert muss der Gesamtwiderstand gegen Erde unterschreiten, damit der RCD (30 mA) noch auslöst?

Lösung: R_{max} = 230 V / 30 mA = **7,67 kΩ**

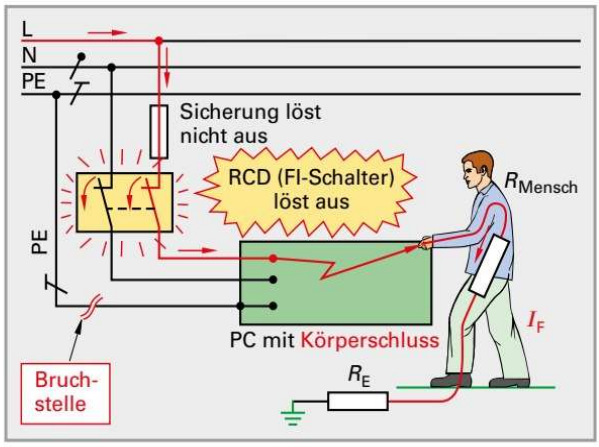


Bild 1: Fehlerschutz bei defektem Schutzleiter

Schutz im TT-System

Da das TT-System keinen Schutzleiter besitzt, werden alle Verbraucher über einen gemeinsamen Erder direkt geerdet **(Bild 2)**. Der Abschaltstrom I_A bei Körperschluss fließt über das Erdreich zum sekundären Sternpunkt des Netztransformators zurück. Der Erdungswiderstand der Anlage R_A muss so klein sein, dass die Berührspannung den maximalen Grenzwert nicht überschreitet, z. B. 50 V für den Menschen in Wechselspannungsanlagen.

Beispiel 2: Erdungswiderstand berechnen

Welchen Wert darf R_A höchstens haben, damit beim Abschalten durch den RCD (30 mA) die maximale Berührspannung nicht überschritten wird?

Lösung: R_{max} = 50 V / 30 mA = **1,67 kΩ**

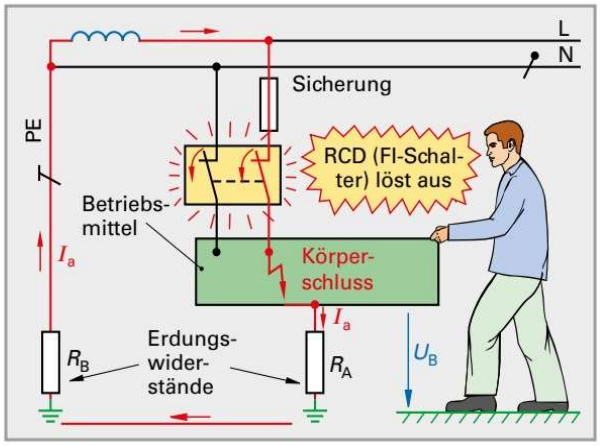


Bild 2: Schutz bei Körperschluss im TT-System

Schutz im IT-System

Das IT-System ist ein von der öffentlichen Stromversorgung galvanisch getrenntes Netz, z. B. in einem Operationssaal. Alle Leiter sind gegen Erde isoliert und die Betriebsmittel sind über einen Schutzleiter direkt geerdet. Tritt ein Fehler auf, z. B. ein Körperschluss über den Leiter L1, so wird L1 geerdet **(Bild 3)**. Es ensteht keine gefährliche Berührspannung. Der Fehlerstrom ist zu gering, um ein Abschalten zu bewirken. Damit der Fehler überhaupt erkannt wird, ist eine Isolationsüberwachung vorgeschrieben, welche den Fehler anzeigt. Erst beim Auftreten eines zweiten Fehlers, z. B. eines Erdschlusses des Leiters L3, schaltet der RCD das Netz ab (Bild 3).

Im IT-System ist eine Isolationsüberwachung vorgeschrieben.

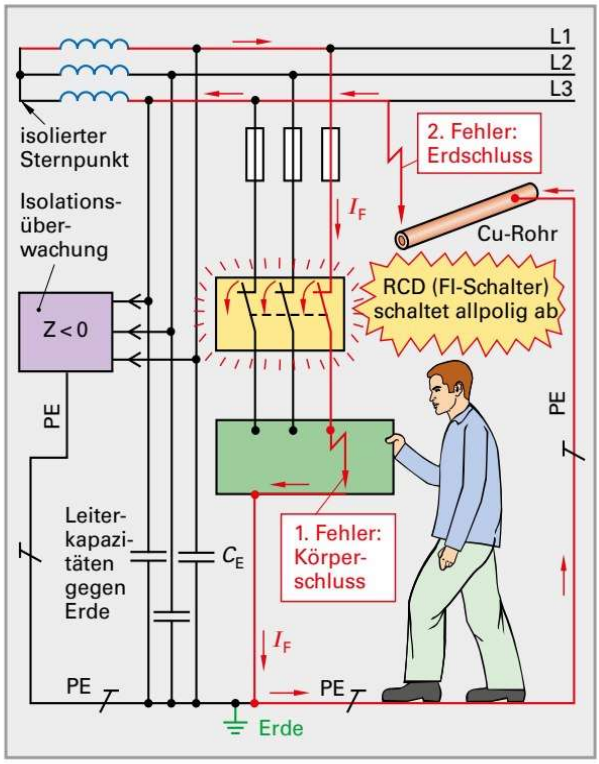


Bild 3: Abschalten im IT-System bei 2 Fehlern

6.6 Elektromagnetische Verträglichkeit EMV

6.6.1 EMV-Störungen

Bei der Signalübertragung muss sichergestellt sein, dass die Information während der Übertragung nicht verfälscht wird. Schon ein kurzes Flachbandkabel kann Störungen in Form von elektromagnetischen Wellen „einfangen" aber auch aussenden. Durch elektrostatisch oder elektromagnetisch hervorgerufene Spannungen können elektronische Bauelemente zerstört werden.
Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) befasst sich mit der Beeinflussung durch elektromagnetische Störsignale. Darunter fallen alle elektromagnetischen Strahlen und Felder, welche die technischen Systeme aber auch die Umwelt und insbesondere den Menschen beeinflussen.

Die EMV bezieht sich auf strahlende elektrische und magnetische Störfelder sowie leitungsgebundene Störsignale.

Störkopplungsmodell
Ein Betriebsmittel, das Störungen verursacht, wird als Störquelle (source) bezeichnet. Das beeinflusste Betriebsmittel heißt Störsenke (victim). Durch Kopplung oder den Kopplungspfad (coupling path) gelangt die Störung von der Störquelle zur Störsenke (**Bild 1**).

Kopplungsarten
Die **galvanische Kopplung** geschieht durch gemeinsame Bauelemente oder Leitungsabschnitte, über die Ausgleichsströme fließen.
Die **kapazitive Kopplung** erfolgt über elektrische Felder, z. B. bei parallel geführten Leitern in Kabelkanälen oder auf Leiterplatten.
Bei der **induktiven Kopplung** wird die Störsenke durch ein Magnetfeld beeinflusst, z. B. wenn magnetische Feldänderungen eine Leiterschleife durchsetzen.
Wenn Kabel oder Leitungen als Antenne wirken und elektromagnetische Felder als Funksignale ungewollt empfangen oder aussenden, spricht man von Strahlungskopplung. Durch Abschirmung lassen sich Störungen vermeiden (**Bild 2**).

Störungsarten
- Leitungsgebundene Störungen werden z. B. direkt über Versorgungsleitungen zur Störsenke übertragen. Abhilfe schafft eine Filterung.
- Feldgebundene Störungen entstehen z. B. durch die Einkopplung einer Mobiltelefonübertragung in eine Audioeinrichtung oder durch kapazitive oder magnetische Felder bei schlecht abgeschirmten Geräten.

Die Einhaltung der in der Checkliste **(Bild 3)** genannten Punkte vermeidet EMV-Störungen.

! **Europäische EMV-Gesetzgebung:**
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV/EMC von electromagnetic compatibility) ist die Fähigkeit eines Gerätes in der elektromagnetischen Umwelt zuverlässig zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere in dieser Umwelt vorhandene Geräte unannehmbar wären (EU-Richtlinie 2004/108/EG).

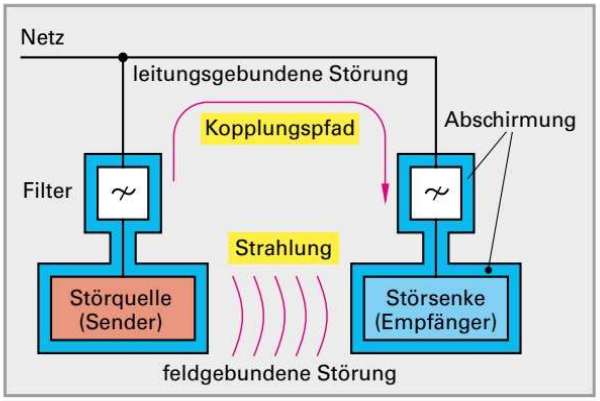


Bild 1: EMV-Störkopplungsmodell

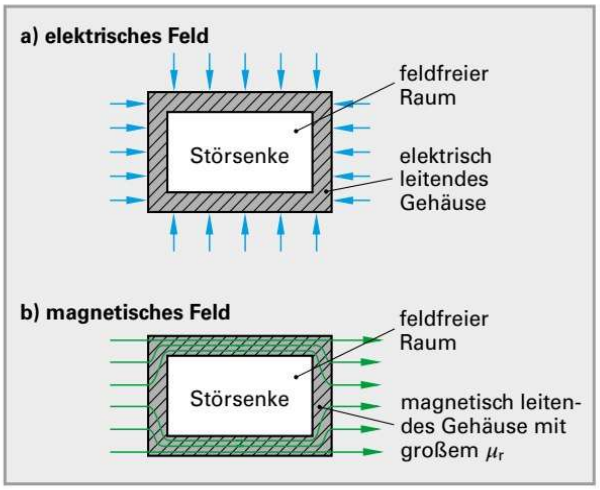


Bild 2: Abschirmung gegen Felder

EMV-Checkliste
- ☐ Leitungen so kurz wie möglich?
- ☐ Hin-/Rückleitung zusammen verlegt?
- ☐ Geschirmte Leitung verwendet?
- ☐ Schirm flächig geerdet?
- ☐ Filter eingebaut?
- ☐ Filter flächig geerdet?

Bild 3: Checkliste für die Vermeidung von EMV-Störungen bei Strahlungskopplung

Mit dem CE-Zeichen bestätigt der Hersteller, dass das Produkt den produktbezogenen geltenden europäischen Richtlinien entspricht.

6.6.2 Grenzwerte und Normen zum Schutz der Gesundheit bei technisch erzeugten Feldern

Das unsichtbare elektromagnetische Umfeld, z. B. durch Hochspannungsleitungen, Richtfunksender, Mobiltelefone oder elektrische Installationen hervorgerufen, lässt sich vom Menschen nicht fernhalten.

Niederfrequente Felder

Niederfrequente Felder (Frequenzen kleiner als 30 kHz) induzieren vorwiegend schwache elektrische Ströme im menschlichen Körper. Die elektrischen Feldstärken von Haushaltsgeräten sind relativ gering und in der Regel kleiner als 0,5 kV/m. Hochspannungsleitungen besitzen dagegen hohe elektrische Feldstärken (**Tabelle 1**).

Hochfrequente Felder

Hochfrequente Felder (größer als 30 kHz) wirken auf atomarer Ebene. Die hier auf den menschlichen Körper einwirkenden Feldstärken sind sehr stark von den Umgebungsbedingungen abhängig.

Grenzwerte und Normen

Für den Schutz der Allgemeinheit vor der Einwirkung nichtionisierender elektromagnetischer Felder sind in der Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (26. BImSchV) Grenzwerte festgelegt. Im niederfrequenten Bereich dürfen die äußeren Felder nur so stark sein, dass Schädigungen durch Körperströme nicht möglich sind (**Tabelle 2**).

Die durch hochfrequente Strahlung im Körper erzeugte Temperaturerhöhung sollte nicht größer als 0,5 °C im 6-Minuten-Intervall sein (IRPA-Empfehlung). Die Strahlenschutzgesellschaft empfiehlt für die Bevölkerung einen Grenzwert für die Energieabsorption im Körper auf der Basis von Spezifischen Absorptionsraten (SAR).

Um schädliche Wirkungen zu vermeiden, darf z. B. die Wärmeabsorption im Körper über 6 Minuten den Wert von 80 mW/kg für die Allgemeinbevölkerung nicht überschreiten (Bereich 100 kHz).

Der Ganzkörper-SAR-Wert beträgt 0,08 W/kg, der Teilkörper-SAR-Wert z. B. für das Auge beträgt 2 W/kg. Für die berufliche Tätigkeit gelten um den Faktor 5 höhere Werte. Die Einhaltung der Grenzwerte ist durch geeignete Messungen an Nachbildungen zu kontrollieren (**Bild 1**).

Analoge und digitale Signale

Die Grenzwert-Empfehlungen unterscheiden bei Funkgeräten und Mobiltelefonen zwischen analogen und digitalen Signalen. Bei Einhaltung der Mindestabstände zwischen Kopf und Antenne wird demnach der Teilkörper-SAR-Wert bei Mobiltelefonen zuverlässig unterschritten (**Tabelle 3**).

! **Einheit des elektromagnetischen Feldes, Flussdichte in (B)**
1 T = 1 Tesla = 1 Vs/m²
(nach Nicola Tesla 1856-1943, amerik. Erfinder)
IRPA von International radiation protection association = internationale Strahlenschutzgemeinschaft.

Tabelle 1: Felder bei Hochspannungsleitungen (Leiterstrom 1 kA, 1 m über dem Boden

Spannung (kV)	Elektr. Feld (kV/m)	magn. Flussdichte (µT)
110	0,6 - 2,2	5,6 - 20,1
220	1,2 - 3,8	5,3 - 13,9
380	2,5 - 6,3	5,2 - 12,7

Tabelle 2: Grenzwerte für Frequenzen von f = 50/60 Hz

Norm/Empfehlung	elektrische Feldstärke E	magnetische Flussdichte B
DIN VDE 0848:		
Expositionsbereich 1	21,3 kV/m	1360 µT
Expositionsbereich 2	6,7 kV/m	425 µT
IRPA:		
Expositionsbereich 1	10,0 kV/m	500 µT
Expositionsbereich 2	5,0 kV/m	100 µT

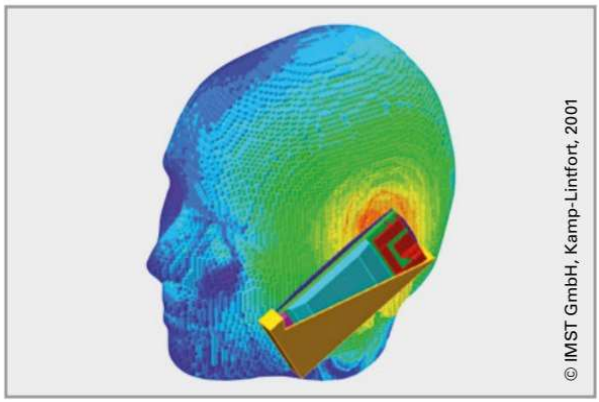


Bild 1: Erwärmungszonen beim Mobiltelefonieren

Tabelle 3: Empfohlene Mindestabstände Antenne-Kopf zur Einhaltung des Teilkörper-SAR-Wertes

Frequenz	Spitzenleistung	Mindestabstand
450 MHz analog	bis 0,5 W bis 1 W	kein Mindestabstand ca. 4 cm
900 MHz analog	bis 0,5 W bis 1 W	kein Mindestabstand ca. 5 cm
900 MHz digital	bis 2 W bis 4 W	kein Mindestabstand ca. 3 cm
1800 MHz digital	bis 1 W bis 2 W	kein Mindestabstand ca. 3 cm

Geräte, die analoge Funksignale in hohen Frequenzbereichen abstrahlen, erfordern einen größeren Abstand vom Kopf zur Antenne.

6.6.3 Überspannungsschutz bei einer IT-Anlage

Außer den elektronischen Spannungen treten in elektronischen Anlagen auch Überspannungen durch Blitzeinschlag und durch Schaltvorgänge im Versorgungsnetz auf, z. B. beim Abschalten von Motoren. Blitzeinschläge im Abstand bis 1000 m vom Netz führen ebenso zu Überspannungen wie direkte Blitzeinschläge in das Netz. Die Spannungsübertragung ins Netz erfolgt dann kapazitiv, induktiv oder auch galvanisch (durch Stromleitung, **Bild 1**).

Blitzeinschläge können zu Überspannungen an elektrischen Geräten führen, auch wenn die Einschläge vom Gerät weit entfernt sind.

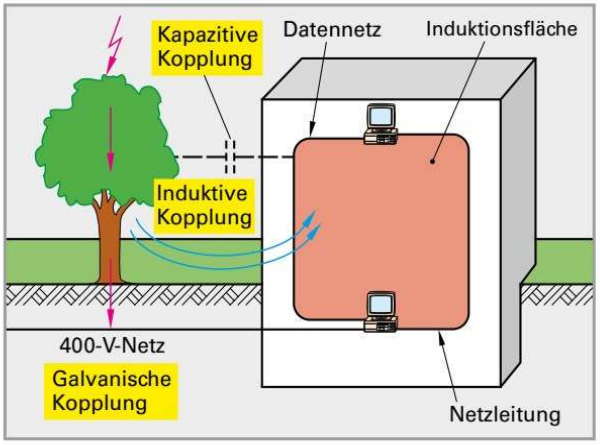


Bild 1: Überspannungsübertragung infolge Blitzeinschlag

Das Übertragen von Überspannungen aus dem 230-V-Netz in das Datennetz der elektronischen Anlage wird durch Überspannungsableiter zwischen den Netzleitern und einem geerdeten Leiter PE vermieden **(Bild 2)**.

Bei einem Blitzeinschlag in das elektrische Versorgungsnetz breitet sich ein energiereicher Impuls, genannt Spannungsstoßwelle, im Netz aus. Deren Energie ist zu groß, als dass sie von einem empfindlichen Bauelement, z. B. einer Z-Diode, abgeleitet werden könnte. Deshalb wird die Stoßspannungswelle zuerst einem robusten Gasableiter zugeführt, der aber etwas verzögert zündet, sodass einige hundert Volt übrig bleiben **(Bild 3)**. Eine nachgeschaltete Induktivität macht die Flanken der verbleibenden Spannung flacher und ein VDR-Widerstand baut, allerdings verzögert, die Spannung weiter ab. Nach einer weiteren Induktivität setzt schließlich z. B. eine Suppressordiode die Spannung auf wenige Volt herab.

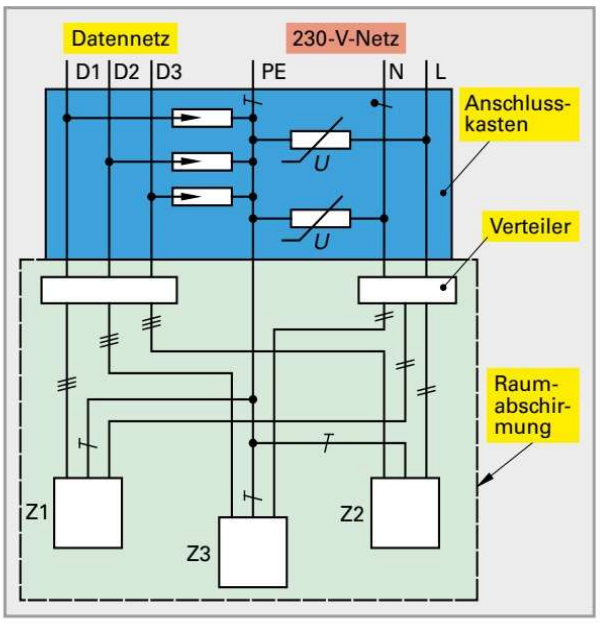


Bild 2: Überspannungsschutz einer IT-Anlage

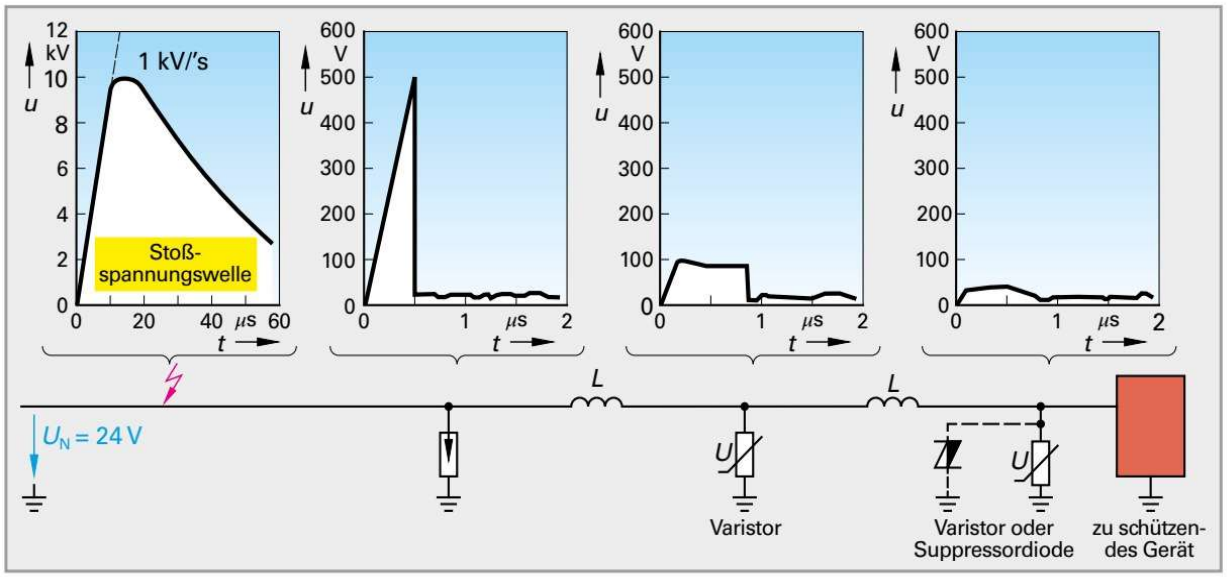


Bild 3: Abbau der Überspannung eines Blitzeinschlages durch Überspannungsableiter

Testen Sie Ihre Fachkompetenz!

Aufgabe 1: Zahlensysteme

a) Wandeln Sie folgende Hexadezimalzahlen in Dualzahlen um:
5_h, 7_h, B_h, 10_h, 15_h, $2A_h$, $E07_h$, $D2FC_h$.

b) Wandeln Sie folgende Dualzahlen in Hexadezimalzahlen um:
1001_2, 100_2, $1000\ 0001_2$, $1100\ 0101_2$, $10\ 1100_2$, $101\ 1111\ 1101_2$, $1010\ 0000\ 0001_2$.

Aufgabe 2: BCD-Codes

a) Welche Eigenschaft hat ein einschrittiger BCD-Code?

b) Geben Sie einen einschrittigen BCD-Code und dessen Anwendung an.

Aufgabe 3: Logikschaltung

4 Motoren nehmen unterschiedliche Leistungen auf **(Bild 1)**. Sind sie in Betrieb, führen ihre Signalausgänge A bis D den logischen Wert 1. Bei einer Gesamtleistung ab 5 kW leuchtet die orangene LED Y und bei einer Gesamtleistung ab 7 kW zusätzlich die rote LED Z.

a) Entwickeln Sie die logischen Funktionen für Y und Z mithilfe der ODER-Normalform oder einem KV-Diagramm.

b) Zeichnen Sie die Logikschaltung.

Aufgabe 4: Stromversorgung

In einem Labor führt ein 42 m langes, 3-adriges Kupferkabel mit Leiterquerschnitten von 1,5 mm² vom 230-V-Gebäudeanschluss zu einer PC-Steckdose.

a) Nennen Sie Farben und Funktionen der Adern.

b) PCs mit einer Stromaufnahme von 2 A werden an der Steckdose angeschlossen. Berechnen Sie die Spannung, die an der PC-Steckdose anliegt.

Aufgabe 5: LED-Schaltung

Berechnen Sie die Widerstandswerte R_1 bis R_3 von **Bild 2**, wenn die LEDs mit 20 mA folgende Spannungen haben: Rot 1,6 V, Grün 2,4 V und Blau 3,4 V.

Aufgabe 6: Mikrocontroller

a) Am Eingang E1 des Mikrocontrollers aus **Bild 3** befindet sich eine Schutzdiode. Berechnen Sie den Strom und die Leistungsaufnahme der Diode, wenn eine Spannung von 5,6 V angelegt wird (Bild3).

b) Am Ausgang A1 des Controllers soll über einen NPN-Transistor mit B = 100 eine Signallampe mit SV /1 W betrieben werden. Berechnen Sie den Strom, den der Controller ausgeben muss.

Aufgabe 7: Verstärkerschaltung mit OP

Berechnen Sie den Widerstand R_1 in der Verstärkerschaltung aus **Bild 4**.

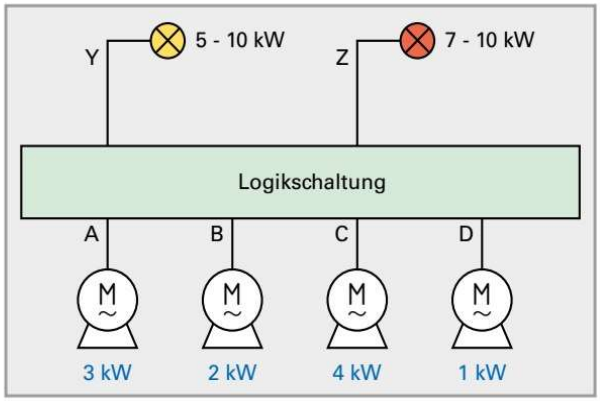


Bild 1: Logikschaltung

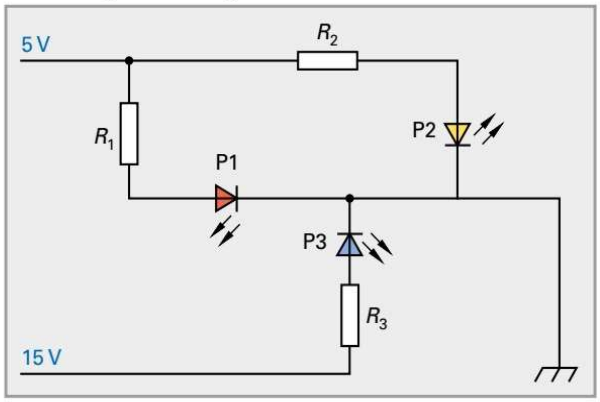


Bild 2: Leuchtdioden

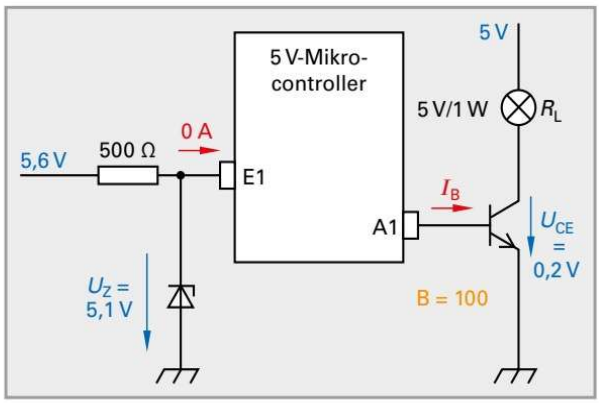


Bild 3: Mikrocontroller

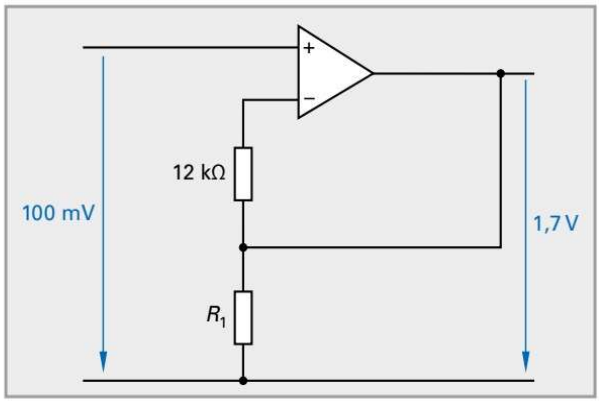


Bild 4: Verstärkerschaltung