

## 2 Grundbegriffe der Elektrotechnik

### 2.1 Umgang mit physikalischen Größen

#### Gesetze und Normen

Das Gesetz über Einheiten im Messwesen schreibt Einheiten und Einheitenzeichen vor. Wichtige Normen sind in der **Übersicht** genannt.

#### Gleichungen und Formeln

Man unterscheidet

- Zahlenwertgleichungen, z. B.  $3x = 8 + x$
- Großengleichungen (Formeln), z. B.  $F_G = m \cdot g$

**Zahlenwertgleichungen** setzen zwei Terme z. B.  $(3x \text{ und } 8 + x)$  mit Zahlen und Variablen ( $x$ ) gleich. Die Zahl für die Variable ( $x$ ), die beide Terme gleichwertig macht, ist die Lösung der Gleichung ( $x = 4$ ).

**Größengleichungen** (Formeln) bestehen meist aus Variablen, z. B.  $F_G, m$ . Sie erfassen den mathematischen Zusammenhang zwischen physikalischen Größen.

#### Einheitenvorsätze

Sehr große oder sehr kleine Größenwerte drückt man mit einem Einheitenvorsatz aus (**Tabelle 1**). Man schreibt z. B. 5432 **km** statt 5 432 000 **m**.

#### Physikalische Größen

Messbare Eigenschaften von Körpern oder physikalischen Zuständen nennt man **physikalische Größen**, z. B. Länge, Temperatur, Spannung. Sie bestehen aus einem Zahlenwert und der Maßeinheit, z. B. 3,4 m, 36 °C oder 230 V. Physikalische Größen werden mit Formelzeichen abgekürzt, z. B.  $l$  für Länge,  $T$  für Temperatur,  $U$  für elektrische Spannung.

In der Technik werden nur SI-Einheiten<sup>1</sup> oder davon abgeleitete Einheiten benutzt (**Tabelle 2**).

**Kursiv** schreibt man nach DIN 1313 und DIN 1338

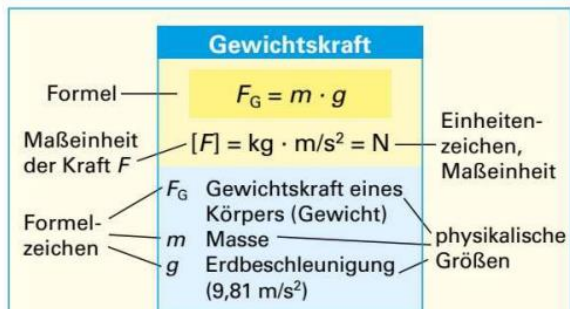
- Formelzeichen z. B.  $F$  (Kraft),
- Variablen, z. B.  $x, y$ .

### Masse und Kraft

Den Materiegehalt einer Stoffmenge z. B. von einem Liter Wasser nennt man Masse. Die Masse hat das Formelzeichen  $m$  und die Maßeinheit kg. Die Masse ist ortsunabhängig. Auf der Erde wirkt auf jede Masse eine Anziehung. Diese Eigenschaft nennt man Gewichtskraft  $F_G$  (**Bild**).

#### Übersicht: Normen über Größen und Einheiten, Formelzeichen und Gleichungen

- DIN 1301 Einheiten
- DIN 1302 Mathematische Zeichen und Begriffe
- DIN 1304 Formelzeichen
- DIN 1313 Physikalische Größen und Gleichungen
- DIN 1338 Formelschreibweise



#### Beispiel:

Eine Kiste mit Werkzeugen hat die Masse  $m = 15 \text{ kg}$ . Berechnen Sie die Gewichtskraft  $F_G$ .

#### Lösung:

$$F_G = m \cdot g = 15 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 147 \text{ N}$$

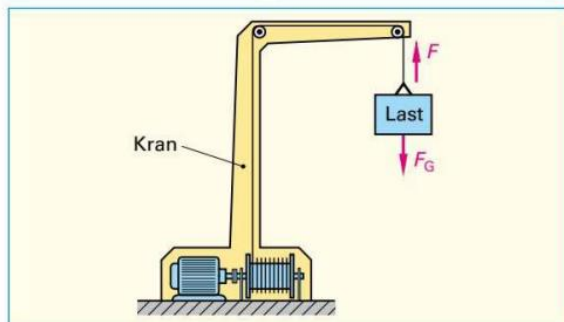


Bild: Kräfte auf eine Last am Kran

**Tabelle 1: Vorsätze für Vielfache und Teile der Einheiten (Auswahl)**

Vorsatz	Peta	Tera	Giga	Mega	Kilo	Dezi	Zenti	Milli	Mikro	Nano	Piko
Zeichen	P	T	G	M	k	d	c	m	$\mu$	n	p
Faktor	$10^{15}$	$10^{12}$	$10^9$	$10^6$	$10^3$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$
				1 000 000	1 000	0,1	0,01	0,001	0,000 001		

**Tabelle 2: SI-Basisgrößen und SI-Basiseinheiten**

Basisgröße	Länge	Zeit	Masse	Stromstärke	Temperatur	Stoffmenge	Lichtstärke
Formelzeichen	$l$	$t$	$m$	$I$	$T$	$n$	$I_v$
Basiseinheit	Meter	Sekunde	Kilogramm	Ampere	Kelvin	Mol	Candela
Einheitenzeichen	m	s	kg	A	K	mol	cd

<sup>1</sup> SI, Abk. für: Système International d'unités (frz.) = Internationales Einheitensystem

## Mechanische Arbeit

Eine Arbeit wird immer dann verrichtet, wenn ein Körper durch Einwirkung einer Kraft  $F$  entlang eines Weges  $s$  bewegt wird, z. B. wenn der Kran in **Bild, Seite 21** die Last gegen die Gewichtskraft  $F_G$  hochhebt. Dabei müssen die Richtung der Kraft  $F$  und die Bewegungsrichtung des Körpers gleich sein. Die Arbeit  $W^1$  wird in der Maßeinheit **Newtonmeter** (Einheitenzeichen Nm) oder mit dem besonderen Einheitennamen **Joule**<sup>2</sup> (Einheitenzeichen J) gemessen.

## Energie

Die angehobene Last hat sich äußerlich nicht geändert. Sie hat jedoch beim Anheben Energie gespeichert. Beim Absenken der Last ist sie in der Lage, Arbeit zu verrichten, z. B. einen Generator anzutreiben.

Energie ist das Vermögen, Arbeit zu leisten.

Die Last am Kran kann beim Absenken genauso viel Arbeit verrichten, wie zuvor Arbeit aufgewendet wurde, um die Last anzuheben. Diesen Zusammenhang nennt man **Energieerhaltungssatz**.

Energie kann nicht erzeugt oder verbraucht werden. Energie kann man nur in andere Energiearten umwandeln.

Die Maßeinheit der Energie ist Newtonmeter (Nm) oder Joule (J), genau wie bei der Arbeit.

Die Energie, die in der angehobenen Last gespeichert ist, heißt **potenzielle Energie**  $W_{\text{pot}}$  (Lageenergie). Beim Absenken wird sie in Bewegungsenergie (**kinetische Energie**  $W_{\text{kin}}$ ), beim Bremsen meist in **Wärme** umgewandelt. Man unterscheidet außer der **mechanischen Energie** noch andere Energiearten (**Übersicht**).

### Beispiel:

Ein Gabelstapler hebt einen Elektromotor mit der Masse  $m = 75 \text{ kg}$  den Weg  $s = 1,2 \text{ m}$  hoch (**Bild**). Berechnen Sie

a) die Gewichtskraft des Elektromotors, b) die Arbeit, die zum Anheben nötig ist.

### Lösung:

a)  $F_G = m \cdot g = 75 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 736 \text{ N}$ ; b)  $W = F \cdot s = 736 \text{ N} \cdot 1,2 \text{ m} = 883 \text{ Nm}$



Elektrische Energie: **Seite 42**, elektrische Leistung: **Seite 44**

## Mechanische Leistung

Die aufgewendete Leistung des Gabelstaplers ist umso größer, je schwerer die Last ist, die er anhebt, und je kürzer die Zeit ist, die er dafür benötigt. Allgemein gilt: Je größer eine Arbeit ist und je schneller sie verrichtet wird, desto mehr **Leistung**  $P^3$  muss dazu aufgebracht werden. Die Maßeinheit für die Leistung ist Watt<sup>4</sup> (W).

Leistung ist verrichtete Arbeit geteilt durch die benötigte Zeit.

### Beispiel:

Der Gabelstapler aus obigem **Beispiel** benötigt zum Anheben der Last 3 s. Berechnen Sie die erforderliche Leistung.

### Lösung:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{883 \text{ Nm}}{3 \text{ s}} = 294 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 294 \frac{\text{Ws}}{\text{s}} = 294 \text{ W}$$

<sup>1</sup> W von work (engl.) = Arbeit, <sup>2</sup> nach Joule (sprich dschul), engl. Physiker, 1818 bis 1889  
<sup>3</sup> P von power (engl.) = Leistung <sup>4</sup> nach James Watt, engl. Physiker, 1736 bis 1819

## Arbeit und Energie

$$W = F \cdot s \quad [W] = \text{Nm}$$

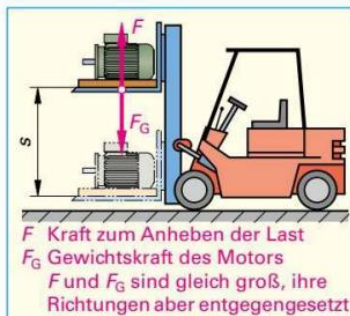
$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$$

$W$	Arbeit, Energie
$W_{\text{pot}}$	potenzielle Energie
$F$	Kraft
$s$	Weg
$m$	Masse
$g$	Erdbeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
$h$	Höhe

## Übersicht: Energiearten

- Mechanische Energie
- Kernenergie
- Wärmeenergie
- Elektrische Energie
- Lichtenergie
- Chemische Energie

**i**  $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$



**Bild:** Verrichten einer Arbeit durch einen Gabelstapler

## Leistung

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

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

$P$	Leistung	$F$	Kraft
$W$	Arbeit	$s$	Weg
$v$	Geschwindigkeit	$t$	Zeit

## i Leistung

- Formelzeichen:  $P$
- Einheitenname: Watt
- Einheitenzeichen: W
- Einheitenvorsätze (Beispiele):  
 $1 \text{ mW} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 0,001 \text{ W}$   
 $1 \text{ kW} = 1 \cdot 10^3 \text{ W} = 1000 \text{ W}$   
 $1 \text{ MW} = 1 \cdot 10^6 \text{ W} = 1\,000\,000 \text{ W}$

## 2.2 Arten von Stromkreisen

In der Elektrotechnik muss die elektrische Energie sicher und wirtschaftlich bis zum Verbraucher geliefert werden. Dazu benötigt man verschiedene Stromkreise. Man unterscheidet in der Praxis:

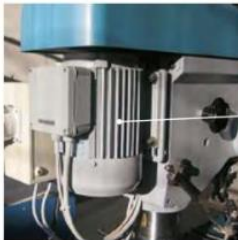
- Elektrische Gleichstromkreise,
- Einphasen-Wechselstromkreise (vereinfacht Wechselstromkreise genannt),
- Dreiphasen-Wechselstromkreise (auch Drehstromkreise genannt).

Elektrischer Gleichstromkreis (Seite 24)		
Betriebsmittelanschluss	Kennzeichnung	Schaltplan
Positiver Pol	+	
Negativer Pol	-	
Leiterbenennung	Kennzeichnung	
Positiver Leiter	L+	
Negativer Leiter	L-	

Überstrom-Schutzeinrichtungen (Sicherungen)

Gleichrichtung: Seite 251

Dreiphasen-Wechselstromkreis (Seite 155)		
Leiterbenennung	Kennzeichnung	Schaltplan
Außenleiter 1	L1	
Außenleiter 2	L2	
Außenleiter 3	L3	
Neutralleiter	N	
Schutzleiter	PE	
Neutralleiter mit Schutzfunktion	PEN	



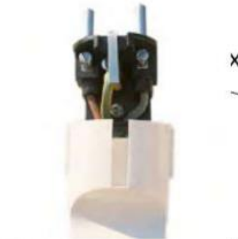
Drehstrommotor

- Motoren: Seite 481
- Schaltzeichen: Seite 654

Einphasen-Wechselstromkreis (Seite 127)		
Leiterbenennung	Kennzeichnung	Schaltplan
Außenleiter	L*	
Neutralleiter	N	
Schutzleiter	PE	



Schutzkontaktsteckdose

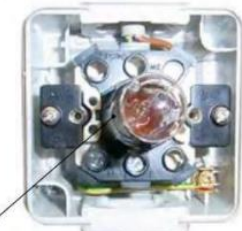


Schutzkontaktstecker

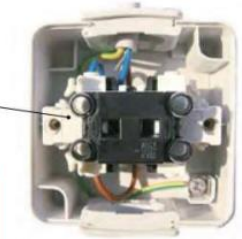
Anstelle der schwarzen Ader bei 5-adrigen Leitungen kann bei dreiadrigen Leitungen die blaue Ader verwendet werden.



Abzweigdose



Leuchte mit Lampe



Ausschalter

- Installationsschaltungen: Seite 103
- Farbkennzeichnung von Leitern: Seite 309
- Leitungsverlegung: Seite 315

\* Die Zahl nach „L“, z.B. L1, L2, L3, wird nur in Stromkreisen mit mehr als einem Außenleiter angegeben.

## Elektrischer Gleichstromkreis

**Versuch 1:** Verbinden Sie durch zwei Kupferdrähte eine Lampe für 1,2 V/0,22 A mit den Anschlüssen einer 1,5-V-Batterie, z. B. einer Mignon-(AA-) Batterie (**Bild 1**).

*Die Lampe leuchtet nur, wenn sie mit den Drähten verbunden ist und diese mit den Polen der Batterie Kontakt haben.*

Die Batterie liefert die elektrische Energie, welche die Lampe zum Leuchten bringt. Die Batterie ist im Versuch der **Erzeuger** (nach DIN VDE 0100, Teil 200 auch **Stromquelle** genannt). Die Lampe ist das elektrische Verbrauchsmittel oder kurz der Verbraucher. (Für die Begriffe Erzeuger und Verbraucher siehe auch **Seite 42**.)

Die Lampe leuchtet, wenn sie vom **elektrischen Strom** durchflossen wird. Dieser Strom fließt vom Pluspol der Batterie durch den oberen Draht zum Fußkontakt der Lampe, durch den Glühfaden hindurch zum Lampengehäuse und durch den unteren Draht zur Batterie zurück (**Bild 1**). In der Praxis wird diese Schaltung z.B. in einer Taschenlampe verwendet (**Bild 2**).

Der elektrische Strom fließt vom Erzeuger zum Verbraucher und wieder zurück zum Erzeuger. Diesen geschlossenen Weg nennt man elektrischen **Stromkreis**. Fließt der Strom im Stromkreis immer in die selbe Richtung, so spricht man von Gleichstrom.

- Elektrischer Strom fließt nur im geschlossenen Stromkreis.
- Ein Stromkreis besteht mindestens aus Erzeuger, Verbraucher und aus dem Hin- und Rückleiter.
- Im elektrischen Gleichstromkreis hat der Strom immer die gleiche Richtung. Die Stromstärke kann sich verändern.

**Versuch 2:** Fügen Sie in den Stromkreis des letzten Versuchs nacheinander Stäbe aus Kupfer, Aluminium, Stahl, Kohle, Glas, Porzellan und Kunststoff ein (**Bild 3**).

*Nur bei den Metallstäben und beim Kohlestab leuchtet die Lampe (allerdings mit unterschiedlicher Helligkeit).*

Metalle leiten den elektrischen Strom gut, Kohle weniger gut; Glas, Porzellan und Kunststoffe leiten den Strom gar nicht.

**Versuch 3:** Füllen Sie einen Becher aus Glas mit destilliertem Wasser<sup>1</sup> und tauchen Sie zwei blanke Kupferdrähte hinein. Verbinden Sie die Drähte mit der 1,5-V-Batterie und der Lampe. Schließen Sie den Stromkreis mit einem dritten Kupferdraht von der Lampe zur Batterie (**Bild 4**). Geben Sie dann etwas Kochsalz in das Wasser und lösen Sie es durch Umrühren mit einem Glasstab auf.

*Bei destilliertem Wasser bleibt die Lampe dunkel. Nach Auflösen des Salzes leuchtet sie.*

Reines Wasser leitet den elektrischen Strom fast nicht. Die Lösung eines Salzes oder einer Säure ist stromleitend.

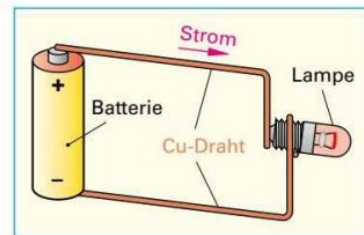
Die einzelnen Stoffe leiten den elektrischen Strom mehr oder weniger gut. Metalle, z. B. Kupfer oder Aluminium, besitzen eine gute Leitfähigkeit. Man verwendet sie als **Leiter**. Stoffe, die den elektrischen Strom nicht leiten, wie Luft, Gummi, Glas, Porzellan oder Kunststoffe bezeichnet man als **Nichtleiter**. Sie werden als **Isolierstoffe** benutzt.

Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der Leitfähigkeit von Leitern und von Nichtleitern (Isolierstoffen) liegt, nennt man **Halbleiter** (**Seite 195**). Sie werden für Bauelemente der Elektronik verwendet.

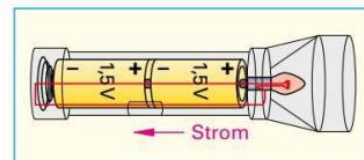
**Leiter** sind alle Metalle, Kohle, feuchte Erde und manche Flüssigkeiten.

**Nichtleiter** (Isolierstoffe) sind z. B. Luft, Gummi, Glas oder Kunststoffe.

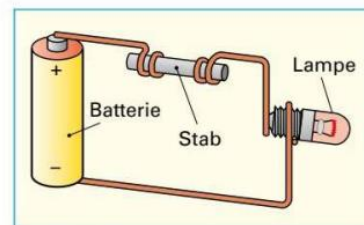
**Halbleiter** sind z. B. Silicium und Germanium.



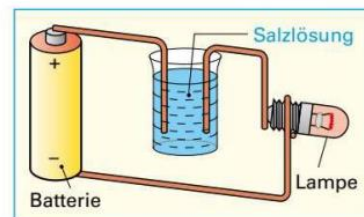
**Bild 1: Einfacher Gleichstromkreis**



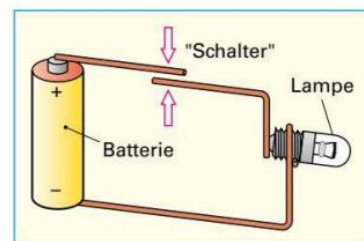
**Bild 2: Taschenlampe**



**Bild 3: Leiter und Isolierstoffe im Stromkreis**



**Bild 4: Salzlösung als Leiter**



**Bild 5: Unterbrechen des Stromkreises**

<sup>1</sup> Destilliertes Wasser ist Wasser ohne die im normalen Leitungswasser vorkommenden Ionen, Spurenelemente und Verunreinigungen.

**Versuch 4:** Bauen Sie einen Stromkreis nach **Bild 5, Seite 24**, auf. Drücken Sie die losen Enden der Drähte zusammen und öffnen Sie danach diesen improvisierten Schalter wieder.

*Die Lampe leuchtet nur, wenn der Schalter geschlossen ist und die Drähte elektrischen Kontakt miteinander haben.*

Ein Schalter besteht aus einem beweglichen Metallstück (Schaltstück), das mit festen Leiterwerkstoffen verbunden werden kann. Ein Isolierstoff, meist Luft, trennt in geöffnetem Zustand die Leiterwerkstoffe voneinander. Den Schalter baut man so in die Hinleitung ein, dass er sich leicht bedienen lässt.

Durch Schließen bzw. Öffnen des Schalters kann man den Verbraucher ein- oder ausschalten.

### Schaltzeichen

Schaltzeichen verwendet man zur Darstellung von Betriebsmitteln in Schaltplänen (**Seite 100**), hauptsächlich für Stromlaufpläne (**Seite 101**). Schaltzeichen (**Tabelle**) sind genormte Sinnbilder elektrischer Betriebsmittel wie Erzeuger, Verbraucher, Schalter, Widerstände oder Leiter. Schaltzeichen sollen die elektrischen Eigenschaften der Betriebsmittel zum Ausdruck bringen, über den konstruktiven Aufbau geben sie keine Auskunft. Widerstände haben z. B. immer das gleiche Schaltzeichen, unabhängig von ihrer Größe, ihrer Leistung oder ihrer Ausführungsform.

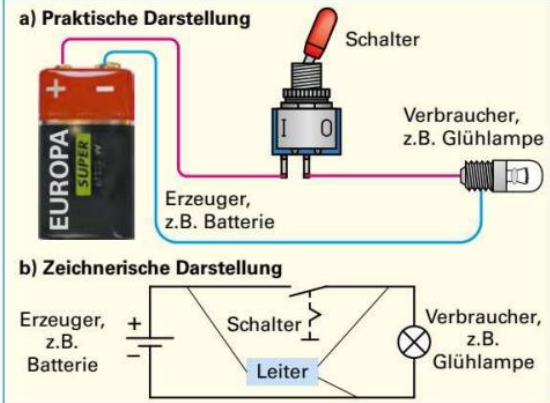
Die Schaltzeichen können in beliebiger Lage dargestellt werden, man bevorzugt jedoch die waagerechte oder senkrechte Lage. Mit den Schaltzeichen lassen sich Stromkreise einfach und übersichtlich darstellen. In einem Schaltplan werden die Schaltzeichen so zusammengestellt, wie die Teile der Stromkreise miteinander verbunden sind (**Bild**). Bei einer Verzweigung der Leiter kann die Verbindung der Leiter durch einen Punkt gekennzeichnet sein. Dieser Punkt darf auch weggelassen werden, wenn dadurch keine Verwechslung möglich ist (**Tabelle**), z. B. bei einer Leiterverzweigung.

Ob die einzelnen Schaltzeichen groß oder klein gezeichnet werden, hängt von der optischen Gesamtwirkung des Schaltbildes ab. Die Funktion der Schaltung muss jedoch gut erkennbar sein.

Tabelle: Schaltzeichen		
Benennung	Bild	Schaltzeichen
Leiter		—
Leiterkreuzung (nichtleitend)		
Leiterverzweigung, einfach		Form 1  Form 2
Leiterverzweigung, doppelt		Form 1  Form 2
Batterie (Erzeuger)		
Glühlampe		
Widerstand		
Schalter		

**i** Schaltzeichen (**Seite 654**) sind nach **DIN EN 60617** genormt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird bei Leitungsverzweigungen in diesem Buch die Form 2 verwendet.



**Bild:** Schaltplan eines Stromkreises

### Wiederholungsfragen

- 1 Aus welchen Teilen besteht ein elektrischer Stromkreis?
- 2 Unter welcher Bedingung fließt in einem Stromkreis ein elektrischer Strom?
- 3 In welche Gruppen kann man alle Stoffe nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit einteilen?
- 4 Wodurch unterscheiden sich elektrische Leiter von den Isolierstoffen?
- 5 Nennen Sie einige elektrische Leiter.
- 6 Zählen Sie gebräuchliche Isolierstoffe auf.
- 7 Wozu benötigt man Schaltzeichen?
- 8 Worauf ist bei der Darstellung der Betriebsmittel eines Schaltplanes zu achten?
- 9 Worin unterscheidet sich die Form 1 von der Form 2 bei Schaltzeichen zu Leiterverzweigungen?

## 2.3 Elektrische Ladung (Elektrizitätsmenge)

**Versuch 1:** Reiben Sie einen Stab aus Kunststoff, z. B. aus Polystyrol, mit einem trockenen Wolltuch und halten Sie ihn über Papierschnitzel, die auf einen Tisch gestreut sind (Bild 1).

Der Kunststoffstab zieht die Papierschnitzel an.

Entdeckt wurden diese Kräfte durch den Menschen beim Umgang mit Bernstein. Da Bernstein im Griechischen  $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$  (sprich elektron) heißt, nannte man diesen besonderen Zustand: **elektrisch**. Ursache für die Kräfte, die z. B. beim Reiben von Bernstein oder Kunststoff entstehen, ist die **elektrische Ladung  $Q$** .

**Versuch 2:** Reiben Sie einen Polystyrolstab mit dem Wolltuch und hängen Sie ihn an einem dünnen Faden auf (Bild 2). Bringen Sie einen zweiten mit dem Tuch geriebenen Polystyrolstab in seine Nähe.

Der drehbar aufgehängte Stab wird abgestoßen (Bild 2).

**Versuch 3:** Wiederholen Sie Versuch 2 mit Acrylglasstäben, die ebenfalls mit dem Wolltuch gerieben werden. Geriebene Acrylglasstäbe stoßen sich ebenfalls ab.

**Versuch 4:** Reiben sie mit dem Wolltuch einen Polystyrolstab und danach einen Acrylglasstab. Hängen Sie einen der Stäbe drehbar auf und nähern Sie den anderen Stab (Bild 3).

Polystyrolstab und Acrylglasstab ziehen sich an (Bild 3).

Da es abstoßende Kräfte und anziehende Kräfte gibt, hat man zwei verschiedene Ladungsarten festgelegt. Die beiden entgegengesetzten Ladungen hat man **positive Ladung  $+Q$**  und **negative Ladung  $-Q$**  genannt.

- Zwischen elektrischen Ladungen wirken Kräfte (Bild 4).
- Gleichartige elektrische Ladungen stoßen sich ab.
- Ungleichartige elektrische Ladungen ziehen sich an.
- Die elektrische Ladung hat das Formelzeichen  $Q$ .

Um das Wesen der elektrischen Erscheinungen genauer erklären zu können, hat man den Stoffaufbau untersucht. Alle Stoffe sind aus **Atomen**<sup>1</sup> aufgebaut. Die Atome sind so klein (Durchmesser etwa  $\frac{1}{10\,000}$   $\mu\text{m}$ ), dass man sie nur mit einem Rasterelektronen-Mikroskop sehen kann. Man verwendet z. B. das bohrsche<sup>2</sup> Atommodell, mit dem man das Verhalten der Atome beschreiben kann.

<sup>1</sup> atomos (griech.) = unteilbar

<sup>2</sup> Niels H. D. Bohr, dän. Physiker, 1885 bis 1962

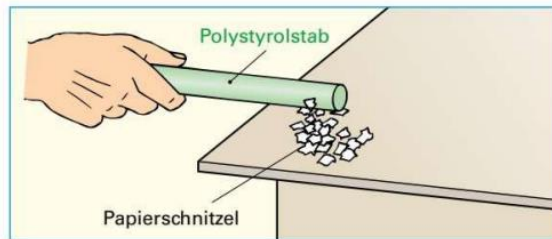


Bild 1: Anziehung durch Reibung

### Elektrische Ladung

Elektrische Ladung nennt man die Eigenschaft von Stoffen, die besondere Kräfte (Anziehung oder Abstoßung) hervorrufen können. Die elektrische Ladung ist die Ursache für alle elektrischen Vorgänge.

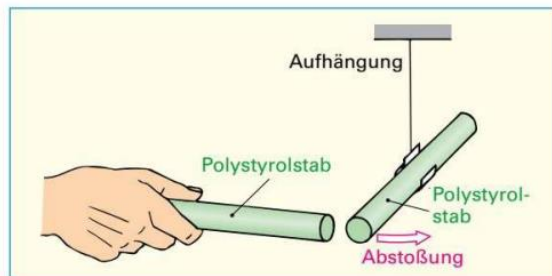


Bild 2: Abstoßung zwischen geriebenen Polystyrolstäben

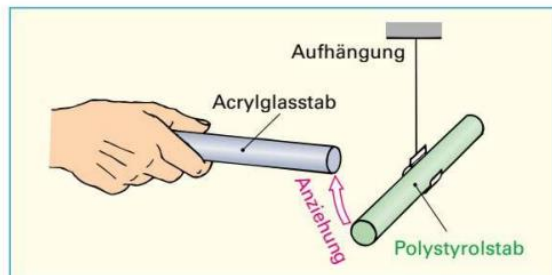


Bild 3: Anziehung von geriebenem Polystyrol- und Acrylglasstab

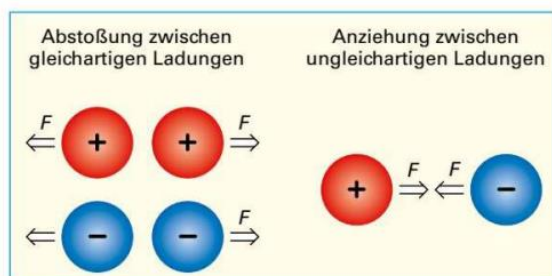


Bild 4: Kraftwirkungen zwischen elektrischen Ladungen

### Aufbau der Atome (bohrsches Atommodell)

Ein Atom besteht aus einem Kern und einer Hülle. Der Kern ist im Durchmesser etwa 100 000-mal kleiner als die Hülle. Der Kern enthält **Protonen** und **Neutronen**. Die Hülle besteht aus **Elektronen** (Bild 1). Neutronen sind elektrisch neutrale Teilchen des Atomkerns. Sie haben für die elektrischen Vorgänge keine Bedeutung. Protonen und Elektronen haben eine entgegengesetzte elektrische Ladung und ziehen sich deshalb an. Protonen, Neutronen und Elektronen sind nicht teilbar und werden **Elementarteilchen** genannt.

Protonen sind positiv geladene Elementarteilchen des Atomkerns, Elektronen sind negativ geladene Elementarteilchen der Atomhülle.

Da sich die Elektronen mit großer Geschwindigkeit um den Atomkern bewegen, entsteht eine Fliehkraft. Die Fliehkraft wirkt entgegen der Anziehungskraft zwischen Protonen und Elektronen, sodass die Elektronen nicht zum Kern angezogen werden. Die Neutronen sind elektrisch neutral und halten den Kern zusammen, wenn sich mehr als ein Proton im Kern befindet. Die Protonen würden sich ohne die Neutronen mit großer Kraft abstoßen.

Die Atomhülle kann man sich aus verschiedenen Schalen (Elektronenbahnen) zusammengesetzt denken. Die Atome, z. B. des Lithiums (Bild 2), des Metalls mit dem einfachsten Atomaufbau, haben in der inneren Schale zwei Elektronen. Die äußere Schale enthält ein Elektron. Der Lithium-Atomkern besteht aus drei Protonen und vier Neutronen. Nach außen wirkt das Atom elektrisch neutral, weil sich die Ladungen der drei Protonen im Kern und die Ladungen der drei Elektronen in der Hülle ausgleichen (Bild 2).

Die Protonen und die Elektronen nennt man **Ladungsträger**. Sie tragen die kleinste elektrische Ladung, die möglich ist. Diese Ladung nennt man **Elementarladung  $e$**  (Tabelle) mit dem Wert von  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C (Einheit der elektrischen Ladung, Coulomb<sup>1</sup>, abgekürzt C).

**Tabelle: Träger der Elementarladung**

Elementarteilchen	Elektronen	Protonen
Ladungsart	negativ	positiv
Formelzeichen	$e$	$e$
Zahlenwert	$-1,602 \cdot 10^{-19}$	$+1,602 \cdot 10^{-19}$
Einheitenname	Coulomb	Coulomb
Einheitenzeichen	C	C

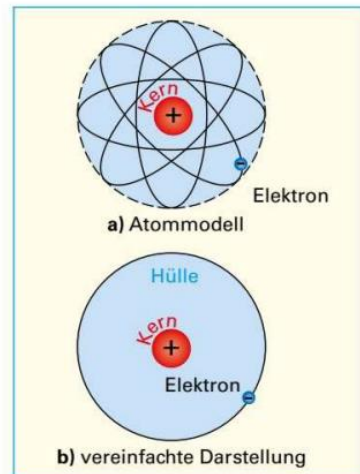
Atome, bei denen sich die Anzahl der Protonen und die Anzahl der Elektronen unterscheiden, nennt man **Ionen**<sup>2</sup>. Fehlen einem Atom Elektronen, ist es positiv geladen und wird **positives Ion** genannt. Hat das Atom mehr Elektronen in der Hülle als Protonen im Kern, ist es negativ geladen und wird **negatives Ion** genannt.

Ionen sind negative oder positive Ladungsträger, die aus neutralen Atomen oder Molekülen durch Anlagerung oder Abgabe von Elektronen entstehen.

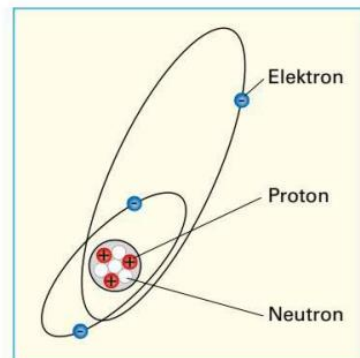
Aus der Anzahl der Elektronen bzw. der Protonen kann man die jeweilige **elektrische Ladung  $Q$  (Elektrizitätsmenge)** eines Atoms berechnen.

<sup>1</sup> Charles A. de Coulomb, franz. Physiker, 1736 bis 1806

<sup>2</sup> ion (griech.) = gehend, wandernd



**Bild 1: Aufbau eines Wasserstoff-Atoms**



**Bild 2: Aufbau eines Lithium-Atoms**

#### **i** Ladungsträger

- **Elektronen** sind negative Ladungsträger.
- **Protonen** sind positive Ladungsträger.
- **Ionen** können positive oder negative Ladungsträger sein.

#### Elektrische Ladung

$$Q = n \cdot e \quad [Q] = \text{As} = \text{C}$$

$Q$  Ladung (Elektrizitätsmenge)  
 $n$  Anzahl der Elementarladungen  
 $e$  Elementarladung

#### Beispiel:

Aus wie vielen Elektronen besteht die Ladung  $Q = -1$  C?

#### Lösung:

$$Q = n \cdot e \Rightarrow n = \frac{Q}{e}$$

$$n = \frac{-1 \text{ C}}{-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 6,242 \cdot 10^{18}$$

## 2.4 Elektrische Spannung

### 2.4.1 Spannungserzeugung

In Spannungsquellen werden elektrische Ladungen voneinander getrennt. Dabei entsteht an einem Pol der Spannungsquelle ein Elektronenüberschuss und an dem anderen Pol ein Elektronenmangel. Der Pol mit Elektronenüberschuss ist negativ geladen und wird **Minuspole** genannt, der Pol mit Elektronenmangel ist positiv geladen und wird **Pluspol** genannt. Zwischen Pluspol und Minuspole einer Spannungsquelle kann man eine Spannung messen (**Bild 2, Seite 30**). Bei der Ladungstrennung werden Ladungen verschoben. Da zwischen ungleichartigen Ladungen Anziehungskräfte wirken, muss dazu Arbeit verrichtet werden. Diese Arbeit ist als Energie in den Ladungen gespeichert.

Durch Ladungstrennung wird Spannung erzeugt.  
Getrennte Ladungen haben das Bestreben, sich auszugleichen.

Zur Veranschaulichung dient die mechanische Spannung in einem Gummiband. Zwei Kugeln an beiden Enden eines Gummibandes befestigt, stellen die positive und negative Ladung dar. Sind die beiden Kugeln dicht beieinander, besteht keine Spannung im Gummiband (**Bild 1a**). Zieht man mit einer Kraft  $F$  die Kugeln auseinander, herrscht eine Spannung im Gummiband (**Bild 1b**). Erhöht man die Kraft, zum Auseinanderziehen der Kugeln, steigt die Spannung im Gummiband (**Bild 1c**). Trennt man nun zwei Kugelpaare mit der gleichen Kraft wie zuvor, können sie nur noch halb so weit auseinandergezogen werden, im Gummiband herrscht nur noch die halbe Spannung (**Bild 1d**). Die Spannung ist umso größer, je mehr Arbeit zur Trennung pro Kugel (Ladung) aufgewendet wurde.

Die erzeugte Spannung  $U$  ist die bei der Ladungsverschiebung aufgewendete Arbeit  $W$  pro Ladung  $Q$  (**Formelkasten rechts**).

### 2.4.2 Spannung am Verbraucher

Wird ein Verbraucher an eine Spannungsquelle angeschlossen, gleichen sich die getrennten Ladungen über den Verbraucher aus. Die bei der Ladungstrennung gespeicherte Energie wird in Arbeit umgesetzt, am Verbraucher misst man eine Spannung (**Bild 3, Seite 30**).

Die Spannung am Verbraucher ist die bei der Ladungsverschiebung frei werdende Arbeit  $W$  pro Ladung  $Q$  (**Formelkasten rechts**).

### 2.4.3 Potenziale in elektrischen Schaltungen

In elektrischen Schaltungen können Messpunkte auf unterschiedlichem Potenzial liegen. Z.B. liegt der Anschluss 4 des Netzteils (**Bild 2**) auf dem Potenzial  $\varphi_4 = 9\text{ V}$ .

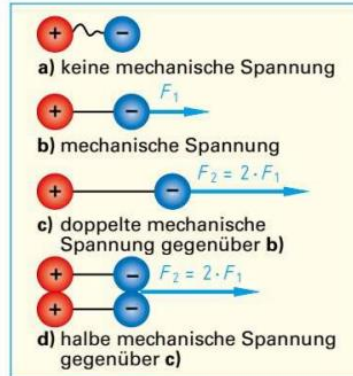
Das Potenzial  $\varphi$  bezieht sich immer auf einen Bezugspunkt (Masse).

Zwischen Anschluss 4 des Netzteils (**Bild 2**) mit dem Potenzial  $\varphi_4 = 9\text{ V}$  und Masse mit  $\varphi_1 = 0\text{ V}$  herrscht eine Spannung von  $9\text{ V}$ .

Zwischen demselben Anschluss und Anschluss 3, mit dem Potenzial  $\varphi_3 = 6\text{ V}$  liegt jedoch die Spannung  $U_{43} = \varphi_4 - \varphi_3 = 9\text{ V} - 6\text{ V} = 3\text{ V}$ .

Zwischen zwei Punkten mit unterschiedlichen Potenzialen herrscht eine Spannung (**Formelkasten rechts**).

<sup>1</sup> nach Volta, ital. Physiker, 1745 bis 1827; <sup>2</sup>  $\varphi$  griech. Kleinbuchstabe phi.

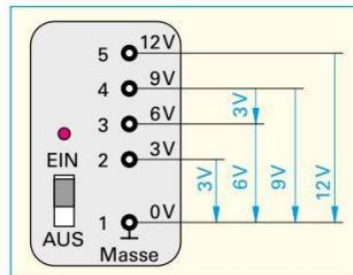


**Bild 1: Mechanische Spannung**

Spannung	
$U = \frac{W}{Q}$	$[U] = \frac{\text{Nm}}{\text{C}} = \frac{\text{VAs}}{\text{As}} = \text{V}$
$U$ Spannung	$Q$ Ladung
$W$ Arbeit	
<b>i Spannung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formelzeichen: <math>U</math></li> <li>• Einheitenname: Volt<sup>1</sup></li> <li>• Einheitenzeichen: V</li> <li>• Einheitenvorsätze (Beispiele):                             <ul style="list-style-type: none"> <li>1 mV = <math>1 \cdot 10^{-3}\text{ V} = 0,001\text{ V}</math></li> <li>1 kV = <math>1 \cdot 10^3\text{ V} = 1000\text{ V}</math></li> <li>1 MV = <math>1 \cdot 10^6\text{ V} = 1\,000\,000\text{ V}</math></li> </ul> </li> </ul>	

Das Berühren von Spannungen über  $50\text{ V}$  kann tödlich sein (**Seite 346**).

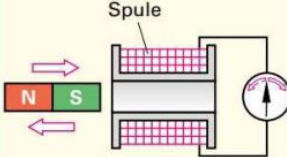
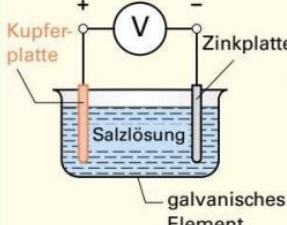
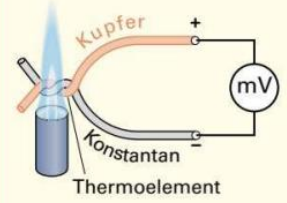
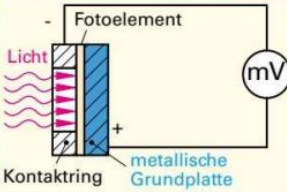
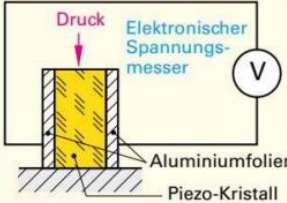
Tabelle: Spannungsbeispiele	
Thermospannung	40 $\mu\text{V}$
Monozelle	1,5V
Autobatterie	12V
Wechselstromnetz	230V
Drehstromnetz	400V
Höchstspannung	220 kV, 380 kV
Blitz	bis 1000 MV



**Bild 2: Potenziale**

Spannung als Potentialdifferenz	
$U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$	
$U$ Spannung	$\varphi^2$ Potenzial

## 2.4.4 Arten der Spannungserzeugung

Tabelle: Arten der Spannungserzeugung		
Spannungserzeugung durch	Versuch und Erkenntnis	Anwendung (Beispiele)
<b>Induktion<sup>1</sup></b>		
	<p><b>Versuch 1:</b> Schließen Sie einen Spannungsmesser mit Millivolt-Messbereich (Nullpunkt in Skalenmitte) an eine Spule mit 600 Windungen an. Führen Sie einen Dauermagneten in die Spule ein und ziehen Sie ihn wieder aus der Spule heraus.</p> <p><i>Bewegt sich der Dauermagnet in der Spule, schlägt der Zeiger des Spannungsmessers aus, beim Herausziehen umgekehrt wie beim Hineinschieben.</i></p> <p>Bei der Induktion (Seite 94) werden durch magnetische Energie elektrische Ladungen getrennt.</p>	<p><b>Generatoren:</b> Fahrraddynamos, Kfz-Lichtmaschinen, Kraftwerks-generatoren, dynamische Mikrofone</p>
<b>Chemische Reaktion im galvanischen Element<sup>2</sup></b>		
	<p><b>Versuch 2:</b> Schließen Sie einen Spannungsmesser (Messbereich 3 V) an zwei Kupferplatten in einem Becher mit Kochsalzlösung an. Ersetzen Sie dann eine der Platten durch eine Zinkplatte und messen Sie wieder die Spannung an den Platten.</p> <p><i>Der Spannungsmesser zeigt eine Spannung an, wenn sich zwei verschiedene Platten in der Salzlösung befinden. Zwei unterschiedliche Metalle in einer leitenden Flüssigkeit (Elektrolyt) bilden ein galvanisches Element.</i></p> <p>Im galvanischen Element (Seite 64) trennt eine chemische Reaktion elektrische Ladungen.</p>	<p><b>Elektrochemische Spannungserzeuger:</b> Batterien, Monozellen (galvanische Elemente), Akkumulatoren, Brennstoffzelle</p>
<b>Wärme im Thermoelement<sup>3</sup></b>		
	<p><b>Versuch 3:</b> Schließen Sie einen Spannungsmesser mit Millivolt-Messbereich an einen Kupfer- und einen Konstantandraht an und verdrehen Sie die freien Drahtenden. Erwärmen Sie die Verbindungsstelle mit einer Gasflamme.</p> <p><i>Beim Erwärmen der Verbindungsstelle zeigt der Spannungsmesser eine Gleichspannung an (etwa 40 µV je K<sup>4</sup>).</i></p> <p>Im Thermoelement (Seite 190) trennt die Wärme elektrische Ladungen.</p>	<p><b>Thermo-elemente:</b> Verwendung zur Temperaturmessung und Temperatur-Fern-Messung, z.B. an schwer zugänglichen Stellen</p>
<b>Licht im Fotoelement<sup>5</sup></b>		
	<p><b>Versuch 4:</b> Schließen Sie einen Spannungsmesser mit Millivolt-Messbereich an ein Fotoelement an. Beleuchten Sie das Fotoelement mit einer Glühlampe.</p> <p><i>Bei Beleuchtung zeigt der Spannungsmesser eine Spannung an.</i></p> <p>Im Fotoelement (Seite 222) trennt die Strahlungsenergie des Lichtes elektrische Ladungen.</p>	<p><b>Fotoelemente:</b> Verwendung als Stromquellen, z.B. für Satelliten, Taschenrechner, Uhren, Fotovoltaik</p>
<b>Druck auf Piezokristalle<sup>6</sup></b>		
	<p><b>Versuch 5:</b> Schließen Sie einen elektronischen Spannungsmesser an einen Piezokristall an. Drücken Sie auf den Kristall.</p> <p><i>Solange der Druck auf den Kristall zu- oder abnimmt, schlägt der Zeiger des Spannungsmessers nach rechts oder nach links aus (piezoelektrischer Effekt).</i></p> <p>Bei manchen Kristallen, z.B. Quarz, werden durch Druck elektrische Ladungen getrennt.</p>	<p><b>Piezokristalle:</b> Verwendung in Kristallmikrofonen, Drucksensoren, Gasanzündern</p>

<sup>1</sup> von inducere (lat.) = einführen; <sup>2</sup> nach Luigi Galvani, italienischer Arzt, 1737 bis 1798; <sup>3</sup> von thermos (griech.) = warm;

<sup>4</sup> Temperaturunterschiede werden statt in Grad Celsius in Kelvin (K) angegeben; <sup>5</sup> von phos (griech.) = Licht; <sup>6</sup> von piezein (griech.) = drücken

### 2.4.5 Messen elektrischer Spannung

Elektrische Spannung wird mit dem Spannungsmesser (**Bild 1**) gemessen. Spannung besteht zwischen zwei Punkten mit unterschiedlichem Potenzial (**Seite 28**). An diese Punkte wird der Spannungsmesser angeschlossen (**Bild 2**).

#### Vorgehensweise bei der Spannungsmessung

- Spannung abschalten.
- Überprüfen, ob der Messbereich des Spannungsmessers für die Messung ausreicht.
- Bei unbekanntem Spannungen den höchsten Messbereich einstellen.
- Bei Gleichspannung das höhere (positive) Potenzial am Anschluss + anschließen.
- Nach der Messung den höchsten Spannungsmessbereich einstellen.

#### Spannungsmessung an einer Spannungsquelle

**Versuch 1:** Messen Sie mit einem Spannungsmesser die Spannung an einer Batterie (**Bild 2**). Achten Sie darauf, dass der Messbereich des Spannungsmessers für die Messaufgabe groß genug eingestellt ist. Die Batterie liefert Gleichspannung. Deshalb muss der Spannungsmesser auf Gleichspannung (DC) eingestellt sein. Verbinden Sie den Spannungsmesser mit der Batterie so, dass der Minusanschluss der Spannungsquelle mit dem Minuspol des Spannungsmessers und der Pluspol der Spannungsquelle mit dem Plusanschluss des Spannungsmessers verbunden ist.

Der Spannungsmesser wird auf den Messbereich 10 V eingestellt und zeigt  $U = 9 \text{ V}$  an.

#### Spannungsmessung am Verbraucher

Spannung kann man nicht nur an Spannungsquellen, sondern auch an stromdurchflossenen Verbrauchern messen (**Bild 3**). Dazu wird der Plusanschluss des Spannungsmessers an den Anschluss des Verbrauchers gelegt, der das höhere Potenzial hat (näher am Pluspol der Spannungsquelle ist). Der Minusanschluss des Spannungsmessers wird an den Anschluss des Verbrauchers mit dem niedrigeren Potenzial (näher am Minuspol der Spannungsquelle) angeschlossen.

#### Spannungsrichtung

**Versuch 2:** Schalten Sie zwei gleiche Lampen, z.B. 6 V/5 W, an ein Netzgerät (**Bild 4**). Schließen Sie einen Spannungsmesser an das Netzgerät und erhöhen Sie die Spannung des Netzgerätes auf  $U = 12 \text{ V}$ . Messen Sie mit einem Digitalmessgerät die Spannung an den Lampen. Am Digitalmessgerät wird die Spannung  $U = +6 \text{ V}$  angezeigt.

**Versuch 3:** Vertauschen Sie den Plus- und Minusanschluss am Digitalmessgerät.

Am Digitalmessgerät wird die Spannung  $U = -6 \text{ V}$  angezeigt.

Die Spannung hat eine Richtung (**Bild 4**).



Bild 1: Vielfachmessinstrument, in der Einstellung Gleichspannungsmessung

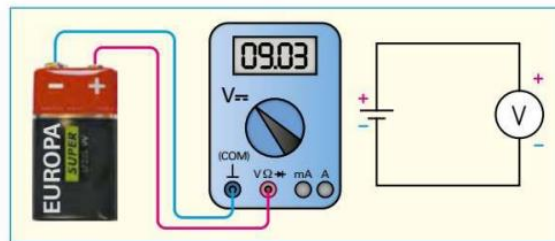


Bild 2: Spannungsmessung an einer Batterie

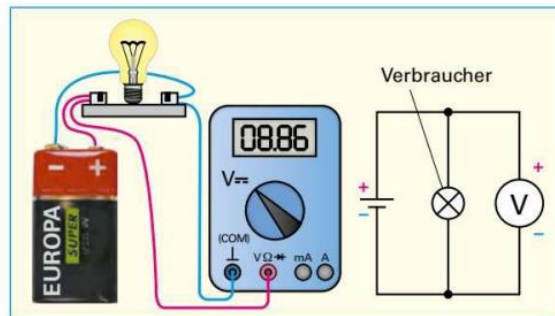


Bild 3: Spannungsmessung an einem Verbraucher

- Der Spannungsmesser wird parallel zum Erzeuger oder Verbraucher angeschlossen.
- Die Richtung der Spannung wird durch einen Bezugspfeil dargestellt. Sie ist vom höheren zum niedrigeren Potenzial gerichtet (**Bild 4**).

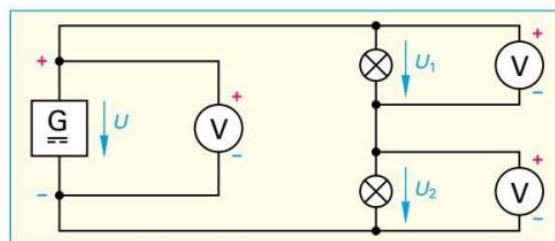


Bild 4: Spannungsmessung im Stromkreis

## 2.5 Elektrischer Strom

**Versuch 1:** Schließen Sie eine 12-V-Glühlampe an den Pluspol und Minuspol einer Gleichspannungsquelle, z. B. an ein Netzgerät mit  $U = 12\text{ V}$ , an (**Bild 1**).

Die 12-V-Glühlampe leuchtet.

Die von der Spannungsquelle getrennten Ladungen gleichen sich aus. Dabei müssen Elektronen vom Minuspol (Elektronenüberschuss) über die Glühwendel der Lampe zum Pluspol (Elektronenmangel) fließen. In der Glühlampe tritt dabei eine Lichtwirkung auf. Diese Bewegung der elektrischen Ladungsträger nennt man elektrischen Strom.

Der elektrische Strom in einem metallischen Leiter ist die gerichtete Bewegung von freien Elektronen.

Das Ausgleichsbestreben der Ladungsträger vom Minus- zum Pluspol ist Ursache für den Stromfluss. Je höher die Spannung der Spannungsquelle, desto stärker ist das Ausgleichsbestreben der Ladungen. Es werden mehr Elektronen durch den Leiter transportiert. Die Anzahl der fließenden freien Elektronen pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt ist ein Maß für die elektrische Stromstärke (**Bild 2**).

Die elektrische Stromstärke  $I$  ist die durch einen Leiterquerschnitt bewegte Ladung  $Q$  pro Zeit  $t$ . Die Stromstärke wird in der Einheit Ampere<sup>1</sup> (Einheitenzeichen A) angegeben.

Die bewegte Ladungsmenge  $Q$  im Leiter ist ein Vielfaches der Elementarladung  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ . Somit besteht die elektrische Ladungsmenge  $Q = 1\text{ C}$  aus der Anzahl  $n = 6,242 \cdot 10^{18}$  Elementarladungen. Die Stromstärke 1 A kann folglich auch über Ladungsmenge und Zeit erklärt werden. Die Stromstärke in einem Leiter beträgt 1 A, wenn sich pro Sekunde eine elektrische Ladungsmenge von 1 C durch den Leiterquerschnitt bewegt.

Die elektrische Stromstärke  $I = 1\text{ A}$  wird über die magnetische Wirkung definiert.

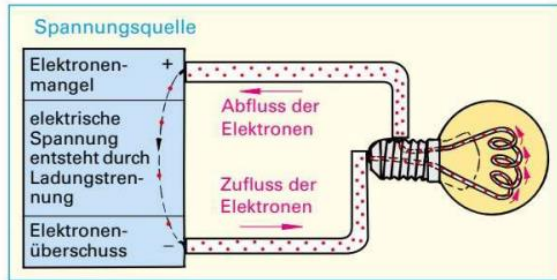
### Definition der Stromstärke

Fließt durch zwei parallele Leiter, die einen Abstand von 1 m haben, eine Stromstärke von  $I = 1\text{ A}$ , so tritt zwischen ihnen je Meter Leitungslänge eine Kraft von  $F = 2 \cdot 10^{-7}\text{ N}$  (Newton) auf.

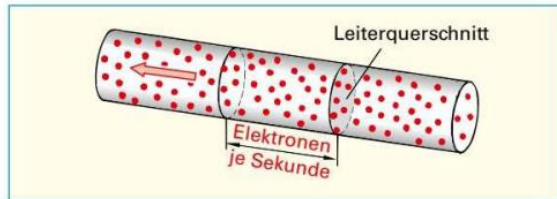
Die Einheit Ampere (A) ist eine Basiseinheit.

**Einheitenvorsätze.** Für sehr große oder kleine Stromstärken kann man wie bei allen physikalischen Größen Einheitenvorsätze verwenden. Damit lassen sich Stromstärken übersichtlicher angeben, z. B.  $1\text{ mA} = 1\text{ Milliampere} = 1 \cdot 10^{-3}\text{ A} = 0,001\text{ A}$ .

In elektrischen Betriebsmitteln bzw. Anlagen treten unterschiedlich hohe Stromstärken auf (**Tabelle**).



**Bild 1:** Elektronenbewegung im Stromkreis



**Bild 2:** Elektronenbewegung im Leiter

### Elektrische Stromstärke

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$[I] = \frac{\text{C}}{\text{s}} = \frac{\text{As}}{\text{s}} = \text{A}; \quad 1\text{ C} = 1\text{ As}$$

$I$	Stromstärke
$Q$	elektrische Ladung
$t$	Zeit

#### **i** Stromstärke

- Formelzeichen:  $I$
- Einheitenname: Ampere
- Einheitenzeichen: A
- Einheitenvorsätze (Beispiele):
  - 1 Mikroampere =  $1\ \mu\text{A} = 1 \cdot 10^{-6}\text{ A} = 0,000\ 001\text{ A}$
  - 1 Milliampere =  $1\ \text{mA} = 1 \cdot 10^{-3}\text{ A} = 0,001\text{ A}$
  - 1 Kiloampere =  $1\ \text{kA} = 1 \cdot 10^3\text{ A} = 1000\text{ A}$

### Tabelle: Beispiele elektrischer Stromstärken

Betriebsmittel/Anlage	Stromstärke
Taschenrechner	100 $\mu\text{A}$
10-W-LED-Lampe E 27	43 mA
Bügeleisen	4,35 A
Straßenbahnmotor	300 A
Elektroschmelzofen	100 kA

### Beispiel:

Bei der Entladung eines Elektronenblitzes fließt während der Zeit  $t = 2\text{ ms}$  die Ladungsmenge  $Q = 0,24\text{ As}$ . Berechnen Sie **a)** die Stromstärke  $I$  bei der Entladung und **b)** die Anzahl  $n$  der Elementarladungen in 2 ms.

### Lösung:

a)  $I = \frac{Q}{t} = \frac{0,24\text{ As}}{2\text{ ms}} = \frac{0,24\text{ As}}{0,002\text{ s}} = 120\text{ A}$

b)  $n = \frac{Q}{e} = \frac{0,24\text{ As}}{1,602 \cdot 10^{-19}\text{ C}} = 1,5 \cdot 10^{18}$

<sup>1</sup> André Marie Ampère, französischer Physiker, 1775 bis 1836

### Stromrichtung

Man unterscheidet die

- technische Stromrichtung und die
- Richtung der Elektronenbewegung (**Bild 1**)

**Technische Stromrichtung:** Außerhalb des Erzeugers fließt der Strom vom Pluspol (+) zum Minuspol (-).

**Elektronenbewegungsrichtung:** Außerhalb des Erzeugers bewegen sich die freien Elektronen vom Minuspol (Elektronenüberschuss) zum Pluspol (Elektronenmangel).

Den Richtungssinn von Strömen und Spannungen gibt man in der technischen Stromrichtung vom höheren zum niederen Potenzial durch **Bezugspfeile** an. In dieser Richtung werden Strom und Spannung als positiv bezeichnet (**Bild 1**).

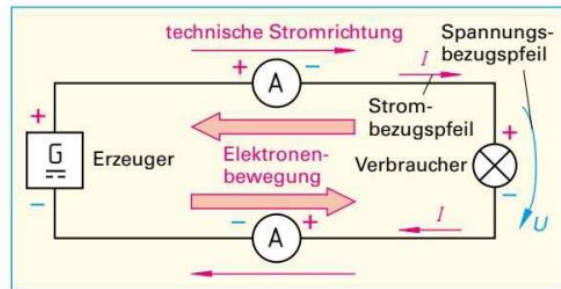
### 2.5.1 Elektrischer Strom in Metallen

In Metallen sind die Atome dicht aneinander gedrängt. Ein Elektron auf der Außenschale eines Atoms kann dabei so nahe an ein benachbartes Atom gelangen, dass es von dessen Atomkern ebenso weit entfernt ist wie vom eigenen. Die Anziehungskräfte der Kerne auf dieses Elektron heben sich in diesem Falle auf, und es kann zum **freien Elektron** werden. Sobald im Metall ein Elektron frei wird, hinterlässt es einen positiv geladenen Atomrumpf, den man auch positives Ion nennt (**Bild 2**).

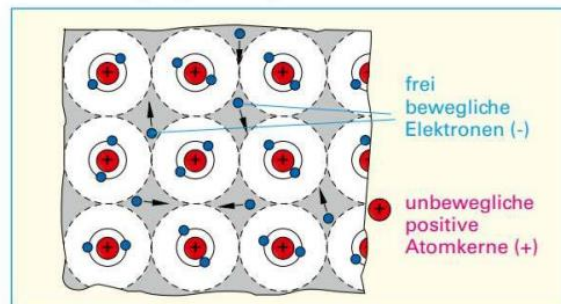
Verbindet man eine Glühlampe mit einer Spannungsquelle, so setzen sich die freien Elektronen im Glühfaden der Lampe fast gleichzeitig zum Pluspol in Bewegung. Die freien Elektronen kommen aber nur mit einer geringen Geschwindigkeit von ca. 0,1 bis 10 mm/s vorwärts, da sie sich im Atomverband nicht ungehindert bewegen können. Diese **Elektronen- bzw. Driftgeschwindigkeit** der Elektronen hängt von ihrer Beweglichkeit, von der Stromstärke, vom Leiterwerkstoff, vom Leiterquerschnitt und von der Temperatur ab. Im **Versuch 1, Seite 31**, leuchtet die Glühlampe sofort. Die freien Elektronen im Leiter stoßen sich wie bei einer Kettenreaktion fast gleichzeitig an. Dies geschieht in ganz kurzer Zeit mit einer Geschwindigkeit, die wesentlich höher ist als die Elektronengeschwindigkeit. Sie erfolgt annähernd mit **Lichtgeschwindigkeit**  $c \approx 300\,000\text{ km/s}$ .

### 2.5.2 Messen elektrischer Stromstärke

Zum Messen der elektrischen Stromstärke verwendet man Strommesser (**Bild 3**). Der Gesamtstrom muss durch das Messinstrument fließen (**Bild 4a**). Die Leitung kann man an beliebiger Stelle trennen, weil die Stromstärke im unverzweigten Stromkreis überall gleich groß ist. Bei Gleichstrom ist auf die Polarität der Anschlüsse zu achten (**Bild 4b**).



**Bild 1: Technische Stromrichtung und Elektronenbewegungsrichtung**



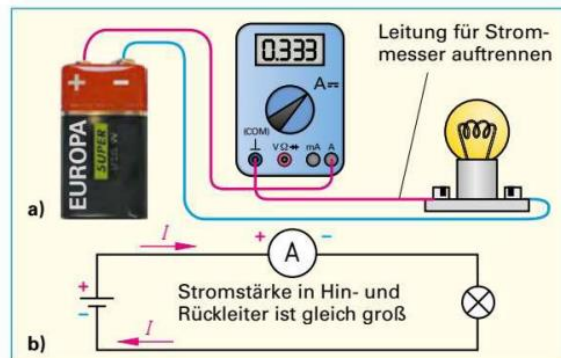
**Bild 2: Freie Elektronen und positive Atomrümpfe eines Leiters**



**Bild 3: Vielfachinstrument, als Strommesser eingestellt**

**i** Zum Messen des elektrischen Stromes wird die Leitung aufgetrennt und der Strommesser in die Trennstelle in Reihe zum Verbraucher geschaltet.

**Strommesszangen: Seite 179**



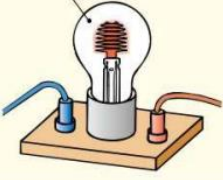
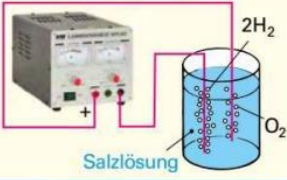



**Bild 4: Messen des Stromes**

### 2.5.3 Wirkungen des elektrischen Stromes

Im **Versuch 1, Seite 31** wurde durch eine Glühlampe nachgewiesen, dass ein elektrischer Strom fließt. Den Strom selbst kann man nicht sehen.

Der elektrische Strom lässt sich nur an seinen Wirkungen erkennen (**Tabelle**).

Tabelle: Stromwirkungen		
Wirkungen	Versuch und Erkenntnis	Anwendung (Beispiele)
<b>Wärmewirkung</b> Tritt immer auf 	<b>Versuch 1:</b> Spannen Sie zwischen zwei Standklemmen einen Stahldraht von etwa 0,3 mm Durchmesser und schließen Sie die Drahtenden an einen Stelltransformator an. Steigern Sie allmählich die Stromstärke. <i>Der Draht erwärmt sich, glüht und schmilzt durch.</i> <b>Der elektrische Strom erwärmt jeden Leiter<sup>1</sup> (Wärmewirkung).</b>	Elektroherde, Bügeleisen, Tauchsieder, Warmwasserbereiter, LötKolben, Schmelzsicherungen
<b>Magnetische Wirkung</b> Tritt immer auf 	<b>Versuch 2:</b> Schließen Sie eine Spule mit 600 Windungen an die Klemmen eines Netzgerätes (6 V oder 12 V) an. Halten Sie die Spule über kleine Eisenteile, z. B. über Nägel oder Büroklammer. <i>Die Eisenteile werden angezogen, sobald Strom durch die Spule fließt.</i> <b>Der elektrische Strom verursacht in seiner Umgebung immer eine magnetische Wirkung.</b>	Elektromagnete, Elektromotoren, Schütze, Relais, Messinstrumente, Klingeln, Telefonhörer, Lautsprecher, Türöffner
<b>Lichtwirkung</b> Auftreten: in Gasen, in Halbleitern Glimmlampe 	<b>Versuch 3:</b> Schließen Sie eine Glimmlampe an eine 230-V-Steckdose an. <i>Die Glimmlampe leuchtet. Die Lichtwirkung tritt nur in der Umgebung der Wendeln auf. Die gewendelten Drähte selbst leuchten nicht. Beim Leuchten erwärmt sich die Glimmlampe kaum.</i> <b>Der elektrische Strom bringt Gas zum Leuchten, erwärmt es aber nur wenig (Lichtwirkung).</b> Die Glimmlampe enthält Gas mit geringem Druck. In einer Glühlampe erhitzt dagegen der elektrische Strom einen dünnen Draht aus Wolfram so stark, dass er hellweiß glüht und dadurch Licht abstrahlt.	Leuchtstofflampen, Leuchtrohren, Glimmlampen, Leuchtdioden, Glühlampen
<b>Chemische Wirkung</b> Auftreten: in leitenden Flüssigkeiten 	<b>Versuch 4:</b> Schließen Sie zwei Kupferdrähte z. B. an ein Netzgerät von 12 V an. Tauchen Sie die Drahtenden in einen Becher mit Natriumsulfat-Lösung oder verdünnter Schwefelsäure, ohne dass sich die Drähte berühren. <i>An den Drahtstücken, die in die Flüssigkeit eintauchen, bilden sich Gasblasen. Das Wasser im Gefäß wird in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt.</i> <b>Der elektrische Strom zerlegt leitende Flüssigkeiten (chemische Wirkung).</b>	Elektrolyse, Galvanisieren, Akkumulatoren
<b>Wirkung auf Lebewesen</b> Auftreten: bei Menschen, Tieren Leitung unter Spannung 	Der elektrische Strom hat auf Lebewesen eine physiologische <sup>2</sup> Wirkung. Die positive Wirkung des elektrischen Stromes nutzt man in der Elektromedizin. <b>⚡</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beim Berühren blanker elektrischer Leitungen kann durch den menschlichen Körper ein lebensgefährlicher Strom fließen.</li> <li>• Gefahren im Umgang mit dem elektrischen Strom, <b>Seite 345</b>.</li> </ul>	Elektroweidezäune, Viehbetäubung, Elektromedizinische Geräte

<sup>1</sup> Eine Ausnahme bilden die Supraleiter; <sup>2</sup> Physiologie = Lehre von den Vorgängen im Körper von Lebewesen.

## 2.5.4 Stromarten

### Gleichstrom (DC<sup>1</sup>, Zeichen: — oder ==)

**Versuch 1:** Schließen Sie eine Lampe, z. B. 6 V/0,1 A, über einen Strommesser (Drehspulmessgerät) an eine Batterie an.

Der Strommesser zeigt während der Messzeit einen gleichbleibenden Strom an.

Im Stromkreis fließt ein **Gleichstrom**, wenn sich in einer bestimmten Zeit, z. B. 1 s, gleich viele freie Elektronen in gleicher Richtung bewegen. Zeichnet man die Stromstärke abhängig von der Zeit in einem Schaubild auf, ergibt sich eine Parallele zur Zeitachse (**Tabelle, oben**).

Gleichstrom fließt nur in einer Richtung mit gleichbleibender Stromstärke.

### Wechselstrom (AC<sup>2</sup>, Zeichen: ~)

**Versuch 2:** Schließen Sie eine Lampe über einen Strommesser (Drehspulmessgerät mit Zeiger in der Skalenmitte) an einen Funktionsgenerator (Wechselstrom, 1 Hz) an.

Der Zeiger des Strommessers schlägt abwechselnd nach links und nach rechts aus.

Im Stromkreis fließt ein **Wechselstrom**, wenn sich die freien Elektronen im Leiter hin und her bewegen, und zwar in beiden Richtungen gleich. Im Stromstärke-Zeit-Schaubild erhält man z. B. eine Sinuslinie (**Tabelle, Mitte**).

Wechselstrom fließt mit ständig wechselnder Richtung und Stärke.

### Mischstrom (UC<sup>3</sup>, Zeichen: ~)

**Versuch 3:** Wiederholen Sie **Versuch 2**, schalten Sie aber zum Funktionsgenerator eine Batterie in Reihe.

Der Zeiger des Strommessers schlägt in einer Richtung aus und pendelt um den eingestellten Gleichstromanteil hin und her.

Im Stromkreis fließt ein **Mischstrom**, wenn in ihm gleichzeitig ein Gleich- und ein Wechselstrom fließt. Der Mischstrom entsteht durch die Überlagerung eines Gleichstromes mit einem Wechselstrom.

Ein Mischstrom ist streng genommen keine eigenständige Stromart, weil er sich auf einen Gleichstrom zurückführen lässt, dem ein Wechselstrom überlagert ist (**Tabelle, unten**).

Ein Mischstrom setzt sich aus einem Gleichstrom- und einem Wechselstromanteil zusammen.

Tabelle: Stromarten		
Bezeichnung	Bild	Beispiele
<b>Gleichstrom (DC)</b>  Elektrischer Strom, der nur in gleicher Richtung und mit gleicher Stärke fließt.		Batterie, Akkumulator, Stromversorgung elektrischer und elektronischer Geräte, Oszilloskop, Fernsehbildröhre
<b>Wechselstrom (AC)</b>  Elektrischer Strom, der ständig seine Richtung und seine Stromstärke ändert.		Energienetz, Fahrraddynamo, Wechselstromgeneratoren und -motoren, dynamische Mikrofone
<b>Mischstrom (UC)</b>  setzt sich zusammen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• aus einem Wechselstromanteil</li> <li>und</li> <li>• aus einem Gleichstromanteil</li> </ul>		gleichgerichteter Wechselstrom, Strom in Netzteilen nach Glättungskondensator, Steuerstrom von Transistoren, in Wechselstromverstärkern, „pulsierender“ Gleichstrom

<sup>1</sup> DC von Direct Current (engl.) = Gleichstrom

<sup>2</sup> AC von Alternating Current (engl.) = Wechselstrom

<sup>3</sup> UC von Universal Current (engl.) = allgemeiner Strom

### 2.5.5 Stromdichte

Der elektrische Strom, der durch eine Lampe fließt, erhitzt die dünne Drahtwendel der Lampe bis zur Weißglut, erwärmt jedoch die Zuleitungen kaum. Bei gleicher Stromstärke bewegen sich durch einen großen und durch einen kleinen Leiterquerschnitt gleich viele Elektronen je Sekunde. Im Leiter mit dem kleineren Querschnitt fließen folglich die Elektronen mit höherer Geschwindigkeit und erwärmen ihn durch Reibung stärker (**Bild 1**).

Die Stromstärke je mm<sup>2</sup> Querschnitt nennt man Stromdichte *J* (Einheit A/mm<sup>2</sup>).

**Beispiel:**

Durch eine Lampe fließt ein Strom  $I = 0,2 \text{ A}$ . Wie groß ist die Stromdichte **a)** in der Zuleitung mit  $1,5 \text{ mm}^2$  Leiterquerschnitt und **b)** im Glühdraht mit  $0,03 \text{ mm}$  Durchmesser?

**Lösung:**

a)  $J = \frac{I}{A} = \frac{0,2 \text{ A}}{1,5 \text{ mm}^2} = 0,13 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

b)  $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,03^2 \text{ mm}^2}{4} = 0,0007 \text{ mm}^2$

$J = \frac{I}{A} = \frac{0,2 \text{ A}}{0,0007 \text{ mm}^2} = 286 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

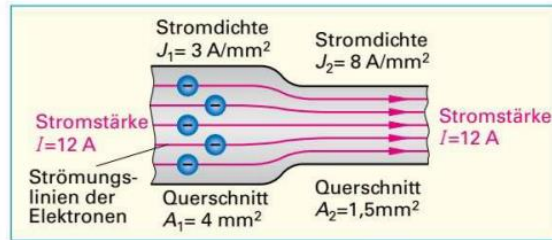
Ein Leiter erwärmt sich umso mehr, je größer die Stromdichte in ihm ist.

In Leitungen, in Wicklungen von Spulen, Transformatoren oder Motoren darf die Stromdichte auf Dauer nicht zu groß werden, damit die Isolation der Drähte nicht zu heiß wird und keine Brandgefahr auftritt. Für die Leiterquerschnitte sind deshalb höchstzulässige Stromstärken festgelegt (**Tabelle**).

Bei der Verlegung von Mantelleitungen in Installationsrohren oder -kanälen auf Wänden, Decken oder Fußböden (Verlegeart B2, **Seite 326 und 664**) sind geringere Stromdichten zugelassen als bei isolierten Leitungen oder Kabeln, die direkt auf oder in der Wand, im oder unter Putz, verlegt sind (Verlegeart C, **Tabelle**).

Die zulässige Stromdichte ist bei kleineren Leiterquerschnitten höher als bei großen (**Bild 2**). Bei doppeltem Durchmesser und gleicher Leiterlänge ist die Leiteroberfläche zwar doppelt so groß, das Leitervolumen beträgt jedoch das Vierfache. Deshalb können dünne Leiter besser abkühlen als dicke. Leiter von Freileitungen werden durch die Umgebung besser abgekühlt als Drähte in Wicklungen.

Die zulässige Stromdichte richtet sich nach dem Leiterquerschnitt, dem Werkstoff und nach der Umgebungstemperatur (**Übersicht, Seite 326**).



**Bild 1: Elektronenbewegung in verschiedenen Leiterquerschnitten**

**Stromdichte**

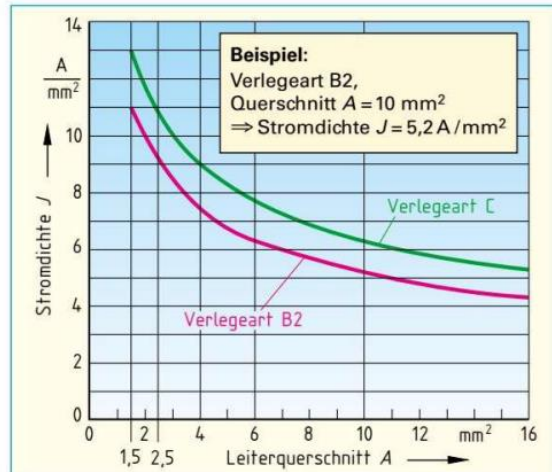
$J = \frac{I}{A} \quad [J] = \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

*J* Stromdichte  
*I* Stromstärke  
*A* Leiterquerschnitt<sup>1</sup>

**Tabelle: Strombelastbarkeit von fest verlegten, PVC-isolierten Kupferleitungen bei 30 °C Umgebungstemperatur nach DIN VDE 0298-4**

Leiterquerschnitt in mm <sup>2</sup>	Zulässige Stromstärke in A			
	Verlegeart B2		Verlegeart C	
	Zahl der belasteten Adern			
	2	3	2	3
1,5	16,5	15	19,5	17,5
2,5	23	20	27	24
4	30	27	36	32
6	38	34	46	41
10	52	46	63	57
16	69	62	85	76
25	90	80	112	96

**Bemessen von Leitungen: Seite 326**



**Bild 2: Zulässige Stromdichten isolierter Kupferleitungen (DIN VDE 0298-4) bei 2 belasteten Adern**

<sup>1</sup> Statt A für die Leiterquerschnittsfläche auch S (DIN 1304)

## 2.6 Elektrischer Widerstand und Leitwert

Fließt Strom durch einen metallischen Leiter, so bewegen sich die freien Elektronen zwischen den Atomen des Leiterwerkstoffs hindurch (**Bild 1**).

Diese Atome sind nicht in Ruhe, sondern schwingen auch bei normaler Temperatur in allen Richtungen um ihre Ruhelage (ungeordnete Wärmebewegung). Dadurch werden die freien Elektronen in ihrer Bewegung und damit der Strom durch den Leiter behindert.

Jeder Leiter setzt dem elektrischen Strom einen **Widerstand** entgegen, der durch eine elektrische Spannung überwunden werden muss.

Der elektrische Widerstand (Formelzeichen  $R$ ) hat die Einheit Ohm<sup>1</sup> (Einheitenzeichen  $\Omega^2$ ).

Ein Leiter mit einem kleinen Widerstand leitet den elektrischen Strom gut, er hat einen großen **Leitwert**. Umgekehrt gehört zu einem großen Widerstand ein kleiner Leitwert (**Bild 2**).

Der elektrische Leitwert (Formelzeichen  $G$ ) hat die Einheit Siemens<sup>3</sup> (Einheitenzeichen S).

Doppelter Widerstand ergibt den halben Leitwert, dreifacher Widerstand ein Drittel des Leitwerts. Der Leitwert ist also der Kehrwert des Widerstands.

$$\text{Leitwert} = \frac{1}{\text{Widerstand}}$$

großer Leitwert  $\Rightarrow$  kleiner Widerstand  
 kleiner Leitwert  $\Rightarrow$  großer Widerstand

Das Wort Widerstand wird in zweifachem Sinne verwendet: Es bezeichnet einmal das Bauelement Widerstand (**Seite 40**) und zum anderen die Eigenschaft, dem Strom einen Widerstand entgegenzusetzen. Falls ein Irrtum entstehen kann, nennt man die in Ohm gemessene Eigenschaft Widerstandswert.

**Beispiel:**

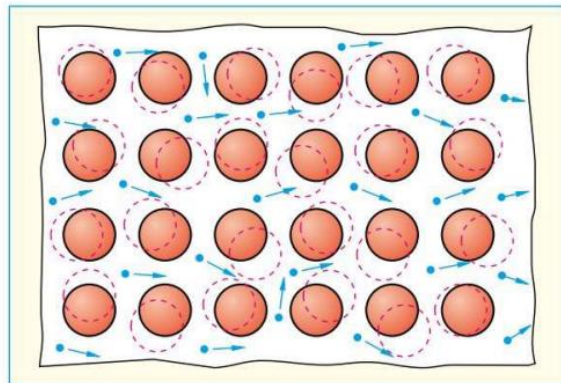
Berechnen Sie zu den Widerstandswerten  $R = 1 \Omega, 2 \Omega, 4 \Omega, 6 \Omega, 8 \Omega, 10 \Omega$  die zugehörigen Leitwerte  $G$ .

**Lösung:**

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{1 \Omega} = 1 \text{ S}$$

R in $\Omega$	1	2	4	6	8	10
G in S	1	0,5	0,25	0,167	0,125	0,1

<sup>1</sup> nach Georg Simon Ohm, deutscher Physiker, 1789 bis 1854  
<sup>2</sup>  $\Omega$  griech. Großbuchstabe Omega  
<sup>3</sup> nach Werner von Siemens, deutscher Ingenieur, 1816 bis 1892

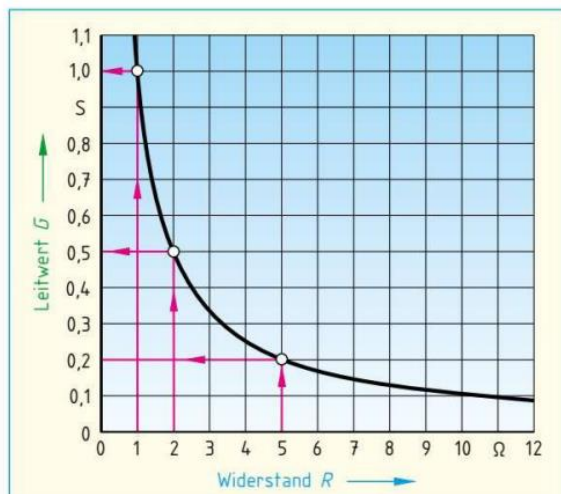


**Bild 1: Elektronenbewegung im Leiter**

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

**Widerstand und Leitwert**

	Widerstand	Leitwert
Formelzeichen:	$R$	$G$
Einheitenname:	Ohm	Siemens
Einheitenzeichen:	$\Omega$	S
Einheitenvorsätze (Beispiele):		
1 Milliohm	$= 1 \text{ m}\Omega = 1 \cdot 10^{-3} \Omega$	$= 0,001 \text{ S}$
1 Kiloohm	$= 1 \text{ k}\Omega = 1 \cdot 10^3 \Omega$	$= 1 \text{ 000 } \text{ S}$
1 Megaohm	$= 1 \text{ M}\Omega = 1 \cdot 10^6 \Omega$	$= 1 \text{ 000 000 } \text{ S}$



**Ablesebeispiele:**  
 Aus der Kennlinie abgelesen:  $R = 5 \Omega \Rightarrow G = 0,2 \text{ S}$ ;  
 $R = 2 \Omega \Rightarrow G = 0,5 \text{ S}$ ;  $R = 1 \Omega \Rightarrow G = 1 \text{ S}$

**Bild 2: Zusammenhang zwischen Leitwert und Widerstand**

## 2.7 Ohmsches Gesetz

**Versuch 1:** Schließen Sie über einen Strommesser einen Widerstand  $R = 4 \Omega$  an ein Netzgerät an, dessen Spannung zwischen 0 V und 10 V eingestellt werden kann. Legen Sie parallel zum Widerstand einen Spannungsmesser (Bild 1). Messen Sie die Stromstärken bei verschiedenen Spannungen.

Bei gleich bleibendem Widerstand wächst die Stromstärke mit der Spannung.

Die Stromstärke ist bei gleichem Widerstand proportional (verhältnismäßig) der Spannung. Sie verändert sich also im gleichen Verhältnis wie die Spannung:  $I \sim U$  (Versuch 1, Bild 1). Trägt man die im Versuch gemessenen Werte des Stromes abhängig von der zugehörigen Spannung in ein Diagramm (Bild 2) ein, so erhält man durch Verbinden der Messpunkte eine lineare Kennlinie. Ein größerer Widerstand, z. B.  $R = 10 \Omega$ , hat eine Kennlinie mit geringerer Steigung.

Die Stromstärke  $I$  ist proportional der Spannung  $U$ .

**Versuch 2:** Messen Sie nun bei gleich bleibender Spannung  $U = 10 \text{ V}$  die Stromstärken bei den Widerstandswerten  $2 \Omega, 4 \Omega, 6 \Omega, 8 \Omega$  und  $10 \Omega$ .

Bei unveränderter Spannung wird die Stromstärke umso kleiner, je größer der Widerstand ist.

Bei gleich bleibender Spannung verhält sich die Stromstärke umgekehrt wie der Widerstand. Die Stromstärke ist also dem Widerstand umgekehrt proportional:  $I \sim 1/R$  (Versuch 2, Bild 1).

Das Diagramm (Bild 3) zeigt die Abhängigkeit des Stromes vom Widerstand. Bei kleinerer Spannung, z. B.  $U = 5 \text{ V}$ , fließen kleinere Ströme.

Die Stromstärke  $I$  ist umgekehrt proportional dem Widerstand  $R$ .

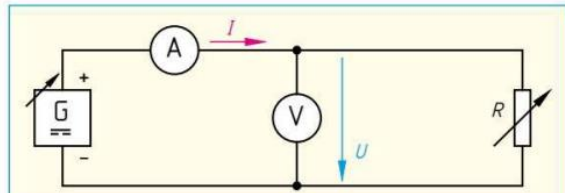
Das ohmsche Gesetz<sup>1</sup> beschreibt den Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand.

### Beispiele:

- Welche Stromstärke fließt durch eine Glühlampe für 4,5 V, die im Betrieb einen Widerstand von  $1,5 \Omega$  hat?
- Welche Spannung liegt an einem Widerstand von  $500 \Omega$ , durch den 0,2 A fließen?
- Ein LötKolben nimmt an 230 V den Strom 0,22 A auf. Welchen Widerstand hat die Heizwicklung?

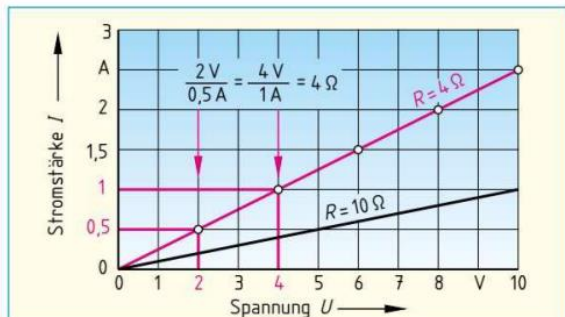
### Lösung:

- $I = \frac{U}{R} = \frac{4,5 \text{ V}}{1,5 \Omega} = 3 \text{ A}$
- $U = R \cdot I = 500 \Omega \cdot 0,2 \text{ A} = 100 \text{ V}$
- $R = \frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{0,22 \text{ A}} = 1045 \Omega$



Versuch 1: Widerstand konstant $R = 4 \Omega$		Versuch 2: Spannung konstant $U = 10 \text{ V}$	
Spannung in V	Strom in A	Widerstand in $\Omega$	Strom in A
2	0,5	2	5,0
4	1,0	4	2,5
6	1,5	6	1,67
8	2,0	8	1,25
10	2,5	10	1,0

Bild 1: Messen von Strom und Spannung



Je höher die Spannung ist, desto größer ist die Stromstärke:  $I \sim U$

$$\frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}} = \text{konstant} = \text{Widerstand}$$

Bild 2: Stromstärke als Funktion der Spannung

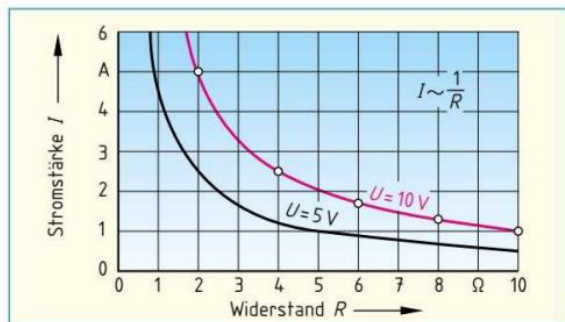


Bild 3: Stromstärke als Funktion des Widerstandes

### Ohmsches Gesetz

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

$I$	Stromstärke	$[I] = \frac{\text{V}}{\Omega} = \frac{\text{V}}{\frac{\text{V}}{\text{A}}} = \text{A}$
$U$	Spannung	
$R$	Widerstand	

<sup>1</sup> nach Georg Simon Ohm, deutscher Physiker, 1789 bis 1854

## 2.8 Leiterwiderstand

**Versuch 1:** Schließen Sie a) einen Kupferdraht und b) einen Konstantandraht von je 0,1 mm Durchmesser und 1 m Länge an ein Netzteil an. Ermitteln Sie mithilfe des ohmschen Gesetzes den Widerstand der beiden Drähte (**Bild**).

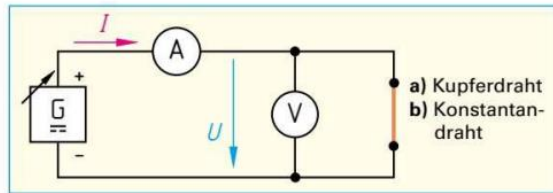
$R_{Cu} = 2,3 \Omega$  und  $R_{Konst.} = 62,4 \Omega$ , d. h., der Widerstand des Konstantandrahts ist etwa 27-mal so groß wie der des Kupferdrahtes.

Der Widerstand eines Leiters hängt vom Werkstoff ab. Den Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt bei 20 °C bezeichnet man als **spezifischen Widerstand**  $\rho$ <sup>1</sup>. Den Kehrwert des spezifischen Widerstands nennt man **Leitfähigkeit**  $\gamma$ <sup>2</sup>.

Gute elektrische Leiter, z. B. Kupfer, enthalten viele freie Elektronen und haben einen geringen spezifischen Widerstand bzw. eine hohe Leitfähigkeit (**Tabelle 1**).

**Versuch 2:** Wiederholen Sie Versuch 1 mit dem Konstantendraht, verdoppeln und verdreifachen Sie die Drahtlänge. Nehmen Sie dann wieder die einfache Länge, verdoppeln Sie jedoch den Querschnitt (2 Drähte parallel schalten) und verdreifachen Sie ihn schließlich (3 Drähte parallel schalten). Ermitteln Sie den jeweiligen Widerstand (**Bild**).

Der Leiterwiderstand ist bei doppelter Länge doppelt so groß, dreifache Länge gibt den dreifachen Widerstand. Bei doppeltem Querschnitt ist der Leiterwiderstand nur halb so groß, dreifacher Querschnitt ergibt nur ein Drittel des Widerstands.



**Bild:** Ermitteln des Widerstands von Drähten

Spezifischer Widerstand	Leitfähigkeit
$\rho = \frac{1}{\gamma}$	$\gamma = \frac{1}{\rho}$
$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$[\gamma] = \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} = \frac{1}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
$\rho$ spezifischer Widerstand	$\gamma$ Leitfähigkeit

**Tabelle 1: Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit (Beispiele bei 20 °C)**

Material	Spezifischer Widerstand $\rho$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	Leitfähigkeit $\gamma$ in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Aluminium (Al)	0,0278	36,0
Kupfer (Cu)	0,0179	56,0
Silber (Ag)	0,0167	60,0
Gold (Au)	0,0219	45,7

Der Leiterwiderstand  $R$  ist dem spezifischen Widerstand  $\rho$  und der Leiterlänge  $l$  proportional, jedoch umgekehrt proportional dem Leiterquerschnitt  $A$  (**Tabelle 2**).

**Tabelle 2: Leiterwiderstand**

Material	Leiterlänge	Leiterquerschnitt
<p>Kupfer: viele freie Elektronen → geringer Widerstand</p> <p>Konstantan: wenig freie Elektronen → hoher Widerstand</p>	<p>doppelte Leiterlänge → doppelter Widerstand</p> <p>2 · l</p>	<p>großer Querschnitt → kleiner Widerstand</p> <p>kleiner Querschnitt → großer Widerstand</p>
Der Leiterwiderstand ist umso größer, je größer der spezifische Widerstand $\rho$ ist.	Der Leiterwiderstand ist umso größer, je größer die Leiterlänge $l$ ist.	Der Leiterwiderstand ist umso größer, je kleiner der Leiterquerschnitt $A$ ist.
$R \sim \rho$	$R \sim l$	$R \sim \frac{1}{A}$
Leiterwiderstand $[R] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \text{m} = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{mm}^2} = \Omega$	$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$ $R = \frac{l}{\gamma \cdot A}$	<p><math>R</math> Leiterwiderstand</p> <p><math>\rho</math> spezifischer Widerstand</p> <p><math>l</math> Leiterlänge</p> <p><math>A</math> Leiterquerschnitt</p> <p><math>\gamma</math> elektrische Leitfähigkeit</p>

**Beispiel:**

Berechnen Sie den Widerstand eines Kupferleiters mit  $l = 50$  m Länge und einem Querschnitt von  $A = 1,5$  mm<sup>2</sup>.

**Lösung:**

Aus **Tabelle 1**:  $\gamma = 56,0 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A} = \frac{50 \text{ m}}{56,0 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} = 0,59 \Omega$$

<sup>1</sup>  $\rho$  griech. Kleinbuchstabe rho; <sup>2</sup>  $\gamma$  griech. Kleinbuchstabe gamma

## 2.9 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes

**Versuch:** Schließen Sie **a)** eine Metallfadenlampe (230 V/60 W) und **b)** eine Kohlefadenlampe (230 V/60 W) zuerst an eine Spannung von 10 V und dann an 230 V an. Ermitteln Sie jeweils den Widerstand des Glühdrahtes durch Strom- und Spannungsmessung (**Bild**).

Die Lampen bleiben bei 10 V dunkel. Damit ist die Temperatur des Glühdrahtes gering. Beim Anschluss an 230 V leuchten beide Lampen hell, die Temperatur des Glühdrahtes ist hoch. Der Widerstand des kalten Metalldrahtes ist niedrig, der des heißen ist groß. Der Widerstand des kalten Kohlefadens ist dagegen groß, der des heißen klein.

- Bei Temperaturerhöhung nimmt der Widerstand von Metallen zu, aber bei Kohle ab.
- Stoffe, die in kaltem Zustand besser leiten, nennt man Kaltleiter.
- Stoffe, die in heißem Zustand besser leiten, nennt man Heißleiter.

Bei Erwärmung schwingen die Atome stärker um ihren Platz im Kristallgitter (**Tabelle 1**). Sind die Atome bzw. die Atomrümpfe wie in den Metallen dicht beieinander, wird die Fortbewegung der freien Elektronen durch die Wärmebewegung der Atome stärker behindert. Der Widerstand dieser Stoffe nimmt mit der Temperatur zu (Kaltleiter).

Die Größe der Widerstandsänderung  $\Delta R$  wird mit dem **Temperaturkoeffizient**  $\alpha$ , der Temperaturdifferenz  $\Delta \vartheta$  und  $R_{20}$  berechnet.

Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  gibt an, um wie viel Ohm sich ein Widerstand von 1  $\Omega$  bei einer Temperaturänderung von 1 K (Kelvin) ändert.

Kaltleiter haben einen positiven, Heißleiter einen negativen Temperaturkoeffizienten (**Tabelle 2**). Metalle sind Heißleiter.

### Beispiel:

Wie groß ist der Drahtwiderstand einer Kupferwicklung (**Tabelle 2**) bei  $\vartheta_2 = 80^\circ\text{C}$ , wenn bei einer Temperatur von  $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$  ein Widerstand von  $R_{20} = 30\ \Omega$  gemessen wird?

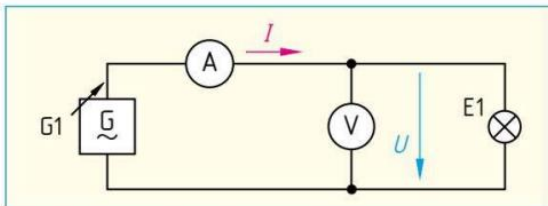
### Lösung:

$$\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 60\ \text{K}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta = 30\ \Omega \cdot 0,0039\ \frac{1}{\text{K}} \cdot 60\ \text{K} = 7,02\ \Omega$$

$$R_8 = R_{20} + \Delta R = 30\ \Omega + 7,02\ \Omega = \mathbf{37,02\ \Omega}$$

Kühlt man manche elektrischen Leiter, z. B. Aluminium unter ihre sogenannte Sprungtemperatur ab, sinkt ihr elektrischer Widerstand auf 0  $\Omega$ . Diesen Zustand nennt man **supraleitend**. Bei Aluminium beträgt die Sprungtemperatur  $-272^\circ\text{C}$ . Kupfer kann nicht supraleitend werden. Die für die Abkühlung auf die Sprungtemperatur aufzuwendende Energie ist im Vergleich zur Energieeinsparung durch den verlustfreien Transport des elektrischen Stromes jedoch noch viel zu hoch. Deshalb sind Supraleiter nur in der Hochtechnologie, z. B. bei einem Magnet-Resonanz-Tomographen, von Bedeutung.



**Bild:** Widerstandsermittlung bei Glühlampen

**Tabelle 1: Temperaturabhängigkeit von Widerständen**

	niedrige Temperatur	hohe Temperatur
Metalle	geringer Atomabstand	
	geringe Behinderung der freien Elektronen	starke Behinderung der freien Elektronen
Halbleiter	großer Atomabstand	
	wenig freie Ladungsträger entstehen	viele freie Ladungsträger entstehen

Temperaturdifferenzen werden nach DIN 1304 in K (Kelvin) angegeben.

### Widerstandswert bei Temperaturänderung

$$\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 \quad [\Delta \vartheta] = \text{K}; [\vartheta] = ^\circ\text{C}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta \quad [\Delta R] = \Omega \cdot \frac{1}{\text{K}} \cdot \text{K} = \Omega$$

$$R_8 = R_{20} + \Delta R \quad [\alpha] = \frac{1}{\text{K}}$$

$$R_8 = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$$

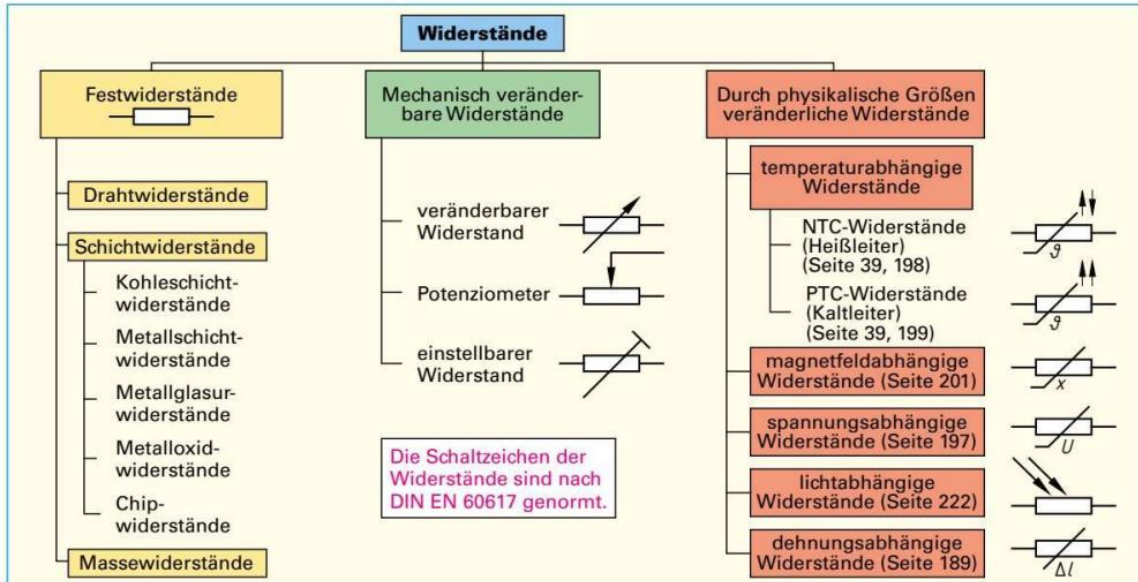
- $\Delta R$  Widerstandsänderung
- $R_{20}$  Widerstand bei  $20^\circ\text{C}$
- $R_8$  Widerstand bei der Temperatur  $\vartheta$
- $\alpha$  Temperaturkoeffizient (Temperaturbeiwert)
- $\Delta \vartheta$  Temperaturänderung
- $\vartheta_1$  Anfangstemperatur
- $\vartheta_2$  Endtemperatur

**Tabelle 2: Temperaturkoeffizient von Werkstoffen bei  $20^\circ\text{C}$**

Werkstoff	$\alpha$ in 1/K	Werkstoff	$\alpha$ in 1/K
Eisen	0,00657	Kupfer	0,0039
Zinn	0,00463	Aluminium	0,004
Blei	0,0042	Messing	0,0015
Zink	0,0042	Manganin	0,00001
Gold	0,00398	Konstantan	0,00004
Silber	0,0041	Kohle	-0,00045

## 2.10 Bauarten von Widerständen

Widerstände teilt man nach der Bauart (**Bild 1**) ein. Weiterhin unterscheidet man lineare Widerstände, z. B. Festwiderstände, und nichtlineare Widerstände, z. B. NTC-Widerstände.



**Bild 1:** Einteilung technischer Widerstände

**Festwiderstände** haben genormte Bemessungswerte (Nennwerte) mit einer zulässigen Toleranz, die in Prozent vom Bemessungswert angegeben wird. Die Normreihen dieser Nennwiderstände sind so aufgebaut, dass sie jeden Zwischenwert abdecken können. Die Bezeichnung der Normreihe, z. B. E12, bedeutet, dass 12 Widerstandswerte von 1,0 bis 8,2 (**Bild 2**) innerhalb einer Dekade<sup>1</sup> vorhanden sind.

Die nach DIN<sup>2</sup> IEC<sup>3</sup> festgelegten E-Reihen und deren Toleranzen sind: E6 ( $\pm 20\%$ ), E12 ( $\pm 10\%$ ), E24 ( $\pm 5\%$ ), E48 ( $\pm 2\%$ ), E96 ( $\pm 1\%$ ) und E192 ( $\pm 0,5\%$ ).

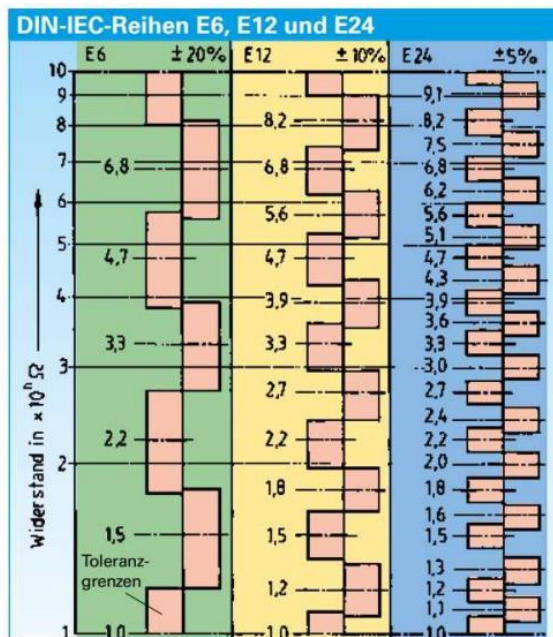
Widerstandswert und Fertigungstoleranz werden durch Zahlen oder Farbringe auf dem Widerstand gekennzeichnet. Widerstände bis einschließlich der Reihe E48 haben 4 Farbringe (**Tabelle, Seite 41**). Sind Widerstände mit 5 Farbringen versehen, z. B. ab der Reihe E96, geben die ersten drei Ringe die drei Ziffern des Widerstandswertes, der vierte Ring gibt den Multiplikator an und der fünfte die Toleranz (siehe Tabellenbuch Elektrotechnik).

**Belastbarkeit von Widerständen.** Sie hängt davon ab, wie gut die Stromwärme an die Umgebung abgegeben werden kann. Hohe Belastbarkeit bedingt deshalb auch große Abmessungen. Man gibt die Bemessungsleistung von Widerständen in Watt bei einer bestimmten Temperatur an, z. B. 1 W bei 70 °C.

<sup>1</sup> Dekade, von dekas (griech.) = zehn

<sup>2</sup> DIN, Abk. für: Deutsches Institut für Normung;

<sup>3</sup> IEC, Abk. für: International Electrotechnical Commission



**Bild 2:** Toleranzgrenzen

### Beispiel:

Welche Widerstandswerte entsprechen der Reihe E12?

### Lösung:

0,1  $\Omega$ ; 0,12  $\Omega$ ; 0,15  $\Omega$  ... 0,82  $\Omega$  **oder** 1,0  $\Omega$ ; 1,2  $\Omega$ ; 1,5  $\Omega$  ... 8,2  $\Omega$  **oder** 10  $\Omega$ ; 12  $\Omega$ ; 15  $\Omega$  ... 82  $\Omega$  **oder** 100  $\Omega$ ; 120  $\Omega$ ; 150  $\Omega$  ... 820  $\Omega$  **oder** 1 k $\Omega$ ; 1,2 k $\Omega$ ; 1,5 k $\Omega$  ... 8,2 k $\Omega$  usw.

Die Belastbarkeit aller Widerstände hängt von der Baugröße und der Umgebungstemperatur ab.

**Drahtwiderstände** bestehen aus einem Keramikkörper, auf den ein Widerstandsdraht, z.B. aus Konstantan, gewickelt ist. Anschlussfahnen, -schellen oder -kappen sorgen für die Stromzuführung. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen werden Drahtwiderstände mit Lack, Zement oder Glas überzogen. Drahtwiderstände werden etwa von 0,3 Ω bis 500 kΩ mit Bemessungsleistungen bis 300 W gefertigt.

**Schichtwiderstände** haben als Widerstandswerkstoff eine dünne Schicht aus kristalliner Kohle, einem Edelmetall oder einem Metalloxid z.B. auf einem Keramikkörper. Bei Metallschichtwiderständen (**Bild 1**) trägt man eine Paste aus Metallen, Metallverbindungen und Glaspulver auf und brennt sie anschließend ein (**Dickschichttechnik**). Sollen sehr dünne Schichten auf dem Keramikkörper entstehen, dampft man die Metalle im Vakuum durch eine Maske auf (**Dünnschichttechnik**). Zum Schutz gegen Feuchtigkeit, hohe Umgebungstemperatur und mechanische Beschädigung erhalten Schichtwiderstände einen Überzug aus Lack, Kunstharz oder Silikonzement. Edelmetallschichtwiderstände sind bei gleichen Abmessungen höher belastbar als Kohleschichtwiderstände (**Bild 1**). Kohleschichtwiderstände sind unempfindlich gegen kurzzeitige Überlastung (Impulsüberlastung). Metallschichtwiderstände sind temperaturstabil und haben besonders kleine Widerstandstoleranzen (bis zu ± 0,005%). Ihr Wertebereich kann zwischen 0,1 mΩ bis 100 MΩ betragen.

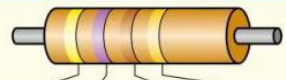
**Chip-Widerstände (Bild 2)** werden für die Oberflächenmontage (SMD-Technik, **Seite 615**) mit einer Belastung bis 2 W hergestellt. Die Bezeichnung der Bauformen, z.B. 1206, besteht immer aus vier Ziffern. Die ersten beiden Ziffern geben die Länge, die zweiten beiden Ziffern die Breite des Bauteils in 1/100 Zoll = 0,254 mm an.

**Mechanisch veränderbare Widerstände** werden als Stellwiderstände und als Drehwiderstände (**Bild 3**) hergestellt. Die drei Anschlüsse bezeichnet man mit E (Eingang), S (Schleifkontakt) und A (Ausgang). Je nach Einstellung des Schleifkontaktes ändert sich der abgegriffene Widerstandswert zwischen S und A bzw. S und E.

**Auswahl von Widerständen.** Widerstände werden ausgewählt nach:

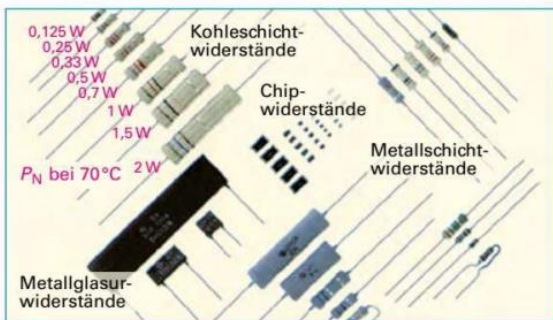
- Widerstandswert (Bemessungswert),
- Toleranz,
- Bemessungsleistung  $P_N$ ,
- Widerstandsverhalten bei Temperaturänderung,
- Bauform (**Bild 1**).

**Tabelle: Farbennzeichnung für Widerstände**

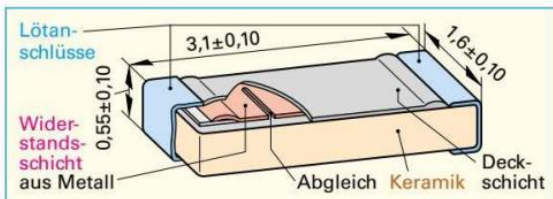


Kennfarbe		1.Ziffer	2.Ziffer	Multiplikator	Toleranz in %
nach DIN IEC 62	nach IEC 757	Widerstandswert in Ω			
schwarz (sw)	BK (black)	—	0	1	—
braun (br)	BN (brown)	1	1	10	±1
rot (rt)	RD (red)	2	2	10 <sup>2</sup>	±2
orange (or)	OG (orange)	3	3	10 <sup>3</sup>	—
gelb (gb)	YE (yellow)	4	4	10 <sup>4</sup>	—
grün (gn)	GN (green)	5	5	10 <sup>5</sup>	±0,5
blau (bl)	BU (blue)	6	6	10 <sup>6</sup>	±0,25
violett (vi)	VT (violet)	7	7	10 <sup>7</sup>	±0,1
grau (gr)	GY (grey)	8	8	10 <sup>8</sup>	—
weiß (ws)	WH (white)	9	9	10 <sup>9</sup>	—
gold (au)	GD (gold)	—	—	0,1	±5
silber (ag)	SR (silver)	—	—	0,01	±10
ohne Farbe		—	—	—	±20

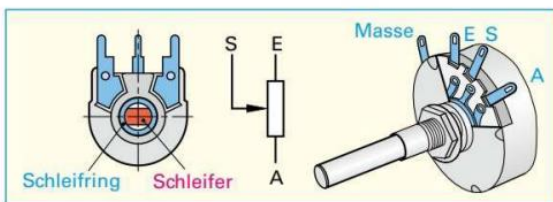
Beispiel:  
Erster Farbring näher am Anschlussdraht  
4 7 x 10 ± 5% ⇒ 470 Ω ± 5%



**Bild 1: Bauformen und Baugrößen von Widerständen**



**Bild 2: Aufbau eines Chip-Widerstandes (Bauform 1206)**



**Bild 3: Drehwiderstand (Potenziometer)**

## 2.11 Elektrische Energie und Arbeit

### 2.11.1 Gewinnung elektrischer Energie

**Elektrische Energie** lässt sich z.B. aus mechanischer Energie gewinnen. Im Wasser eines hochgelegenen Stausees ist potenzielle Energie gespeichert. Strömt das Wasser in das tiefergelegene Kraftwerk, wird die potenzielle Energie zur Bewegungsenergie. Das Wasser verrichtet in der Turbine Arbeit (**Bild 1**). Die Turbine treibt einen Generator an, der die mechanische Energie der Turbine in elektrische Energie umwandelt.

Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.

Elektrische Energie kann aus erneuerbaren Energien, fossilen<sup>1</sup> Energien oder aus der Kernenergie gewonnen werden (**Bild 2**).

**Beispiel Wärmekraftwerk:** Aufgabe eines Wärmekraftwerks ist die Energieumwandlung mithilfe von Wärmeenergie. Die Wärmeenergie wird z.B. aus der chemischen Energie durch Verbrennung von Kohle, Gas, Heizöl oder aus der Kernenergie durch Kernspaltung gewonnen. Im Dampferzeuger wird durch die Wärmeenergie aus Wasser Wasserdampf erzeugt. Der Wasserdampf treibt die Schaufelräder der Turbine an. Die Turbine ist mit dem Generator gekoppelt und wandelt die mechanische Energie (Bewegungsenergie) der Turbine in elektrische Energie um.

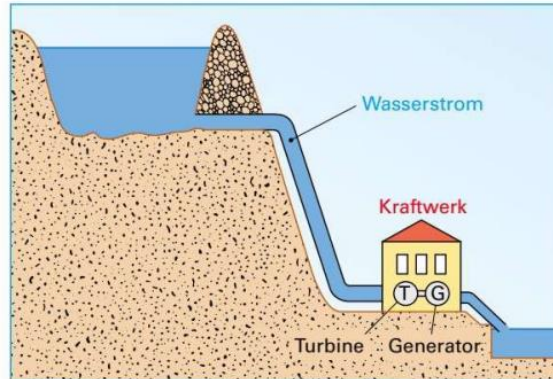


Bild 1: Wasserkraftwerk

Kraftwerke: Seite 277

Energie lässt sich nicht erzeugen, sondern nur umwandeln.

Trotzdem nennt man Einrichtungen, die eine Energieform in elektrische Energie umwandeln, **Erzeuger**. Erzeuger sind z.B. Generatoren, Solarzellen oder Akkumulatoren (beim Entladen).

Geräte, die elektrische Energie in andere Energiearten umformen, bezeichnet man als **Verbraucher**. Verbraucher sind z.B. Lampen, Elektromotoren, Akkumulatoren (beim Laden) oder Lautsprecher.

Die Umwandlung von elektrischer Energie in eine andere Energieform wird als elektrische Arbeit bezeichnet.

Elektrische Energie ist eine hochwertige Energieform, weil sie sich ohne große Verluste in andere Energiearten überführen lässt, z.B. in mechanische Energie oder Wärmeenergie.

<sup>1</sup> fossil (lat.) = ausgegraben, aus früher erdgeschichtlicher Zeit stammend

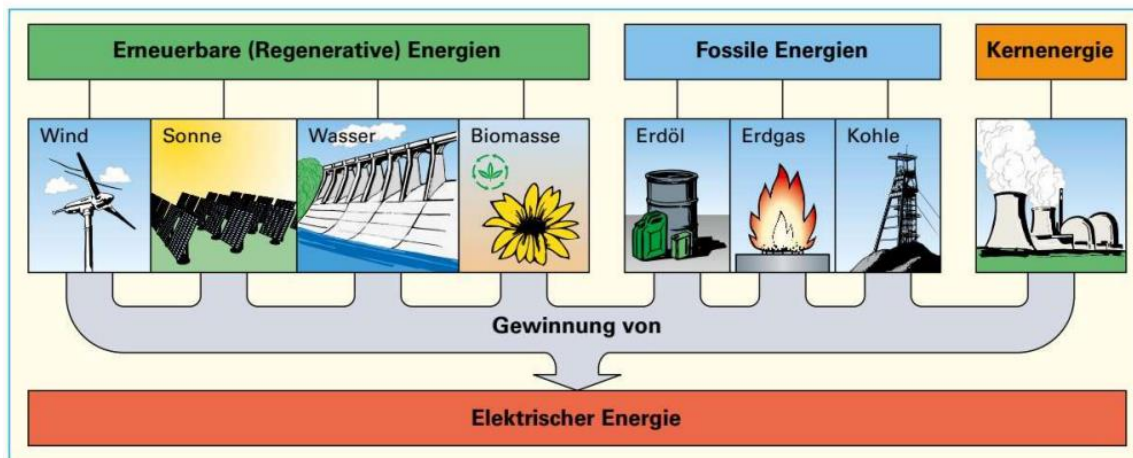


Bild 2: Beispiele für die Gewinnung elektrischer Energie

### 2.11.2 Elektrische Arbeit

Elektrische Spannung entsteht durch Ladungstrennung unter Arbeitsaufwand. Diese aufgewendete Arbeit kann an einem Verbraucher in elektrische Arbeit umgesetzt werden. Stellt man die Formel zur Berechnung der Spannung  $U = W/Q$  nach  $W$  um, so erhält man  $W = U \cdot Q$ . Ersetzt man die Ladung  $Q$  durch  $Q = I \cdot t$ , so ergibt sich für die elektrische Arbeit:

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

Die elektrische Arbeit  $W$  ist das Produkt aus der Spannung  $U$ , der Stromstärke  $I$  und der Zeit  $t$ .

Die **elektrische Arbeit** ist dabei umso größer,

- je größer die Spannung  $U$ ,
- je höher die Stromstärke  $I$  und
- je länger die Zeit  $t$  ist, in der ein Gerät elektrische Energie aus dem Netz entnimmt.

In der Praxis ist für die elektrische Arbeit die Einheit Kilowattstunde (kWh) gebräuchlich.

**i**  $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 3\,600\,000 \text{ Ws} = 3\,600\,000 \text{ J}$

#### Messen der elektrischen Arbeit

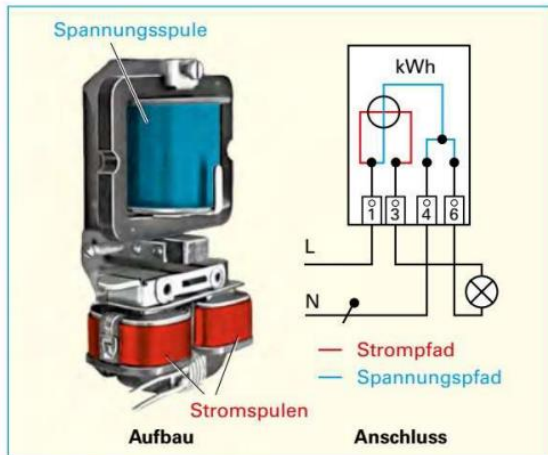
**Indirekte Messung.** Die elektrische Arbeit kann indirekt durch Messen von Spannung  $U$ , Stromstärke  $I$  und der Zeit  $t$  mit anschließender Berechnung über die Formel  $W = U \cdot I \cdot t$  bestimmt werden.

**Direkte Messung.** Elektrizitätszähler, oft nur als Zähler bezeichnet, messen die elektrische Arbeit direkt. Im Zähler (**Bild**) befinden sich eine Spannungsspule und zwei in Reihe geschaltete Stromspulen. Die Spannungsspule wird wie ein Spannungsmesser (Spannungspfad), die Stromspulen werden wie ein Strommesser (Strompfad) geschaltet. Die magnetischen Wirkungen der Spulen versetzen die Zählerscheibe in Drehung. Ein Zählwerk zählt die Umdrehungen und zeigt die elektrische Arbeit direkt in kWh an.

Elektrizitätszähler: **Seite 176**

#### Kosten der elektrischen Arbeit

Der Abnehmer elektrischer Energie muss die verbrauchte elektrische Arbeit dem **Netzbetreiber (NB)** bezahlen. Die Kosten der elektrischen Arbeit (Arbeitspreis) ergeben sich aus der vom Zähler angezeigten verbrauchten elektrischen Arbeit und dem tariflichen Preis für eine kWh. Der tarifliche Preis ist je nach Art des Verbrauchers, z.B. Industrie, Landwirtschaft, Haushalt, gestaffelt und richtet sich außerdem nach dem jeweiligen NB. Zur Berechnung der Gesamtkosten (Stromentgelt) müssen zum Arbeitspreis noch der Leistungspreis (Bereitstellungspreis) und der Verrechnungspreis (Zählermiete) hinzugerechnet werden.



**Bild: Elektrizitätszähler**

#### Elektrische Arbeit

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

$$[W] = \text{Ws}$$

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ VAs} = 1 \text{ J}$$

$W$	elektrische Arbeit	$I$	Stromstärke
$U$	Spannung	$t$	Zeit

#### Beispiel 1:

Berechnen Sie die elektrische Arbeit, wenn eine Lampe an einer Spannung von  $U = 230 \text{ V}$  angeschlossen ist und während einer Zeit von  $t = 4 \text{ h}$  ein Strom  $I = 0,44 \text{ A}$  fließt.

#### Lösung:

$$W = U \cdot I \cdot t = 230 \text{ V} \cdot 0,44 \text{ A} \cdot 4 \text{ h}$$

$$= 404,8 \text{ Wh} \approx \mathbf{0,405 \text{ kWh}}$$

#### **i** Elektrische Arbeit

- Formelzeichen:  $W$
- Einheitenname: Wattsekunde
- Einheitenzeichen:  $\text{Ws}$
- Einheitenvorsätze (Beispiele):
  - 1 Milliwattsekunde =  $1 \text{ mWs} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ws} = 0,001 \text{ Ws}$
  - 1 Kilowattsekunde =  $1 \text{ kWs} = 1 \cdot 10^3 \text{ Ws} = 1000 \text{ Ws}$
  - 1 Megawattsekunde =  $1 \text{ MWs} = 1 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 1\,000\,000 \text{ Ws}$

#### Kosten der elektrischen Arbeit

$$K_A = W \cdot T$$

$$[K_A] = \text{€}$$

$K_A$	Arbeitspreis
$W$	elektrische Arbeit in kWh
$T$	tariflicher Preis in €/kWh

#### Beispiel 2:

Ein Fernsehgerät nimmt an einer Spannung von  $230 \text{ V}$  einen Strom von  $0,32 \text{ A}$  auf. Berechnen Sie den Arbeitspreis, wenn das Fernsehgerät 10 Stunden in Betrieb ist und der tarifliche Preis  $0,26 \text{ €/kWh}$  beträgt.

#### Lösung:

$$W = U \cdot I \cdot t = 230 \text{ V} \cdot 0,32 \text{ A} \cdot 10 \text{ h} = 736 \text{ Wh} = 0,736 \text{ kWh}$$

$$K_A = W \cdot T = 0,736 \text{ kWh} \cdot 0,26 \text{ €/kWh} = \mathbf{0,19 \text{ €}}$$

## 2.12 Elektrische Leistung

Wird eine bestimmte Arbeit  $W$  in einer gewissen Zeit  $t$  verrichtet, so spricht man von Leistung  $P$ . Diese Definition gilt für die mechanische Leistung ebenso wie für die elektrische Leistung. Die Einheit der Leistung ist Watt (W).


Elektrische Leistung ist elektrische Arbeit pro Zeit.

Setzt man für die elektrische Arbeit die Formel  $W = U \cdot I \cdot t$  ein, so ergibt sich für die elektrische Leistung:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I$$

Die elektrische Leistung errechnet man aus Spannung mal Stromstärke.

Bei Gleichstrom darf man die Leistung immer mit der Formel  $P = U \cdot I$  berechnen, bei Wechselstrom nur bei Wärmegeräten (ohmsche Widerstände).

 Wechselstromleistung: Seite 140

Die elektrische Leistung kann man auch mit dem Widerstandswert und der Spannung bzw. der Stromstärke berechnen. Über das ohmsche Gesetz lässt sich ein Zusammenhang zwischen Leistung und Widerstand herstellen.

$$P = U \cdot I$$

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

$$\Rightarrow P = I \cdot R \cdot I \quad \Rightarrow P = U \cdot \frac{U}{R}$$

$$\Rightarrow P = I^2 \cdot R \quad \Rightarrow P = \frac{U^2}{R}$$

In einem Verbraucher mit konstantem Widerstand nimmt die elektrische Leistung mit dem Quadrat des Stromes zu, ebenso mit dem Quadrat der Spannung.

Wird z. B. an einem konstanten Widerstand  $R = 100 \Omega$  die Spannung von  $U_1 = 2 \text{ V}$  auf  $U_2 = 4 \text{ V}$  verdoppelt, so steigt die Leistung von  $P_1 = 40 \text{ mW}$  um das Vierfache auf  $P_2 = 160 \text{ mW}$ .

In einem Strom-Spannungs-Schaubild (**Bild**) ist die Kurve für eine bestimmte Leistung, z. B. für  $P = 2 \text{ W}$ , eine Hyperbel (Leistungshyperbel). An jedem Punkt der Hyperbel ist  $P = U \cdot I = 2 \text{ W}$ .

Eine Widerstandsgerade schneidet diese Hyperbel im Punkt der höchstzulässigen Spannung  $U_{\max}$  und der höchstzulässigen Stromstärke  $I_{\max}$ .

### Elektrische Leistung

$$P = \frac{W}{t}$$

$$[P] = W$$

$$P = U \cdot I$$

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{VAs}}{\text{s}} = 1 \text{ VA}$$

$P$	Elektrische Leistung	$I$	Stromstärke
$W$	Elektrische Arbeit	$t$	Zeit
$U$	Spannung		

#### Beispiel 1:

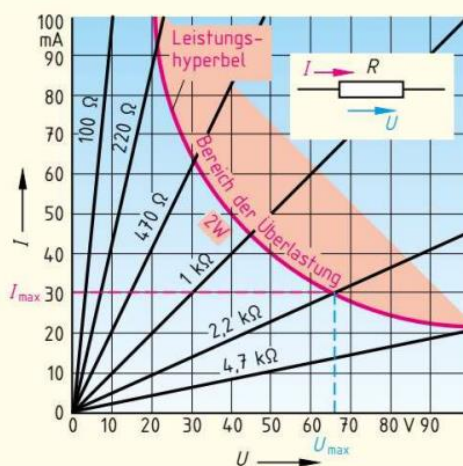
Ein Heizgerät für 230 V nimmt im Betrieb 8,65 A auf. Wie groß ist die aufgenommene elektrische Leistung?

#### Lösung:

$$P = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 8,65 \text{ A} = 1989,5 \text{ W} \approx 2 \text{ kW}$$

#### Elektrische Leistung

- Formelzeichen:  $P$
- Einheitenname: Watt
- Einheitenzeichen: W
- Einheitenvorsätze (Beispiele):
  - 1 Milliwatt = 1 mW =  $1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$  = 0,001 W
  - 1 Kilowatt = 1 kW =  $1 \cdot 10^3 \text{ W}$  = 1000 W
  - 1 Megawatt = 1 MW =  $1 \cdot 10^6 \text{ W}$  = 1 000 000 W



**Bild:** Leistungshyperbel für 2-W-Widerstände

#### Beispiel 2:

- Ermitteln Sie aus dem **Bild** die Werte  $U_{\max}$  und  $I_{\max}$  für einen Widerstand von 2,2 k $\Omega$ , 2 W.
- Überprüfen Sie die Werte rechnerisch.

#### Lösung:

- aus Schaubild (**Bild**):

$$U_{\max} \approx 66 \text{ V} \text{ und } I_{\max} \approx 30 \text{ mA}$$

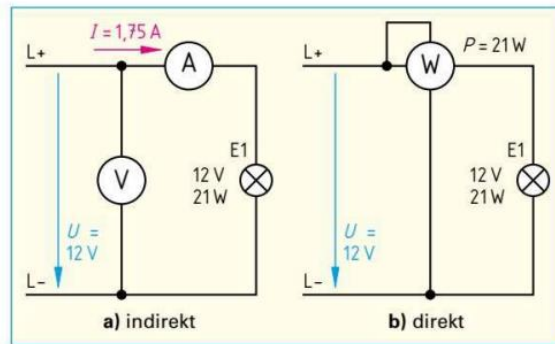
- $U_{\max} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{2 \text{ W} \cdot 2200 \Omega} = 66,3 \text{ V}$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{2 \text{ W}}{2200 \Omega}} = 0,03 \text{ A}$$

### Messung der elektrischen Leistung

**Indirekte Messung.** Die elektrische Leistung kann man **indirekt** aus den Messwerten einer Strom- und Spannungsmessung (**Bild 1a**) mit der Formel  $P = U \cdot I$  berechnen.

Die Leistungsbestimmung mithilfe eines **Elektrizitätszählers** ist eine weitere Methode der indirekten Leistungsbestimmung. Auf dem Leistungsschild des Zählers (**Bild 2**) ist die Zählerkonstante  $C_z$  angegeben. Sie gibt an, wie oft sich die Zählscheibe drehen muss, bis 1 kWh verbraucht ist. Eine Farbmarkierung am Umfang der Zählerscheibe ermöglicht das Zählen der Umdrehungen.



**Bild 1: Indirekte und direkte Leistungsmessung**

### Arbeitsschritte bei der indirekten Leistungsmessung mithilfe eines Zählers:

- Einschalten des Verbrauchers, dessen Leistung ermittelt werden soll (alle anderen Verbraucher müssen ausgeschaltet sein).
- Zählen der Umdrehungen der Zählerscheibe, die der zu messende Verbraucher, z. B. in einer Minute, verursacht.
- Umrechnen der Umdrehungen der Zählerscheibe auf eine Stunde.
- Berechnen der elektrischen Leistung in kWh mit der Formel  $P = n/C_z$ .

**Direkte Messung.** Die elektrische Leistung kann mit einem Leistungsmesser **direkt** bestimmt werden (**Bild 1b**). Ein Leistungsmesser besitzt vier Anschlüsse, zwei für die Spannungs- und zwei für die Strommessung. Am Spannungspfad liegt die zu messende Spannung, und durch den Strompfad fließt der zu messende Strom. Die Anzeige entspricht dem Produkt aus anliegender Spannung  $U$  und fließendem Strom  $I$  und damit der Leistung  $P$ .

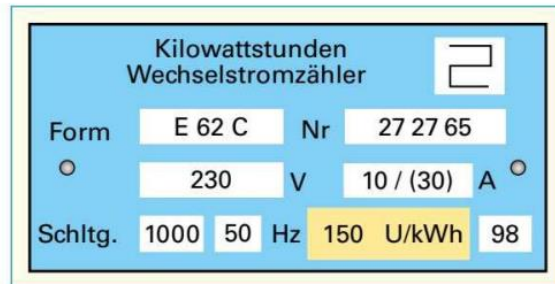
Bei der Einstellung des Spannungs- und Strommessbereichs ist darauf zu achten, dass weder der Strompfad noch der Spannungspfad überlastet werden.

Beim Leistungsmesser schließt man den Spannungspfad wie einen Spannungsmesser und den Strompfad wie einen Strommesser an.

Leistungsmesser: **Seite 178**

**Leistungsangaben.** Bei elektrischen Betriebsmitteln, z. B. einer Bohrmaschine, ist auf dem Leistungsschild die **Bemessungsleistung** angegeben.

Die Bemessungsleistung gibt die Leistung unter den angegebenen Betriebsbedingungen (z. B. Bemessungsspannung, Bemessungsstrom) an.



**Bild 2: Leistungsschild eines Elektrizitätszählers**

**Elektrische Leistung**

$P = \frac{n}{C_z}$

$[P] = \frac{1/h}{1/kWh} = kW$

$P$  Leistung  
 $n$  Umdrehungen der Zählerscheibe je Stunde  
 $C_z$  Zählerkonstante, Umdrehungen der Zählerscheibe je kWh

**Beispiel:**

Nach einem Zähler mit der Zählerkonstanten  $C_z = 150$  1/kWh (**Bild 2**) ist nur noch ein Heizgerät eingeschaltet. Die Zählerscheibe dreht sich 5-mal in der Minute. Welche elektrische Leistung nimmt das Gerät auf?

**Lösung:**

$n = \frac{5 \cdot 60 \cdot \text{min/h}}{1 \text{ min}} = 300 \text{ 1/h}; P = \frac{n}{C_z} = \frac{300 \text{ 1/h}}{150 \text{ 1/kWh}} = 2 \text{ kW}$

- Die angegebene Bemessungsleistung ist:
- bei Elektrogeräten, z. B. einem Haartrockner oder LötKolben (**Tabelle**), die **aufgenommene Leistung**,
  - bei Elektromotoren die **abgegebene Leistung**.

<b>Tabelle: Leistungen von Verbrauchern (Beispiele)</b>			
Verbraucher	Leistung	Verbraucher	Leistung
Haartrockner	2 000 W	LED-Lampe	7,5 W
LED-TV-Gerät	65 W	LötKolben	60 W
ICE-Antrieb	8 000 kW	Quarz-Uhr	90 $\mu$ W

## 2.13 Wirkungsgrad

**Versuch:** Schließen Sie einen Transformator über einen Leistungsmesser an eine Wechselspannung  $U = 50\text{ V}$  an (Bild 1). Belasten Sie den Transformator mit einem Stellwiderstand, z. B.  $50\ \Omega$ , und messen Sie die Leistungsaufnahme und die Leistungsabgabe.

Die Leistungsabgabe ist kleiner als die Leistungsaufnahme.

In allen Energiewandlern entstehen unerwünschte Nebenwirkungen. So erwärmt der elektrische Strom z. B. bei Transformatoren und Motoren die Drähte der Wicklungen. Auch das Eisenblech wird erwärmt. Bei Motoren wird zusätzlich noch die Lager- und Luftreibung in Wärme umgesetzt.

Den Teil der aufgenommenen (aufgewendeten) Leistung, der in unerwünschte Nebenwirkungen umgesetzt wird, nennt man **Verlustleistung**. Das **Leistungsschaubild** eines Motors (Bild 2 und Seite 495) zeigt den Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Leistung, der abgegebenen (genutzten) Leistung und den im Motor auftretenden Verlustleistungen.

Der Wirkungsgrad  $\eta^1$  ist das Verhältnis von abgegebener Leistung zur aufgenommenen Leistung.

Der Wirkungsgrad kann als Dezimalzahl (Tabelle) oder in Prozent angegeben werden. Er ist immer kleiner als 1 bzw. 100%, weil die Leistungsaufnahme immer größer ist als die nutzbare Leistungsabgabe.

### Beispiel 1:

Ein Motor nimmt  $4,65\text{ kW}$  elektrische Leistung auf und gibt an der Motorwelle  $4,0\text{ kW}$  mechanische Leistung ab. Berechnen Sie a) die Verlustleistung  $P_v$  und b) den Wirkungsgrad  $\eta$  des Motors.

### Lösung:

a)  $P_v = P_{zu} - P_{ab} = 4,65\text{ kW} - 4\text{ kW} = 0,65\text{ kW}$

b)  $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{4\text{ kW}}{4,65\text{ kW}} = 0,86 \cong 86\%$

Wandelt man in einer Anlage die Energieform mehrmals um, z. B. von elektrischer Energie in mechanische Energie und dann wieder in elektrische Energie mit anderer Frequenz und/oder Spannung (Bild 3), erhält man den Gesamtwirkungsgrad  $\eta$  durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade.

### Beispiel 2:

Berechnen Sie für den Frequenzumformer (Bild 3) a) den Wirkungsgrad  $\eta_M$  des Motors, des Generators  $\eta_G$  und b) den Gesamtwirkungsgrad  $\eta$ .

### Lösung:

a)  $\eta_M = \frac{P_{abM}}{P_{zuM}} = \frac{3,2\text{ kW}}{4\text{ kW}} = 0,8$      $\eta_G = \frac{P_{abG}}{P_{zuG}} = \frac{2,4\text{ kW}}{3,2\text{ kW}} = 0,75$

b)  $\eta = \frac{P_{abG}}{P_{zuM}} = \frac{2,4\text{ kW}}{4\text{ kW}} = 0,6$  oder

$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = \eta_M \cdot \eta_G = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6$

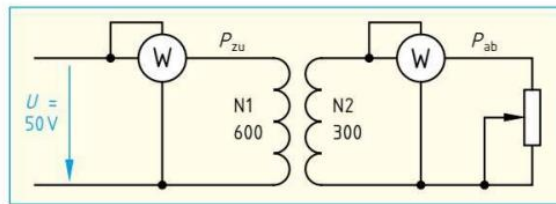


Bild 1: Bestimmen des Wirkungsgrades an einem Transformator

### Verlustleistung und Wirkungsgrad

$$P_v = P_{zu} - P_{ab}$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}; \quad \eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad [\eta] = 1$$

$\eta$	Wirkungsgrad (Leistungsverhältnis), Gesamtwirkungsgrad
$\eta_1, \eta_2$	Einzelwirkungsgrade
$P_{ab}$	abgegebene Leistung
$P_{zu}$	aufgenommene Leistung
$P_v$	Verlustleistung

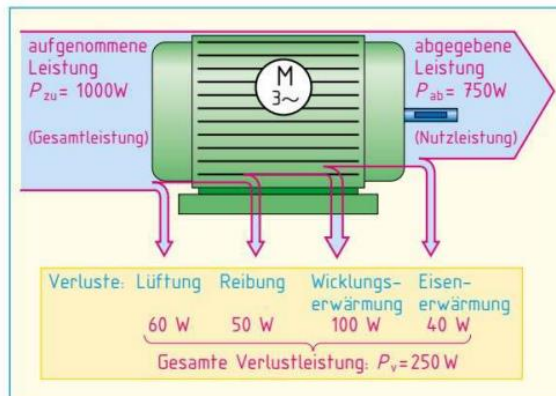


Bild 2: Leistungsschaubild eines Motors

### Tabelle: Wirkungsgrade (Beispiele)

Verbraucher		Wirkungsgrad $\eta$
Drehstrommotor	1 kW	0,75
Transformator	1 kVA	0,90
Tauchsieder	1 kW	0,95
Glühlampe	40 W	0,15

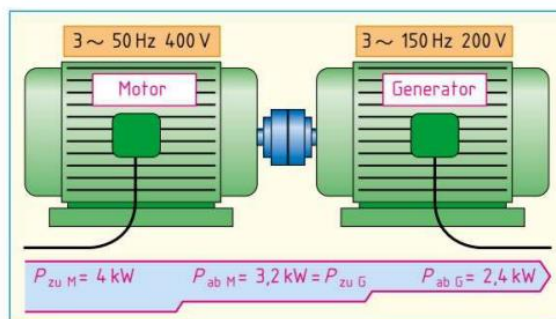


Bild 3: Frequenzumformer

<sup>1</sup>  $\eta$  griech. Kleinbuchstabe eta

## 2.14 Elektrowärme

**Wärme** ist eine Energieform, die durch die Energie der ungeordneten Bewegung von Atomen oder Molekülen entsteht. Meist wird elektrische Energie unmittelbar in Wärme umgewandelt. Diese Wärme kann erwünscht (Nutzwärme) oder nicht erwünscht (Verlustwärme) sein (**Tabelle 1**). Wärme hat die gleichen Einheiten wie Energie, z. B. Joule<sup>1</sup> (J).

**Temperatur.** Den Wärmeszustand eines Körpers kennzeichnet seine Temperatur. Zur Messung benützt man Thermometer. Als Einheit der Temperatur ist das Grad Celsius<sup>2</sup> (°C) üblich. In der Physik und Elektrotechnik wird meist bei Temperaturen mit der Einheit Kelvin<sup>3</sup> (K) gerechnet (0 K = -273,15 °C). Temperaturdifferenzen werden immer in Kelvin angegeben, z. B.  $\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 55\text{ °C} - 20\text{ °C} = 35\text{ K}$ .

**Wärmekapazität.** Einem Körper muss man Wärme zuführen, um seine Temperatur zu erhöhen. Ein Rückgang der Temperatur bedeutet dagegen Abgabe von Wärme. Aufgenommene bzw. abgegebene Wärme wird häufig auch als Wärmemenge bezeichnet. Die Wärmemenge, die zur Temperaturerhöhung eines Stoffes, z. B. Wasser, von 1 kg um 1 K notwendig ist, nennt man **spezifische Wärmekapazität c** (**Tabelle 2**). Je größer die spezifische Wärmekapazität ist, umso mehr Wärme kann ein Körper speichern.

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  gibt die Wärmemenge  $Q$  an, die eine Masse  $m = 1\text{ kg}$  des Stoffes um 1 K erwärmt.

Die zur Erwärmung erforderliche oder bei Abkühlung eines Körpers frei werdende Wärme hängt von der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c$  des Stoffes und der Masse  $m$  ab.

**Wärmeübertragung.** Wärme wird immer von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedriger Temperatur übertragen. Dabei unterscheidet man Wärmeübertragung durch **Wärmeleitung**, z. B. in Metallen (**Bild**), durch **Konvektion (Wärmeströmung)**, z. B. bei Gasen und Flüssigkeiten, und durch **Wärmestrahlung**, z. B. bei Heizstrahlern. Der Wärmeübertragung wird ein bestimmter Widerstand entgegengesetzt, den man thermischen Widerstand  $R_{th}$  nennt.

 Thermischer Widerstand: **Seite 205**

**Wärmenutzungsgrad.** In Elektrowärmegeräten entstehen Verluste dann, wenn ein Teil der Stromwärme (zugeführte elektrische Arbeit) durch Wärmeleitung, Wärmeströmung und Wärmestrahlung verloren geht. Die an der erwünschten Stelle, z. B. im Kochgut, auftretende Wärme bezeichnet man als **Nutzwärme**. Die Nutzwärme ist um die Verluste kleiner als die **Stromwärme**. Das Verhältnis von Nutzwärme zu Stromwärme nennt man **Wärmenutzungsgrad  $\zeta$** <sup>4</sup>.

### Beispiel:

Ein 6-kW-Warmwasserspeicher erwärmt 80 l Wasser von 14 °C auf 55 °C in 45 Minuten. Berechnen Sie **a)** die Wärmemenge und **b)** den Wärmenutzungsgrad.


### Lösung:

- a)**  $Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta = 80\text{ kg} \cdot 4,19\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (55\text{ °C} - 14\text{ °C}) = 13\,743\text{ kJ}$   
**b)**  $\zeta = Q_N/Q_S = 13\,743\text{ kJ}/(6\text{ kW} \cdot 45\text{ min} \cdot 60\text{ s/min}) = 0,85 \hat{=} 85\%$

<sup>1</sup> James Joule (sprich: dschul), engl. Physiker, 1818 bis 1889  
<sup>2</sup> Anders Celsius, schwedischer Physiker, 1701 bis 1744  
<sup>3</sup> Lord William Kelvin, englischer Physiker, 1824 bis 1907  
<sup>4</sup>  $\zeta$ , griech. Kleinbuchstabe zeta

**Tabelle 1: Elektrowärme (Beispiele)**

Nutzwärme	Verlustwärme
Raumheizung	Glühlampe
Kochplatten	Motor
Lötkolben	Transformator
Tauchsieder	Leitung

 **1 Ws = 1 J = 1 Nm**

**Tabelle 2: Spezifische Wärmekapazität c**

Stoff	Spezifische Wärmekapazität $c$ in kJ/(kg · K)
Aluminium	0,92
Kupfer	0,39
Stahl	0,46
Polyvinylchlorid	0,88
Wasser	4,19

### Wärme, Wärmemenge

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad [Q] = \text{J}$$

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

$Q$	Wärme, Wärmemenge
$m$	Masse
$c$	spezifische Wärmekapazität
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz
$\vartheta_1$	Anfangstemperatur
$\vartheta_2$	Endtemperatur

### Wärmenutzungsgrad

$$Q_N = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

$$Q_S = P \cdot t$$

$$\zeta = \frac{Q_N}{Q_S} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\vartheta}{P \cdot t}$$

$\zeta$	Wärmenutzungsgrad
$Q_N$	Nutzwärme
$Q_S$	Stromwärme
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz
$c$	spezifische Wärmekapazität
$m$	Masse
$P$	Leistung
$t$	Zeit



**Bild: Wärmeleitung**

### 3 Grundsaltungen der Elektrotechnik

#### 3.1 Reihenschaltung

Bei der Reihenschaltung sind die einzelnen Verbraucher, z. B. Lampen, so geschaltet, dass sie vom selben Strom durchflossen werden. Die Reihenschaltung nennt man auch Hintereinanderschaltung.

##### 3.1.1 Gesetze der Reihenschaltung

**Versuch 1:** Schalten Sie zwei Lampen gleicher Leistung in Reihe an einen Spannungserzeuger. Messen Sie den Strom vor, zwischen und nach den beiden Verbrauchern (**Bild 1**). Vergleichen Sie die Messergebnisse miteinander. *Alle Strommesser zeigen die gleiche Stromstärke an ( $I_1 = I_2 = I_3$ ).*

Die Stromstärke ist in der Reihenschaltung an allen Stellen gleich, weil der Strom sich bei dieser Schaltung nicht verzweigt.

In der Reihenschaltung fließt überall derselbe Strom.

**Versuch 2:** Schalten Sie zwei Verbraucher, z. B. zwei Lampen verschiedener Leistung, in Reihe an einen Spannungserzeuger und messen Sie alle Spannungen (**Bild 2**). Vergleichen Sie diese Spannungen.

*Die Teilspannungen an den Verbrauchern sind zusammen so groß wie die angelegte Spannung (Gesamtspannung  $U = U_1 + U_2$ ).*

Bei der Reihenschaltung liegt an jedem Verbraucher ein Teil der Gesamtspannung. Die Gesamtspannung teilt sich an den einzelnen Widerständen auf (Spannungsteilung).

Bei der Reihenschaltung ist die Summe der Teilspannungen an den Verbrauchern so groß wie die angelegte Spannung.

Erzeuger und Verbraucher in Versuch 2 sind so geschaltet, dass sie einen geschlossenen Weg, eine sogenannte Masche bilden. Es können sich in einer Masche mehrere Verbraucher und mehrere Erzeuger befinden (**Bild 3**). Auch die erzeugten Spannungen (**Erzeugerspannungen, Seite 63**) werden mit einbezogen.

Es gilt die **Maschenregel** (2. Kirchhoffsche<sup>1</sup> Regel):

In einer Masche ist die Summe der Erzeugerspannungen (Quellenspannungen) und der Teilspannungen an den Verbrauchern null.

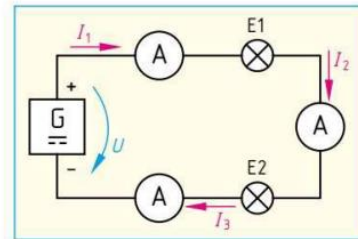
Bei der Anwendung der Maschenregel sind die Umlaufrichtung (frei wählbar) und die Spannungspfeile zu berücksichtigen. In Umlaufrichtung zeigende Spannungspfeile werden positiv gezählt, entgegengesetzte Spannungspfeile negativ.

**Versuch 3:** Wiederholen Sie Versuch 2, messen Sie aber auch die Stromstärke. Berechnen Sie aus Strom, Teilspannungen und Gesamtspannung die Widerstände der beiden Verbraucher und den Gesamtwiderstand der Reihenschaltung.

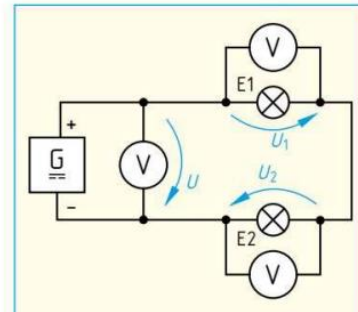
*Der Gesamtwiderstand  $R$  der beiden Verbraucher ist gleich der Summe der Einzelwiderstände  $R_1$  und  $R_2$ .*

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} \Rightarrow R = R_1 + R_2$$

<sup>1</sup> Gustav R. Kirchhoff, deutscher Physiker, 1824 bis 1887



**Bild 1: Reihenschaltung, Messen des Stromes**



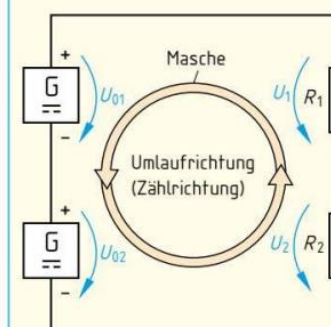
**Bild 2: Reihenschaltung, Messen der Spannungen**

##### Teilspannungen

$$U = U_1 + U_2 + \dots$$

$U$  Gesamtspannung  
 $U_1, U_2$  Teilspannungen, Verbraucherspannungen

##### Maschenregel (2. Kirchhoffsche Regel)



**Bild 3: Masche**

$$\begin{aligned} \Sigma U &= 0 \\ U_{01} + U_{02} - U_2 - U_1 &= 0 \\ U_{01} + U_{02} &= U_1 + U_2 \end{aligned}$$

$\Sigma U$  Summe aller Spannungen  
 $U_{01}, U_{02}$  Erzeugerspannungen  
 $U_1, U_2$  Verbraucherspannungen

Bei der Reihenschaltung ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Einzelwiderstände.

Den **Gesamtwiderstand**  $R$  einer Schaltung nennt man auch **Ersatzwiderstand**. Ein solcher Ersatzwiderstand nimmt an der gleichen Spannung die gleiche Stromstärke auf wie die Einzelwiderstände zusammen.

#### Beispiel:

Zwei Widerstände,  $R_1 = 24 \Omega$  und  $R_2 = 72 \Omega$ , sind in Reihe geschaltet (**Bild**) und liegen an einer Spannung von 24 V. Berechnen Sie **a)** den Ersatzwiderstand, **b)** die Stromstärke, **c)** die Teilspannungen, die an den Einzelwiderständen liegen und **d)** die Gesamtspannung.

#### Lösung:

- a)  $R = R_1 + R_2 = 24 \Omega + 72 \Omega = 96 \Omega$   
 b)  $I = \frac{U}{R} = \frac{24 \text{ V}}{96 \Omega} = 0,25 \text{ A}$   
 c)  $U_1 = I \cdot R_1 = 0,25 \text{ A} \cdot 24 \Omega = 6 \text{ V}$   
 $U_2 = I \cdot R_2 = 0,25 \text{ A} \cdot 72 \Omega = 18 \text{ V}$   
 d)  $U = U_1 + U_2 = 6 \text{ V} + 18 \text{ V} = 24 \text{ V}$

Da in der Reihenschaltung überall derselbe Strom fließt, ist die Spannung am Widerstand  $R_2$  größer als die Spannung am Widerstand  $R_1$ .

Bei der Reihenschaltung liegt am Widerstand mit dem größten Widerstandswert auch die größere Spannung an.

Vergleicht man die Werte der Teilspannungen und dann die der Einzelwiderstände, so erkennt man, dass sich die Teilspannungen zueinander wie die Einzelwiderstände verhalten (**Beispiel**).

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Ebenso verhält sich die Teilspannung zur Gesamtspannung wie der zugehörige Einzelwiderstand zum Gesamtwiderstand.

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R} \quad \text{bzw.} \quad \frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R}$$

Bei der Reihenschaltung verhalten sich die Spannungen wie die zugehörigen Widerstände.

**Anwendungen der Reihenschaltung.** Verbraucher, z. B. Lampen, werden selten in Reihe geschaltet. Fällt nämlich ein Verbraucher aus, so ist der Stromkreis unterbrochen. Bei Weihnachtsbaumbeleuchtungen wird die Reihenschaltung jedoch angewendet. Um bei solchen Beleuchtungen zu verhindern, dass beim Durchschmelzen einer Lampenwendel der Stromkreis unterbrochen wird, überbrückt man jede Lampe mit einem Heißleiter (**Seite 198**). Beim Unterbrechen der Lampenwendel fließt dann ein größerer Strom durch den Heißleiter, der sich dadurch mehr erwärmt. Sein Widerstand verringert sich dann, sodass er als Stromweg für die ausgefallene Lampe dienen kann.

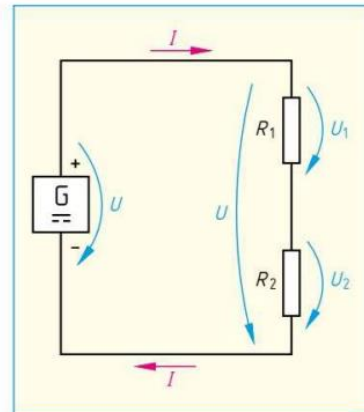
Spannungserzeuger, z. B. galvanische Elemente, können ebenfalls in Reihe geschaltet werden (**Seite 63**). Auch beim Fließen des elektrischen Stromes durch den menschlichen Körper liegt eine Reihenschaltung von Widerständen (Übergangs- und Durchgangswiderstände, **Seite 346**) vor.

Mehrere Aus-Taster, z. B. für die Sicherheitsschaltung bei Motoren, werden ebenfalls in Reihe (**Seite 114**) geschaltet.

#### Gesamtwiderstand

$$R = R_1 + R_2 + \dots$$

$R$	Gesamtwiderstand (Ersatzwiderstand)
$R_1, R_2$	Einzelwiderstände



**Bild:** Strom, Spannungen und Widerstände in einer Reihenschaltung

#### Spannungsteilung

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R} \quad \frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R}$$

$U$	Gesamtspannung
$U_1, U_2$	Teilspannungen
$R$	Gesamtwiderstand (Ersatzwiderstand)
$R_1, R_2$	Einzelwiderstände

### 3.2 Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung sind jeweils alle Strom- eintrittsklemmen und alle Stromaustrittsklemmen miteinander verbunden.

**Versuch 1:** Schalten Sie drei Verbraucher, z. B. Lampen, parallel an einen Spannungserzeuger. Messen Sie nacheinander die Spannungen am Spannungserzeuger und an jedem einzelnen Verbraucher (**Bild 1**) und vergleichen Sie die Messwerte miteinander.

Die Spannungen an den Verbrauchern und am Spannungserzeuger sind gleich groß ( $U = U_1 = U_2 = U_3$ ).

An parallel geschalteten Verbrauchern liegt dieselbe Spannung.

Durch die Parallelschaltung ist es möglich, gleichzeitig mehrere Verbraucher unabhängig voneinander an dieselbe Spannung anzuschließen. Daher schaltet man am Ortsnetz angeschlossene Verbraucher parallel.

**Versuch 2:** Schalten Sie drei parallel geschaltete Verbraucher, z. B. 3 Lampen 12 V/0,1 A, an einen Spannungserzeuger. Messen Sie nacheinander die Stromstärke in der Zuleitung und die Stromstärken der einzelnen Verbraucher (**Bild 2**). Vergleichen Sie die Ströme miteinander.

Die Stromstärken in den einzelnen Verbrauchern ergeben zusammen die Stromstärke in der Zuleitung.

Der Strom in der Zuleitung verzweigt sich auf die einzelnen Verbraucher. Man nennt die Ströme in den einzelnen Verbrauchern **Zweigströme** oder **Teilströme**.

Bei der Parallelschaltung ist der Gesamtstrom gleich der Summe der Teilströme (Zweigströme).

Punkte, an denen sich Ströme verzweigen, werden auch als **Knotenpunkte** (**Bild 2**) bezeichnet. An einem Knotenpunkt können mehrere Ströme zufließen (positiv gezählt) und mehrere Ströme abfließen (negativ gezählt). Es gilt dann die **Knotenpunktregel** (1. Kirchhoffsche Regel):

An jedem Knoten ist die Summe der zufließenden Ströme so groß wie die Summe der abfließenden Ströme.

**Versuch 3:** Schalten Sie zwei verschieden große Widerstände parallel, z. B. 47 Ω und 100 Ω. Schließen Sie diese Widerstände an einen Spannungserzeuger an. Messen Sie nacheinander die Teilströme und vergleichen Sie die Messwerte mit den Widerständen.

Durch den größeren Widerstand fließt der kleinere Strom und durch den kleineren Widerstand der größere.

An den Widerständen liegt bei Parallelschaltung dieselbe Spannung. Deshalb verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die zugehörigen Widerstandswerte.

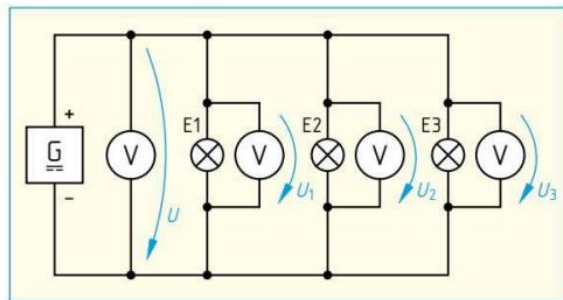


Bild 1: Parallelschaltung, Messen der Spannungen

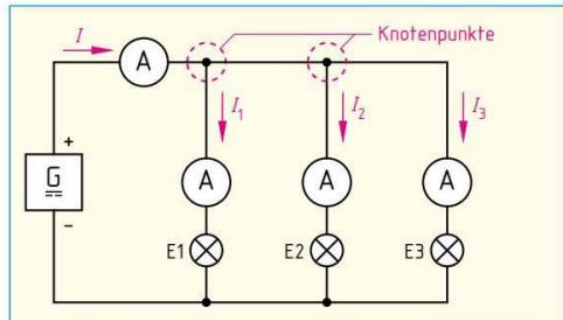


Bild 2: Parallelschaltung, Messen der Ströme

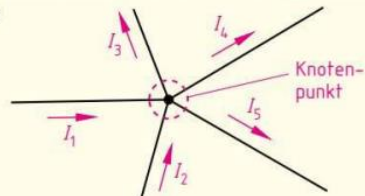
#### Gesamtstrom

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$I$  Gesamtstrom, Strom in der Zuleitung  
 $I_1, I_2, I_3$  Teilströme, Zweigströme

#### Knotenpunktregel (1. Kirchhoffsche Regel)

Beispiel:



$$\Sigma I = 0$$

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

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

$\Sigma I_{zu}$  Summe der zufließenden Ströme  
 $\Sigma I_{ab}$  Summe der abfließenden Ströme

#### Für 2 parallele Widerstände gilt:

$$U_1 = U_2 \quad I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

$I_1, I_2$  Zweigströme, Teilströme  
 $R_1, R_2$  Einzelwiderstände  
 $U_1, U_2$  Teilspannungen

Bei der Parallelschaltung verhalten sich die Stromstärken umgekehrt wie die zugehörigen Widerstandswerte. Der größere Strom fließt also durch den kleineren (niederohmigeren) Widerstand.

**Versuch 4:** Schließen Sie einen Verbraucher, z. B. eine Lampe, an ein Netzgerät mit gleich bleibender (stabilisierter) Ausgangsspannung an. Messen Sie den Strom in der Zuleitung und die Spannung am Verbraucher. Schalten Sie nacheinander einen zweiten und dritten Verbraucher parallel, z. B. Lampen, und beobachten Sie die Anzeige von Spannungs- und Strommesser.

Bei der Parallelschaltung weiterer Verbraucher nimmt die Stromstärke in der Zuleitung zu, während die Spannung an den Verbrauchern etwa gleich bleibt; der gesamte Widerstand der Parallelschaltung wird also kleiner.

Den gesamten Widerstand der Parallelschaltung nennt man auch **Ersatzwiderstand  $R$** . Er kann die Teilwiderstände ersetzen. Bei gleicher Spannung nimmt er den gleichen Strom auf wie die parallel geschalteten Einzelwiderstände zusammen.

Bei der Parallelschaltung ist der Ersatzwiderstand stets kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

Wie sich bei der Parallelschaltung die Zweigströme zum Gesamtstrom summieren, so summieren sich auch die **Einzelleitwerte** der einzelnen Zweige zum **Ersatzleitwert  $G$**  der Parallelschaltung. Durch Parallelschalten wird der Leitwert also größer.

Bei der Parallelschaltung ist der Ersatzleitwert gleich der Summe der Einzelleitwerte.

#### Beispiel 1:

Berechnen Sie den Ersatzwiderstand  $R$  für die beiden Widerstände (**Bild**) mithilfe a) der Einzelwiderstände und b) der Einzelleitwerte.

#### Lösung:

$$\text{a) } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{50 \Omega} + \frac{1}{100 \Omega} = 0,03 \frac{1}{\Omega} \Rightarrow R = 33,33 \Omega$$

$$\text{b) } G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{50 \Omega} = 20 \text{ mS}; \quad G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{100 \Omega} = 10 \text{ mS}$$

$$G = G_1 + G_2 = 20 \text{ mS} + 10 \text{ mS} = 30 \text{ mS} = 0,03 \text{ S}$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{0,03 \text{ S}} = 33,33 \Omega$$

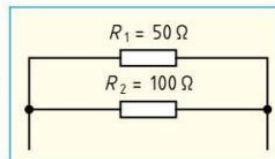


Bild: Parallelschaltung von zwei Widerständen

Bei zwei verschieden großen, parallel geschalteten Widerständen lässt sich die Formel zur Berechnung des Ersatzwiderstandes  $R$  vereinfachen:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \Rightarrow R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

#### Beispiel 2:

Berechnen Sie den Ersatzwiderstand aus **Beispiel 1** nach der Formel für zwei parallel geschaltete Widerstände.

#### Lösung:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{50 \Omega \cdot 100 \Omega}{50 \Omega + 100 \Omega} = 33,33 \Omega$$

Bei  $n$  gleich großen Widerständen ist der Ersatzwiderstand der Parallelschaltung gleich dem  $n$ -ten Teil eines Einzelwiderstandes, also  $R = \frac{R_1}{n}$ .

**Anwendung der Parallelschaltung.** Lampen, elektrische Haushaltsgeräte oder Elektromotoren werden für genormte Spannungen, z. B. 230 V, hergestellt. Sie werden daher parallel an das Netz geschaltet. Generatoren, Transformatoren und galvanische Elemente schaltet man parallel, wenn große Ströme geliefert werden sollen (**Seite 63**).

#### Ersatzwiderstand Ersatzleitwert

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

$R$	Ersatzwiderstand
$R_1, R_2, \dots$	Einzelwiderstände
$G$	Ersatzleitwert
$G_1, G_2, \dots$	Einzelleitwerte

#### Für 2 parallel geschaltete Widerstände gilt:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$$

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

#### Für $n$ gleiche parallel geschaltete Widerstände:

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

$R$	Ersatzwiderstand
$R_1$	Einzelwiderstand
$n$	Anzahl gleicher Widerstände

# 8 Messtechnik

## 8.1 Elektrische Messgeräte

In der Elektrotechnik und in der Elektronik kommt dem Messen eine besondere Bedeutung zu. Nur durch Messen kann der Zahlenwert einer Größe zweifelsfrei festgestellt werden. Das ist die Grundlage für die Fehlersuche z. B. an Geräten, Bauteilen, Baugruppen und Schaltungen oder bei der Inbetriebnahme einer elektrischen Anlage.

Ein **Messgerät (Bild)** besteht z. B. aus Anzeige, Messgrößenschalter, Funktionstasten, z. B. zur Messbereichswahl, Anschlussbuchsen und Messwerk. Die Messwerte werden vom Messgerät angezeigt oder aufgezeichnet.

Eine **Messeinrichtung** besteht aus einem oder mehreren Messgeräten mit zusätzlichen Einrichtungen. Zusätzliche Einrichtungen können z. B. eine Ableselupe, eine Monitoranzeige und Signalleitungen sein.

Der **Messbereich** eines Messgerätes, z. B. 300 V, ist der Bereich der Messwerte, in dem vorgegebene Fehlergrenzen, z. B.  $\pm 1\%$ , nicht überschritten werden.



**Bild: Messgerät mit Fachbezeichnungen**

Bedienungsanleitungen zu den Messgeräten

- Messtechnik-Normen (Auswahl)**
- DIN 1319-1 Grundlagen der Messtechnik
  - DIN EN 60051-1 Direkt wirkend anzeigende analoge elektrische Messgeräte und ihr Zubehör

### 8.1.1 Grundbegriffe der Messtechnik

Die Bestimmung physikalischer Größen wie z. B. Spannung, Stromstärke oder elektrischer Widerstand erfordert Geräte und Methoden, die in der Messtechnik zur Verfügung gestellt, beschrieben (**Tabelle**) und genormt werden.

**Tabelle: Grundbegriffe der Messtechnik**

<b>Messen</b>	Bestimmen des Zahlenwertes einer physikalischen Größe, z. B. einer Spannung ( <b>Bild a</b> ) oder einer Gewichtskraft, durch Messung.
<b>Zählen</b>	Ermitteln der Anzahl gleichartiger Ereignisse oder Dinge in einer bestimmten Zeit, z. B. Zahl der elektrischen Impulse in einer Sekunde.
<b>Prüfen</b>	Feststellen, ob der Prüfgegenstand vorgeschriebene Eigenschaften einhält, insbesondere ob die Eigenschaften in den vorgeschriebenen Fehlergrenzen liegen. So stellt man z. B. mit dem Durchgangsprüfer fest, ob die Lampe Durchgang hat ( <b>Bild b</b> ).
<b>Kalibrieren</b>	Ermitteln und Dokumentieren, wie sich der gemessene Wert vom wahren Wert einer Messgröße unterscheidet. Dabei darf kein Eingriff erfolgen, der das Messgerät verändern würde.
<b>Justieren</b>	Einstellen einer Messwertanzeige auf den richtigen Wert, z. B. bei der Widerstandsmessung auf den Nullpunkt des Messgerätes bei kurzgeschlossenen Messleitungen.
<b>Eichen</b>	Amtliche Bestätigung, dass die Messergebnisse eines Messgerätes die Eichfehlergrenze nicht überschreiten. Die Eichung erfolgt z. B. durch Landeseichämter oder staatlich anerkannte Prüfstellen unter fachlicher Aufsicht der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und wird durch ein Prüfsiegel am Gerät angezeigt. Sie ist in regelmäßigen zeitlichen Abständen zu wiederholen.



**b) Prüfen mit einem Durchgangsprüfer**

### 8.1.2 Anzeigarten von Messgeräten

Messgeräte werden in analog und digital anzeigende Messgeräte eingeteilt.

Bei **analogen**<sup>1</sup> Messanzeigen (**Bild 1 a**) folgt die Anzeige des Messwertes stetig der Eingangsgröße (Messgröße). Meist zeigt ein Zeiger oder eine Marke, die gleichmäßig über die Skala geführt wird, den Messwert an. Für sich ständig ändernde Messwerte, die z. B. in Messwerten beobachtet werden müssen, verwendet man wegen der Übersichtlichkeit meist Zeigermessgeräte (analoge Messgeräte).

**Digital**<sup>2</sup> anzeigende Messgeräte zeigen den Messwert in Ziffern an (**Bild 1 b**).

- Analog anzeigende Messgeräte sind Zeigermessgeräte und Oszilloskop.
- Digital anzeigende Messgeräte haben eine Ziffernanzeige.

Messwerte können für eine spätere Auswertung auch schriftlich aufgezeichnet werden, z. B. durch Y-t-Schreiber oder durch Drucker. Die Aufzeichnung kann sowohl analog in einem Kurvendiagramm als auch digital in einer Zahlenreihe erfolgen.

### 8.1.3 Analoge Messgeräte

**Analogmultimeter (Bild 2)** sind Zeiger-Vielfachmessgeräte. Sie werden zur Spannungs- und Strommessung bei Gleich- und Wechselstrom sowie zur Widerstandsmessung eingesetzt. Ein beweglicher Zeiger wird durch die Messgröße, z. B. die angelegte Spannung, ausgelenkt und zeigt im Skalenfeld für den mit dem Messbereichsschalter gewählten Messbereich den Messwert an. Durch eine Spiegelunterlegung wird ein falsches Ablesen, z. B. schräg von der Seite, der **Parallaxenfehler**<sup>3</sup>, vermieden. Der Messwert muss dann abgelesen werden, wenn der Zeiger und sein Spiegelbild genau deckungsgleich sind.

Das **Skalenfeld** beinhaltet wichtige Sinnbilder und Bezeichnungen (**Tabelle**):

- Einheit der Messgröße
- Genauigkeitsklasse
- Sinnbild des Messwerks
- Gebrauchslage
- Stromartenzeichen
- Prüfspannungszeichen

Damit das Messgerät nicht beschädigt wird oder die Schutzeinrichtung auslöst, ist vor Messbeginn der größte Messbereich der zu messenden elektrischen Größe einzustellen.

Beim Messen eines unbekanntes Messwertes ist aus Sicherheitsgründen zunächst der größte Messbereich der entsprechenden Messgröße, z. B. Spannung, einzustellen und dann auf den Messbereich zu schalten, bei dem die Anzeige möglichst im letzten Skalendrittel liegt.



Bild 1: Analoge und digitale Anzeigen



Bild 2: Analogmultimeter

Messwerke	Sinnbild	Gebrauchshinweis	Sinnbild
Drehspulmesswerk		senkrechte Gebrauchslage	
Drehspulmesswerk mit Gleichrichter		waagerechte Gebrauchslage	
Drehspul-Quotientenmesswerk		schräge Gebrauchslage, z. B. 60°	
Dreheisenmesswerk		Prüfspannung 500 V	
elektrodyn. Messwerk (eisengeschlossen)		Prüfspannung z. B. 2000 V	
Induktionsmesswerk		Achtung! Gebrauchsanweisung beachten	

<sup>1</sup> analog (griech.) = ähnlich, entsprechend

<sup>2</sup> von digitus (lat.) = Finger

<sup>3</sup> von parallaxis (griech.) = Abweichung

### 8.1.3.1 Messfehler von analogen Messgeräten

Messfehler sind in der Praxis unvermeidbar. Um ein Messergebnis bewerten zu können, müssen deshalb Messwert und Messfehler angegeben werden.

#### Messfehler können sein:

- **Persönliche Fehler.** Durch z.B. ungenaues oder fehlerhaftes Ablesen (Parallaxenfehler).
- **Einflussfehler.** Durch Abweichen von z.B. der Nenntemperatur oder der Nennfrequenz.
- **Systematische Fehler.** Durch die Messschaltung, z.B. Verwendung der Stromfehler- anstelle der Spannungsfehlerschaltung (**Seite 59**).
- **Anzeigefehler.** Durch die Konstruktion, z.B. Lagerreibung, ungenaue Skalenausführung oder durch Fertigungstoleranzen des Messgeräts.

Persönliche Fehler und systematische Fehler werden in der Fehlerrechnung nicht berücksichtigt, weil sie vermeidbar sind.

Einflussfehler werden nur dann berücksichtigt, wenn die Betriebsbedingungen für das Messgerät nicht eingehalten werden können.

Für die Fehlerrechnung wird meist nur der Anzeigefehler verwendet. Der Anzeigefehler wird auch zulässiger **absoluter Fehler**  $F$  genannt und durch die **Genauigkeitsklasse**  $k$  bestimmt. Bei z.B.  $k=1,5$  darf der wahre Wert um maximal  $\pm 1,5\%$  des Messbereichsendwertes  $E$  vom angezeigten Messwert  $M$  abweichen. Die Genauigkeitsklasse (Güteklasse) wird vom Hersteller angegeben (**Tabelle und Beispiel**).

Die Genauigkeitsklasse  $k$  gibt den höchst zulässigen Fehler in Prozent (Anzeigefehler) vom Messbereichsendwert  $E$  an.

Der zulässige absolute Fehler  $F$  ist für jeden Messwert im Messbereich gleich. Setzt man den absoluten Fehler  $F$  ins Verhältnis zum Messwert  $M$ , so erhält man den **relativen Fehler**  $f$  für ein Messergebnis. Aus  $M$  und  $F$  kann die zulässige Obergrenze  $w_o$  und die zulässige Untergrenze  $w_u$  des wahren Wertes berechnet werden.

- i**
- Absoluter Fehler  $F = \frac{\text{Genauigkeitsklasse } k \cdot \text{Messbereichsendwert } E}{100}$
  - Relativer Fehler  $f = \frac{\text{Absoluter Fehler } F}{\text{Messwert } M} \cdot 100\%$

Der relative Fehler  $f$  ist bei einer Anzeige in der Mitte der Skala doppelt so groß wie am Skalende.

Der Messbereich ist möglichst so zu wählen, dass der Zeiger im letzten Drittel der Skala anzeigt. Dadurch bleibt der relative Messfehler klein.

**Tabelle: Genauigkeitsklassen elektrischer Messgeräte**

Feinmessgeräte				
Genauigkeitsklasse $k$	0,1	0,2	0,5	
Anzeigefehler in % vom Messbereichsendwert	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,5\%$	
Betriebsmessgeräte				
Genauigkeitsklasse $k$	1	1,5	2,5	5
Anzeigefehler in % vom Messbereichsendwert	$\pm 1\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 2,5\%$	$\pm 5\%$

#### Fehlerrechnung

$$F = \frac{k \cdot E}{100}$$

$F$  zulässiger absoluter Fehler, Messunsicherheit (Betrag)  
 $k$  Genauigkeitsklasse  
 $E$  Messbereichsendwert

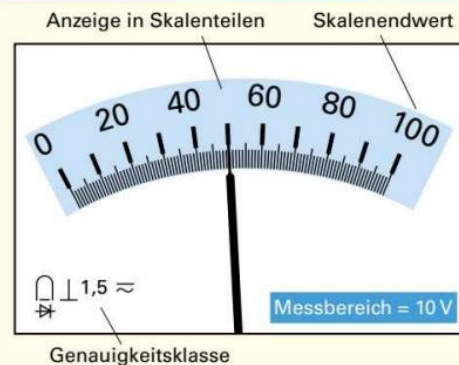
$$f = \frac{F \cdot 100\%}{M}$$

$f$  relativer, prozentualer Fehler (Betrag)  
 $M$  Messwert

$$w_u = M - F$$

$$w_o = M + F$$

$w_u$  zulässige Untergrenze des wahren Wertes  
 $w_o$  zulässige Obergrenze des wahren Wertes



#### Beispiel:

Berechnen Sie für das Messgerät mit dieser Messwertanzeige **a**) die Skalenkonstante, **b**) den Messwert  $M$ , **c**) den absoluten Fehler  $F$ , **d**) den relativen Fehler  $f$ , **e**) die Obergrenze  $w_o$  und **f**) die Untergrenze  $w_u$  des wahren Wertes.

#### Lösung:

**a) Skalenkonstante**  $= \frac{\text{Messbereich}}{\text{Skalenteile}} = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ Skt}} = 0,1 \frac{\text{V}}{\text{Skt}}$

**b)  $M$**   $= \text{Anzeige in Skalenteilen} \cdot \text{Skalenkonstante} = 50 \text{ Skt} \cdot 0,1 \frac{\text{V}}{\text{Skt}} = 5 \text{ V}$

**c)  $F$**   $= \frac{k \cdot E}{100} = \frac{1,5 \cdot 10 \text{ V}}{100} = 0,15 \text{ V}$


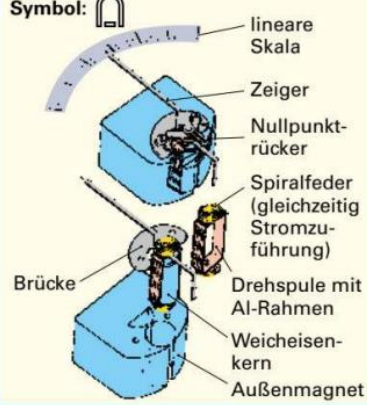

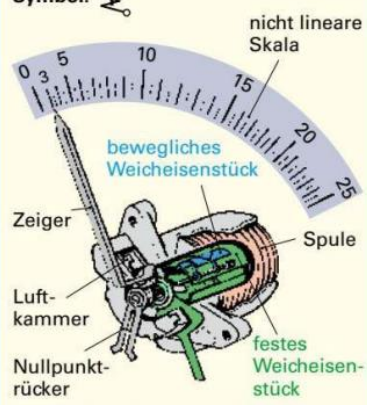

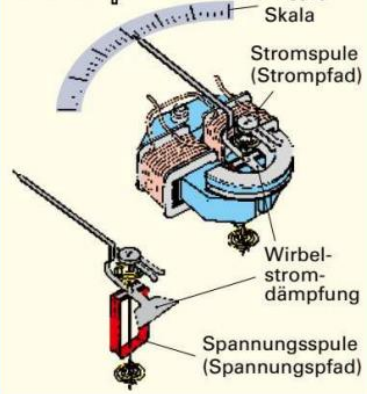
**d)  $f$**   $= \frac{F \cdot 100\%}{M} = \frac{0,15 \text{ V} \cdot 100\%}{5 \text{ V}} = 3\%$

**e)  $w_o$**   $= M + F = 5 \text{ V} + 0,15 \text{ V} = 5,15 \text{ V}$

**f)  $w_u$**   $= M - F = 5 \text{ V} - 0,15 \text{ V} = 4,85 \text{ V}$

### 8.1.3.2 Elektrische Messwerke

Die aktiven Teile eines Zeigermessgerätes erzeugen ein Drehmoment. Sie werden als Messwerk bezeichnet. Zum Messwerk gehören auch Zeiger und Skala. Messwerke unterscheiden sich nach ihrem Aufbau und durch ihre Eigenschaften (Tabelle).

Tabelle: Messwerke für Zeigermessgeräte		
Darstellung	Aufbau und Funktion	Eigenschaften
<b>Drehspulmesswerk</b>		
<p>Symbol: </p>  <p>lineare Skala Zeiger Nullpunkt-rücker Spiralfeder (gleichzeitig Stromzuführung) Brücke Drehspule mit Al-Rahmen Weicheisenkern Außenmagnet</p>	<p>Im Feld eines Dauermagneten (Außenmagnet) ist eine Spule drehbar gelagert. Fließt ein Messstrom durch die Drehspule, wird ein Spulenmagnetfeld erzeugt, das ein Drehmoment auf die Spule bewirkt. Der Zeiger dreht sich mit der Spule und zeigt den Messwert auf der linearen Skala an. Eine Wirbelstromdämpfung verhindert ein starkes Pendeln des Zeigers. Die Drehspule ist auf einen Aluminiumrahmen gewickelt. Beim Ausschlag des Zeigers werden im Aluminiumrahmen Wirbelströme erzeugt, die den Zeigerausschlag dämpfen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zur Messung von Gleichspannung und Gleichstrom geeignet</li> <li>• Sehr hohe Empfindlichkeit</li> <li>• Hohe Genauigkeit</li> <li>• Geringer Eigenverbrauch (1 <math>\mu\text{W}</math> bis 100 <math>\mu\text{W}</math>)</li> <li>• Lineare, d.h. gleichmäßig geteilte Skala</li> <li>• Messung von sinusförmigen Wechselstromgrößen durch Vorschalten eines Gleichrichters möglich</li> <li>• Bei Mischspannungen wird der arithmetische Mittelwert (<b>Seite 133</b>) angezeigt</li> <li>• Der Nullpunkt kann auch in der Skalenmitte liegen</li> </ul>
<b>Dreheisenmesswerk</b>		
<p>Symbol: </p>  <p>nicht lineare Skala bewegliches Weicheisenstück Zeiger Luftkammer Nullpunkt-rücker Spule festes Weicheisenstück</p>	<p>Im Inneren einer Spule sind ein festes und ein an der Zeigerachse befestigtes bewegliches Weicheisenplättchen angeordnet. Fließt ein Messstrom durch die Spule, entsteht in der Spule ein Magnetfeld, das die beiden Weicheisenstücke gleichsinnig magnetisiert. Sie stoßen sich ab. Das entstehende Drehmoment ist ein Maß für den Messwert. Der Zeigerausschlag wird in einer Luftkammer gedämpft.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfacher, betriebssicherer Aufbau</li> <li>• Für Gleich- und Wechselstrom geeignet</li> <li>• Unempfindlich gegen magnetische Fremdfelder</li> <li>• Bei der Messung von Mischspannungen oder -strömen wird stets der Effektivwert angezeigt</li> <li>• Nicht geeignet zur Messung von Strömen unter 20 mA und Spannungen unter 6 V</li> <li>• Verhältnismäßig hoher Eigenverbrauch (0,5 bis 1 VA)</li> <li>• Die Genauigkeitsklasse beträgt bei Gleich- und Wechselstrom 1,5 bis 2,5</li> <li>• Nichtlineare Skalenteilung</li> <li>• Nur bis etwa 400 Hz verwendbar</li> </ul>
<b>Elektrodynamisches Messwerk</b>		
<p>Symbol: </p>  <p>lineare Skala Stromspule (Strompfad) Wirbelstromdämpfung Spannungsspule (Spannungspfad)</p>	<p>Das <b>elektrodynamische Messwerk</b> gleicht im Aufbau dem Drehspulmesswerk. An Stelle des Dauermagneten beim Drehspulmesswerk hat das elektrodynamische Messwerk einen Elektromagneten. Das Messwerk besteht aus zwei Spulen, einer Stromspule, in deren Feld sich eine drehbar angeordnete Spannungsspule befindet. Die Stromspule bildet den <b>Strompfad</b> und die Spannungsspule den <b>Spannungspfad</b>. Fließt Strom durch die beiden Spulen, so wirkt auf die Drehspule ein Drehmoment, das sowohl der Spannung an der Drehspule als auch dem Strom durch die Stromspule proportional ist.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eigenverbrauch 1 bis 3 W</li> <li>• Genauigkeitsklassen: 0,1 für eisenlose und 1,5 für eisengeschlossene elektrodynamische Messwerke</li> <li>• Für Gleich- und Wechselstrom geeignet</li> <li>• Es wird das Produkt aus Spannung, Strom und Wirkfaktor (<math>P = U \cdot I \cdot \cos \varphi</math>) gemessen</li> <li>• Anwendung als Wirkleistungsmesser (<b>Seite 178</b>)</li> <li>• Kaum Genauigkeitsverluste durch Alterung, weil das Messwerk keine Dauermagnete enthält</li> </ul>

### 8.1.4 Digitale Messgeräte

Digitale Messgeräte setzen die analoge Messgröße in einen digitalen Wert um, der meist durch Ziffern angezeigt wird (**Bild 1**).

Digitale Messgeräte (Digitalmultimeter) enthalten:

- einen Analog-Digital-Umsetzer (AD-Umsetzer),
- ein Display (Anzeigeeinheit),
- eine Stromversorgung (Netzteil oder Batterie),
- einen Messverstärker mit hohem Eingangswiderstand, z. B. 10 MΩ.

Der AD-Umsetzer (**Bild 2**) verarbeitet nur Spannung. Für die Messung von Strömen und Widerständen sind deshalb Messwertumformer notwendig. Als Messwertumformer für die Strommessung dienen Präzisionswiderstände, durch die der Messstrom fließt. Für die Widerstandsmessung ist eine Konstantstromquelle vorhanden, die an dem zu messenden Widerstand einen Spannungsfall erzeugt.

Analog-Digital-Umsetzer: **Seite 241**

**Anzeigen:** Die Ziffern 0 bis 9 werden z. B. mit 7-Segment- oder 14-Segment-Anzeigen dargestellt (**Bild 3a und 3b**). Durch Punktmatrixanzeigen, z. B. mit 5 × 7 Punkten, lassen sich neben Ziffern auch Buchstaben und Symbole, z. B. Ω (für Ohm, **Bild 3c**) darstellen. Der **Anzeigeumfang** gibt an, wie viele Werte die Anzeige darstellen kann. Für den Anzeigeumfang wird häufig eine Stellenzahl-Bezeichnung angegeben (**Tabelle**).

**Tabelle: Anzeigeumfang und Stellenzahl (Beispiele)**

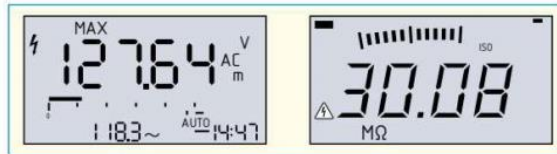
Anzeige	Anzeigeumfang	Stellenzahl
1. Stelle: 0 oder 1	–	1/2
1. Stelle: 0, 1, 2 oder 3	–	3/4
000 bis 999	1000	3
0000 bis 1999	2000	3 1/2
0000 bis 3999	4000	3 3/4
00000 bis 39999	40000	4 3/4

**Auflösung.** Sie ist ein wichtiges Merkmal der Anzeige und gibt an, welche kleinste Messgröße, z. B. 1 mV, innerhalb eines bestimmten Messbereichs noch angezeigt werden kann (**Beispiel 1**).

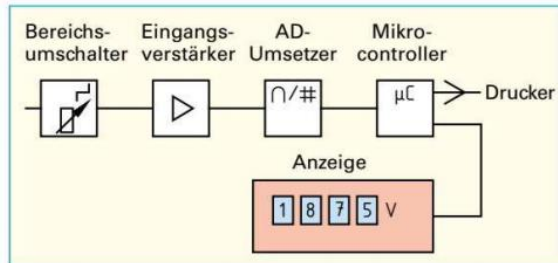
#### Messfehler von digitalen Messgeräten

$$F = \frac{k \cdot M}{100} + z \cdot l \quad w_u = M - F \quad w_o = M + F$$

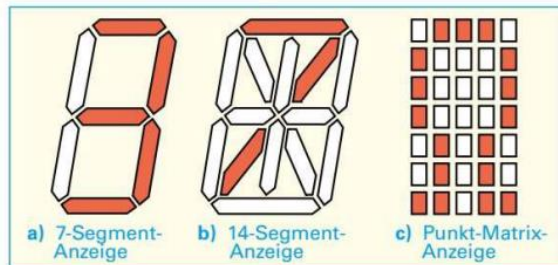
<i>F</i>	zulässiger absoluter Fehler, Messunsicherheit (Betrag)
<i>M</i>	Messwert, angezeigter Wert
<i>k</i>	prozentualer Anteil der Messunsicherheit
<i>z</i>	konstanter Anteil der Messunsicherheit in Digit
<i>l</i>	Auflösung der Digitalanzeige
<i>w<sub>u</sub></i> , <i>w<sub>o</sub></i>	zulässige Unter-/Obergrenze des wahren Wertes



**Bild 1: Beispiele digitaler Ziffernanzeigen**



**Bild 2: Prinzipschaltung eines Digitalmultimeters**



**Bild 3: Anzeigen digitaler Messgeräte**

#### Genauigkeit

Die Messgenauigkeit von Digitalmultimetern wird immer auf den Messwert bezogen und als Messunsicherheit (Messfehler) mit einem prozentualen und einem konstanten Anteil angegeben, z. B. ± (0,5 % v. M.<sup>1</sup> + 3 Digit).

#### Beispiel 1:

Welche Auflösung ist bei einer 3<sup>3/4</sup>-stelligen Anzeige im 3-V-Messbereich (Anzeige: 0000...2,999 V) vorhanden (**Bild, Seite 169**)?

#### Lösung:

$$\text{Auflösung} = \frac{\text{Messbereich}}{\text{Anzeigeumfang}} = \frac{3 \text{ V}}{3000} = 0,001 \text{ V} = 1 \text{ mV}$$

#### Beispiel 2:

Ein Digitalmultimeter mit 3<sup>3/4</sup>-stelliger Anzeige zeigt eine Spannung von DC 2,689 V an (**Bild, Seite 169**). Die Messunsicherheit wird mit ± (0,5 % v. M. + 3 Digit) angegeben. Wie groß ist **a)** der zulässige absolute Fehler *F* und **b)** in welchem Bereich muss der wahre Wert liegen?

#### Lösung:

**a) aus Beispiel 1:** Auflösung *l* = 0,001 V

$$F = \frac{k \cdot M}{100} + z \cdot l = \frac{0,5 \cdot 2,689 \text{ V}}{100} + 3 \cdot 0,001 \text{ V} = 0,016 \text{ V}$$

**b)** Der wahre Wert muss zwischen

$$w_u = M - F = 2,689 \text{ V} - 0,016 \text{ V} = 2,673 \text{ V} \text{ und}$$

$$w_o = M + F = 2,689 \text{ V} + 0,016 \text{ V} = 2,705 \text{ V} \text{ liegen.}$$

<sup>1</sup> v. M. = vom Messwert

**Fachbegriffe zum Digitalmultimeter:**

**Digitalmultimeter.** Multimeter sind zur Messung mehrerer elektrischer Größen geeignet (**Bild**).

**Range<sup>1</sup>:** Manuelle Messbereichseinstellung.

**AC-Bandbreite:** Der Frequenzbereich, über den Wechselspannungsmessungen möglich sind und der Messfehler in vorgegebenen Grenzen bleibt.

**Analoge Balkengrafik:** Eine Displayanzeige für sich schnell ändernde oder instabile Signale.

**Automatische Buchsensperre:** Abhängig von der eingestellten Messung, z.B. Spannungsmessung, sperren mechanische Verriegelungen die nicht benötigten Anschlussbuchsen, z.B. für Strommessung (**Bild**).

**Automatische Bereichsumschaltung:** Das Multimeter wählt automatisch den Messbereich mit der größten Genauigkeit für die Messaufgabe.

**Automatische Messwertspeicherung (DATA-Hold<sup>2</sup>):** Messwert wird erfasst und auf dem Display festgehalten. Ein akustisches Signal zeigt die Speicherung an.

**Akustische Durchgangsprüfung:** Die Prüfung des Durchgangs wird sowohl am Display als auch akustisch angezeigt.

**Crestfaktor<sup>3</sup>  $F_c$ :** Gibt an, bis zu welchem Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert (= Scheitelfaktor) der echte Effektivwert der Messgröße richtig angezeigt wird (**Tabelle**).

**true RMS, TRMS<sup>4</sup>:** Echter Effektivwert wird angezeigt, wenn der Scheitelfaktor (Scheitelwert/Effektivwert) der Messgröße kleiner ist als der Crestfaktor des Gerätes.

**Diodentest:** Bei einwandfrei funktionierenden Dioden muss in Durchlassrichtung ein Spannungsfall von 0,6 bis 0,7 V angezeigt werden.

**Relativer Bezugswert:** Ein Messwert wird gespeichert und die Differenz zwischen diesem Wert und den folgenden Messwerten angezeigt.

**MIN/MAX:** Das Messgerät erfasst und speichert automatisch den höchsten und den niedrigsten Messwert.

**Auto-Power-Off:** Das Gerät schaltet sich ab, wenn es z.B. 10 Minuten lang nicht benutzt wird.

**Tastverhältnis:** Gibt bei einem Impulssignal das Verhältnis von Pulsbreite zur Periodendauer in Prozent an.

**Input Alert<sup>5</sup>:** Gibt ein akustisches Warnsignal, wenn die Messleitungen z.B. in die Strom-Eingangsbuchsen gesteckt werden, der Messgrößenschalter aber nicht auf Strommessung steht.

**Serielle Schnittstelle:** Anschlussmöglichkeit für einen Computer zur Messwertverarbeitung.



**Technische Kennwerte (Auswahl)**

<b>Messfunktionen:</b>		
Spannung	10 $\mu$ V	... 1000 V
Strom	10 nA	... 10 A (16 A)
Widerstand	0,01 $\Omega$	... 40 M $\Omega$
Frequenz	0,001 Hz	... 1 MHz
Temperatur	-250 $^{\circ}$ C	... +1372 $^{\circ}$ C
<b>AC-Bandbreite:</b>	100 kHz	
<b>Zulässiger Crestfaktor:</b>	5	
<b>Eingangsimpedanz:</b>	$\geq$ 9 M $\Omega$	
<b>Messstrom bei <math>\Omega</math>-Messung:</b>	max. 250 $\mu$ A	
<b>Anzeigeumfang:</b>	60.000 Digits (00000 ... 59999)	
<b>Messunsicherheit:</b>	$\pm$ (0,05% v.M. + 3 Digit) bei V DC	

**Bild: Digitalmultimeter**

**Effektivwertmessung nicht sinusförmiger Größen: Seite 181**

**Tabelle: Crestfaktor\* und Signalform (Beispiele)**

Signalform			
Crestfaktor	$F_c = \sqrt{2}$	$F_c = \sqrt{2}$	$F_c > \sqrt{2}$

\* Weitere Crestfaktoren: **Seite 133**

Crestfaktor	
$F_c = \frac{\hat{u}}{U}$	$F_c$ Crestfaktor $\hat{u}$ Scheitelwert $U$ Effektivwert

**Beispiel:**

Eine Phasenanschnittsteuerung hat einen Scheitelwert  $\hat{u} = 325$  V und einen Effektivwert  $U = 65$  V. Welchen Crestfaktor muss das zu verwendende Messgerät haben, damit der Effektivwert richtig angezeigt wird?

**Lösung:**

$F_c = \frac{\hat{u}}{U} = \frac{325 \text{ V}}{65 \text{ V}} = 5 \Rightarrow$  Das Messgerät muss den Crestfaktor  $F_c \geq 5$  haben.

<sup>1</sup> range (engl.) = Bereich  
<sup>2</sup> to hold (engl.) = halten  
<sup>3</sup> crest (engl.) = Gipfel

<sup>4</sup> True Root Mean Square (engl.) = wahrer quadratischer Mittelwert = echter Effektivwert  
<sup>5</sup> Input Alert (engl.) = Warnsignal bei falsch gewähltem Eingang

## 8.2 Praktisches Messen

### 8.2.1 Messen von Leistungen

Mit elektrodynamischen Messwerken (**Seite 172**) kann mit einer einfachen Schaltung (**Bild 1**) eine Leistungsmessung durchgeführt werden.

Elektrodynamische Messwerke eignen sich zur Wirkleistungsmessung.

**Wirkleistungsmessung.** Dazu wird ein elektrodynamisches Messwerk (**Bild 2**) verwendet. Der **Strompfad** wird in den Außenleiter und der **Spannungspfad** zwischen L und N geschaltet (**Bild 1**).

#### Beispiel:

Die Wirkleistung eines Einphasen-Wechselstrommotors (aufgenommene Leistung  $P = 150 \text{ W}$ ,  $\cos \varphi = 0,72$ ) soll mit dem Wirkleistungsmessgerät nach **Bild 2** gemessen werden.

- Welche Messart muss mit dem Messartenschalter eingestellt werden?
- Wie groß ist der Strom im Messgerät bei Netzspannung  $U = 230 \text{ V AC}$ ?
- Auf welchen Wert sind jeweils Strom- und Spannungsbereichsschalter einzustellen?
- Welcher Messbereichsendwert  $E$  ergibt sich?
- Welche Auswirkung hätte die Einstellung des Strombereichsschalters auf  $0,25 \text{ A}$ ?

#### Lösung:

- Leistungsmessung für Gleich- oder Wechselstrom
- $I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} = \frac{150 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 0,72} \approx 0,9 \text{ A}$
- Strombereich: **1 A**; Spannungsbereich: **250 V**
- $E = U \cdot I = 250 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 250 \text{ W}$
- Überlastung des Strompfades! (Zerstörung Messgerät)

Spannungs- und Strompfad nicht überlasten!

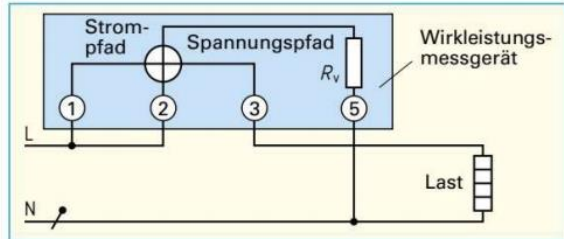
**Blindleistungsmessung.** Ein elektrodynamisches Messwerk kann zur Messung der Blindleistung verwendet werden, wenn in den Spannungspfad eine Induktivität (Drosselspule) geschaltet wird. Der Messstrom im Spannungspfad wird dadurch um  $90^\circ$  phasenverschoben. Der induktive Stromanteil in der Stromspule und der Strom in der Spannungsspule sind phasengleich. Gemessen und angezeigt wird deshalb der Blindleistungsanteil.

### 8.2.2 Messen von Widerständen

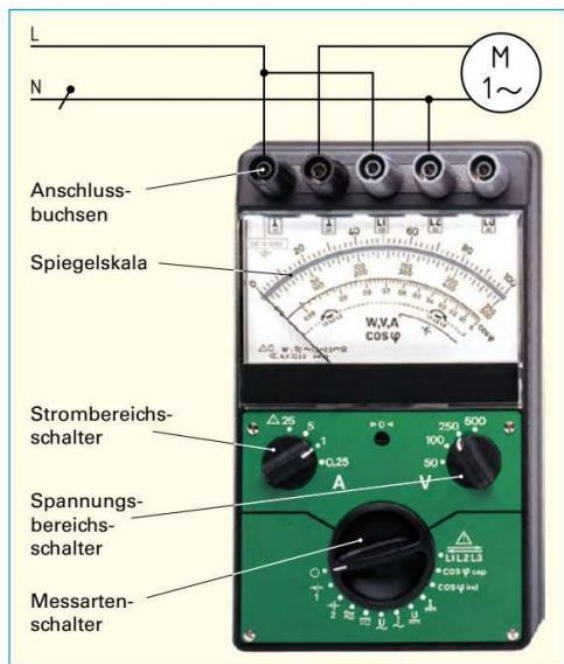
Elektrische Widerstände lassen sich durch verschiedene Verfahren (**Bild 3**) messen. Der Widerstandswert lässt sich bei direkter Messung mit einem Widerstandsmesser ermitteln. Weil das Messgerät dabei mit einem eigenen Prüfstrom arbeitet, muss der betroffene Stromkreis spannungsfrei geschaltet und aufgetrennt werden. Eine weitere Möglichkeit zur direkten Widerstandsbestimmung sind **Messbrücken** (**Seite 57**).

Der Widerstandswert lässt sich auch indirekt durch eine Strom- und Spannungsmessung (**Seite 59**) bestimmen.

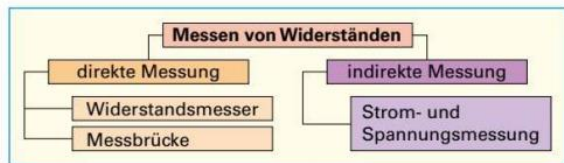
- Messen von Spannungen: **Seite 30**
- Messen von Strömen: **Seite 32**
- Messen elektrischer Leistung: **Seite 45**
- Messen mit dem Oszilloskop: **Seite 185**



**Bild 1:** Wirkleistungsmessung für Einphasenwechselstrom



**Bild 2:** Wirkleistungsmessgerät



**Bild 3:** Verfahren zur Widerstandsmessung

#### Übersicht: Messbrücken

**Gleichstrom-Brücken**  
für Wirkwiderstände

- Wheatstone-Brücke<sup>1</sup>
- Thomson-Brücke<sup>2</sup>

**Wechselstrom-Brücken**  
für Blindwiderstände

- Wien-Brücke<sup>3</sup>
- Maxwell-Brücke<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Charles Wheatstone, engl. Physiker, 1802 bis 1875

<sup>2</sup> William Thomson, engl. Physiker, 1824 bis 1907

<sup>3</sup> Wilhelm Wien, deutscher Physiker, 1864 bis 1928

<sup>4</sup> James Clerk Maxwell, engl. Physiker, 1831 bis 1879

### 8.2.3 Messen mit Strommesszangen

Mit Strommesszangen (**Bild**) können Strommessungen durchgeführt werden, ohne den Stromkreis aufzutrennen.

#### Messen von Wechselströmen

Der Wechselstrom in einem elektrischen Leiter erzeugt ein elektromagnetisches Feld um den Leiter, das zur Messung des Stromes genutzt wird. Der **Messkopf** bildet einen Stromwandler, der aus einem geschlossenen Eisenkern mit Spule besteht. Das elektromagnetische Feld des vom Messkopf umschlossenen Leiters induziert in der Spule eine Spannung, die proportional zur Stromstärke ist.

Strommesszangen mit Stromwandler können nur zur Wechselstrommessung verwendet werden.

#### Messen von Gleichströmen

Weil Gleichstrom in Stromwandlern keine Spannung induziert, können Gleichströme nur von Strommesszangen mit eingebautem **Hallgenerator** erfasst werden. Sie eignen sich

- zur Gleichstrommessung,
- zur Wechselstrommessung,
- zur Messung des Echt-Effektivwertes (TRMS bzw. true RMS, **Seite 174** und **Seite 181**).

#### Messen des Leckstromes

Ist in den Adern eines Stromkreises die Summe der zu- und abfließenden Ströme ungleich null, dann fließt ein Leckstrom. Dieser Leckstrom, z. B. 8 mA, wird von einer Strommesszange mit empfindlichem Strommessbereich, deren Messkopf um alle Adern der Leitung gelegt wird, angezeigt.

**i** Beim Prüfen elektrischer Geräte kann der Schutzleiterstrom mithilfe einer Leckstrommessung (**Bild 3, Seite 416**) bestimmt werden.

### 8.2.4 Messkategorien

Je näher eine Messung an der Quelle der Niederspannungsinstallation durchgeführt wird, desto mehr können z. B. Überspannungen Personen gefährden, die sich mit dem Messgerät am Netz befinden. Ein Stromversorgungssystem wird nach der Norm DIN EN 61010-1 in die Messkategorien CAT I bis CAT IV eingeteilt (**Tabelle**). Die Messkategorien geben Aufschluss, bis zu welchem Anwendungsbereich ein Messgerät gefahrlos eingesetzt werden kann. Beispielsweise bedeutet die Angabe 600 V CAT IV auf einem Messgerät, dass jeder Messbereich für eine maximale Bemessungsspannung 600 V in Kategorie IV ausgelegt ist. Mit diesem Messgerät darf z. B. an primären Überstrom-Schutzeinrichtungen, aber z. B. auch an Steckdosen für große Lasten (CAT III) gemessen bzw. geprüft werden.



**Bild: Strommesszange**

- Hallgenerator: **Seite 201**
- Prüfen elektrischer Geräte: **Seite 415**
- Stromwandler: **Seite 474**

Tabelle: Messkategorien (nach DIN EN 61010-1)	
	<b>CAT IV (höchste Kategorie)</b> Messungen an der Quelle der Niederspannungsinstallation, z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leitungen und Kabel im Freien als Zuführung zum Gebäude</li> <li>• Hausanschluss</li> <li>• Zähler</li> <li>• Primärer Überstromschutz</li> </ul>
	<b>CAT III</b> Messungen in der Gebäudeinstallation, z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geräte in Festinstallationen, z. B. Schaltgeräte, mehrphasige Motoren und stationäre Verbraucher</li> <li>• Verteileranschluss</li> <li>• Steckdosen für große Lasten</li> </ul>
	<b>CAT II</b> Messungen an Stromkreisen, die elektrisch direkt mit dem Niederspannungsnetz verbunden sind, z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steckdosen mehr als 10 m von CAT-III-Quelle oder mehr als 20 m von CAT-IV-Quelle entfernt</li> <li>• Geräte mit Verbindung zu Steckdosen, z. B. in Büro und Haushalt</li> </ul>
	<b>CAT I (niedrigste Kategorie)</b> Messungen an Stromkreisen, die nicht direkt mit dem Netz verbunden sind, z. B. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschützte Elektronikbaugruppen</li> <li>• Batteriebetriebene Geräte</li> <li>• Batterien</li> <li>• Kfz-Elektroanlagen</li> </ul>


**Situationsbeschreibung:**

Messungen in elektrischen Anlagen, an Elektrogeräten und an elektronischen Schaltungen gehören zu den täglichen Aufgaben einer Elektrofachkraft. Für grundlegende Messungen mit einem Digitalmultimeter soll die praktische Durchführung unter Beachtung der Sicherheitsaspekte beschrieben werden.

**i** Messgeräte und Zusatzeinrichtungen müssen so gehandhabt werden, dass keine Gefahren für Elektrofachkräfte, andere Personen oder Messgeräte auftreten. Arbeits- und Unfallschutz sind zu beachten (**Seiten 15 und 350**).

Prinzipielle Messschaltung und Anschluss des Digitalmultimeters	Durchführung der Messung	Sicherheits- und Gebrauchshinweise
<b>Gleich- und Wechselspannungsmessung</b>		
<p>Lampenspannung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messfunktionsschalter für Gleichspannungsmessung auf <b>V-DC</b> (Symbol: V<math>\overline{-}</math>) oder für Wechselspannungsmessung auf <b>V-AC</b> (Symbol: V<math>\sim</math>) stellen.</li> <li>Roten Messleitungsstecker in die <b>V</b>-Buchse und schwarzen Messleitungsstecker in die <b>COM</b><sup>1</sup>-Buchse (Symbol: <math>\perp</math>) stecken.</li> <li>Messgerät parallel zum Messobjekt schalten. Bei DC-Messung Polarität (rot: Plus, schwarz: Minus) beachten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messschaltung spannungsfrei aufbauen.</li> <li>Messleitungen auf evtl. Beschädigungen überprüfen und auf Berührungsschutz achten.</li> <li>Bei manueller Messbereichswahl zunächst den höchsten Messbereich einstellen, dann Messbereich anpassen.</li> </ul>
<b>Gleich- und Wechselstrommessung</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messfunktionsschalter für Strommessung nach erwarteter Stromstärke auf <b>A</b>, <b>mA</b> oder <b><math>\mu</math>A</b> stellen. Bei manchen Messgeräten muss zusätzlich DC oder AC ausgewählt werden.</li> <li>Roten Messleitungsstecker in die entsprechende Strombuchse (z. B. <b>mA</b>) und den schwarzen Messleitungsstecker in die <b>COM</b>-Buchse (Symbol: <math>\perp</math>) stecken.</li> <li>Stromkreis des Messobjektes auftrennen und Messgerät in Reihe zum Messobjekt schalten. Bei DC-Messung Polarität (rot: Plus, schwarz: Minus) beachten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Achtung:</b> Vor dem Auftrennen des Stromkreises ist das Messobjekt unbedingt spannungsfrei zu schalten!</li> <li>Die Spannung des Messstromkreises darf erst wieder eingeschaltet werden, wenn eine sichere Verbindung der Reihenschaltung von Messgerät und Messobjekt besteht!</li> </ul>
<b>Widerstandsmessung</b>		
<p>Motorwicklungswiderstand</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messfunktionsschalter für Widerstandsmessung auf <math>\Omega</math> stellen.</li> <li>Roten Messleitungsstecker in die <math>\Omega</math>-Buchse und schwarzen Messleitungsstecker in die <b>COM</b>-Buchse (Symbol: <math>\perp</math>) stecken.</li> <li>Messgerät parallel zum Messobjekt, z. B. Drahtwiderstand, Heizleiter oder Motorwicklung, schalten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vor dem Messleitungsanschluss ist das Messobjekt spannungsfrei zu schalten und während der Messung spannungsfrei zu halten.</li> <li>Elektronische Bauteile im ausgebauten Zustand messen.</li> </ul>
<b>Durchgangsprüfung</b>		
<p>Geräteanschlussleitung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messfunktionsschalter auf Durchgangsprüfung stellen. Meistens ist dafür ein Symbol abgebildet, z. B. <math>\rightarrow</math>. Manchmal muss z. B. auf <math>\Omega</math> oder <math>\rightarrow</math> gestellt und anschließend die Durchgangsprüfung mit der Funktionstaste ausgewählt werden.</li> <li>Roten Messleitungsstecker in die Buchse <b>V/<math>\Omega</math>/<math>\rightarrow</math></b> und schwarzen Messleitungsstecker in die <b>COM</b>-Buchse (Symbol: <math>\perp</math>) stecken.</li> <li>Messgerät parallel zum Messobjekt, z. B. Leiter oder Leiterverbindung, schalten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vor dem Messleitungsanschluss ist das Messobjekt spannungsfrei zu schalten und während der Messung spannungsfrei zu halten.</li> <li>Bei einem ausreichend kleinen Durchgangswiderstand, z. B. kleiner als 35 <math>\Omega</math>, ertönt ein akustisches Signal.</li> </ul>
<b>Diodentest</b>		
<p>Halbleiterdiode in Durchlassrichtung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messfunktionsschalter für den Diodentest auf das Symbol <math>\rightarrow</math> stellen. Bei manchen Messgeräten muss auf das Symbol <math>\Omega</math> gestellt und anschließend der Diodentest mit der Funktionstaste ausgewählt werden.</li> <li>Roten Messleitungsstecker in die Buchse <b>V/<math>\Omega</math>/<math>\rightarrow</math></b> und schwarzen Messleitungsstecker in die <b>COM</b>-Buchse (Symbol: <math>\perp</math>) stecken.</li> <li>Messgerät parallel zum Messobjekt schalten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vor dem Messleitungsanschluss ist das Messobjekt spannungsfrei zu schalten und während der Messung spannungsfrei zu halten.</li> <li>In Durchlassrichtung (Beispiel) wird die Durchlassspannung, z. B. ca. 0,6...0,7V, angezeigt. In Sperrrichtung oder bei Leitungsunterbrechung wird z. B. <b>OL</b><sup>2</sup> angezeigt.</li> </ul>

<sup>1</sup> COM von common (engl.) = gemeinsam

<sup>2</sup> OL von overload (engl.) = Überlauf



### Situationsbeschreibung:

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

Um Fehlmessungen zu vermeiden, muss der Prüfer wissen, ob die zu messenden Wechselströme und -spannungen reine 50-Hz-Sinusgrößen sind oder ob die Messgrößen nicht sinusförmig sind (**Bild 2**). Nicht sinusförmige Spannungen und Ströme entstehen z.B. in Anlagen und Geräten mit Dimmsteuerung, in Niedervolt-Halogen-Beleuchtungsanlagen (**Bild 1**), in Anlagen mit Frequenzumrichtern, mit Gleichrichtern oder in Geräten, die mit Schaltnetzteilen versorgt werden.

### Messgerätewahl:

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

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

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

### Beispiel zum Crestfaktor:

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

### ⓘ Kurzbezeichnungen für Effektivwertanzeigen von Messgeräten (nicht genormt)

Bezeichnung	Erklärung
TRMS AC+DC	Es wird der Echt-Effektivwert (quadratische Mittelwert) angezeigt. Neben der 50-Hz-Grundschwingung werden auch Oberschwingungen ( <b>Seite 306</b> ) und Gleichanteile berücksichtigt.
TRMS oder TRMS AC	Anzeige wie bei TRMS AC+DC, aber eventuelle Gleichanteile werden nicht berücksichtigt.

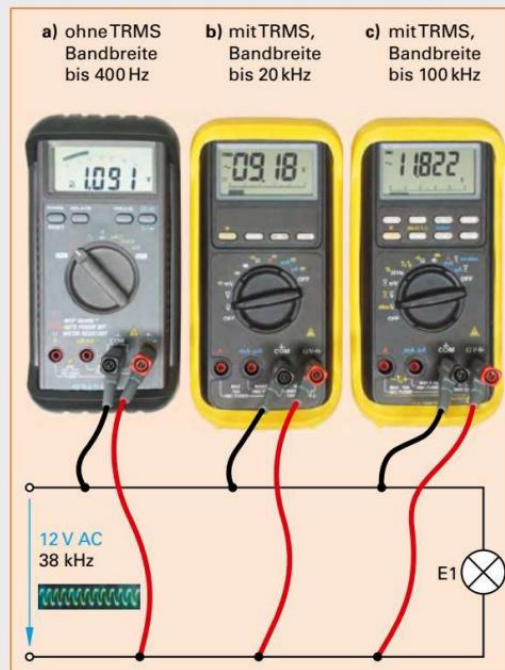


**Bild 1:** Spannungsmessung an einer Niedervolt-Halogen-Beleuchtungsanlage



**Bild 2:** Ausgangsspannung eines elektronischen Transformators (Frequenz  $f = 38 \text{ kHz}$ )

📖 Oberschwingungen: **Seite 306**



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

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

## 9.2 Halbleiterwiderstände

Halbleiterwiderstände ändern ihren Widerstandswert in Abhängigkeit von einer physikalischen Größe. Sie werden darum häufig als Messumformer in Überwachungsschaltungen oder Steuerungen eingesetzt.

### 9.2.1 Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren)

Der Widerstandswert eines **Varistors**<sup>1</sup> (**VDR**<sup>2</sup>) ist von der angelegten Spannung abhängig (**Bild 1**).

Der Widerstand eines Varistors ist bei angelegter niedriger Spannung groß und bei hoher Spannung klein.

Mit zunehmender Spannung nimmt der Strom durch den VDR zunächst wenig und dann immer stärker zu (**Bild 2**). Der Kontaktwiderstand der Metalloxidkörner (z. B. Zinkoxid, ZnO) oder Siliciumkarbidkörner (SiC), ist spannungsabhängig. Die Kennlinie  $I = f(U)$  ist nichtlinear, aber symmetrisch zum Ursprung. Spannungsabhängige Widerstände werden in Scheibenform oder Blockform hergestellt.

Man verwendet vielfach ZnO-Varistoren (**Tabelle 1**), deren Kennlinienknick (**Bild 2**) ihnen annähernd Schalteigenschaften verleiht. Diese Varistoren können Spannungen begrenzen (**Tabelle 2**). Sie dienen hauptsächlich zum Unterdrücken von Überspannungsimpulsen, seltener zur Spannungsstabilisierung (**Tabelle 2**). Durch einen Überspannungsimpuls verringert der Varistor seinen Widerstandswert schlagartig von einigen Megaohm auf wenige Ohm.

**Anwendung:** VDR-Widerstände schützen überspannungsempfindliche Bauteile wie Dioden, Transistoren, Thyristoren oder integrierte Schaltungen. Sie bewahren auch Kontakte und Schalter vor Abbrand. Die Varistoren fangen außerdem die kurzen, aber starken Spannungstöße sicher ab, die beim Schalten großer Induktivitäten entstehen. Der Schutz wirkt auch gegen Überspannungsspitzen, die über die Verbindungs- oder Versorgungsleitungen kommen.

Die am Ende der Bauteilbezeichnung stehende Zahl gibt die maximal zulässige Betriebsspannung des Varistors an.

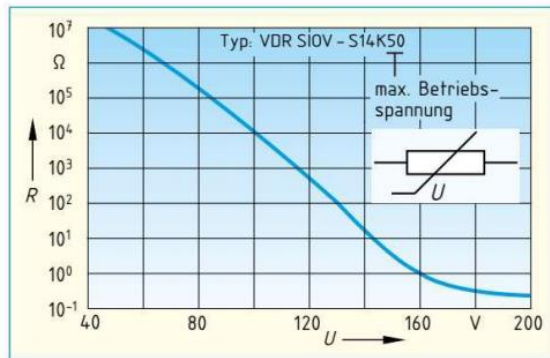
Der VDR in **Bild 1** hat damit als maximal zulässige Betriebsspannung 50 V.

**Beispiel:**

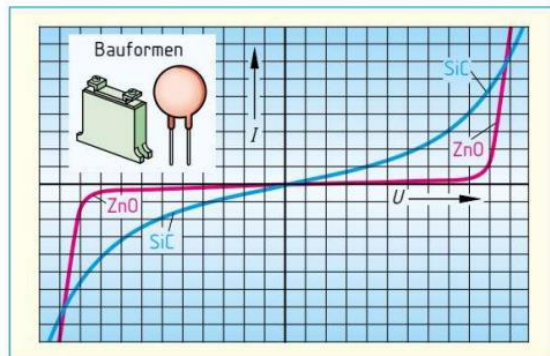
Ermitteln Sie aus der Kennlinie (**Bild 1**) den Widerstandswert des VDR bei **a**) maximal zulässiger Betriebsspannung und **b**) wenn die Betriebsspannung sprunghaft auf 160 V ansteigt.

**Lösung:**

- a) bei 50 V:  $R = 10^7 \Omega = 10 \text{ M}\Omega$
- b) bei 160 V:  $R = 10^0 \Omega = 1 \Omega$



**Bild 1:** Widerstandskennlinie eines Varistors



**Bild 2:** Kennlinien  $I = f(U)$  verschiedener Varistoren

Tabelle 1: Zinkoxid (ZnO)-Varistor-Kenndaten	
Kenngrößen	Werte
Max. zulässige Betriebsspannung	11 V ... 1,5 kV
Stromimpuls (Stoßstrom)	100 A ... 6,5 kA
Dauerbelastbarkeit	10 mW ... 1 W
Energieabsorption <sup>3</sup>	≤ 160 Ws
Betriebstemperatur	- 40 °C ... + 85 °C
Ansprechzeit	< 50 ns

Tabelle 2: Anwendung von Varistoren	
Spannungsbegrenzung	
<p>Transistorschutz</p>	<p>Überspannungsschutz</p>

**Blitzschutz: Seite 456**

<sup>1</sup> von **Variable Resistor** (engl.) = veränderlicher Widerstand  
<sup>2</sup> von **Voltage Dependent Resistor** (engl.) = spannungsabhängiger Widerstand  
<sup>3</sup> Absorption = Aufsaugen von absorbere (lat.) = verschlingen

### 9.2.2 Heißleiter (NTC-Widerstände)

Heißleiter leiten im warmen Zustand besser.

Ein Heißleiter (NTC<sup>1</sup>-Widerstand) ist ein temperaturabhängiger Widerstand mit negativem Temperaturbeiwert  $\alpha$ . Sein Widerstandswert nimmt mit zunehmender Temperatur ab (**Bild 1**).

Ein Heißleiter kann seinen Widerstand durch zwei Einflüsse verändern:

- von außen durch die Umgebungstemperatur (fremderwärmter Heißleiter) oder
- von innen durch die Wärme, die infolge des durchfließenden Stromes entsteht (eigenerwärmter Heißleiter).

**Fremderwärmte Heißleiter** darf der durchfließende Strom nur unmerklich aufheizen (**Bild 2**). Eigenerwärmte Heißleiter dagegen darf die Umgebungstemperatur kaum beeinflussen.

Heißleiter stellt man aus Metalloxiden, z. B. Magnesiumoxid (MgO) und Titanoxid (TiO<sub>2</sub>), her. Nach dem Mahlen und Mischen der Oxide mit Bindemitteln presst man die Masse in Stahlformen in die gewünschte Bauform (**Bild 3**) und sintert<sup>2</sup> sie bei 1200 °C bis 1600 °C. Die Zusammensetzung und die Form eines Heißleiters bestimmen seine Kenndaten (**Tabelle**). Die Neigung der Widerstandskennlinie (**Bild 1**) wird durch die Thermistorkonstante  $B$  festgelegt.

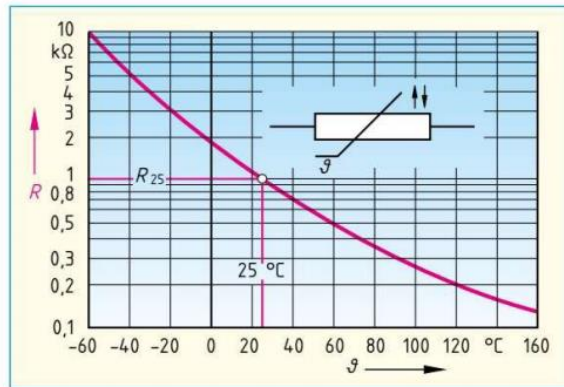
Fremderwärmte Heißleiter betreibt man im Anstiegsbereich der Kennlinie (**Bild 2**). Dort ist der Strom noch so gering, dass er den Heißleiter kaum erwärmt. Diese Heißleiter haben meist geringe Abmessungen. Dadurch sprechen sie rasch auf Temperaturschwankungen an. Wegen des großen Temperaturbeiwerts  $\alpha$  kann man noch Temperaturdifferenzen bis  $\pm 0,0001$  K messen. Festwiderstände, z. B.  $R = 10$  k $\Omega$ , in Reihe oder parallel zum Heißleiter geschaltet, linearisieren (begradigen) die Kennlinie  $R = f(\vartheta)$  (**Bild 4**).

**Tabelle: Kenndaten von Heißleitern (Beispiele)**

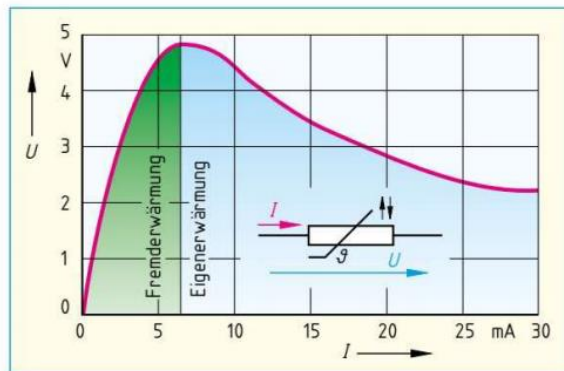
Kenndaten	Heißleiterperle	Scheibenform
	NTCLE100E3	K 164
Bemessungswiderstand	3,3 $\Omega$ bis 470 k $\Omega$	15 $\Omega$ bis 450 k $\Omega$
Bemessungsbelaubarkeit	470 mW	450 mW
untere Grenztemperatur	-40 °C	-55 °C
obere Grenztemperatur	+150 °C	+125 °C
Wärmeleitwert	7 mW/K	7,5 mW/K
Wärmekapazität	10 mJ/K	150 mJ/K
Abkühlzeitkonstante	$\approx 15$ s	$\approx 20$ s
Reaktionszeit (in Öl)	1,2 s	1,5 s
Thermistorkonstante $B$	2880 K bis 4570 K	2900 K bis 4300 K

<sup>1</sup> von Negative Temperature Coefficient (engl.) = negativer Temperaturkoeffizient

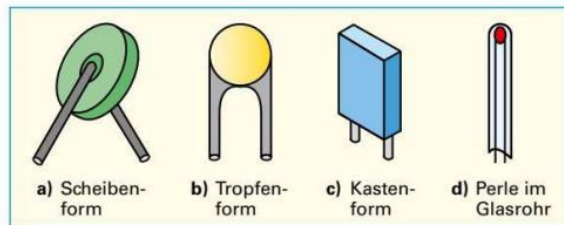
<sup>2</sup> Sintern = Metallpulvergemische werden in einer Form um bis zu 50 % ihres Volumens zusammengepresst und erwärmt.



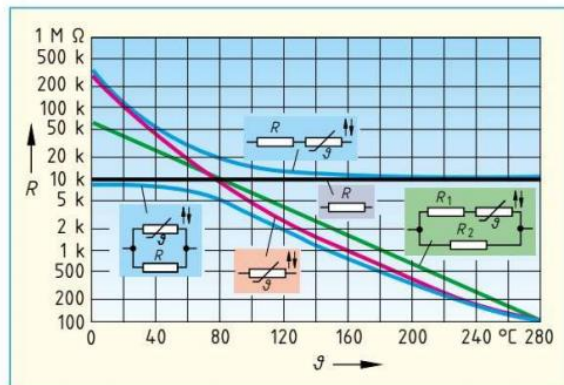
**Bild 1: Widerstandskennlinie eines Heißleiters**



**Bild 2: Kennlinie  $U = f(I)$  eines Heißleiters**



**Bild 3: Bauformen von Heißleitern**



**Bild 4: Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen und Heißleiter**

**Anwendungsbeispiele für fremderwärmte Heißeiter**

- Messen der Haut- und Körpertemperatur,
- Leistungsmessung von Mikrowellen,
- Temperaturerfassung in Geräten und Anlagen,
- Messen der Kühlwasser- und Öltemperatur sowie
- Temperaturkompensation von Bauelementen (**Tabelle**).

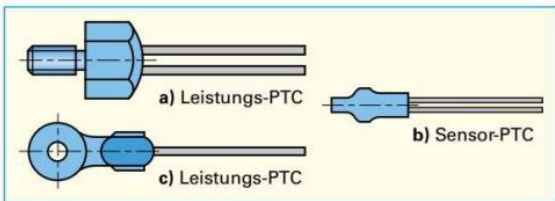
**Eigenerwärmte Heißeiter** werden durch den durchfließenden Strom aufgeheizt. Die Temperatur des Heißeiters steigt so lange an, bis sich ein Gleichgewicht zwischen der zugeführten elektrischen Energie (Stromwärme) und der durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung wieder an die Umgebung abgegebene Energie (stationärer Zustand) einstellt. Der Heißeiter verändert seinen Widerstand, wenn ihn ein Medium abkühlt.

**Anwendungsbeispiele für eigenerwärmte Heißeiter**

- Lichterketten (**Tabelle**),
- Relais-Anzugsverzögerung (**Tabelle**) und
- Einschaltstrombegrenzung.

Bei der Lichterketten-Beleuchtung (**Tabelle**) sind z. B. 16 Glühlampen 14V in Reihe an 230V geschaltet. Fällt eine Glühlampe aus, fließt der gesamte Strom durch den parallel geschalteten Heißeiter. Der NTC-Widerstand erwärmt sich und nimmt einen Widerstand an, der dem Ersatzwiderstand der Parallelschaltung von Lampe und kaltem NTC entspricht. Dadurch leuchten die restlichen Glühlampen weiter.

Tabelle: Anwendungsbeispiele von Heißeitern	
Fremderwärm	Eigenerwärm
Temperaturmessung	Lichterketten
Temperaturkompensation	Relais-Anzugsverzögerung



**Bild 1: Bauformen von Kaltleitern**

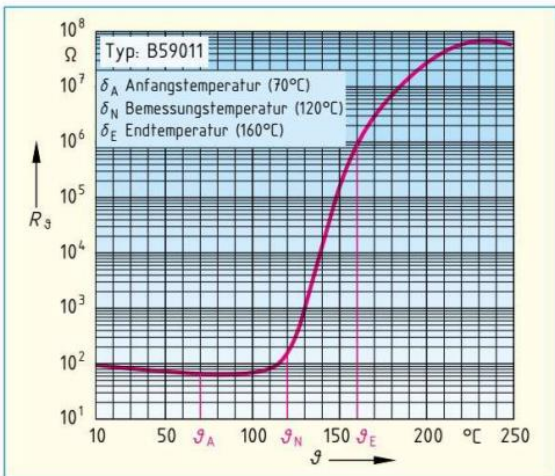
**9.2.3 Kaltleiter (PTC-Widerstände)**

Kaltleiter (PTC<sup>1</sup>-Widerstände) (**Bild 1**) sind temperaturabhängige Widerstände mit einem positiven Temperaturbeiwert.

Kaltleiter leiten im kalten Zustand besser.

Zu ihnen zählen alle Metalle. Kaltleiter aus Halbleiterwerkstoffen, z. B. Bariumtitanat (BaTiO<sub>3</sub>) zeigen jedoch ein untypisches Verhalten. Zunächst nimmt der Widerstand des Kaltleiters bei ansteigender Temperatur ab (**Bild 2**) wie bei jedem Halbleiter. Bei der Ausgangstemperatur  $\vartheta_A$  ist der geringste Widerstand  $R_{min}$  erreicht. Weiter erwärmt nimmt der Widerstandswert sprunghaft um das über Tausendfache bis zum Endwiderstand  $R_E$  zu. Bei der Bemessungstemperatur  $\vartheta_N$  beginnt der Steilanstieg des Widerstandes.

In einem begrenzten Temperaturbereich steigt der Widerstand eines Kaltleiters steil an.



**Bild 2: Widerstandskennlinie eines Kaltleiters**

**Beispiel:**

- Welchen geringsten Widerstandswert  $R_{min}$  erreicht der PTC-Widerstand B 59011 (**Bild 2**)?
- Bei welcher Bemessungstemperatur  $\vartheta_N$  beginnt der Steilanstieg?
- Um welchen Faktor  $n$  ist der Endwiderstand  $R_E$  größer als  $R_N$ ?

**Lösung:**

Aus Kennlinie:

- $R_{min} = 60 \Omega$
- $\vartheta_N = 120 \text{ °C}$
- $R_N = 150 \Omega$ ;  $R_E = 900 \text{ k}\Omega$ ;  $n = \frac{R_E}{R_N} = \frac{900 \text{ k}\Omega}{150 \Omega} = 6000$

<sup>1</sup> von Positive Temperature Coefficient (engl.) = positiver Temperaturbeiwert

**Fremderwärmte Kaltleiter** dürfen vom durchfließenden Strom nur wenig erwärmt werden. Dann beeinflusst fast nur die Umgebungstemperatur den Kaltleiterwiderstand. Der Steilanstieg (**Bild 2, Seite 199**) zwischen  $R_N$  und  $R_E$  ist der Betriebsbereich für Temperaturmess- und Regelaufgaben (**Tabelle 1**). Eine wichtige Anwendung ist dabei der Übertemperaturschutz elektrischer Maschinen zwischen 60 °C und 180 °C. Der Kaltleiter löst – in die Wicklung eingebaut – das Abschalten der Maschine über Transistorverstärker und Relais aus, wenn die zulässige Wicklungstemperatur überschritten wird.

Motorschutz mit Kaltleiter: **Seite 325**

**Eigenerwärmte Kaltleiter** erhitzt der durchfließende Strom auf eine Temperatur, bei der die abgeführte Wärme die zugeführte elektrische Energie ausgleicht. Sinkt die Temperatur, nimmt der Kaltleiter wegen des abfallenden Widerstands mehr Strom und damit eine höhere Leistung auf. Die Temperatur des Kaltleiters steigt wieder an. Umgekehrt setzt der Kaltleiter bei Temperaturanstieg seine Leistung herab.

Erhöht sich die Spannung, nimmt der Kaltleiter mehr Leistung auf. Er erwärmt sich dadurch stärker, vergrößert seinen Widerstand und verringert damit die Stromstärke. In einem weiten Bereich ist also die aufgenommene Leistung kaum spannungsabhängig. Ein Kaltleiter findet wegen dieser Eigenschaft als temperaturstabiles Heizelement Verwendung.

Der eigenerwärmte Kaltleiter reagiert bei Abkühlung durch ein anderes Medium, z. B. Öl, mit einem Stromanstieg, weil der Widerstand sinkt (**Bild**). Diese Eigenschaft nutzt man z. B. bei Füllstandsfühlern für Flüssigkeiten.

Wichtige Kenndaten von Kaltleitern zeigt **Tabelle 2**.

**Anwendungsbeispiele von eigenerwärmten Kaltleitern**

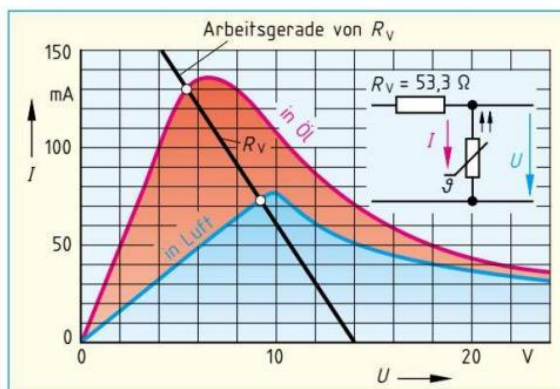
- Überlastsicherung oder Kurzschlusschutz von Kleinmotoren mit in Reihe geschaltetem Kaltleiter (**Tabelle 1**),
- Strömungswächter in Flüssigkeiten,
- Flüssigkeits-Niveaufühler (**Tabelle 1**) und
- Grenzwertgeber der Überfüllsicherung, z. B. bei Heizöltanks.

**Tabelle 1: Anwendungsbeispiele von Kaltleitern**

Fremderwärmte	Eigenerwärmte
Temperaturmessung	Niveaufühler
Temperaturregler	Überlastsicherung

**Tabelle 2: Kenndaten von Kaltleitern (Beispiele)**

Kenndaten	Messkaltleiter	Überlastschutz
Bemessungstemperatur $\vartheta_N$	40 °C	130 °C
Bemessungswiderstand $R_N$	110 Ω	13 Ω
Anfangstemperatur $\vartheta_A$	0 °C	60 °C
Anfangswiderstand $R_A$	100 Ω	0,7 Ω
Endtemperatur $\vartheta_E$	95 °C	250 °C
Endwiderstand $R_E$	≥ 50 kΩ	≥ 5 kΩ
Temperaturbeiwert $\alpha_R$	0,16 1/K	0,15 1/K
Max. Spannung $U_{max}$	30 V	30 V
Abkühlzeitkonstante $\tau_{th}$	18 s	10 s
Wärmeleitwert $G_{th}$	5,6 mW/K	5,5 mW/K



**Bild:** Kennlinien eines Kaltleiters in Luft und in Öl

**Wiederholungsfragen**

- 1 Welchen Widerstandswert hat ein Varistor, wenn er an einer a) niedrigen und b) hohen Spannung liegt?
- 2 Erklären Sie die Wirkungsweise des Varistors.
- 3 Beschreiben Sie den Überspannungsschutz durch einen Varistor.
- 4 Welches Vorzeichen hat der Temperaturbeiwert a) eines Heißeiters und b) eines Kaltleiters?
- 5 Wie verhält sich ein Heißeiter bei Erwärmung?

- 6 Was versteht man unter a) fremderwärmten und b) eigenerwärmten Heißeitern?
- 7 Wozu verwendet man a) eigenerwärmte und b) fremderwärmte Heißeiter?
- 8 Welche Anwendungen haben a) fremderwärmte, b) eigenerwärmte Kaltleiter?
- 9 Erklären Sie die Funktion der Anwendungsbeispiele von Tabelle 2.

### 9.2.4 Feldplatten

Der Widerstand einer Feldplatte steigt mit der magnetischen Flussdichte.

Feldplatten werden auch magnetfeldabhängige Widerstände oder MDR<sup>1</sup> genannt. Sie bestehen aus sehr dünnen Halbleiterplättchen, die mäanderförmig auf eine Trägerplatte geklebt sind (Bild 1). Durch den Einfluss eines Magnetfeldes werden die Elektronen abgelenkt, wodurch sich der Stromweg im Halbleiter verlängert und damit der Widerstandswert erhöht wird.

Die Feldplatte FP 30D 250E (Bild 2) hat einen Grundwiderstand  $R_0 = 250 \Omega \pm 20\%$  bei der magnetischen Flussdichte  $B = 0 \text{ T}$  (Tesla). Wird die magnetische Flussdichte auf 1 T erhöht, steigt der Widerstand der Feldplatte um den Faktor 15 also auf  $R_{BD(1T)} = 3750 \Omega$  an.

#### Anwendungsbeispiele von Feldplatten

- kontaktlos steuerbare Widerstände,
- kontakt- und berührungslose Schalter,
- Drehzahl- und Drehrichtungserfassung,
- Messung von Magnetfeldern und
- Gleichstrommessung mit Strommesszangen.

### 9.3 Hallgeneratoren

Der Hallgenerator erzeugt aus einem Strom und einem Magnetfeld eine Spannung (Hall-Spannung).

Der Hallgenerator<sup>2</sup> wird auch **Hallsonde** oder Hallsensor genannt. Hallgeneratoren werden aus dünnen Halbleiterplättchen in typischen Bauformen (Bild 3) hergestellt. Fließt infolge einer angelegten Spannung  $U_b$  ein Strom  $I$  durch das Halbleiterplättchen und wird dieses zusätzlich in ein Magnetfeld gebracht, so entsteht an den beiden Messanschlüssen aufgrund der Kraftwirkung auf Ladungsträger (Elektronen) eine Spannung  $U_H$  bis 18 V (Bild 4). Diese Hall-Spannung  $U_H$  wächst mit der Stärke des Steuerstromes  $I$  und der magnetischen Flussdichte  $B$ .

#### Anwendungsbeispiele von Hallgeneratoren

- Magnetfeldmessung,
- potenzialfreie Strommessung,
- berührungs- und kontaktlose Signalgeber.

In der Automobilindustrie finden Hallgeneratoren vielfältige Anwendung, z. B. im Gurtschloss, im TürschlieÙsystem, bei der Pedalzustandserkennung, in Getriebeschaltern oder zur Steuerung der Zündzeitpunkte als Hall-Impulsgeber (Bild 5).

<sup>1</sup> MDR von magnetic field depending resistor (engl.) = magnetfeldabhängiger Widerstand  
<sup>2</sup> Edwin Herbert Hall, amerikanischer Physiker, 1855 bis 1938

**i** **Feldplatten** ändern ihren Widerstandswert durch den Einfluss eines Magnetfeldes.

**Hallgeneratoren** erzeugen infolge von Stromfluss und einem äußeren Magnetfeld eine Spannung.

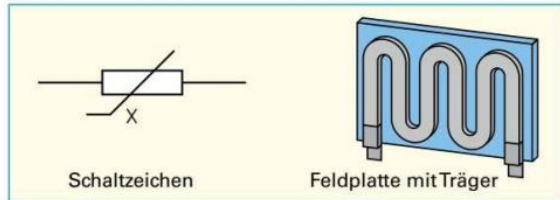


Bild 1: Schaltzeichen und Aufbau einer Feldplatte

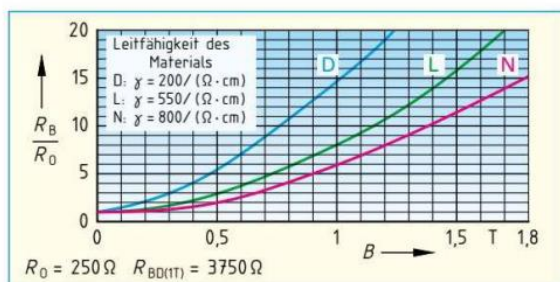


Bild 2: Kennlinien von Feldplatten (Typ: FP 30D 250E)



Bild 3: Bauformen von Hallgeneratoren

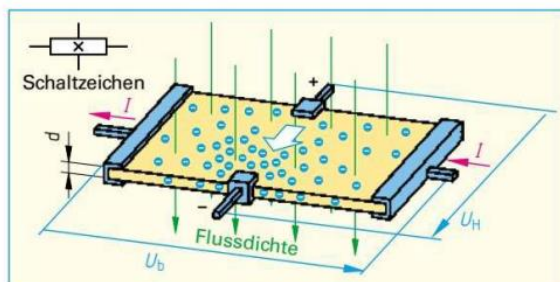


Bild 4: Hall-Effekt

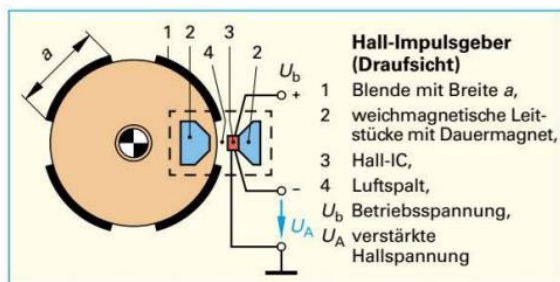


Bild 5: Hall-Impulsgeber

### 9.6.2 Optoelektronische Empfänger (Detektoren)

#### Fotodioden

Fotodioden stellt man meist aus Silicium her. Im Betrieb wird die Fotodiode in Sperrichtung geschaltet. Ohne Beleuchtung fließt nur ein sehr geringer **Dunkelstrom** (einige  $\mu\text{A}$ ). Bei Beleuchtung fließt der **Hellstrom** (mehrere mA). Fotodioden verwendet man z.B. zur Lichtstärkemessung und für Lichtsensoren.

#### Fotowiderstände

Fotowiderstände (**Bild 1 und Bild 5**) ändern ihren Widerstand mit der Beleuchtungsstärke. Dazu wird der Halbleiterwerkstoff, z.B. Cadmiumsulfid ( $\text{CdS}$ ), als dünne Schicht auf einen Träger, z.B. Glas, aufgedampft und in ein Gehäuse eingebaut. Fotowiderstände verwendet man z.B. als Lichtsensor in Dämmerungsschaltern (**Bild 1**).

#### Beispiel:

Bestimmen Sie mithilfe des Kennlinienfeldes (**Bild 2**) die Spannung  $U_{B1}$  (**Bild 1**) im Leerlauf (ohne K1 und P1) bei  $R_2 = 0 \Omega$  und einer Beleuchtungsstärke von 1000 lx.

#### Lösung:

1. Arbeitsgerade für  $R_1 = 6,8 \text{ k}\Omega$  bei  $U_b = 24 \text{ V}$  einzeichnen
2. Schnittpunkt von Arbeitsgerade und 1000-lx-Gerade ergibt Arbeitspunkt (**Bild 2**)  $\Rightarrow U_{B1} = 9 \text{ V}$  (Leerlauf)

#### Fotoelemente

Fotoelemente geben eine elektrische Spannung von etwa 0,4V ab, wenn Licht auf sie fällt. Ein Fotoelement aus Germanium oder Silicium mit Metall-Halbleiter-Kontakt besteht aus einem flachen P-Leiter, auf den eine hauchdünne, durchsichtige Goldschicht aufgedampft ist. Der PN-Übergang zur Spannungsentnahme bildet sich dann zwischen Halbleiter und der Deckelektrode. Man verwendet Fotoelemente z.B. zur Lichtmessung, bei Lichtsteuerungen und Lichtregelungen.

#### Solarzellen

Solarzellen (**Bild 3**) sind Halbleiterbauelemente, vergleichbar mit Fotoelementen, die Lichtstrahlung direkt in elektrische Energie umwandeln.

Kennlinie Solarzelle: Seite 282

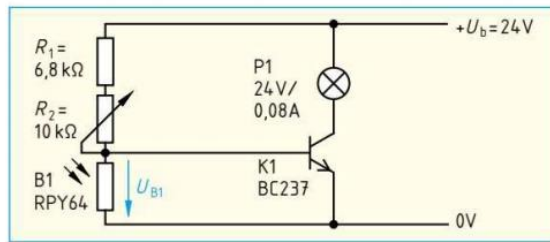


Bild 1: Einfacher Dämmerungsschalter

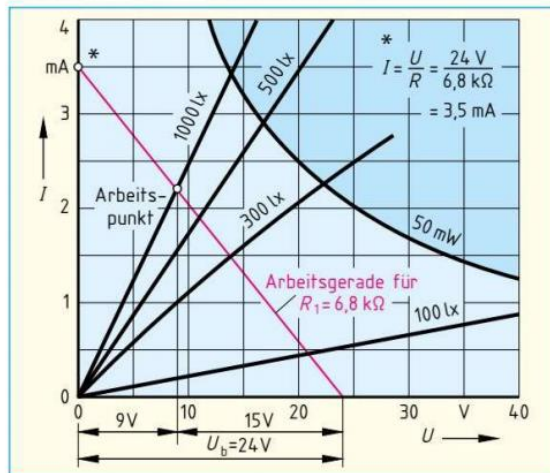


Bild 2: Kennlinienfeld des Fotowiderstandes RPY64

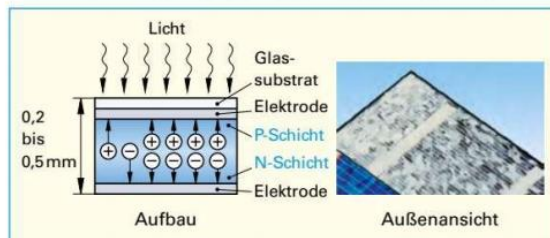


Bild 3: Solarzellen

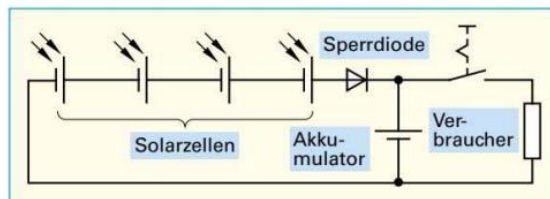


Bild 4: Solarzellen mit Akkumulator

Fotovoltaik in der Gebäudegestaltung

Aufbau	Schaltzeichen und Anwendung	Elektrische Daten (Beispiel: RPY 64)
<p>Glasfenster lichtempfindliche Halbleiterschicht</p>	<p>Prinzipschaltung: Belichtungsmesser</p>	<p><b>Grenzwerte:</b>                      Verlustleistung <math>P_{tot} = 50 \text{ mW}</math>                      Grenzspannung <math>U_G = 50 \text{ V}</math></p> <p><b>Kennwerte:</b>                      Dunkelwiderstand <math>R_d \geq 100 \text{ M}\Omega</math>                      Hellwiderstand <math>R_h &lt; 3 \text{ k}\Omega</math></p>

Bild 5: Fotowiderstand

Solarzellen bestehen aus weniger als einen Millimeter dünnen Halbleiterplättchen aus Silicium. Die Oberfläche der Solarzelle wird durch ein Glas-Substrat vor Umwelteinflüssen geschützt. Zwischen der Ober- und der Unterseite der Solarzelle, den Elektroden, kann eine Gleichspannung entnommen werden. Allerdings können Solarzellen nur einen geringen Teil des einfallenden Lichtes (etwa 17 %) in elektrische Energie umwandeln.

**Anwendung von Solarzellen.** Spannungserzeugung mit Solarzellen (Bild 4, Seite 222 und 282) erfolgt für viele Anwendungen, vom Solar-Taschenrechner bis zur Energieversorgung im Kilowattbereich (Fotovoltaikanlagen). Die elektrische Leistung wird von den Abmessungen, dem Wirkungsgrad der Solarzelle und von der Sonneneinstrahlung bestimmt. Beträgt die Fläche der Solarzelle z.B. 100 cm<sup>2</sup>, so kann bei voller Sonneneinstrahlung eine Leistung von 1,7 W, eine Spannung von etwa 0,5 V und ein Strom von 3 A entnommen werden. Höhere Spannungen erhält man durch Reihenschaltung, größere Ströme durch Parallelschaltung einzelner Solarzellen.

**Fototransistoren**

Fototransistoren sind Siliciumtransistoren mit einer Lichteintrittsöffnung von einigen mm<sup>2</sup>. Das Licht beeinflusst die Basis-Kollektor-Strecke (Tabelle 1). In der Wirkungsweise entspricht ein Fototransistor einer Fotodiode mit einem eingebauten Verstärker. Der Fototransistor weist eine 100- bis 500-mal größere Lichtempfindlichkeit auf als eine vergleichbare Fotodiode.

Ohne Lichteinfall verhält sich ein Fototransistor wie ein üblicher Transistor. Es fließt nur ein kleiner Kollektor-Emitter-Reststrom (einige nA). Fällt Licht durch die Lichteintrittsöffnung, so werden im PN-Übergang Ladungsträger freigesetzt, wodurch die Leitfähigkeit der Kollektor-Emitter-Strecke steigt. Der Fototransistor leitet besser.

Eine hohe Empfindlichkeit erreicht man bei Betrieb mit offener Basis. Deshalb gibt es auch Fototransistoren ohne Basisanschluss.

**Schaltungsbeispiele optoelektronischer Empfänger mit Fototransistoren**

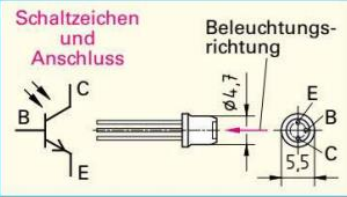
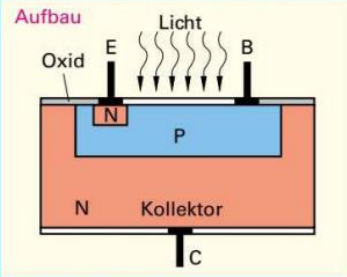
Bei optoelektronischen Empfängern werden Änderungen von sichtbarem Licht oder unsichtbarer Strahlung, z.B. IR-Strahlung, in ein elektrisches Signal umgewandelt und dann verstärkt.

Optoelektronische Empfänger bestehen im Prinzip aus einem optoelektronischen Bauelement und einer Verstärkerschaltung, z.B. mit einem Transistor (Tabelle 2).

Tabelle 2: Optoelektronische Empfänger (Prinzipialschaltungen)				
Schaltung				
Funktion	Bei Lichteinfall leiten der Fotowiderstand B1 und der Transistor K1 mehr; U <sub>a</sub> wird kleiner.	Bei Lichteinfall entsteht am Fotoelement B1 eine Spannung. Der Transistor K1 leitet weniger. U <sub>a</sub> wird größer.	Bei Lichteinfall werden der Fototransistor B1 und der Transistor K1 leitend; U <sub>a</sub> wird kleiner.	Bei Lichteinfall leitet der Fototransistor B1, der Transistor K1 dagegen nicht; U <sub>a</sub> wird größer.

Fotovoltaikanlagen:  
Seite 283

**Tabelle 1: Fototransistor**



**Elektrische Daten (BPX 62)**

**Grenzwerte:**

Spannung	$U_{CE0} = 32 \text{ V}$
Verlustleistung	$P_{\text{tot}} = 0,25 \text{ W}$
Kollektorstrom	$I_{C\text{max}} = 25 \text{ mA}$

**Kennwerte:**

Fotostrom (bei 1000 lx)	$I_p = 1,2 \text{ bis } 10 \text{ mA}$
Dunkelstrom	$I_d = 5 \text{ nA}$