

## Leiterwerkstoffe

Als Leiterwerkstoffe dienen in der Elektrotechnik fast ausschliesslich Metalle, insbesondere Kupfer (Cu) und in geringerem Umfang Aluminium (Al). Massgebend für die Leiterwerkstoffe ist die elektrische Leitfähigkeit, die von der Dichte, der Ladung und der Beweglichkeit der Ladungsträger abhängig ist.

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

neben  $\gamma$  wird auch das  $\kappa$  verwendet

Um einen Einblick in die Grössenverhältnisse der elektrischen Leitfähigkeit reiner Metalle zu geben, sind einige Metalle und deren Legierungen in drei Leiterwerkstoffgruppen eingeteilt. Gemeinsam ist allen reinen Metallen, dass ihre Leitfähigkeit mit steigender Temperatur abnimmt.

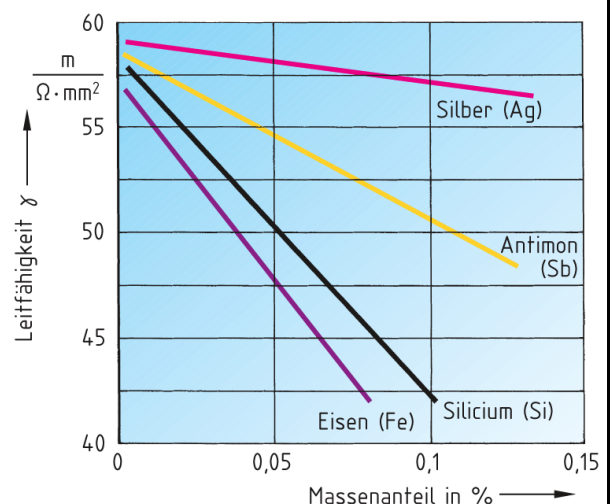
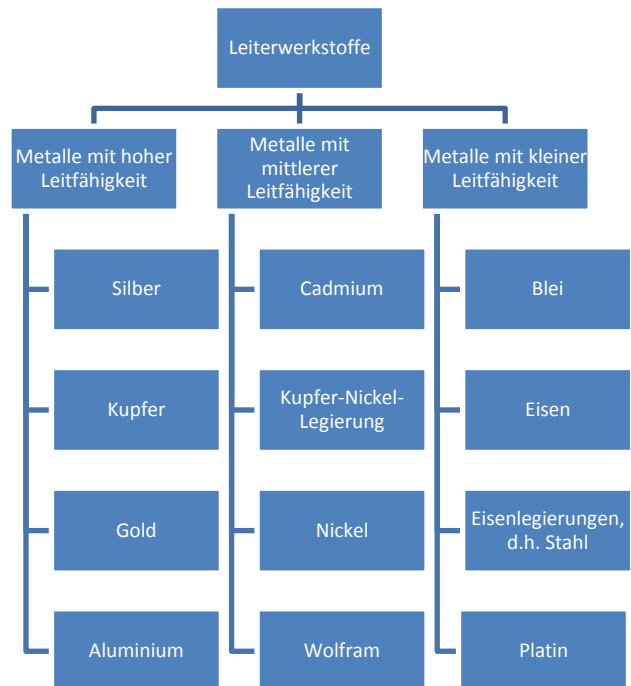
Eine Widerstandszunahme kann auch durch mechanische Verformung erfolgen. Eine plastische Verformung verschlechtert die Beweglichkeit der Elektronen. Verunreinigungen und Legierungen lösen ebenfalls starke Widerstandszunahmen aus, weil der kristalline Aufbau gestört und damit wieder die Beweglichkeit der Elektronen negativ beeinflusst wird. Werden für Integrierte Schaltungen (IC's) die Leitungen extrem dünn ausgeführt, dann wird die Beweglichkeit der Elektronen durch die geringe Schichtdicke eingeschränkt.

Zu den Strukturdefekten gehören:

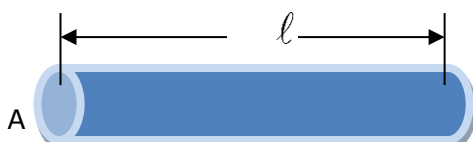
- Reinheitsgrad (Herstellungsprozess)
- Legierungsart (reine Phasen, Mischkristalle)
- Verformungsgrad (mechanische Belastung und Vorgeschichte)
- Schichtausbildung (Kontaktierung, Umgebung bei sehr dünnen metallischen Schichten im  $\mu\text{m}$ -Bereich.)

Mit zunehmendem Gehalt an löslichen Verunreinigung Ag, Sb, Si oder Fe sinkt die elektrische Leitfähigkeit der reinen Metalls Kupfers.

**Die höchste Leitfähigkeit besitzt ein Metall, wenn es in völlig reiner Form vorliegt und eine möglichst gleichmässige Gitterstruktur aufweist.**



Die spezifische Leitfähigkeit ist immer an eine bestimmte Temperatur gebunden. (Norm:  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ). Der elektrische Widerstand steigt mit wachsender Länge des Leiters  $l$  und fällt mit zunehmendem Leiterquerschnitt  $A$ . Somit ergibt sich die Formel



$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad R = \frac{1}{\gamma \cdot A}$$

Einheit von  $\rho$ : [ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ]; [ $\Omega \text{ m}$ ] bzw. [ $\text{Vm/A}$ ]

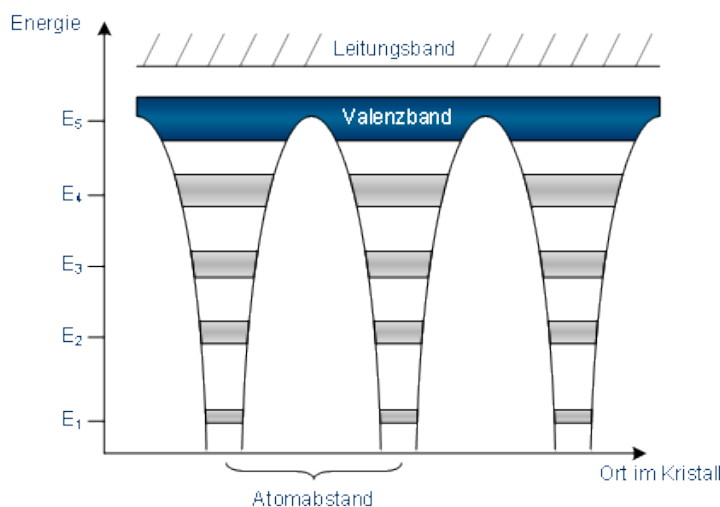
In der Tabelle sind für die wichtigsten Leiterwerkstoffe nochmals die Zahlenwerte der spezifischen Leitfähigkeit und des spezifischen Widerstands aufgeführt.

### Leitungsmechanismen

Um die Vorgänge der Leitung des elektrischen Stromes in Werkstoffen besser zu verstehen, brauchen wir ein neues Modell, das sogenannten Energiebändermodell. Das Modell beschreibt die Zustände der Elektronen von Atomen mit einer regelmässig, angeordneten Gitterstruktur. Diese Strukturen kommen in Metallen, Salzen und Halbleiterkristallen vor.

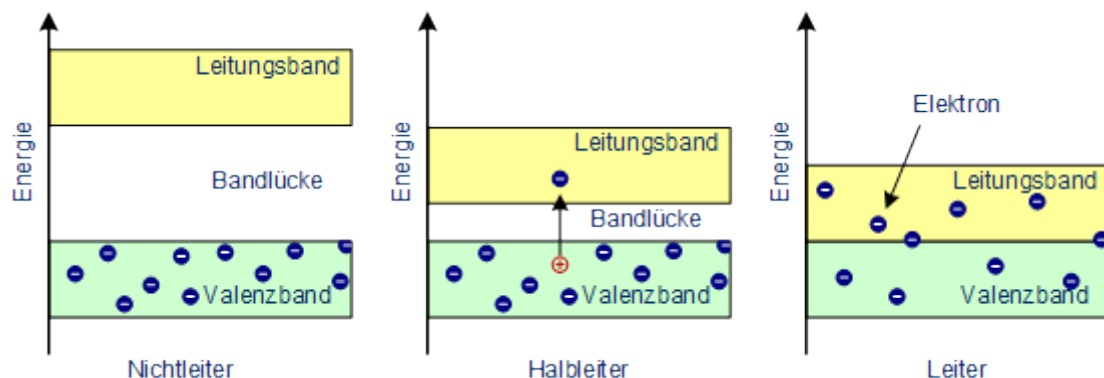
Spezifischer Widerstand  $\rho$  und spezifische Leitfähigkeit  $\gamma$

Material	Spezifischer Widerstand [ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ]	Leitfähigkeit [ $\text{m}/\Omega \text{ mm}^2$ ]
Silber	0,0167	60
Kupfer	0,0178	56
Gold	0,022	45,7
Aluminium	0,0278	36



Von den Atomen wissen wir, dass sie ihre Elektronen auf verschiedenen Energieniveaus kreisen lassen. Wenn nun die Atome sehr nahe und regelmässig angeordnet sind, so überlagern sich die Niveaus und aus den einzelnen Schichten werden ganze Energiebänder.

Das äusserste Band der Aussenenergie wird als Valenzband bezeichnet. Es enthält die Elektronen mit der grössten Energie in Form von Bewegung. Die Elektronen sind aber in diesem Band immer noch an den Atomkern gebunden, wenn auch nicht mehr sehr stark. Das Mass für diese Anziehungskraft wird mit Hilfe von sogenannten Elektronenvolt angegeben.



Energetisch höher liegt das Leitungsband. Elektronen in diesem Band fliessen ungebunden von den Atomen als Elektronengas um die Atomkerne resp. um die Gitter der Kristalle. Damit nun Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband aufsteigen können, brauchen sie zusätzliche Energie. Diese Energie ist je nach Werkstoff unterschiedlich und wird schlussendlich in der Werkstoffgrösse „spezifische Leitfähigkeit“ zusammengefasst.

### Silber

Obwohl Silber die grösste spezifische Leitfähigkeit besitzt, wird dieser Werkstoff sehr selten als elektrischer Leiter in Kabeln und Elektromotoren verwendet. Der Grund dafür liegt in seinem hohen Preis als Edelmetall. Als Edelmetall oxidiert Silber mit dem Luftsauerstoff nur sehr wenig und der Hautwiderstand bleibt sehr gering. Wird Silber mit anderen Metallen legiert, so erhält man einen vorzüglichen Kontaktwerkstoff.

## Kupfer

In der Elektrotechnik ist Kupfer der meist verbreitete Leiterwerkstoff. Um einen hohen Wirkungsgrad elektrischer Maschinen zu garantieren, wird darum Kupfer als Leiter eingesetzt. Kupfer wird meist in Verbindung mit Schwefel und Sauerstoff als Erz gefunden. Durch mehrere Schmelzprozesse und eine anschließende Elektrolyse wird Kupfer mit einem Reinheitsgrad von bis 99,99% erreicht. Dies ist für „ECu“, d.h. „Kupfer für die Elektrotechnik“, äusserst wichtig, da ganz **geringe Verunreinigungen die elektrische Leitfähigkeit stark verschlechtern**.

### Steckbrief Kupfer

Elektrische Leitfähigkeit	58 m/(Ω·mm <sup>2</sup> )
Wärmeleitfähigkeit	395 W/(K·m)
Dichte	8,9 kg/dm <sup>3</sup>
Schmelzpunkt	1083°C
Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes	0,0043 K <sup>-1</sup>

Kupfer ist neben Silber der beste elektrische Leiter und Wärmeleiter. Reines Kupfer ist weich und daher gut kalt umformbar. Gegen Atmosphäreneinfluss ist Kupfer korrosionsbeständig. An der Luft bildet sich auf der Oberfläche Patina, eine dünne braungüne Schutzschicht aus Kupfersalzen.

Reines Kupfer wird als Leiterwerkstoff für Drähte, Bänder, Kabel, Sammelschienen, Leiterbahnen verwendet. Kupfer kann auch sehr gut geschweisst und gelötet werden. Leider wird dadurch an der Schweissstelle aber die Leitfähigkeit etwas herabgesetzt.

Als Konstruktionswerkstoff wird Kupfer im Apparatebau, elektrischen Maschinenbau als Wärmetauscher verwendet. Auch hier spielt die Schweiss- und Lötbarkeit eine wichtige Rolle.

Im Bauwesen wird Kupfer als Abdeckung von Schornsteinen und Kaminen und im sanitären Leitungsbau bei der Wasserversorgung eingesetzt.

### Kennzeichnung:

#### Kupfer für die Elektrotechnik:

Cu-ETP	hohe elektrische Leitfähigkeit $\gamma \geq 58 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ , sauerstoffhaltig
Cu-FRHC	hohe elektrische Leitfähigkeit $\gamma \geq 57 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ , sauerstoffhaltig
Cu-OF	hohe elektrische Leitfähigkeit $\gamma \geq 58 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ , sauerstofffrei

#### Kupferlegierungen:

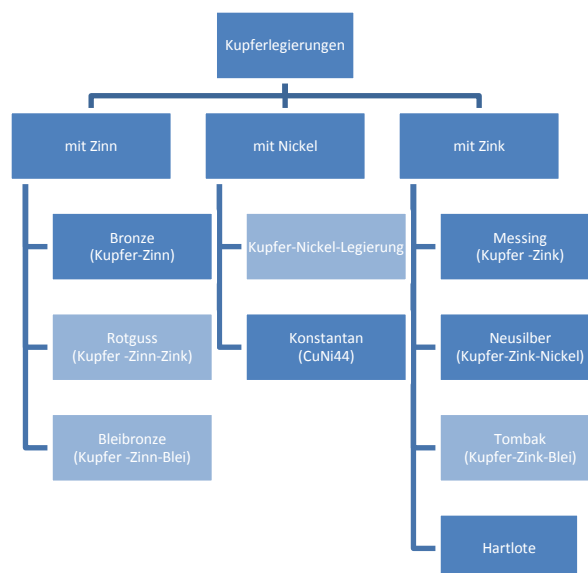
CuNi44	Konstantan aus 44% Nickel, 1% Mangan, 55% Kupfer
CuNi12Zn27	Neusilber aus 12% Nickel, 27% Zink, 61% Kupfer
CuZn37	Messing aus 37% Zink, 63% Kupfer
CuSn8	Zinnbronze aus 8% Zinn, 92% Kupfer

#### Hartlote:

L-CuZn40	Messinglot aus 39,7 % Zinn, 0,3 % Silizium, 60% Kupfer
----------	--------------------------------------------------------

Kupfer eignet sich vorzüglich als Legierungselement. Zu den bekanntesten Legierungen gehören Messing, Bronze, Neusilber und Konstantan. Sie werden vor allem als Konstruktionswerkstoffe, Kontaktwerkstoffe oder als Widerstandswerkstoffe verwendet.

In der Elektrotechnik werden Kleinteile wie Klemmen, Lampenfassungen, Schalterteile, Lötösen und Bürstenhalter aus Messing hergestellt. Bronze wird für preisgünstige Kontaktstreifen und für stromleitende Federn verwendet.



## Aluminium

Aluminium wird als Bauxit im Tagebau als Erz gefördert. Durch mehrere Schmelzprozesse und eine anschliessende Schmelzflusselektrolyse wird Aluminium mit einem Reinheitsgrad von bis zu 99,5 % erreicht. Aluminium hat eine hohe elektrische Leitfähigkeit bei geringer Dichte (Leichtmetall). Es wird darum in der Elektrotechnik als Leiterwerkstoff im Freileitungsbau und als Käfiganker in Drehstromasynchronmotoren eingesetzt.

Gegenüber Kupfer hat Aluminium den Nachteil, dass es härter ist. Gerade bei Drahtverbindungen im Installationsbereich ist aber das Zurechtbiegen in den Verteilsteckdosen entscheidend. Zudem neigt Aluminium unter Druck zum Wegfliessen, was vor allem nach längerer Zeit bei Schraubverbindungen zu losen Kontakten führt. Als letzter Punkt muss erwähnt werden, dass durch die Oxidation mit Luft ein elektrischer Übergangswiderstand entsteht, der um ein Vielfaches höher liegt, als bei Kupfer. Zu den bekanntesten Aluminiumlegierungen, die als Leiter eingesetzt werden, gehört Aldrey.

Beim Aluminium unterscheidet man zwischen Guss- (AC) und Knetlegierungen (AW). Durch die Legierungselemente Mangan, Magnesium, Silizium, Zinn, Kupfer können die mechanischen Eigenschaften wesentlich verbessert werden. Hier ist vor allem die Zugfestigkeit zu erwähnen, die von  $100 \text{ N/mm}^2$  auf bis zu  $530 \text{ N/mm}^2$  gesteigert werden kann.

Steckbrief Aluminium	
Elektrische Leitfähigkeit:	$37,7 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$
Wärmeleitfähigkeit	$226 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$
Dichte	$2,7 \text{ kg/dm}^3$
Schmelzpunkt	$659^\circ\text{C}$
Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes	$0,0046 \text{ K}^{-1}$
Aluminium ist sehr leicht und extrem dünn walzbar. Es oxidiert an der Luft mit einer dünnen Oxidschicht, die das Material noch härter macht. Es wird bei grossen Mengen recycelt (z.B. Getränkedosen). Der Energieaufwand zur Herstellung von Aluminium ist jedoch fast doppelt so gross wie bei der Stahlherstellung.	
Verwendet wird Aluminium als Leiterwerkstoff in Erdkabeln und Hochfrequenzkabeln, als Folie zum Abschirmen von elektromagnetischer Strahlung sowie als Folien bei Papier- und Elektrolytkondensatoren. Geringes Gewicht und die relativ hohe Leitfähigkeit führen dazu, dass Aluminium als Käfiganker bei Drehstromasynchronmotoren eingesetzt wird.	
Als Konstruktionswerkstoff wird Aluminium meist dort verwendet, wo leichtes Gewicht mit hoher Festigkeit kombiniert werden soll, so z.B. in der Luftfahrt, im Automobilbau und im Anlagebau als Profilmaterial.	
In der Verpackungsindustrie wird es zum Abpacken von Lebensmitteln verwendet.	
Kennzeichnung:	
Aluminium für die Elektrotechnik:	
E-AlMgSi	Aldrey aus 0,5% Mg, 0,5% Si, 99% Al, $\gamma \geq 30 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$
EN AW-Al Cu4PbMg	Automatenlegierung hoher Festigkeit
EN AW-Al MgSiCh	Knetlegierung mit hoher Festigkeit
EN AC-Al Si9	Gusslegierung für dünnwandige Werkstücke hoher Festigkeit