

### 3 Elektrische Kenngrößen

#### 3.1 Leiterwiderstand

Der Leiterwiderstand bedingt die stromabhängigen Verluste und einen Teil des Spannungsfalles im Kabel. Zu unterscheiden sind der Widerstand  $R$  bei Gleichstrom und der Wirkwiderstand  $R_W$  im Wechsel- und Drehstrombetrieb.

##### 3.1.1 Widerstand bei Gleichstrom

Der Widerstand  $R$  bei Gleichstrom ist von der Länge  $\ell$ , dem Querschnitt  $A$  und der Leitfähigkeit  $\gamma$  des Leiters gemäß Gleichung (1) abhängig.

$$(1) \quad R = \frac{\ell}{\gamma \cdot A} = \frac{\ell \cdot \rho}{A}$$

Der Kehrwert der Leitfähigkeit  $\gamma$  ist der spezifische Widerstand  $\rho$ . Der Kehrwert des Widerstandes  $R$  ist der Leitwert  $G$ .

Tabelle 3: Vergleich der Leiterwerkstoffe Kupfer und Aluminium

(41016a)

		Kupfer	Aluminium
Spezifischer Widerstand	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0,01724	0,02826
Leitfähigkeit	$\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$	58	35
Dichte	$\text{kg}/\text{dm}^3$	8,9	2,7
Spezifische Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	360	890
Längenausdehnungskoeffizient	$10^{-6} \text{K}^{-1}$	17	24
Bei gleichem Leitwert			
Gewicht	%	100	51
Durchmesser	%	100	129

Wesentliche Eigenschaften der Leiterwerkstoffe Kupfer (Cu) und Aluminium (Al) sind in Tabelle 3 angegeben. Die Leitfähigkeit von Aluminium ist um etwa 40% kleiner als die von Kupfer. Um denselben Wi-

derstand bei Gleichstrom zu erreichen, muss ein Aluminiumleiter einen um 70 % größeren Querschnitt haben; das entspricht einem um 29 % größeren Durchmesser. Das Gewicht des Aluminiumleiters ist dann aber immer noch um 50 % kleiner als das des Kupferleiters.

Betrachtet man die Erwärmung durch einen Kurzschlussstrom, so ergibt sich wegen der unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazität bei gleichem Strom und gleichem Leiterwiderstand, also bei gleicher Verlustleistung, dass die Temperaturzunahme des Aluminiumleiters um 20% unter der des Kupferleiters bleibt.

Mit steigender Temperatur steigt der Widerstand metallener Leiter an. Der Anstieg des Widerstandes ist proportional zur Temperatur, wenn die Temperatur im Bereich technisch üblicher Werte bis etwa 150 °C bleibt. Es gilt dann für den Widerstand  $R_t$  bei der Temperatur  $t$  in °C

$$(2) \quad R_t = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20^\circ\text{C})].$$

Hierin ist  $R_{20}$  der Widerstand bei 20 °C. Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  des elektrischen Widerstandes bei 20 °C liegt für Metalle bei etwa  $4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Es ergibt sich also eine Widerstandserhöhung um etwa 40% bei einer Temperaturerhöhung um 100K. Diese Widerstandserhöhung wird bei der Ermittlung der zulässigen Strombelastbarkeit eines Kabels berücksichtigt.

Häufig wird der längenbezogene Widerstand  $R' = R/\ell$  benötigt. Er wird Widerstandsbelag genannt und beispielsweise in der Einheit Ohm/km angegeben. Beispiele für  $R'$  sind in Bild 3 dargestellt.

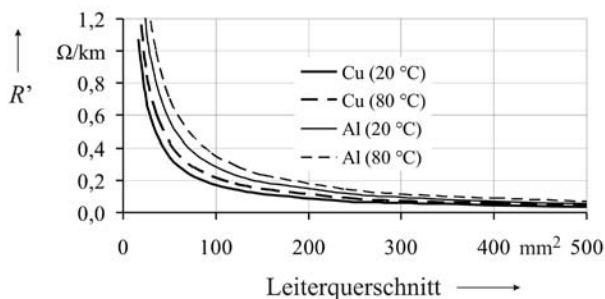


Bild 3: Gleichstrom-Widerstandsbelag bei Kupfer- und Aluminiumleitern (Daten: Nexans) (70/33-2)

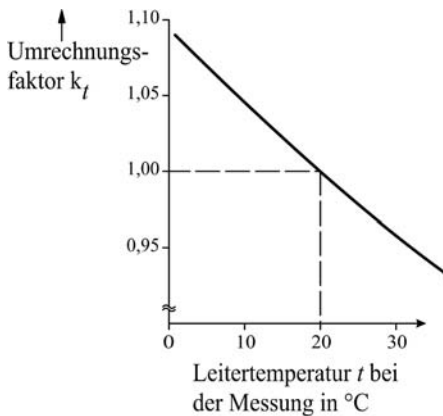
Die zulässigen Höchstwerte des Widerstandes für ein- und mehrdrähtige Leiter sind in VDE 0295 angegeben. Die Höchstwerte gelten für die Bezugstemperatur 20 °C und die definierte Bezugslänge (beispielsweise  $\ell = 1 \text{ km}$ ). Da die Messung im Prüffeld nicht immer bei der Bezugstemperatur durchgeführt werden kann und die aktuelle Kabellänge  $L$  meist von der Bezugslänge abweicht, ist eine Umrechnung auf die Bezugsgrößen durchzuführen. Dies zeigt angenähert Bild 4.

Die genauen Korrekturfaktoren für die Temperatur  $t$  in °C sind gemäß VDE 0295 für Kupfer in Gleichung (3)

$$(3) \quad k_{\text{Cu}} = \frac{1}{1 + 0,00393 \cdot (t - 20)}$$

und für Aluminium in Gleichung (4) angegeben.

$$(4) \quad k_{\text{Al}} = \frac{1}{1 + 0,00403 \cdot (t - 20)}$$



$$R_{20} = R_t \cdot k_t \cdot \frac{1000}{L}$$

$$k_t = \frac{1}{1 + 0,004 \cdot (t - 20)}$$

Bild 4: Widerstandsumrechnung auf Bezugstemperatur und Bezugslänge nach VDE 0295:2005-09 (39014-5)

Die in Gleichung (2) angegebene Proportionalität zwischen Temperatur- und Widerstandsänderung gilt nicht mehr bei sehr tiefer Temperatur. Hier fällt der spezifische Widerstand der meisten Metalle sehr steil ab, wie in Bild 5 schematisch dargestellt ist.

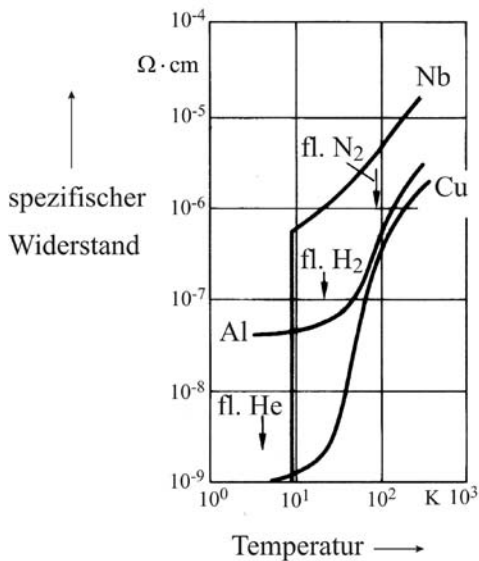


Bild 5: Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes  $\rho$  nach [Pesc98] (26073-3)

Der spezifische Widerstand von Kupfer und Aluminium nähert sich bei tiefer Temperatur einem niedrigen Restwert. Dagegen springt bei Niob (Nb) und einigen anderen Werkstoffen der spezifische Widerstand unterhalb einer kritischen Temperatur (Sprungtemperatur) nahe des absoluten Nullpunktes auf nahezu Null; der Werkstoff wird supraleitend. Im Zustand der Supraleitung entstehen fast keine stromabhängigen Verluste. Oberhalb der kritischen Temperatur leitet der Werkstoff schlecht. Wird der Leiter einer zu hohen magnetischen Flussdichte ausgesetzt, geht die Supraleitfähigkeit ebenfalls verloren. Das kann auch durch das eigene magnetische Feld des Supraleiters eintreten, wenn der Leiter einen hohen, kurzschlussartigen Strom führt. Deshalb können Supraleiterkabel nur bei entsprechend tiefer Temperatur und bei nicht zu hoher Stromdichte betrieben werden. Die Höchstwerte von Temperatur, Stromdichte und Flussdichte sind von einander und vom Werkstoff des Supraleiters abhängig.

In den Jahren 1986/87 wurden keramische Supraleiter gefunden, deren Sprungtemperatur bei etwa 100 K liegt. Das entspricht etwa  $-173^{\circ}\text{C}$ . Diese Werkstoffe werden Hochtemperatur-Supraleiter genannt. Zur Kühlung wird flüssiger Stickstoff mit einer Temperatur von weniger als 77 K (also  $-196^{\circ}\text{C}$ ) verwendet. Deshalb ist der Aufwand für die Kühlung auf der gesamten Länge des Kabels hoch [Funk93; Srot01].

Kabel mit Supraleitern sind zur Übertragung großer Leistungen mit mittlerer oder hoher Spannung geeignet. Ihre kritische Stromstärke liegt im Bereich einiger kA [Nass03; Okub10].

### 3.1.2 Messung des Widerstandes bei Gleichstrom

Der Widerstand bei Gleichstrom wird mit Widerstandsmessgeräten erfasst. Sie wenden die Strom-Spannungs-Messmethode in Vierleiterschaltung an. Ein eingepprägter Strom von etwa  $100\ \mu\text{A}$  bis 10 A erzeugt am Prüfling einen Spannungsfall, der gemessen und verarbeitet wird [Slem93]. Ein Rechenprogramm kompensiert selbsttätig den Einfluss der aktuellen Temperatur des Prüflings. So wird direkt angezeigt, welchen Widerstand der Prüfling bei  $20^{\circ}\text{C}$  hat. Dieser Widerstand ist dann auch für die rechnerische Weiterbearbeitung verfügbar.

Da die zu messenden Widerstände klein sind, ist stets auf den richtigen Anschluss der den Strom zuführenden und der die Spannung abgreifenden Klemmen zu achten. Der Kontaktwiderstand der Stromklemmen darf nicht mitgemessen werden. Dies ist in Bild 6 dargestellt.

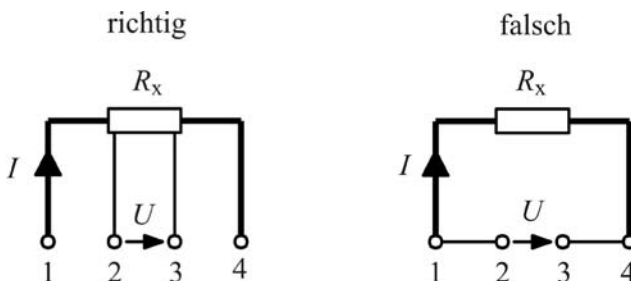


Bild 6: Anschlüsse bei der Messung des Gleichstromwiderstandes

(4/43-2)



*Bild 7: Einspannvorrichtung zur Messung des Widerstandes langer Leiter*

*(69/7) (Foto: Burster)*

Bild 7 zeigt eine Einspannvorrichtung für lange Leiter mit großem Querschnitt. Die Messlänge beträgt 1000 mm. Rechts und links sind die den Strom zuführenden Anschlussklemmen zu erkennen. Die Klemmen für den Spannungsabgriff liegen etwa 400 mm von den Stromklemmen entfernt. Dieser Abstand ist bei Leiterquerschnitten über  $100 \text{ mm}^2$  erforderlich, weil innerhalb der Mess-Strecke im Leiter ein homogenes elektrisches Strömungsfeld vorhanden sein muss. Nur so kann der Widerstand des Leiters fehlerfrei gemessen werden. Zwischen den Klemmen für die Stromzuführung und dem Spannungsabgriff geht das anfangs inhomogene Strömungsfeld in ein homogenes Strömungsfeld über. Handelsüblich sind auch Einspannvorrichtungen, bei denen die gesamte Messlänge in einem temperierten Wasserbad liegt, so dass die Temperatur des Prüflings auf einen bestimmten Wert eingestellt werden kann. Dabei ist auf den Temperatureausgleich zwischen Wasserbad und Prüfling zu achten.

Die Widerstandsmessung ist wichtig, weil gemäß VDE 0295 nicht der geometrische Nennquerschnitt eines Kabels eingehalten werden muss, sondern vielmehr der Widerstand, der unter Normalbedingungen (bei  $20^\circ\text{C}$ ) dem zugeordneten Nennquerschnitt entspricht. Also wird eigentlich nicht ein Leiterquerschnitt, sondern ein Widerstand bestellt und verkauft! Tatsächlich ist für den Betreiber eines Kabels der Widerstand eines Kabels wichtiger als der Querschnitt, weil vom Widerstand die Verlustleistung und die Strombelastbarkeit abhängen. Für den Hersteller des Kabels ist es dagegen wichtig, den zulässigen Höchstwert des Widerstandes mit möglichst geringem Einsatz von Leiterwerkstoff und mit möglichst effizienten Fertigungsverfahren zu erreichen. Der spezifische Widerstand von Kupfer und Aluminium hängt vom Reinheitsgrad des Metalls ab. Der Reinheitsgrad bestimmt generell den Preis. Allerdings schreibt die Norm auch Mindest- und Höchstwerte für den Leiterdurchmesser vor.

Drähte, Litzen, Leitungen und Kabel der amerikanischen Elektroindustrie werden mit AWG-Nummern gekennzeichnet (AWG = American Wire Gauge, amerikanische Drahtlehre). Die AWG-Nummern stammen aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, als die Drahtzieher entdeckten, dass das Drahtziehen leichter wird und beim Ziehen weniger Brüche auftreten, wenn die Querschnittsfläche der Drähte in bestimmten konstanten Stufen verringert wird. Die amerikanische Drahtlehre beruht darauf, dass sich von einer Lehrenummer zur nächsten der Querschnitt des Drahtes um jeweils 26% vermindert. Auf angelsächsischen Märkten existieren weitere Drahtlehren, die in [Worz09] tabelliert wiedergegeben sind.

Im Gegensatz zu den Leitern werden bei Schirmen aus Kupfer der Höchstwert des spezifischen Widerstandes mit  $\rho = 0,01786 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  und der gesamte geometrische Querschnitt aller Schirmungselemente vorgegeben [Hein99]. Der Schirm soll die Wärmemenge aufnehmen, die während der kurzen Zeit eines Kurzschlusses auftritt. Er darf sich dabei nicht unzulässig hoch erwärmen. Die Temperaturerhöhung im Kurzschlussfall ist in erster Linie von der Verlustarbeit und von der Wärmekapazität des Schirmes abhängig. Durch die genormten Werte für den spezifischen Widerstand und den geometrischen Querschnitt bieten die heutigen Kupferschirme etwa die gleiche Sicherheit wie die früher üblichen Bleimäntel von Massekabeln [Hetz72; Hove10]. Bei metallenen Kabelmänteln und Schirmen sollte man prüfen, ob bei länger andauernden Kurzschlüssen die Erwärmung noch adiabatisch verläuft und die zulässige Grenztemperatur nicht überschritten wird [Mire10] (Abschnitt 3.10.2).

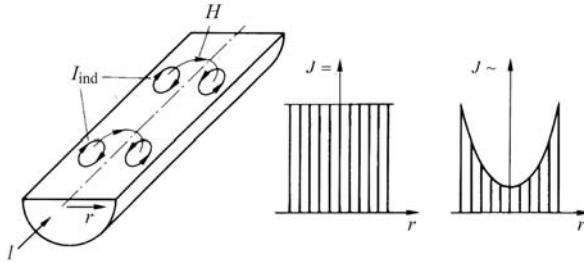
### 3.1.3 Wirkwiderstand bei Wechselstrom

Im Wirkwiderstand bei Wechselstrom berücksichtigt man die Zusatzverluste durch Stromverdrängung im Leiter (Skineneffekt, Proximity- oder Näheeffekt), durch die Ummagnetisierungsverluste in Stahlbewehrungen, durch Wirbelströme in Metallmänteln, Bewehrungen und benachbarten Metallteilen sowie durch induzierte Schirm- bzw. Mantelströme [Hein99; Artb61].

Der Wirkwiderstandsbelag  $R'_w$  ergibt sich aus dem Widerstandsbelag  $R'$  bei Gleichstrom und dem beim Wechselstrom auftretenden Zusatzwiderstandsbelag  $\Delta R'$  nach Gleichung (5).

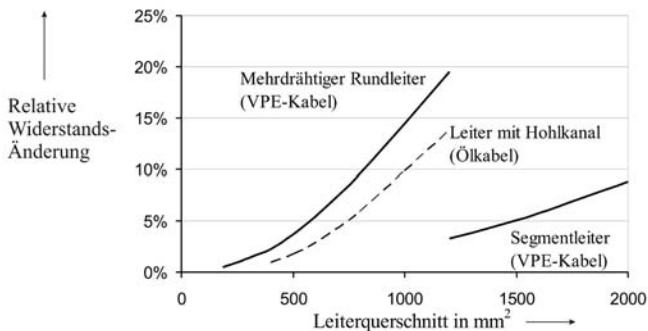
$$(5) \quad R'_w = R' + \Delta R'$$

Beispiele für den Zusatzwiderstandsbelag  $\Delta R'$  sind in [Siem71] angegeben.



**Bild 8:** Skin-Effekt und unterschiedliche Stromdichte  $J$  bei Gleich- und Wechselstrom, prinzipiell dargestellt nach [Artb61] (32139-2)  
 $H$  Feldstärke des magnetischen Wechselfeldes  
 $I_{ind}$  induzierter Wirbelstrom

Unter Skin-Effekt versteht man die Verdrängung des Stromes zur Oberfläche des Leiters hin [Nerr06]. Dies ist in Bild 8 prinzipiell dargestellt. Durch das magnetische Eigenfeld mit der Feldstärke  $H$  des von Wechselstrom durchflossenen Leiters werden Wirbelströme  $I_{ind}$  induziert, die sich dem Leiterstrom überlagern. Dadurch entsteht eine ungleichmäßige Stromverteilung im Leiterquerschnitt, was sich in einer scheinbaren Abnahme des leitenden Querschnittes und einer Zunahme des Widerstandes bemerkbar macht. Wie Bild 9 zeigt, gewinnt der Skin-Effekt bei der Frequenz 50 Hz bei großen Leiterquerschnitten zunehmend an Einfluss. Eine Aufteilung des Leiters in einzelne Segmente vermindert den Skin-Effekt.



**Bild 9:** Relative Widerstandserhöhung infolge des Skin-Effekts bei 50 Hz (Daten: Nexans) (70/34-2)