



Werkstoffkenngrößen elektro-technischer Bauelemente (1)

Die stromleitenden, dielektrischen und magnetischen Eigenschaften von Werkstoffen können quantitativ nur durch entsprechende Kenngrößen bewertet werden. Sie können dann einen optimalen Werkstoffeinsatz in den Bauelementen der Elektrotechnik gewährleisten.

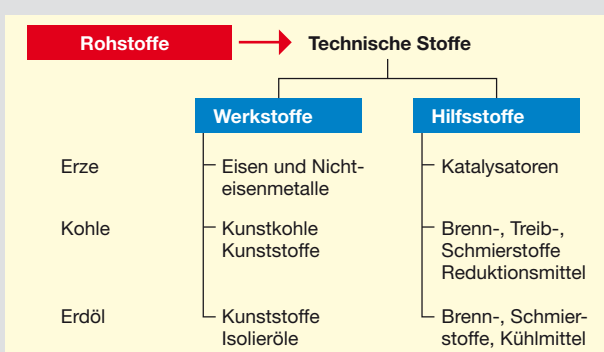
Rohstoffe sind im Allgemeinen Naturstoffe wie zum Beispiel Erze, Kohle, Holz und Öl sowie zur weiteren Verarbeitung aufbereitete Naturstoffe, ebenso Sekundärrohstoffe. Aus Rohstoffen entstehen durch Weiterverarbeitung technische Stoffe. Sie stellen Zwischenprodukte im Prozess der Rohstoffveredlung dar, die je nach Anwendungsgebiet als Werkstoffe oder als Hilfsstoffe eingesetzt werden (Bild 1).

Werkstoffe sind Zwischenprodukte, aus denen durch Be- und Verarbeitungsverfahren Halbfertig- oder Fertigerzeugnisse hergestellt werden.

Hilfsstoffe sind entweder zur Herstellung bzw. zur Vergütung der Werkstoffe erforderlich oder gewährleisten erst den Einsatz dieser Stoffe. Die Hilfsstoffe gehen nicht oder nur unbedeutend in die Werkstoffe, damit in die Erzeugnisse ein.

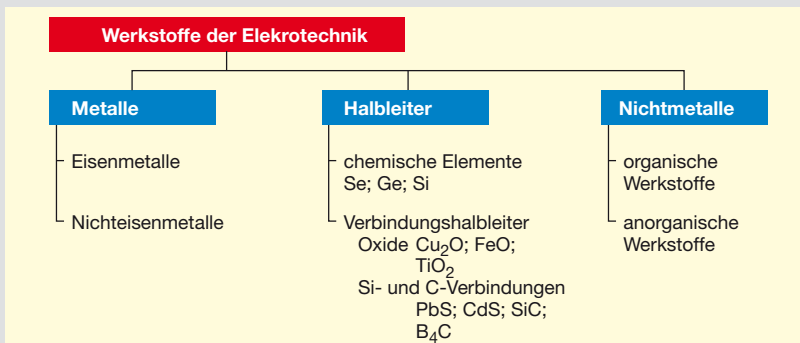
Merkmale der Werkstoffe

Aus der Sicht der Werkstoffkunde wird zwischen Rohstoffen, Werkstoffen und Hilfsstoffen unterschieden.



1 Einteilung der Stoffe aus der Sicht ihrer technischen Anwendung

2 Werkstoffgruppen der Elektrotechnik



INHALT	
Grundwissen Lernfelder 1-5	
Werkstoffkunde	
Werkstoffgrößen elektro-technischer Bauelemente (1)	1
Fachbegriffe	
Was versteht man unter	4
Fachwissen Lernfelder 6-13	
Regelungstechnik	
Temperaturmesstechnik (3)	6
Antennentechnik	
Satellitenempfang (7)	8
Arbeitssicherheit	
Beleuchtung am Arbeitsplatz (5)	10
Impressum	11
Fremdsprache	
Technisches Englisch	12
WISO	
Wirtschafts-, Sozial- und Gemeinschaftskunde	13
Prüfung Lernfelder 1-13	
Fachtest	
Fachtest GET	14
Fachtest GT	15
Lösungen	16

Einteilung. In der Technik werden Werkstoffe meist in Metalle und Nichtmetalle unterteilt. Aufgrund der Bedeutung von Halbleiterwerkstoffen werden diese in der Elektrotechnik zusätzlich als eigenständige Werkstoffgruppe betrachtet. Ihre Eigenschaften müssen teils denen der Metalle, teils denen der Nichtmetalle zugeordnet werden. Bild 2 zeigt im Überblick die gebräuchliche Einteilung der Werkstoffe.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, Werkstoffe solchen Hauptgruppen zuzuordnen, die typische Einsatzgebiete dieser Werkstoffe widerspiegeln, zum Beispiel

- Leiterwerkstoffe,
- Kontaktwerkstoffe,
- Widerstandswerkstoffe,
- Isolierstoffe,
- Konstruktionswerkstoffe.

Werkstoffe müssen die durch die Konstruktion eines Bauelementes oder einer Anlage vorausgesetzten Gebrauchseigenschaften erfüllen. In der Technik beschränken sich diese auf mechanische Parameter, auf thermische Beständigkeit oder auf Korrosionseigenschaften. Die einen Werkstoff als Konstruktionselement kennzeichnenden mechanischen Größen sind zum Beispiel

- Zug-, Druck-, Biege- und Torsionsfestigkeit;
- Elastizitätsmodul;
- Bruchdehnung;
- Dauerfestigkeit und Kerbschlagfähigkeit bei dynamischer Belastung.

Die Elektrotechnik fordert eine wesentlich größere Bandbreite von zusätzlichen, vor allem elektrischen und magnetischen Eigenschaften, von Herstellungsparametern, Eigenschaften dünner Schichten, der Formgebung und der Verbindungstechnik. Die folgenden Aussagen beschränken sich auf Größen, die die Strom führenden, dielektrischen und magnetischen Eigenschaften der Werkstoffe erfassen.

■ Kenngrößen der Leiterwerkstoffe

Die Strom leitende Eigenschaft der Nicht-eisenmetalle ist für deren Hauptanwendungen in der Elektrotechnik als Leiter-, Kontakt- und Widerstandswerkstoffe von grundsätzlicher Bedeutung. In allen Metallen können sich die Elektronen zwischen den in Kristallgitter angeordneten positiven Ionen bewegen.

Ursache für das Fließen des elektrischen Stromes in den Metallen sind die freien Elektronen, die nicht an den Atomkern gebunden sind.

Wird an den metallischen Werkstoff eine Spannung angelegt, entsteht durch die elektrische Feldstärke zu der vorher ungeordneten Elektronenbewegung eine Bewegung in Richtung der elektrischen Strömungslinien. Die Geschwindigkeit dieser Driftbewegung ist von der elektrischen Feldstärke und von dem Maß der Bewegungsfähigkeit der Elektronen im Gitter abhängig. Diese wird durch

- Fremdatome im Gitter des Basismetalls,
- plastische Formänderungen und vor allem durch die
- Temperatur beeinflusst.

Die Leitfähigkeit der Metalle hängt deshalb von ihrer Reinheit ab und wird bei einem gewollten Einbau von Fremdatomen als Legierungen des Basismetalls oft zu besseren mechanischen Eigenschaften aber stets zu einer Minderung der elektrischen Leitfähigkeit führen.

Leiterwerkstoffe, zum Beispiel für Installationsleitungen, Freileitungen, Kabeln, Stromschienen, Wicklungen ebenso Kontaktwerkstoffe für Relais-, Schütz- und Schalterkontakte, sollen mit möglichst geringen Verlusten den Strom gut leiten. Widerstandswerkstoffe als Heizleiter, technische Widerstände oder Messwiderstände sollen dagegen bei möglichst geringem

Tafel 1 Kenngrößen von Leiter- und Widerstandswerkstoffen

Leiter- und Kontaktwerkstoffe	elektrische Leitfähigkeit in $m/(\Omega \cdot mm^2)$ bei 20 °C	linearer Temperaturkoeffizient in 10 ⁻³ 1/K
Kupfer	56	3,93
Aluminium	35	3,77
Silber	61,3	3,8
Gold	45,4	4,0
Sinterlegierung Ag-Ni	35,7 – 50	–
Tränklegerung W-Cu	25 – 15,15	–
Widerstandswerkstoffe	spezifischer elektrischer Widerstand in $\Omega \cdot mm^2/m$	linearer Temperaturkoeffizient in 10 ⁻⁶ 1/K
Konstantan	0,5	±40
Nickelin	0,40	+140
Manganin	0,43	+20

Materialeinsatz den Stromdurchgang behindern. Für beide entgegen gesetzten Forderungen ist es sinnvoll, zwei Kenngrößen für die Strom leitende Eigenschaft einzuführen. Dies sind die elektrische Leitfähigkeit (Konduktivität) und der spezifische elektrische Widerstand (Resistivität).

Elektrische Leitfähigkeit

Die Konduktivität wird von der Werkstoff abhängigen Konzentration der Leitungselektronen und der Elektronenbeweglichkeit bestimmt. In der berufsbildenden Literatur wird als Formelzeichen überwiegend κ (Kappa) verwendet. In DIN 1304-1 (Formelzeichen; allgemeine Formelzeichen) sind auch die griechischen Buchstaben γ (Gamma) und σ (Sigma) festgelegt. Die Einheit der elektrischen Leitfähigkeit wird in DIN 1301-2 (Einheiten; allgemein angewendete Teile und Vielfache) in Siemens pro Meter [κ] = 1 S/m angegeben.

Spezifischer elektrischer Widerstand

Wie die Bezeichnung „Widerstand“ verdeutlicht, wird die Eigenschaft eines Stoffes, sich dem Stromdurchgang zu widersetzen, durch die Resistivität – Formelzeichen ρ (Rho) – quantitativ erfasst. Je größer der Widerstand eines Werkstoffes ist, umso geringer ist sein Leistungsvermögen. Logischerweise ist deshalb die Werkstoffkenngröße „spezifischer elektrischer Widerstand“ als Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit definiert:

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad (1)$$

Mit der Gleichung (1) kann die Einheit

$$[\rho] = \frac{1}{1 \text{ S/m}} \text{ und mit } 1 \text{ S} = \frac{1}{\Omega} [\rho] = 1 \Omega \cdot m$$

abgeleitet werden.

Durch die Bemessungsgleichung des Widerstandes für linienhafte Leiter mit der Leiterlänge l und dem Leiterquerschnitt A

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad (2)$$

ergibt sich die Einheit auch durch $[\rho] = 1 \Omega \cdot m^2/m$ und bei Angabe des Leiter-

querschnitts in mm^2 durch $[\rho] = 10^6 \cdot \Omega \cdot mm^2/m$.

Die Einheit der Konduktivität ist dann nach (1):

$$[\kappa] = 10^{-6} \cdot m/(\Omega \cdot mm^2)$$

Temperaturabhängigkeit

Mit zunehmender Temperatur schwingen die Kristallgitter stärker. Die Beweglichkeit der freien Elektronen wird durch die Verringerung ihrer freien Weglänge eingeschränkt. Mithin steigt der spezifische elektrische Widerstand bzw. die Konduktivität der Metalle sinkt. Diese Temperaturabhängigkeit wird durch die Berechnungsgleichung (3) für die Resistivität bei der Temperatur ϑ beschrieben:

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta + \beta_{20} \cdot \Delta\vartheta^2) \quad (3)$$

ρ_{20} Resistivität bei 20 °C

$\Delta\vartheta$ Differenz der Temperatur zu 20 °C

α_{20} linearer Temperaturkoeffizient des Widerstandes bei 20 °C,

β_{20} quadratischer Temperaturkoeffizient des Widerstandes bei 20 °C.

Der lineare Temperaturkoeffizient ist bei Metallen im Allgemeinen positiv und liegt im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ 1/K bis $6,3 \cdot 10^{-3}$ 1/K. Bei Temperaturdifferenzen unter 1000 K wird der Summand $\beta_{20} \cdot \Delta\vartheta^2$ vernachlässigt.

Die in Tafel 1 angegebenen Zahlenwerte der elektrischen Leitfähigkeit sind die Leitwerte in S von Drähten mit einer Länge von 1 m und einem Querschnitt von 1 mm^2 und die Zahlenwerte des spezifischen elektrischen Widerstandes die Widerstandswerte in Ω ebenfalls von Drähten mit einer Länge von 1 m und einem Querschnitt von 1 mm^2 .

■ Kenngrößen der Isolierstoffe

Der sehr hohe elektrische Widerstand der Isolierstoffe hat seine Ursache in der verschwindend geringen Elektronenleitung. Verunreinigungen von niedermolekularen

Monomerresten, Katalysatorresten, Weichmachern und Reaktionsprodukten reduzieren durch Ionenleitungen den Volumen- und den Oberflächenwiderstand. Da die Isolierstoffe sich zwischen spannungsführenden Leitern oder der Erde befinden, werden die Isolierstoffatome und -moleküle durch die elektrischen Felder polarisiert. Bei der sog. Elektronenpolarisation verschieben sich die Bahnen der elastisch an den Atomkernen gebundenen Elektronen der Atomhülle. An der einen Seite des Atoms überwiegen die Wirkungen der negativen Ladungen der Elektronen, an der anderen die der positiven des Kerns. Zusätzlich werden die ebenfalls elastisch an ihren Gitterplatz gebundenen Ionen ausgelenkt. Die Isolierstoffmoleküle besitzen im elektrischen Feld Dipolcharakter.

Kennzeichnend für das Verhalten der Isolierstoffe im elektrischen Feld sind die Permittivität, die Durchschlagsfestigkeit und der dielektrische Verlustfaktor.

Permittivität

Die Permittivität – Formelzeichen ϵ (Epsilon) – früher als Dielektrizitätskonstante DK bezeichnet, charakterisiert das Verhalten eines Isolierstoffs im elektrostatischen Feld. Sie ist mit der elektrischen Leitfähigkeit κ vergleichbar. κ erfasst jedoch den Einfluss des Leiterwerkstoffes auf das elektrische Strömungsfeld. Weiterhin werden die Materialwerte der Nichtleiter im Gegensatz zu κ als Produkte der elektrischen Feldkonstanten (Influenzkonstante) $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} / (\text{V} \cdot \text{m})$ und der relativen Permittivität ϵ_r angegeben:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (4)$$

$$[\epsilon] = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} = \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

F Farad

Die relative Permittivität ist eine Vergleichszahl. Sie gibt an, wie viel Mal leichter ein elektrostatisches Feld in einem Isolierstoff im Vergleich zum leeren Raum, annähernd auch zu Luft, aufgebaut werden kann. Nur die Werte von ϵ_r werden in den Tabellenwerken angegeben (Tafel 2).

Durchschlagsfestigkeit

Unter dem Einfluss hoher elektrischer Feldstärken können die Kräfte auf die Elektronen in den Isolierstoffatomen so

groß werden, dass sie sich vom Atomkern lösen. Die entstehenden Spannungsdurchbrüche heben die isolierende Eigenschaft des Werkstoffes auf. Als Durchschlagsfestigkeit bezeichnet man die elektrische Feldstärke, bei der ein Isolierstoff gerade durchschlagen kann. Sie ist von der

- Spannungsform: Gleich-, Wechsel- oder Stoßspannung,
- Dicke des Isolierstoffes und von der
- Temperatur abhängig.

Durchschlagsfestigkeit

$$E_D = \frac{U_D}{a} \quad (5)$$

$[E_D] = \text{kV/mm}$ oder kV/cm
 U_D Durchschlagsspannung
 a Isolierstoffdicke

Da die Durchschlagsfestigkeit meist nicht linear mit der Dicke des Isolierstoffes ansteigt, können Angaben für eine bestimmte Isolierstoffdicke nicht ohne Weiters auf andere Dicken übertragen werden (Tafel 2).

Dielektrischer Verlustfaktor

Bei Wechselspannung entstehen durch die periodische Umpolarisierung der Isolierstoffmoleküle innere Reibungen, die den Isolierstoff erwärmen und als Verluste zu werten sind. Insbesondere bei Kondensatoren als Leiter-Nichtleiter-Leiter-Anordnungen ist der dielektrische Verlustfaktor d ein Maß für diese Verluste. Er ist als Verhältnis von Wirkleistung P zur Blindleistung Q definiert. Bei sinusförmigen Wechselspannungen ist er gleich dem Tangens des Verlustwinkels δ (Tafel 2).

Dielektrischer Verlustfaktor

$$d = \frac{P}{Q} \quad d = \tan \delta \quad (6)$$

Der Verlustwinkel δ ist der Winkel, um den sich der Phasenverschiebungswinkel $\varphi = 90^\circ$ zwischen Strom und Spannung eines idealen Kondensators durch die Verluste verringert. Zum Beispiel ergibt sich mit dem Tabellenwert des Verlustfaktors von Phenoplaste $\tan \delta = 0,03$ ein Verlustwinkel von $\delta = 1,72^\circ$.

Bei der Mehrzahl der Isolierstoffe ist der Verlustwinkel kleiner als 1° .

Kenngrößen der Magnetwerkstoffe

Der Elektrotechniker beurteilt das magnetische Verhalten der Stoffe danach, wie sie ein von außen wirkendes magnetisches Feld beeinflussen können. Die Ursache von magnetischen Feldern sind sich bewegende Ladungen, die durch einen vom Strom durchflossenen Leiter (Spule) oder durch die Drehbewegung der Elektronen um ihre eigene Achse (Elektronenspin) entstehen.

Die Wirkungen der Stoffe, die sich in einem Magnetfeld befinden, sind sehr unterschiedlich. Der größte Teil zeigt kaum Abweichungen gegenüber Luft, andere erhöhen die magnetischen Kräfte erheblich. Das Gemeinsame aller Stoffe ist, dass sie die magnetischen Feldlinien leiten.

Alle Stoffe können von einem magnetischen Feld durchsetzt werden.

Permeabilität

Die Größe, die die magnetische Durchlässigkeit der Stoffe kennzeichnet, ist die Permeabilität μ (Müh). Analog der Permittivität der Isolierstoffe wird die Permeabilität auch als Produkt angegeben aus der magnetischen Feldkonstanten $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s} / (\text{A} \cdot \text{m})$ und der relativen Permeabilität μ_r :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (7)$$

$$[\mu] = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

H Henry

Die relative Permeabilität ist eine Vergleichszahl, die angibt, wie viel Mal besser ein Stoff die magnetischen Feldlinien als der leere Raum – annähernd auch Luft – leitet. Dementselben Bildungsgesetz wie Gleichung (2) des elektrischen Widerstandes folgt die Berechnungsgleichung des magnetischen Widerstandes:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (8)$$

Mit der Länge l des von den magnetischen Feldlinien durchsetzten Stoffes, seinem Querschnitt A und der Permeabilität μ .

H. Spanneberg

Tafel 2 Kenngrößen von Isolierstoffen

organische Isolierstoffe	relative Permittivität ϵ	Verlustfaktor d bei 50 Hz	Durchschlagsfestigkeit in kV/mm
Vulkanfaser	4 ... 7	$80 \cdot 10^{-4}$	3 ... 5
Phenoplaste	5	$300 \cdot 10^{-4}$	10
Epoxidharz	3,5 ... 4,5	$8 \dots 20 \cdot 10^{-4}$	25 ... 45
Polystyrol	2,6 ... 2,7	$0,1 \cdot 10^{-4}$	100
Polyvinylchlorid PVC-H	3,2 ... 3,8	$20 \dots 30 \cdot 10^{-4}$	40 ... 50

Fortsetzung  LERNEN & KÖNNEN

Einfluss auf elektromagnetische Felder