

Versuch: Elektrische Eigenschaften von Materialien (IGP)

1 Grundlagen

1.1 Allgemeines

Elektrische Eigenschaften von Werkstoffen, die im Maschinenbau und in der Elektrotechnik/Elektronik Anwendung finden, werden nicht durch einen einzigen Kennwert, sondern durch mehrere Kennwerte beschrieben. Außer den di- und piezoelektrischen Kennwerten, die hier nicht behandelt werden, sind es:

- die elektrische Leitfähigkeit κ_D [S/m],
- die Oberflächenleitfähigkeit κ_O [S/m],
- die elektrische Durchschlagsfestigkeit E_d [kV/mm] und
- die Kriechstromfestigkeit E_k [kV/mm].

Die Bedeutung dieser elektrischen Kenndaten hängt vom Werkstoff selbst und seiner Anwendung ab. Für elektrische Leiterwerkstoffe (Cu, Ag, Au, ...Pt) sind die elektrische Leitfähigkeit oder ihr Kehrwert, der spezifische elektrische Widerstand, ausschlaggebend. Bei Isolierwerkstoffen - Materialien zum Trennen von Potentialdifferenzen (Kunststoffe, Keramiken, Gläser) - spielen vor allem die elektrische Durchschlagsfestigkeit, die Oberflächenleitfähigkeit sowie die Kriechstromfestigkeit eine Rolle.

Die elektrischen Eigenschaften werden von der chemischen Zusammensetzung, den Bindungen und den Leitungsmechanismen in den Materialien bestimmt.

1.2 Bindungsarten in Festkörpern

Nach der traditionellen Klassifizierung unterscheidet man drei Werkstoffhauptgruppen, die Metalle, die anorganisch nichtmetallischen Werkstoffe und die Kunststoffe. Neben den Werkstoffen der drei Hauptgruppen gibt es die Verbundwerkstoffe, die einen mikroskopisch homogenen Verbund von Werkstoffen verschiedener Werkstoffhauptgruppen darstellen und demzufolge die Eigenschaften ihrer Komponenten integrieren. Zunehmend entstehen Werkstoffe, deren Eigenschaften nicht mehr in das Gesamtbild einer Werkstoffhauptgruppe passen, beispielsweise die Kohlenstoffwerkstoffe, die über eine gute oder auch schlechte elektrische Leitfähigkeit verfügen können.

Die Werkstoffhauptgruppen unterscheiden sich durch den chemisch strukturellen Aufbau der zugehörigen Werkstoffe voneinander.

Jedes Atom hat das Bestreben, in seiner äußeren Schale einen stabilen Zustand zu erreichen. Dies wird entweder durch

- Aufnahme oder Abgabe von Elektronen sowie
- gemeinsame Elektronenbahnen für mehrere Atome erreicht.

Dadurch wird im ersten Fall das elektrisch neutrale Atom zum Ion. Es baut ein elektrostatisches Feld zu anderen Ladungsträgern auf und übt darüber eine Kraftwirkung auf seine Umgebung aus.

In Metallen liegen Bindungen vor, die nicht alle Elektronen in den Außenschalen der Atome benötigen. Da in einem reinen Metall auch keine Bausteine vorhanden sind, die Elektronen aufnehmen können, bleiben diese Elektronen ungebunden (Valenzelektronen/ Elektronengas/ Ladungsträgerwolke). Die elektrostatischen Kräfte zwischen den freien Elektronen und den Atomrümpfen sowie den Atomrümpfen untereinander sind charakteristisch für die **metallische Bindung**. Zwischen den Atomrümpfen und den freien Elektronen bestehen anziehende elektrostatische Kräfte. Andererseits stoßen sich die gleichartig geladenen Atomrümpfe ab. Für einen bestimmten Abstand zweier Atomrümpfe eines Stoffes sind die Kräfte im Gleichgewicht. Diese Gleichgewichtslage führt zu einer regelmäßigen Anordnung der einzelnen Atome – zu einem kristallinen Aufbau.

Praktisch unterscheidet man den idealen Gitteraufbau (Idealkristall), wie er eigentlich nur theoretisch auftritt, und den Realkristall, der durch eine Vielzahl möglicher Gitterbaufehler (z. B. Leerstellen, Zwischengitteratome, Stufenversetzung, Schraubenversetzung, Stapelfehler) gekennzeichnet ist.

Kunststoffe sind in ihren wesentlichen Bestandteilen organische Stoffe. Kunststoffe sind aus Molekülen, in sich abgeschlossene Einheiten aus mehreren Atomen, aufgebaut. Feste Werkstoffe entstehen bei gleichzeitiger Wirkung von Nebenvalenzbindungen dann, wenn die Atomzahl im Molekül sehr hoch ist, d.h. wenn Makromoleküle vorliegen. Beim Aufbau von Makromolekülen reagieren nur einzelne in den Molekülen niedermolekularer Verbindungen enthaltene Atome oder Atomgruppen, die funktionellen Gruppen, miteinander.

Die Ausgangsmoleküle sind faden- oder kettenförmig angeordnet und gegebenenfalls mehr oder weniger verzweigt. Teilweise können sich die Ausgangsmoleküle auch zu einem Gebilde zusammenschließen, in dem sie eng miteinander verzahnt sind. Ausgangsstoffe niedermolekularer Art heißen Monomer. Durch Verknüpfung dieser zu Makromolekülen entstehen Polymere.

Ein Kennzeichen aller Moleküle ist, dass der Zusammenschluss der Atome zum Molekül vorrangig durch **kovalente Bindung** (Atombindung) erfolgt. Zwischen den Makromolekülen wirken zwischenmolekulare Nebenvalenzkräfte. Als Folge der kovalenten Bindung liegen keine freien Elektronen vor.

Im Gegensatz zur metallischen Bindung werden bei der **Ionenbindung** (heteropolare Bindung) - vorwiegend bei anorganisch nichtmetallischen Werkstoffen - Elektronen von einem Atom abgegeben und von einem anderen aufgenommen. Der Abstand zwischen den Ionen stellt sich auch hier aus dem Gleichgewicht von Anziehungs- und Abstoßungskräften ein. Allerdings muss man unterscheiden zwischen Werkstoffen, die sowohl eine Nah- als auch eine Fernordnung haben (kristalline Struktur: Basis für Keramiken) und Werkstoffen, die nur eine Nahordnung der Bausteine aufweisen (amorphe Struktur: Basis für Gläser).

Bei Keramiken und Gläsern treten aber vor allem **Hybridbindungen** auf, d.h. es handelt sich nicht um eine reine Bindungsart, sondern um eine Mischform zwischen Ionenbindung und kovalenter Bindung.

1.3 Leitungsmechanismen

Im festen Körper entstehen Energiebänder mit vielen dicht gestaffelten Energieniveaus. Für die elektrische Leitfähigkeit sind die beiden äußeren Energiebänder (Leitungs- und Valenzband) bedeutsam (Bild 1).

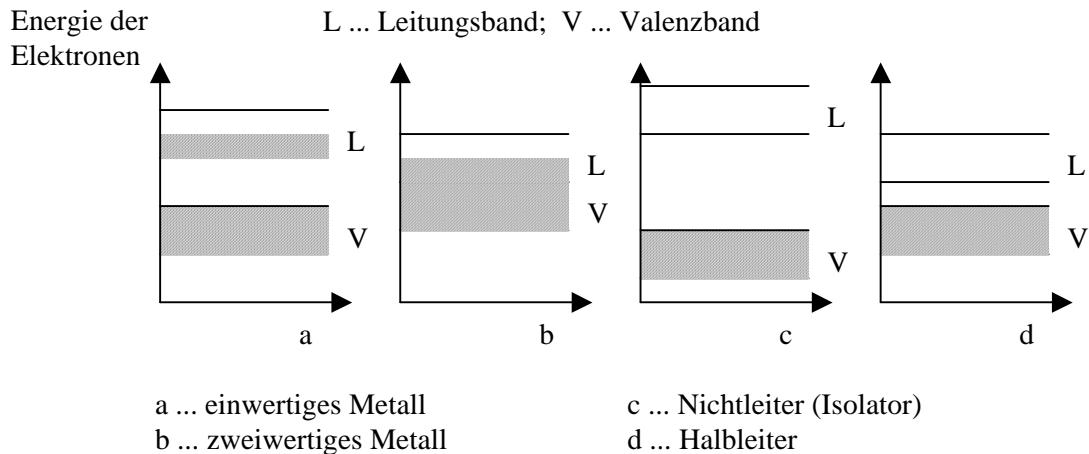


Bild 1: Anordnung der beiden äußeren Energiebänder für unterschiedliche Werkstoffe

In Metallen tritt **Elektronenleitung** auf. Durch die nahezu frei beweglichen Elektronen infolge der metallischen Bindung ist die Leitfähigkeit sehr hoch.

Besonders hoch ist die elektrische Leitfähigkeit, wenn sich nur ein Elektron in der äußeren Schale befindet (z. B. Kupfer, Silber, Gold), d.h. das Leitfähigkeitsband nur halb gefüllt ist. Bei zweiwertigen Metallen (z.B. Eisen, Nickel, Zink, Platin) ist das Valenzband infolge von Wechselwirkungen so breit, dass es sich mit dem Leitungsband überlappt. In beiden Fällen können die Elektronen benachbarter Atome leicht die noch freien Energiezustände im Leitungsband annehmen.

Fehler im strukturellen Aufbau der Metalle (Gitterbaufehler) behindern den Ladungstransport und verringern die Leitfähigkeit. Mit steigender Temperatur verringert sich die elektrische Leitfähigkeit, da die thermischen Eigenschwingungen der Atome auf ihren Gitterplätzen zunehmen und damit die Elektronenwanderung behindern.

Für Isolatoren und Halbleiter ist das Leitungsband aufgrund der Bindungen jeweils leer. Es ist durch einen Energiebereich (verbotene Zone) vom Valenzband getrennt. Bei einer breit ausgeprägten verbotenen Zone handelt es sich um einen Isolator. Ist die verbotene Zone nur sehr schmal, so dass durch die Zufuhr von Energie (z. B. über das elektrische Feld oder durch Erwärmung) ein Elektronenübergang in das Leitungsband möglich ist, dann handelt es sich um Halbleiter. Bei Halbleitern ist die verbotene Zone definitionsgemäß $< 2,5 \text{ eV}$.

In Gläsern und Keramiken liegen in der Regel keine freien Elektronen, jedoch Ionen vor. Die Elektronen sind fest gebunden. Mit den Ionen ist eine **Ionenleitung** möglich. Allerdings benötigt man dazu hohe elektrische Feldstärken, die unter der Durchschlagfestigkeit des Glases liegen müssen. Der spezifische elektrische Widerstand von Festkörpern mit Ionenbindung ist somit bei Raumtemperatur sehr hoch. Der geringe Ladungstransport wird vor allem durch die einwertigen Kationen möglich – insbesondere, wenn sie kleine Ionenradien (Lithium, Natrium, Kalium) besitzen. An der Ionenleitung nehmen bei Gläsern oberhalb des dilatometrischen Erweichungspunktes in zunehmendem Maße auch Anionen teil.

Infolge Platzwechsels der Ionen wird die elektrische Ladung weitergegeben, so dass neben Ladungstransport auch Materialtransport auftritt.

Bestimmend für diese Prozesse sind Ionenradius, -beweglichkeit und -konzentration sowie die Ladung, und bei Gläsern auch das Netzwerk bzw. bei Keramiken die Kristall- oder Gefügestruktur. Sie ergeben den Widerstand, den die Werkstoffstruktur einer Ionenwanderung unter Einwirkung eines elektrischen Feldes entgegengesetzt. So fällt in Gläsern bei höheren Alkaligehalten der spezifische Durchgangswiderstand überproportional zum Alkaligehalt. Auch der Einfluss der Wärmevergeschichte (z. B. Abkühlung des Glases) ist elektrisch nachweis-

bar, da ein Netzwerk mit geringerer Dichte, das bei einer höheren fiktiven Einfriertemperatur entsteht, die Ladungsträgerbewegung begünstigt.

Für Spezialgläser ist auch eine Leitung durch Elektronen möglich. Elektronenleitung setzt jedoch voraus, dass polyvalente Elemente im Anionen- oder Kationenanteil des Netzwerkes vorhanden sind.

In Elementhalbleitern, z. B. Silizium, unterscheidet man die **Eigenleitung** und die **Störstellenleitung**. Mit steigender Temperatur wird immer mehr Energie zur Verfügung gestellt, die zum Aufbrechen von Elektronenpaarbindungen führt. Dabei werden ständig Elektronen aus ihren Bindungen gelöst und von den positiv geladenen Atomrümpfen wieder eingefangen. Ein herausgelöstes Elektron hinterlässt eine Elektronenleerstelle (Elektronenloch, Defektelektronen), das von einem anderen Elektronen wieder gefüllt werden kann. Der auf diesem Mechanismus beruhende Effekt ist die Eigenleitung.

Ersetzt man in einem Einkristall ein Atom mit 4 Valenzelektronen z. B. durch ein Arsenatom mit 5 Valenzelektronen, dann wird in den Kristall ein Elektron eingeführt, das nicht für die Elektronenpaarbildung benötigt wird. Dieses ist zwar durch die positive Ladung des Arsens gebunden, kann aber durch eine geringe Energie gelöst werden. Arsen ist dann ein Elektronendonator. Da in diesem Fall mehr Elektronen als Löcher vorliegen, ist der Halbleiter n-leitend.

Ähnliches ist beim Einbau dreiwertiger Elemente (z. B. Bor) möglich. In diesem Fall fehlt ein Elektron für die Elektronenpaarbildung. Bor ist in diesem Fall Akzeptor, und das Material ist p-leitend. Diese Leitungsformen werden als Störstellenleitung bezeichnet.

Kunststoffe sind naturgemäß die besten Isoliermaterialien, da im Molekülverband keine frei beweglichen Elektronen vorhanden sind. Der spezifische Durchgangswiderstand von Kunststoffen liegt bei Werten von bis zu $10^{20} \Omega\text{cm}$. Allerdings besitzen reale Kunststoffe eine gewisse Anzahl niedermolekularer Bestandteile, die als Ladungsträger fungieren. Derartige leitfähige Teilchen sind bei der Herstellung meist unvermeidbar und treten in Form von Monomerresten, niedermolekularen Reaktionsprodukten sowie Weichmachern auf.

Zusätzlich gibt es auch leitfähige Kunststoffe. Hierbei sind insbesondere gefüllte Kunststoffe mit leitfähigen Füllstoffen (z. B. Ruß), d.h. Verbundwerkstoffe, zu nennen. Eine andere Gruppe sind intrinsisch leitfähige Polymere. In diesen Werkstoffen wird durch eine spezielle Behandlung ein Polysalz, bestehend aus elektrisch geladenen Ketten mit eingelagerten Ionen, gebildet. Die Elektronen können dann entlang dieser Ketten wandern. Es werden Leitfähigkeiten vergleichbar mit Metallen erreicht.

2 Elektrische Eigenschaften

2.1 Elektrische Leitfähigkeit

Die Fähigkeit eines Materials, einen elektrischen Strom unter Einwirkung eines elektrischen Feldes zu leiten, wird mit der elektrischen Leitfähigkeit κ beschrieben. Der Reziprokwert der elektrischen Leitfähigkeit wird als spezifischer elektrischer Widerstand ρ bezeichnet.

Es gilt das Ohmsche Gesetz gemäß Gl.(1)

$$\vec{j} = \kappa \cdot \vec{E} \quad [\text{A/m}^2] \quad (1)$$

wobei E die elektrische Feldstärke und j die elektrische Stromdichte bezeichnen.

Daraus ergibt sich bei homogenem elektrischen Feld ($E(x,y,z) = \text{const.}$) in einem flächigen Probekörper ($s \ll d$) der spezifische elektrische Durchgangswiderstand ρ_D zu:

$$\rho_D = \frac{R_D \cdot A}{s} \quad [\Omega\text{cm}] \quad (2)$$

- R_D - gemessener Durchgangswiderstand
 A - Äquipotentialfläche des elektrischen Feldes (= Fläche der Meßelektrode)
 s - Abstand der Elektroden (= Dicke des Prüfkörpers).

Die messtechnische Ermittlung des Durchgangswiderstandes R_D erfolgt gemäß DIN IEC 60093, VDE 0303 Teil 30, DIN 53482 oder analogen Normen entsprechend Bild 2.

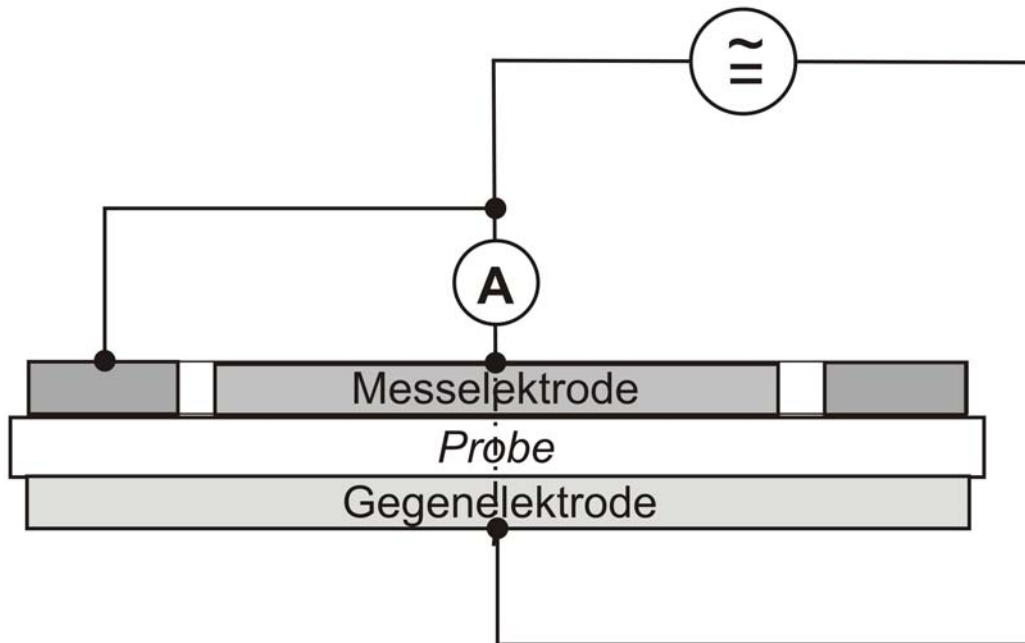


Bild 2: Messanordnung zur Bestimmung des elektrischen Durchgangswiderstandes R_D

Zur Erhöhung der Genauigkeit der R-Bestimmung werden nicht wie in Bild 2 dargestellt Strom- und Spannungsmesser sondern Brückenschaltungen (LCR-Meter) verwendet.

Die Probenoberflächen werden zur Erzielung einer guten Kontaktierung metallisiert (s. Bild 3)

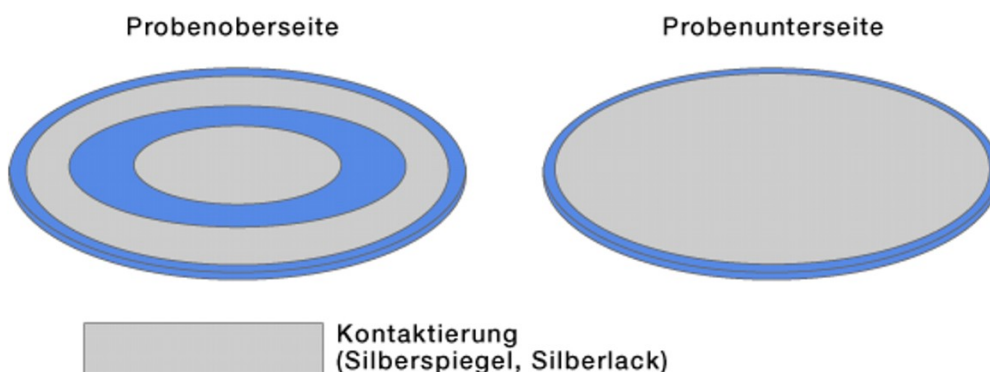


Bild 3: Kontaktierung der Probe für die messtechnische Bestimmung von R_D

Übliche Beschichtungsverfahren sind Bestreichen mit einem/einer leitfähigen Lack/Paste oder Sputtern und Bedampfen mit Silber, Gold oder Platin.

Für die Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes von metallischen Leitern gilt Gl.(3):

$$\rho_D(\vartheta) = \rho_{D,0}[1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (3)$$

$\rho_{D,0}$ - spezifischer elektrischer Widerstand bei der Bezugstemperatur ϑ_0	[Ωcm]
ϑ_0 - Bezugstemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
ϑ - Messtemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
α - Temperaturkoeffizient des spezifischen elektrischen Widerstandes	[1/K]

Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes von Gläsern und Keramiken ist nichtlinear und lässt sich mit dem Gesetz von Rasch und Hinrichsen gemäß Gl.(4) charakterisieren:

$$\lg \rho_D / \Omega\text{cm} = A + \frac{B}{T / ^{\circ}\text{K}} \quad (4)$$

T - absolute Temperatur	[$^{\circ}\text{K}$]
A, B - empirische Konstanten	[1]

Trägt man $(\lg \rho_D)$ in Abhängigkeit von $(\frac{1}{T})$ auf, erhält man für Gläser bis zur Transformationstemperatur T_g und darüber Geraden unterschiedlicher Anstiege.

Im Transformationsbereich wird die elektrische Leitfähigkeit infolge struktureller Umwandlungen stark verändert, was sich in den unterschiedlichen Anstiegen der Geraden äußert. Die Verlängerung der Geraden bis zu ihrem Schnittpunkt ergibt die Transformationstemperatur T_g des Glases.

Aufgrund der nichtlinearen Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur hat man zum Vergleich/Einordnung des elektrischen Verhaltens von Gläsern einen diskreten Wert, den T_{K100} -Wert, eingeführt. Es ist die Temperatur, bei der die Leitfähigkeit des Glases den Wert $100 \cdot 10^{-10} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ beträgt bzw. das Glas den spezifischen elektrischen Widerstand $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ besitzt.

Keramiken ohne Phasenumwandlungen zeigen eine durchgängige Gerade.

2.2 Volumen- und Oberflächenleitfähigkeit

Betrachtet man den Vorgang der elektrischen Leitung in Festkörpern geometrisch, muss man zwischen Volumen- und Oberflächenleitfähigkeit unterscheiden.

Die Volumenleitfähigkeit bezieht sich auf den Ladungstransport durch das Volumen des Festkörpers.

Bei Leitermaterialien (Metalle, ...) ist die Volumenleitfähigkeit in der Regel immer größer als die Oberflächenleitfähigkeit. Bei Isolierwerkstoffen (Kunststoffe, Keramiken, Gläser, ...) liegt die Oberflächenleitfähigkeit in der Größenordnung der Volumenleitfähigkeit. Ist die Oberflächenleitfähigkeit größer als die Volumenleitfähigkeit ist der Einsatz solcher Materialien als Isolierwerkstoff durch die Oberflächenleitfähigkeit begrenzt.

Die Vergrößerung der Oberflächen- gegenüber Volumenleitfähigkeit resultiert aus der Bildung besser leitender Oberflächenschichten, z.B. aufgrund von Effekten bei der Materialherstellung infolge größerer Abkühlgeschwindigkeiten im oberflächennahen Bereich und/oder aufgrund Oberflächenkorrosionen infolge von chemisch und/oder physikalisch bedingten Wasseranlagerungen.

Die Oberflächenleitfähigkeit von Gläsern und Keramiken ist normalerweise um Größenordnungen kleiner als die Volumenleitfähigkeit.

2.3 Elektrischer Durchschlag

Die Kenntnis der elektrischen Durchschlagsfestigkeit ist von größter Wichtigkeit beim Einsatz von Werkstoffen in der Hochspannungstechnik (Isolierwerkstoffe), aber auch in der Elektronik. Sie stellt eine *kritische Feldstärke E_d* dar, bei der die Potentialtrennung infolge eines exponentiellen Stromanstieges nicht mehr gewährleistet ist. Ein solcher elektrischer Durchschlag kann auch bei kleinen Spannungen (V-Bereich) und geringen Potentialabständen (μm -Bereich) eintreten. Es kommt auf die Größe der Feldstärke an!

Das Material wird bei einem elektrischen Durchschlag unter Funken- und Lichtbogenbildung zerstört. Man spricht vom *Felddurchschlag*.

Bei der Bauteildimensionierung ist jedoch nicht nur die Durchschlagsfestigkeit zu berücksichtigen, sondern auch der dielektrische Leistungsumsatz. Mit Zunahme der Temperatur verringert sich die Durchschlagsfestigkeit. Bei ausreichend hohen Temperaturen kann ein *Wärmedurchschlag* ausgelöst werden. Ursache dafür ist die Erwärmung des Isolierstoffes selbst.

In gasförmigen Medien (Luft) sind neben der Temperatur die Feuchtigkeit, die Verunreinigungen (Staub) und der Druck maßgebend.

3 Versuchsaufbau/-anordnung

Der Versuchsaufbau (Bild 4) besteht aus den folgenden Teilen:

- **Messbrücke** LCR 1920 mit R 232-Schnittstelle, PC, Messerfassungsprogramm und Musterdateien (MS Excel)
- **Widerstandsbeheizter Rohrofen** mit Elektrodenhalterung, Temperaturregler (Thyristorregleinrichtung mit PID-Regler Eurotherm Typ32H8 1/8) und Temperatursensor (Thermoelement in Probennähe)
- **Probekörper** (metallisiert)

Bild 4 zeigt einige Details des Versuchsaufbaus.

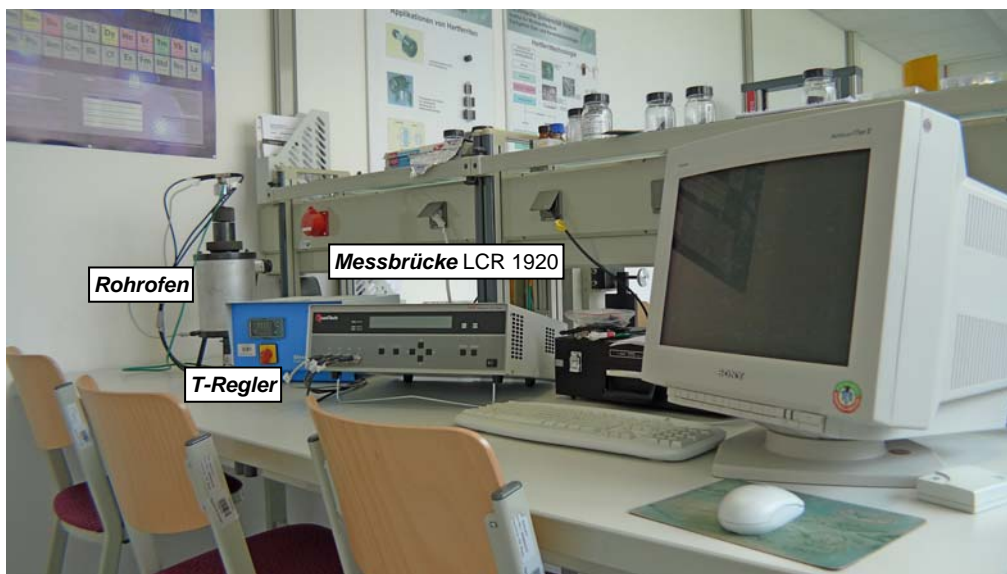


Bild 4: Details des Versuchsaufbaus zur Bestimmung elektrischer Eigenschaften von Werkstoffen in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz

Spezielle Anleitungen zur Benutzung/Bedienung der Geräte liegen am Versuchsplatz aus. Für Übernahme der Messdateien ist ein geeigneter Datenträger mitzubringen (USB-Stick).

4 Versuchsaufgaben

- 4.1 In Vorbereitung auf das Praktikum sind die Vorbereitungsaufgaben (s. Pkt. 6) schriftlich zu beantworten und auf Verlangen zur Einsicht vorzulegen.
- 4.2 An den vom Versuchsbetreuer zur Verfügung gestellten Probe sind die für Auswertung notwendigen geometrischen Abmessungen (Durchmesser der metallisierten Flächen, Probendicke, Achtung: Mehrfachmessung und Mittelwertbildung) zu ermitteln!
- 4.3 Berechnen Sie mit den ermittelten Geometriedaten den Ohmschen Widerstand $R_P(T_{K 100})$ der Probe, der sich bei der Temperatur $T_{K 100}$ einstellen muss!
- 4.4 Erfassen Sie **bei Raumtemperatur** mittels der Messbrücke und dem Messwerterfassungsprogramm den Ohmschen Widerstand R_P der Probe **in Abhängigkeit von der Frequenz f** (Bereich: 100 Hz – 1 MHz)!

Dazu sind unter Anleitung des Versuchsbetreibers und mit Hilfe der am Versuchsplatz ausliegenden Bedienungsanleitungen, die geometrisch ausgemessene Probe in der Elektrodenhalterung zu positionieren, die komplette Elektrodenhalterung im Prozessraum des Ofens zu montieren, die LCR-Messbrücke, der PC in Betrieb zu nehmen, das Messwerterfassungsprogramm zu aktivieren und die geforderten Daten (Temperatur, untere Frequenz, obere Frequenz, Schrittweite) einzugeben.

Zweckmäßig ist es, den gesamten Frequenzbereich in 4 Bereiche (nach Dekaden) zu teilen, um in den Teilbereichen sinnvolle Schrittweiten Δf festlegen zu können!

Prüfen Sie nach Beenden der Messung die Wertetabelle auf Fehlmessungen/ Ausreißer und eliminieren Sie diese („Delete“). Speichern Sie mit „Save“ die Messwerttabelle ab.

- 4.5 Nehmen Sie **bei einer konstanten Frequenz von 10 kHz** die Messwerte R_P der Probe **in Abhängigkeit der Temperatur T** auf!

Dazu aktivieren Sie im Messwerterfassungsprogramm „Temperaturabhängig“ und geben die gewünschte Messtemperatur und die Messfrequenz (10 kHz) ein. Nach Betätigen der Taste „Measure“ erfolgt dann die Aufnahme eines einzelnen Messwertes. Nehmen Sie auf diese Weise über den durch das Temperaturprogramm des Ofenreglers vorgegebenen Bereich (RT – 120 °C) Messwerte in sinnvollen Temperaturschritten auf (Empfehlung: $\Delta T = 10$ K). Die über den T-Regler voreingestellte Aufheizrate des Rohrofens beträgt 3 K/min. Damit steht Ihnen während der Aufheizung genügend Zeit zur Aufnahme und Kontrolle der Messwerte zur Verfügung!

Prüfen Sie nach Beenden der Messung die Wertetabelle auf Fehlmessungen/ Ausreißer und eliminieren Sie diese („Delete“). Speichern Sie am Ende der Messung die Wertetabelle mit „Save“ ab.

- 4.6 Ermitteln Sie nach Erreichen stationärer Verhältnisse bei der **eingestellten Endtemperatur T_E** erneut die Messwerte R_P der Probe **in Abhängigkeit von der Frequenz f** ! (Frequenzbereich und Vorgehensweise wie unter 4.4)
- 4.7 **Kopieren** Sie die ASCII-Files der Messdateien und die unter LCR1920\qbasic\Speicher\Praktikum-Musterdateien abgelegten Musterdateien für die spätere Versuchsauswertung auf Ihren Datenträger. Notieren Sie sich aus den ausliegenden Gerätebeschreibungen die Messfehler der benutzten Geräte zur Messfehlerberechnung (s. Aufgabe 5.5).
- 4.8 **Schalten** Sie danach die Ofenheizung sowie alle benutzten Geräte aus. Hinterlassen Sie einen aufgeräumten Versuchsplatz!

5 Versuchsauswertung

Je Versuchsgruppe ist ein Protokoll anzufertigen und spätestens 14 Tage nach Versuchsdurchführung beim verantwortlichen Versuchsbetreuer oder im Sekretariat abzugeben!

- 5.1 Werten Sie mit den Musterdateien und den darin befindlichen Routinen die unter 4.4, 4.5 und 4.6 ermittelten Messwertreihen aus.
Kontrollieren Sie die in den Musterdateien sich über die implementierten Routinen automatisch darstellenden Abhängigkeiten hinsichtlich Ausreißer/ nicht physikalisch sinnvollen Werten. Eliminieren Sie auch solche aus der Tabelle.
Passen Sie die Skalierungen der Achsen der Diagramme an die aktuellen Wertebereiche an. **Punkte: 30**
- 5.2 Diskutieren Sie die Abhängigkeiten $\rho_D(f)$ bei Raum- und Endtemperatur. Bewerten Sie den Einfluss der Frequenz und der Temperatur! Was führt zu welchen Effekten? **Punkte: 20**
- 5.3 Diskutieren Sie die Abhängigkeit $\rho_D(T)$ bei konstanter Frequenz! Wie sind die Verläufe erklärbar? **Punkte: 20**
- 5.4 a) Ermitteln Sie aus $\rho_D(T)$ die Abhängigkeit $\lg \rho_D = f(1/T)$. Bestimmen Sie mittels linearer Regression die Trendlinie von $\lg \rho_D = f(1/T)$! **Punkte: 10**
- 5.4 b) Bestimmen Sie aus der Trendlinie die Konstanten A und B der Rasch-Hinrichsen-Gleichung! **Punkte: 5**
- 5.4 c) Berechnen Sie mit der ermittelten Gleichung für die Trendlinie und mit dem in 4.3 errechneten Widerstand den T_{K100} -Wert für Ihre Glasprobe. Vergleichen Sie diesen experimentell ermittelten Wert mit aus der Literatur bekannten T_{K100} -Werten. Leiten Sie daraus ab, zu welcher Glasart ihre Glasprobe gehört! **Punkte: 5**
- 5.5 Berechnen Sie mit den aus den Gerätebeschreibungen entnommenen Angaben die Messfehler für den spezifischen elektrischen Durchgangswiderstand ρ_D und die Frequenz f ! **Punkte: 10**

Summe: 100

6 Vorbereitungsaufgaben

- 6.1 Erläutern Sie die elektrischen Leitungsmechanismen in Metallen, Keramiken, Gläsern und Kunststoffen!
- 6.2 Ordnen Sie folgenden Begriffen
+ elektrischer Leiter,
+ Heizleiter,
+ Isolierstoff,
+ Dielektrikum
mindestens 3 spezielle Werkstoffe zu und begründen Sie Ihre Zuordnungen!
- 6.3 Auf welche kennzeichnenden elektrischen Eigenschaften kommt es bei den in 6.2 aufgeführten Werkstoffgruppen an?
- 6.4 Stellen Sie für ein Metall die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ_D von der Temperatur T in der Form $\rho_D(T)$ grafisch dar und begründen Sie den Verlauf!
- 6.5 Stellen Sie für eine Keramik die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ_D von der Temperatur T in der Form $\rho_D(T)$ und $\lg \rho_D = f(1/T)$ grafisch dar.
- 6.6 Stellen Sie für ein Glas die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ_D von der Temperatur T in der Form $\rho_D(T)$ und $\lg \rho_D = f(1/T)$ grafisch dar.
- 6.7 Erläutern Sie die Definition des $T_{K\ 100}$ -Wertes für Gläser? Warum wurde er eingeführt?
- 6.8 Kennzeichnen Sie in diesen grafischen Darstellungen den $T_{K\ 100}$ -Wert und die Transformationstemperatur T_g für ein Glas!
- 6.9 Welche $T_{K\ 100}$ -Werte besitzen Kieselglas und Kalk-Natron-Silikatglas? Weshalb unterscheiden sich die Werte?
- 6.10 Wie muss man die Messprobe eines elektrischen Leiterwerkstoffes und eines Isolierstoffes zur Bestimmung der Volumenleitfähigkeit präparieren? Begründen Sie die Unterschiede!

7 Literatur

- Werner Schatt, Hartmut Worch: Werkstoffwissenschaft. Wiley VCH 2002
- Georg Menges: Werkstoffkunde Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1990
- Fasching, G.: Werkstoffe für Elektrotechnik. Springer-Verlag, Wien 1984
- Werner Vogel: Glaschemie. Springer-Verlag, 1992
- DIN 53 482/VDE 0304 Teil 3, Prüfung von Werkstoffen für die Elektrotechnik; Messung des elektrischen Widerstandes von nichtmetallenen Werkstoffen
- DIN IEC 15C (CO) 87/VDE 0335 Teil 200: Keramik- und Glas-Isolierstoffe (VDE-Bestimmungen)
- DIN 52 326: Prüfung von Glas; Bestimmung des spezifischen elektrischen Durchgangswiderstandes

8 Versuchsverantwortlicher/Kontakt

Dr.-Ing. Bernd Halbedel Arrheniusbau, Zi 216
Tel.: 03677 69 2784 Fax: 03677 69 1436
Email : bernd.halbedel@tu-ilmenau.de