

DIN EN 62812

ICS 31.040.01; 17.220.20

Einsprüche bis 2013-10-12

Entwurf**Verfahren zur Messung niederohmiger Widerstände
(IEC 40/2231/CD:2013)**

Method of measurement of low resistance
(IEC 40/2231/CD:2013)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2013-08-12 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (Hausanschrift: Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 61 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
4 Einflussgrößen der Widerstandsmessung.....	5
4.1 Allgemeines	5
4.2 Zuleitungs- und Kontaktwiderstand	5
4.3 Eigenerwärmung	7
4.4 Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes.....	8
4.5 Thermo-EMK	10
5 Messverfahren.....	13
5.1 Allgemeines	13
5.2 Vierdraht-Widerstandsmessung	13
5.3 Offset-Kompensationsverfahren.....	16
5.4 Umpolungsverfahren	18
5.5 Differentielles Umpolungsverfahren	21
5.6 Kurzzeit-Triggerungsverfahren	24
5.7 Verfahren der Vergleichsmessung mit einem Bezugswiderstand.....	24
6 Anschluss der Prüflinge.....	25
6.1 Widerstände mit Schraubanschlüssen	25
6.1.1 Allgemeines	25
6.2 Widerstände mit Anschlussdrähten für die Lötmontage.....	25
6.3 Widerstände mit Lötanschlüssen für die Oberflächenmontage	26
7 Erforderliche Angaben in der entsprechende Bauteilspezifikation.....	28
Anhang A (informativ) Formelzeichen und Abkürzungen.....	29
A.1 Formelzeichen	29
A.2 Abkürzungen	30
Literaturhinweise.....	31

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 40/2231/CD:2013 „Method of measurement of low resistance“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 40 „Capacitors and resistors for electronic equipment“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium GK 613 „Widerstände“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Verfahren zur Messung niederohmiger Widerstände

1 Anwendungsbereich

Widerstandsmessungen werden in der Regel durch verschiedene Einflussgrößen, z. B. den Serienwiderstand im Messpfad, die Eigenerwärmung oder nicht-ohmsche Eigenschaften, beeinträchtigt. Ob die Auswirkungen dieser Einflussgrößen auf eine Widerstandsmessung annehmbar sind oder nicht, hängt von der Größenordnung der einzelnen Auswirkungen im Vergleich zum Widerstandswert und zur erforderlichen Messgenauigkeit ab. Das Risiko fehlerhafter Widerstandsmessungen steigt folglich mit kleiner werdendem Widerstandswert und mit der Verschärfung der zulässigen Grenzabweichungen des Widerstandswertes.

Diese Internationale Norm legt Messverfahren sowie die entsprechenden Prüfbedingungen fest, mit denen die Auswirkungen der nachteiligen Einflussgrößen aufgehoben oder verringert werden, um die erreichbare Genauigkeit der Messungen niederohmiger Widerstände zu verbessern.

Die in dieser Internationalen Norm beschriebenen Verfahren können für Einzelmessungen des Widerstandswertes einzelner Widerstände und auch für Widerstandsmessungen als Teil einer Prüffolge eingesetzt werden. Sie werden angewandt, sofern in einer entsprechenden Bauteilspezifikation festgelegt oder zwischen Kunde und Hersteller vereinbart.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

IEC 60115-1, *Fixed resistors for use in electronic equipment – Part 1: Generic specification*

IEC 60115-2:201X, *Fixed resistors for use in electronic equipment – Part 2: Sectional specification: Leaded fixed low-power film resistors*

IEC 60115-8:2009, *Fixed resistors for use in electronic equipment – Part 8: Sectional specification – Fixed surface mount resistors*

Wo wird dieses Dokument benötigt?

IEC 60068-2-58:2004, *Environmental testing – Part 2-58: Tests – Test Td: Test methods for solderability, resistance to dissolution of metallization and to soldering heat of surface mounting devices (SMD)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60115-1 sowie die folgenden Begriffe.

3.1

elektromotorische Kraft

EMK

Potentialdifferenz, die zu einem elektrischen Stromfluss führt

3.2

niederohmiger Widerstand

Widerstand, für den der vorhersagbare Fehler bei der Messung mit einem herkömmlichen Zweidrahtverfahren verglichen mit der geforderten Genauigkeit oder der angegebenen Grenzabweichung nicht unwesentlich ist

3.3

Vierdrahtmessung Kelvin-Messung

Messtechnik zur Ermittlung des elektrischen Widerstands, die gesonderte Leitungspaare für den Messstrom und für den Abgriff der Potentialdifferenz verwendet, um den Beitrag des Leitungs- und Kontaktwiderstands zum elektrischen Widerstand auszuschalten

Anmerkung zum Begriff: Die Vierdrahtmessung oder Kelvin-Messung wird auch als Vierleitermessung und Vierpunkt-messung bezeichnet.

3.4

Zweidrahtmessung

herkömmliche Messtechnik zur Ermittlung des elektrischen Widerstands, die ein Leitungspaar verwendet, über das sowohl der Messstrom fließt als auch die Potentialdifferenz abgegriffen wird

4 Einflussgrößen der Widerstandsmessung

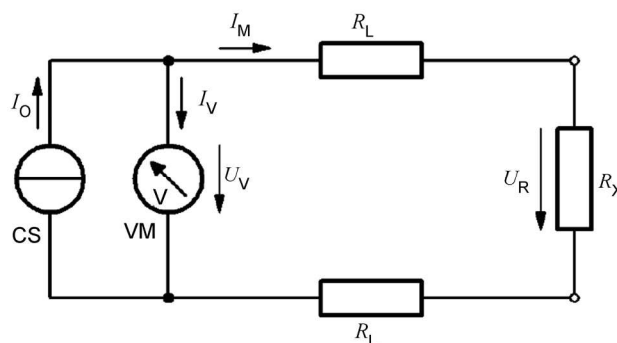
4.1 Allgemeines

Die Messung eines niederohmigen Widerstands basiert in der Regel auf der Messung einer kleinen Spannung, die einige Vorkehrungen gegen typische nachteilige Einflussgrößen wie Offsetspannungen, Funkfrequenzstörungen, elektromagnetische Störungen, elektrisches Rauschen oder nicht-ohmsche Kontakte erfordert. Diese Einflussgrößen aber werden in diesem Dokument nicht behandelt, da sie nicht speziell die Widerstandsmessung betreffen.

Die zu messende Spannung wird durch eine Steigerung des Messstroms erhöht, was ebenfalls zu nachteiligen Auswirkungen auf die Messung führen kann. Derartige Einflussgrößen werden in diesem Abschnitt beschrieben.

4.2 Zuleitungs- und Kontaktwiderstand

Ein herkömmliches Verfahren zur Messung des Widerstandswertes ist die Verwendung einer Konstantstromquelle mit bekanntem (oder gemessenem) Ausgangsstrom und eines Spannungsmessgerätes zur Ermittlung der Spannung am zu messenden Widerstand, wobei die Verbindung durch ein einzelnes Prüflingpaar hergestellt wird, wie in Bild 1 angegeben.



Legende

- CS Stromquelle, die den Strom I_0 liefert
- VM Spannungsmessgerät zur Ermittlung der Spannung U_V
- R_L Zuleitungswiderstand, einschließlich Kontaktwiderstand zum Prüfling
- R_x zu messender Widerstandswert

Bild 1 – Widerstandsmessung mit dem Zweidrahtverfahren

In dieser Schaltung teilt sich der Versorgungsstrom I_0 in den Strom I_M , der über den Pfad mit dem zu messenden Widerstand fließt, und den Strom I_V , der durch das Spannungsmessgerät fließt, auf, wobei I_V von der gemessenen Spannung U_V und vom Innenwiderstand des Spannungsmessgerätes R_V abhängt.

$$I_0 = I_M + I_V \quad ()$$

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} \quad ()$$

Das Spannungsmessgerät ermittelt den folgenden Spannungsfall beim Strom I_M über den Zuleitungs- und Kontaktwiderstand R_L sowie über den zu messenden Widerstandswert R_x :

$$U_V = I_M \times (2R_L + R_x) \quad ()$$

Daraus ergibt sich das scheinbare Ergebnis der Widerstandsmessung, R' , das aus der gemessenen Spannung U_V und dem bekannten Versorgungsstrom I_0 wie folgt berechnet wird:

$$R' = \frac{U_V}{I_0} = \frac{I_M}{I_M + I_V} \times (2R_L + R_x) = \frac{2R_L + R_x}{1 + \frac{2R_L + R_x}{R_V}} \quad ()$$

Mit $I_V \rightarrow 0$ – diese Bedingung ist gegeben, wenn $R_V \gg (2R_L + R_x)$ – tendiert das scheinbare Ergebnis gegen:

$$R' = \frac{U_V}{I_0} = \frac{I_M}{I_M + 0} \times (2R_L + R_x) = 2R_L + R_x \quad ()$$

Dieses scheinbare Endergebnis impliziert noch den Messfehler ΔR :

$$\Delta R = R' - R_x = 2R_L \quad ()$$

Dieser Fehler kann nur dann vernachlässigt werden, wenn $(2R_L) \ll R_x$, wobei die Vernachlässigbarkeit von der für die Messung von R_x erforderlichen Genauigkeit abhängt.

BEISPIEL 1 Eine 1 m lange Kupferleitung mit einem Querschnitt von $0,5 \text{ mm}^2$ hat einen Widerstand von $35 \text{ m}\Omega$. Wird ein Paar dieser Leitungen für die Zweidrahtmessung eines $100\text{-m}\Omega$ -Widerstands verwendet, dann ergibt sich ein nicht annehmbarer Messfehler von 70 %. Der Strom durch das Spannungsmessgerät hat aufgrund dessen begrenzten Innenwiderstands voraussichtlich keine Bedeutung für den Messfehler.

BEISPIEL 2 Bei Verwendung derselben Schaltung ergibt sich für die Messung eines $10\text{-}\Omega$ -Widerstands ein Messfehler von 0,7 %, wobei angenommen wird, dass der Strom durch das Spannungsmessgerät null beträgt. Dieser Messfehler von 0,7 % kann annehmbar sein, wenn die relative Grenzabweichung des Widerstandswertes mit $\pm 10 \%$ angegeben wird, nicht aber, wenn sie nur $\pm 1 \%$ beträgt.

Wird in dieser Schaltung ein Spannungsmessgerät mit einem Innenwiderstand von $1 \text{ M}\Omega$ eingesetzt, ergibt sich ein zusätzlicher Messfehler von nur $-0,001 \%$, der im Vergleich zu dem durch die Zuleitungen verursachten Messfehler unerheblich ist. Weist das Spannungsmessgerät aber einen Innenwiderstand von nur $10 \text{ k}\Omega$ auf, dann beträgt der zusätzliche Messfehler $-0,1 \%$ und ist damit nicht mehr zu vernachlässigen.

BEISPIEL 3 Für einen Widerstand von $1 \text{ k}\Omega$, der entsprechend den obigen Angaben gemessen wird, ist die beschriebene Schaltung selbst bei dem scheinbar geringen Messfehler von $0,007 \%$ ungeeignet, wenn es sich um einen Präzisionswiderstand mit einer relativen Grenzabweichung von z. B. $\pm 0,01 \%$ handelt.

Wird in dieser Schaltung ein Spannungsmessgerät mit einem Innenwiderstand von 1 MΩ eingesetzt, ergibt sich ein zusätzlicher Messfehler von –0,1 %. Vergleicht man die absoluten Fehlerbeiträge, dann ist diese Auswirkung sogar größer als der durch die Zuleitungen verursachte Messfehler.

4.3 Eigenerwärmung

Der durch den zu messenden Widerstand mit dem Widerstandswert R_x fließende Prüfstrom I_M verursacht eine Verlustleistung P_R :

$$P_R = I_M^2 \times R_x \quad ()$$

Diese Verlustleistung P_R bewirkt eine Temperaturerhöhung am zu messenden Widerstand, die von der Fähigkeit des Messaufbaus oder der Prüfeinrichtung, Wärme an die Umgebung abzuführen, abhängt, und als Wärmewiderstand R_{th} angegeben wird. Die konstante Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_{R\infty}$ am zu messenden Widerstand ist

$$\Delta\vartheta_{R\infty} = R_{th} \times P_R, \quad ()$$

die sich zur Umgebungstemperatur nahe am Prüfling, ϑ_{amb} , addiert und so zur Beharrungstemperatur $\vartheta_{R\infty}$ am zu messenden Widerstand führt, die wie folgt gegeben ist:

$$\vartheta_{R\infty} = \vartheta_{amb} + \Delta\vartheta_{R\infty} = \vartheta_{amb} + R_{th} \times P_R \quad ()$$

ANMERKUNG Im Rahmen dieser Spezifikation gilt die Ableitung der Wärme vom zu messenden Widerstand als ein lineares System. Diese Annahme beruht auf der allgemeinen Beobachtung, dass Strahlung und Konvektion am Körper der meisten Widerstände niedriger Belastbarkeit in nur geringem Maße zur gesamten Wärmeableitung beitragen. Bei großen Widerständen, bei denen Strahlung und Konvektion an der Körperoberfläche eine größere Rolle spielen als die Wärmeleitung über die Anschlüsse oder Anschlussdrähte kann eine komplexere Betrachtung geeignet sein.

Die zeitliche Temperaturerhöhung $\vartheta_R(t)$ am zu messenden Widerstand vor Erreichen der Beharrungstemperatur wird durch die thermische Zeitkonstante τ_{th} des zu messenden Widerstands im Prüfaufbau oder in der Prüfeinrichtung bestimmt:

$$\vartheta_x(t) = \vartheta_{amb} + \Delta\vartheta_{R\infty} \times (1 - e^{-t/\tau_{th}}) \quad ()$$

Die Kenntnis der thermischen Zeitkonstante τ_{th} ist für Messungen zur Ermittlung der Beharrungstemperatur sowie zur Bestimmung der zeitlichen Steuerung bei Schaltprüfungen erforderlich.

Die aufgrund der Eigenerwärmung erhöhte Temperatur am zu messenden Widerstand wirkt sich nicht nur auf den Prüfling aus, sondern führt auch zur Ausbreitung der Wärme in der Prüfeinrichtung oder im Prüfaufbau und beeinflusst ebenfalls die entsprechenden Teile der Messschaltung. Daher ist die erhöhte Temperatur die Grundursache für die Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes, wie in 4.4 dargelegt, und für die Thermo-EMK, wie in 4.5 beschrieben.

Die Eigenerwärmung wird durch die Reduzierung des Messstroms I_M auf einen Wert, bei dem die für eine Messung mit gewünschter Genauigkeit erforderliche Spannung noch gegeben ist, verringert, doch zählt die Einstellung des Messstroms üblicherweise nicht zu den Funktionen von Widerstandsmessgeräten. Andere Möglichkeiten zur Verringerung der Eigenerwärmung sind die nur kurzzeitige Aktivierung des Messstroms, wie in Abschnitt 5 beschrieben, und natürlich die Erhöhung der Wärmeableitung vom Prüfling und von der Prüfeinrichtung.

4.4 Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes

Eine der in IEC 60115-1 für die Messung des Widerstandswertes festgelegten Bezugsbedingungen ist die Bezugstemperatur von 20 °C. Aus praktischen Gründen aber ist es für die meisten Prüfungen und Messungen zulässig, dass sie bei Normalklima für Prüfungen nach IEC 60068-1, das einen zulässigen Umgebungstemperaturbereich von 15 °C bis 35 °C umfasst, durchgeführt werden.

Bei einer mit hinreichender Genauigkeit vorgenommenen Messung ergibt sich für einen Widerstand, der bei 15 °C oder 35 °C gemessen wird, nicht derselbe Widerstandswert, der bei 20 °C ermittelt wird. Tatsächlich weisen nahezu alle Widerstandsbauarten eine Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes auf, die üblicherweise keiner linearen Beziehung folgt. Der Verlauf und die Größe der Abhängigkeit beruhen im Wesentlichen auf der Technologie und der Fertigung des Widerstands und in einigen Fällen auf dem tatsächlichen Widerstandswert.

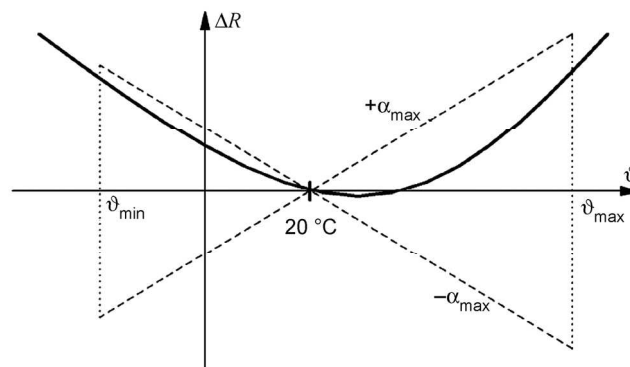


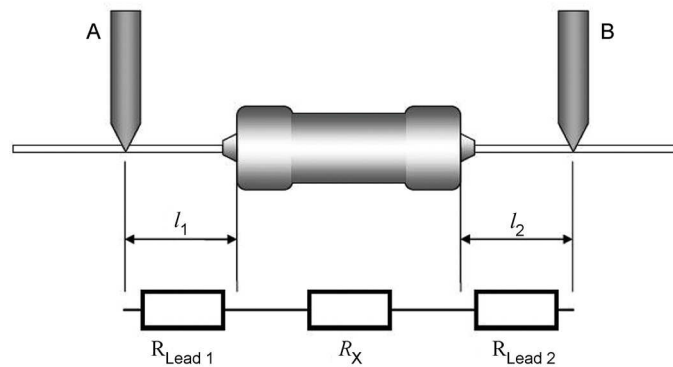
Bild 2 – Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes (beliebiges Beispiel)

In einem Spezifikationsdiagramm für Widerstände wird die Begrenzung des zulässigen Bereichs für die Änderung des Widerstandswertes innerhalb eines festgelegten Temperaturbereichs üblicherweise durch zwei symmetrisch-lineare Kurven angegeben, die durch den Bezugspunkt bei 20 °C verlaufen, $+\alpha_{\max}$ und $-\alpha_{\max}$, wie in Bild 2 dargestellt. Dabei ist $\alpha_{\max}$ der absolute Wert des festgelegten Temperaturkoeffizienten des Widerstandswertes bzw. des festgelegten TCR.

BEISPIEL 1 Dickschicht-Chipwiderstände mit einem Widerstandswert von bis zu 100 mΩ werden üblicherweise mit einem TCR von mindestens $500 \times 10^{-6}/\text{K}$ angeboten. Der bei 35 °C gemessene Widerstandswert kann um $\pm 0,75\%$ von dem bei der Bezugstemperatur von 20 °C ermittelten Widerstandswert abweichen. Diese Abweichung kann annehmbar sein, wenn die relative Grenzabweichung des Widerstandswertes mit $\pm 10\%$ angegeben wird, nicht aber, wenn sie nur $\pm 1\%$ beträgt.

Mit der Dünnschicht- oder Metallfolientechnologie gefertigte Präzisionswiderstände können mit einem TCR von nur $5 \times 10^{-6}/\text{K}$ angeboten werden. Der bei 15 °C oder 25 °C gemessene Widerstandswert weicht möglicherweise nur um $\pm 0,0025\%$ von dem bei der Bezugstemperatur ermittelten wahren Widerstandswert ab. Diese sehr geringe Abweichung wiederum kann bei einer festgelegten relativen Grenzabweichung für diese Widerstände von nur $\pm 0,01\%$ oder sogar besser als nicht annehmbar gelten.

Ein realer Widerstand umfasst nicht nur das aus einem speziellen Werkstoff gefertigte Widerstandselement, sondern ist an beiden Seiten auch mit Leitern zur Herstellung einer elektrischen Verbindung versehen. In einigen Fällen sind die Form und die effektive Länge dieser elektrischen Leiter festgelegt und sollten daher in eine Gesamtspezifikation des Widerstands aufgenommen werden. In anderen Fällen, z. B. bei Widerständen mit axialen Anschlüssen, wie in Bild 3 beispielhaft dargestellt, sind die elektrischen Leiter in Form von Anschlussdrähten mit großzügig bemessener Länge gebildet, die in der Schaltung üblicherweise nur zum Teil verwendet werden und eine geeignete Festlegung verbindlicher Punkte für die Widerstandsmessung erfordern.



Legende

A, B Messsonden

Bild 3 – Widerstandswerte bei einem Widerstand mit Anschlussdrähten

Die Anschlussdrähte bestehen im Allgemeinen aus einem hochleitfähigen Metall, dessen TCR üblicherweise weitaus größer als der TCR des Widerstandselementes ist. Eine typische Wahl ist Kupfer mit einer elektrischen Leitfähigkeit von $\gamma_{Cu} = 58 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ und einem TCR von $\alpha_{Cu} = 3\,800 \times 10^{-6}/\text{K}$.

BEISPIEL 2 Ein Widerstand von $100 \text{ m}\Omega$ kann mit Anschlussdrähten aus Kupfer, deren Durchmesser $0,5 \text{ mm}$ beträgt, versehen sein. Werden die Messsonden auf jeder Seite in einem Abstand von 5 mm vom Widerstandskörper angebracht, dann ergibt sich für das Anschlussdrahtpaar bei 20°C ein Beitrag von $0,88 \text{ m}\Omega$ und bei 35°C ein Beitrag von $0,93 \text{ m}\Omega$ zum Gesamtwiderstand, was einem potenziellen Messfehler von nahezu 1% entspricht.

Werden die Messsonden auf jeder Seite in einem Abstand von 21 mm vom Widerstandskörper angebracht, dann ergibt sich für die Anschlussdrähte bei 20°C ein Beitrag von $3,7 \text{ m}\Omega$ und bei 35°C ein Beitrag von $3,9 \text{ m}\Omega$ zum Gesamtwiderstand, was einem potenziellen Messfehler von nahezu 4% entspricht.

Bei SMD-Chipwiderständen mögen die einzelnen Beiträge nicht so bedeutsam wie in dem zuvor angegebenen Beispiel eines Widerstands mit Anschlussdrähten sein. In Bild 4 aber ist ein Chipwiderstand mit dem auf der Oberseite befindlichen Widerstandselement und den um die Kanten herum bis zur Kontaktstelle mit der elektrischen Schaltung auf der Leiterplatte angebrachten Anschlüssen dargestellt. Jedes dieser Elemente weist üblicherweise seine eigene elektrische Leitfähigkeit und seinen eigenen TCR auf, die alle zum gesamten zu messenden Widerstandswert des Prüflings beitragen.

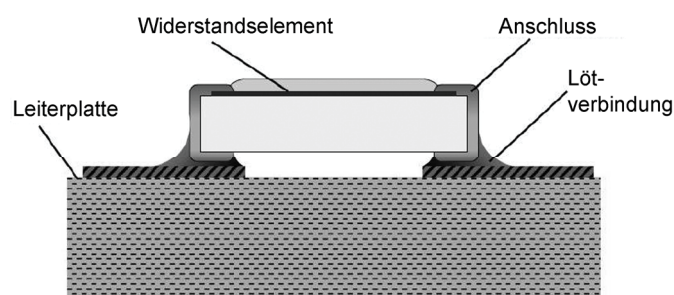


Bild 4 – SMD-Chipwiderstand auf einer Leiterplatte

BEISPIEL 3 Ein Chipwiderstand der Größe RR3216M kann mit um die Kanten herum gelegten Anschlüssen gefertigt sein, die mit einer $3 \mu\text{m}$ dicken Nickelschicht und einer darüber aufgetragenen $5 \mu\text{m}$ dicken Zinnschicht versehen sind. Bei einer Anschlussbreite von $1,6 \text{ mm}$ und einer angenommenen effektiven Leiterlänge von 1 mm beträgt der Leiterwiderstand auf jeder Seite $7,8 \text{ m}\Omega$ bzw. insgesamt $15,6 \text{ m}\Omega$. Ist der Widerstand z. B. mit $100 \text{ m}\Omega$ festgelegt, dann stellt dieser Anschlusswiderstand bereits $15,6 \%$ dieses Wertes dar und dieser Beitrag ändert sich um 1% je $64 \mu\text{m}$ der effektiven Leiterlänge.

Wird der Widerstand bei 35°C gemessen, ergibt sich aufgrund eines effektiven TCR von etwa $5\,400 \times 10^{-6}/\text{K}$ für die beiden Anschlussschichten ein kombinierter Leiterwiderstand von $16,8 \text{ m}\Omega$.

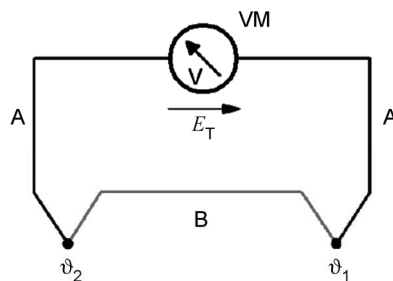
4.5 Thermo-EMK

Bei einem massiven Leiter, der einem Temperaturgang ausgesetzt wird, kommt es aufgrund der thermischen Diffusion zur Verschiebung von Ladungsträgern, die dazu führt, dass sich Elektronen zum kalten Ende hin bewegen. So entsteht ein elektrisches Feld vom warmen zum kalten Ende hin.

Zwei verschiedene Materialien, die zur Bildung einer elektrischen Schleife, in der die beiden Kontaktstellen unterschiedliche Temperaturen aufweisen, miteinander verbunden werden, bewirken, dass ein kontinuierlicher thermoelektrischer Schleifenstrom fließt. Wird die Schleife an einer beliebigen Stelle der Materialien geöffnet, ergibt sich eine messbare Thermo-EMK, E_T , wie in Bild 5 dargestellt.

Die Thermo-EMK, die als Seebeck-Effekt bezeichnet wird, hängt von den jeweiligen zwei Materialien und vom Temperaturunterschied zwischen den beiden Kontaktstellen ab. Die Thermospannung (Seebeck-Effekt) ist nicht linear und hängt von den jeweiligen Temperaturen ab. Für einen begrenzten Temperaturbereich aber ist es möglich, eine hinreichend große Linearität anzunehmen und so die Thermo-EMK, E_T , aus der Differenz der Seebeck-Koeffizienten α_S der beiden verbundenen Metalle und der Temperaturdifferenz ihrer Kontaktstellen zu berechnen.

$$E_T = (\alpha_{SB} - \alpha_{SA}) \times (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad ()$$



Legende

VM Spannungsmessgerät zur Messung der Thermo-EMK, E_T

A, B Drahtmaterialien

ϑ_1, ϑ_2 Temperatur der Draht-Kontaktstellen

Bild 5 – Thermo-EMK

Die Seebeck-Koeffizienten können als absolute Zahlen oder bezogen auf ein zweites Material angegeben werden. Bei metallenen Leitern liegen die Koeffizienten üblicherweise in einem Bereich von einem bis einigen zehn Mikrovolt je Kelvin, während sie bei dotierten Halbleitermaterialien eher in der Größenordnung eines Millivolt je Kelvin liegen. In Tabelle 1 werden die relativen Seebeck-Koeffizienten α_S für einige potenziell relevante, mit Platin oder mit Kupfer verbundene Metalle angegeben.

Tabelle 1 – Relative Seebeck-Koeffizienten für ausgewählte Metalle

Metall	α_s für Platin $\mu\text{V/K}$	α_s für Kupfer $\mu\text{V/K}$
Chrom-Nickel	+22	+14,5
Eisen	+18,8	+10,8
Kupfer-Zink-Legierung	+11	+3,5
Kupfer	+7,5	± 0
Silber	+7,3	-0,2
Gold	+7	-0,5
Blei	+4,4	-3,1
Zinn	+4,2	-3,3
Aluminium	+3,9	-3,6
Platin	± 0	-7,5
Nickel	-15	-22,5
Konstantan	-33	-40,5
Die angegebenen Zahlen gelten für eine Bezugstemperatur von 0 °C.		
Die Seebeck-Koeffizienten werden herkömmlicherweise auch in mV/100 K angegeben.		

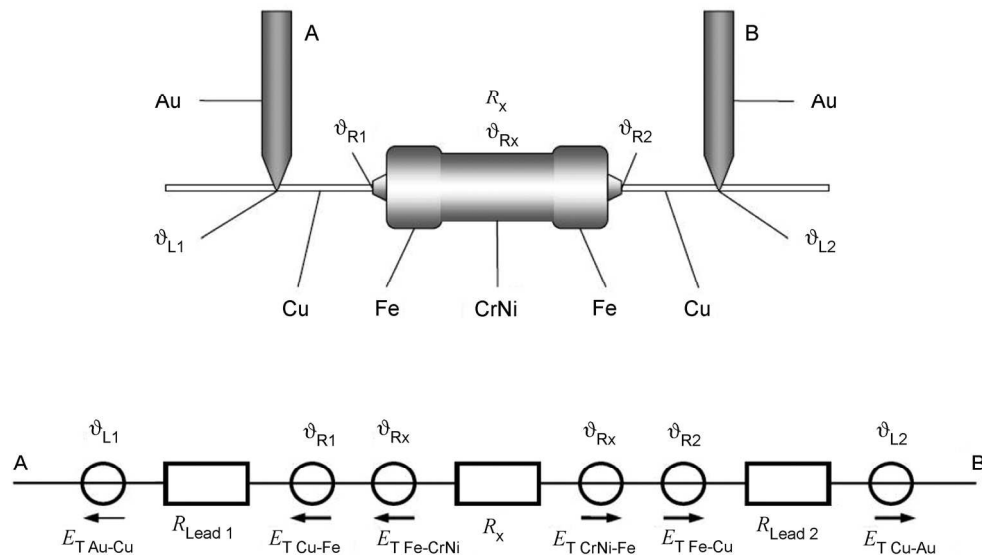
Selbst die Kontaktstellen von Labor-Steckverbindern erzeugen eine Thermo-EMK, da die für die Fertigung verwendeten speziellen Materialien vom Hersteller ausgewählt werden. Bei Steckverbindern, die für eine geringe thermische Aktivität ausgelegt sind, können die Koeffizienten weniger als ein Zehntel eines Mikrovolt je Kelvin betragen, während die Kontaktstellen herkömmlicher Produkte Koeffizienten von mehr als ein Mikrovolt je Kelvin aufweisen können.

Halbleitermaterialien spielen für die Konstruktion von Widerständen üblicherweise keine Rolle, abgesehen von Kupferoxid, für das ein Seebeck-Koeffizient von 1 mV/K bezogen auf Kupfer gilt. Jeder Versuch der Kontaktierung einer Kuperoberfläche sollte daher mit besonderer Vorsicht vorgenommen werden.

Bei den meisten Widerständen sind mehrere unterschiedliche Metalle in Reihe angeordnet.

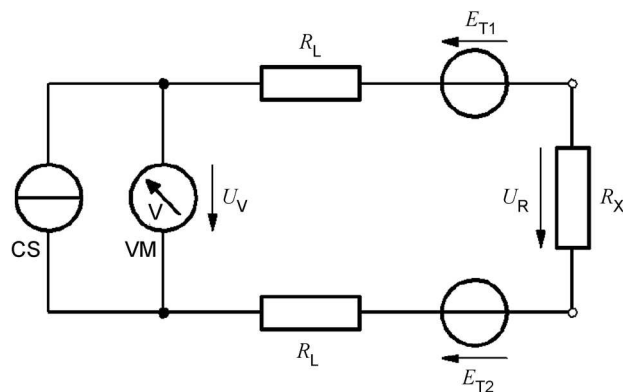
- Bei einem Drahtwiderstand ist vielleicht nur der Widerstandsdraht aus Konstantan an die beidseitigen Anschlussdrähte aus Kupfer oder kupferkaschiertem Stahl angeschweißt, oder ist der Widerstandsdraht am Rand der Anschlusskappen aus Stahl, an denen die Anschlussdrähte mittig befestigt sind, angeschweißt.
- Ein Schichtwiderstand mit axialen Anschlussdrähten kann mit Anschlusskappen aus Stahl versehen sein, die auf die Nickelchrom-Widerstandsschicht gepresst wurden, bevor die kupfernen Anschlussdrähte in der Kappenmitte angeschweißt wurden.
- Bei einem SMD-Chipwiderstand kann ein planarer Kontakt der Nickelchrom-Widerstandsschicht mit der Innenschicht des Anschlusssystems gegeben sein, das üblicherweise mit einer Zinn- oder Nickelschicht abgeschlossen ist.

Diese Bauelemente werden in Prüfeinrichtungen mit Spitzen oder Klemmen in Kontakt gebracht, die voraussichtlich aus einem anderen Metall als die Anschlussdrähte oder die Anschlüsse des Bauelements bestehen. Oder sie werden auf eine Leiterplatte gelötet, wobei die Verbindungen zu den aufgedruckten Kupferleitern üblicherweise aus einer Zinnlegierung bestehen.

**Bild 6 – Thermoelemente an einem Widerstand mit Anschlussdrähten**

Alle diese Verbindungen unterschiedlicher Metalle können jeweils eine Thermo-EMK erzeugen, wenn die einzelnen in Reihe liegenden Verbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen aufweisen (Seebeck-Effekt). Die Eigenerwärmung und der entsprechende Wärmefluss, wie in 4.3 beschrieben, stellen eine allgemeine Ursache für die unterschiedlichen Temperaturen entlang der Reihenverbindung metallischer Kontaktstellen dar.

Die gesamte Thermo-EMK eines montierten Widerstands kann null betragen, wenn die Reihen der metallischen Verbindungsstellen, von der Mitte des Widerstands aus hin zu beiden Enden betrachtet, identisch sind und wenn die Temperaturen dieser beiden identischen Verbindungsreihen zudem gleich hoch sind. Dazu aber ist es üblicherweise erforderlich, dass sich der vom Widerstand ausgehende Wärmefluss gleichmäßig auf die beiden äquivalenten Wärmeableitungspfade aufteilt.

**Bild 7 – Widerstandsmessung unter dem Einfluss der Thermo-EMK**

Die Thermo-EMK überlagert sich der am zu messenden Widerstand durch den Versorgungsstrom erzeugten Spannung (siehe Bild 7) und kann daher die Genauigkeit der Widerstandsmessung wesentlich beeinträchtigen. Weniger offensichtlich ist, dass die Stromverteilung an einem Knoten ebenfalls beeinträchtigt wird, wenn nur einer der Zweige von der Thermo-EMK betroffen ist.

Dieser Aspekt der Thermo-EMK kann statischer oder dynamischer Art sein, je nachdem, ob die Temperatur am Prüfling und im Messaufbau oder in der Prüfeinrichtung den Beharrungszustand erreicht hat oder nicht. In Abschnitt 5 werden Messverfahren beschrieben, mit denen es möglich ist, den Einfluss einer auftretenden Thermo-EMK auf das Messergebnis des Widerstandswertes auszuschalten.

5 Messverfahren

5.1 Allgemeines

Die im vorstehenden Abschnitt beschriebenen Erläuterungen haben dargelegt, dass – neben den eher allgemeinen Unsicherheiten bei Kleinsignal-Messungen – die Messung niederohmiger Widerstände durch eine Reihe sehr grundlegender Einflussgrößen beeinträchtigt werden kann. Diese Einflussgrößen können, jede für sich, nachteilige Auswirkungen auf die erreichbare Genauigkeit der Widerstandsmessung haben. Diese Auswirkungen wiederum können zu einem wesentlichen Messfehler führen, der die Verwertbarkeit der Messung eines niederohmigen Widerstands letztlich ausschließt.

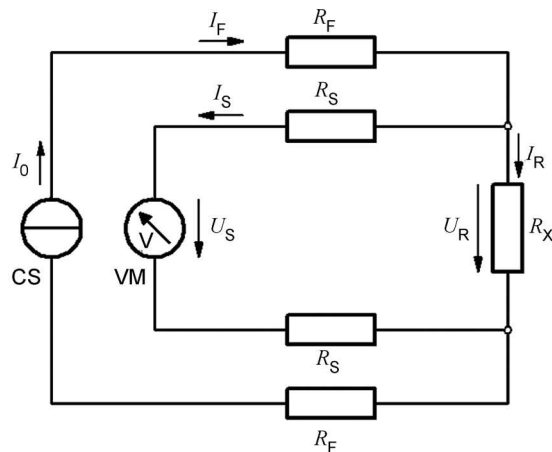
Eine naheliegende erste Maßnahme zur Verhinderung des nachteiligen Einflusses von Zuleitungs- und Kontaktwiderständen, wie in 4.2 dargelegt, ist die Anwendung der Offset-Korrektur, die die meisten Strommessgeräte bieten. Dieses Verfahren erfordert, dass die Kontaktpunkte direkt, ohne dazwischen liegende Widerstandsgrößen, miteinander verbunden sind, was in einer realen Prüfeinrichtung unter Umständen nicht ohne eine zusätzliche Messbeeinflussung möglich ist. Außerdem können, da der zu messende Widerstand bei diesem Verfahren nicht berücksichtigt wird, die in der eigentlichen Messung gegebenen Auswirkungen seiner Materialien und der Eigenerwärmung nicht kompensiert werden.

In diesem Abschnitt werden weitere Messverfahren beschrieben, mit denen die Auswirkungen einer oder mehrerer der genannten Einflussgrößen unter Berücksichtigung bestimmter Beziehungen ausgeschaltet werden können. Es werden auch Begrenzungen, die noch bestehen können, sowie mögliche Bedingungen angegeben, unter denen diese Begrenzungen aufgehoben werden können.

5.2 Vierdraht-Widerstandsmessung

Ein sehr häufig eingesetztes Verfahren zur Vermeidung des Einflusses von Zuleitungs- und Kontaktwiderständen bei der Messung niederohmiger Widerstände ist die Vierdrahtmessung, die auch als Kelvin-Messung bezeichnet wird. Bei diesem Verfahren wird ein dediziertes Stromleitungspaar zur Einprägung des Stroms in den Prüfling verwendet, und über ein weiteres dediziertes Messleitungspaar wird der Prüfling an das Spannungsmessgerät angeschlossen, wie in Bild 8 dargestellt.

Die Vierdrahtmessung ist ein weithin eingesetztes Verfahren und dient daher auch als Grundlage für zahlreiche andere Verfahren, mit denen auch weitere nachteilige Auswirkungen vermieden werden sollen.

**Legende**

- CS Stromquelle, die den Strom I_0 liefert
- R_F Widerstand der Speiseleitungen, einschließlich Kontaktwiderstand
- I_F Strom durch die Speiseleitungen
- I_R Prüfstrom durch R_X
- R_X zu messender Widerstandswert
- U_R Spannung an R_X
- R_S Messleitungswiderstand, einschließlich Kontaktwiderstand
- I_S Strom durch die Messleitungen
- VM Spannungsmessgerät zur Ermittlung von U_S

Bild 8 – Vierdraht-Widerstandsmessung

In dieser Schaltung teilt sich der Versorgungsstrom I_0 , der üblicherweise als Speisestrom I_F bezeichnet wird, an der Verbindung des Prüflings in den Strom I_R , der durch den zu messenden Widerstand fließt, und den Messstrom I_S , der durch das Spannungsmessgerät fließt, auf.

$$I_0 = I_F = I_R + I_S \quad ()$$

Aus der Spannung U_R , die an dem zu messenden Widerstand anliegt und ebenso für die Messschleife gilt, kann der jeweilige Strom durch die beiden Pfade bestimmt werden.

$$U_R = I_R \times R_X = I_S \times (2R_S + R_V) \quad ()$$

Dabei ist

- R_X der zu messende Widerstandswert;
- I_R der Strom durch R_X ;
- R_S der Messleitungswiderstand, einschließlich Kontaktwiderstand;
- I_S der Strom durch die Messschleife, einschließlich Spannungsmessgerät;
- R_V der Innenwiderstand des Spannungsmessgerätes.

$$I_S = I_F \times \frac{R_X}{2R_S + R_X + R_V} \quad ()$$

$$I_R = I_F \times \frac{2R_S + R_V}{2R_S + R_X + R_V} \quad ()$$

Das scheinbare Ergebnis der Widerstandsmessung, R' , basiert auf der gemessenen Spannung U_S und dem bekannten Versorgungsstrom I_0 :

$$R' = \frac{U_S}{I_0} \quad ()$$

Mit der gemessenen Spannung U_S , die von der Spannung am zu messenden Widerstand, U_R , getrennt wird,

$$U_S = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times U_R \quad ()$$

ergibt sich der scheinbare Widerstand R' wie folgt:

$$R' = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times \frac{U_R}{I_0} \quad ()$$

Und mit der Spannung am zu messenden Widerstand, die aus dem Strom durch den Widerstand, I_R , ermittelt wird

$$U_R = I_R \times R_X = I_F \times \frac{2R_S + R_V}{2R_S + R_X + R_V} \times R_X \quad ()$$

ergibt sich schließlich der scheinbare Widerstand

$$R' = \frac{R_V}{2R_S + R_X + R_V} \times R_X, \quad ()$$

der den folgenden Messfehler impliziert:

$$\Delta R = R' - R_X = \left(\frac{R_V}{2R_S + R_X + R_V} - 1 \right) \times R_X \quad ()$$

Mit $R_V \gg R_S$ tendiert der scheinbare Widerstand R' gegen

$$R' = \frac{U_R}{I_0} = \frac{U_R}{I_R + I_S} \quad ()$$

und mit $R_V \gg R_X$ kann der Messstrom vernachlässigt werden, $I_S \rightarrow 0$, und somit fließt der gesamte Speisestrom durch den zu messenden Widerstand, $I_S \rightarrow I_F$; der scheinbare Widerstand tendiert dann schließlich gegen

$$R' = R_X, \quad ()$$

womit der Messfehler ΔR aufgehoben ist.

Der tatsächliche Schwellenwert für die Bewertung von $R_V \gg R_S$ und $R_V \gg R_X$ und damit für die angenommene Ausschaltung des Messfehlers ΔR hängt von der geforderten Genauigkeit für die Messung des Widerstandswertes R_X ab.

BEISPIEL 1

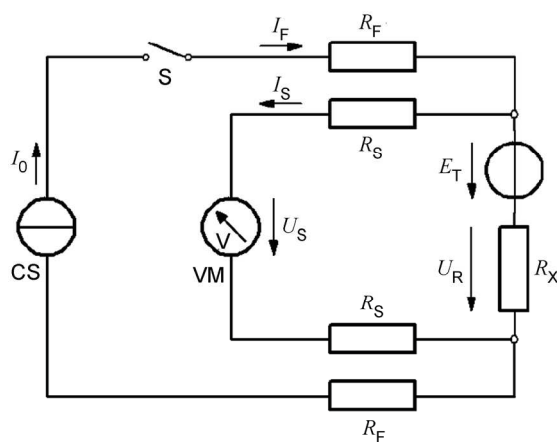
BEISPIEL 2

Angemessene Beispiele zur Darlegung a) der Eignung und b) der Begrenzungen sind hinzuzufügen.

5.3 Offset-Kompensationsverfahren

Ein einfaches Verfahren zur Vermeidung des Einflusses einer Thermo-EMK auf eine Widerstandsmessung ist das Offset-Kompensationsverfahren. Zur Vereinfachung der Beschreibung wird die gesamte im Prüfling und in der Prüfeinrichtung vorhandene Thermo-EMK zu einer E_T in Reihe mit dem zu messenden Widerstand zusammengefasst.

In Bild 9 ist die Schaltung für eine Vierdraht-Widerstandsmessung, wie in 5.2 beschrieben, dargestellt, die um einen für die Durchführung von Messungen mit und ohne Speisestrom erforderlichen Schalter erweitert ist.



Legende

- CS Stromquelle, die den Strom I_0 liefert
- S Schalter
- R_F Widerstand der Speiseleitungen, einschließlich Kontaktwiderstand
- I_F Strom durch die Speiseleitungen
- I_R Prüfstrom durch R_X
- R_X zu messender Widerstandswert
- U_R Spannung an R_X
- E_T zusammengefasste Thermo-EMK des Prüflings und der Prüfeinrichtung
- R_S Messleitungswiderstand, einschließlich Kontaktwiderstand
- I_S Strom durch die Messleitungen
- VM Spannungsmessgerät zur Ermittlung von U_S

Bild 9 – Offset-Kompensationsverfahren für die Widerstandsmessung

Der Schalter wird periodisch geschlossen und geöffnet, um die Messung der Spannung U_{S1} , die die durch den Speisestrom I_F erzeugte Spannung U_R umfasst, und andererseits der Spannung U_{S0} , die ausschließlich die Thermo-EMK E_T darstellt, wie in Bild 10 angegeben, durchführen zu können.

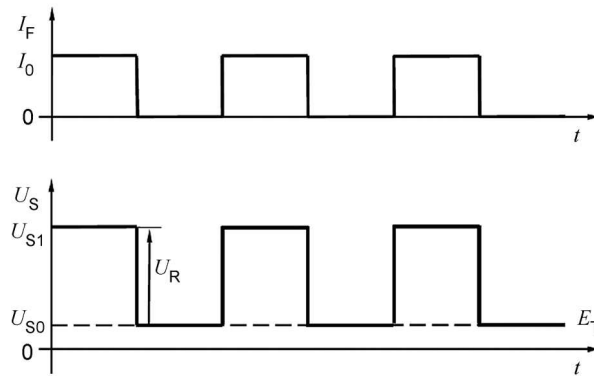


Bild 10 – Strom und Spannung beim Offset-Kompensationsverfahren

Im Einzelnen sind die beiden gemessenen Spannungen U_{S1} und U_{S0} gegeben durch

$$U_{S1} = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times (U_R + E_T) \quad ()$$

$$U_{S0} = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times E_T \quad ()$$

Dabei ist

R_x der zu messende Widerstandswert;

R_S der Messleitungswiderstand, einschließlich Kontaktwiderstand;

R_V der Innenwiderstand des Spannungsmessgerätes;

U_R die Spannung am zu messenden Widerstand;

E_T die Thermo-EMK.

Damit kann die Thermo-EMK E_T durch Berechnung der folgenden Differenz aufgehoben werden

$$\Delta U_S = U_{S1} - U_{S0} = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times U_R \quad ()$$

und es ergibt sich der Widerstand R' , der scheinbar unabhängig von der Thermo-EMK E_T ist,

$$R' = \frac{\Delta U_R}{I_0} = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times \frac{U_R}{I_0} \quad ()$$

und der, wieder mit $R_V \gg R_S$, gegen

$$R' = \frac{U_R}{I_0} \quad ()$$

tendiert.

Die Stromverteilung im Messpfad und im Pfad mit dem zu messenden Widerstand aber impliziert noch den Einfluss der Thermo-EMK, E_T , was zu folgendem Ausdruck für den Strom I_R durch den Widerstandsprüfling führt

$$I_R = I_0 \times \frac{2R_S + R_V}{2R_S + R_x + R_V} - E_T \times \frac{1}{2R_S + R_x + R_V}, \quad ()$$

aus dem sich durch Bestimmung der wahren Spannung am Widerstandsprüfling

$$U_R = I_R \times R_x = I_0 \times \frac{2R_S + R_V}{2R_S + R_x + R_V} \times R_x - E_T \times \frac{R_x}{2R_S + R_x + R_V} \quad ()$$

der folgende komplexere Ausdruck für den scheinbaren Widerstand ergibt:

$$R' = \frac{R_V}{2R_S + R_x + R_V} \times R_x - \frac{R_V \times R_x}{(2R_S + R_V) \times (2R_S + R_x + R_V)} \times \frac{E_T}{I_0} \quad ()$$

Mit $R_V \gg R_x$ und $R_V \gg R_S$ kann der Messstrom vernachlässigt werden, $I_S \rightarrow 0$, was zu $I_R \rightarrow I_0$ und ebenfalls zur Ausschaltung des Einflusses von E_T auf die Stromverteilung führt. Dann ergibt sich das scheinbare Ergebnis der Widerstandsmessung mit

$$R' = R_x, \quad ()$$

das schließlich ein vom Einfluss der Thermo-EMK, E_T , bereinigtes Ergebnis ist.

In diesem Fall gilt auch, dass der tatsächliche Schwellenwert für die Annehmbarkeit der Beziehungen $R_V \gg R_S$ und $R_V \gg R_x$ von der erforderlichen Genauigkeit für die Messung von R_x abhängt.

Aufgrund der Forderung nach einer hinreichend genauen Subtraktion der beiden nacheinander gemessenen Spannungen U_{S1} und U_{S0} ist dieses Verfahren für den Einsatz eines analogen Spannungsmessgerätes weniger geeignet, und es wird eindeutig empfohlen, ein digitales Instrument mit ausreichend hoher Messauflösung und -genauigkeit sowie anschließender Berechnung zu verwenden.

Eine wesentliche Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass die Thermo-EMK während der Zeit, die für das Schalten des Speisestroms und die nachfolgenden Spannungsmessungen benötigt wird, hinreichend konstant bleibt. Das aber kann unter Umständen nicht erreicht werden, wenn die Temperatur des Prüflings und damit die Temperatur der Einrichtung sowie die Thermo-EMK überwiegend durch die Eigenerwärmung des Prüflings bei eingeschaltetem Speisestrom beeinflusst werden.

Soll die Thermo-EMK jedoch über eine sogar längere Zeitspanne hinreichend konstant sein, kann die Subtraktion der beiden Spannungen U_{S1} und U_{S0} unter Verwendung der Offset-Kalibrierung des Spannungsmessgerätes erfolgen, wobei U_{S0} praktisch auf null gesetzt wird, was dann zur direkten Anzeige von $U_{S1} = \Delta U_S$ führt.

BEISPIEL 1

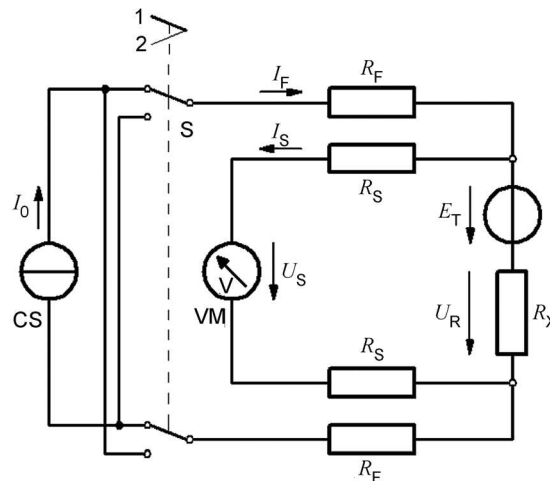
Entsprechende Beispiele zur Darlegung a) der Eignung und b) der Begrenzungen sind hinzuzufügen.

BEISPIEL 2

5.4 Umpolungsverfahren

Ein weiteres Verfahren zur Vermeidung des Einflusses einer Thermo-EMK auf eine Widerstandsmessung ist das Umpolungsverfahren, das auf der Änderung der Polarität des Speisestroms beruht. Zur Vereinfachung der Beschreibung wird die gesamte im Prüfling und in der Prüfeinrichtung vorhandene Thermo-EMK zu einer E_T in Reihe mit dem zu messenden Widerstand zusammengefasst.

In Bild 11 ist die Schaltung für eine Vierdraht-Widerstandsmessung, wie in 5.2 beschrieben, dargestellt, die um einen für die Durchführung von Messungen mit und ohne Speisestrom erforderlichen Schalter erweitert ist.



Legende

- CS Stromquelle, die den Strom I_0 liefert
- S Umpolschalter
- R_F Widerstand der Speiseleitungen, einschließlich Kontaktwiderstand
- I_F Strom durch die Speiseleitungen
- I_R Prüfstrom durch R_X
- R_X zu messender Widerstandswert
- U_R Spannung an R_X
- E_T zusammengefasste Thermo-EMK des Prüflings und der Prüfeinrichtung
- R_S Messleitungswiderstand, einschließlich Kontaktwiderstand
- I_S Strom durch die Messleitungen
- VM Spannungsmessgerät zur Ermittlung von U_S

Bild 11 – Umpolungsverfahren für die Widerstandsmessung

Wie in Bild 12 dargestellt, wird die Polarität des Speisestroms über den Schalter periodisch geändert, um die Messung der Spannung U_{S1} , die die durch den Speisestrom I_F erzeugte und zur Thermo-EMK E_T addierte Spannung U_R umfasst, sowie der Spannung U_{S2} , die die durch den umgepolten Speisestrom $-I_F$ erzeugte und von der Thermo-EMK E_T subtrahierte Spannung U_R umfasst, durchführen zu können.

Die beiden gemessenen Spannungen U_{S1} und U_{S2} sind folglich gegeben durch

$$U_{S1} = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times (U_R + E_T) \quad ()$$

$$U_{S2} = \frac{R_V}{2R_S + R_V} \times (-U_R + E_T) \quad ()$$

Dabei ist

- R_X der zu messende Widerstandswert;
- R_S der Messleitungswiderstand, einschließlich Kontaktwiderstand;
- R_V der Innenwiderstand des Spannungsmessgeräts;
- U_R die Spannung am zu messenden Widerstand;
- E_T die Thermo-EMK.