Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 21

Artikel: Konstruktion und Eigenschaften von Metallfilm-Widerständen im Vergleich mit Kohleschicht-Widerständen

Autor: Schär, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916781

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Konstruktion und Eigenschaften von Metallfilm-Widerständen im Vergleich mit Kohleschicht-Widerständen

Von *K. Schär*, Regensdorf

621.316.84 : 539.216.2

Mit dem Aufschwung der Elektronik haben die Widerstände eine enorme Verbreitung gefunden, und parallel damit sind auch die Ansprüche an dieses wichtige Bauelement gestiegen. So wurden Mittel und Wege gesucht, um die Qualität, die Stabilität und die Betriebssicherheit der Widerstände wesentlich zu erhöhen. Zu diesem Zweck wurden Widerstände entwickelt, bei denen das Widerstandelement nicht mehr aus einer Kohleschicht, oder einem Widerstandsdraht, sondern aus einer Metallegierung besteht. Im folgenden wird nebst einer Beschreibung der Herstellungsmethode und des Aufbaus der Metallfilm-Widerstände versucht, durch einen Vergleich der wichtigsten Eigenschaften von Kohleschicht- und Metallfilm-Widerständen dem Verbraucher die Wahl des geeignetsten Widerstandes zu erleichtern.

Du fait des progrès rapides de l'électronique, les résistances ont subi un développement considérable et les exigences posées à ces importants composants sont devenues d'autant plus sévères. Il fallait donc rechercher les moyens d'améliorer toujours plus leur qualité, leur stabilité et leur sécurité de service. Dans ce but, on a mis au point des résistances dont l'élément proprement dit n'est plus constitué par une couche de charbon ou un fil métallique, mais par un alliage de métaux. L'auteur décrit la méthode de fabrication et la constitution des résistances à film métallique et en compare les principales caractéristiques avec celles des résistances à couche de charbon, afin de faciliter aux utilisateurs le choix des résistances qui conviennent le mieux.

1. Einleitung

Fast gleichzeitig mit der Entwicklung der Kohleschicht-Widerstände, deren Widerstandsmaterial aus der bewährten Glanzkohle besteht, die durch thermische Spaltung von Kohlenwasserstoffen im Vakuum oder bei Normaldruck als reiner Kohlenstoff in polykristalliner Form auf einen Keramikkörper niedergeschlagen wird, setzte auch die Entwicklung von Metallfilm-Widerständen ein. Dabei wurde angestrebt, das Widerstandelement aus einer Metallegierung herzustellen und in geeigneter Weise auf den Trägerkörper zu bringen. Der Gedanke, einen Drahtwiderstand durch einen Metallfilm-Widerstand zu ersetzen, um z. B. höhere Widerstandwerte, kleinere Abmessungen, kleinere Induktivitäten und grössere Betriebssicherheit zu erreichen, liegt eigentlich näher als Kohle für diesen Zweck zu verwenden. Die Meinung, man könne nur dieselbe Legierung, aus der die Widerstanddrähte bestehen, nehmen und als feine Schicht auf einen Trägerkörper auftragen, um die gewünschten Eigenschaften zu erzielen, erwies sich bald als irrig. Vielfältige Versuche während mehr als zwei Jahrzehnten waren notwendig, bis man das gesteckte Ziel erreichte.

Dank der im vergangenen Jahrzehnt gemachten Fortschritte in der Hochvakuumtechnik und den Erfahrungen bei der Herstellung dünner aufgedampfter Metallfilme für optische Zwekke, gelang es, ein Verfahren zur Massenherstellung von Metallfilm-Widerständen zu entwickeln. Die Eigenschaften dieser Widerstände sind nicht nur denen der Kohleschicht- und der Drahtwiderstände ebenbürtig, sondern ihnen in mancherlei Beziehung überlegen.

2. Aufbau der Metallfilm-Widerstände

Da der Aufbau von Kohleschicht-Widerständen als bekannt vorausgesetzt werden darf, sei hier nur derjenige von handelsüblichen Metallfilm-Widerständen geschildert (Fig. 1), wovon einige Beispiele in Fig. 2 gezeigt sind.

Als Trägerkörper, dessen Dimensionen von der Nennlast des Widerstandes abhängig sind, dient ein Keramikrohr von besonders hoher Qualität. In leistungsfähigen Bedampfungsanlagen (eine Apparatur ist in Fig. 3 dargestellt) wird im Hochvakuum bei 10^{-5}...10^{-6} Torr und einer Temperatur von 1000...1300° C der Metallfilm — eine Legierung auf Chrom-Nickel-Basis — aufgedampft. Dadurch wird ein bestimmter Widerstandswert, der sog. Vorwert, erzeugt. Dieser ist von der Dauer des Bedampfungsprozesses abhängig, der im Mittel 1...1½ h beträgt. Ein anschliessend an die Bedampfung über den aufgedampften Metallbelag aufgetragener polymerisierter Silikonlacküberzug schützt den erhaltenen Vorwert vor Verschmutzung.

Vor der Bedampfung werden die Enden des Keramikrohres mit einer Silberverbindung bestrichen, die dann im Ofen bei über 500° C zu reinem Silber reduziert wird. Eine derart aufgebrachte Silberschicht weist gegenüber anderen Versilberungsverfahren eine viel grössere Haftfestigkeit mit dem Trägerkörper auf. Der Metallfilmbelag, der durch die Bedampfung eine innige Verbindung mit der Silberschicht eingeht, und die achsialen Anschlussdrähte, die mittels Hochtemperatur-Spezialllot an den Enden eingelötet werden, stellen eine einwandfreie galvanische Verbindung zwischen dem Widerstandselement und den Anschlussdrähten her. Durch Verwendung eines Speziallotes mit besonders hohem Schmelzpunkt wird gewährleistet, dass die Widerstände der in der Praxis vorkommenden Temperaturbeanspruchung während des Verlötens in die Schaltung einwandfrei gewachsen sind.

Mittels einer hochtourigen Diamantschleifscheibe wird in den Metallfilmbelag des Vorwertes eine sog. Wendel- oder Spiralkerbe eingeschliffen. Die Breite und die Steigung der

33'243-252

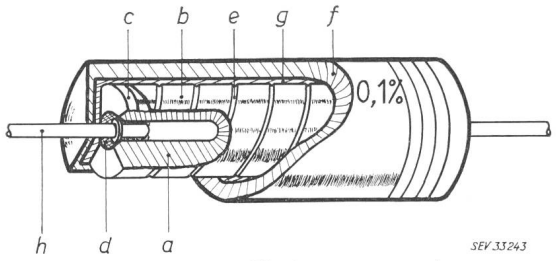

Fig. 1

Aufbau eines nicht induktionsarmen Metallfilm-Widerstandes

a) Trägerkörper aus Keramik; *b* auf den Trägerkörper aufgedampfter Metallfilm; *c* versilberte Stirnfläche des Trägerkörpers zur Gewährleistung einer guten Kontaktierung des Widerstandselementes; *d* Lötstelle zwischen versilberter Stirnfläche und Anschlussdraht; *e* in den aufgedampften Metallfilmbelag eingeschliffene Wendelkerbe; *f* Keramik- oder Epoxydharz-Schutzrohr; *g* Füllung aus einer Mischung Epoxydharz und Quarzsand; *h* Anschlussdraht

Spiralkerbe wird entsprechend dem gewünschten Widerstandwert und der garantierten Nennlast gewählt. Bei sorgfältiger Ausführung dieser Spiralisierung kann eine Genauigkeit des Widerstandwertes bei der Fertigung grosser Stückzahlen bis zu $\pm$ 0,5%, bei der Fertigung von Einzelexemplaren bis zu $\pm$ 0,25% erreicht werden.

Die an einem Widerstand liegende Spannung ist nicht nur durch die Wärmebelastung, die sie in Verbindung mit dem auftretenden Strom erzeugt, begrenzt, sondern auch durch die Potentialdifferenz zwischen zwei benachbarten Wendelkerben. Wenn diese Spannungsdifferenz zu hoch wird, besteht die Gefahr, dass Überschläge zwischen den Wendelkerben auftreten und Partikelchen aus dem Metallfilmbelag herausgerissen werden können, die dann zwischen benachbarten Wendelkerben eine Brücke bilden. Zufolge einer derartigen Brückenbildung sinkt der Widerstandwert entsprechend der kurzgeschlossenen Wendelwindung und täuscht eine Unstabilität des Widerstandbelages vor. Dies führt bei gleichbleibender an den Widerstand angelegter Spannung zu einem Anstieg des Stromes und demzufolge zu einer thermischen Überlastung der übrigen, nicht kurzgeschlossenen Wendelkerben, was schliesslich zur völligen Zerstörung des Widerstandes führen kann.

Durch den in den Widerstandbelag eingeschliffenen Wendel wird eine gewisse Induktivität erzeugt, die für bestimmte Anwendungen im Gebiete höherer Frequenzen unerwünscht ist. Deshalb werden zur Erreichung des Endwertes für induktionsfreie Metallfilm-Widerstände an Stelle des Wendels sog. Längskerben eingeschliffen, die gleichmässig auf den Umfang des Widerstandes verteilt sind (Fig. 4).

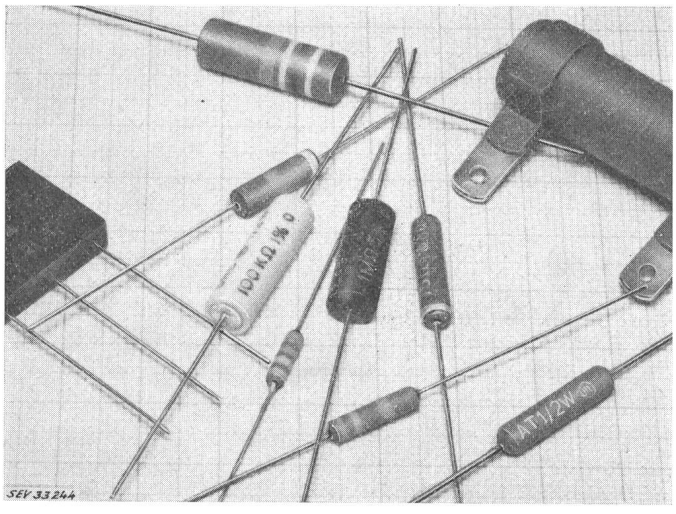

Fig. 2

Metallfilm-Widerstände verschiedener Typen desselben Fabrikates

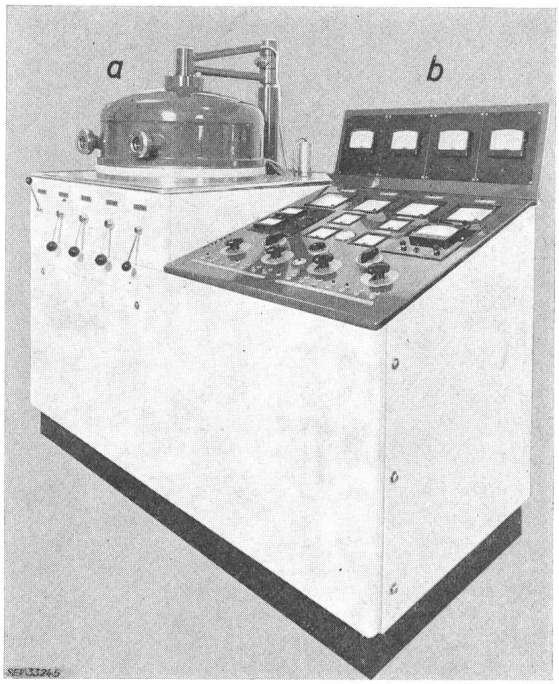

Fig. 3

Hochvakuum-Bedampfungsanlage zur Herstellung von Metallfilm-Widerständen

a Vakuumpumpe mit der dazugehörigen Glocke und die zur Bedienung notwendigen Schalthebel; *b* Kommandopult mit der Messbrücke und den für die Steuerung und Überwachung des Bedampfungsprozesses notwendigen Instrumenten und Bedienungsstellen

Wie erwähnt, kann durch die Spiralisierung des Vorwertes im besten Falle eine Genauigkeit von $\pm$ 0,25% erreicht werden. Wird aber eine noch engere Toleranz des Nennwertes von z. B. $\pm$ 0,1% gewünscht, kann der vorabgeglichene und vorstabilisierte Widerstand durch eine chemisch-physikalische Behandlungsmethode irreversibel so verändert werden, dass er in den gewünschten Toleranzbereich zu liegen kommt.

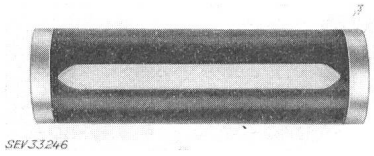

Fig. 4

Beispiel eines induktionsfreien Antennenabschluss-Widerstandes für einen Frequenzbereich bis zu 300 MHz

bei dem zur Vermeidung der Induktivität an Stelle der eingeschliffenen Wendelkerbe Längskerben angebracht wurden

Je nach Feuchtigkeitsbeständigkeit werden die Widerstände mit mehrfachen glimmerhaltigen Silikonlacküberzügen oder durch Eingiessen in ein Epoxydharzrohr geschützt, oder aber hermetisch in ein Keramikrohr verlötet. Zur Gewährleistung einer guten Wärmeableitfähigkeit wird als Füllmittel z. B. Quarzsand verwendet (siehe auch Fig. 1).

3. Eigenschaften

3.1. Temperaturkoeffizient

Die Abhängigkeit des Widerstandwertes von der Temperatur wird als Temperaturkoeffizient α angegeben. (Normalerweise in %/°C oder in 10^{-6}/°C):

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 (t_2 - t_1)}$$

In dieser Gleichung bedeuten R_1 den bei der Temperatur t_1 gemessenen Widerstandwert und R_2 den Widerstandwert bei der Temperatur t_2. Da der Temperaturkoeffizient über grössere Temperaturbereiche nur angenähert linear ist, muss immer festgestellt werden, für welches Temperaturintervall er gültig ist.

Der Temperaturkoeffizient von Metallfilm-Widerständen ist von der Oberflächenbeschaffenheit (Rauhigkeit) des Trägerkörpers und der dadurch beeinflussten Homogenität des Metallfilmes, von der Legierung und der Sorgfalt bei der Bedampfung abhängig.

Zur Gewährleistung eines homogenen Gefügeaufbaues des aufgedampften Metallfilmbelages und demzufolge zur Erreichung eines kleinen Temperaturkoeffizienten muss die Rauhigkeit der Oberfläche des sauber geschliffenen und polierten feinkristallinen Keramikkörpers minimal sein. Zudem muss die Aufprallgeschwindigkeit der einzelnen Legierungsmoleküle beim Bedampfungsprozess durch zweckmässige Regulierung der Austrittstemperatur der Moleküle aus dem Schmelztiegel so klein als möglich gehalten werden.

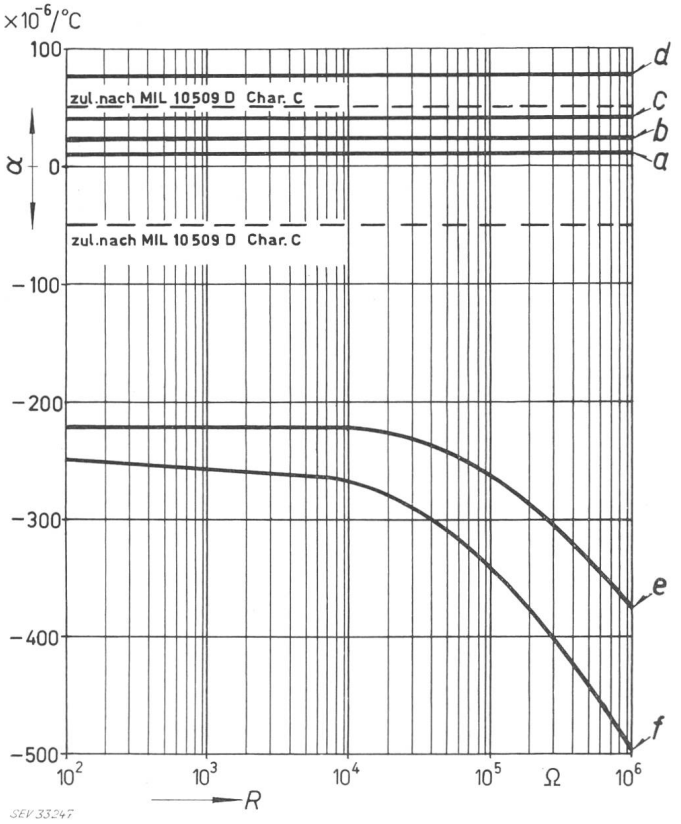

Fig. 5

Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten α vom Widerstandwert

Die nach Publikation MIL 10509/D (Military Specification for Resistors, Fixed, Film High Stability) zulässigen Grenzen sind gestrichelt eingezeichnet

(Nach neuestem Entwurf der CEI wurde für Präzisionswiderstände als Grenze des Temperaturkoeffizienten $\leqq \pm 50 \cdot 10^{-6}/°C$ vorgeschlagen.)

Kurve *a* Metallfilm-Widerstand hermetisch in ein Keramikrohr eingelötet.
Nennwert des Temperaturkoeffizienten $\alpha \leqq \pm 15 \cdot 10^{-6}/°C$

Kurve *b* Metallfilm-Widerstand gemäss *a* sowie Metallfilm-Widerstand in Epoxydharzrohr eingegossen mit je einem Nennwert des Temperaturkoeffizienten α von $\leqq \pm 25 \cdot 10^{-6}/°C$

Kurve *c* Metallfilm-Widerstand gemäss *a* und *b* sowie Metallfilm-Widerstand lackiert mit je einem Temperaturkoeffizienten α von $\leqq \pm 50 \cdot 10^{-6}/°C$

Kurve *d* Metallfilm-Widerstand lackiert mit einem Temperaturkoeffizienten α von $\leqq \pm 100 \cdot 10^{-6}/°C$

Kurve *e* Kohleschicht-Präzisions-Widerstand lackiert

Kurve *f* Kohleschicht-Widerstand lackiert normaler Qualität

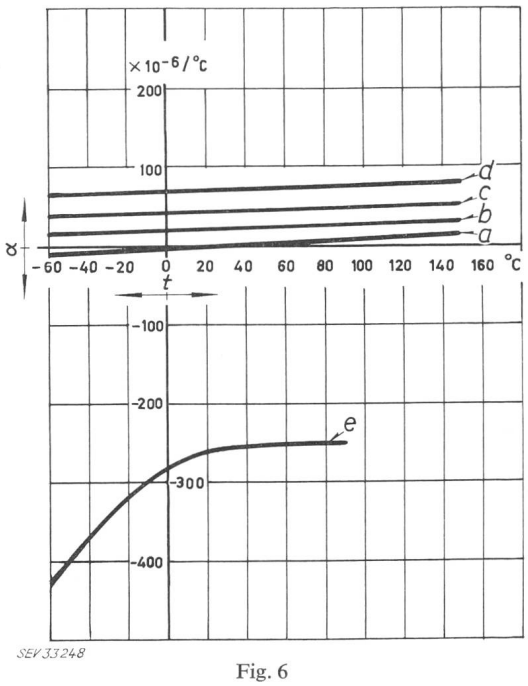

Fig. 6

Charakteristische Kurven des Temperaturkoeffizienten α in Funktion der Temperatur t für einige handelsübliche Metallfilm- und Kohleschicht-Widerstände

Kurven *a*...*d* Metallfilm-Widerstände α:
a $\alpha \leqq \pm 15 \cdot 10^{-6}/°C$; *b* $\alpha \leqq \pm 25 \cdot 10^{-6}/°C$;
c $\alpha \leqq \pm 50 \cdot 10^{-6}/°C$; *d* $\alpha \leqq \pm 100 \cdot 10^{-6}/°C$

Kurve *e* Kohleschicht-Widerstand durchschnittlicher Qualität (Mittelwert) $-300 \cdot 10^{-6}/°C$

Eine weitere positive Eigenschaft der Metallfilm-Widerstände gegenüber Kohleschicht-Widerständen zeigt Fig. 5, in welcher der Temperaturkoeffizient α in Abhängigkeit vom Widerstandwert R aufgetragen ist. Die Kurven zeigen deutlich, dass der Temperaturkoeffizient von Metallfilm-Widerständen über den gesamten praktisch realisierbaren Widerstandbereich konstant bleibt: ein Vorteil, den die Kohleschicht-Widerstände nicht aufweisen. Für die in Fig. 5 aufgezeichneten Messkurven wurden handelsübliche Metallfilm-Widerstände mit einer Nennlast von 1/2 W und als Vergleich Kohleschicht-Präzisions-Widerstände sowie Kohleschicht-Widerstände von Rundfunk-Qualität, ebenfalls mit einer Nennlast von 1/2 W, genommen. Die einzelnen Kurven stellen Mittelwerte aus einer grossen Zahl von Messwerten dar.

Während bei Kohleschicht-Widerständen der Temperaturkoeffizient mit zunehmenden Widerstandwerten, bzw. abnehmender Schichtdicke stark nach negativen Werten fällt, bleibt der Temperaturkoeffizient von Metallfilm-Widerständen praktisch unabhängig vom Widerstandwert. Die charakteristischen Kurven des Temperaturkoeffizienten in Funktion der Temperatur sind in Fig. 6 aufgezeichnet. Sie zeigen deutlich, dass der Temperaturkoeffizient von Metallfilm-Widerständen im Temperaturbereich von $-60 \ldots +150°C$ angenähert linear verläuft, während bei Kohleschicht-Widerständen die Linearität nur zwischen sehr engen Temperaturgrenzen gegeben ist.

Die Bedeutung eines kleinen Temperaturkoeffizienten wird klar, wenn man bedenkt, dass z. B. Kohleschicht-Widerstände der Klasse 0,5 DIN (der besten Güteklasse für Kohleschicht-

Widerstände der Deutschen Industrie-Normen, DIN 41400) mit einem für diese Widerstände sehr guten Temperaturkoeffizienten von $-250 \cdot 10^{-6}/°C$ ihren Widerstandwert bei einer Erwärmung von $+20°C$ auf $+70°C$ um $-1{,}25\%$ ändern. Unter gleichen Bedingungen ändert sich der Widerstandwert von Metallfilm-Widerständen derselben Güteklasse mit einem Temperaturkoeffizienten von z. B. $\leqq \pm 15 \cdot 10^{-6}/°C$ nur um $\leqq \pm 0{,}075\%$. Während in einem Rundfunkgerät ein Temperaturkoeffizient der Widerstände von $\pm 400 \cdot 10^{-6}/°C$ durchaus ohne Nachteile zulässig ist, würde in einem Gleichstromverstärker der gleiche Temperaturkoeffizient die Verwendung des Gerätes unmöglich machen, bzw. den Konstrukteur dazu zwingen, komplizierte Vorrichtungen zur Konstanthaltung und Regelung der Temperatur anzubringen.

3.2. Stabilität

3.2.1 Stabilität bei Lagerung

Wie schon erwähnt, müssen Trägerkörper von höchster Qualität und feinster Oberfläche für die Herstellung hochqualitativer Widerstände verwendet werden. Selbst kleinste Poren oder kleinste Unrauhigkeiten in der Oberfläche der Keramikkörper können zu Strukturänderungen des Gefügeaufbaus der Metallfilm-Widerstände führen, wodurch unerwünschte Änderungen des Widerstandwertes bei der Lagerung und im Betrieb erzeugt werden, was die Stabilität des Metallfilm-Widerstandes beeinträchtigt. Aus diesem Grunde ist es notwendig, dass der Trägerkörper aus einer sehr feinkörnigen Keramikmasse mit feinstgeschliffener Oberfläche besteht. Zur Erreichung einer hohen Stabilität können ausserdem während des Fabrikationsprozesses geeignete Stabilisierungs- und Alterungsmethoden eingestreut werden, wie z. B. Lagerung der bedampften ungewendelten Widerstände je nach Typ und Widerstand während 25...120 h bei Temperaturen von 160...250° C.

Wie bereits im Abschnitt 2 erwähnt, werden die bedampften und noch ungewendelten Widerstände im Anschluss an den Bedampfungsprozess durch einen Schutzlack vor äusseren Einflüssen geschützt. Dieser wird nun beim Stabilisierungsprozess gleichzeitig ausgehärtet.

Aus Fig. 7 ist die mittlere Abweichung des Widerstandes (Lagerungsstabilität) an einer grossen Anzahl unbelasteter, in normaler Raumtemperatur und Raumfeuchtigkeit während 600 Tagen gelagerter Widerstände ersichtlich, wobei als Vergleich wiederum Kohleschicht-Widerstände dienen. Daraus geht eindeutig die viel kleinere Änderung des Widerstandes

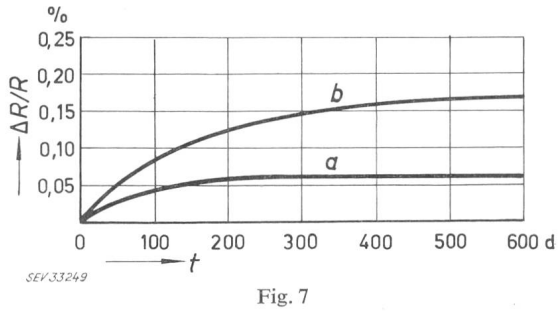

Fig. 7

Änderung des Widerstandes in Funktion der Zeit gemessen an einer Anzahl unbelasteter bei normaler Raumtemperatur und Raumfeuchtigkeit gelagerter Metallfilm- und Kohleschicht-Präzisions-Widerstände

a Metallfilm-Widerstände hermetisch in ein Keramikrohr eingelötet. Metallfilm-Widerstände in ein Epoxydharzrohr eingegossen und Metallfilm-Widerstände lackiert

b Kohleschicht-Präzisions-Widerstände, lackiert

der Metallfilm-Widerstände hervor. Es ist dabei auffallend, dass der Alterungsprozess nach ca. 200 Tagen seinen Höhepunkt erreicht und abgeschlossen ist. Bei den Kohleschicht-Widerständen dauert derselbe Alterungsprozess fast 3mal so lang und erreicht erst zwischen 500 und 600 Tagen seinen Höhepunkt und das Ende.

3.2.2 Stabilität bei Nennlast

Nebst den hohen Anforderungen, die man an die Qualität der Oberfläche der Trägerkörper stellt, wird von den Herstellern danach getrachtet, Keramikträger möglichst frei an Natrium zu verwenden. Bei gleichzeitiger Einwirkung von kleinsten Spuren an Feuchtigkeit und Gleichstrom besteht für jeden Widerstand die Gefahr des Auftretens elektrolytischer Erscheinungen. Durch Bildung von Ionen zufolge allfällig vorhandenen freien Natriums wird eine Strukturänderung des Gefüges des Widerstandbelages hervorgerufen und damit der Widerstandwert und die Stabilität beeinflusst. Um weiterhin im Betrieb eine hohe Stabilität zu erreichen ist es wichtig, ausser den Stabilisierungs- und Alterungsvorgängen bei der Herstellung der Endwerte die einzelnen Wendel bzw. Längskerben regelmässig über der Oberfläche des Widerstandes zu verteilen, um hiedurch eine gleichmässige spezifische Strombelastung zu erhalten. Gleichzeitig wird damit die ganze typenabhängige Oberfläche des Widerstandes benützt, um die bei der Belastung entstehende Eigenwärme möglichst gut abzuleiten, und um hierdurch eine günstige Relation zwischen Widerstandmessung und Oberflächentemperatur zu schaffen.

Eine Bewährungsprobe für Widerstände bildet die Lebensdauerprüfung nach den Empfehlungen der Commission Electrotechnique Internationale (CEI), sowie den amerikanischen Militärvorschriften MIL oder den Vorschriften der Deutschen-Industrie-Normen DIN.

Nach den internationalen Empfehlungen für die Lebensdauerprüfung gemäss Publikation 115 der CEI, Recommandations pour résistances fixes non bobinées, Typ I (Typ I — Widerstände sind laut Definition der CEI für Schaltungen geeignet, wo hohe Stabilitätsanforderungen von Wichtigkeit sind), und der Publikation MIL-R-10509/D werden die Widerstände während 1000 h einer Nenngleichstrombelastung ausgesetzt, wobei der Strom jeweils 1½ h ein und ½ h ausgeschaltet bleibt. Widerstandmessungen werden nach 50, 100, 250, 500, 750 und 1000 h durchgeführt. Der Schwierigkeitsgrad der Prüfung ist durch verschiedene Umgebungstemperaturen festgelegt und nach Publikation 115 der CEI bei $+40°C$ Umgebungstemperatur in die Gruppe IA, bei $+70°C$ Umgebungstemperatur in die Gruppe IB eingeteilt. Nach Publikation MIL-R-10509/D werden die Gruppen bei $+40°C$ Umgebungstemperatur «X», bei $+70°C$ «B» und bei $+125°C$ «C» genannt.

Die Widerstände müssen nach Publikation 115 der CEI und Publikation MIL-R-10509/D die Bedingungen nach Tabellen I und II erfüllen:

Zulässige Änderungen des Widerstandes gemäss den Empfehlungen des CEI

Tabelle I

CEI-Gruppe	Umgebungstemperatur	Zulässige Änderung des Widerstandes [1]) für Widerstände von ¼, ½, 1 und 2 W Leistung	
IA	40	$\leqq 1\%$...220 kΩ	$\leqq 1{,}5\%$ über 220 kΩ
IB	70	$\leqq 1\%$...220 kΩ	$\leqq 1{,}5\%$ über 220 kΩ

[1]) Nach dem neuesten Entwurf der CEI soll die Grenze der zulässigen Änderung des Widerstandes für Präzisionswiderstände auf $\leqq 0{,}5\%$ oder 0,05 Ω gesenkt werden.

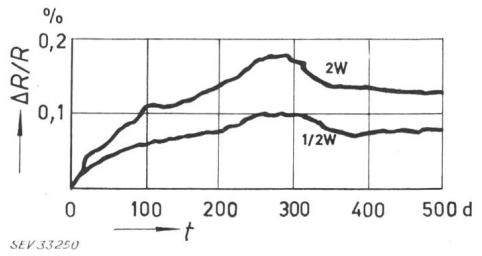

Fig. 8

Änderung des Widerstandes in Funktion der Zeit bei zyklischer Belastung und + 70 °C Umgebungstemperatur

gemessen an einem hermetisch in ein Keramikrohr eingelöteten 1/2-W- und 2-W-Metallfilm-Widerstand

Zulässige Änderung des Widerstandes gemäss den MIL-Vorschriften

Tabelle II

MIL-Gruppe	Umgebungstemperatur	Zulässige Änderung des Widerstandes %
X	40	≦ 1
B	70	≦ 1
C	125	≦ 0,5

Die durch die Lebensdauerprüfung hervorgerufene Änderung des Widerstandes in Funktion der Zeit eines hermetisch in ein Keramikrohr eingelöteten 1/2- und 2-W-Metallfilm-Widerstandes zeigt Fig. 8. In Fig. 9 wird die Änderung des Widerstandes in Funktion des ursprünglichen Widerstandwertes dargestellt, wobei die zulässigen Grenzwerte der Änderungen gestrichelt eingezeichnet wurden. Die Typen *a, b, d,* und *e* wurden nur bei einer Umgebungstemperatur von +40 und +70 °C geprüft, da diese Widerstände nur für eine Umgebungstemperatur von +70 °C gebaut sind und somit die Bedingungen nach Publikation 115 der CEI Gruppe IA und IB sowie Publikation MIL-R-10509/D Gruppe X und B erfüllen, während der Typ *c* die Bedingungen der Publikation MIL-R-10509/D Gruppe C einwandfrei erfüllt. Zum Vergleich wurden Kohleschicht-Präzisions-Widerstände, die hermetisch in ein Keramikrohr eingelötet sind, denselben Prüfungen unterworfen und die Ergebnisse in Fig. 9 aufgeführt.

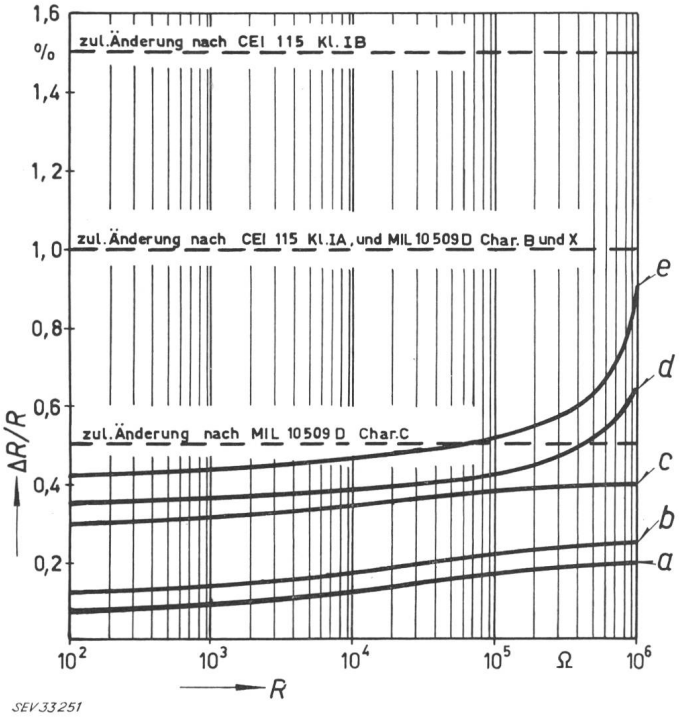

Fig. 9

Charakteristische Kurven der Änderung des Widerstandes in Funktion des ursprünglichen Widerstandwertes bei der Lebensdauerprüfung nach der Publikation 115 der CEI [1] und der Publikation MIL-R-10509/D

a Metallfilm-Widerstände hermetisch in ein Keramikrohr eingelötet, Metallfilm-Widerstände in ein Epoxydharzrohr eingegossen und Metallfilm-Widerstände lackiert, bei + 40 °C Umgebungstemperatur
b Metallfilm-Widerstände gemäss *a*, jedoch bei + 70 °C Umgebungstemperatur
c Metallfilm-Widerstände hermetisch in ein Keramikrohr eingelötet bei + 125 °C Umgebungstemperatur
d Kohleschicht-Präzisions-Widerstände hermetisch in ein Keramikrohr eingelötet bei + 40 °C Umgebungstemperatur
e Kohleschicht-Präzisions-Widerstände gemäss *d*, jedoch bei + 70 °C Umgebungstemperatur

[1]) Nach neuestem Entwurf der CEI soll die Grenze der zulässigen Änderung des Widerstandes für Präzisionswiderstände auf ≦ 0,5 % oder 0,05 Ω gesenkt werden.

3.2.3 Stabilität in Feuchtigkeit

Die Feuchtigkeit schwankt in der Praxis sehr stark, so dass die Stabilität unter feuchten Bedingungen nur auf Grund konkreter, definierter Verhältnisse, wie sie für Prüfzwecke verwendet werden, allgemein verständlich und eindeutig angegeben werden kann.

Bei der Prüfmethode gemäss der Publikation 115 der CEI werden die Widerstände nach einer langandauernden Prüfung der Feuchtigkeitsbeständigkeit, Strengegrad IV (schärfster genormter Strengegrad durch die CEI) während 56 Tagen und einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 90...95 % bei einer Temperatur von 40 ± 2 °C an eine Polarisationsspannung von 5 V– angelegt.

Die Widerstände von 1/4, 1/2, 1 und 2 W Leistung müssen folgende Bedingungen erfüllen:

Widerstandbereich	Zulässige Änderung des Widerstandes [1])
22 Ω ...220 kΩ	= 1 %
221 kΩ... 1 MΩ	= 1,5 %

Im Anschluss an die Lagerung in Feuchtigkeit werden die Widerstände während 24 h an Nennspannung gelegt und anschliessend nach einer Erholungszeit von 4 h wiederum gemessen, wobei die Änderungen nicht mehr betragen dürfen als bereits erwähnt.

Bei der Prüfung der Feuchtigkeitsbeständigkeit nach der Publikation MIL-Std-202 werden die Widerstände einer Behandlung von 10 Prüfzyklen unter Nennlast mit Gleichstrom bei einer relativen Feuchtigkeit von 90...98 % unterzogen. Während jedem einzelnen Zyklus werden die Widerstände im Feuchtraum mehrmals von Raumtemperatur auf +65 °C erwärmt und anschliessend auf —10 °C abgekühlt. Wie schon bei der Lebensdauerprüfung nach MIL werden auch bei der Prüfung der Feuchtbeständigkeit die Widerstände in die Gruppen X, B und C eingeteilt, wobei folgende Bedingungen erfüllt werden müssen:

MIL-Gruppe	Zulässige Änderung des Widerstandes
X	≦ 4 %
B	≦ 3 %
C	≦ 0,5 %

Die Resultate der nach MIL-Std-202 auf Feuchtigkeitsbeständigkeit geprüften handelsüblichen Widerstände (prozen-

[1]) Nach neuestem Entwurf der CEI (Dokument 40 Sekretariat 132 vom Januar 1964) soll die Grenze der zulässigen Änderung des Widerstandes für Präzisionswiderstände auf ≦ 0,5 % oder 0,05 Ω abgesenkt werden.

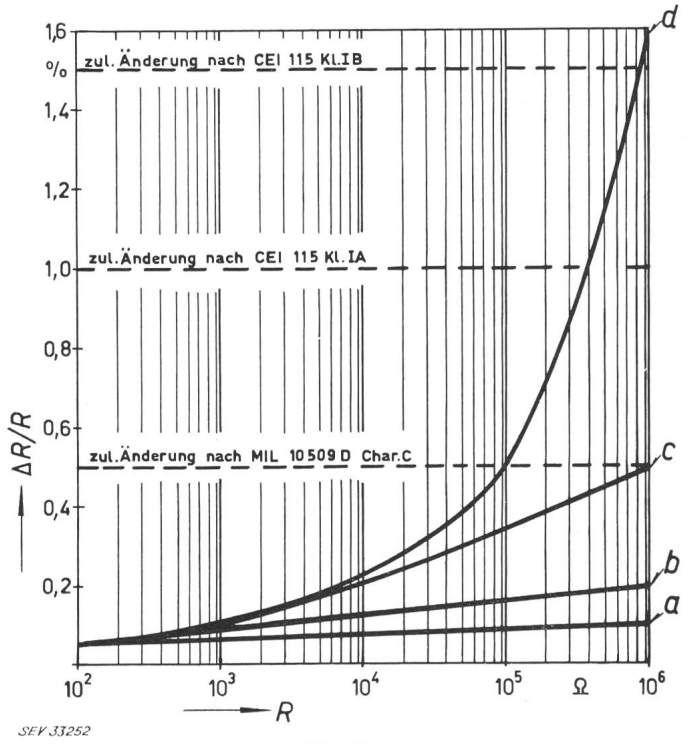

Fig. 10

Charakteristische Kurven der Änderung des Widerstandes in Funktion des ursprünglichen Widerstandnennwertes bei der Prüfung der Feuchtbeständigkeit nach der Publikation MIL-Std-202

Die nach Publikation MIL-Std-202 und Publikation 115 der CEI [1]) zulässigen Grenzen der Abweichungen sind gestrichelt eingezeichnet
a Metallfilm-Widerstände hermetisch in ein Keramikrohr eingelötet
b Metallfilm-Widerstände in ein Epoxydharzrohr eingegossen
c Metallfilm-Widerstände lackiert
d Kohleschicht-Präzisions-Widerstände, lackiert

[1]) siehe Fussnote bei Fig. 9

tuale Änderung des Widerstandwertes in Funktion des ursprünglichen Widerstandes) sind in Fig. 10 dargestellt. Die Wirksamkeit des hermetischen Abschlusses von Widerständen ist deutlich erkennbar, da die Widerstandänderung nur noch durch die normale Alterung zufolge Temperatureinfluss bedingt, und nicht auf Feuchtigkeitseinfluss zurückzuführen ist. Ein Vergleich von lackierten Metallfilm-Widerständen mit lackierten Kohleschicht-Widerständen lässt aber erkennen, dass offenbar auch die Eigenart des Widerstandelementes eine wesentliche Rolle spielt, denn die stabileren Eigenschaften des Metallfilm-Widerstandes bei dieser Prüfung sind eindeutig. Der Grund liegt wohl darin, dass das homogene und durch den Schutzlack geschützte Widerstandelement selbst ein Eindringen von Feuchtigkeit durch den äusserst kompakten Gefügeaufbau und die innige Verbindung mit dem Trägerkörper erfolgreich verhindert. Ausserdem wird als Widerstandelement bei den Metallfilm-Widerständen eine Chrom-Nickel-Legierung verwendet, die eine Zersetzung zufolge elektrolytischer Wirkung durch Feuchtigkeit auf ein Minimum beschränkt.

4. Dauerbelastbarkeit, Impulsbelastbarkeit

Die Belastbarkeit eines Widerstandes hängt unmittelbar mit seiner Fähigkeit zusammen, die Verlustwärme abzuleiten. Die notwendige Kühlung erfolgt im wesentlichen

durch die umgebende Luft (Konvektion),

durch Wärmeabstrahlung,

durch Wärmeableitung über die Anschlussarmaturen.

Es wird selbstverständlich danach getrachtet, Widerstände so zu konstruieren und herzustellen, dass bei Nennlast eine möglichst kleine Erwärmung resultiert. Dies lässt sich durch optimale Kombination der Grösse der wärmeabstrahlenden Oberfläche, Farbe der Oberfläche und Dicke des wärmeableitenden Anschlussdrahtes erreichen. Die Kühlung über die Anschlüsse wirkt sich jedoch nur bei Widerständen kleiner Dimensionen wesentlich aus.

Die Niedrighaltung der Oberflächentemperatur ist von ausschlaggebender Wichtigkeit zur Erreichung einer guten Stabilität des Widerstandes, was durch die Realisierung der oben dargestellten Gesichtspunkte geschieht. Bei Kohleschichtwiderständen tritt nämlich bei steigender Temperatur der Kohleschicht ein zunehmender Abbau der Kohleschichtdicken zufolge Verbrennung auf, wodurch der Widerstand langsam unreversibel steigt. Bei Metallfilm-Widerständen kann durch Wahl einer schwer oxydierbaren Legierung zur Erzeugung des Widerstandelementes der Abbau der aktiven Widerstandschicht zufolge Temperatureinfluss bzw. Oxydation in kaum messbaren Grenzen gehalten werden. Dadurch ist für Metallfilm-Widerstände von vornherein bei Dauerbelastung oder auch sogar bei Überbelastung eine höhere zeitliche Konstanz des Widerstandwertes gewährleistet. Dennoch ist aber wichtig, auch bei Metallfilm-Widerständen die Oberflächentemperatur im Nennbetrieb möglichst klein zu halten, um den bei diesen Widerständen allein massgebenden Einfluss des Temperaturkoeffizienten so klein wie möglich halten zu können. Da überdies, wie Fig. 5 deutlich zeigt, der Temperaturkoeffizient von Metallfilm-Widerständen wesentlich kleiner ist als bei Kohleschicht-Widerständen, ist selbst dieser Einfluss bei jenen Typen weniger ins Gewicht fallend als bei diesen.

Die weitgehende Unabhängigkeit der elektrischen Daten über den gesamten Widerstandbereich, die hohe Temperaturstabilität verbunden mit dem kleinen Temperaturkoeffizienten gestattet die volle Ausnützung der Nennbelastbarkeit der Metallfilm-Widerstände, was bedeutet, dass es nicht mehr notwendig ist, aus Gründen der Betriebssicherheit oder zur Verbesserung der Stabilität leistungsmässig überdimensionierte Widerstände in ein Gerät einzubauen, wie aus Fig. 9 ersichtlich ist. Beim Metallfilm-Widerstand kann sogar aus den erwähnten Gründen die Belastung bzw. die Stromdichte, ohne Gefahr einer unzulässigen, bleibenden Widerstandsänderung in Kauf nehmen zu müssen, stark über die Nennbelastung hinausgesteigert werden (bis zur doppelten Nennlast und mehr), da das Widerstandelement selbst hohe Temperaturen ohne Schaden aushält und nur darauf geachtet werden muss, dass die Grenzspannung und die Grenztemperatur des Schutzlackes oder einer sonstigen Umhüllung der Metallfilm-Widerstände nicht überschritten wird. Bei gewissen Metallfilm-Widerständen, die heute im Handel erhältlich sind, ist eine intermittierende Impulsbelastbarkeit bis zur 100-fachen Nennlast während 0,001 s zulässig.

5. Der Spannungskoeffizient

Als Mass für die Abhängigkeit des Widerstandwertes von der anliegenden Spannung gilt der Spannungskoeffizient, der die Widerstandänderung in %/V angibt. In den meisten Fällen ist diese Abhängigkeit so gering, dass ihr praktisch keine Bedeutung zukommt. Die Messung erfolgt z. B. durch Änderung der an die Widerstände angelegten Spannung von 10 auf 100%, wobei die Zeitdauer der angelegten Spannung so kurz zu wählen ist, dass keine messbare Erwärmung des Widerstandelementes auftritt, ansonsten sich der Widerstandände-

rung infolge Spannungseinfluss eine Änderung zufolge Temperatureinfluss überlagert.

Der Spannungskoeffizient der Kohleschicht-Widerstände beträgt im Mittel ca. $20 \cdot 10^{-6}$/V, derjenige der Metallfilm-Widerstände im Mittel ca. $5 \cdot 10^{-6}$/V. Diese Zahlen zeigen deutlich, dass die Metallfilm-Widerstände auch in dieser Hinsicht den Kohleschicht-Widerständen überlegen sind.

6. Rauschpegel

Bekanntlich lässt sich Wärme als Bewegungsenergie der kleinsten Materialteilchen auffassen. Beim Nullpunkt der absoluten Temperatur ist sie ebenfalls gleich Null, da sich alle Teilchen im Zustand der Ruhe befinden. Zu den wärmeabhängigen Bewegungen der Moleküle kommt bei elektrischen Leitern ausserdem eine Bewegung der freien Elektronen hinzu. Legt man einem Widerstand eine konstante Spannung an, so überlagert sich dem aus ihr und dem Widerstandwert bedingten Strom ein Wechselstrom, der durch die Schwankungen der Elektronenbewegung hervorgerufen wird. Das Frequenzband ist hiebei sehr breit und lässt sich in ein gleichmässiges Spektrum reiner Sinusschwingungen auflösen. Der Rauscheffekt ist einerseits von der Schichtstärke und Länge des Widerstandelementes und dem damit verbundenen homogenen Gefügeaufbau, der Innigkeit der Verbindung zwischen Widerstand und den Enden des Trägerkörpers sowie der Innigkeit der Verbindung dieser Enden mit den Anschlussdrähten, anderseits von der angelegten Spannung abhängig.

Der Rauschpegel der Widerstände, d. h. die Rauschspannung pro Volt angelegter Prüfspannung am Widerstand wird in µV/V angegeben. Z. B. zusammen mit dem Röhrenrauschen (auf das hier nicht näher eingegangen wird) begrenzt der Rauschpegel die sinnvoll anwendbare Verstärkung eines Empfängers oder Verstärkers, weil das Eingangssignal im Rauschpegel verschwindet, sobald es kleinere oder gleiche Werte annimmt, wie die Eigenrauschspannung der Widerstände. Für gewisse Schaltungsanwendungen ist deshalb der Konstrukteur darauf angewiesen, Widerstände mit kleinstem Eigenrauschen zu verwenden.

Die in einem Widerstand erzeugte Rauschleistung errechnet sich nach *Nyquist* wie folgt:

$$P_r = \frac{U^2}{R} = 4kT \cdot \Delta f$$

Darin bedeuten

P_r Rauschleistung [W];
k $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ (Bolzmannsche Konstante)
T absolute Temperatur des Widerstandes [°K]
Δf Frequenzbereich [Hz]
R Widerstand [Ω]

Aus dieser Gleichung errechnet sich die Rauschspannung:

$$U = \sqrt{P_r R} = \sqrt{4kT \cdot \Delta f \cdot R} \quad [\text{V}]$$

$$U\,[\mu\text{V}] = 0{,}00745 \sqrt{T \cdot \Delta f \cdot R} \quad [°\text{K} \cdot \text{kHz} \cdot \text{k}\Omega]$$

Diese unvermeidbare Rauschspannung ist nach *Nyquist* umso grösser, je höher die Temperatur des Widerstandes, je grösser der Widerstandwert und je breiter das betrachtete Frequenzspektrum ist. Bei scharfen Anforderungen an die Rauscharmut empfiehlt sich der Metallfilm-Widerstand ganz besonders, denn eine wesentliche Eigenschaft besteht darin, dass die gemessenen Rauschwerte durchweg unterhalb 0,1 µV/V liegen, wobei Messungen in diesem Bereich verständlicherweise schwierig durchzuführen sind. Man kann aber in grober Annäherung sagen, dass der Rauschpegel der Metallfilm-Widerstände eine Zehnerpotenz niedriger liegt als derjenige von Kohleschicht-Präzisions-Widerständen.

Die beschriebenen Widerstände sollten, gemäss den Empfehlungen der CEI mit der Angabe des Types, des Widerstandwertes, der Toleranz, der Belastbarkeit und des Firmenzeichens gekennzeichnet sein.

Adresse des Autors:
K. Schär, W. Moor AG, Bahnstrasse 58, 8105 Regensdorf.

Statistische Untersuchung der Netzspannungsschwankungen

Von *H. Bühler*, Ciona di Carona

621.3.015.2 : 621.316.1

Ausgehend von der Definition der Spektraldichte von statistischen Schwankungen wird eine Messmethode beschrieben, bei der ein normaler Analogrechner verwendet wird. Das Verfahren wurde zur Bestimmung der Spektraldichte der Netzspannungsschwankungen angewendet. Bei den hier angeführten Resultaten wird insbesondere die Streuung der Messwerte und die Bestimmung der Mittelwerte gezeigt.

En partant de la définition de la densité spectrale de variations statistiques, l'auteur décrit une méthode de mesure qui permet l'emploi d'un calculateur analogique normal. Cette méthode a été utilisée pour déterminer la densité spectrale des fluctuations de la tension d'un réseau. Les résultats montrent notamment la dispersion des valeurs mesurées et la détermination des valeurs moyennes.

1. Übersicht

Die Belastung eines elektrischen Netzes ist nie konstant, sondern es treten darin dauernde, normalerweise meist kleine Schwankungen auf. Diese Laständerungen bewirken, dass die Frequenz und die Spannung in einem Netz ebenfalls dauernden Schwankungen unterworfen sind. Die auftretenden Änderungen sind rein zufälliger Natur, zu ihrer Beschreibung müssen statistische Methoden herbeigezogen werden.

Über die Wirkleistungsschwankungen und die damit verbundenen Frequenzschwankungen wurden von der Studienkommission für die Regelung grosser Netzverbände des SEV verschiedene Untersuchungen durchgeführt, [1; 2; 3][1]). Die beschriebenen Untersuchungen sollen Aufschluss geben über die im Netz auftretenden Spannungsschwankungen. Solche Angaben sind z. B. interessant für die Bestimmung des Verhaltens von elektronischen Geräten, wie z. B. Genauigkeit der Drehzahl eines elektronischen Regelantriebes infolge der dauernden kleinen Änderungen der Netzspannung.

Während die langsamen Frequenzschwankungen, infolge der Wirklaständerungen in jedem Punkt eines Netzes praktisch gleich gross sind, sind die Spannungsschwankungen in jedem

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.