

Urdox-Widerstände

Technische Verwendung

Z

117-3

Verfasser: Dr. Wilfried Meyer, Berlin

DK 621.316.86

Allgemeines. Halbleiter-Widerstände haben in Form der Urdox-Widerstände (Urdox ist eingetragenes Warenzeichen der Osram G. m. b. H. Kommanditgesellschaft; seine Verwendung in vorliegender Arbeit erfolgt mit ausdrücklicher Genehmigung der Zeicheneinhaberin) eine weitgehende Anwendung gefunden; ihre physikalischen und technischen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten werden im folgenden beschrieben. Halbleiter sind Verbindungen, z. B. Metalloxyde, chemisch und röntgenographisch gleichförmig und ausschließlich Elektronenleiter. Ionenleiter und mechanische Gemische von Leitern und Nichtleitern fallen nicht unter die folgenden Betrachtungen.

Werkstoff-Eigenschaften. Bei einem Halbleiter fällt mit wachsender Temperatur der Widerstand W nach der Gleichung

$$W = a \cdot e^{b/T} \quad (1)$$

a und b sind Konstanten, T ist die absolute Temperatur. An Stelle von b wird auch der Ausdruck ε/k angeführt. k ist die Boltzmann-Konstante, ε das Produkt $e \cdot V$, die Ladung eines Elektrons multipliziert mit einer Spannung. Gleichung (1) ist für eine große Zahl von Werkstoffen zwischen 0°C und 400°C sichergestellt¹. Abweichungen von dieser Gleichung bei höheren und tieferen Temperaturen wurden beobachtet².

Bei den technisch verwendeten Widerständen liegt der Zahlenwert für b je nach Bauart zwischen 500 und 3000. Ist $b \ll 500$, so liegt kein eigentlicher Halbleiter mehr vor. Stoffe mit solchen b -Werten gehören in das Gebiet der Übergangslleiter; jenseits davon liegen die metallischen Leiter. Stoffe mit einem Wert für $b > 6000$ gehören in das Gebiet der Nichtleiter. Eine scharfe Begrenzung dieser Bereiche ist nicht möglich.

Der spez. Widerstand $\varrho_{(20^\circ\text{C})}$ technischer Widerstände liegt zwischen $10 \Omega \cdot \text{cm}$ und $20000 \Omega \cdot \text{cm}$. Dies sind keine Grenzwerte, sie sind durch die bisher gestellten Forderungen bestimmt. Eine Wärmebehandlung unter reduzierenden Bedingungen führt bei gesättigten Metalloxyden zu einer Widerstandsverminderung. Nach der Behandlung treten chemisch nicht beanspruchte Wertigkeitselektronen als Leitfähigkeitselektronen auf. Die Widerstandsänderung bei der gleichen Art der Vorbehandlung verläuft bei chemisch ungesättigten Oxyden umgekehrt. Es entstehen Körper, die je nach Art der Behandlung innerhalb des angegebenen Bereiches auf einen beliebigen spezifischen Widerstand eingestellt werden können. Neben Gleichung (1) gilt noch die Näherungsregel: $\log \varrho_T \sim b$, d. h. in einem gegebenen Temperaturbereich ist die Widerstandsänderung des Werkstoffs um so größer, je größer der spezifische Wider-

stand bei der Vergleichstemperatur T ist¹. Die Konstanten a und b der Gleichung (1) gelten als solche also nur für Widerstandskörper gleicher Art mit gleicher Vorbehandlung.

In Bild 1 sind Temperatur-Leitfähigkeitsmessungen dargestellt, gemessen an Körpern gleicher Art, die nach einer verschiedenen Vorbehandlung sehr verschiedene spez. Widerstandswerte aufweisen. Nach Gleichung (1) entstehen Geraden, wenn $\log \varrho$ in Abhängigkeit von $1/T$ aufgetragen wird. Die Neigung der Geraden ist ein Maß für den Zahlenwert von b . Der Temperaturkoeffizient ist nicht gleichbedeutend mit b^6 . Eine Umformung der Gleichung (1) führt zu dem Temperaturkoeffizienten α :

$$\alpha = \frac{1}{\varrho} \cdot \frac{d\varrho}{dT} = -\frac{b}{T^2} \quad (2)$$

Der Temperaturkoeffizient sinkt also mit steigender Temperatur. Er ist in $\text{vH je } ^\circ\text{C}$ für zwei handelsübliche Widerstände aus der Zahlentafel zu ersehen.

$^\circ\text{C}$	Bauart: U 920	U 3007
0	$\alpha = 1,28$	$\alpha = 2,27$
100	0,686	1,21
200	0,427	0,755
300	0,291	0,514
400	0,210	0,373

Ein großer Teil von Metalloxyden mit Halbleitereigenschaften zeigt schon bei 400°C analytisch oft nicht nachweisbare Änderungen in der Zusammensetzung. Hiermit sind z. T. über Zehnerpotenzen gehende Widerstandsänderungen verbunden. Diese Erscheinungen sind von untergeordneter Bedeutung bei Uranodioxyd und Magnesium-Titan-Spinell. Bis 1934 wurde in den Urdox-Widerständen der Auslandswerkstoff Uranodioxyd verwendet. Seit 1934/35 wird der leicht herstellbare Heimwerkstoff Mg-Ti-Spinell benutzt. Die Kurven in Bild 1 sind an Spinell-Körpern gemessen.

Bestimmte Widerstandswerte bei Körpern aus Uranodioxyd können eingestellt werden durch Wärmebehandlung bei bestimmten, sehr kleinen Sauerstoffteildrücken des umgebenden Gases, bei Körpern aus Mg-Ti-Spinell durch Einhalten bestimmter Temperaturen während der reduzierenden Behandlung. Der nicht-

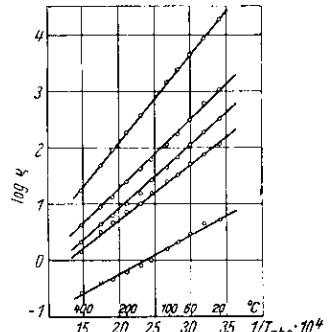


Bild 1. Widerstands-Temperatur-Kurven, gemessen an Mg-Ti-Spinellkörpern.

leitende Spinell wird hierbei zu einem Halbleiter. In beiden Fällen liegt die Temperatur oberhalb von 1000°C . Zum Schutz vor Oxydation befinden sich die Widerstandskörper in Glaskolben, die entlüftet oder mit einem indifferenten oder reduzierenden Gas gefüllt sind (Bild 2).

Anwendungen. Unterdrückung von Einschalt-Überströmen (Bild 2a, b und c). Die Leistungsaufnahme vieler Nutzlasten ist unmittelbar nach dem Einschalten wesentlich größer als im Betrieb. Es treten Einschalt-Überströme auf, die in mehr oder weniger langer Zeit auf den Nennstrom absinken, und deren Un-

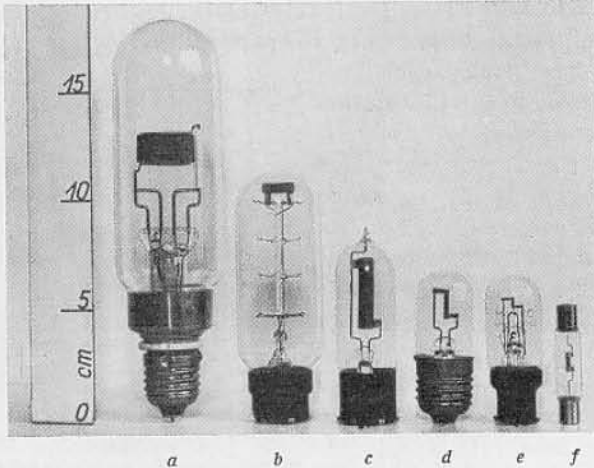


Bild 2. Auswahl handelsüblicher Urdox-Widerstände; a) 6 Ampere-Widerstand, b) EU 6, c) U 920, d) Verzögerungs-Widerstand, e) W 3, f) U 3007.

terdrückung in vielen Fällen notwendig ist. Die selbsttätige Steuerung eines Einschaltvorganges durch einen Urdox-Widerstand begrenzt den Einsatzstrom auf einen Bruchteil des Nennstromes. Die langsam vor sich gehende Erwärmung des Urdox-Körpers läßt mit der damit verbundenen Widerstandserniedrigung den Einschaltstrom auf den Nennstrom anwachsen (Bild 3).

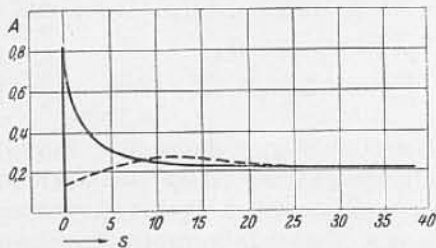


Bild 3. Einschaltvorgang; — ohne Urdox-Widerstand, - - - mit Urdox-Widerstand.

Eine Anpassung des Urdox-Widerstandes an beinahe beliebige Anforderungen in der Steuerung von Einschaltvorgängen ist gegeben durch die Einstellung eines innerhalb der angegebenen Grenzen beliebigen spez. Widerstandes für den Werkstoff und durch die richtige Bemessung der Wärmekapazität des Körpers. Allgemein gültige Angaben über die Anlaufzeit von Urdox-Widerständen sind nicht möglich, weil diese stets mitbestimmt ist durch die Nutzlast und die wirksame Spannung. Die Spannung an Urdox-Widerständen bei Nennstrom liegt je nach Bauart zwischen 7 und 12 V; Widerstände mit geringerer Spannung sind meist nur für Spannungsquellen $< 110\text{ V}$ benutzbar. Das Hauptanwendungsgebiet liegt auf dem Gebiet der Schwachstromtechnik. Die kleine Wattaufnahme und kleine

Wärmekapazität der Urdox-Körper bedingt nur geringe Abkühlzeiten. Bei Betriebspausen ist ein solcher Widerstand bald wieder schaltbereit. Widerstände für große Stromstärken haben größere Abkühlzeiten (Bild 4); nach kurzzeitigen Schaltphasen ist die den Einschalt-

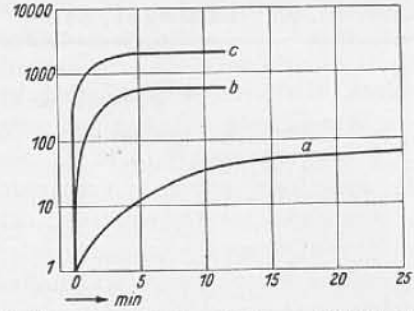


Bild 4. Abkühlgeschwindigkeit; a) 6-Amp.-Widerstand, b) U 3007, c) W 3. Der Ordinatenabschnitt 1 ist der Widerstandswert bei Vollast.

strom dämpfende Wirkung gering. Durch Verwendung eines Körpers mit hohem Widerstand und großem Temperaturkoeffizienten kann jedoch häufig eine ausreichende Steuerung des Einschaltvorganges auch nach kurzen Schaltphasen erzielt werden. Ist z. B. zur Dämpfung ein Anfangswiderstand $\rho_{(20^{\circ}\text{C})}$ von $300\ \Omega$ ausreichend, wird jedoch ein solcher von $3000\ \Omega$ verwendet, so braucht sich dieser bei Schaltphasen nicht auf 20°C abzukühlen, um wieder schaltbereit zu sein. Er durchläuft in kürzerer Zeit einen kleineren Temperaturbereich bis zum Erreichen des $300\text{-}\Omega$ -Wertes. Dies kann dann angewandt werden, wenn die Nutzlast auch bei kleiner, über längere Zeit dauernder Leistungsaufnahme in den Betriebszustand übergeführt wird, z. B. bei thermisch beanspruchten Verbrauchern. Braucht die Nutzlast sofort eine beträchtliche Einschaltleistung, so muß zum Erreichen kleiner Schaltphasen eine Parallelschaltung eines Urdox-Widerstandes mit hohem Ω -Wert und eines Festwiderstandes, beide in Reihe mit der Nutzlast, angewendet werden. Der Festwiderstand gewährleistet die gewünschte Anfangsleistung, er wird nach Erwärmung des Urdox-Körpers durch diesen dann fast kurzgeschlossen.

Eisen-Urdox-Widerstände (Bild 2b). Zum Ausregeln der Stromstärke werden Eisenwasserstoff-Widerstände verwendet. Eisendraht und Gasfüllung durchlaufen vom Augenblick des Einschaltens bis zum endgültigen Betriebszustand einen beträchtlichen Temperaturbereich. Es können, ohne Berücksichtigung der Anlaufkennlinie der Nutzlast, Einschalt-Überströme bis zum Achtfachen des Nennstromes auftreten. Zu deren Dämpfung wurden Eisen-Urdox-Widerstände verschiedenster Bauart durchgebildet³. Eisendraht und Urdox-Körper sind in ein und demselben Glaskolben untergebracht.

Zeitliche Verzögerung von Schaltvorgängen. Nutzlasten verlangen oft eine Reihe von Schaltvorgängen, die nacheinander in bestimmten Zeitabständen erfolgen müssen. Die häufig zulässige Betätigung nur eines Schalters verlangt dann eine selbsttätig verzögerte Auslösung der übrigen Schaltvorgänge. Soll z. B. die Anodenspannung eines Entladungsgefäßes erst eingeschaltet werden, nachdem die Glühkathode die Betriebstemperatur erreicht hat, so ist dies mit Hilfe eines Urdox-Widerstandes möglich (Bild 5). Nach Ein-

rücken des Schalters *S* wird die Glühkathode *K* des Entladungsgefäßes aufgeheizt. Die Anodenspannung wird über den Relais-Schalter durch das Relais *R* eingeschaltet, die Relais-Spule erhält Strom über den Urdox-Widerstand *U*. Dieser läßt anfangs nur einen Bruchteil des für die Relais-Betätigung notwendigen Stromes hindurch. Bestimmt durch Ausgangswiderstand und Wärmekapazität, erreicht der Urdox-Körper nach bestimmter Zeit eine solche Temperaturerhöhung und Widerstandserniedrigung, daß *R* erst anzieht, wenn *K* die Betriebstemperatur erreicht hat, gleichzeitig kann *U* kurzgeschlossen werden¹⁰. Urdox-Widerstände wurden entwickelt mit einer Verzögerungszeit von 40...60 s (Bild 2d), die mit der Raumtemperatur schwankt. Ist in dem Gefäß *U* eine Heizwicklung untergebracht, die den Urdox-Körper vorwärmt, so kann der Einfluß von Temperaturschwankungen der Umgebung auf die Verzögerungszeit verringert werden.

Bild 5. Verzögerungs-Relaisschaltung mit Urdox-Widerstand.

Schutzwiderstand für Kondensatoren⁴ (Bild 2f). Für Kondensatoren ist eine obere Spannungsgrenze bei Dauerbetrieb vorgeschrieben. Bei Elektrolytkondensatoren ist die höchstzulässige Dauer- und die kurzzeitige Spitzenbelastung wenig verschieden, z. B.

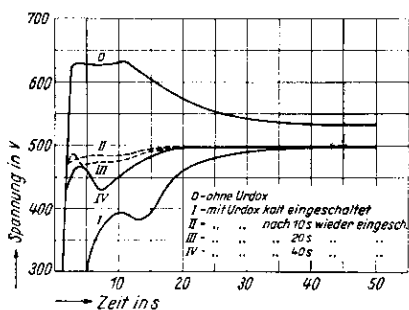


Bild 6. Kondensator-Schutzwiderstand; Spannungsverlauf am Kondensator während des Einschaltvorganges nach O. Harr u. W. Wehnert⁴.

500 und 550 V. Liefert ein Doppelweg-Glühkathoden-Gleichrichter 500 V mittlere Gleichspannung, so liegt die Scheitelspannung bei etwa 700 V. Hat der Gleichrichter eine kürzere Anlaufzeit als die Nutzlast, so werden Ladungs- und Glättungskondensatoren während des Einschaltvorganges auf den Scheitelwert aufgeladen. Das ist der Fall, wenn ein Gleichrichter mit unmittelbar geheizter Glühkathode in Verbindung mit fremdgeheizten Verstärkerröhren arbeitet. Die Überlastung der Kondensatoren kann durch Verwendung eines Urdox-Widerstandes vermieden werden. Die für die Steuerung des Einschaltvorganges notwendige Anfangsbelastung des Gleichrichters wird durch einen parallel zum Kondensator liegenden Hochohmwiderstand gegeben. Die Spannung an einem Kondensator während des Einschaltvorganges zeigt Bild 6. Überspannungen treten nicht auf.

Urdox-Regler (Bild 2e). Bei Fremdgeheizung der Urdox-Körper kann je nach der Heizleistung zwischen 20° C und 400° C eine beliebige Temperatur und damit ein beliebiger Widerstandswert der Urdox-Körper eingestellt werden. Eine thermisch geregelte Widerstandsordnung besteht aus Urdox-Hohlkörper, Heizkörper, Spannungsquelle und Regelwiderstand für den Heizkörper⁵. Es gibt eine Leitungsführung für den Heizkreis, die eine leicht durchführbare Fernregelung ermöglicht. Der überstreichbare Widerstandsbereich liegt für zwei Bauarten zwischen 10⁶ Ω und 10³ Ω und zwischen 1,5 · 10⁵ Ω und 300 Ω. Sonderausführungen z. B. mit einem Widerstandsbereich von 500 Ω bis 50 Ω wurden auch durchgebildet. Heizkörper und Urdox-Körper sind elektrisch voneinander getrennt. Die Eigenschaften sind aus Bild 7 und 8 zu entnehmen.

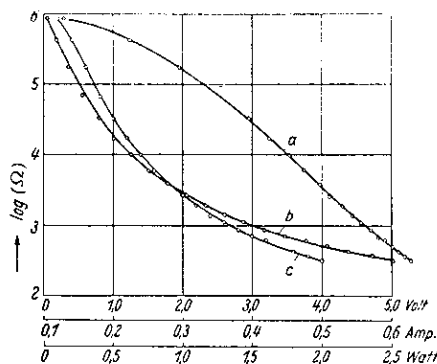


Bild 7. Urdox-Regler. Widerstand des Urdox-Hohlkörpers in Abhängigkeit a) vom Heizstrom b) von der Leistung, c) von der Spannung am Heizkörper.

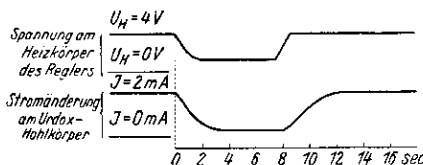


Bild 8. Urdox-Regler; Stromänderung bei Änderung der Heizspannung. Spannung am Urdox-Körper konstant.

Temperaturmessung mit Urdox-Körpern. E. Weise⁶ hat Urdox-Widerstände als Temperaturfühler durchgebildet. Die Ergebnisse von Messungen mit solchen Temperaturfühlern in Brückenschaltung zeigt Bild 9. Es wurden Schwankungen innerhalb eines Bereiches von etwa 1° C bei 352° C gleichzeitig mit einem geeichten Thermolement und mit Temperaturfühlern

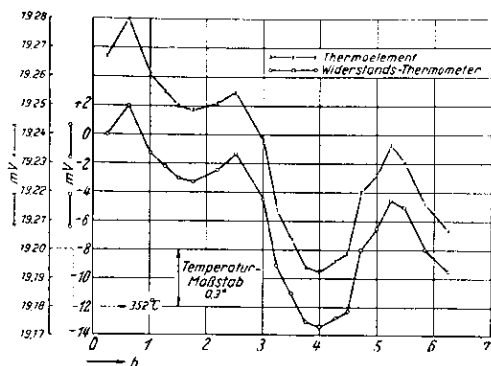


Bild 9. Ergebnis einer Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer.

verfolgt. Das Thermolement gab für 0,3° C eine Spannungsänderung von 0,02 mV, diese kann nur mit einer Präzisionseinrichtung festgestellt werden. Temperatur-

föhler geben für $0,3^{\circ}\text{C}$ eine mit einfachen Mitteln meßbare Spannungsänderung von 4 mV . Die Grenze der Temperaturmessung liegt bis jetzt bei etwa 400°C .

Gasdruckmesser nach Pirani. Werden in den bekannten Pirani-Manometern an Stelle von Metallwiderständen Urdox-Widerstände angewendet, so ist eine beträchtliche Erweiterung des Meßbereiches gegeben⁶. Es lassen sich mit Sicherheit noch Drucke von 10^{-5} mm Hg feststellen. Die Geschwindigkeit der Einstellung ist geringer als bei einem Manometer mit Metallwiderständen. Bei Schaltung der Urdox-Körper als Widerstandsmanometer konnten Druckmessungen bis herauf zu 1 mm Hg vorgenommen werden. Dies bedeutet eine Meßbereicherweiterung des Pirani-Manometers um etwa 2 Zehnerpotenzen.

Ausnutzung verschiedener Formen von $E-I$ -Kennlinien. Die unter isothermen Bedingungen aufgenommenen $E-I$ -Kennlinien an Urdox-Körpern gehorchen streng dem Ohm-Gesetz, wenn Übergangswiderstände vermieden werden. Hiefür wurden Verfahren durchgebildet, die sogar ein hartes Verlöten der Zuführungsdrähte mit dem Halbleiterwerkstoff ermöglichen. Bemerkenswerte Formen von $E-I$ -Kennlinien treten auf, wenn mit der Leistungsaufnahme Temperaturerhöhungen verbunden sind. Dann zeigt ein Körper ein Temperaturgefälle von der Mitte zu den Enden, den Stromzuführungen, hin. Die Steilheit dieses Gefälles ändert sich mit Änderung der aufgenommenen Leistung. In Verbindung damit bedingt der negative Temperaturkoeffizient des Werkstoffes nunmehr $E-I$ -Kennlinien verschiedener Form (Bild 10).

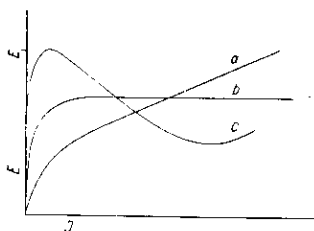


Bild 10. Strom-Spannungskurven an Urdox-Widerständen.

Mit wachsender Spannung steigt der Strom, stets jedoch mehr als dem Ohm-Gesetz entspricht (Kurve a), oder die Spannung ist in einem weiten Bereich unabhängig vom Strom (Kurve b), oder aber über einen beträchtlichen Bereich fällt die Spannung mit wachsendem Strom (Kurve c). Kurve a und b erhält man bevorzugt an Körpern mit geringem spez. Widerstand und geringer Stirnflächen-(Elektroden-)Küh-

lung, Kurve c an Körpern mit hohem spez. Widerstand und großer Stirnflächen-Kühlung. Eine von diesen Überlegungen abweichende mathematische Behandlung dieser Vorgänge versuchten Lueder und Spenke⁷. Urdox-Körper mit einem Kennlinienverlauf nach Kurve a wurden von E. Weise⁶ verwendet, um eine konstante Spannung im Mittelzweig einer Brücke zu erzeugen. Auch Körper nach Kurve b wurden für Schaltkreise mit konstanter Spannung vorgeschlagen⁸. Die Ausregelung von Spannungsschwankungen ist an die Wärmeträgheit des Urdox-Körpers gebunden; kurzzeitige Spannungsschwankungen werden nicht ausgeglichen. Widerstandskörper mit dem Kennlinienverlauf c werden u. a. als Strombrücke für Nutzlasten in Reihenschaltung verwendet⁹. Die Spannung an einer Nutzlast muß bei Betrieb kleiner sein als E_1 (Bild 10). Fällt eine der Nutzlasten aus, so ist z. B. bei Lampen die ganze Reihenschaltung außer Betrieb. Liegt jedoch jetzt der Nutzlast ein Urdox-Körper parallel, so liegt an diesem dann die volle Netzspannung, größer als E_1 . Der Körper erwärmt sich, der Widerstand sinkt und wird in seinem Wert vergleichbar mit dem der ausgefallenen Nutzlast. Die Reihenschaltung wird damit wieder in Betrieb gesetzt. Unter bestimmten Bedingungen, z. B. bei Lampen, muß auch nach dem Durchbrennen von 2 oder 3 Lampen die Reihenschaltung jederzeit in Betrieb gesetzt werden können. Dies ist unmöglich, wenn die Summe der Spannungen E_1 größer ist als die Netzspannung. Eine um den Widerstandskörper gelegte und bei Ansprechen des Körpers verdampfende Magnesiumschelle verändert durch Reduktion diesen so, daß er jetzt eine Strom-Spannungskennlinie entsprechend Bild 10, Kurve b aufweist. Der hohe Widerstand mit hohem Temperaturkoeffizienten ist nun gesunken auf einen niedrigen Wert mit niedrigem Temperaturkoeffizienten.

Begrenzungswiderstände. Urdox-Körper mit einem sehr kleinen Wert für b (Gleichung 1) werden in großem Umfange verwendet zur Strombegrenzung im Zündkreis von Gasentladungslampen. Hier werden die Widerstände stark beansprucht. Sie befinden sich bei etwa 300°C im Vakuum und müssen dabei beständig sein gegen geringe Gasreste, z. B. Spuren von Sauerstoff. Gleichzeitig sind die räumlichen Abmessungen begrenzt. Eine Bauart hat z. B. bei $22\,500\ \Omega \pm 2\,500\ \Omega$ etwa 19 mm Länge und $1,2\text{ mm } \phi$. Widerstände von etwa $1,5\text{ M}\Omega$ bei 8 mm Länge und $1\text{ mm } \phi$ werden für Schalterglühlampen verwendet.

Literatur.

1. Wilfried Meyer, Über die Elektrizitätsleitung anorganischer Stoffe mit Elektronenleitfähigkeit, Z. Physik 85 (1933) S. 278...293; Wilfried Meyer, Beitrag zur Elektrizitätsleitung in Halbleiterwerkstoffen, Z. techn. Physik 16 (1935) S. 355...361; Wilfried Meyer u. Hans Neldel, Über die Beziehungen zwischen der Energiekonstanten und der Mengenkennkonstanten a in der Leitwert-Temperaturformel bei oxydischen Halbleitern, Z. techn. Physik 18 (1937) S. 588...593. —
2. E. Engelhard, Mechanismus und Ursprung der Dunkelleitung und der lichtelektrischen Leitung in Kupferoxydul, Ann. Physik 17 (1933) S. 501...542; G. Bauer, Elektrisches und optisches Verhalten von Halbleitern, Ann. Physik 30 (1937) S. 433...445. —
3. Wilfried Meyer, Die elektrische Leitfähigkeit von Urandioxyd und seine Anwendung als Vorschaltwiderstand insbesondere für Eisenwasserstoffwiderstände, Z. techn. Physik 14 (1933) S. 126...128. —
4. O. Harr u. W. Wehnert, Spannungsbeanspruchung von Kondensatoren in Netzanschlußgeräten, Die Telefunkeröhre, Heft 7 (1936) S. 132...145. —
5. Hans Neldel, Ein regelbarer Hochohmwiderstand ohne gleitenden Stromabnehmer, Z. techn. Physik 18 (1937) S. 464...467. —
6. E. Weise, Einige Beispiele für Brückenschaltungen mit Halbleiterwiderständen, Z. techn. Physik 18 (1937) S. 467...470. —
7. H. Lueder u. E. Spenke, Über den Einfluß der Wärmeableitung auf das elektrische Verhalten von temperaturabhängigen Widerständen, Z. techn. Physik 16 (1935) S. 373...379. —
8. Wilfried Meyer u. Harry Berg, Urandioxyd als Widerstand für elektrische Geräte, Techn.-wiss. Abh. Osram-Konz. 3 (1934) S. 96...99. —
9. Wilfried Meyer u. Harry Berg, Lampen für Reihenschaltung mit Urdox-Nebenschlußwiderständen, Techn.-wiss. Abh. Osram-Konz. 4 (1936) S. 30...33. —
10. G. W. Müller, Ausgleichswiderstände aus Urandioxyd zum Anlassen von Motoren und zur Unterdrückung von Einschaltüberströmen, AEG-Mitteilungen 1934 S. 267...270.