

2. Widerstände

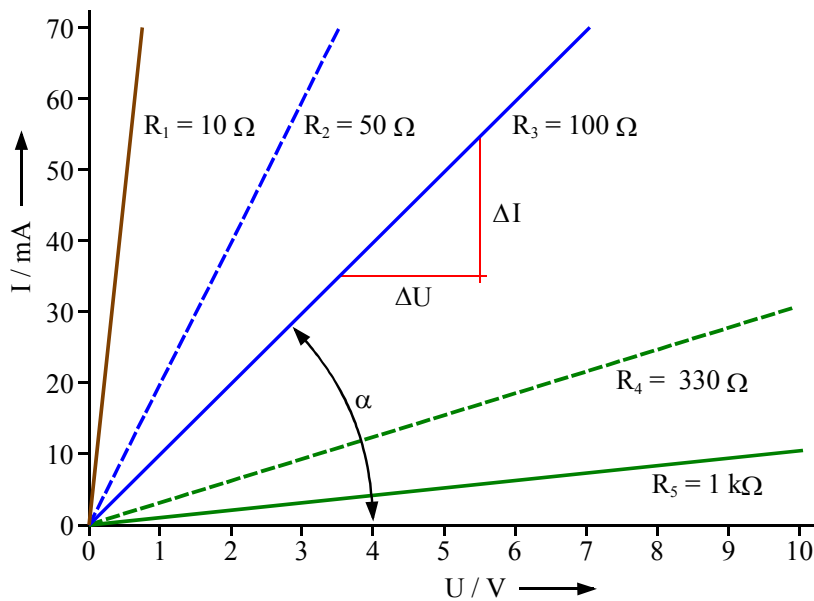
Widerstände sind Bauteile mit einem gewünschten Widerstandsverhalten. Nach ihrem Verhalten im Stromkreis unterscheidet man lineare Widerstände und nichtlineare Widerstände.

Lineare Widerstände sind Widerstände mit linearer I-U-Kennlinie. Es gilt das Ohmsche Gesetz.

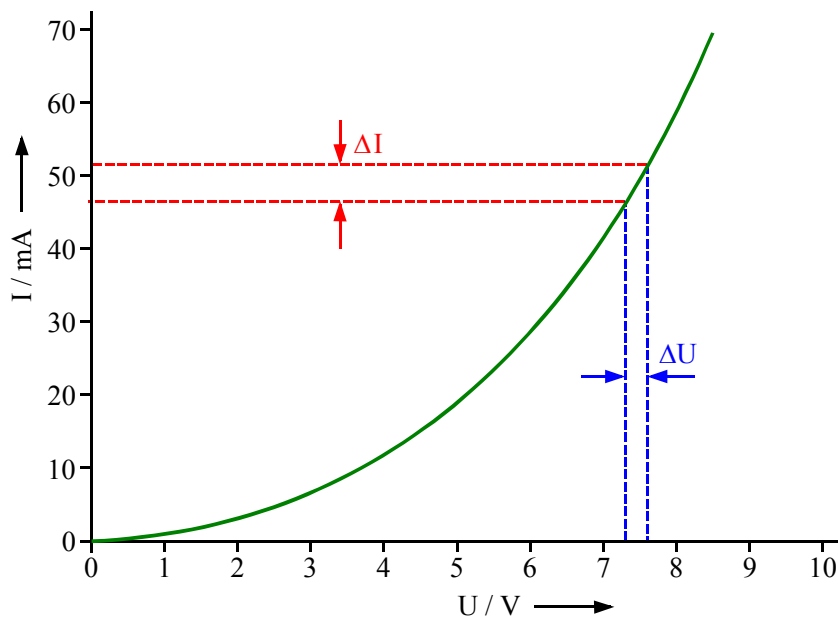
$$I = \frac{U}{R} \quad R = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

In I-U-Kennlinien von linearen Widerständen entspricht das Steigungsmaß, der Tangens des Winkels α , dem Leitwert des Widerstandbauteiles.

$$\tan \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R} = G \quad (2.2)$$



I-U-Kennlinien linearer Widerstände mit verschiedenen Widerstandswerten



I-U-Kennlinie eines nichtlinearen Widerstandes

Nichtlineare Widerstände sind Widerstände mit nichtlinearer I-U-Kennlinie. Das Ohmsche Gesetz in der üblichen Form kann nicht angewendet werden.

Wird nur ein kleines Stück der Kennlinie betrachtet, so stellt man nahezu Linearität fest. Den Anstieg der Kennlinie in einem Punkt kann man durch die Differenzen ΔU und ΔI angeben. Mit dem Grenzübergang erhält man den sogenannten differentiellen Widerstand r .

$$r = \frac{dU}{dI} \quad (2.3)$$

Mit dem differentiellen Widerstand r kann man kleine Änderungen von I und U in dem betrachteten Kennlinienbereich berechnen.

Bauteile mit nichtlinearem Widerstandsverhalten sind z.B. Halbleiterdioden, Transistoren und Thyristoren. Sie werden aber nicht als nichtlineare Widerstände bezeichnet.

Die eigentlichen nichtlinearen Widerstände sind VDR-, NTC- und PTC-Widerstände.

Widerstände haben einen Widerstandswert und eine Belastbarkeit. Es gibt sie mit festem und mit einstellbarem Widerstandswert.

Die Belastbarkeit gibt an, welche elektrische Leistung der Widerstand dauernd in Wärmeleistung umsetzen kann. Die Größe der Belastbarkeit hängt von der Fähigkeit des Widerstandes ab, Wärme an die Umgebung abzugeben.

Die Belastbarkeit (elektrische Verlustleistung) P errechnet sich aus der höchstzulässigen Temperatur der Widerstandsfläche ϑ_{\max} , der Temperatur der umgebenden Luft ϑ_U und vom Wärmewiderstand R_{thU} .

$$P = \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_U}{R_{thU}} \quad (2.4)$$

Die gewünschten Widerstandswerte lassen sich bei der Herstellung nicht genau erreichen. Man muss bestimmte Toleranzen zulassen. Die Toleranzgrenzen liegen zwischen $\pm 0,1\%$ bis $\pm 20\%$ vom Widerstandsnennwert. Widerstände mit geringen Toleranzen sind in der Herstellung aufwendig und damit teuer.

2.1 Festwiderstände

Festwiderstände sind ohmsche Widerstände mit festen Widerstandswerten. Sie sind bestimmt durch

- Nennwiderstand,
- Belastbarkeit,
- Auslieferungstoleranz,
- Güteklasse (Grenzwerte in bestimmten Zeiträumen).

Aus wirtschaftlichen Gründen werden die Nennwiderstände nach bestimmten Normzahlreihen abgestuft.

Festwiderstände werden nach den IEC-Widerstands-Normreihen E 6, E 12, E 24, E 48, E 96 und E 192 gefertigt.

Der Faktor F für die Normreihe E6 beträgt:

$$F = 10^{1/6} = 1,4678 \quad (2.5)$$

Die theoretischen Werte für die Normreihe E 6 sind:

1,00; 1,4678; 2,1544; 3,1623; 4,6416; 6,8129; In der Praxis werden diese Werte nur auf zwei Stellen angegeben (grob gerundet).

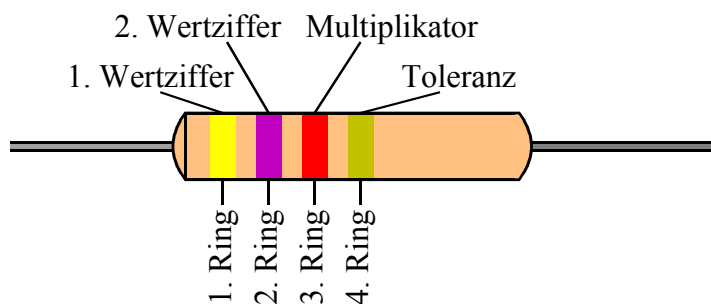
E 6 ($\pm 20\%$)	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8																		
E 12 ($\pm 10\%$)	1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2												
E 24 ($\pm 5\%$)	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

IEC-Widerstands-Normenreihen E 6, E 12 und E 24

Neben den IEC-Normenreihen E 6, E 12 und E 24 gibt es die Normenreihen E 48 ($\pm 2,0\%$), E 96 ($\pm 1,0\%$) und E 192 ($\pm 0,5\%$). Die Berechnung erfolgt entsprechend Gl. 2.5 und Rundung auf drei Stellen.

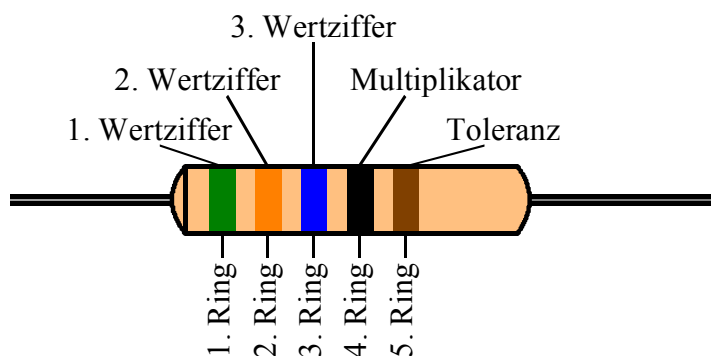
Kennfarbe	1. Ring = 1. Wertziffer	2. Ring = 2. Wertziffer	3. Ring = Multiplikator	4. Ring = Toleranz
farblos	-	-	-	± 20%
silber	-	-	$\cdot 10^{-2} \Omega$	± 10%
gold	-	-	$\cdot 10^{-1} \Omega$	± 5%
schwarz	0	0	$\cdot 10^0 \Omega$	
braun	1	1	$\cdot 10^1 \Omega$	± 1%
rot	2	2	$\cdot 10^2 \Omega$	± 2%
orange	3	3	$\cdot 10^3 \Omega$	
gelb	4	4	$\cdot 10^4 \Omega$	± 0,5%
grün	5	5	$\cdot 10^5 \Omega$	
blau	6	6	$\cdot 10^6 \Omega$	
violett	7	7	$\cdot 10^7 \Omega$	
grau	8	8	$\cdot 10^8 \Omega$	
weiß	9	9	$\cdot 10^9 \Omega$	

Internationaler Farbcode für Vierfachberingung



Lage der Ringe des internationalen Farbcodes bei Vierfachberingung (E 6, E 12 und E 24)

Die IEC-Normenreihen E 48, E 96 und E 192 haben drei Wertziffern und Fünffachberingung.



Lage der Ringe des internationalen Farbcodes bei Fünffachberingung (E 48, E 96 und E 192)

Bauarten von Festwiderständen

Auf zylindrische Keramik- oder Hartglaskörper wird eine dünne leitfähige Schicht durch Tauchen, Aufsprühen oder Aufdampfen im Vakuum aufgebracht. Die Schichtdicke liegt zwischen $0,001 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$. Als Schichtwerkstoffe verwendet man Kohle, Metalle und Metalloxide.

Durch Wendelschliff (relativ große Induktivität) oder Mänderschliff können genauere Werte erreicht werden.

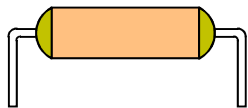
Der Widerstandskörper wird mit Anschlüssen versehen (hochwertig Metallkappen).



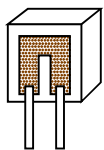
Festwiderstand mit Wendelschliff



Festwiderstand mit Mänderschliff



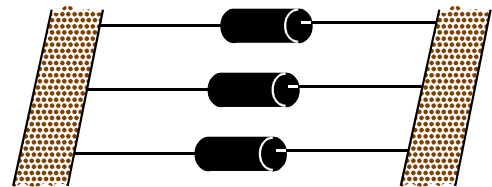
Widerstand mit gebogenen und auf die richtige Länge geschnittenen Anschlussdrähten



Widerstand mit einseitigen Anschlüssen

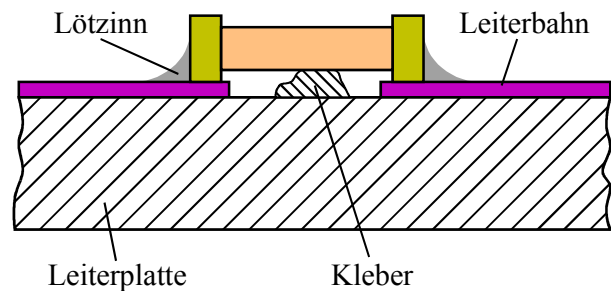
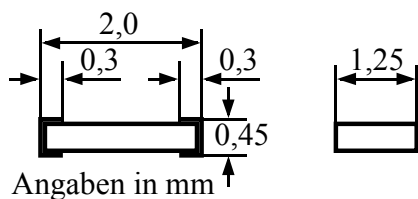
Der Widerstandskörper einschließlich eventueller Kappen wird mit einem Lack- oder Kunstharzüberzug versehen (Schutz gegen Feuchtigkeit, aggressive Luftbestandteile und mechanische Beschädigung).

Neben den axialen Widerständen (gegurtet) gibt es spezielle Gehäuseformen und Anschlüsse für die Leiterplatten-Bestückung.



Gegurtete Widerstände

Für die Oberflächen-Montagetechnik, die sogenannte SMD-Technik (Surface Mounted Device), werden SMD-Widerstände verwendet.



Abmessungen eines SMD-Widerstandes

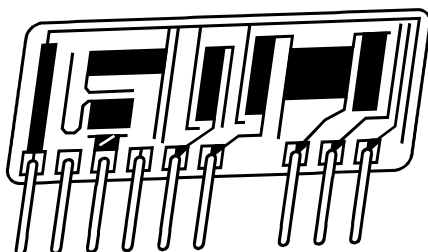
SMD-Widerstand auf der Leiterplatte

Mikromodultechnik (Dickschicht- und Dünnschichttechnik)

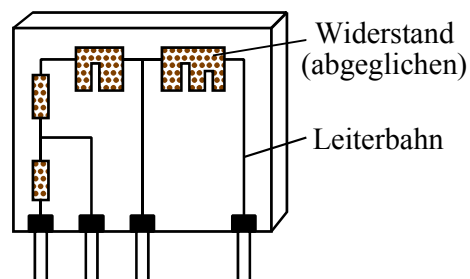
In der Mikromodultechnik werden Widerstände, Dioden, Transistoren und Kondensatoren mit kleinen Kapazitätswerten zu einer Schaltung vereint und mit Kunststoff umpresst. Diese Module werden in Dickschichttechnik oder in Dünnschichttechnik hergestellt.

In der Dickschichttechnik werden zur Herstellung von Widerständen Metallpasten im Siebdruckverfahren auf oxidierte Aluminiumplättchen gedruckt und anschließend eingebrannt. Ein nachträglicher Abgleich ist durch Schleifen möglich.

In der Dünnschichttechnik wird auf ein Plättchen aus Keramik oder Hartglas eine Maske aufgebracht und die Widerstandsschicht im Vakuum aufgedampft. Mit dem Laser kann ein Abgleich auf 0,1% erfolgen.



Widerstandskörper in Dickschichttechnik

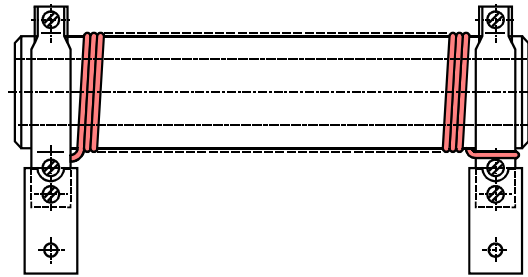


Widerstandskörper in Dünnschichttechnik

Drahtwiderstände

Auf einen Körper aus temperaturbeständiger Keramik wird Widerstandsdraht gewickelt. Um möglichst kleine Induktivitäten zu erhalten, wendet man die bifilare Wickeltechnik an.

Bei enger Wicklung werden die Widerstandsdrähte mit Lack oder besser mit Oberflächensoxidsschichten isoliert.



Bei sehr hoch belasteten Drahtwiderständen verwendet man Widerstandsdrähte mit Rechteckquerschnitt, um den Wickelraum besser auszunutzen.

Drahtwiderstand mit Schellenanschluss

Drahtwiderstände werden mit kappenlosen Anschlüssen und Drahtenden oder mit Schellen-, Kappen- oder Lötflächenanschluss geliefert.

Die Widerstandswicklung wird ausgeführt:

- ungeschützt → kein Schutz, hoch belastbar;
- lackiert → Schutz gegen Berühren;
- zementiert → guter Schutz gegen mechanische Beschädigung, feuchtigkeitsdurchlässig;
- glasiert → hervorragender Schutz gegen Feuchtigkeit, aggressive Umgebung und mechanische Beschädigung.

Der Temperaturkoeffizient des Widerstandsdrahtes geht von $\alpha_{20} = (-10 \dots -80) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ bei Konstantan (WM 50) bis $\alpha_{20} = +110 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ bei Nickeldraht (WM 40).

Temperaturabhängigkeit

Widerstandswerte gelten normalerweise für eine Temperatur von 20°C (Bezugstemperatur).

Mit steigender Temperatur wird der Widerstand bei Metallschichten größer und bei Kohleschichten kleiner.

Ausgehend vom Bezugswiderstand R_{20} kann bei gegebenem Temperaturkoeffizienten (TK) α_{20} der Widerstand R_{ϑ} für beliebige Temperaturen berechnet werden.

$$R_{(\vartheta)} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta - 20^\circ\text{C})] \quad (2.6)$$

Durch geeignete Metalllegierungen lassen sich sehr kleine Temperaturkoeffizienten auf Chrom-Nickel-Basis erzielen. Schichtdicken und Legierungsverhältnisse bestimmen den TK.

Die Auslieferungstoleranz von Metallschichtwiderständen reicht von $\pm 0,01\%$ bis $\pm 10\%$, der Temperaturkoeffizient beträgt $\text{TK} = (\pm 1 \dots \pm 100) \cdot 10^{-6}/\text{K}$.

Metalloxidwiderstände haben einen Temperaturkoeffizienten beträgt $\text{TK} = (\pm 50 \dots \pm 250) \cdot 10^{-6}/\text{K}$. Kohlenstoff ist ein Halbleiter, der Temperaturbeiwert ist negativ und vom Widerstandswert abhängig.

Der Temperaturkoeffizient von Kohleschichtwiderständen beträgt $\text{TK} = (-200 \dots -1200) \cdot 10^{-6}/\text{K}$.

Die TK-Bereiche $\pm 100, 50, 25, 10$ und 5 ppm/K sind gebräuchlich.

Herstellerangaben für gegurtete Metallschicht-Widerstände (0,4 W; TK50)

Allgemeine Angaben:

Widerstandswerte: Reihe E12 (10 Ω – 470 k Ω),

Widerstandstoleranz: $\pm 1\%$.

Eigenschaften:

- ausgewogenes Größen-Leistungsverhältnis,
- gute Langzeitstabilität,
- klimafeste Umhüllung.

Aufbau:

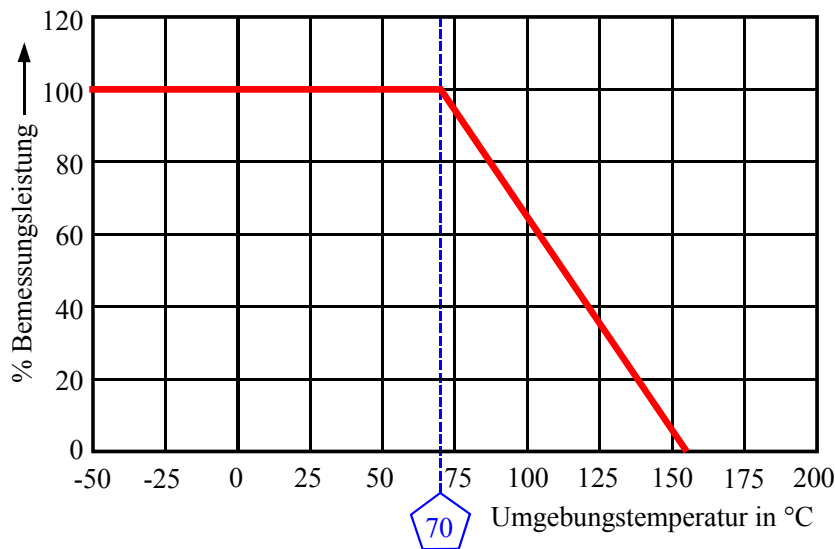
- Trägermaterial: hochwertige Keramikwerkstoffe,
- veredelte Metallkappen auf den Enden der beschichteten Keramikträger für einwandfreien elektrischen Kontakt,
- Genauer Endwertabgleich des Widerstandes erfolgt durch Wendelung bzw. gezielte Strukturierung der Schicht,
- Drahtenden aus verzinneten Elektrolytkupfer,
- Isolierter Überzug aus mehreren Schichten schützt die Widerstandsschicht vor Umwelteinflüssen.

Technische Daten

Leistung (70°C):	0,4 W	Betriebsspannung, max.:	250 V _{eff}
Wärmewiderstand:	200 K/W	Isolationswiderstand:	10 ¹⁰ Ω
Isolationsspannung (1 min):	> 500 V _{eff}		
Temperaturkoeffizient:	50 ppm/K		
Betriebstemperaturbereich:	-55...+155°C		
Ausfallrate:	< 1·10 ⁻⁹ h ⁻¹		
Zugbelastbarkeit der Anschlüsse:	> 30 N		
Lastminderung:	linear von 70°C bis 155°C		
Masse:	0,1g		

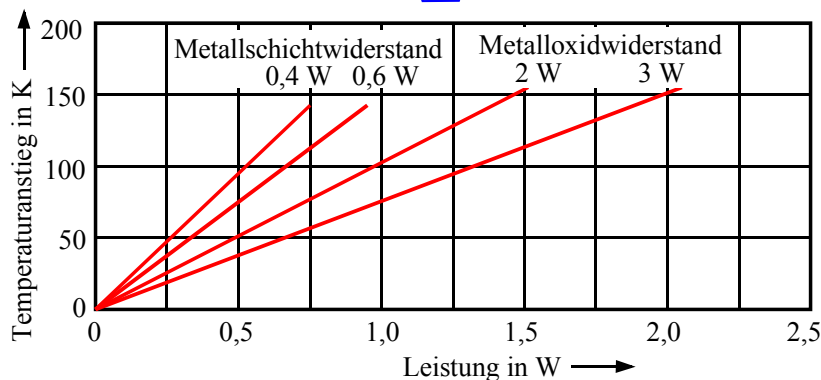
Widerstandsänderung ΔR/R

Dauerprüfung bei 70°C unter Nennlast (1000h):	±0,5%
Dauerprüfung bei 155°C (1000 h):	±0,5%
Überlast (2s, 2,5·U _{Nenn} bzw. 2·U _{max.}):	±0,1%
Feuchte Wärme (56 d, 40°C, 93% r.F.):	±0,5%
Lötwärmebeständigkeit (260°C, 10 s):	±0,1%



Belastbarkeit von Metallschicht-Widerständen in Abhängigkeit der Temperatur

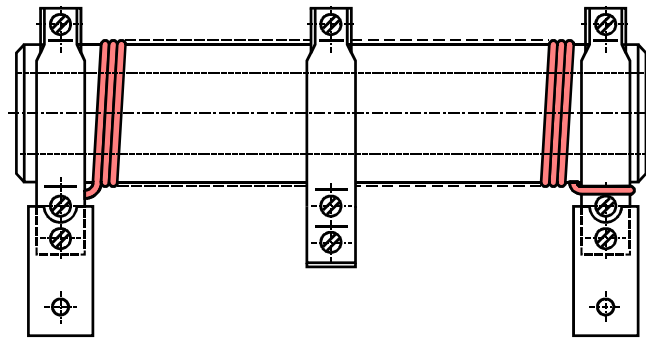
(Kohlewiderstände haben einen entsprechenden Verlauf, Temperaturbereich 0°C ... 155°C)



Temperaturanstieg verschiedener Widerstände in Abhängigkeit der Leistung

2.2 Einstellbare Widerstände

Bei einstellbaren Widerständen wird die Größe des Widerstandswertes in einem bestimmten Bereich mit einer Drehachse oder einem Schieber eingestellt.



Die einfachsten einstellbaren Widerstände sind ungeschützte Drahtwiderstände mit einer verschiebbaren Abgreifschelle.

Einstellbarer Widerstand mit verschiebbarer Abgreifschelle

Bei den meisten einstellbaren Widerständen wird der Widerstandswert jedoch mit Hilfe eines Schleifkontaktes abgegriffen. Der Schleifkontakt kann über eine bestimmte Länge der Widerstandsbahn bewegt werden. Diese Strecke wird Arbeitsbereich genannt.

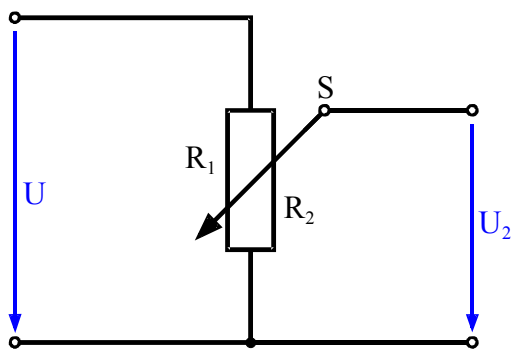


Einstellbare Widerstände

Jeder einstellbare Widerstand hat einen Kleinstwert und einen Größtwert. Der Kleinstwert ist häufig Null.

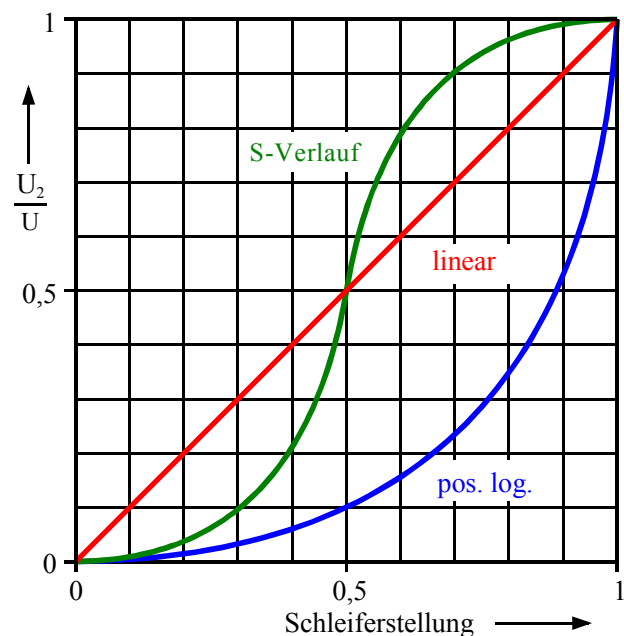
Die vom Hersteller angegebene Belastbarkeit gilt stets für die ganze Widerstandsbahn. Für den unbelasteten Spannungsteiler gilt:

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.7)$$



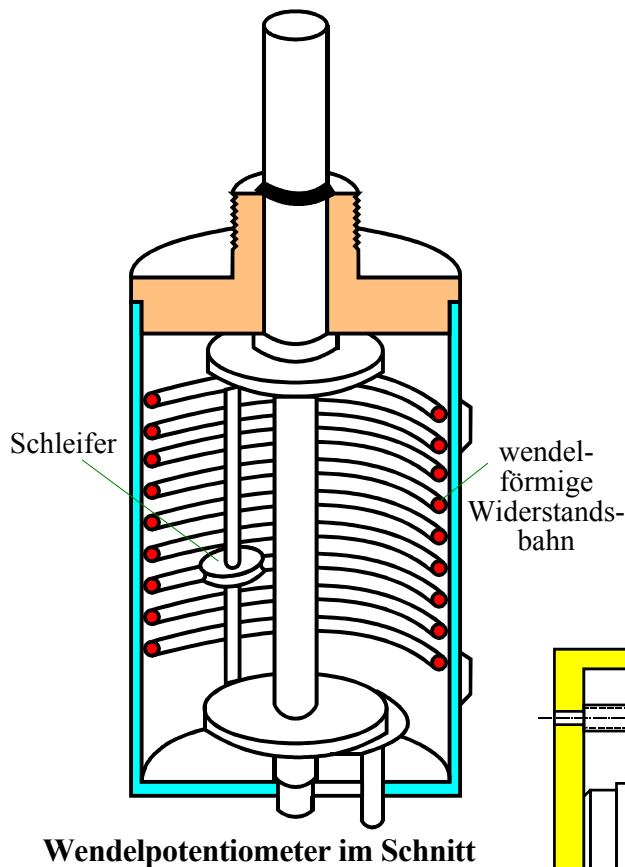
Grundsaltung des verstellbaren Spannungsteilers

Widerstandskurven einstellbarer Widerstände



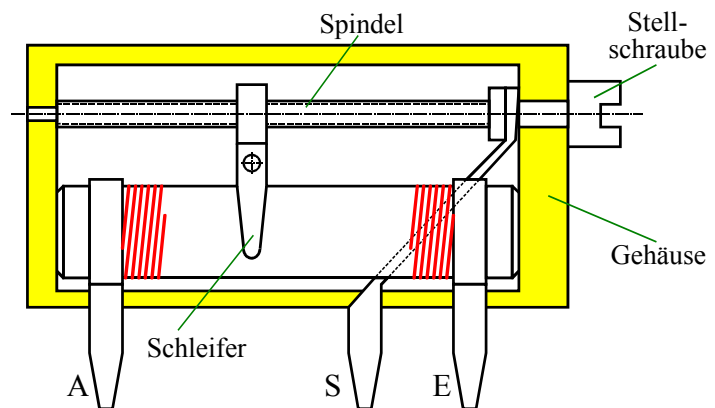
Beim Schichtdrehwiderstand besteht die Widerstandsbahn aus einer Hartkohle- oder Cerment-Schicht (Keramik-Metall) auf einer Hartpapierplatte (preiswert) oder Keramikplatte (anspruchsvoll), die kreisförmig um die Betätigungsachse verläuft. Der Drehwinkel des Schleifers umfasst etwa einen Winkel von 270°. Die einfachste Form ist der Trimmwiderstand.

Drahtdrehwiderstände sind hoch belastbar. Als Träger der Wicklung aus Widerstandsdraht dient ein keramischer Ring mit rechteckigem Querschnitt. Der Schleifer ist meistens von der Achse isoliert. Die Verbindung zum äußern Anschluss erfolgt mit einem zweiten Schleifer oder über eine Spiralfeder. Die Widerstandskurve eines Drahtdrehwiderstandes verläuft nicht genau stetig, da der Schleifer von Drahtwindung zu Drahtwindung springt.



Das Wendelpotentiometer ist eine abgewandelte Art des Drehwiderstandes. Der Schleifer wird auf einer wendelförmigen Widerstandsbahn mit 3.....50 Windungen geführt. Die feine Einstellung erfolgt von Hand oder mit Servomotoren.

Spindelpotentiometer sind Trimmerwiderstände. Die Widerstandsbahn wird zu einer Geraden ausgezogen. Der Schleifer wird über eine Spindel auf der Widerstandsbahn hin- und herbewegt. Die Spindelumdrehungen betragen 20 oder mehr Spindelumdrehungen zwischen den Anschlägen.



Spindelpotentiometer im Schnitt

Wichtige Kennwerte von einstellbaren Widerständen:

- Abmessungen,
- Belastbarkeit,
- Widerstandstoleranz,
- Linearität,
- Auflösung,
- elektrischer und mechanischer Drehwinkel,
- Temperaturbeiwert der Wicklung,
- Spannungsfestigkeit und Prüfspannung,
- mechanische Lebensdauer.

2.3 Heiß- und Kaltleiter

Thermistoren (Heiß- und Kaltleiter) sind Widerstände, die von der Temperatur abhängen.

Im Bereich der Fremderwärmung ($U < 1 \text{ V}$) ist die Strom-Spannungs-Kennlinie linear. Die Temperatur des Thermistors wird durch die Umgebungstemperatur bestimmt.

Im Bereich der Eigenerwärmung ist die Strom-Spannungs-Kennlinie nichtlinear. Die Temperatur des Thermistors wird wesentlich durch die Joule'schen Verluste bestimmt.

Heißleiter (NTC-Widerstände, NTC = negative-temperature-coefficient)

Heißleiter leiten im heißen Zustand besonders gut. Sie haben einen großen negativen Temperaturkoeffizienten ($\alpha = -0,02 \text{ K}^{-1} \dots -0,10 \text{ K}^{-1}$). Die Größe des TK hängt vom verwendeten Werkstoff und von der Temperatur des NTC-Widerstandes ab.

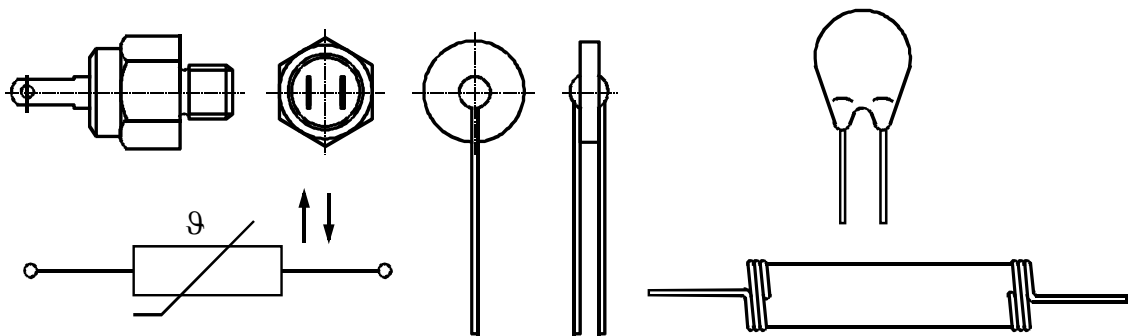
Kennwerte und Grenzwerte von Heißleitern:

- R_{20} Widerstand im kalten Zustand bei 20°C ,
- t Abkühlzeit (Widerstandswert verdoppelt),
- P_{\max} höchstzulässige Belastung,
- $\vartheta_{\max 0}$ höchstzulässige Betriebstemperatur bei Nulllast (nur Fremderwärmung),
- $\vartheta_{\max P}$ höchstzulässige Betriebstemperatur bei P_{\max} ,
- Toleranz des Kaltwiderstandswertes.

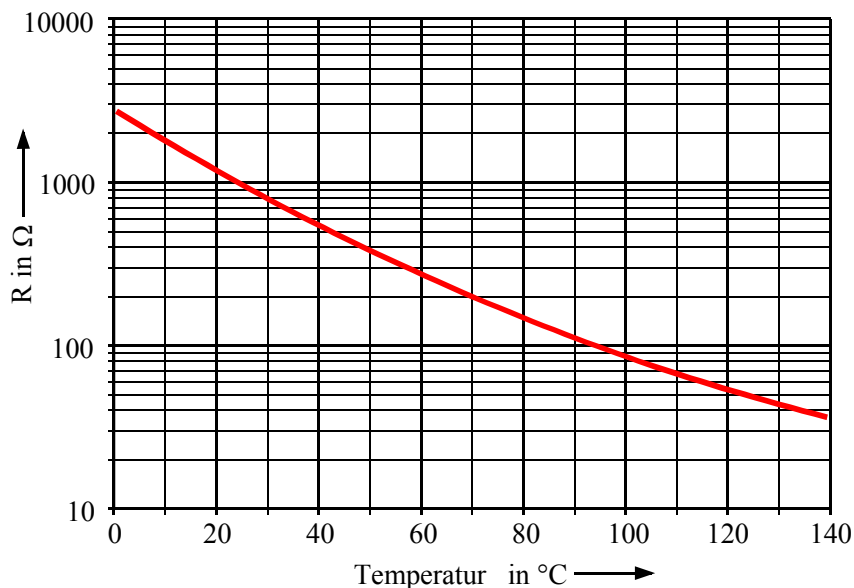
Heißleiter werden aus bestimmten halbleitenden Metalloxiden (Fe_2O_3 , Zn_2TiO_4 , MgCr_2O_4) hergestellt.

NTC-Widerstände werden näherungsweise nach Gl. 2.8 berechnet. Streng genommen ist B eine Funktion der Temperatur mit $\text{TK} = -B/T^2$.

$$R_T = A \cdot e^{B/T} \quad (2.8)$$



Schaltzeichen und Bauformen des NTC-Widerstandes



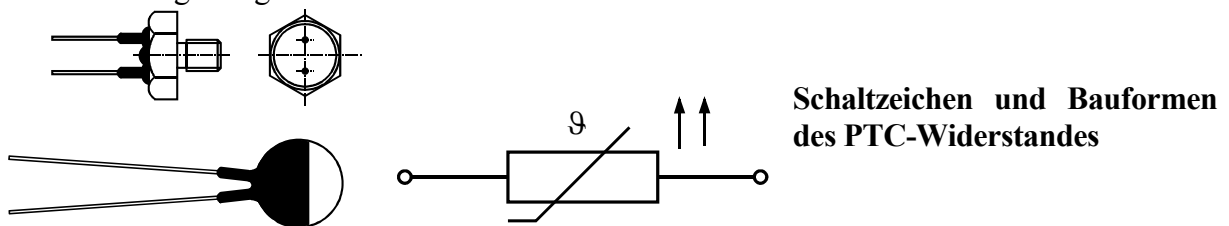
Abhängigkeit des NTC-Widerstandes von der Temperatur

Heißleiter finden Anwendung als fremderwärmte Temperaturfühler. In Halbleiterschaltungen werden sie zum Ausgleich von temperaturabhängigen Kennwerten eingesetzt. Im Bereich der Eigenerwärmung werden Heißleiter zur Begrenzung von Einschaltströmen eingesetzt (Reihenschaltung von Glühlampe und Heißleiter). Die Reihenschaltung von Relais und Heißleiter ergibt eine Ansprechverzögerung; nach dem Einschalten wird der Heißleiter mit einem Schließer überbrückt.

Kaltleiter (PTC-Widerstände, PTC = positive-temperature-coefficient)

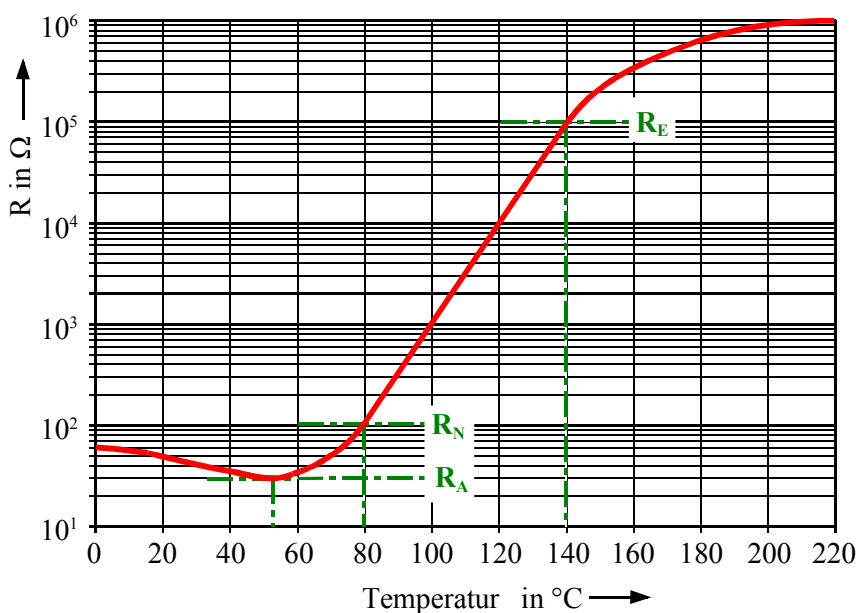
Kaltleiter leiten im kalten Zustand besonders gut. Sie haben einen großen positiven Temperaturkoeffizienten ($\alpha = 0,07 \text{ K}^{-1} \dots 0,5 \text{ K}^{-1}$). Die Größe des TK hängt vom verwendeten Werkstoff und von der Temperatur des PTC-Widerstandes ab.

Grundsätzlich sind zwar alle Metalle PTC-Widerstände, ihr TK ist jedoch gering. PTC-Widerstände werden aus polykristallinen Titanat-Keramik-Sorten (BaTiO_3 , ferroelektrisch) oder dotiertem Silizium gefertigt.



Kennwerte und Grenzwerte von BaTiO_3 -Kaltleitern:

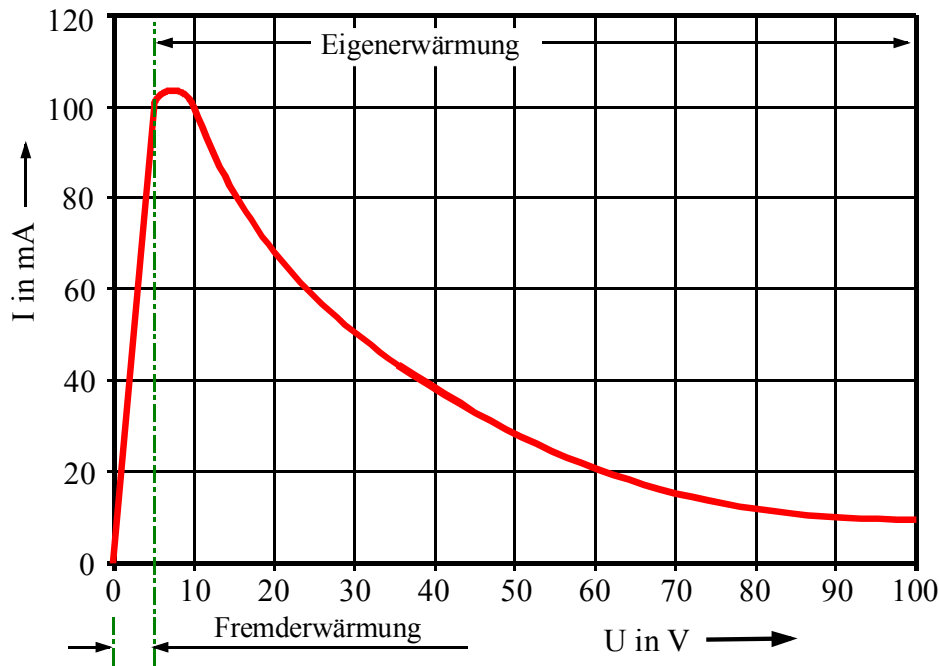
- R_N Nennwiderstand bei Nenntemperatur ϑ_N (Curie-Temperatur),
- R_A Anfangswiderstand bei Anfangstemperatur ϑ_A (kleinster Widerstand),
- R_E Endwiderstand bei Endtemperatur ϑ_E ,
- α_R Temperaturbeiwert im steilsten Bereich der R - ϑ -Kennlinie,
- U_{\max} höchstzulässige Betriebsspannung,
- ϑ_{\max} höchstzulässige Temperatur.



Abhängigkeit des PTC-Widerstandes (BaTiO_3) von der Temperatur

Im Bereich der Fremderwärmung werden PTC-Widerstände als Temperaturfühler eingesetzt (Schutz von elektrischen Maschinen).

Im Bereich der Eigenerwärmung werden PTC-Widerstände als Füllstandsmelder von Flüssigkeiten eingesetzt. Die Flüssigkeit kühlt den PTC-Widerstand stark ab, wenn er mit einer Spannung $U = 10 \text{ V} \dots 50 \text{ V}$ betrieben wird.



**Stationäre
Kennlinie eines
PTC-
Widerstandes**

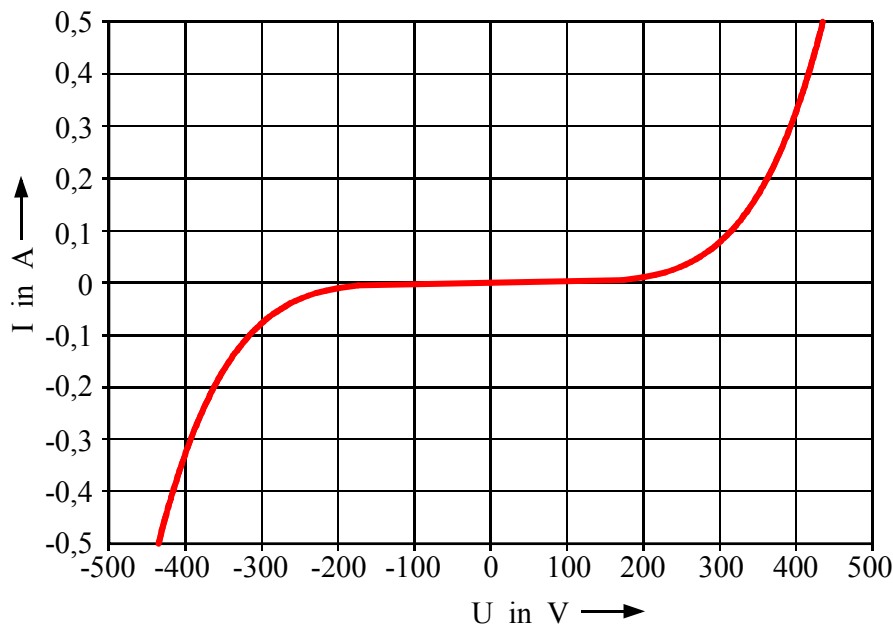
PTC-Widerstände weisen im Bereich 20°C bis 200°C einen konstanten TK von +0,8%/K auf (Störstellenleitung). Ab ca. 250°C überwiegt die Eigenleitung (Verhalten eines NTC-Widerstandes).

2.4 Spannungsabhängige Widerstände

Spannungsabhängige Widerstände (Varistor = Variable Resistor), auch VDR-Widerstände genannt (VDR = Voltage Dependet Resistor), werden aus gesinterten Metalloxiden (Zinkoxid) oder Siliziumkarbid gefertigt. Das pulverisierte Ausgangsmaterial wird mit Bindemittel versetzt und zu Scheibchen von 7 bis 40 mm Durchmesser und 1 bis 10 mm Stärke oder zu Stäbchen gepresst und anschließend gesintert.

Der Widerstandswert eines VDR-Widerstandes wird mit zunehmender Spannung immer kleiner. Die Polung der Spannung spielt keine Rolle. Das wesentliche Verhalten des VDR-Widerstandes ist durch die I-U-Kennlinie gegeben. Sie verläuft nach der Einheitengleichung (Gl. 2.9):

$$U = C \cdot I^\beta \quad (U \text{ in V}; I \text{ in A}) \quad (2.9)$$



**I-U-Kennlinie eines
VDR-Widerstandes**

Kennwerte und Grenzwerte:

- β Regelfaktor (Maß für die Steilheit der Kennlinie, $0,15 \leq \beta \leq 0,40$)
- C Konstante ($15 \leq C \leq 5000$)
- P_{\max} höchstzulässige Belastbarkeit
- ϑ_{\max} höchstzulässige Temperatur

Zinkoxid-VDR-Widerstände zeigen eine geringe Ansprechzeit von ca. 50 ns.

VDR-Widerstände sind widerstandsfähig gegenüber hoher, kurzzeitiger Überlastung.

Die Kennwerte gelten für Gleichspannung. Bei Wechselspannung verursacht die Eigenkapazität Abweichungen.

Beim Einsatz von VDR-Widerständen darf ihre höchstzulässige Belastbarkeit nicht überschritten werden.



VDR-Widerstände eignen sich besonders gut zur Spannungsbegrenzung. Sie erzeugen nichtsinusförmige Strom- und Spannungskurven.