

1.2 Widerstände

1.2.1 Elektrotechnische Grundlagen

Der Widerstandswert ist ein Spannungs-Strom-Verhältnis:

$$R = \frac{U}{I} \text{ (Ohmsches Gesetz)}$$

An einem stromdurchflossenen Widerstand fällt eine Spannung ab (Abbildung 1.2.1a):

$$U = I \cdot R$$

Wird an einen Widerstand eine Spannung angelegt, so begrenzt der Widerstandswert den Stromfluß (Abbildung 1.2.1b):

$$I = \frac{U}{R}$$

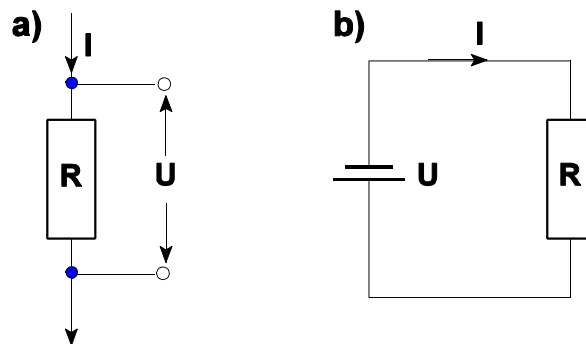


Abbildung 1.2.1 Der Widerstand im Stromkreis. a) zur Erzeugung eines Spannungsabfalls; b) zur Strombegrenzung

In einem stromdurchflossenen Widerstand wird eine Verlustleistung P in Wärme umgesetzt:

$$P = U \cdot I; \quad P = I^2 \cdot R; \quad P = \frac{U^2}{R}$$

1.2.2 Kennwerte

Widerstandswert (Nennwert)

Widerstände werden in einer Vielzahl genormter, abgestufter Nennwerte gefertigt. Die genormten Nennwerte sind in den E-Reihen vorgegeben (Tabelle 1.2.1).

Typische Größenordnungen:

- Ω (Ohm),
- $k\Omega$ (Kiloohm). $1 k\Omega = 1\,000 \Omega$.
- $M\Omega$ (Megaohm). $1 M\Omega = 1\,000 k\Omega = 1\,000\,000 \Omega = 10^6 \Omega$.

Ist der Widerstand einstellbar, bezeichnet der Nennwert den größten einstellbaren Widerstandswert. Hängt der Widerstandswert von einer anderen Größe (Temperatur, Spannung) ab, wird der Widerstandsnennwert bezogen auf einen bestimmten Temperatur- oder Spannungsnennwert (Nenntemperatur/Nennspannung) angegeben.

Reihe	Werte
E6 20%	1.0 1.5 2.2 3.3 4.7 6.8
E12 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
E24 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
E96 1%	1.00 1.02 1.05 1.07 1.10 1.13 1.15 1.18 1.21 1.24 1.27 1.30 1.33 1.37 1.40 1.43 1.47 1.50 1.54 1.58 1.62 1.65 1.69 1.74 1.78 1.82 1.87 1.91 1.96 2.00 2.05 2.10 2.15 2.21 2.26 2.32 2.37 2.43 2.49 2.55 2.61 2.67 2.74 2.80 2.87 2.94 3.01 3.09 3.16 3.24 3.32 3.40 3.48 3.57 3.65 3.74 3.83 3.92 4.02 4.12 4.22 4.32 4.42 4.53 4.64 4.75 4.87 4.99 5.11 5.23 5.36 5.49 5.62 5.76 5.90 6.04 6.19 6.34 6.49 6.65 6.81 6.98 7.15 7.32 7.50 7.68 7.87 8.06 8.25 8.45 8.66 8.87 9.09 9.31 9.53 9.76

Tabelle 1.2.1 Die wichtigsten E-Reihen im Überblick

Der RKM-Code

Um kurze Bezeichnungen zu haben, läßt man bei Widerstandsangaben auf Bauelementen (manchmal auch in Schaltplänen, Stücklisten und Katalogen) das Symbol Ω weg und schreibt die jeweilige Vorsatzangabe anstelle des Kommas (Tabelle 1.2.2). Manchmal wird an diese Wertangabe noch ein Buchstabe angehängt, der die Toleranz kennzeichnet (Tabelle 1.2.3).

Widerstandsangabe	anstelle des Kommas steht ein	Beispiele
in Ω	R	$3,3 \Omega = 3R3$; $0,68 \Omega = R68$
in $k\Omega$	K	$2,2 k\Omega = 2K2$
in $M\Omega$	M	$1 M\Omega = 1M$

Tabelle 1.2.2 Der RKM-Code (IEC 62)

Toleranz	Kennbuchstabe	Toleranz	Kennbuchstabe
± 20%	M	± 1%	F
± 10%	K oder k	± 0,5%	D
± 5%	J	± 0,25%	C
± 2%	G	± 0,1%	B

Tabelle 1.2.3 Kennbuchstaben zur Toleranzkennzeichnung

Beispiel:

Was bedeuten (1) 1K2F und (2) 3R3J? (1): 1,2 kΩ ± 1%, 82): 3,3 Ω ± 5%.

Der Null-Ohm-Widerstand

Der Null-Ohm-Widerstand ist ein Bauteil, das wie ein Widerstand aussieht, aber praktisch eine Drahtbrücke ist, die keinen nennenswerten Widerstand aufweist. Weshalb nimmt man dann nicht gleich ein Stück Draht? - Es müßte von Hand zurechtgebogen und (auf der Leiterplatte) bestückt werden. Hingegen kann man Null-Ohm-Widerstände (die es auch in SMD-Ausführung gibt) in üblichen Bestückungsautomaten verarbeiten.

Toleranz

Die zulässige Abweichung des Widerstandswertes wird in Prozenten vom Nennwert angegeben. In den E-Reihen nach DIN/IEC sind Toleranzbereiche gemäß Tabelle 1.2.4 vorgesehen.

E-Reihe	Toleranz	Faktor
E 6	± 20 %	$\sqrt[6]{10} \approx 1,46$
E 12	± 10 %	$\sqrt[12]{10} \approx 1,21$
E 24	± 5 %	$\sqrt[24]{10} \approx 1,1$
E 96	± 1 %	$\sqrt[96]{10} \approx 1,02$
E 192	± 0,5 %	$\sqrt[192]{10} \approx 1,01$

Tabelle 1.2.4 Toleranzbereich der E-Reihen

Das Bildungsprinzip der E-Reihen

Alle Widerstände, die aus der Fertigung kommen, müssen sich verkaufen lassen. Folglich muß es möglich sein, jeden Widerstand einem Nennwert zuzuordnen. Ist ein Widerstandswert größer als ein bestimmter Nennwert + größte Plustoleranz, so wird das Bauelement als Widerstand mit dem nächstgrößeren Nennwert verkauft. Es hat dann eine entsprechend hohe Minustoleranz. Hierzu werden die Nennwerte der E-Reihen im Sinne einer geometrischen Reihe gebildet. Der

jeweils nächste Kennwert muß um knapp das Doppelte der vorgesehenen Toleranz größer sein, damit sich beide Toleranzbereiche berühren (vorhergehender Nennwert + Plustoleranz, nachfolgender Nennwert - Minustoleranz). Der jeweils nächste Kennwert ergibt sich, indem der vorhergehende mit einem festen Faktor (vgl. Tabelle 1.2.4) multipliziert wird.

Beispiel der Reihenbildung (Reihe E 12): $1 \quad 1,21 \approx \mathbf{1,2} \quad 1,21 \approx \mathbf{1,5} \quad 1,21 \approx \mathbf{1,8}$ usw.

Sortierbeispiel (Reihe E 12):

Ein Widerstand mit (gemessenen) $1,65 \text{ k}\Omega$ wird als $1,5\text{-k}\Omega$ -Typ verkauft ($1,5 \text{ k}\Omega + 10\%$), einer mit $1,66 \text{ k}\Omega$ als $1,8\text{-k}\Omega$ -Typ ($1,8 \text{ k}\Omega - 9,2\%$). In der Reihe E6 wären beide Bauelemente $1,5\text{-k}\Omega$ -Typen.

Wenn wir einen Widerstandswert messen: wann ist das Bauelement o. k. und wann nicht?

Wir bezeichnen den Nennwert des Widerstandes mit R_N und die Prozent-Toleranzangabe mit p . Dann gilt

- für den noch zulässigen kleinsten Wert R_{\min} : $R_{\min} = R_N (1 - 0,01 p)$,
- für den noch zulässigen größten Wert R_{\max} : $R_{\max} = R_N (1 + 0,01 p)$.

Beispiel:

Ein Widerstand $4,7 \text{ k}\Omega \pm 5\%$ ist in Ordnung, wenn wir einen Widerstandswert im Bereich von $4,465 \text{ k}\Omega$ bis $4,935 \text{ k}\Omega$ messen.

$$R_{\min} = 4,7 (1 - 0,05) = 4,465 \text{ k}\Omega; \quad R_{\max} = 4,7 (1 + 0,05) = 4,935 \text{ k}\Omega$$

Der Einfluß der Widerstandstoleranzen auf die Schaltung

Als Beispiel verwenden wir den in Abbildung 1.2.2 gezeigten Spannungsteiler. Er soll bei 30 V Eingangsspannung eine Ausgangsspannung von 10 V liefern. Wir verwenden Widerstände mit einer Toleranz von $\pm 10\%$. In Tabelle 1.2.5 betrachten wir die ungünstigsten Fälle, die sich ergeben, wenn die Widerstandswerte an entgegengesetzten Enden der Toleranzbereiche liegen (Worst-Case-Analyse).

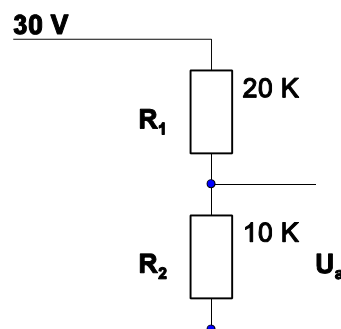


Abbildung 1.2.2 Ein Spannungsteiler

	R_1	R_2	U_a
Idealfall. Alles entspricht den Nennwerten	20 k Ω	10 k Ω	10,0 V
Worst-Case-Fall 1: R_1 am unteren, R_2 am oberen Ende	18 k Ω	11 k Ω	11,38 V
Worst-Case-Fall 2: R_1 am oberen, R_2 am unteren Ende	22 k Ω	9 k Ω	8,71 V

Tabelle 1.2.5 Ungünstigste Toleranzfälle am Spannungsteiler von Abbildung 1.2.2

Statt uns auf 10 V zu verlassen, müssen wir mit einer Ausgangsspannung im Bereich von 8,71 bis 11,38 V rechnen (Fehler rund $\pm 13\%$).

Faustregel:

Wenn alle Widerstände den gleichen Toleranzbereich haben, ergibt sich im Worst-Case-Fall eine Spannungstoleranz von ca. 1,4 Widerstandstoleranz.

Abhilfe:

- genauere (enger tolerierte) Widerstände einsetzen,
- nur Widerstände aus gleichen Fertigungslosen einsetzen (verringert Wahrscheinlichkeit von Worst-Case-Kombinationen^{*)},
- Widerstandswerte durch Reihen- oder Parallelschaltung mehrerer Einzelwiderstände bilden (so daß sich die Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit gegenseitig aufheben^{**}).

^{*)}: ist aber eine Zumutung im Service...

^{**}): je mehr Einzelbauelemente, desto besser greift die Statistik. Teuer. Hier wäre es sehr ungünstig, Bauelemente aus dem gleichen Fertigungslos einzusetzen. Denksportaufgabe: Warum?

Belastbarkeit

Die Belastbarkeit wird in W angegeben. Genaugenommen gilt der Wert für die jeweils spezifizierte Gehäusetemperatur. Auch die Belastbarkeit ist in genormte Klassen eingeteilt. Übliche Werte: 1/8 (0,125) W, 1/4 (0,25) W, 1/2 (0,5) W, 1 W, 2 W, 2,5 W, 3 W, 6 W, 10 W, 15 W, 25 W, 50 W, 100 W, 200 W, 300 W.

Die Belastbarkeit wird üblicherweise auf eine Umgebungstemperatur von 70 °C und eine zulässige Oberflächentemperatur von 125 °C bezogen.

Faustregel 1 (Derating):

Für je 30° Anstieg der Umgebungstemperatur über 70 °C hinaus die Belastbarkeitsangabe halbieren (: 2). Wenn es darauf ankommt: Derating-Kurven der Hersteller verwenden (Abbildung 1.2.3).

Faustregel 2 (Temperaturanstieg bei voller Belastung):

Typischerweise 60° über Umgebungstemperatur. Als Beispiel siehe Abbildung 1.2.3.

Faustregel 3: Dimensionierung

Beim Schaltungsentwurf ist doppelte Sicherheit eine sinnvolle Auslegung (wenn sich rechnerisch beispielsweise eine Verlustleistung von 0,9 W ergibt, wird man einen 2-W-Widerstand einsetzen). Weitergehende Überdimensionierung lohnt sich nicht (Kosten, Leiterplattenfläche, Bestückungsaufwand). Hochlastwiderstände brauchen Kühlkörper!

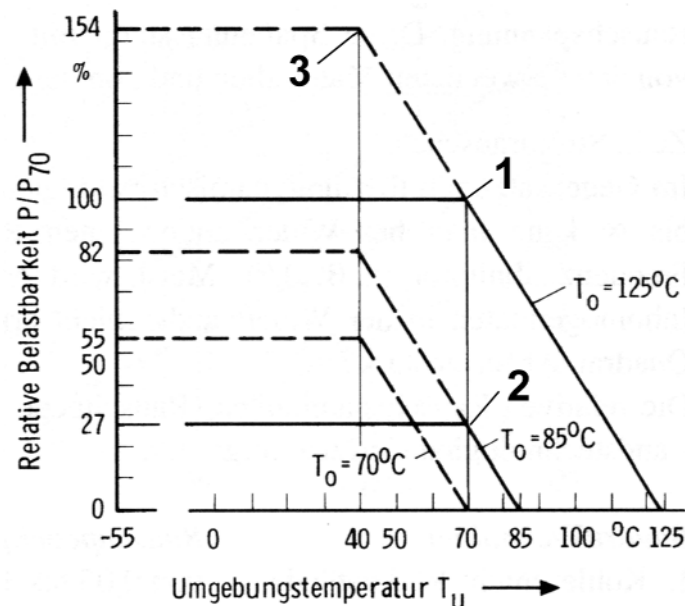


Abbildung 1.2.3 Beispiel einer Deratingkurve: Kohleschichtwiderstände (DIN 44052)

Erklärung:

Die tatsächliche Belastung, die man einem Widerstand zumuten kann, hängt von der Umgebungstemperatur T_U und von der maximal zulässigen Oberflächentemperatur T_O ab. Ablesebeispiele:

- 1) $T_U = 70\text{ °C}$, $T_O = 125\text{ °C}$: 100% (ein 1-W-Widerstand darf mit 1 W belastet werden),
- 2) $T_U = 70\text{ °C}$, $T_O = 85\text{ °C}$: 27% (ein 1-W-Widerstand darf nur mit 0,27 W belastet werden (Derating)),
- 3) $T_U = 40\text{ °C}$, $T_O = 125\text{ °C}$: 154% (ein 1-W-Widerstand darf mit 1,54 W belastet werden (Uprating)).

Rechengang zur Bestimmung der zulässigen Leistung:

$$P = \frac{T_O - T_U}{R_{th}} \quad (R_{th} \text{ ist der Wärmewiderstand in K/W - ein Datenblattwert.})$$

Achtung:

Wenn es darauf ankommt, auch an die MTBF denken! In manchen Bereichen (z. B. MIL und Automotive) sind Sondervorschriften zu beachten.

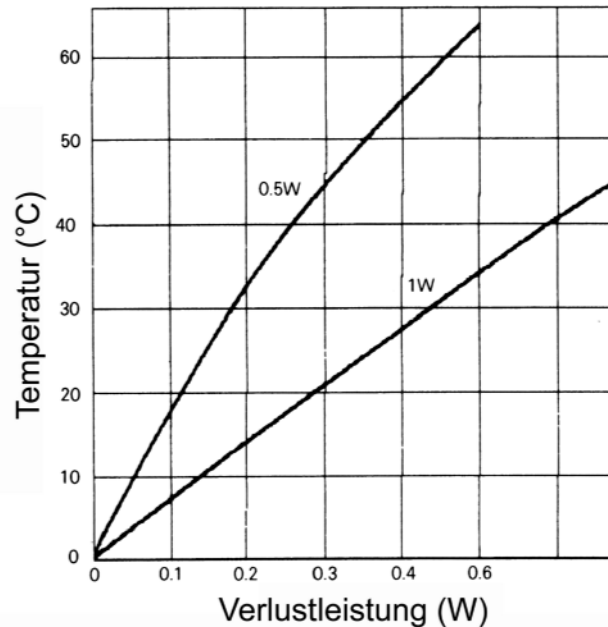


Abbildung 1.2.4 Die Temperaturerhöhung in Abhängigkeit von der Verlustleistung. Zwei Beispiele (Belastbarkeit 0,5 W und 1 W)

Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient (Temperaturbeiwert) α kennzeichnet die Abhängigkeit des Widerstandswertes von der Gehäusetemperatur. Er wird üblicherweise in $1/^\circ\text{C}$, $1/\text{K}$ oder ppm/C angegeben.

1 ppm = 1 part per million = 10^{-6} = 0,0001 (%). Ein gängiger Wert ist beispielsweise 100 ppm/ C.

Berechnung: Bei einer niedrigeren Temperatur T_1 (Bezugstemperatur) und einer höheren Temperatur T_2 messen wir jeweils den Widerstandswert. Die beiden Werte bezeichnen wir mit R_K (Kaltwiderstand) und R_W (Warmwiderstand). Dann gilt:

$$\alpha = \frac{R_W - R_K}{R_K (T_2 - T_1)} = \frac{\Delta R}{R_K \Delta T}$$

Die Widerstandsdifferenz ΔR bei gegebener Temperaturdifferenz ΔT ergibt sich aus Temperaturkoeffizient α und Kaltwiderstand R_K folgendermaßen:

$$\Delta R = \alpha R_K \Delta T$$

(ΔT = aktuelle Betriebstemperatur - Temperatur des Kaltwiderstandes (z. B. + 20 °C)).

Prozentuale Widerstandsänderung:

$$\Delta R [\%] = \frac{R_W - R_K}{R_K} \cdot 100\% = \alpha \cdot \Delta T \cdot 100\%$$

Berechnung des Warmwiderstandes:

$$R_W = R_K (1 + \alpha \cdot \Delta T) = R_K + R_K \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Nennwertangaben und Temperaturkoeffizient

Nennwertangaben beziehen sich typischerweise auf eine Temperatur von + 20 °C (Widerstandswert R_{20}). R_{20} ist unser bisheriger Wert R_K .

Der Wert eines wärmeren Widerstandes:

$$R_{_W} = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta T) = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Der Wert eines kälteren Widerstandes:

$$R_{_K} = R_{20} (1 - \alpha \cdot \Delta T) = R_{20} - R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Allgemein:

$$R_{_T} = R_{20} (1 + \alpha \cdot (\Delta T - 20)) = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha \cdot (\Delta T - 20)$$

Es gibt Widerstände mit positivem und mit negativem Temperaturkoeffizient. Beim Rechnen auf das Vorzeichen von α achten! Durch geeignetes Zusammenschalten beider Ausführungen kann man *temperaturkompensierte* Schaltungen bauen, die gegen Temperaturschwankungen weitgehend unempfindlich sind.

Der Temperaturkoeffizient einer Reihenschaltung zweier Widerstände R_1, R_2 :

$$R_K = R_1 + R_2; R_W = R_1 + R_1 \alpha_1 \Delta T + R_2 + R_2 \alpha_2 \Delta T$$

$$\alpha = \frac{R_W - R_K}{R_K \Delta T} = \frac{R_1 + R_1 \alpha_1 \Delta T + R_2 + R_2 \alpha_2 \Delta T - R_1 - R_2}{(R_1 + R_2) \Delta T}$$

$$\alpha = \frac{R_1 \alpha_1 \Delta T + R_2 \alpha_2 \Delta T}{(R_1 + R_2) \Delta T} = \frac{R_1 \alpha_1 + R_2 \alpha_2}{R_1 + R_2}$$

Temperaturkompensation

Ziel: Temperaturkoeffizient der Gesamtschaltung = 0 ($\alpha = 0$). Also: $R_1 \alpha_1 + R_2 \alpha_2 = 0$.

Die typische Entwurfsaufgabe:

Ein temperaturkompensierter Gesamt Widerstand R . Hierfür sind R_1 und R_2 zu bestimmen.

$$R_1 \alpha_1 + (R - R_1) \alpha_2 = 0; \quad R_1 \alpha_1 + R \alpha_2 - R_1 \alpha_2 = 0; \quad R_1 \alpha_1 - R_1 \alpha_2 = -R \alpha_2; \quad R_1 \alpha_2 - R_1 \alpha_1 = R \alpha_2$$

$$R_1 = R \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}; \quad R_2 = R - R_1$$

Löst man die Gleichung nach R_2 (statt nach R_1) auf, so ergibt sich:

$$R_2 = R \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2}; \quad R_1 = R - R_2$$

Praxistip: Beide Widerstände müssen der gleichen Umgebungstemperatur ausgesetzt sein (eng zusammen, gleiche Einbaulage im Luftstrom).

Temperaturkompensation in Reihen- oder Parallelschaltung?

Wir betrachten zwei parallelgeschaltete Widerstände R_1, R_2 . Infolge des Temperaturgangs sollen sie sich um kleine Werte $\Delta R_1, \Delta R_2$ ändern (wir gehen so heran, damit die Rechnung übersichtlich bleibt):

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(R_1 + \Delta R_1) (R_2 + \Delta R_2)}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2} = \frac{R_1 R_2 + \Delta R_1 R_2 + \Delta R_2 R_1 + \Delta R_1 \Delta R_2}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2}$$

Es liegt nahe, eine ideale Temperaturkompensation dann zu erwarten, wenn beide Widerstände gleich sind und gleich große, aber entgegengesetzte Temperaturkoeffizienten haben:

$$R_1 = R_2; \quad \Delta R_2 = -\Delta R_1$$

$$R = \frac{R_1 R_1 + \Delta R_1 R_1 - \Delta R_1 R_1 - \Delta R_1 \Delta R_1}{R_1 + R_1 + \Delta R_1 - \Delta R_1} = \frac{R_1^2 - \Delta R_1^2}{2 R_1} = \frac{R_1}{2} - \frac{\Delta R_1^2}{2 R_1}$$

$R_1/2$ wäre der ideale temperaturkompensierte Widerstand einer Parallelschaltung aus zwei Widerständen R_1 . Die Kompensation gelingt aber nicht ideal; es gibt stets einen quadratischen Fehleranteil.

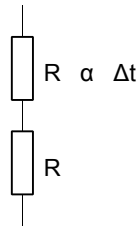
Temperaturkoeffizient und Widerstandsberechnung bei Parallelschaltung

Wir rechnen nicht mit Widerständen, sondern mit Leitwerten (Abbildung 1.2.5). Der Temperaturkoeffizient des Leitwerts heiße β .

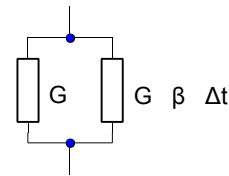
$$G_w = G_k (1 + \beta \cdot \Delta T)$$

Temperaturgänge von Widerständen

a) mit Temperaturkoeffizient des Widerstandswerts

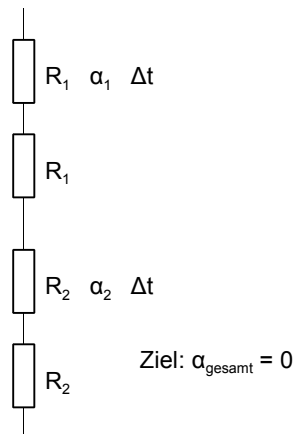


b) mit Temperaturkoeffizient des Leitwerts



Temperaturkompensation

a) Reihenschaltung



b) Parallelschaltung

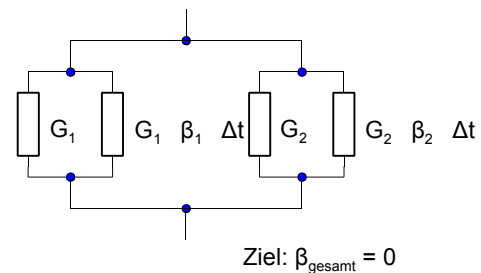


Abbildung 1.2.5 Temperaturkompensation in Reihen- und Parallelschaltung

Der Leitwert einer Parallelschaltung ergibt sich als Summe der Leitwerte der einzelnen Widerstände.

$$G = G_1 + G_2$$

Deshalb können wir mit Leitwerten in Parallelschaltung so rechnen wie mit Widerstandswerten in Reihenschaltung und die betreffenden Formeln einfach übernehmen:

$$\beta = \frac{G_1 \beta_1 + G_2 \beta_2}{G_1 + G_2}$$

Temperaturkompensation

Ziel: Temperaturkoeffizient der Gesamtschaltung = 0 ($\alpha = 0$). Also: $G_1 \beta_1 + G_2 \beta_2 = 0$.

Die typische Entwurfsaufgabe:

Ein temperaturkompensierter Gesamtleitwert G . Hierfür sind G_1 und G_2 zu bestimmen.

$$G_1 = G \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1}; \quad G_2 = G - G_1$$

Löst man die Gleichung nach G_2 (statt nach G_1) auf, so ergibt sich:

$$G_2 = G \frac{\beta_1}{\beta_1 - \beta_2}; \quad G_1 = G - G_2$$

Wir ersetzen nun die Leitwerte durch die Widerstandswerte:

$$\beta = \frac{\frac{1}{R_1} \beta_1 + \frac{1}{R_2} \beta_2}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{\frac{R_2 \beta_1 + R_1 \beta_2}{R_1 R_2}}{\frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}} = \frac{R_1 \beta_2 + R_2 \beta_1}{R_1 + R_2}$$

Sinngemäß ergibt sich beispielsweise:

$$R_2 = \frac{1}{G \frac{\beta_1}{\beta_1 - \beta_2}} = R \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1}; \quad R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{R_2 - R}{R R_2}} = \frac{R R_2}{R_2 - R}$$

In der Literatur finden wir aber u. a. folgende Formel:

$$\alpha = \frac{R_1 \alpha_2 + R_2 \alpha_1}{R_1 + R_2}; \quad R_2 = R \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1}; \quad R_1 = \frac{R R_2}{R_2 - R}$$

Man hat hier einfach $\alpha = \beta$ gesetzt. Ist das gerechtfertigt? - Offensichtlich muß der Leitwert gleich dem Kehrwert des Widerstandswerts sein:

$$G (1 + \beta \Delta t) = \frac{1}{R (1 + \alpha \Delta t)}$$

Diese Gleichung wird nach β umgestellt. Wir multiplizieren zunächst beide Seiten mit $1/G = R$:

$$1 + \beta \Delta t = \frac{1}{1 + \alpha \Delta t}$$

$$\beta \Delta t = \frac{1}{1 + \alpha \Delta t} - 1 = \frac{-\alpha \Delta t}{1 + \alpha \Delta t}$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \alpha \Delta t} - 1 = \frac{-\alpha}{1 + \alpha \Delta t} \approx -\alpha \text{ (wenn } \alpha \Delta t \text{ klein)}$$

Mit $\beta = -\alpha$ kommt man auf die obige Formel, indem man entsprechend ersetzt und beide Seiten mit -1 multipliziert. Das kann aber nur eine - mehr oder weniger zutreffende - Näherung sein.

Hinweise:

1. Für α ergibt sich eine gleich aussehende Formel (α und β tauschen). Ist α konstant, so ist β temperaturabhängig und umgekehrt.
2. Wenn es darauf ankommt, die Linearität der Temperaturgänge überprüfen. Welcher Temperaturkoeffizient ist weniger temperaturabhängig? - Ist es α , eine Reihenschaltung wählen, ist es β , eine Parallelschaltung.
3. Die Temperaturkompensation gelingt nie exakt, zumindest nicht über größere Temperaturbereiche. Abhilfe im Extremfall: Temperatur konstant halten (Thermostat).

Weitere Angaben

Weitere technische Daten betreffen unter anderem:

- die Betriebsspannung,
- den Isolationswiderstand zwischen Anschlüssen und Gehäuse,
- Wärmewiderstände, Thermospannungen und Rauschverhalten.

Richtwerte zur Betriebsspannung: Bis 0,25 W Belastbarkeit: um 150 V, höher belastbare Typen bis zu 1 000 V.

Praxistip: Für hohe Spannungen mehrere Widerstände in Reihe schalten (Richtwerte: wenigstens 1 W, Spannungsabfall über dem einzelnen Widerstand ca. 500 V).

Thermospannungen gegen Kupfer (Richtwerte): $U_T \approx 1...3,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Rauschverhalten

- thermisches Rauschen. Durch Wärmebewegung der Elektronen verursacht. Rauschspannung steigt mit zunehmender Temperatur.
- Stromrauschen. Ist proportional dem Quadrat Stromstärke. Nimmt mit wachsender Frequenz ab (z. B. gemäß $1/f$).

Angabe des Rauschpegels: typischerweise als μV je V Spannungsabfall ($\mu\text{V}/\text{V}$) bei 1 MHz Bandbreite. Rauschspannungsberechnung (thermisches Rauschen):

$$E = \sqrt{4 R k T \Delta f}$$

- E: Rauschspannung (V) als Effektivwert (quadratischer Mittelwert (RMS)),
- R: Widerstand (Ω),
- k: Boltzmannkonstante ($1,38 \cdot 10^{-23}$),
- T: Temperatur (K)*,
- Δf : Bandbreite (Hz).

*) Kelvin (= $^\circ\text{C} + 273$).

Rauschspannungsberechnung mit zugeschnittener Größengleichung:

$$E = 2,43 \sqrt{R T \Delta f}$$

- E: Rauschspannung (nV) als Effektivwert (quadratischer Mittelwert (RMS)),
- R: Widerstand (kΩ),
- T: Temperatur (K),
- Δf: Bandbreite (kHz).

1.2.3 Ersatzschaltungen

Abbildung 1.2.6 zeigt verschiedene Ersatzschaltungen für Widerstände. Welche davon jeweils in Frage kommt, hängt von Ausführung, Bauform und Betriebsfrequenz ab.

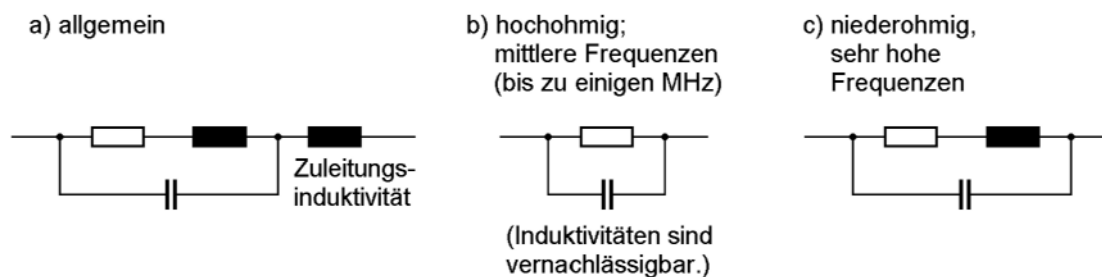


Abbildung 1.2.6 Ersatzschaltungen für Widerstände

1.2.4 Der Widerstand im Schaltplan

In Abbildung 1.2.7 sind die üblichen Schaltsymbole für Widerstände zusammengestellt.

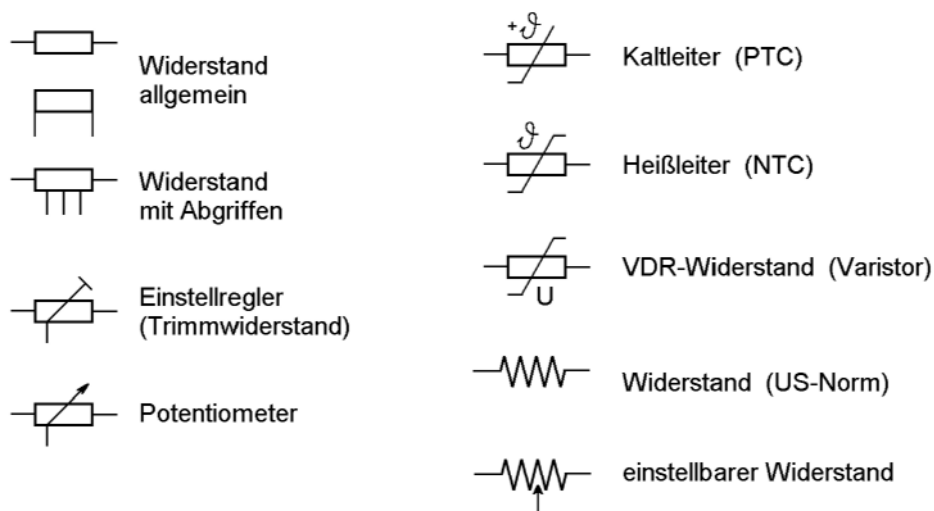


Abbildung 1.2.7 Schaltsymbole für Widerstände

1.2.5 Festwiderstände

Festwiderstände werden mit axialen Anschlußdrähten, als Widerstandsnetzwerke und als SMD-Bauelemente gefertigt. Der jeweilige Widerstandswert wird durch eine Kohleschicht, eine Metallschicht oder durch Drahtwicklungen realisiert.

Kohleschichtwiderstände

Kohleschichtwiderstände sind preisgünstig und werden mit Toleranzen von $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ und $\pm 10\%$ gefertigt. Sie haben einen negativen Temperaturkoeffizienten. Kohleschichtwiderstände werden für Belastbarkeiten von 0,125 W bis zu 2 W gefertigt.

Metallschichtwiderstände

Metallschichtwiderstände können mit wesentlich geringeren Toleranzen gefertigt werden als Kohleschichtwiderstände. Sie weisen auch einen geringeren Temperaturgang auf. Der Temperaturkoeffizient ist positiv. Die Belastbarkeit liegt typischerweise im Bereich von 0,125 bis 0,5 W.

Drahtwiderstände

Drahtwiderstände bestehen aus Widerstandsdraht, der auf einen Isolierstoffkörper gewickelt ist. Sie werden für Belastbarkeiten von 2,5 W an aufwärts gefertigt. (Es gibt auch Präzisions-Drahtwiderstände mit weniger als 1 W.) Durch entsprechende Ausführung der Wicklung bleiben die parasitären Induktivitäten und Kapazitäten hinreichend klein.

SMD-Bauformen

Zur Oberflächenmontage vorgesehene Widerstände werden in zylinder- oder quaderförmiger Ausführung (Chipwiderstände) gefertigt. Die Belastbarkeit liegt je nach Bauform zwischen 0,1 und 0,25 W.

Widerstandsnetzwerke

Widerstandsnetzwerke sind Anordnungen gleichartiger Widerstände, die gemeinsam in einem Gehäuse mit einer oder mit zwei Anschlußreihen untergebracht sind (SIL- oder DIL-Gehäuse). Sie werden meist in Dickschichttechnologie (durch Aufdrucken von Widerstandsbahnen auf ein Keramikplättchen) gefertigt. Der einzelne Widerstand ist typischerweise mit 0,125 W belastbar. Es gibt folgende Ausführungen (Abbildung 1.2.8):

- mehrere einzelne Widerstände,
- Widerstände mit gemeinsamem Anschluß (Einsatz als z. B. Pull-up-Widerstände),
- Widerstandspaare mit zwei gemeinsamen Anschlüssen (mehrfache Spannungsteiler, die z. B. zu Abschlußzwecken eingesetzt werden),
- in Reihe geschaltete Widerstände mit Abgriffen (Spannungsteiler; besonders in Präzisionsausführung zu Meßzwecken).

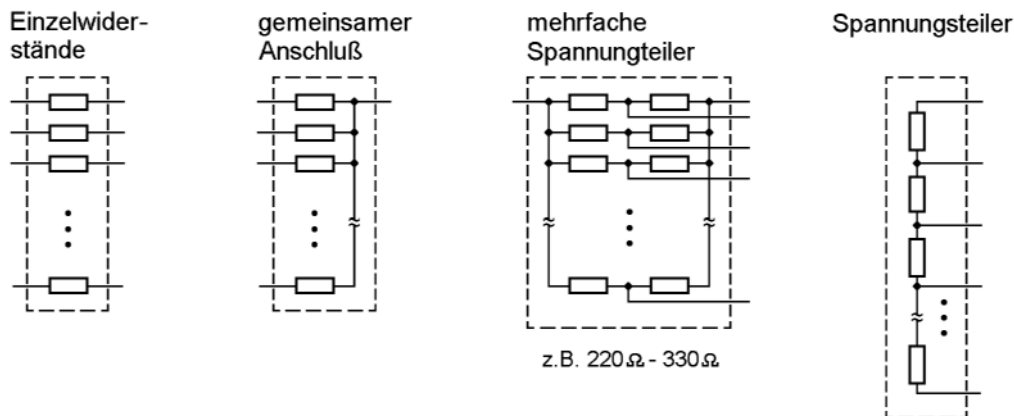


Abbildung 1.2.8 Widerstandsnetzwerke

1.2.6 Einstellbare Widerstände

Einstellbare Widerstände haben einen Schleifkontakt, der eine Widerstandsbahn abgreift. Der Kontakt wird entweder über eine gerade Widerstandsbahn hin- und herbewegt (Schiebewiderstand) oder an einem drehbar gelagerten Arm über eine kreisbogenförmig ausgeführte Widerstandsbahn geschwenkt (Drehwiderstand).

Solche Bauelemente haben eine weitere wichtige Kenngröße: die Abhängigkeit des Widerstandes vom Stellweg (zwischen Schleifkontakt (Abgriff) und einem Ende der Widerstandsbahn). Gebräuchlich sind lineare und logarithmische Ausführungen (Abbildung 1.2.9). Abbildung 1.2.10 veranschaulicht typische Schaltungsprinzipien.

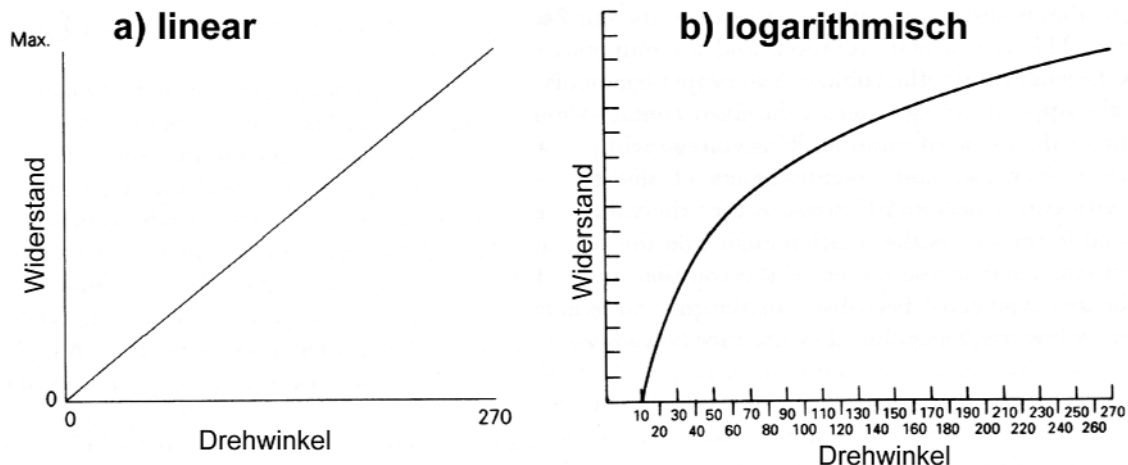


Abbildung 1.2.9 Lineare und logarithmische Weg-Widerstands-Kennlinien

Achtung:

Manchmal wird der Begriff "linear" auch verwendet, um ein Bauelement mit gerader Widerstandsbahn (und hin- und herzubewegendem Schleifkontakt) zu bezeichnen.

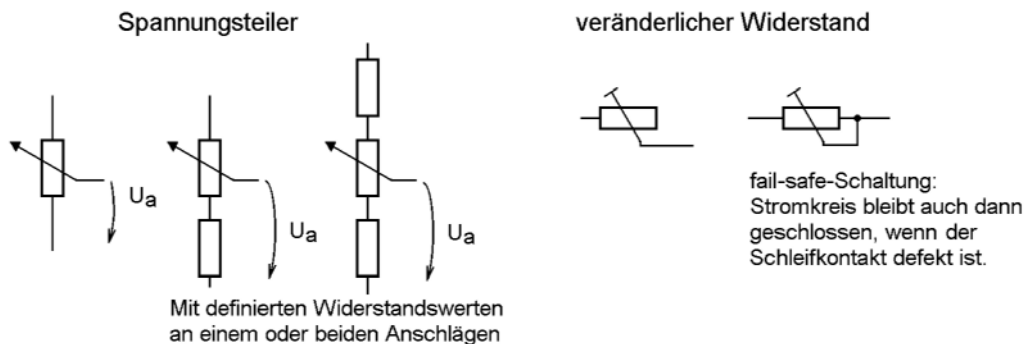


Abbildung 1.2.10 Schaltungseinzelheiten beim Einsatz einstellbarer Widerstände

Trimmwiderstände (Trimmpotentiometer)

Trimmwiderstände sind zu Einstellzwecken vorgesehen und werden während des normalen Betriebs nicht betätigt. Die einfachsten Ausführungen sind durch eine offene Widerstandsbahn und Drehbewegung gekennzeichnet. Präzisionsbauelemente haben meist eine gerade Widerstandsbahn, wobei der Schleifkontakt über eine Spindel betätigt wird.

Potentiometer

Widerstände, die zum Verstellen während des normalen Betriebs vorgesehen sind, bezeichnet man als Potentiometer. Es gibt verschiedene Ausführungen: mit zwei Widerstandsbahnen (Tandempotentiometer), mit angebautem Schalter usw.

Wendelpotentiometer (Mehrgangpotentiometer) haben eine nach dem Gewindeprinzip gestaltete Widerstandsbahn, so daß mehrere Umdrehungen erforderlich sind, um den Schleifkontakt von einem Ende zum anderen zu bewegen. Da die gesamte Widerstandsbahn vergleichsweise lang ist, kann man den gewünschten Widerstandswert sehr genau einstellen. (Wenn es auf Genauigkeit ankommt, setzt man 10-Gang-Wendelpotentiometer ein. Diese erfordern 10 Umdrehungen, um den Schleifkontakt von Anschlag zu Anschlag zu bewegen.)

Praxistips:

1. Wenn eine Schaltung nur dann funktioniert, falls das Trimmpotentiometer am Anschlag steht, ist meistens etwas faul (oder es kündigt sich so ein bevorstehender Totalausfall an, z. B. infolge Alterung eines anderen Bauelements).
2. Vorsicht beim Reinigen von Leiterplatten. Nur "waschfest" verkapselte Bauteile dürfen unbedenklich mit Reinigungsmittel überschwemmt werden.
3. Drahtpotentiometer nicht in korrosiver Umgebung einsetzen (Kontakt Metall auf Metall).
4. Mehrgang-Präzisionspotentiometer sind nicht für höhere Signalfrequenzen (Richtwert: > 10 kHz) geeignet (am besten nur Gleichstromeinsatz (Einstellen von Referenzspannungen)).
5. Wieviel Strom soll über den Schleifkontakt fließen (betrifft vor allem Trimmer auf Kohleschichtbasis)? - Die Meinungen sind geteilt (zwischen 0 = "am besten gar keiner" und ca. $10 \mu\text{A}$).

$$B = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$$

(Widerstände in Ω , Temperaturen in K.)

Typische Meßtemperaturen:

- $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ (298 K, 328K). Ergibt Thermistorkonstante $B_{25/55}$.
- $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ (298 K, 358K). Ergibt Thermistorkonstante $B_{25/85}$.

Die thermische Zeitkonstante τ_{th}

Diese Angabe beschreibt die Zeit, die der Thermistor benötigt, um bei einer Temperaturänderung seinen Widerstandswert zu ändern. Anfangswerte: T_1 , R_1 , Endwerte: T_2 , R_2 . Die Zeitkonstante wird gemessen, wenn 63% der Widerstandsänderung ($R_1 - R_2$) erreicht sind. Richtwerte: 5...11 s für kleinere, 18...25 s für größere Bauformen.

Der Wärmeleitwert (Verlustleistungskonstante) G_{th}

Dieser Kennwert beschreibt die Leistung, die erforderlich ist, um die Temperatur des Thermistors um $1 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber der Umgebungstemperatur zu erhöhen. Richtwerte: 50...500 $\mu\text{W}/^\circ\text{C}$.

Hinweis:

Beim Einsatz zur Temperaturmessung/Temperaturkompensation mit möglichst geringen Strömen arbeiten (Eigenerwärmung kleiner als geforderte Genauigkeit).

Linearisierung der Kennlinie

Das gelingt näherungsweise u. a. durch Parallelschalten eines Festwiderstandes R_p . Aus der exponentiellen wird eine S-förmige Kennlinie (Abbildung 1.2.12). *Praxistip:* Den Wendepunkt des "S" in die Mitte des Temperaturbereichs legen. Diese mittlere Arbeitstemperatur sei T (in K). Daraus läßt sich der aktuelle Widerstand R_T berechnen. Damit ergibt sich

$$R_p = R_T \frac{B - 2 T}{B + 2 T}$$

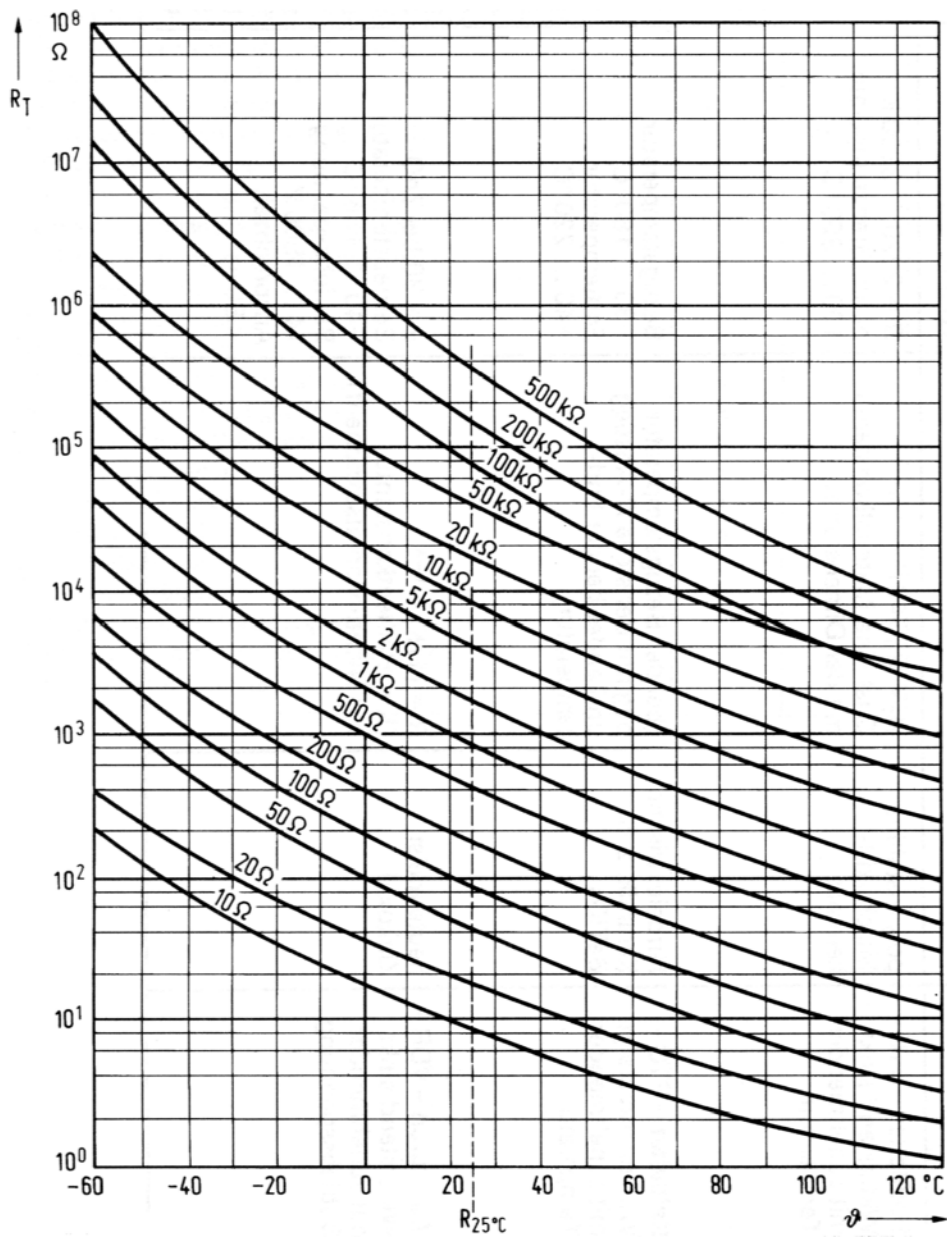


Abbildung 1.2.11 Kennlinien von Heißeleitern

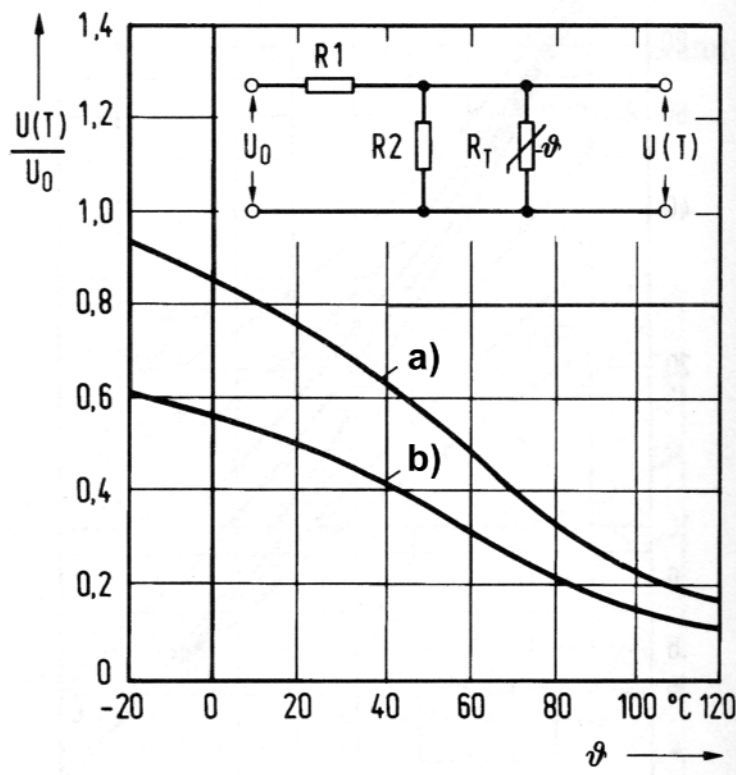


Abbildung 1.2.12 Kennlinienbeeinflussung durch Parallel- und Serienwiderstände

Erklärung:

a) - nur Serienwiderstand ($R_1 = 3 \text{ k}\Omega$; $R_2 = \text{---}$); b) - Serien- und Parallelwiderstand ($R_1 = 4,5 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 9 \text{ k}\Omega$). $R_{25^\circ} = 10 \text{ }\Omega$ (Richtwerte; nach Nährmann). Berechnungshinweis: Wert R_p berechnen wie vorstehend beschrieben. Dann R_1 und R_2 gemäß folgendem Zusammenhang dimensionieren:

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Hinweis:

Der Serienwiderstand beeinflusst den Kennlinienverlauf vor allem bei höheren Temperaturen, der Parallelwiderstand vor allem bei niederen.

Kaltleiter (PTC-Widerstände)

Kaltleiter haben einen positiven Temperaturkoeffizienten (PTC = Positive Temperature Coefficient). Ihr Widerstand steigt mit steigender Temperatur. Abbildung 1.2.13 zeigt die Temperatur-Widerstands-Kennlinie eines Kaltleiters.

Anwendung: Temperaturüberwachung, Überstromsicherung usw. Der Vorteil des Kaltleiters: viele Temperaturüberwachungsaufgaben lassen sich ohne Operationsverstärker lösen.

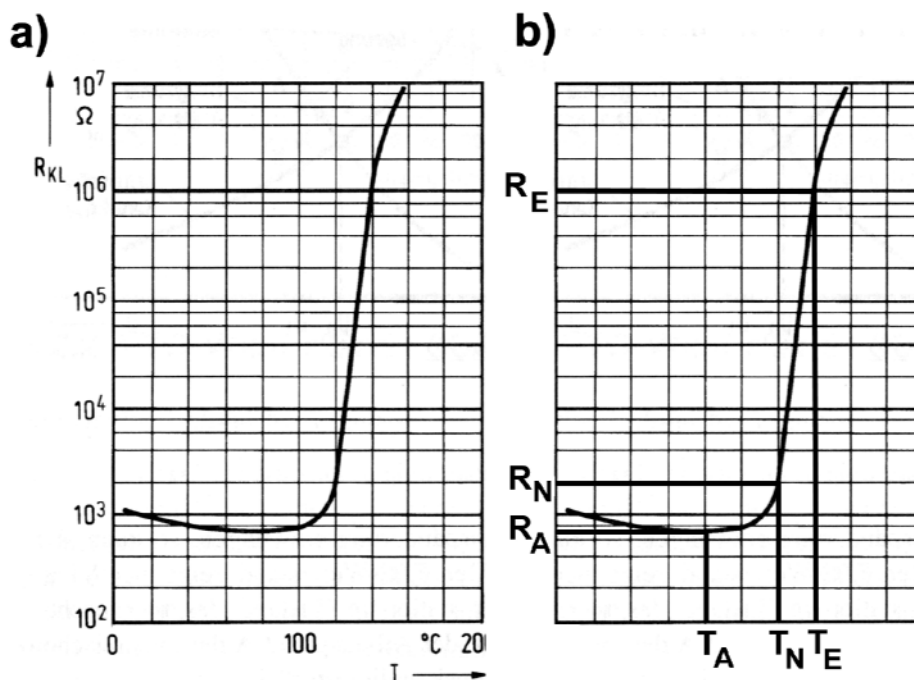


Abbildung 1.2.13 Die Kennlinie eines Kaltleiters. a) Beispiel, b) typische Kennwerte

Kennwerte im Überblick:

- Anfangstemperatur und Minimalwiderstand (T_A , R_A). Die Anfangstemperatur T_A ist die Temperatur, an der der Temperaturbereich mit positivem Temperaturkoeffizienten beginnt. Der zugehörige Widerstandswert ist der Anfangswiderstand R_A . Bis zum Erreichen der Anfangstemperatur bleibt der Widerstand nahezu konstant; dann steigt er mit zunehmender Temperatur an.
- Nenntemperatur und Nennwiderstand (T_N , R_N). Die Nenntemperatur (Bezugstemperatur) T_N ist die Temperatur, an der der steile Anstieg der Kennlinie beginnt. Der zugehörige Widerstandswert ist der Nennwiderstand (Bezugswiderstand) R_N . Genauer: T_N ist die Temperatur, die in der Kennlinie einem Bezugswiderstand $R_N = 2 R_A$ entspricht. Typische Toleranz: $\pm 5\%$.
- Endtemperatur und Endwiderstand (T_E , R_E). R_E ist der kleinste Widerstand, der als Kennwert angegeben ist. T_E ist die zugehörige Temperatur.
- thermische Zeitkonstante und Wärmeleitwert: vgl. die NTC-Widerstände.

Richtwerte:

- T_A : 10...130 °C,
- R_A : 10 Ω...2 kΩ,
- T_N : 30...270 °C,
- R_N : 1,2 kΩ...300 Ω,
- T_E : 60...300 °C,
- R_E : > 100 Ω... < 40 kΩ,

- G_{th} : 2...10 mW/K,
- maximale Betriebsspannung U_{max} : 10...300 V,
- maximale Betriebstemperatur T_{max} : 100...> 300 °C,
- typische Betriebsspannung für Meßzwecke: 1,5 V (kein Varistoreffekt, vernachlässigbare Eigenerwärmung).

Der Temperaturkoeffizient α_R

Im steilen Bereich der Kennlinie kann der Temperaturkoeffizient als nahezu konstant angenommen werden. Es gilt:

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

$$R_2 = R_1 \cdot (T_2 - T_1) \cdot e^{\alpha_R}$$

Meßtechnische Bestimmung von α_R :

$$\alpha_R \approx \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{T_2 - T_1}$$

R_2 : Widerstand bei Temperatur T_2 , R_1 = Widerstand bei Temperatur T_1 . α_R wird typischerweise in %/K angegeben. Richtwerte: 10...30 %/K (= 0,1...0,3/K).

Frequenzabhängigkeit

Infolge ihres inneren Aufbaus sind PTC-Widerstände frequenzabhängig (Abbildung 1.2.14).

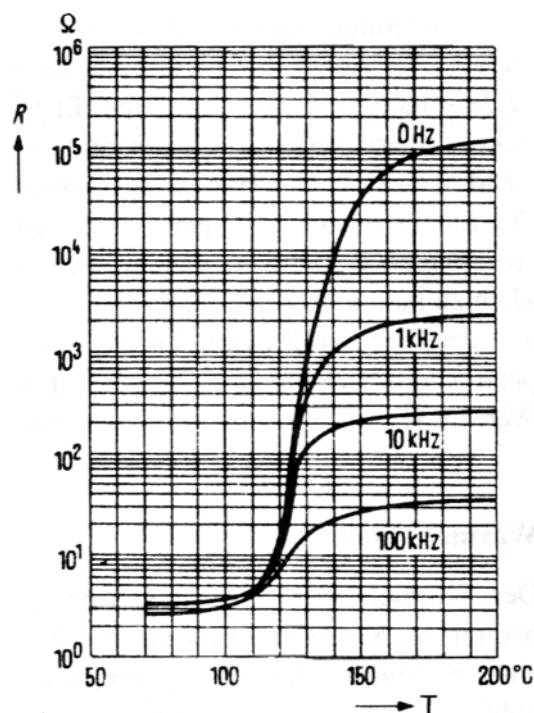


Abbildung 1.2.14 Die Kaltleiterkennlinie in Abhängigkeit von der Frequenz

1.2.8 Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren, VDRs)

Spannungsabhängige Widerstände (VDR = Voltage Dependend Resistor) haben eine nichtlineare Strom-Spannungs-Kennlinie (Abbildung 1.2.15). Sie werden üblicherweise auf Grundlage von Zinkoxid-Werkstoffen gefertigt.

Der VDR hat in einem gewissen Spannungsbereich (in der Abbildung zwischen den Punkten A und B) einen eher geringen Stromanstieg bezogen auf den Spannungsanstieg, also einen eher großen Widerstand. Wird die Spannung weiter erhöht, steigt der Strom stark an; mit anderen Worten: der Widerstand wird dann vergleichsweise gering. Die Anwendung: Überspannungsschutz.

Kennwerte im Überblick:

- Nennwiderstand (C). Wird definiert über die Spannung, die erforderlich ist, um einen Stromfluß von 1 A zu bewirken:

$$C = \frac{U}{1A}$$

- Regelfaktor (β). Gibt die Steigung der Kennlinie an (Abbildung 1.2.16):

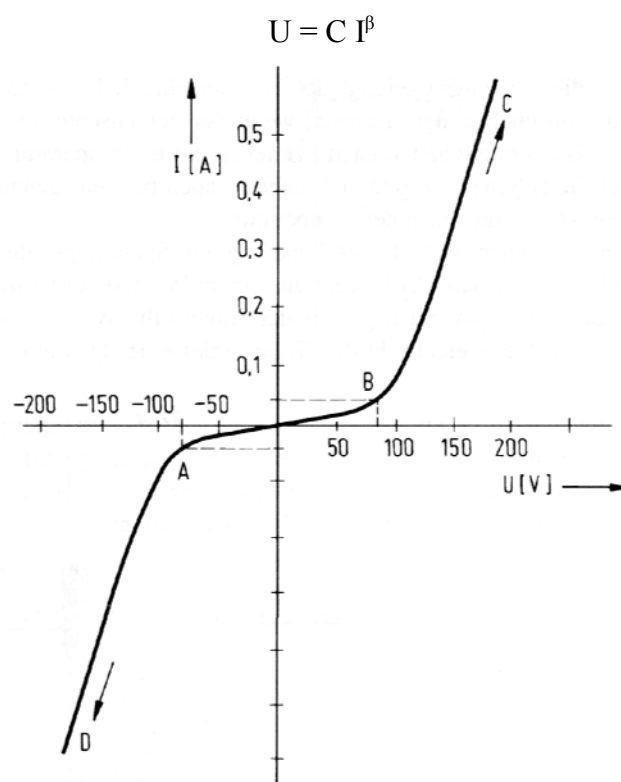


Abbildung 1.2.15 Strom-Spannungs-Kennlinie eines spannungsabhängigen Widerstands. Zwischen A und B ist der Widerstandsverlauf nahezu linear

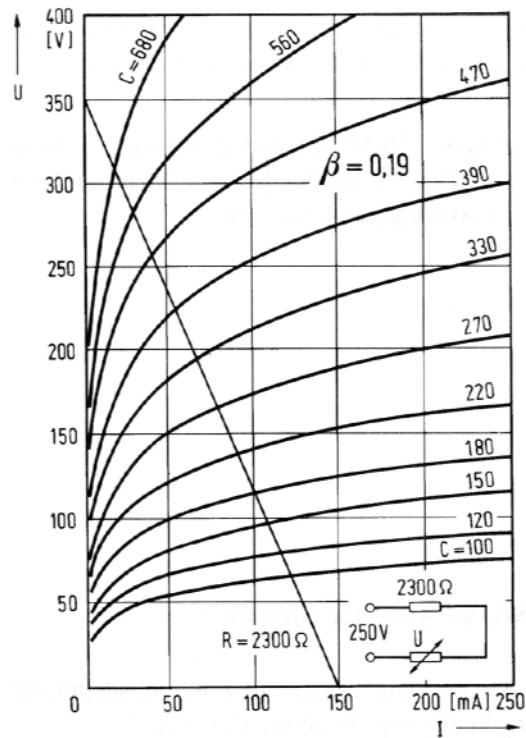


Abbildung 1.2.16 Ströme und Spannungen für eine VDR-Baureihe mit $\beta = 0,19$

Richtwerte:

- C: 10 Ω ... 1 k Ω ,
- β : 0,15...0,35,
- Toleranzen: ± 5 ...20%,
- Dauerbelastbarkeit: 0,25...3 W,
- Meßspannung: < 3 v...> 1 kV,
- Meßstrom: 1...100 mA,
- Betriebstemperatur: ca. 150 $^{\circ}\text{C}$,
- Temperaturkoeffizient (von C): -0,0012...-0,0018/K*).

*) der Temperaturkoeffizient TK_C ist negativ. $C_T = C_{\text{nenn}} (1 + \text{TK}_C \Delta T)$