

1.4 Heißeiter (NTC-Widerstände)

1.4.1 Grundlagen

Heißeiter sind temperaturabhängige Widerstandsbauelemente (Thermistoren) mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC = Negative Temperature Coefficient). Ihr Widerstand sinkt mit zunehmender Temperatur (Abb. 1.76). Der Heißeiter ist ein Volumenwiderstand aus keramischen Werkstoffen auf Grundlage von Metalloxiden. Abb. 1.77 zeigt einige typische Bauformen.

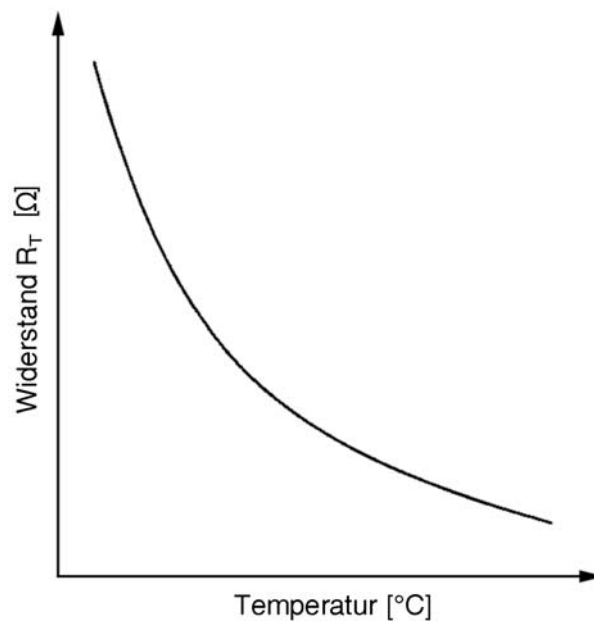


Abb. 1.76 Heißeiter. Die Widerstands-Temperatur-Kennlinie im Überblick.

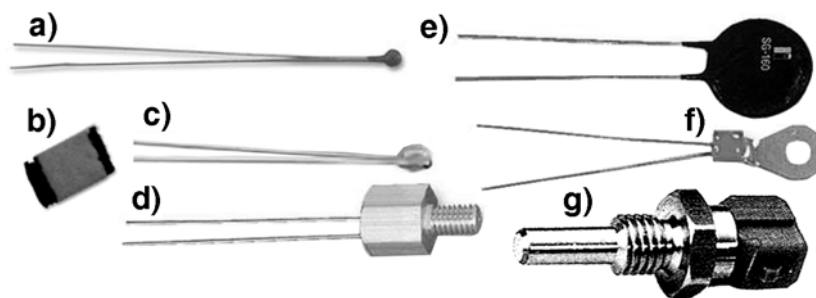


Abb. 1.77 Typische Bauformen (Auswahl). a) Perle; b) SMD; c) Perle in Glaskörper; d) Schraubgewinde; e) Scheibe; f) mit Flansch (zum Anschrauben); g) zur Temperaturmessung von Flüssigkeiten (wird in den Behälter eingeschraubt; der zylindrische Teil wird von der Flüssigkeit umspült).

Anwendung

Die Vielfalt der Anwendungsfälle unterscheidet sich vor allem dadurch, wie die Temperatur in das Bauelement hineinkommt:

Erfassen der Umgebungstemperatur (Temperaturmessung, Temperaturüberwachung, Temperaturkompensation). Das Bauelement soll die Temperatur an der jeweiligen Erfassungsstelle möglichst unverfälscht annehmen und in einen auswertbaren Widerstandswert umsetzen. Die Eigenerwärmung infolge des durchfließenden Stroms muß so gering gehalten werden, daß sie die Genauigkeit der Temperaturerfassung nicht beeinträchtigt.

Ausnutzung der Eigenerwärmung. Fließt Strom durch das Bauelement, so heizt es sich auf. Dadurch sinkt sein Widerstand. Dieses Verhalten kann u. a. zu Zwecken der Einschaltstrombegrenzung, Zeitverzögerung und Regelung ausgenutzt werden.

Fremdgeheizte Heißleiter sind Kombinationen aus einem Heißleiter und einer Heizwendel*, die voneinander isoliert sind, aber in engem Wärmekontakt stehen. Um Temperatureinflüsse der Umgebung auszuschließen, ist die Anordnung typischerweise in einen evakuierten Glaskolben eingebaut. Der Widerstandswert des Heißleiters hängt von der Temperatur der Heizwendel ab. Ein solches Bauelement ist praktisch ein stromgesteuerter Widerstand, der vom Steuerstromkreis galvanisch getrennt ist. Anwendungsgebiete: Regelungstechnik, Verstärkungs- und Amplitudenregelung in der Hochfrequenztechnik, Effektivwertmessung (geeignet für extreme Frequenzen und beliebige Spannungsverläufe).

*: Ausführungsbeispiel: Widerstand 100 Ω , Heizstrom 20 mA.

Typische Vorteile der Heißleiter:

- kostengünstig (Fertigung erfordert keine Halbleitertechnologien),
- sehr kleine Bauformen möglich (z. B. Perlen mit 0,4 mm Durchmesser),
- großer Bereich der Nennwerte,
- starke Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes (zwischen - 2 %/°C bis - 6 %/°C),
- Heißleiter können als vergleichsweise präzise Temperatursensoren ausgeführt werden.

Richtwerte im Überblick:

- Widerstandsbereich: 1 Ω ...100 M Ω ,
- Verlustleistung: einige mW...mehrere W,
- Temperaturbereich: - 60... 200 °C (es gibt aber auch Typen, die bis zu 600 °C aushalten),
- Toleranzen (bezogen auf R₂₅): +- 0,1...20 %.

Heißleiter einsetzen

Die Zusammenhänge sind komplex und rechnerisch nur näherungsweise zu erfassen. Deshalb kommt man nicht ohne Experimente aus. Manche Hersteller halten Rechen- und Simulationsprogramme bereit, um das Herantasten zu unterstützen. Auch geben die von den Herstellern veröffentlichten Prüfverfahren (zum Ermitteln der Kennwerte) brauchbare Hinweise für eigene Versuche.

Auswahl der Bauform

Es kommt auf den Einsatzfall an. Typische Beispiele:

- Temperaturmessung, Temperaturkompensation. Der Heißleiter muß innigen Wärmekontakt mit den jeweiligen Einrichtungen haben. Er wird z. B. in einen Kühlkörper eingeschraubt oder in SMD-Ausführung unmittelbar neben dem Bauelement angeordnet, dessen Temperaturgang kompensiert werden soll.
- Zeitverzögerung, Spannungsstabilisierung. Diese Wirkungen hängen nur von der Eigenerwärmung ab. Der Heißleiter sollte deshalb von seiner Umgebung nach Möglichkeit gar nicht beeinflusst werden (die extreme Auslegung: Unterbringung in einem evakuierten Glaskolben).
- Strombegrenzung. Hier wird der Heißleiter selbst richtig warm. Es muß für Wärmeabfuhr gesorgt werden. Manchmal ist die Umgebung vor übermäßiger Wärmeeabgabe zu schützen (an der richtigen Stelle auf der Leiterplatte oder im Gerät anordnen, hinreichend Platz zu temperaturempfindlichen Schaltungsteilen lassen usw.).

1.4.2 Kennwerte

Nennwiderstandswert

Der Nennwiderstandswert (Rated Resistance R_R) ist der Widerstandswert des unbelasteten Heißleiters bei einer bestimmten Nenntemperatur. Die allgemein übliche Nenntemperatur: + 25 °C = 298,15 K. Dieser Kennwert wird mit R_{25} bezeichnet.

Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

Sie kann anhand von Kennlinien, Formeln oder Tabellen beschrieben werden (Näheres in Abschnitt 1.4.3). Solche Angaben werden benötigt, um Bauelemente auszusuchen, Anwendungsschaltungen zu dimensionieren und Meßergebnisse programmseitig auszuwerten (der typische Einsatzfall: ein Mikrocontroller soll aus einem Spannungs- oder Widerstandswert eine – möglichst präzise – Temperaturangabe in °C ausrechnen).

Temperaturkoeffizienten (α_R , TC o. ä.) werden gelegentlich angegeben. Es sind aber nur sehr grobe Richtwerte, die nur bei geringen Abweichungen von der jeweils zugehörigen Bezugstemperatur gelten.

B-Wert

Der B-Wert bildet die Grundlage der formelmäßigen Beschreibung des Widerstands-Temperatur-Verhaltens (Thermistorkonstante). Er ergibt sich aus den Materialeigenschaften

des Heißleiters. Der B-Wert wird in Kelvin (K) angegeben. Richtwert: einige tausend K.

Temperaturgrenzen

Es gibt zwei Angaben. Sie beschreiben den Temperaturbereich, in dem das Bauelement eingesetzt werden darf:

- die untere Grenztemperatur (Lower Category Temperature) T_{\min} ,
- die obere Grenztemperatur (Upper Category Temperature) T_{\max} .

Toleranzen

Es gibt mehrere Toleranzangaben. Sie betreffen:

- den unbelasteten Widerstand bei Nenntemperatur, also üblicherweise die maximal zulässige Abweichung vom Nennwert R_{25} (Manufacturing Tolerance MT). Richtwerte: $\pm 1...25\%$.
- die maximal zulässige Abweichung des B-Wertes. Richtwerte: $\pm 1...2\%$.
- die maximal zulässige Abweichung der Temperatur, bezogen auf den Widerstandswert (Temperaturtoleranz). Richtwerte: $\pm 0,1...5\%$.

Näheres in Abschnitt 1.4.3.

Belastbarkeit

Die Belastbarkeitsangabe (Nennverlustleistung, Power Dissipation, Power Rating P) betrifft die maximal zulässige Verlustleistung bei der jeweils angegebenen Bezugstemperatur T, wobei die Oberflächentemperatur des Heißleiters die obere Grenztemperatur nicht überschreiten darf. Der Datenblattwert gilt typischerweise bei einer Bezugstemperatur von $+25\text{ °C}$ (P_{25}). Bei beliebiger Temperatur T gilt:

$$P_T = I^2 \cdot R_T \quad (1.63)$$

Hinweis: Der Datenblattwert gilt nur für einen gewissen Temperaturbereich. Bei niedrigeren oder höheren Temperaturen ist die zulässige Verlustleistung zu verringern (Derating).

Maximalstrom

Ob eine Maximalstromangabe (I_{\max}) im Datenblatt zu finden ist, richtet sich nach der vorgesehenen Anwendung des Bauelements:

- bei Anwendung als Temperaturfühler sollte sowenig Strom wie möglich fließen. Deshalb wird oftmals gar kein Stromkennwert angegeben. Die zulässige Strombelastung kann aus der Belastbarkeit errechnet werden. Maximal zulässige Meßströme liegen bei wenigen mA.
- wenn die Eigenerwärmung ausgenutzt werden soll, betrifft die Maximalstromangabe typischerweise den zulässigen Dauerstrom, bezogen auf den minimalen Widerstand oder

auf die obere Grenztemperatur. Richtwerte: einige hundert mA bis einige zehn A (Spezialtypen für die Einschaltstrombegrenzung). Ergänzend dazu ist gelegentlich noch eine Impulsbelastbarkeit (Energy Rating) in J (Ws) angegeben.

Spannungsangaben

Manche Datenblätter enthalten keine. Solche Bauelemente halten dann die Spannung aus, die sich aus Widerstandswert und Belastbarkeit ergibt:

$$U_{\max} \leq \sqrt{P_T \cdot R_T} \quad (1.64)$$

Manchmal sind Maximalwerte angegeben, z. B. als Nennspannung (Rated Voltage), maximale Betriebsspannung (Operating / Working Voltage) o. dergl. Trotzdem solle eine Kontrollrechnung nach (1.64) ausgeführt werden. Der jeweils kleinere Wert darf nicht überschritten werden.

1.4.3 Der unbelastete Heißleiter

Ein Heißleiter ist dann unbelastet, wenn nur sehr geringe Ströme fließen und somit praktisch keine Eigenerwärmung auftritt. Eine genauere Definition: dann, wenn sich bei beliebiger Änderung der Belastung der Widerstandswert um nicht mehr als $\pm 0,1\%$ ändert (Nulllastwiderstand).

Die Widerstands-Temperatur-Kennlinie (R-T-Kennlinie) hat typischerweise eine linear geteilte Temperatur- und eine logarithmisch geteilte Widerstandsachse (Abb. 1.78). Damit sieht die Kurve viel weniger krumm aus, als sie wirklich ist. Der überstrichene Widerstandsbereich ist aber beachtlich. Die Ablesbeispiele in Abb. 1.78 ergeben:

- 1: bei 25 °C: 33 Ω (Nennwert),
- 2: bei - 20 °C: 200 Ω ,
- 3: bei 100 °C: etwa 3,5 Ω .

Das Verhältnis der beiden Endwerte beträgt rund 57 : 1.

Kennlinien sind aber nur für eine pauschale Orientierung geeignet; genaue Werte kann man nicht entnehmen. Auch eignen sie sich nicht zur rechentechnischen Auswertung. Der genaue Verlauf der Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur (R-T-Kurve) wird deshalb formelmäßig oder durch Tabellen dargestellt. In entsprechenden Anwendungen auf Grundlage von Mikrocontrollern oder Prozessoren hat man die Wahl, die jeweilige Formel durchzurechnen oder eine gespeicherte Tabelle zu durchsuchen.

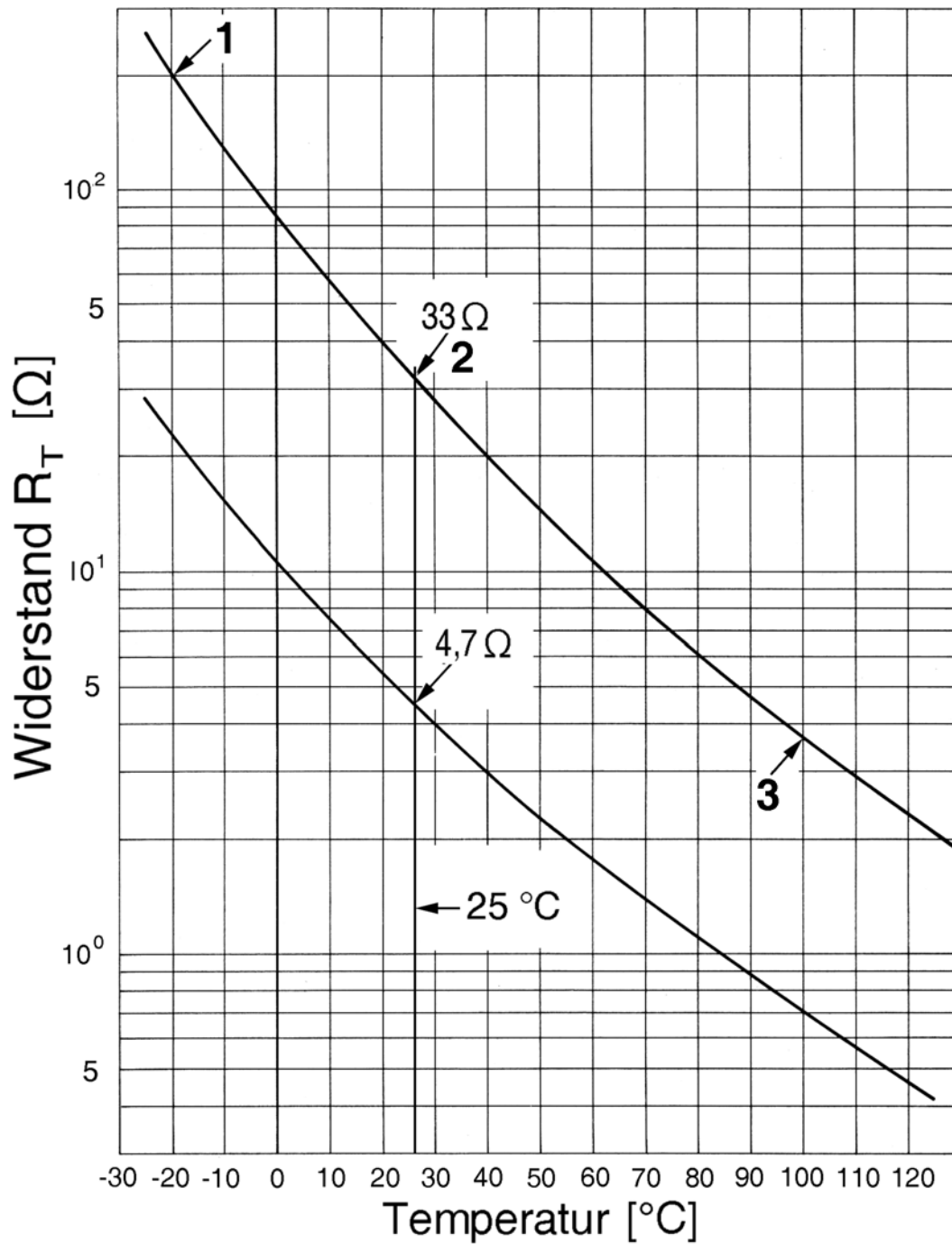


Abb. 1.78 Widerstands-Temperatur-Kennlinie (R-T-Kennlinie) von Heißleitern (zwei Beispiele). Die Widerstandswerte gelten bei einer Nenn­temperatur von + 25 °C. Wenn es kälter wird, steigt der Widerstandswert; wenn es wärmer wird, sinkt er. 1, 2, 3 - Ab­lese­beis­piele (s. Text).

Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstandswert als Formel

Gleichung (1.65) gibt näherungsweise an, wie sich der Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur ändert:

$$R_T = R_R \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)} \quad (1.65)$$

- R_T Widerstandswert [Ω] bei Temperatur T [K],
- R_R Widerstandswert [Ω] bei Bezugstemperatur T_R in K (z. B. R_{25} bei $T_{25} = 298,15$ K),
- B Thermistorkonstante [K] Der Wert bestimmt den Verlauf der R-T-Kennlinie (Abb. 1.79).

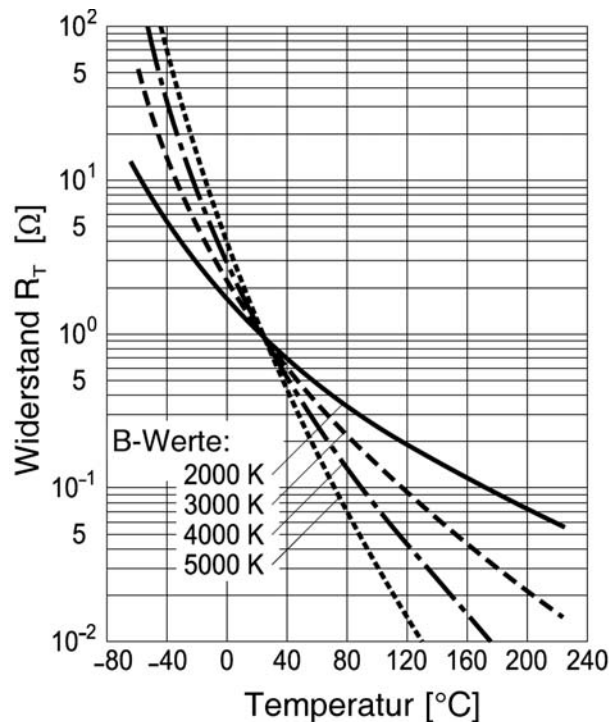


Abb. 1.79 R-T-Kennlinien von Heißleitern mit verschiedenen B-Werten (nach [1.22]).

Meßtechnische Bestimmung von B: Durch Messen der Widerstandswerte R_R und R_T [Ω] bei zwei verschiedenen Temperaturen T_R und T [K]:

$$B = \frac{T \cdot T_R}{T_R - T} \cdot \ln \frac{R_T}{R_R} = \frac{T \cdot T_R}{T - T_R} \cdot \ln \frac{R_R}{R_T} \quad (1.66)$$

Der zweite Ausdruck in (1.66) ergibt sich, indem beim Umstellen von (1.65) Zähler und Nenner mit -1 multipliziert werden. So kommt man bei Temperaturerhöhung ($T > T_R$) auf durchgehend positive Zahlenwerte.

Typische B-Angaben betreffen die übliche Bezugstemperatur $T_R = 298,15$ K (+ 25 $^{\circ}\text{C}$) und verschiedene industrieeübliche Meßtemperaturen T (Tabelle 1.19):

B-Angabe	Bezugstemperatur T_R	Meßtemperatur T	Berechnung
$B_{25/100}$	+ 25 °C = 298,15 K	+ 100 °C = 373,15 K	$B_{25/100} = 1484,4 \cdot \ln \frac{R_{25}}{R_{100}}$
$B_{25/85}$		+ 85 °C = 358,15 K	$B_{25/85} = 1779,7 \cdot \ln \frac{R_{25}}{R_{85}}$
$B_{25/50}$		+ 50 °C = 323,15 K	$B_{25/50} = 3853,9 \cdot \ln \frac{R_{25}}{R_{50}}$

Tabelle 1.19 Typische B-Angaben.

Der Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient (α_R oder TC) wird typischerweise in Prozent je Temperaturgrad angegeben (%/K oder %/°C). Da die R-T-Kennlinie nichtlinear ist, gilt der Wert strenggenommen nur in einem Punkt (Bezugstemperatur T_R , Bezugswiderstand R_R). Der Temperaturkoeffizient ergibt sich aus dem Anstieg der R-T-Kennlinie in diesem Punkt:

$$TC = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{dR}{dT} \cdot 100\% ; TC = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \cdot 100\% \quad (1.67)$$

Die rechte Formel in (1.67) betrifft die praktische Berechnung aus zwei Punkten der Kennlinie (aus Tabellen oder Diagrammen abgelesen oder meßtechnisch ermittelt). Braucht man den Temperaturkoeffizienten für eine bestimmte Temperatur T_R , wählt man T_1 und T_2 so, daß T_R in der Mitte des Intervalls zu liegen kommt: $T_1 < T_R < T_2^*$. Beispiel: gesucht ist der TC für $T_R = 50$ °C. Dann wählt man z. B. $T_1 = 49$ °C und $T_2 = 51$ °C.

*: T_1 ist der nächst-niedrigere, T_2 der nächst-höhere Temperaturwert, z. B. in einer Tabelle ähnlich Abb. 1.80.

Bei bekannter Thermistorkonstante B läßt sich der Temperaturkoeffizient für eine beliebige Bezugstemperatur T_R wie folgt bestimmen:

$$TC = -\frac{B}{T_R^2} \cdot 100 \quad (1.68)$$

Temperaturbestimmung – die typische Meßaufgabe

Bekannt sind der B-Wert und der Nennwert R_{25} , gemessen wurde ein Widerstandswert R_T . Daraus ist die aktuelle Temperatur T zu bestimmen. Durch Umstellen von (1.66) ergibt sich:

$$T = \frac{T_R}{1 - \frac{T_R}{B} \cdot \ln \frac{R_R}{R_T}} ; \quad T = \frac{298,15\text{K}}{1 - \frac{298,15\text{K}}{B} \cdot \ln \frac{R_{25}}{R_T}} \quad (1.69)$$

(Der rechte Ausdruck ist zugeschnitten für eine Bezugstemperatur von 25 °C.)

Die Temperatur kann auch über den Temperaturkoeffizienten TC näherungsweise bestimmt werden. Aus (1.67)* ergibt sich die Differenz ΔT zur Bezugstemperatur:

$$\Delta T = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{\Delta R}{TC} \cdot 100\% \quad (1.70)$$

*: Mit Differenzenquotienten $\Delta R/\Delta T$ anstelle des Differentialquotienten.

Beide Formeln (1.69), (1.70) sind ungenau. Die Abweichung wächst mit dem Temperaturbereich. Je größer die Differenz zwischen Bezugstemperatur T_R und Meßtemperatur T , desto größer der Fehler. (1.70) ist rechnerisch einfach, aber eine sehr grobe Näherung (die Formel gilt strenggenommen nur für kleine Abweichungen von der jeweiligen Bezugstemperatur).

Rechnet man mit der Thermistorkonstanten B ((1.68), (1.69)), so können sich Fehler in folgenden Größenordnungen ergeben (nach [1.23]):

- mehr als +1 % über einen Temperaturbereich zwischen 0 °C und + 100 °C,
- um +- 5 % über den gesamten Temperaturbereich eines typischen Heißleiters.

Toleranzen

Es gibt zwei Arten der Toleranzspezifikation und dementsprechend zwei Ausführungen von Heißleitern:

- *Point Matching*. Die Toleranzangabe gilt für eine einzige Bezugstemperatur. Das ist zumeist + 25°C, kann aber auch eine anwendungsspezifischer Wert sein (z. B. 0 °C für Typen, die als Temperaturfühler in Kühlschränken vorgesehen sind).
- *Curve Tracking*. Die Toleranzangabe gilt für einen Temperaturbereich (z. B. zwischen 0 und + 70 °C); es wird also eine maximale Abweichung von einem bestimmten Verlauf der R-T-Kurve gewährleistet.

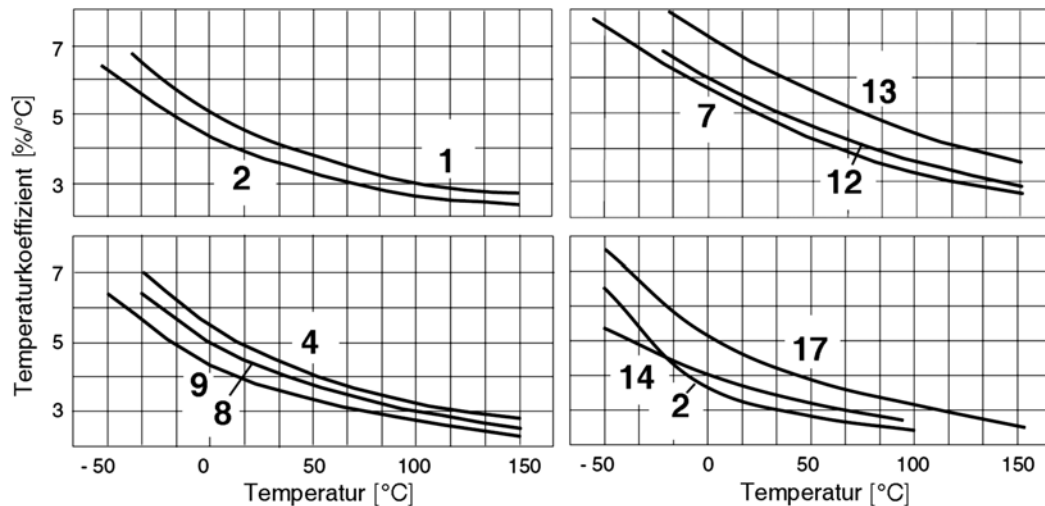


Abb. 1.80 Beispiele standardisierter R-T-Kurven (nach [1.26]). Zu den Kurvennummern vgl. Tabelle 1.20.

Reaktionszeit

Diese Zeitangabe (Response Time) vermittelt einen Eindruck davon, wie schnell der Heißleiter auf eine Änderung der Umgebungstemperatur reagiert. Dabei verbleibt er im jeweiligen Medium, kann also allen Temperaturänderungen sofort folgen. Im Gegensatz dazu geht es bei den thermischen Zeitkonstanten um Ausgleichsvorgänge als Antwort auf sprunghafte Änderungen der Umgebungstemperatur. Deshalb ist die Reaktionszeit typischerweise deutlich kürzer (z. B. < 1 s bei Zeitkonstanten von mehreren s).

Hinweis: Solche Zeitangaben sind nur grobe Richtwerte. Im praktischen Einsatz sind die Zeiten von den Umgebungsbedingungen abhängig (vor allem vom umgebenden Medium).

1.4.4 Der stromdurchflossene Heißleiter

Wird der bisher stromlose Heißleiter von einem hinreichend starken Strom durchflossen, so erwärmt er sich zunächst schnell. Die Eigenerwärmung klingt jedoch nach und nach ab. Schließlich wird ein stationärer Zustand erreicht, in dem die zugeführte Leistung über Wärmeleitung und Wärmestrahlung an die Umgebung abgegeben wird.

Die Spannungs-Strom-Kennlinie

Diese Kennlinie veranschaulicht, wie die über dem Heißleiter abfallende Spannung vom durchfließenden Strom abhängt (Abb. 1.81).

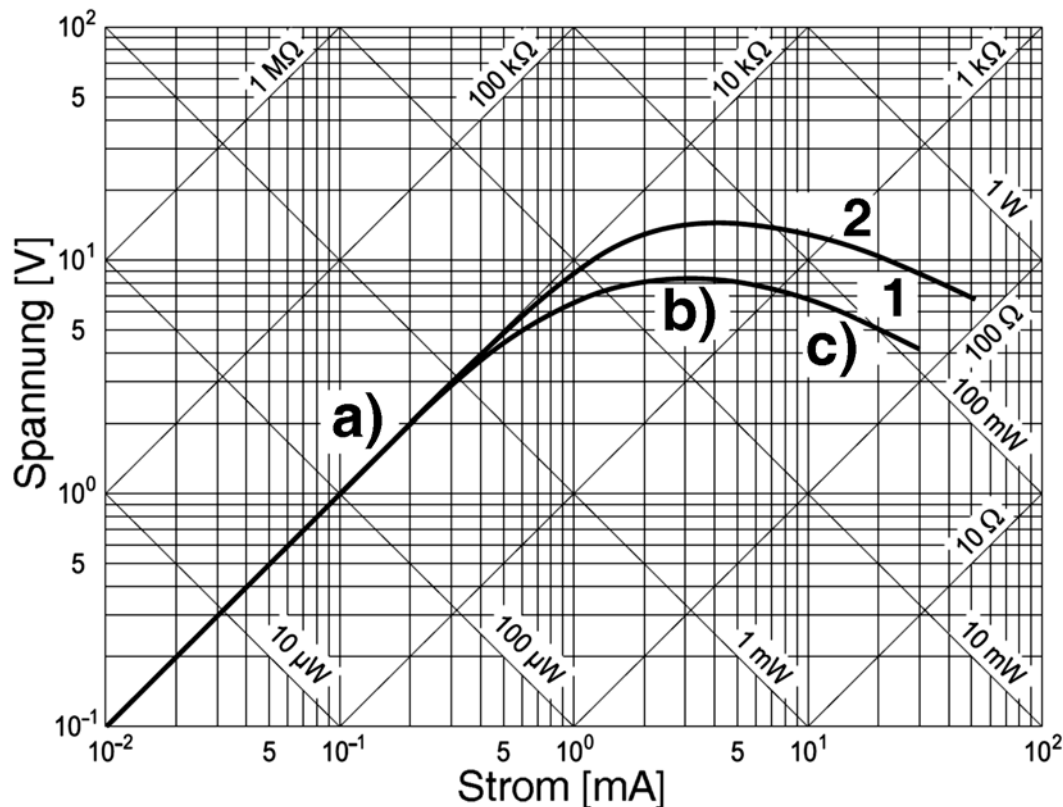


Abb. 1.81 Spannungs-Strom-Kennlinie (nach [1.22]). 1 - in Luft; 2 - in Wasser. Es handelt sich um eine doppelt logarithmische Darstellung. Zur Orientierung sind zusätzlich Kurven gleicher Leistung und gleichen Widerstandes eingezeichnet (die bei dieser Art der Darstellung zu Geraden werden). a), b) c) - die typischen Bereiche der Kennlinie (s. Text).

Die Spannungs-Strom-Kennlinie kann in drei Bereiche eingeteilt werden:

- a) Niedrige Stromstärken bewirken nur eine geringe Eigenerwärmung. Der Widerstandswert wird praktisch allein von der Umgebungstemperatur bestimmt. Dieser Kennlinienabschnitt wird in meßtechnischen Anwendungen ausgenutzt.
- b) Anstieg bis zum maximalen Spannungsabfall. Mit steigender Stromstärke macht sich die Eigenerwärmung nach und nach bemerkbar und führt zu einer deutlichen Verringerung des Widerstandes. Am Scheitelpunkte der Kurve (d. h. bei maximalem Spannungsabfall) ist die relative Abnahme des Widerstandes gleich dem relativen Anstieg der Stromstärke:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta I}{I} \quad (1.90)$$

- c) Bei weiterer Erhöhung der Stromstärke nimmt der Widerstand schneller ab als der Strom ansteigt. Dieser Kennlinienabschnitt wird durchlaufen, wenn die Eigenerwärmung zur Lösung der Anwendungsaufgabe ausgenutzt wird (z. B. bei der Einschaltstrombegrenzung).

Der Heißeiter in verschiedenen Medien

Die Angaben in den Datenblättern werden am frei stehenden Bauelement in ruhender Luft ermittelt. Das betrifft sowohl den Wärmeleitwert \mathcal{Q}_{th} als auch die Spannungs-Strom-Kennlinie. In der Anwendung sind die Zusammenhänge zwischen Verlustleistung und Temperatur und zwischen Strom und Spannung von vielen Einflüssen abhängig (Bauart, Montage, Art des Mediums usw.). In strömender Luft, in einer Flüssigkeit, bei Einbau des Heißeiters in ein Gehäuse, bei Montage an Kühlköpern usw. (vgl. beispielsweise Abb. 1.77d, f, g) kann der Wärmeleitwert um den Faktor 2 bis 6 (Richtwerte) ansteigen. Somit verschiebt sich die Spannungs-Strom-Kennlinie in Richtung größerer Strom- und Spannungswerte (vgl. (1.87) und (1.88) sowie die Kennlinienverläufe 1 und 2 in Abb. 1.82). Im Vakuum hingegen ist der Wärmeleitwert niedriger, da es kein Medium gibt, über das die Wärme durch Wärmeleitung oder Konvektion abgeführt werden kann (es gibt nur die Wärmestrahlung). Somit verschiebt sich die Spannungs-Strom-Kennlinie in Richtung geringerer Strom- und Spannungswerte.

Temperatur und Belastbarkeit; Derating

Heißeiter sind nicht im gesamten Temperaturbereich in gleichem Maße belastbar. Die zulässige Belastung in Abhängigkeit von der Temperatur wird – wie bei den Festwiderständen und einstellbaren Widerständen – in Derating-Diagrammen angegeben. Im Gegensatz zu den Derating-Kurven der genannten Widerstände fällt die zulässige Belastbarkeit auch im Bereich der tiefen Temperaturen ab (Abb. 1.83).

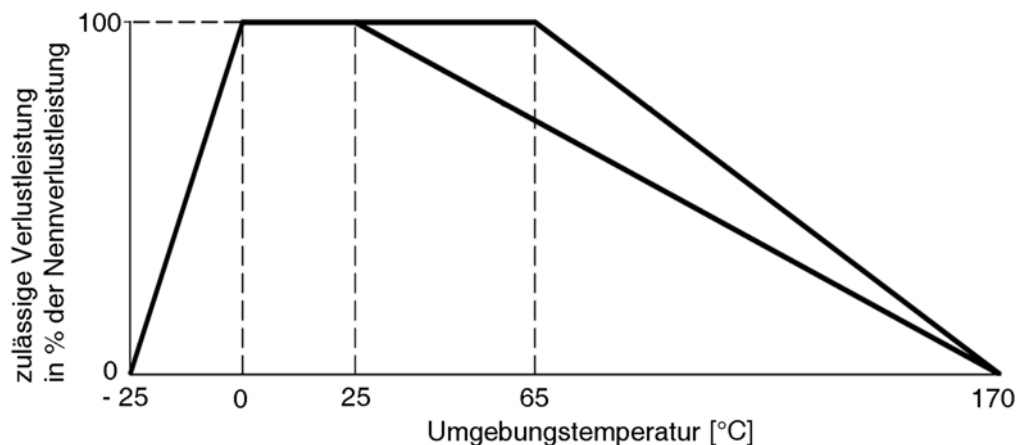


Abb. 1.82 Beispiel eines Derating-Diagramms (nach [1.27]). Es sind die Derating-Kurven für zwei Heißeitertypen dargestellt. Der eine darf zwischen 0 und + 25 °C voll belastet werden, der andere zwischen 0 und + 56 °C. Bei - 25 °C und + 170 °C darf überhaupt kein Strom durch den Heißeiter fließen. Solche Diagramme sind genauso abzulesen und auszuwerten wie jene der Festwiderstände (vgl. Abschnitt 1.2****).

1.4.5 Zur Anwendungspraxis

Temperaturmessung

Die Temperatur ergibt sich aus dem aktuellen Widerstandswert R_T des Heißleiters. Es sind somit zwei grundsätzliche Probleme zu lösen:

- die – möglichst belastungslose – Messung des Widerstandswertes R_T (Abb. 1.83),
- die Umsetzung dieses Meßwertes in eine der jeweiligen Anwendungsaufgabe entsprechende Wirkung* oder Temperaturdarstellung.

*: Ein- oder Ausschalten einer Heizwendel, Beeinflussung der Drehzahl eines Lüfters usw.

Temperaturmessung hat Zeit

Es geht typischerweise um Sekunden, nicht um Mikrosekunden. Somit lassen sich auch anspruchsvolle Aufgaben der Meßwert- und Signalverarbeitung mit kleinen Mikrocontrollern lösen. Es liegt also nahe, den Aufwand in den analogen Schaltungsteilen so gering wie möglich zu halten. Prinzip: eine dem aktuellen Widerstandswert R_T entsprechende Meßgröße möglichst unverfälscht ins Digitale wandeln und alles andere (Linearisierung, Glättung, Wandlung in "echte" Temperaturangaben usw.) programmseitig erledigen.

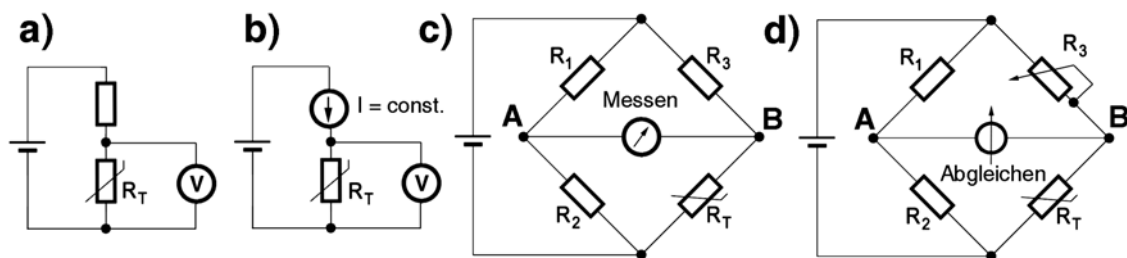


Abb. 1.83 Prinzipschaltungen der Temperaturmessung. a) Messung des Spannungsabfalls in einer Spannungsteilerschaltung; b) Messung des Spannungsabfalls bei Einspeisung eines konstanten Stroms (Richtwert: $< 1 \text{ mA}$); c) Spannungs- oder Strommessung in Wheatstone-Brücke; d) Messen durch Abgleichen einer Wheatstone-Brücke.

Temperaturmessung durch Spannungsmessung

Diese einfache Lösung (Abb. 1.83a) reicht für viele Anwendungsfälle aus. Wird eine hohe Genauigkeit gewünscht, kann man den "oberen" Widerstand des Spannungsteilers durch eine präzise Konstantstromquelle ersetzen (Abb. 1.83b). Geht es nur um Ein-Aus-Funktionen (z. B. Übertemperaturanzeige), läßt sich die Meßspannung mit einem Komparator auswerten. Manchmal genügt sogar eine Transistor-Schaltstufe*.

*: Die sich aber wie ein Schmitt-Trigger verhalten sollte (Schwellwert, Hysterese). Von simplen Bastellösungen wird abgeraten.

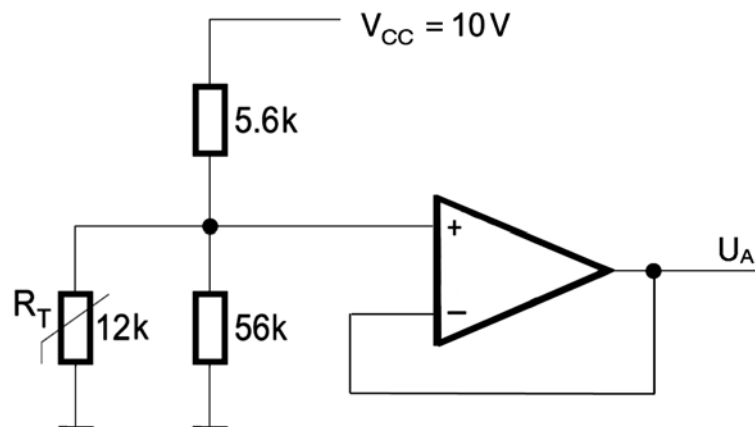


Abb. 1.84 Heißleiter-Meßschaltung mit Pufferstufe (die z. B. durch einen Komparator ersetzt werden kann). Näherungsweise Linearisierung durch Parallelwiderstand. Dimensionierungsbeispiel (nach [1.27]).

Temperaturmessung mittels Wheatstone-Brücke

Aus der Spannungsdifferenz zwischen den Punkten A und B (vgl. Abb. 1.83c) oder aus dem fließenden Strom läßt sich der Widerstandswert R_T bestimmen. Die Spannung zwischen den Punkten A und B kann z. B. mittels Differenzmeßverstärker (Instrumentation Amplifier) gemessen werden.

Alternativ dazu kann die Brücke durch Verändern von R_3 (vgl. Abb. 1.83d) abgeglichen werden (zwischen A und B keine Spannungsdifferenz oder kein Stromfluß). R_T läßt sich dann aus den Werten der anderen Widerstände errechnen. In typischen Anwendungslösungen ist R_3 ein Digitalpotentiometer, das von einem Mikrocontroller verstellt wird.

Sensoren

Dieser Anwendungsbereich beruht darauf, daß der Verlauf der Spannungs-Strom-Kennlinie von den Eigenschaften des umgebenden Mediums abhängt. Hierzu muß der Heißleiter im Bereich der Eigenerwärmung betrieben werden. Wird die zugeführte Wärme nur langsam oder nahezu gar nicht abgeführt (ruhende Luft, Vakuum), so wird der Heißleiter wärmer, und es ergibt sich ein niedriger Widerstand R_T . Wird hingegen die zugeführte Wärme schnell abgeführt (strömende Luft, Flüssigkeit), so kann der Heißleiter nicht so warm werden, und es ergibt sich ein höherer Widerstand R_T .

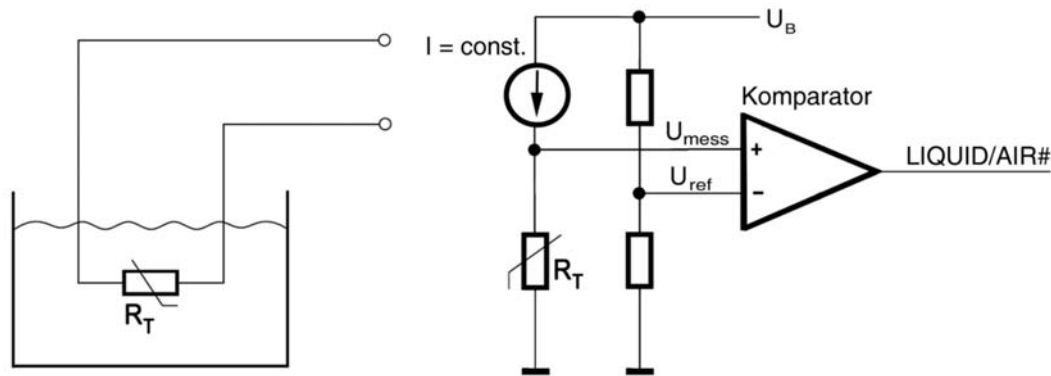


Abb. 1.85 Heißleiter als Sensor zur Erkennung eines Flüssigkeitspegels. Der Arbeitspunkt wird näherungsweise in den Scheitelpunkt der Strom-Spannungs-Strom-Kennlinie gelegt. Praxisbeispiel (vgl. Abb. 1.82): Es wird ein Strom von 5 mA eingespeist. In ruhender Luft ergibt sich ein Widerstandswert R_T von etwa 1,6 k Ω und somit ein Spannungsabfall U_{mess} von rund 8 V. In Wasser erhöht sich der Widerstandswert R_T auf etwa 3 k Ω . Hierdurch steigt der Spannungsabfall U_{mess} auf rund 15 V. Die Schaltung ist so zu dimensionieren, daß U_{mess} bei kaltem Heißleiter (in Flüssigkeit) größer und bei warmem Heißleiter (in Luft) kleiner ist als die Referenzspannung U_{ref} . In vielen Einsatzfällen kann die Konstantstromquelle durch einen Vorwiderstand ersetzt werden.

Zeitverzögerung

In diesem Anwendungsbereich nutzt man die Tatsache aus, daß die Eigenerwärmung und damit das Absinken des Widerstandswertes R_T Zeit kostet. Die typische Aufgabe: Es ist ein Ausgangsimpuls zu bilden, der gegenüber einem Eingangsimpuls mit einer bestimmten Zeitverzögerung Δt einschaltet. Die Lösung: Der Eingangsimpuls bewirkt, daß Strom durch den Heißleiter fließt – und zwar soviel, daß die Eigenerwärmung in Gang kommt. Infolgedessen sinkt allmählich sein Widerstandswert. Ist ein bestimmter Widerstandswert erreicht, wird der Ausgangsimpuls wirksam. Der Vorteil des Heißleiters liegt darin, daß mit geringem Aufwand große Zeitkonstanten (Millisekunden bis Sekunden) realisiert werden können. Der Heißleiter muß allerdings Gelegenheit haben, zwischen den aufeinanderfolgenden Erregungen wieder abzukühlen (Wiederbereitschaftszeit).

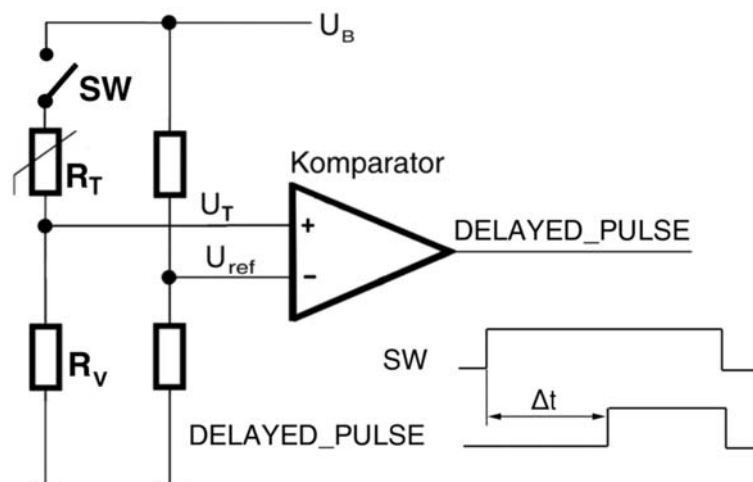


Abb. 1.86 Zeitverzögerung mittels Heißleiter (Prinzipdarstellung). Ist der Schalter SW geöffnet, so liegt der +-Eingang des Komparators auf Massepegel, und der Ausgang ist inaktiv. Wird der Schalter SW betätigt, so fließt Strom durch den Heißleiter. Da sich dessen Widerstand R_T allmählich verringert, steigt die Spannung U_T an. Sobald sie die Referenzspannung U_{ref} überschreitet, wird der Ausgang aktiv. Er wird wieder inaktiv, wenn SW geöffnet wird (nur Einschaltverzögerung; keine Ausschaltverzögerung). Der Schalter SW kann beispielsweise durch einen Relaiskontakt oder eine Transistorschaltstufe ersetzt werden.

Einschaltstrombegrenzung

Der kalte Heißleiter hat zunächst einen hohen Widerstand, der die Stärke des durchfließenden Stroms begrenzt. Die vom Stromfluß umgesetzte Verlustleistung $P = I^2 \cdot R_T$ heizt aber das Bauelement auf. Hierdurch nimmt R_T ab, der Strom nimmt weiter zu usw., bis ein stationärer Endzustand erreicht ist. Dieses Verhalten kann ausgenutzt werden, um Einschaltströme zu begrenzen. Für diesen Anwendungsfall werden eigens Heißleiter gefertigt, die sehr hohe Ströme aushalten (ICL = Inrush Current Limiter). Richtwerte: von einigen hundert mA bis zu etwa 30 A. Das Prinzip ist einfach – es genügt, den Heißleiter mit der stromaufnehmenden Einrichtung in Reihe zu schalten.

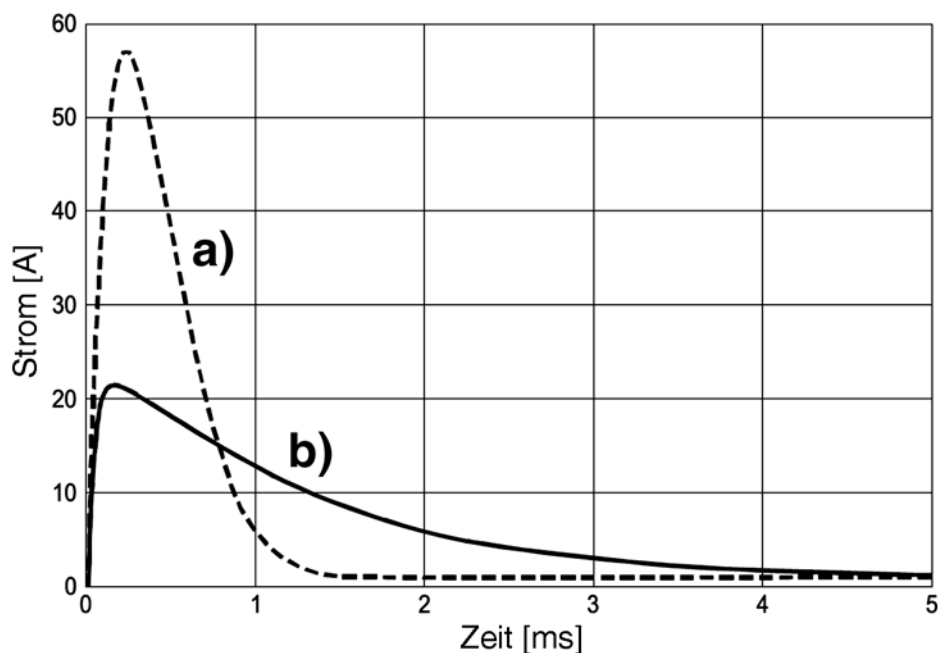


Abb. 1.87 Die Wirkung des Heißleiters als Einschaltstrombegrenzung (nach [1.27]). Viele Einrichtungen nehmen einen hohen Einschaltstrom auf. Durch Vorschalten eines Heißleiters kann die anfängliche Stromaufnahme zeitlich gestreckt und deren Amplitude beträchtlich vermindert werden. a) Stromspitze ohne Heißleiter; b) der Heißleiter begrenzt den Einschaltstrom.

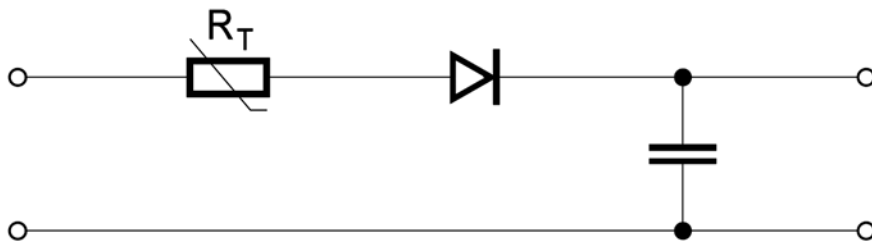


Abb. 1.88 Einsatzbeispiel der Einschaltstrombegrenzung (nach [1.27]). Beim Einschalten stellt der (ungeladene) Kondensator praktisch einen zeitweiligen Kurzschluß dar. Infolge der extremen Stromspitze (vgl. Abb. 1.93a) könnte die Diode Schaden nehmen. Ein vorgeschalteter Heißleiter begrenzt den Einschaltstrom auf einen ungefährlichen Wert (vgl. Abb. 1.93b).