

1.5 Kaltleiter (PTC-Widerstände)

1.5.1 Grundlagen

Kaltleiter sind temperaturabhängige Widerstandsbauelemente (Thermistoren) mit positivem Temperaturkoeffizienten (PTC = Positive Temperature Coefficient). Ihr Widerstand steigt mit zunehmender Temperatur. Sie bestehen aus dotierten keramischen Werkstoffen auf Grundlage von Bariumtitanat. Die typischen Bauformen entsprechen denen der Heißeiter; es gibt Perlen, Tropfen oder Scheiben, SMD-Bauformen, Gehäuse mit Montagevorkehrungen (z. B. Gewinde) usw.

Kaltleiter oder Heißeiter?

Beide Thermistorarten beruhen auf keramischen Werkstoffen, in denen komplexe Leitungsmechanismen wirksam sind. Sie verhalten sich aber nicht spiegelbildlich zueinander.

Leitungsmechanismus und Kennlinienverlauf

Der in einem Heißeiter vorherrschende Leitungsmechanismus hängt von der Materialzusammensetzung ab, bleibt aber über den gesamten Temperaturbereich gleich. Somit ergibt sich im gesamten Temperaturbereich eine mit steigender Temperatur fallende Widerstands-Temperatur-Kennlinie (vgl. Abb. 1.76), und es ist möglich, Bauelemente zu fertigen, die einen bestimmten Kennlinienverlauf mit geringen Abweichungen einhalten (Curve Tracking).

Im Kaltleiter kommen in Abhängigkeit von der Temperatur verschiedene Leitungsmechanismen zur Wirkung. Deshalb ergibt sich nur in einem Teil des gesamten Temperaturbereichs ein mit zunehmender Temperatur ansteigender Verlauf der Widerstands-Temperatur-Kennlinie (Abb. 1.97). Bei niedrigeren oder höheren Temperaturen weist die Kennlinie Abschnitte auf, die einen mit steigender Temperatur abfallenden Verlauf haben; der Temperaturkoeffizient ist also an beiden Enden des Temperaturbereichs negativ.

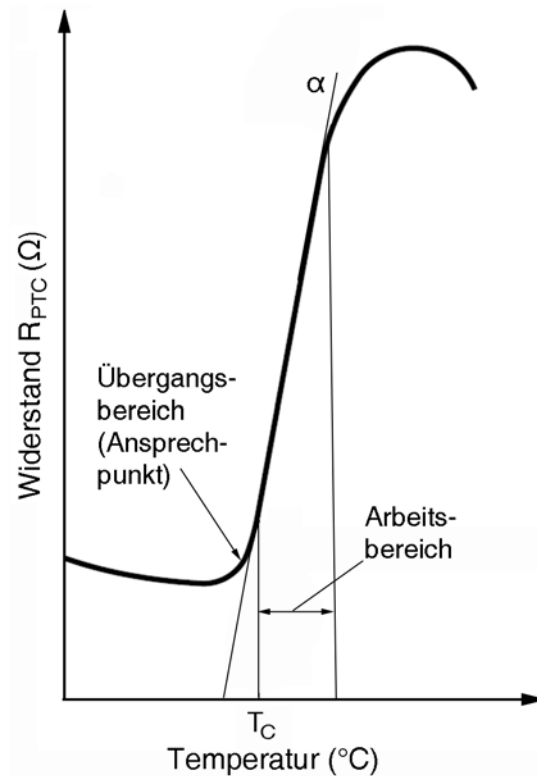


Abb. 1.97 Kaltleiter. Die Widerstands-Temperatur-Kennlinie im Überblick. Die Temperaturachse ist linear, die Widerstandsachse logarithmisch geteilt. T_C - ferroelektrische Curie-Temperatur. Ab hier beginnt der (näherungsweise) exponentielle Anstieg des Widerstandes (der in der logarithmischen Darstellung zur Geraden wird). α - Temperaturkoeffizient.

Der Kaltleiter besteht aus kleinsten Kristallelementen, die an ihren Grenzen Sperrschichten (Potentialwälle) bilden. Unterhalb der Curie-Temperatur ist die Dielektrizitätskonstante hoch, und die Sperrpotentiale sind gering. Die freien Elektronen haben nur geringen Widerstand zu überwinden; das Bauelement ist niederohmig. Wird die Curie-Temperatur überschritten, so sinkt die Dielektrizitätskonstante, und die Sperrpotentiale steigen an. Infolgedessen wächst auch der Widerstand des Bauelements. Mit zunehmender Erwärmung werden schließlich weitere Ladungsträger freigesetzt (thermische Aktivierung), so daß der Widerstand mit weiter steigender Temperatur wieder abnimmt. Vom gesamten Kennlinienverlauf werden vor allem zwei Bereiche ausgenutzt:

- der Bereich des steilen Anstiegs (Arbeitsbereich). Dieser Bereich ist vor allem für Anwendungen von Bedeutung, die auf der Temperaturmessung beruhen, denn nur hier ist eine gewisse Genauigkeit zu erwarten.
- der Bereich des Übergangs zwischen geringen Widerstandswerten und dem steilen Anstieg. Anwendungsbeispiele: Übertemperaturerkennung, Überlastungsschutz, Überstrom- und Übertemperatursicherung. In solchen Anwendungen wird ein möglichst schlagartiges Umschalten zwischen nieder- und hochohmigem Widerstand gewünscht (Schwellwertverhalten), das möglichst bei einem einzigen Temperaturwert stattfinden soll (Ansprechpunkt, Trip Point).

Temperaturkoeffizient und Anstieg der Widerstands-Temperatur-Kennlinie

Kaltleiter können mit wesentlich größeren Temperaturkoeffizienten oder (was das gleiche bedeutet) steilerem Anstieg des Kennlinienverlaufs* gefertigt werden als Heißeiter. Richtwerte: Heißeiter - 2 %/°C bis - 6 %/°C, Kaltleiter 10 %/°C bis über 30 %/°C (im steilsten Bereich des Kennlinienverlaufs).

Als Temperatursensor ist der Heißeiter präziser, der Kaltleiter hingegen empfindlicher.

*: Hier ist nur vom Betrag die Rede.

Der Bereich der Nennwiderstandswerte ist vergleichsweise klein. Richtwerte: wenige Ω bis wenige $k\Omega$.

Spannungs- und Frequenzabhängigkeit

Der Kaltleiter ist beiden Einflüssen unterworfen. Der Widerstand hängt in einem solchen Maße von der Frequenz ab, daß Kaltleiter praktisch nur für Gleichspannung oder im Frequenzbereich der Netzwechselfrequenz einsetzbar sind.

Kaltleiter sind eher was fürs Grobe

Durch Einsatz solcher Bauelemente ist es oftmals möglich, in Temperaturüberwachungsschaltungen und Übertemperatur-Schutzschaltungen auf Operationsverstärker, Komparatoren, Stellglieder usw. zu verzichten. In vielen Einsatzfällen kann der Kaltleiter direkt in den zu schützenden Stromweg eingebaut werden.

Der Kaltleiter als Temperaturfühler

Ist die Umgebungstemperatur zu messen oder innerhalb enger Toleranzbereiche zu überwachen, so entsprechen Einsatzbedingungen und Anwendungsschaltungen im Grunde denen des Heißeiters. Bei hohen Anforderungen an die Genauigkeit kommt nur ein Heißeiter in Betracht. Ansonsten ist es eine Ermessens- oder Preisfrage (Kaltleiter sind oftmals kostengünstiger). Viele Anwendungsfälle der Temperaturüberwachung laufen auf ein pauschales Unterscheiden zwischen den Zuständen "normal" und "zu warm/zu kalt" hinaus, wobei es auf Genauigkeit nicht besonders ankommt. Hierfür werden eigens Typenreihen von Kaltleitern angeboten, die auf ein entsprechendes Schwellwertverhalten hin ausgelegt sind (Overtemperature Protection, Limit Temperature Sensors o. ä.).

Ausnutzung der Eigenerwärmung

Fließt Strom durch den Kaltleiter, so heizt er sich auf. Dadurch steigt sein Widerstand. Dieses Verhalten kann u. a. zu Zwecken der Überstrombegrenzung und Zeitverzögerung ausgenutzt werden. Weitere Anwendungsbereiche: das Durchschalten kurzzeitiger Stromimpulse (z. B. zum Entmagnetisieren von Farbbildröhren oder zum Anlassen von Induktionsmotoren) sowie die Nutzung als Wärmequelle (Heizelement).

Der von außen erwärmte Kaltleiter

Daß mit zunehmender Temperatur der Widerstand ansteigt, kann zu Schutzzwecken ausgenutzt werden. Entsprechende Bauelemente werden z. B. in den Wicklungen von Transformatoren oder Motoren angeordnet. Sie bewirken, daß bei zu starker Erwärmung der Stromfluß verringert oder daß die gefährdete Einrichtung abgeschaltet wird.

Typische Vorteile der Kaltleiter:

- kostengünstig (Fertigung erfordert keine Halbleitertechnologien),
- kleine Bauformen möglich,
- für viele Anwendungen ausreichender Bereich der Nennwerte,
- extreme Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes (zwischen 3 %/°C bis zu etwa 30 %/°C).

Richtwerte im Überblick:

- Widerstandsbereich: 1 Ω ...10 k Ω ,
- Verlustleistung: einige mW...mehrere W,
- Temperaturbereich: - 50... + 170 °C (Sensoranwendungen); als Schalt- oder Heizelemente bis 300 °C,
- Toleranzen (bezogen auf R_{25}): +- 1...20 %.

Kaltleiter einsetzen

Die Zusammenhänge sind komplex und rechnerisch nur näherungsweise zu erfassen. Deshalb kommt man nicht ohne Experimente aus.

Auswahl der Bauform.

Es kommt – wie beim Heißleiter – auf den Einsatzfall an. Typische Beispiele:

- Temperaturmessung, Temperaturüberwachung. Der Kaltleiter muß innigen Wärmekontakt mit den jeweiligen Einrichtungen haben. Er wird z. B. in einen Kühlkörper eingeschraubt, in eine Spulenwicklung eingebunden oder in SMD-Ausführung unmittelbar neben dem Bauelement angeordnet, dessen Temperatur überwacht werden soll.
- Zeitverzögerung. Diese Wirkungen hängen nur von der Eigenerwärmung ab. Der Kaltleiter sollte deshalb von seiner Umgebung nach Möglichkeit gar nicht beeinflusst werden.
- Überstromsicherung oder direktwirkende Schalter (zum anfänglichen Durchschalten von Stromimpulsen). Hier wird der Kaltleiter selbst richtig warm. Es muß für Wärmeabfuhr gesorgt werden. Manchmal ist die Umgebung vor übermäßiger Wärmeabgabe zu schützen (an der richtigen Stelle auf der Leiterplatte oder im Gerät anordnen, hinreichend Platz zu temperaturempfindlichen Schaltungsteilen lassen usw.).

- Wärmequelle (Heizelement). Der Kaltleiter kann sehr warm werden (Richtwert: bis zu 300 °C). Die Wärme muß schnell an die Umgebung abgegeben werden. Entsprechende Bauelemente sind deshalb besonders dünn ausgeführt. Sie haben keine Lötanschlüsse, sondern metallisierte Oberflächen, die über Klemmverbindungen kontaktiert werden.

1.5.2 Kennwerte

Nennwiderstandswert

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

Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

Sie wird typischerweise anhand der Kennlinie dargestellt und mit einigen Angaben beschrieben, die auffallende Punkte im Kennlinienverlauf betreffen (Abb. 1.98).

Anfangstemperatur und Minimalwiderstand

Die Anfangstemperatur (Minimum Temperature T_{\min}) ist die Temperatur, an der der Temperaturbereich mit positivem Temperaturkoeffizienten beginnt. Der zugehörige Widerstandswert ist der Anfangs- oder Minimalwiderstand (Minimum Resistance R_{\min}). Bis zum Erreichen der Anfangstemperatur bleibt der Widerstand nahezu konstant. Dann steigt er mit zunehmender Temperatur an (vgl. Abb. 1.98).

Bezugstemperatur und Bezugswiderstand

Die Bezugstemperatur (Reference Temperature T_{ref}) ist die Temperatur, an der der steile Anstieg der Kennline beginnt (vgl. Abb. 1.98). Der zugehörige Widerstandswert ist der Bezugswiderstand (Reference Resistance R_{ref}). T_{ref} entspricht näherungsweise der ferroelektrischen Curie-Temperatur des Widerstandsmaterials.

Definition der Bezugstemperatur: T_{ref} ist die Temperatur, die in der Kennlinie einem Bezugswiderstand $R_{\text{ref}} = 2 R_{\min}$ entspricht.

Nennansprechtemperatur

Das ist eine andere Bezeichnung der Bezugstemperatur (Nennansprechtemperatur T_{NAT} ; Nominal Threshold Temperature T_{NTT} mit zugehörigem Widerstandswert R_{NTT}). T_{NTT} und R_{NTT} sind typische Datenblattangaben für Kaltleiter, die als Temperaturfühler zu Überwachungszwecken vorgesehen sind. Sie stehen dort anstelle der Werte T_{ref} und R_{ref} . R_{NTT} ist ein Widerstandswert im steil ansteigenden Bereich der Kennlinie; T_{NTT} ist die zugehörige Temperatur. Die Widerstandsangabe gilt typischerweise für eine Temperaturtoleranz von +5 °C. Manche Datenblätter enthalten zudem Widerstandswerte, die sich in der Umgebung der Nennansprechtemperatur einstellen (z. B. bei $T_{\text{NTT}} - 5$ °C, $T_{\text{NTT}} + 5$ °C und $T_{\text{NTT}} + 15$ °C). Diese Widerstandsangaben können genutzt werden, um Temperaturüberwachungsschaltungen zu dimensionieren, die auf das Über- oder Unterschreiten der Nenntemperschwelle reagieren.

Endwiderstand und Endtemperatur

Der Endwiderstand (R_E) ist der größte Widerstandswert, der als Kennwert angegeben ist. Es handelt sich um einen Minimalwert, der besagt, daß bei einer Umgebungstemperatur T_E das Bauelement einen Widerstand von wenigsten R_E Ohm hat. Die Endtemperatur (T_E) ist die zugehörige Temperaturangabe. Das Wertepaar T_E, R_E gibt an, wo der steil ansteigende Bereich der Kennlinie zu Ende ist. Der Arbeitsbereich – also der Bereich des steilen Anstiegs – liegt zwischen Bezugstemperatur und Endtemperatur.

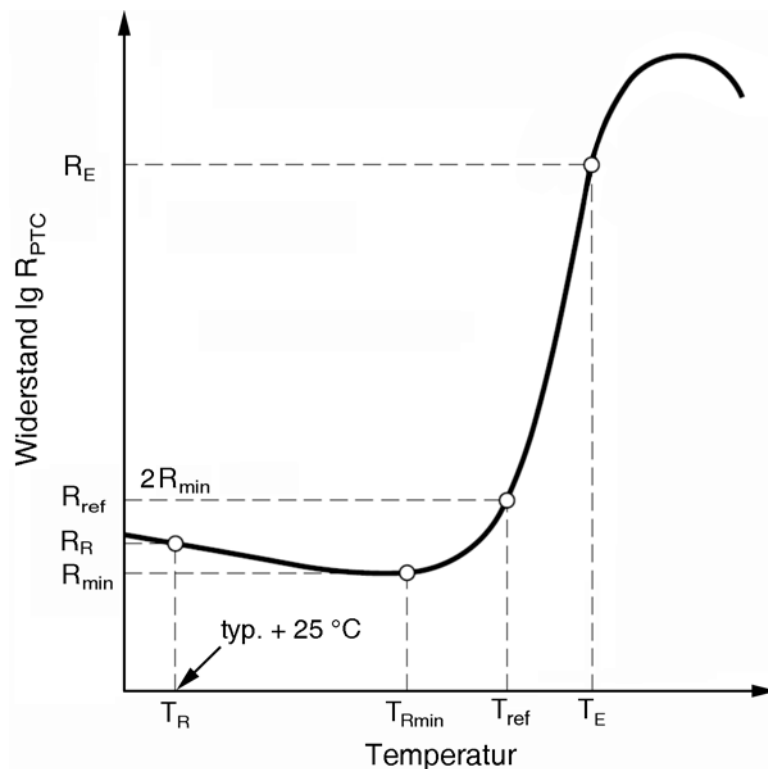


Abb. 1.98 Elementare Widerstands- und Temperaturkennwerte in der Widerstands-Temperatur-Kennlinie. T_R, R_R - Nenntemperatur und Nennwiderstand; T_{Rmin} und R_{min} - Anfangstemperatur und Anfangswiderstand (Minimalwiderstand); T_{ref}, R_{ref} - Bezugstemperatur und Bezugswiderstand; T_E, R_E Endtemperatur und Endwiderstand. T_R und R_{ref} sind Definitionssache (+ 25 °C, $2 R_{min}$); alle anderen Werte ergeben sich aus der Kennlinie.

Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient (α , TC, TCR) wird typischerweise in Prozent je Temperaturgrad angegeben (%/K oder %/°C). Er wird folgendermaßen definiert:

$$TC = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \cdot 100\% = \frac{d \ln R}{dT} \cdot 100\% \quad (1.108)$$

Richtwerte: 10...30 %/K (Dünnschicht-Präzisionstypen z. B. 0,3 %/K = 3000 ppm/K).

Im steilen Bereich der Widerstands-Temperatur-Kennlinie kann er als nahezu konstant angenommen werden. Er ergibt sich dann aus den Widerstands- und Temperaturwerten (R_1 , T_1 ; R_2 , T_2) zweier Punkte des Kennlinienverlaufs:

$$TC = \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{T_2 - T_1} \quad (1.109)$$

Auf Grundlage von (1.109) kann der Temperaturkoeffizient meßtechnisch ermittelt werden (Messung der Widerstandswerte R_1 , R_2 bei zwei verschiedenen Temperaturen T_1 , T_2).

Der Widerstand R_2 bei einer gegebenen Temperatur T_2 ergibt sich zu:

$$R_2 = R_1 \cdot e^{TC \cdot (T_2 - T_1)} \quad (1.110)$$

T_2 ist beispielsweise eine zu überwachende Temperaturgrenze; R_1 und T_1 sind Datenblattwerte (z. B. T_{ref} und R_{ref} oder T_{NTT} und R_{NTT}).

Durch Umstellen von (1.109) oder (1.110) kann man die Temperatur T_2 aus einem gemessenen Widerstandswert R_2 und Datenblattwerten für R_1 und T_1 (s. vorstehend) berechnen:

$$T_2 = \frac{1}{TC} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} + T_1 \quad (1.111)$$

Maximal zulässige Betriebstemperatur

Dies ist die höchste Oberflächentemperatur (Surface Temperature T_{surf}), die das Bauelement unter stationären Bedingungen (= im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung) annehmen darf. Die Datenblattangaben gelten typischerweise für eine Umgebungstemperatur von + 25 °C.

Betriebstemperaturbereich

In diesem Temperaturbereich (Operating Temperature Range) darf das Bauelement eingesetzt werden. Manche Datenblätter enthalten einschränkende Angaben zum Betrieb mit höheren Spannungen. Beispiel: - 25 ... + 125 °C bei 0 V, aber nur 0...40 °C bei Anliegen der maximalen Betriebsspannung V_{max} .

Belastbarkeit

Die Belastbarkeitsangabe (Nennverlustleistung, Power Dissipation, Power Rating P) betrifft die maximal zulässige Verlustleistung bei der jeweils angegebenen Bezugstemperatur T, wobei die Oberflächentemperatur die maximal zulässige Betriebstemperatur nicht überschreiten darf. Belastbarkeitsangaben im Datenblatt betreffen typischerweise eine Bezugstemperatur von + 25 °C (P₂₅). Bei beliebiger Temperatur T gilt:

$$P_{\text{PTC}} = I^2 \cdot R_{\text{PTC}} = \frac{U^2}{R_{\text{PTC}}} \quad (1.112)$$

Viele Datenblätter enthalten keine Belastbarkeitsangaben, da es in den jeweiligen Einsatzbereichen vor allem auf die Spannungs- und Stromkennwerte ankommt. Bei Betrieb innerhalb der entsprechenden Grenzen wird auch die zulässige Verlustleistung nicht überschritten (Erwärmung und Verlustleistung wirken einander entgegen).

Kontrollrechnung: Die maximal zulässigen Strom-, Spannungs- und Leistungswerte dürfen nicht überschritten werden. Bei bekannter Belastbarkeit ergeben sich die maximal zulässigen Strom- und Spannungswerte aus dem Widerstandswert im jeweiligen Betriebsfall:

$$U_{\text{max}} \leq \sqrt{P_{\text{PTC}} \cdot R_{\text{PTC}}} ; I_{\text{max}} \leq \sqrt{\frac{P_{\text{PTC}}}{R_{\text{PTC}}}} \quad (1.113)$$

Der Schaltungsdimensionierung ist der jeweils kleinere der Maximalwerte (Datenblattangaben oder Ergebnisse gemäß (1.113)) zugrunde zu legen.

Nennspannung

Die Nennspannung (Rated Voltage V_R) ist die maximale Betriebsspannung, für die das Bauelement vorgesehen ist. Richtwerte: 12... > 300 V.

Maximale Betriebsspannung

Die maximale Betriebsspannung (Maximum Operating Voltage V_{max}) ist die höchste Spannung, die ständig am Bauelement anliegen darf. Die Angabe gilt nur für die jeweils spezifizierte Umgebungstemperatur T_A bei Betrieb im steil ansteigenden Bereich der Kennlinie (stationärer hochohmiger Zustand). Beispiel: 30 V. Richtwert (wenn V_{max} nicht angegeben): V_{max} = Nennspannung V_R + 15 V bei einer Umgebungstemperatur T_A von + 40 bis 60 °C (Bauelement in ruhender Luft).

Durchbruchspannung

Die Durchbruchspannung (Breakdown Voltage V_{BD}) ist die höchste Spannung, die das Bauelement aushalten kann. Wird die Spannung über diesen Wert hinaus erhöht, verliert es seine funktionellen Eigenschaften und kann ggf. zerstört werden.

Maximale Meßspannung

Die maximale Meßspannung (Maximum Measuring Voltage $V_{\text{meas,max}}$) ist die höchste Spannung, die am Bauelement anliegen darf, wenn es als Temperaturfühler eingesetzt wird. Beispiel: 7,5 V. Liegt eine höhere Spannung an, werden die Fehler durch Eigenerwärmung und Feldstärkeabhängigkeit zu groß.

Isolations-Prüfspannung

Die Isolations-Prüfspannung (Insulation Test Voltage V_{ins}) ist die höchste Spannung zwischen dem Körper des Bauelements und seiner Umhüllung, bei der – unter Prüfbedingungen – keine Durchbrucherscheinungen auftreten. Die Prüfspannung wird typischerweise 5 s lang angelegt.

1.5.3 Der unbelastete Kaltleiter

Ein Kaltleiter ist dann unbelastet, wenn nur sehr geringe Ströme fließen und somit praktisch keine Eigenerwärmung auftritt (Nullastwiderstand). Beim Einsatz von Kaltleitern als Temperaturfühler sind aber weitere Effekte zu beachten; der Widerstand ist sowohl spannungs- als auch frequenzabhängig. Viele Typen sind nicht für genauere Messungen, sondern lediglich dazu vorgesehen, das Über- oder Unterschreiten eines Grenzwertes zu überwachen (Overtemperature Protection, Limit Temperature Sensors). Abb. 1.99 und 1.100 veranschaulichen einschlägige Widerstands-Temperatur-Kennlinien. Solche Bauelemente sind gemäß der zu überwachenden Temperatur auszuwählen (Nennansprechtemperatur T_{NTT}). Die Datenblätter enthalten Angaben zu Widerstandswerten bei bestimmten Temperaturen. Drei Werte sind üblich:

- $T_{\text{NTT}} - 5 \text{ °C}$. Der angegebene maximale Widerstandswert wird typischerweise unterschritten.
- $T_{\text{NTT}} + 5 \text{ °C}$. Der angegebene minimale Widerstandswert wird typischerweise überschritten.
- $T_{\text{NTT}} + 15 \text{ °C}$. Der angegebene minimale Widerstandswert wird typischerweise überschritten.

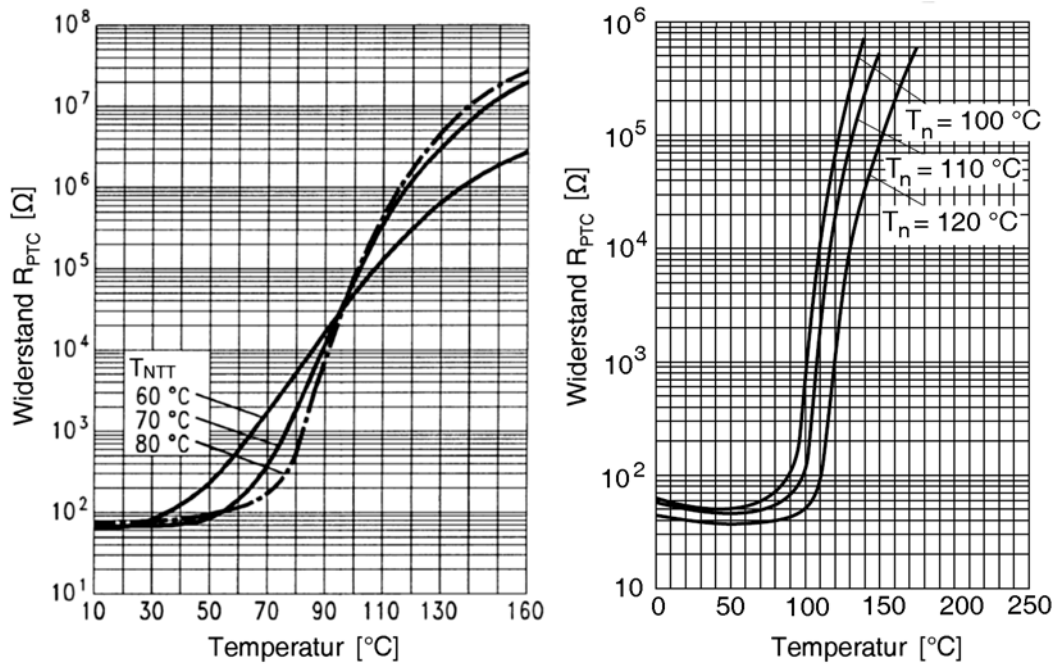


Abb. 1.99 Widerstands-Temperatur-Kennlinien von Temperaturfühlern mit verschiedenen Nennansprechtemperaturen (nach [1.30]).

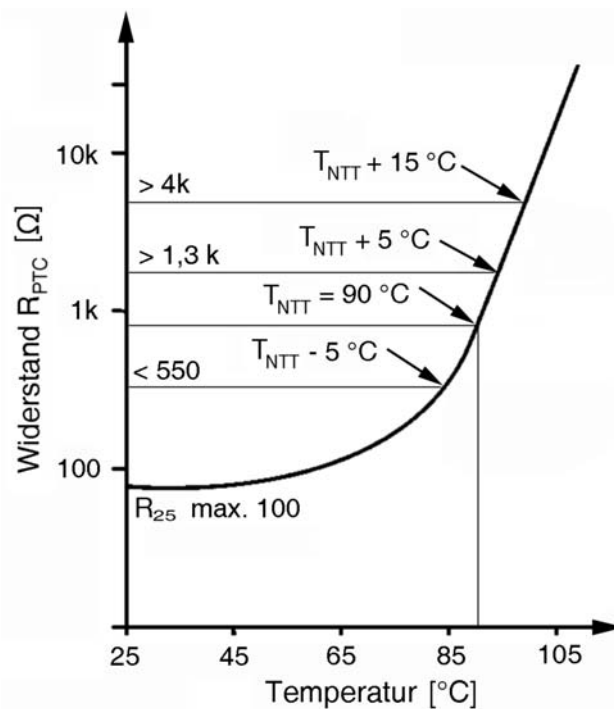


Abb. 1.100 Einzelheiten der Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines Kaltleiters für die Übertemperaturkontrolle. Die Widerstandsangaben zu den Temperaturwerten stehen im Datenblatt. Ablesebeispiel: $T_{NTT} = 90 \text{ °C}$. Widerstand bei 85 °C : $< 550 \text{ } \Omega$, bei 95 °C : $> 1,3 \text{ k}\Omega$, bei 105 °C : $> 4 \text{ k}\Omega$. Solche Werte gelten typischerweise für ganze Baureihen mit abgestuften Nennansprechtemperaturen, z. B. von 70 bis 150 °C in Stufen zu 5 oder 10 °C .

Der Widerstand des Kaltleiters ist spannungsabhängig

Je höher die Spannung, desto höher die Feldstärke an den Grenzen zwischen den Kristallelementen, aus denen das Bauelement besteht. Sie wirkt den Sperrpotentialen entgegen, so daß sich der Widerstand verringert (Varistoreffekt).

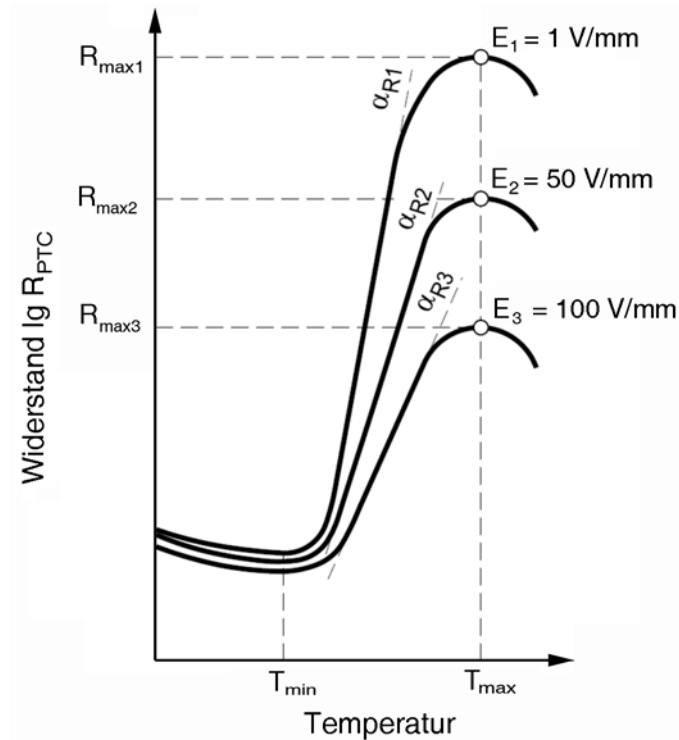


Abb. 1.101 Der Widerstand des Kaltleiters in Abhängigkeit von der Temperatur und der elektrischen Feldstärke E (nach [1.31]). Mit zunehmender Feldstärke verringert sich der Widerstand (Varistoreffekt).

Der Widerstand des Kaltleiters ist frequenzabhängig

Das liegt an den Sperrschichten. Sie bewirken, daß die Körnchen (Kristallelemente) nicht nur kleine ohmsche Widerstände darstellen, sondern auch kapazitiv miteinander verkoppelt sind.

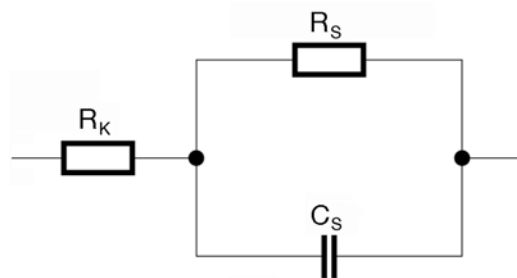


Abb. 1.102 Das Wechelspannungs-Ersatzschaltbild des Kaltleiters (nach [1.31]). R_x - Widerstand der Kristallelemente; R_s - ohmscher Widerstand der Sperrschichten; C_s - Sperrschichtkapazität.

Infolge der zum ohmschen Widerstand R_s parallel wirkenden Sperrschichtkapazität C_s muß sich der Widerstand des Bauelements mit zunehmender Frequenz verringern. Bereits vergleichsweise niedrige Frequenzen (z. B. im Audiodbereich) haben einen beachtlichen Einfluß (Abb. 1.104). Kaltleiter eignen sich somit nur für Gleichspannung und für Wechelspannungen mit Frequenzen in der Größenordnung der Netzfrequenz.

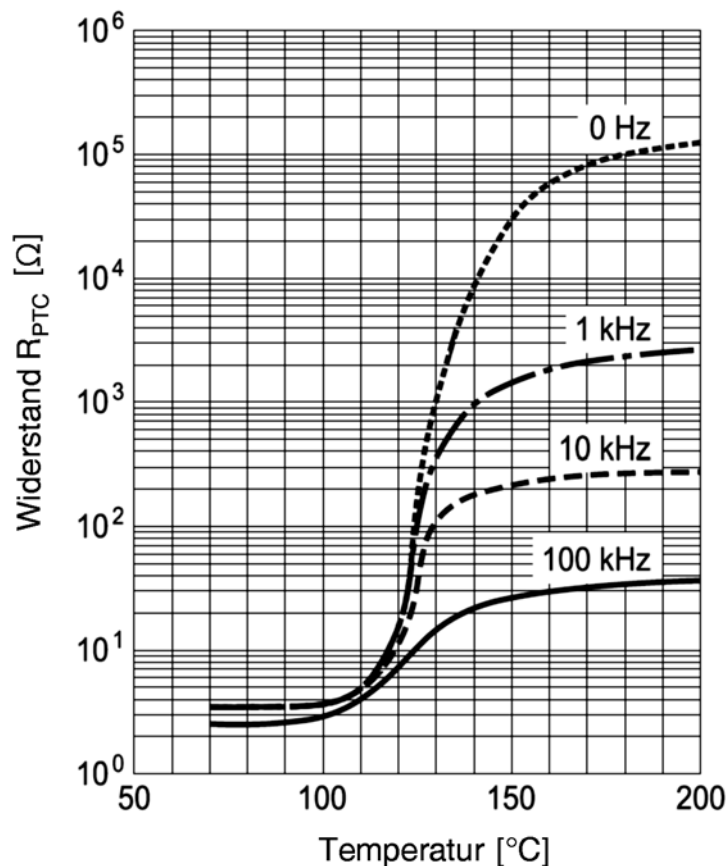


Abb. 1.103 Der Widerstand des Kaltleiters in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz (nach [1.31]). Mit zunehmender Frequenz verringert sich der Widerstand.

1.5.4 Der stromdurchflossene Kaltleiter

Wird an den Kaltleiter eine hinreichend hohe Spannung angelegt, so kommt ein Stromfluß zustande, der ausreicht, das Bauelement zu erwärmen (Eigenerwärmung). Mit zunehmender Temperatur wächst jedoch der Widerstand, so daß der Stromfluß bei weiter steigender Spannung wieder abnimmt. Schließlich wird ein stationärer Zustand erreicht, in dem die zugeführte Leistung über Wärmeleitung und Wärmestrahlung an die Umgebung abgegeben wird.

1.5.5 Zur Anwendungspraxis

Temperaturfühler

Die Eigenerwärmung und der Einfluß der elektrischen Feldstärke (Varistoreffekt) müssen vernachlässigbar klein sein. Richtwert: elektrische Feldstärke ca. 1 V/mm. Aus dieser Forderung ergeben sich Meßspannungen um 1,5 V. Typische maximale Meßspannungen (Datenblattwerte) liegen bei etwa 7 V. Solche höheren Werte können dann ausgenutzt werden, wenn es nicht auf absolute Genauigkeit ankommt (Temperaturüberwachung).

Temperaturmessung

Die Temperatur ergibt sich aus dem aktuellen Widerstandswert R_{PTC} des Kaltleiters – es ist im Grunde das gleiche Problem wie beim Heißleiter. Die typische Grundschialtung ist der Spannungsteiler, wobei der Spannungsabfall über dem Kaltleiter ausgewertet wird. Er wird entweder entsprechend verstärkt* (kontinuierliche Temperaturmessung) oder mit einer Referenzspannung verglichen (Überwachung eines beliebig einstellbaren Temperaturwertes). Linearisierung ist nicht erforderlich. Für höhere Anforderungen sind Kaltleiter mit entsprechend linearisiertem Verlauf der Widerstands-Temperatur-Kennlinie verfügbar.

*: Z. B. auf einen Spannungshub, der dem Eingangsspannungsbereich eines nachgeschalteten Analog-Digital-Wandlers entspricht.

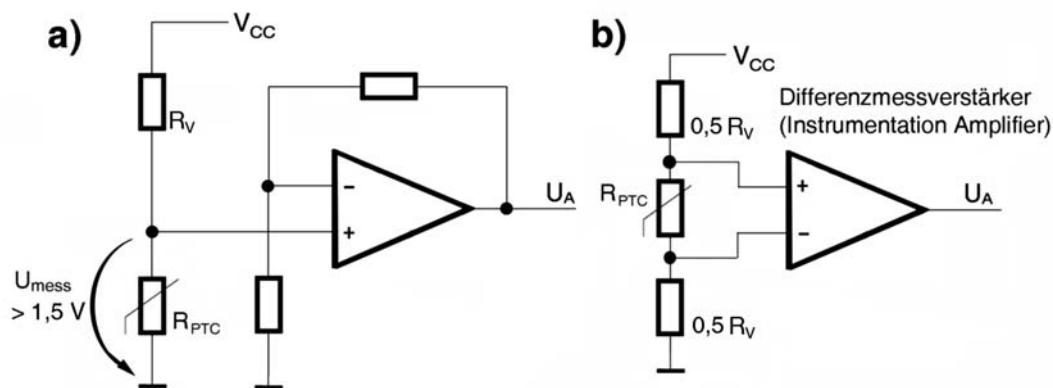


Abb. 1.104 Kaltleiter-Meßschaltungen. a) Messung der über dem Kaltleiter abfallenden Spannung. b) bei Betrieb mit nur einer Speisespannung (Single Rail) können Meßspannungen, die nur wenig höher sind als das Massepotential, nicht mehr korrekt verstärkt werden. Deshalb Messung des Spannungsabfalls als Differenzspannungsmessung deutlich oberhalb des Massepegels.

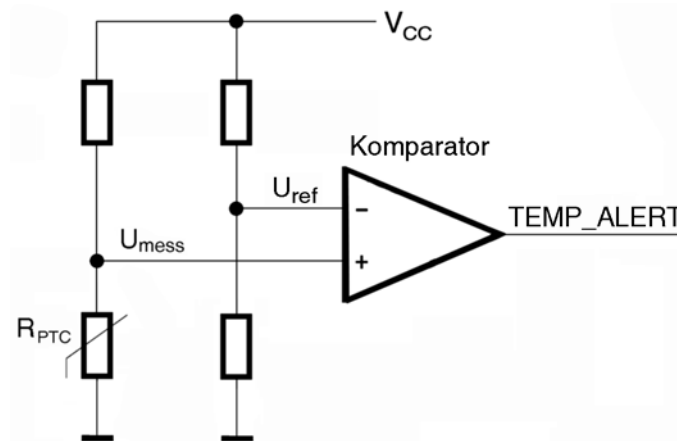


Abb. 1.105 Temperaturüberwachung (Prinzipialschaltung). Übersteigt die über dem Kaltleiter abfallende Meßspannung die Referenzspannung, wird der Komparatorausgang aktiv.

Pauschale Temperaturüberwachung

Hierzu gibt es besondere Kaltleitertypen (Overtemperature Protection, Limit Temperature Sensors o. ä.). Die Prinzipschaltung entspricht Abb. 1.105. Die Temperaturschwelle wird aber nicht durch Einstellen einer Referenzspannung, sondern durch Auswahl des Bauelements bestimmt (typischerweise kann die Dimensionierung der Schaltung für eine ganze Baureihe von Kaltleitern gleich bleiben).

In vielen Anwendungsfällen ist ein Komparator gar nicht erforderlich. Manchmal genügen einfache Transistor-Schaltstufen. Oftmals ist es sogar möglich, den Kaltleiter direktwirkend in die vor zu hoher Temperatur zu schützende Schaltung einzubauen – manche Bauelemente sind eigens für solche "rohe" Anwendungsfälle vorgesehen.

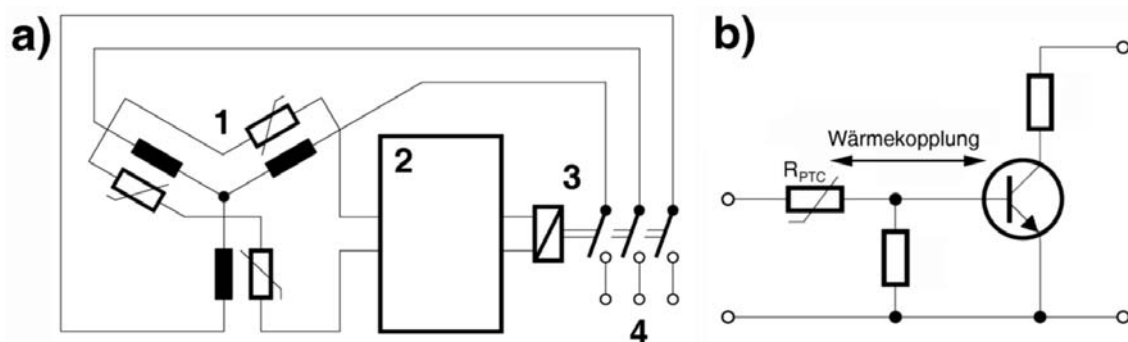


Abb. 1.106 Temperaturüberwachungsbeispiele (nach [1.32]). a) die Temperaturfühler befinden sich in den Wicklungen eines Drehstrommotors. 1 - Kaltleiter; 2 - Steuergerät; 3 - Schaltschütz; 4 - Speisespannungszuführung. Die Temperatúrauswertung im Steuergerät ist z. B. gemäß Abb.

1.108 ausgelegt (spricht der Komparator an, wird die Spannungsversorgung aufgetrennt). b) Schutz einer Leistungsstufe gegen Übertemperatur. Der Kaltleiter muß mit dem Leistungstransistor thermisch gekoppelt sein, z. B. durch Einschrauben in den Kühlkörper – es gibt eigens entsprechende Bauformen (vgl. Abb. 1.77). Mit steigender Temperatur wächst der Widerstand des Kaltleiters, so daß sich der Basisstrom verringert.

Kaltleiter in Reihe schalten

Der Grundgedanke: es genügt, daß einer der Kaltleiter hochohmig wird, um die ganze Reihe als hochohmig erscheinen zu lassen (vgl. Abb. 1.106a). Das entspricht einer ODER-Verknüpfung von Temperaturüberwachungssensoren.

Fühler für Flüssigkeitspegel

Dieses Anwendungsgebiet beruht darauf, daß der Verlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie von den Eigenschaften des umgebenden Mediums abhängt. Hierzu muß der Kaltleiter im Bereich der Eigenerwärmung betrieben werden. Richtwerte: Betriebsspannung um 10...12 V, elektrische Feldstärke zwischen 6 bis 30 V/mm. Unter solchen Betriebsbedingungen ist die aufgenommene Leistung nahezu spannungsunabhängig, so daß an der Stromaufnahme erkennbar ist, ob sich das Bauelement in einem Medium befindet, das die Wärme schneller (Flüssigkeit) oder langsamer abführt (Luft)*. Es gibt eigens hermetisch verkapselte Ausführungen für solche Einsatzfälle.

*: Auf gleiche Weise kann man erkennen, ob sich der Kaltleiter in einem ruhenden oder einem strömenden Medium befindet.

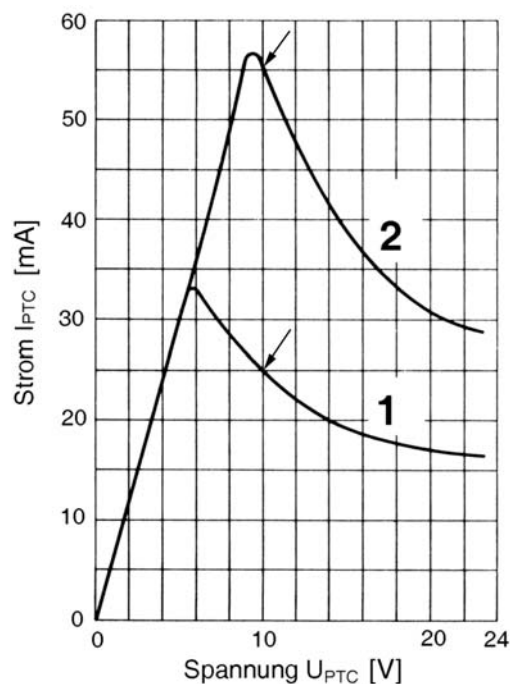


Abb. 1.107 Beispiel einer Strom-Spannungs-Kennlinie bei Einsatz als Fühler für Flüssigkeitspegel (nach [1.24]). 1 - Kaltleiter in Luft; 2 - Kaltleiter in Öl. Unter den gewählten Betriebsbedingungen wird der hier interessierende Abschnitt der Kennlinie zu einer Verlustleistungshyperbel (nahezu konstante Verlustleistung bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen). Bei einer Spannung von etwa 10 V ergeben sich gut auswertbare Unterschiede der Stromstärke (25 mA in Luft, 55 mA in Öl).

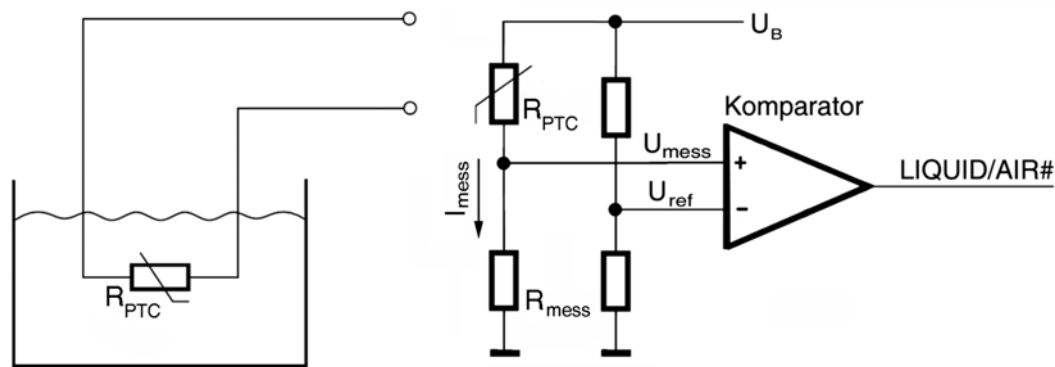


Abb. 1.108 Kaltleiter als Sensor zur Erkennung eines Flüssigkeitspegels. Der durch den Kaltleiter fließende Strom bewirkt einen Spannungsabfall über einem niederohmigen Meßwiderstand ($R_{\text{mess}} \ll R_{\text{PTC}}$). Wird nur wenig Wärme abgeleitet (in Luft), so ist der Meßstrom gering. Bei intensiver Wärmeableitung (in Flüssigkeit) steigt der Meßstrom an. Die Schaltung ist so zu dimensionieren, daß U_{mess} bei warmem Kaltleiter (Luft) niedriger und bei kaltem Kaltleiter (Flüssigkeit) höher ist als die Referenzspannung U_{ref} .

Der Kaltleiter als Schutzbeschaltung

In dieser Funktion soll er Stromflüsse unterbrechen (Überstromsicherung) oder wenigstens abschwächen (Strombegrenzung). Hierzu kann sowohl die Eigen- als auch die Fremderwärmung ausgenutzt werden. Der Kaltleiter wird im zu schützenden Stromkreis mit der Last in Reihe geschaltet.

Eigenerwärmung

Ein zu starker Strom erwärmt den Kaltleiter soweit, daß er in den hochohmigen Bereich gelangt und somit den Stromfluß begrenzt. Für solche Anwendungen optimierte Bauelemente können bei entsprechender Erwärmung den Stromfluß praktisch vollständig unterbinden. Sie wirken somit als Sicherungen (die sich – wenn die Überlast verschwunden ist – durch Abkühlen selbst zurückstellen).

Überspannungsschutz

Eine zu hohe Spannung führt zu einem anfänglich starken Stromfluß, der das Bauelement erwärmt. Hierdurch erhöht sich der Widerstand, so daß die an einem Ende anliegende Spannung am anderen nicht mehr schaden kann. Beispiel: Schutz der Anschlüsse von Meß- oder Telekommunikationsgeräten gegen irrtümliches Anlegen von Netzspannung.

Fremderwärmung

Wird die zu überwachende Einrichtung zu heiß, so wächst der Widerstand des Kaltleiters bis in den hochohmigen Bereich hinein und begrenzt somit den Stromfluß. Der Kaltleiter muß hierzu in engem Wärmekontakt mit der zu überwachenden /zu schützenden Einrichtung stehen. Entsprechende Bauformen lassen sich in Wicklungen von Transformatoren oder Motoren einbinden, an Kühlkörper anschrauben usw.

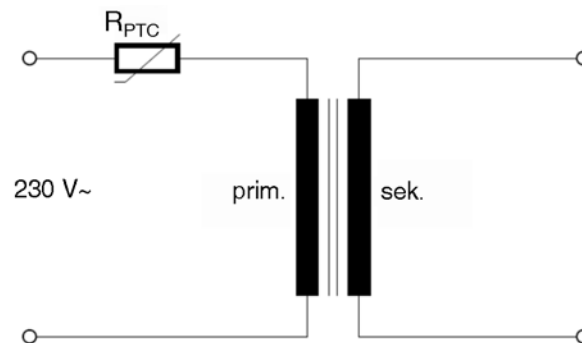


Abb. 1.109 Schutz eines Transformators (nach [1.32]). Der Kaltleiter ist am Kern befestigt oder in die Wicklung eingearbeitet. Bei übermäßiger Erwärmung wird der Stromfluß verringert (Strombegrenzung), gleichgültig ob sie durch Erwärmung des Trafos (sekundärseitige Überlastung, Windungsschluß) oder durch einen zu starken Primärstrom (primärseitiger Kurzschluß) bewirkt worden ist.

Zeitverzögerung

In diesem Anwendungsbereich nutzt man die Tatsache aus, daß die Eigenerwärmung und damit die Zunahme des Widerstandswertes R_{PTC} Zeit kostet. Hierbei ist zwischen indirekter und direkter Wirkung zu unterscheiden.

Indirekte Wirkung

Der Kaltleiter stellt praktisch nur die Zeitkonstante dar (Alternative zum Kondensator oder zur digitalen Zählschaltung). Die Schaltungstechnik entspricht grundsätzlich der des Heißleiters (nur andere Richtung der Widerstandsänderung).

Direkte Wirkung

Hier ist der Kaltleiter das Gegenstück des Heißleiters. Der Heißleiter bildet einen verzögerten Impuls, oder er läßt den Strom erst nach einer anfänglichen Verzögerung in voller Stärke fließen (Einschaltstrombegrenzung). Demgegenüber bildet der Kaltleiter einen anfänglichen Impuls, oder er läßt anfangs einen starken Strom fließen und vermindert die Stromstärke nach einer gewissen Zeit.

Der Kaltleiter als direktwirkender Verzögerungsschalter

Sofort nach dem Einschalten soll ein starker Stromimpuls durch die Last fließen. Dann soll die Stromstärke auf den üblichen Betriebsstrom zurückgehen. Mit Kaltleitern lassen sich solche Aufgaben auf einfache Weise lösen. Der Kaltleiter wirkt näherungsweise wie ein Kontakt, der anfänglich kurzzeitig geschlossen ist und dann öffnet, um den Stromfluß zu unterbrechen. Vorsicht: in diesem Betriebszustand (näherungsweise Stromunterbrechung = hoher Widerstand) ist das Bauelement heiß – und zwar für die gesamte Betriebsdauer. Es eignen sich also nur Typen, die ausdrücklich für solche Anwendungen bestimmt sind.

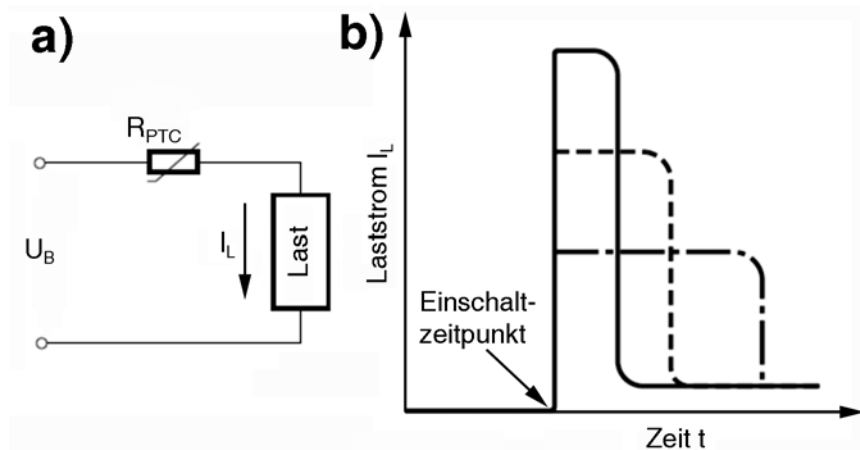


Abb. 1.110 Der Kaltleiter als direktwirkender Verzögerungsschalter. a) Prinzip. b) durch entsprechende Bauelementewahl lassen sich verschiedene Strom-Zeit-Verläufe realisieren.

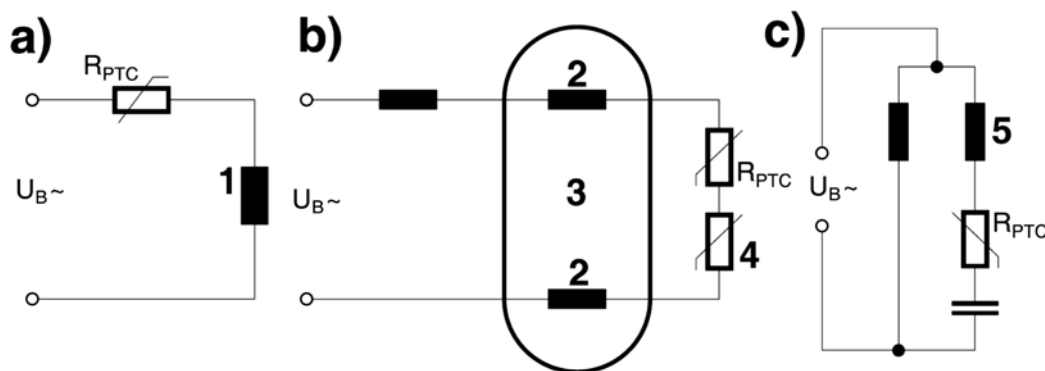


Abb. 1.111 Typische Anwendungsbeispiele (nach [1.32]). a) Entmagnetisierung von Farb bildröhren. Nach dem Einschalten fließt ein starker Stromstoß durch die Entmagnetisierungsspule 1. b) Vorwärmen der Elektroden 2 einer Leuchtstoffröhre oder Energiesparlampe 3. Ist der Kaltleiter noch kalt, so ist – infolge des niedrigen Widerstandes – die Spannung an den Elektroden geringer als die Zündspannung. Der fließende Strom erwärmt zunächst die Elektroden und den Kaltleiter. Gelangt dieser in den hochohmigen Bereich, so wird die Spannung an den Elektroden höher als die Zündspannung, und die Anordnung zündet. 4 - Varistor (Überspannungsschutz). c) Starthilfe für Induktionsmotoren. Um einen unter Last anlaufenden Induktionsmotor zu starten, ist eine Hilfswicklung 5 vorgesehen, die bei kaltem Kaltleiter kurzzeitig von einem starken Strom durchflossen wird. Nach dem Anlaufen bewirkt der nunmehr warme Kaltleiter, daß nur noch ein schwacher Strom durch die Hilfswicklung 5 fließt.