

## AUFBAU, FUNKTIONSWEISE UND ANWENDUNGSGEBIETE VON TEMPERATURSENSOREN MIT NEGATIVEM TEMPERATURKOEFFIZIENTEN (NTC)





## Einleitung

- 1. Aufbau und Funktionsweise von NTC-Thermistoren**
- 2. Fehlerquellen**
- 3. Bauweisen von NTC-Thermistoren**
  - 3.1 Perlen Thermistoren**
  - 3.2 Chip-und Scheiben Thermistoren**
  - 3.3 Glasgekapselte Thermistoren**
- 4. Eigenschaften von NTC-Thermistoren**
  - 4.1 Widerstand**
  - 4.2 Beta-Konstante**
  - 4.3 Wärmeableitungskonstante**
  - 4.4 Thermische Zeitkonstante**
  - 4.5 Temperaturkoeffizient des Widerstands**
- 5. Vergleich mit anderen Temperatursensoren**
- 6. Einsatzbereiche für NTC-Thermistoren**
  - 6.1 Widerstands-Temperatur-Kennlinie**
  - 6.2 Strom-Zeit-Kennlinie**
  - 6.3 Spannungs-Strom-Kennlinie**

## Einleitung

Ein NTC-Thermistor (auch Heißleiter oder Warmleiter genannt) ist ein variabler elektrischer, wärmeempfindlicher Widerstand mit negativer Temperaturcharakteristik, dessen Wert sich mit der Temperatur reproduzierbar ändert. Oder kurz gesagt: Ein elektronisches Bauteil, das seinen Widerstand temperaturabhängig verändert. Von ihrem negativen Temperaturkoeffizienten (englisch: negative temperature coefficient) haben die NTC-Thermistoren auch ihren Namen.

Während der Widerstand gewöhnlicher Materialien mit zunehmender Temperatur leicht ansteigt, verlieren NTC-Thermistoren bei steigenden Temperaturen an Widerstand. Sie leiten den Strom umso besser, je höher die Temperaturen sind. Wie genau das funktioniert, wie ein NTC-Thermistor aufgebaut ist und wo er zum Einsatz kommt, erklären wir hier.

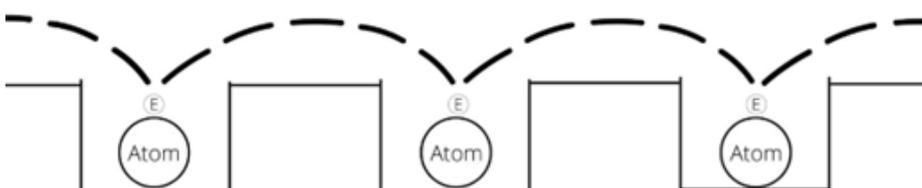
### 1. Aufbau und Funktionsweise von NTC-Thermistoren

NTC-Thermistoren bestehen aus mehreren Übergangsmetalloxiden, die zu einem feinen Keramikkörper gesintert werden. In der Produktion kommen reine Halbleitermaterialien, Verbindungshalbleiter oder metallische Legierungen zum Einsatz. Die Legierungen bestehen normalerweise aus Metalloxiden (Verbindungen aus Metallen und Sauerstoff) von Mangan, Kupfer, Nickel, Titan, Kobalt oder Eisen. Die Materialien werden zunächst mit Bindemitteln versetzt und anschließend gepresst und gesintert. Nur so kann der Heißleiter sein charakteristisches Verhalten entfalten. Erwärmen sich die Bauteile dann, lockern sich aus den Gitteratomen einige Elektronen und verlassen ihren Platz im Gefüge, wodurch der Strom deutlich besser transportiert wird. Die Thermistoren decken dabei den gesamten Temperaturbereich von -50 bis +500°C ab, der für die tägliche Temperaturkontrolle erforderlich ist.

Normalerweise gilt: Mit steigender Temperatur eines Metalls nimmt auch sein Widerstand zu. Das liegt daran, dass sich die Elektronen bei steigender Hitze immer mehr bewegen, dabei an Atome stoßen und so in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt werden. Der Widerstand wird also größer. Im Gegensatz dazu gibt es bei NTC-Thermistoren nicht viele freie Elektronen und somit mehr Bewegungsfreiheit. Dies macht es schwieriger, den Strom bei Raumtemperatur fließen zu lassen. Deshalb liegt die Driftrate bei Raumtemperatur gerade einmal bei einigen mK pro Jahr.

Stattdessen funktioniert die elektrische Leitung in NTC-Thermistoren als eine Art „Sprungleitung“. Diese ist auf die Bewegung von zwei Ladungsträgern zurückzuführen: Freie Elektronen und „Löchern“. Wenn ein Elektron in ein Loch eintritt, „springt“ es sofort zum nächsten freien Platz. Die Wiederholung dieser Bewegung erzeugt dann den Stromfluss. Bei niedrigen Temperaturen gibt es weniger freie Elektronen und ihre Bewegung ist träge, so dass der Strom nur schwer fließen kann und der Widerstand hoch ist. Mit steigender Temperatur nimmt die Zahl der Ladungsträger zu und die Bewegung (Hopping) der Elektronen wird durch thermische Schwingungen unterstützt, wodurch der Stromfluss erleichtert wird.

Zum Vergleich: Der Temperaturempfindlichkeitskoeffizient eines NTC-Thermistors ist circa fünfmal größer im Vergleich zu Silizium-Temperatursensoren und sogar zehnmals größer als der von Widerstandstemperaturfühlern.





## 2. Fehlerquellen

Die Eigenerwärmung, d. h. die Energie, die der Thermistor aufgrund der I<sup>2</sup>R-Erwärmung abgibt, ist wahrscheinlich die Hauptfehlerquelle bei der Temperaturmessung mit Thermistoren. Wenn möglich, sollte man mit einer Leistung arbeiten, die etwa 100 Mal unter der Verlustleistungskonstante liegt. Dies führt normalerweise zu einem Eigenerwärmungsfehler von 10mK oder weniger. Alternativ kann man den Eigenerwärmungsfehler verringern, indem man den Thermistor mit der gleichen Leistung betreibt, die für die Kalibrierung verwendet wurde.

Die Veränderung des Widerstands bei einer bestimmten Temperatur kann sich nicht immer auf kurzfristige Schwankungen zurückführen lassen. Diese werden auch als Rauschen bezeichnet. Sofern kein Defekt im Gerät vorliegt, sind Thermistoren sehr ruhig. Weitere Ursachen von Abweichungen sind Verschlechterungen des Kontakts und Veränderungen des Grundmaterials über Zeit. Eine Kontaktverschlechterung äußert sich in der Regel durch einen konstanten prozentualen Anstieg des Widerstands bei allen Messtemperaturen.

Die Folge ist ein größerer thermometrischer Fehler bei höheren Messtemperaturen. Änderungen der Materialeigenschaften sind auf kristallografische Veränderungen, Verschiebungen des Phasengleichgewichts, Korngrenzen Effekte und Änderungen aufgrund der Kationenverteilung und des Sauerstoffgleichgewichts zurückzuführen.

Doch auch die Herstellungsbedingungen und die Art des Thermistors wirken sich auf die Stabilität aus. In aufsteigender Reihenfolge der Stabilität kann man blanke Thermistoren, mit organischem Material beschichtete Chips/Scheiben, glasbeschichtete Scheiben und Perlen aufzählen.

## 3. Bauweisen von NTC-Thermistoren

NTC-Thermistoren kommen beispielsweise als Temperaturfühler zum Einsatz. Hierfür müssen sie mit einer Spannungsquelle und einem Strommesser verschaltet werden. Für die NTCs gibt es verschiedene Bauformen – von perlenförmig bis hin zu glasverkapselt.

### 3.1 Perlen Thermistoren

Hergestellt werden diese NTC-Thermistoren aus direkt in den Keramikkörper eingesinterter Bleidrähte aus einer Platinlegierung. Dabei überzeugen sie mit besserer Stabilität, schnelleren Ansprechzeiten sowie der Einsatzmöglichkeit auch bei höheren Temperaturen im Vergleich zu anderen Bauweisen. Gleichzeitig sind sie aber zerbrechlicher.

### 3.2 Chip- und Scheiben Thermistoren

Bei der Herstellung von Scheiben-NTCs wird eine Oxidpulver-Mischung in eine runde Form gepresst und anschließend bei hoher Temperatur gesintert. Chips entstehen in der Regel in einem Bandgussverfahren, bei welchem eine Schicht der Aufschlammung des Materials ausgebreitet, getrocknet und in Form geschnitten wird. Diese NTC-Thermistoren mit metallisierten Oberflächenkontakten sind größer als Perlen-Thermistoren und haben dementsprechend eine langsamere Reaktionszeit, können andererseits aber höhere Ströme deutlich besser bewältigen.



### 3.3 Glasgekapselte Thermistoren

In diesem speziellen Fall werden die NTC-Thermistoren in eine luftdichte Glasblase eingeschlossen, wodurch einerseits die Stabilität verbessert und andererseits der Sensor vor der Umgebung geschützt wird. Glasgekapselte Thermistoren sind so auch für Temperaturen über 150 °C und für Leiterplattenmontagen einsetzbar.

Vergleich von Glas- und Scheibenthermistoren bei 25°C (in unbewegter Luft)

|                        | Glasgekapselte Thermistoren | Chip- und Scheiben Thermistoren |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Durchmesser            | 0,4 mm - 3,2 mm             | 0,5 mm - 2,4 mm                 |
| Zeitkonstante          | 1 sek - 12 sek              | 2 sek - 15 sek                  |
| Dissipations Konstante | 0,15 mW/°C - 1,3 mW/°C      | 0,3 mW/°C - 2 mW/°C             |
| Max. Arbeitstemperatur | 220°C - 250°C               | 100°C - 150°C                   |

## 4. Eigenschaften von NTC-Thermistoren

NTC-Thermistoren gibt es mit verschiedenen Eigenschaften. Einsatzbar für Temperaturen von -60 bis +250 °C, in Bereichen von 1 Kiloohm bis zu 100 Megaohm. Mit Toleranzen von 0,1 bis 20 Prozent. Geht es also um die Auswahl eines Warmleiters, sind dabei verschiedene Kennwerte zu berücksichtigen, die nachfolgend aufgeschlüsselt werden.

### 4.1 Widerstand

Der Widerstand eines Thermistors ist in der Norm JIS C 5602 wie folgt definiert: „Der Gleichstromwiderstandswert eines Thermistors wird bei einer bestimmten Temperatur mit ausreichend geringer Verlustleistung gemessen. Die Widerstandsänderung aufgrund von Selbsterwärmung ist im Vergleich zum Gesamtmessfehler vernachlässigbar.“

Durch die Änderung der Größe eines Thermistorchips kann der Widerstand variiert werden. Wenn man den Widerstandwert herausfinden will, kann dieser wie folgt berechnet werden:

$$R = A (B/T)$$

R = Widerstandswert

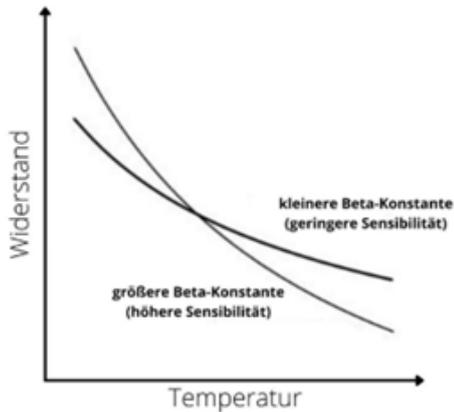
A = Maßfaktoren und unendliche Temperaturbeständigkeit

B = Beta-Konstante

T = absolute Temperatur

#### 4.2 Beta-Konstante

Die Beta-Konstante drückt den Grad der Empfindlichkeit des Thermistors (Änderungsrate seines Widerstands) gegenüber Temperaturänderungen aus. Die Änderungsrate kann auch durch die Steigung einer Linie ausgedrückt werden. Je größer die Steigung ist, desto höher ist die Empfindlichkeit.



Die Beta-Konstante kann im Gegensatz zum Widerstand nicht durch Änderung der Chipgröße variiert werden, sondern wird durch die Materialzusammensetzung eines Thermistorchips bestimmt. Außerdem gilt im Allgemeinen: Je größer die Konstante, desto höher ist der Widerstand eines Thermistors. Daher ist die Kombination aus Widerstand und dem Wert begrenzt.

Die Beta-Konstante kann wie folgt berechnet werden:

$$B = (\ln(R1/R2)) / (1/T1 - 1/T2)$$

B = Beta-Konstante

R1 = Widerstand 1

R2 = Widerstand 2

T1 = gegebene absolute Temperatur 1

T2 = gegebene absolute Temperatur 2



### 4.3 Wärmeableitungskonstante

Die Wärmeableitungskonstante gibt die Leistung an, die ein Thermistor benötigt, um sich 1° C zu erwärmen, wenn er in ruhender Luft bestromt wird (mW/°C). Sie ist das Gleiche wie W (Kraft) durch Temperaturgleichgewicht minus Umgebungstemperatur.

Durch Anlegen einer Leistung, die der Wärmeabgabekonstante entspricht, erwärmt sich ein Thermistor um 1° C. Dies führt zu einem Fehler zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Umgebungstemperatur. Daher muss die Schaltung so ausgelegt werden, dass die anzuwendende Leistung so gering wie möglich ist, damit die durch die Selbsterhitzung des Thermistors verursachten Messfehler vermieden werden.

Die Wärmeabgabekonstante wird durch ein Gleichgewicht zwischen „Selbsterhitzung“ und „Wärmeabgabe“ bestimmt. Daher variiert sie je nach Umgebung des Thermistors erheblich.

Die Wärmeableitungskonstante wird wie folgt berechnet:

$$\delta = W / (T - T_a)$$

$\delta$  = Wärmeableitungskonstante

W = Leistungsverbrauch

T = Temperatur bei Wärmegleichgewicht

T<sub>a</sub> = Umgebungstemperatur

### 4.4 Thermische Zeitkonstante

Die thermische Zeitkonstante gibt die Zeit an, die ein Thermistor benötigt, um auf eine Änderung seiner Umgebungstemperatur zu reagieren.

Im Allgemeinen gilt: Je kleiner die Größe des Thermistors, desto schneller ist die thermische Reaktion und desto kleiner ist die Konstante. Die Konstante  $\tau$  variiert je nach Thermistor-Baugruppe (s.o.) erheblich. Unter Berücksichtigung der Umgebung, in welcher der Thermistor verwendet wird, müssen Materialien mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit ausgewählt werden.

Unter der Annahme, dass t und  $\tau$  gleich sind, kann die thermische Zeitkonstante so berechnet werden:

$$T = (T_2 - T_1) (1 - e^{-t/\tau}) + T_1$$

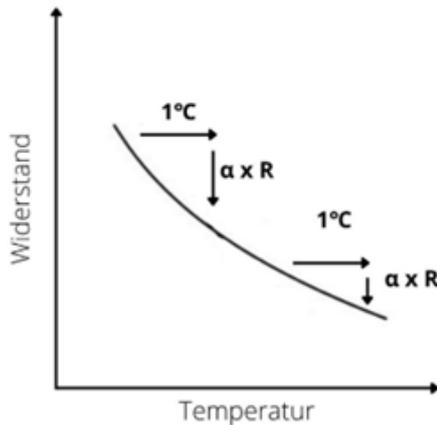
T = Thermistor Temperatur

T<sub>1</sub> = Umgebungstemperatur 1

T<sub>2</sub> = Umgebungstemperatur 2

#### 4.5 Temperaturkoeffizient des Widerstands

Der Temperaturkoeffizient eines Thermistors gibt die Änderungsrate des Widerstands pro 1°C an und wird normalerweise in %/°C angegeben. Die Metalle Gold (0,4 %/°C) oder Nickel (0,67 %/°C) reagieren langsamer als Thermistoren. Deshalb eignen sie sich hervorragend für präzise Messungen.



Berechnet wird das in dieser Weise:

$$\alpha = - (B/T^2) \times 100$$

$\alpha$  = Temperaturkoeffizient

B = Beta-Konstante

T = absolute Temperatur

#### 5. Vergleich mit anderen Temperatursensoren

NTC-Thermistoren überzeugen im Vergleich zu anderen Temperatursensoren mit vielen positiven Eigenschaften. So haben sie gegenüber FTEs eine deutlich kleinere Größe, eine höhere Vibrations- und Schockfestigkeit, ein schnelleres Ansprechverhalten und sind dabei auch noch günstiger.

Hinsichtlich ihrer Präzision können sie mit Thermoelementen problemlos mithalten, während RTDs doch noch etwas präziser sind. Auch können Thermoelemente in sehr hohen Temperaturbereichen bis 1200 °C eingesetzt werden, die von NTC-Thermistoren nicht mehr abgedeckt werden. In weniger extremen Temperaturbereichen glänzt wiederum der NTC-Thermistor mit einer höheren Genauigkeit, Empfindlichkeit und auch Stabilität bei insgesamt geringeren Gesamtkosten. Die Kosten werden dabei auch durch den Wegfall von Signalkonditionierungsschaltungen gesenkt, welche bei RTDs relativ häufig benötigt werden und bei Thermoelementen zwingend erforderlich sind.



## 6 Einsatzbereiche für NTC-Thermistoren

Für NTC-Thermistoren gibt es ein breites Spektrum an Anwendungsbereichen – von der Temperaturmessung, über die Temperaturregelung bis hin zur Temperaturkompensation. Besonders interessant sind NTC Thermistoren für die Medizintechnik. Denn ihre hohe Sensitivität macht sie perfekt für den Einsatz in diesem Bereich. Es ist äußerst wichtig, dass bei solchen Anwendungen die Raum- bzw. Körpertemperatur präzise gemessen wird. Diese Genauigkeit kann der NTC Thermistor liefern. Daher werden sie unter anderem für Anwendungen in Inkubatoren, in der Patientenüberwachung oder auch bei Infusionswärmern in Betracht gezogen und eingesetzt.

Außerdem sind sie zum Erkennen von Vorhandensein oder Fehlens von Flüssigkeiten geeignet. Weitere Anwendungsfelder sind unter anderem die Temperaturüberwachung in Automobilanwendungen sowie als Strombegrenzungsvorrichtungen.

Basierend auf diesen Anwendungsfeldern können NTC-Thermistoren in drei Gruppen eingeteilt werden, abhängig von der in der jeweiligen Anwendung genutzten elektrischen Eigenschaft.

### 6.1 Widerstands-Temperatur-Kennlinie

In die Kategorie der auf der Widerstands-Temperatur-Kennlinie basierenden Anwendungen zählen beispielsweise Temperaturmessungen sowie Temperaturregelungen und -kompensationen. Voraussetzung ist hier, dass der Thermistor im leistungslosen Zustand arbeitet. Man spricht hier auch von einem unbelasteten Heißeiter. Konkret bedeutet das: Um eine Erwärmung des Temperaturfühlers (und so Messabweichungen) zu vermeiden, wird der durch den Thermistor fließende Strom so gering wie möglich gehalten.

### 6.2 Strom-Zeit-Kennlinie

Zu den Strom-Zeit-Kennlinie basierenden Anwendungen gehören beispielsweise die Einschaltstrombegrenzung, die Überspannungsunterdrückung sowie die Zeitverzögerung und weitere. In dieser Kategorie hängen die Eigenschaften mit der Verlustleistungskonstante und der Wärmekapazität des Thermistors zusammen. Dabei ist die Schaltung in der Regel darauf angewiesen, dass durch den fließenden Strom eine Selbsterhitzung des NTC-Thermistors stattfindet und so – je nach Anwendungsfall – an einem bestimmten Punkt eine Änderung der Schaltung auslöst.



## 6.3 Spannungs-Strom-Kennlinie

Diese Anwendungen beinhalten entweder Änderungen der Umgebungsbedingungen oder aber der Schaltvariationen, welche dann wiederum zu Änderungen des Arbeitspunktes auf einer gegebenen Kurve führen. Das kann für Anwendungen wie Temperaturmessungen, die Strombegrenzung und Temperaturkompensationen genutzt werden.

Die Kennlinien von NTC-Thermistoren sind dadurch gekennzeichnet, dass die Spannung linear ansteigt, wenn der Strom ansteigt. Die Spannung beginnt jedoch zu sinken, nachdem sie bei einem bestimmten Stromwert ihren Höchstwert erreicht hat.

Ein Thermistor beginnt sich selbst zu erwärmen, wenn Strom angeschlossen wird, und die vom Thermistor erzeugte Wärmemenge wird größer, je höher der Stromfluss ist. Während die Wärmeerzeugung gering ist, ist die Wärmeabgabe von der Oberfläche und den Leitungsdrähten des Thermistors hoch. Strom und Spannung sind hier nach dem Ohmschen Gesetz direkt proportional zueinander.

Sobald jedoch die Wärmeerzeugung größer ist als die Wärmeabgabe, steigt die Temperatur des Thermistorkörpers, der Widerstand sinkt, und die proportionale Beziehung zwischen Strom und Spannung geht verloren. Die Spannung nimmt dann allmählich ab, nachdem sie ihren Höchstwert erreicht hat.

Haben Sie Fragen?  
Kontaktieren Sie uns!

Tel: +49 (0)6221 39 20 100  
Mail: [sensor@variohm.com](mailto:sensor@variohm.com)