

Temperatursensoren

Die Temperatur spielt nicht nur in der Meteorologie eine wichtige Rolle, sondern hat auch einen entscheidenden Einfluss auf nahezu alle biologischen und physikalischen Prozesse. Daher ist in der Messtechnik die exakte Ermittlung besonders wichtig. Dieser Artikel befasst sich nun ausführlich mit den unterschiedlichen Sensoren zur Temperaturerfassung.

Allgemeines

Zur Temperaturangabe dienen unterschiedliche Temperaturskalen. Am gebräuchlichsten ist dabei die auf nahezu jedem Thermometer zu findende Celsius-Skala. Bei der Celsius-Skala werden als Fixpunkte der Gefrierpunkt und der Siedepunkt des Wassers bei einem Luftdruck von 1013,5 hPa definiert.

Der zwischen diesen beiden Fixpunkten liegende Bereich ist in 100 gleiche Teilstriiche aufgeteilt, sodass der Gefrierpunkt bei 0 °C und der Siedepunkt bei 100 °C liegt.

Die Kelvin-Skala besitzt die gleiche Einteilung, bezieht sich jedoch nicht auf den Gefrierpunkt, sondern auf den absoluten Nullpunkt, der bei -273,15 °C liegt. Die Kelvin-Skala ist somit nichts anderes als eine um diesen Betrag verschobene Celsius-Skala.

Eine weitere gebräuchliche Skala zur Temperatureinteilung ist die Fahrenheit-Skala. Diese Temperatur-Skala wird vor-

wiegend in den USA verwendet, wobei die Umrechnung zwischen °C und °F nach folgender Formel möglich ist:

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9 \cdot ^{\circ}\text{C}}{5} + 32 \quad ^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32) \cdot 5}{9}$$

Die Messung der Temperatur ist bereits seit mehr als 250 Jahren möglich, wobei früher nahezu ausschließlich Flüssigkeitsthermometer verwendet wurden. Diese sind heute auch noch in vielen Anwendungen zu finden und basieren auf der Ausdehnung von Quecksilber oder eingefärbtem Alkohol bei steigender Temperatur.

Bei elektronischen Thermometern muss hingegen die nicht-elektrische Größe der Temperatur in eine elektrische Größe umgewandelt werden, wobei wiederum unterschiedliche Sensorarten zur Temperaturerfassung zum Einsatz kommen.

Welcher Sensor für die jeweilige Aufgabe am besten einsetzbar ist, hängt im Wesentlichen von der Aufgabe, dem erforderlichen Messbereich und den Genauigkeitsanforderungen ab. Weitere wichtige zu

berücksichtigende Punkte sind unter anderem die Alterung, die Empfindlichkeit des Sensors auf Fremdeinflüsse und die Linearität der Messung. In kostensensible Anwendungen, wie z. B. Universalthermometer, spielt natürlich auch der Preis des Sensors eine wichtige Rolle.

Bei einigen Anwendungen kommt es auf eine möglichst kleine Bauform an, damit dem zu messenden Objekt keine Wärme durch den Sensor entzogen wird.

Je nach Anwendungsfall gibt es Temperatursensoren zur Temperaturmessung an Oberflächen, in Gasen (z. B. Luft) und in Flüssigkeiten. Als Sensoren kommen metallische Messwiderstände, thermoelektrische Fühler, Thermistoren und Silizium-Halbleiter zum Einsatz.

Die Auswahl des geeigneten Sensors hängt von der Aufgabe ab, wobei verschiedene Kriterien zu berücksichtigen sind. Wichtig ist der Temperatur-Messbereich mit Anfangs- und Endwert, die Auflösung und die Genauigkeit. Aber auch der Einsatzort (z. B. korrosive Umgebung) hat einen Einfluss auf die Auswahl des Sensor-Materials. Betrachten wir nun die verschiedenen Sensorarten näher.

Metallische Temperatursensoren

Metallische Temperatursensoren werden vorwiegend aus Nickel oder Platin hergestellt und können auch für sehr hohe Temperaturen eingesetzt werden. Das Funktionsprinzip beruht auf der Veränderung des Widerstandswertes eines Leitermaterials in Abhängigkeit von der Temperatur. Neben Nickel und Platin kommen auch andere metallische Materialien zum Einsatz. So nimmt z. B. auch der elektrische Widerstand von Kupfer bei Temperaturerhöhung zu.

Wie stark nun die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Leitermaterials von der Temperatur ist, wird durch den Temperaturbeiwert bzw. den Temperaturkoeffizienten α angegeben. Dieser beschreibt dann, um wieviel Ω sich der Widerstand bei einer Temperaturerhöhung um eine Temperatureinheit (°K oder °C) verändert. Es gibt sowohl Widerstandsmaterialien mit positiven als auch mit negativen Temperaturbeiwerten.

Wie bereits erwähnt, sind Metall-Temperatursensoren für einen sehr hohen Temperaturbereich einsetzbar (-250 °C bis +850 °C). Diese Sensoren lassen sich zudem gut mit reproduzierbaren Widerstandswerten herstellen und haben eine sehr hohe Genauigkeit.

Die bekanntesten Platin-Sensoren (PT 100, PT 1000) weisen bei 0 °C einen Widerstandswert von 100 Ω bzw. 1000 Ω auf und sind zur Temperaturmessung im Bereich von -200 °C bis +850 °C geeignet. Der

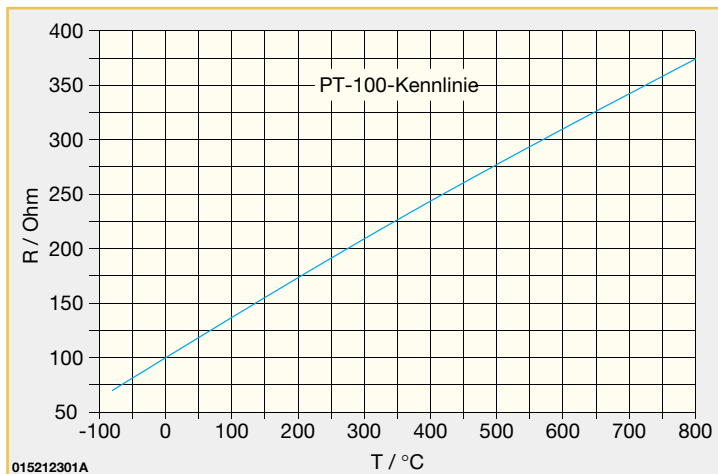


Bild 1: Kennlinienverlauf eines PT-100-Metall-Temperatur-sensors

typische Kennlinienverlauf eines PT-100-Sensors ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Widerstandswerte gemäß DIN 60571 für diesen Sensor sind Tabelle 1 zu entnehmen. Da die Widerstandswerte genau definiert sind, ist eine sehr gute Austauschbarkeit des Sensors gegeben. PT-100- und PT-1000-Sensoren lassen sich somit ohne weiteres durch einen Sensor gleichen Typs ersetzen, ohne dass Maßnahmen zur Anpassung des Sensors an der Schaltung des Messgerätes (Abgleich) erforderlich sind.

Metall-Temperatur Sensoren auf Nickelbasis sind preiswerter als Platin-Sensoren und haben eine größere Widerstandsänderung pro Temperatureinheit. Dafür ist jedoch die Korrosionsbeständigkeit schlechter und der Temperaturbereich geringer.

Halbleiter-Temperatur Sensoren

Eine wesentlich höhere Temperaturabhängigkeit als Leiter besitzen Halbleitermaterialien. Diese Widerstandssensoren werden allgemein auch als Thermistoren (Thermally sensitive resistor) bezeichnet, wobei Sensoren mit positiven Temperaturkoeffizienten als Kaltleiter und Sensoren mit negativen Temperaturkoeffizienten

als Heißeleiter bezeichnet werden.

Bei allen Widerstandssensoren handelt es sich um passive Sensoren, da die nicht-elektrische Größe der Temperatur bestimmte Parameter eines Bauelementes, in unserem Fall den elektrischen Widerstand, verändert.

Bei Thermistoren handelt es sich hauptsächlich um Halbleiter-Keramik-Widerstände aus gesinterten Metalloxyden mit einem relativ hohen ohmschen Widerstand. Grundsätzlich sind Thermistoren nichts anderes als wärmeempfindliche Widerstände, die eine große Widerstandsänderung in einem relativ kleinen Temperaturbereich aufweisen.

Thermistoren werden als Scheiben, Zylinder oder als Perlen hergestellt. Die Reproduzierbarkeit der Parameter von Thermistoren ist jedoch wesentlich schlechter als bei Metall-Widerstandssensoren. Somit ist beim Austausch des Sensors ein Neuabgleich der auswertenden Elektronik erforderlich.

Aufgrund des günstigen Preises kommen in der Konsumgüterindustrie nahezu ausnahmslos Halbleiter-Temperatur Sensoren zum Einsatz. Weitere positive Aspekte sind kleine Bauformen, hohe Nennwider-

stände und schnelle Ansprechgeschwindigkeiten.

Die prinzipiellen Kennlinienverläufe von Kaltleitern und Heißeleitern unterscheiden sich recht stark. Betrachten wir zunächst den typischen Widerstandsverlauf eines Kaltleiters in Abbildung 2. Wegen des ausgeprägten sprunghaftigen Widerstandsanstiegs ab einer bestimmten Temperatur eignen sich Kaltleiter (PTC) auch hervorragend für Überlastschutzmaßnahmen und zur Temperaturüberwachung von elektronischen Baugruppen.

Wie der Kennlinie zu entnehmen ist, hat das Bauelement in Abbildung 2 bei niedrigen Temperaturen einen negativen Temperatur-Koeffizienten. Der Beginn des Temperaturbereichs mit positiven Temperatur-Koeffizienten wird durch die Temperatur R_{min} angegeben. Die Bezugstemperatur R_{Ref} kennzeichnet den Anfang des steilen Widerstandsanstiegs. Der bei R_{PTCmin} angegebene Widerstandswert gibt den Mindestwiderstand bei der Temperatur T_{PTC} an.

Zur Temperaturmessung kommen vorwiegend Thermistoren mit negativen Temperatur-Koeffizienten (Heißeleiter) zum Einsatz. Der typische Kennlinienverlauf eines Heißeleiters (NTC-Thermistor) ist in Abbildung 3 zu sehen.

Im Vergleich zu Metall-Sensoren ist der Temperatur-Koeffizient eines Thermistors etwa 10-mal größer. Abbildung 4 zeigt 2 verschiedene Bauformen eines von den Daten identischen NTC-Sensors.

Der typische Widerstandswert ist mit $10\text{ k}\Omega$ bei $25\text{ }^\circ\text{C}$ angegeben und die Genauigkeit beträgt $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Sensor wird auch in vielen ELV-Applikationen eingesetzt.

Ausgangsmaterialien für NTC-Thermistoren sind Oxide verschiedener Metalle, wie z. B. Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Kupfer und Zink.

Grundsätzlich muss zwischen einem elektrisch nicht belasteten und einem elektrisch belasteten Heißeleiter unterschieden werden, da Eigenwärmeeffekte eine erhebliche Rolle spielen können. Nulllast-Kennwerte beschreiben immer einen elektrisch nicht belasteten Heißeleiter.

Zur Auswertung der Widerstandsveränderung eines Heißeleiters wird dieser üblicherweise als Teil eines Spannungsteilers oder in einer Brückenschaltung genutzt. Dabei muss unbedingt darauf geachtet werden, dass keine zu große Leistung im Halbleiter in Wärme umgesetzt wird, da dies das Messergebnis erheblich verfälschen kann. In den Datenblättern ist meistens der Wärmeleitwert in mW/K angegeben. Diese Angabe beschreibt, welche Eigenbelastung einen Halbleiter um 1 K erwärmt.

Bei der Schaltungsdimensionierung ist

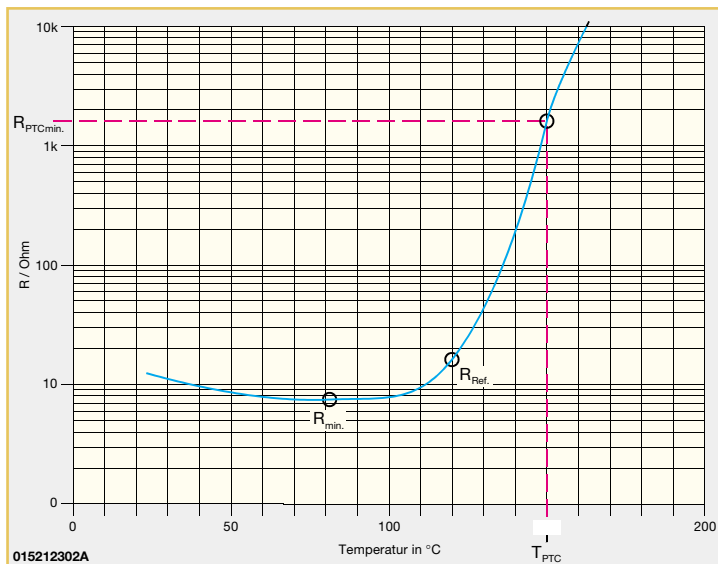


Bild 2: Typischer Kennlinienverlauf eines Kaltleiters

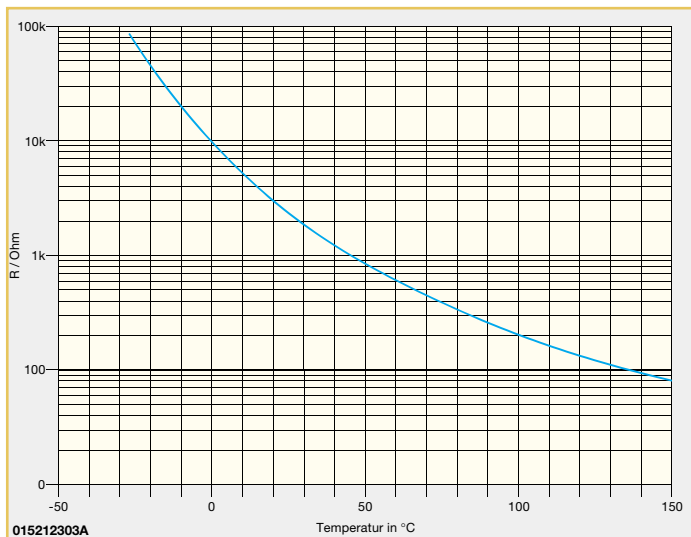


Bild 3: Typischer Kennlinienverlauf eines NTC-Temperatur-sensors

natürlich auch zu berücksichtigen, dass der Messfühler die nachfolgende Elektronik nicht belastet. Die Widerstands-Temperatur-Kennlinien von Thermistoren sind von den Halbleitermaterialien abhängig. Die Materialkonstante eines Heißleiters wird



Bild 4: Verschiedene Bauformen eines von den Daten identischen Temperatursensors

im Datenbuch als B-Wert angegeben und liegt bei den gängigen Materialien zwischen 2000 K und 6000 K. In Abbildung 5

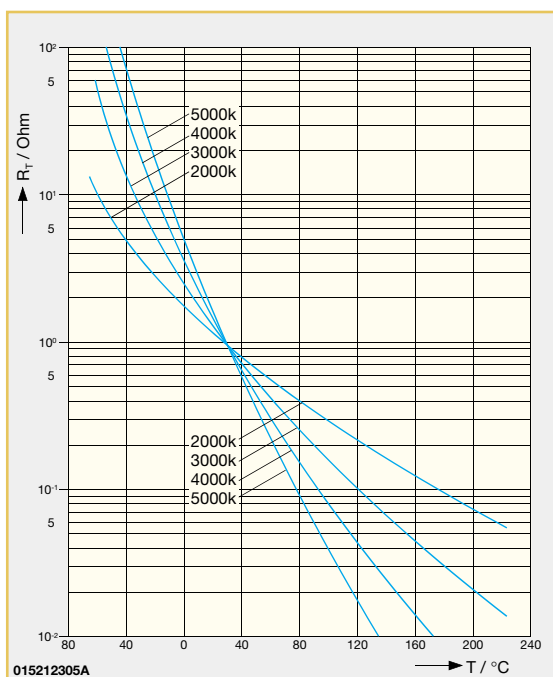


Bild 5: Abhängigkeit der Widerstands-Temperatur-Kennlinie vom so genannten B-Wert

ist die Abhängigkeit der Widerstands-Temperatur-Kennlinie vom B-Wert grafisch dargestellt.

Sowohl der Nennwiderstand als auch der B-Wert des Sensors sind mit Fertigungstoleranzen behaftet, sodass diese Sensoren nicht mit der gleichen Reproduzierbarkeit und Genauigkeit wie die Metall-Widerstandssensoren herzustellen sind.

Bei den meisten Heißleitern handelt es sich um punktabgeglichene Sensoren, wo eine bestimmte Widerstandstoleranz für einen festgelegten Temperaturwert, meistens 25 °C, spezifiziert ist.

Die Widerstandswerte für verschiedene Temperatursensoren werden vom Hersteller häufig in einer Tabelle angegeben. Die Werte in Tabelle 2 gehören zu den Sensoren in Abbildung 4.

Ein Problem stellt häufig die Nicht-Linearität der Widerstands-Temperatur-Kennlinien dar. Für Temperaturmessungen kommt man somit i. d. R. nicht um eine Linearisierung der Kennlinie herum.

Bei Mikroprozessorsystemen kann dies durch Ablegen von Tabellen in der Software erreicht werden. Eine gute Linearisierung ist bei den meisten Heißleitern auch durch einen Reihen- und Parallelwiderstand mit äußerst geringen Temperaturkoeffizienten (Abbildung 6) möglich.

Der Reihenwiderstand muss denselben Widerstandswert haben wie der Heißleiter in der Mitte des zu linearisierenden Temperaturbereichs und der Parallelwiderstand zum Heißleiter sollte 10-mal größer sein. Je kleiner der zu linearisierende Temperaturbereich ist, desto besser ist die Linearität.

In der Regel erhält man mit dem Parallelwiderstand eine S-förmige Kennlinie mit einem

Tabelle 2: Widerstandswerte eines Sensors in Abbildung 4 in Abhängigkeit von der Temperatur

Temperatur T (°C)	R (kΩ)
-50	329,5
-45	247,7
-40	188,5
-35	144,1
-30	111,3
-25	86,43
-20	67,77
-15	53,41
-10	42,47
-5	33,90
0	27,28
5	22,05
10	17,96
15	14,69
20	12,09
25	10,00
30	8,313
35	6,940
40	5,827
45	4,911
50	4,160
55	3,536
60	3,020
65	2,588
70	2,228
75	1,924
80	1,668
85	1,451
90	1,266
95	1,108
100	0,9731
105	0,8572
110	0,7576

Wendepunkt, der für die beste Linearisierung in der Mitte des zu linearisierenden Temperaturbereichs liegen muss.

Silizium-Temperatursensoren

Silizium-Temperatursensoren, wie der in vielen ELV-Schaltungen eingesetzte SAA 965 (Abbildung 7), haben wiederum einen positiven Temperatur-Koeffizienten. Der Widerstands-Temperaturverlauf ist in Abbildung 8 zu sehen.

Zur Linearisierung wird nur ein Serienwiderstand oder ein Parallelwiderstand

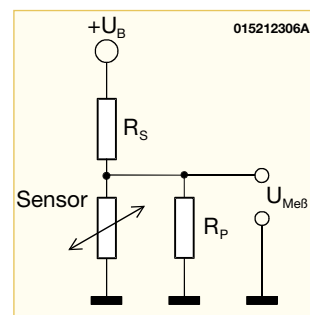


Bild 6: Linearisierung durch Reihen- oder Parallelwiderstand



Bild 7: Der SAA-965-Temperatur-sensor

benötigt. Bei Speisung aus einer Konstant-Spannungsquelle wird dann der Linearisierungswiderstand in Serie geschaltet und bei Speisung aus einer Konstant-Stromquelle parallel zum Sensor.

Abbildung 9 zeigt die max. Abweichung der Temperaturmessung bei einer Linearisierung von $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ und von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Diese Sensoren haben eine hohe Wi-

zweier verschiedener Metalle eine temperaturabhängige Thermospannung entsteht.

Nach diesem Funktionsprinzip arbeitende Thermometer sind zur Erfassung eines sehr hohen Temperaturbereichs geeignet. Je nach eingesetzten Materialien können Temperaturen von nahe des absoluten Nullpunktes bis hin zu mehr als $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen werden.

Der praktische Aufbau von Thermoelementen ist recht einfach und besteht aus zwei Drähten aus unterschiedlichen Metallen oder Metalllegierungen, die an den Enden verdreht und miteinander verschweißt sind (Thermopaare). Verschiedene Thermopaare haben unterschiedliche Eigenschaften und dienen somit zur Temperaturerfassung in verschiedenen Messbereichen.

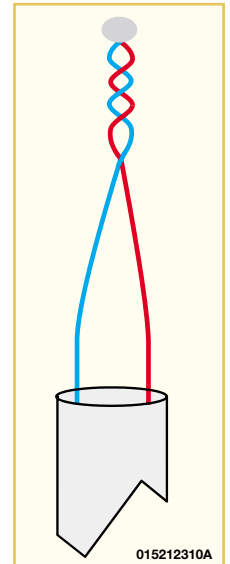


Bild 10: Prinzipieller Aufbau eines Thermopaares

ger als bei anderen Temperatursensoren. Zur Vergrößerung des Messsignals besteht auch die Möglichkeit, mehrere Thermopaare elektrisch in Reihe zu schalten, sodass eine Thermosäule entsteht. Dann müssen jedoch alle Thermopaare der zu messenden Temperatur ausgesetzt werden. Um eine Verstärkung des Messsignals kommt man jedoch grundsätzlich nicht herum.

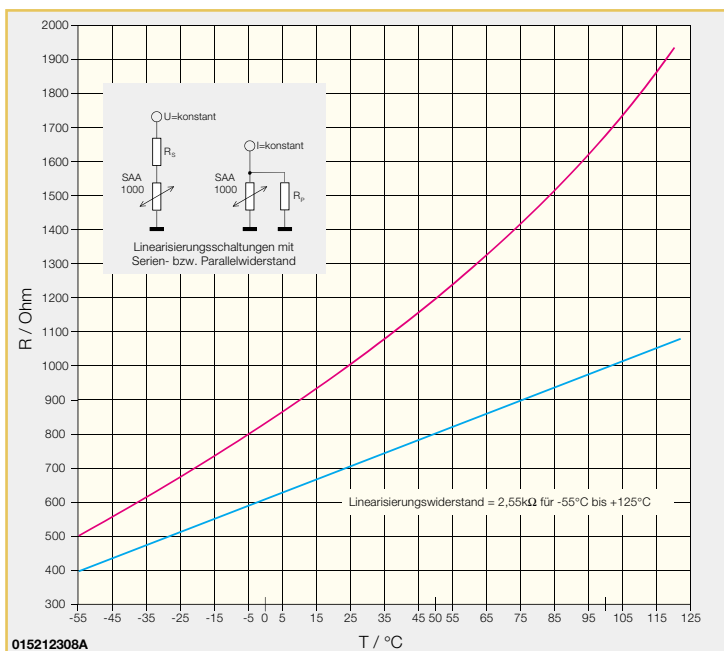


Bild 8: Widerstands-Temperaturverlauf des SAA 965 mit und ohne Linearisierung

derstandsgenauigkeit, geringe Exemplarstreuungen und kurze Ansprechzeiten. Wie bereits erwähnt, ist durch die leichte Kennlinienkrümmung die Linearisierung des Sensors besonders einfach.

Thermoelektrische Sensoren

Das Funktionsprinzip von thermoelektrischen Sensoren zur Temperaturerfassung beruht darauf, dass an der Berührungsstelle

Oft werden Thermopaare auch in Schutzrohre eingebaut oder von einem dichten Metallmantel elektrisch isoliert umschlossen. Der prinzipielle Aufbau eines Thermopaars ist in Abbildung 10 dargestellt. Thermofühler können auch mit einem sehr geringen Außendruckmesser von $0,2\text{ mm}$ hergestellt werden.

Thermospannungen liegen typisch im mV -Bereich und auch die Empfindlichkeit mit ca. $7\text{ mV pro } 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist weitaus gerin-

Berührungslose Temperaturmessung

Mit Hilfe von Thermopile-Sensoren (Abbildung 11) kann die berührungslose Tem-

Bild 11: Thermopile-Sensor zur berührungslosen Temperaturerfassung



peraturmessung erfolgen. Thermopile-Sensoren sind spezielle Infrarot-Strahlungssensoren auf der Basis einer großen Anzahl von Thermoelementen (typ. 100 Thermopaare), die wiederum eine Thermosäule bilden.

Die aktiven Kontaktstellen der Thermopaare bilden eine geschwärzte strahlungsabsorbierende Empfängerfläche. Die Thermospannung entsteht durch die Temperaturdifferenz der aktiven Fläche und den Referenz-Kontaktstellen, die an den äußeren Chiprändern positioniert sind. Diese Temperatur wird wiederum durch einen integrierten Halbleiter-Temperatur-sensor erfasst, sodass die Korrektur der Vergleichstemperatur einfach möglich ist. Die genaue Funktionsweise und der Aufbau von Thermopile-Sensoren werden wir zu einem späteren Zeitpunkt in einem separaten Artikel beschreiben. **ELV**

Bild 9: Linearisierung des Temperatursensors SAA 965 in 2 Temperaturbereichen

