

Fachartikel

Feuer und Eis

Feuer und Eis

Der Temperaturmesstechnik kommt in der Industrie eine hohe Bedeutung zu. Im Bereich der Kontroll- und Regelungstechnik, insbesondere dem Umweltschutz und der chemischen Industrie, werden sehr viele Temperaturmessfühler eingesetzt. Aufgrund ihrer geringen Kosten und einfachen Handhabung werden oft Thermoelemente bevorzugt.

In diesem Zusammenhang werden häufig folgende Fragen gestellt: Wie funktioniert ein Thermoelement? Warum zeigt ein Voltmeter, das direkt an ein Thermoelement angeschlossen wird, 0 Volt an? Welche Funktion haben die Ausgleichsleitungen? Wie funktioniert eine Kompensationsdose bzw. Vergleichsstelle? Kann man direkt an ein gängiges Multimeter ein Thermoelement anschliessen? Welche Fehler können in der Praxis auftreten? Diese und ähnliche Fragen werden im nachfolgenden Artikel beantwortet.

Historischer Rückblick

Das erste Thermoelement, welches zum Zweck der Temperaturmessung eingesetzt wurde, entwickelte Le Chatelier im Jahre 1887. Es setzte sich aus einer Platin-Rhodium-Legierung zusammen und eignete sich gut für genaue Messungen im Temperaturbereich von 0 bis 1300 °C.

Thermoeffekt physikalisch erklärt

In jedem Metall sind freie Ladungsträger (Elektronen) vorhanden, die sich wegen ihrer losen Bindung zum Atomkern relativ frei im Metallgitter bewegen können. Die quantitative Auswertung ergab folgende Erkenntnis: Bei den als gute Leiter bekannten Materialien stellt jedes Atom im Mittel ein Leitungselektron für den elektrischen Ladungstransport zur Verfügung. D.h. die Anzahl der Leitungselektronen ist im Mittel gleich der Zahl der Atome. Die Dichte der Atome ist pro Volumeneinheit bei jeder Stoffart eine andere. Demzufolge muss auch die Konzentration der freien Elektronen vom einen zum anderen

Leitungsmaterial verschieden sein. In einem Metallstück, welches sich im thermischen Gleichgewicht befindet, also an allen Stellen die gleiche Temperatur besitzt, sind die negativen elektrischen Ladungsträger, die Elektronen, gleichmässig verteilt. Besteht in einem Körper dagegen ein Temperaturunterschied $T_1 > T_2$, sind die Elektronen bestrebt, in das Gebiet niedrigerer Temperaturen abzuwandern. Sie verhalten sich wie ein Gas, welches sich auch bei höheren Temperaturen ausdehnt und bei niedrigeren Temperaturen zusammenzieht (Bild 1). Man spricht heute – wegen der besseren Anschaulichkeit – von Elektronengasen. Die Elektronen füllen, wie ein Gas, einen zur Verfügung stehenden Raum bei thermischem Gleichgewicht gleichmässig aus.

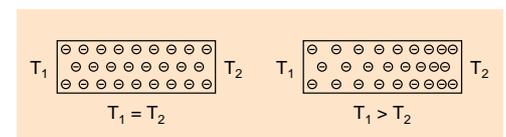


Bild 1
Elektronenverteilung in Abhängigkeit der Temperatur

Bringt man zwei Stoffe mit unterschiedlicher Ladungsträgerkonzentration, z.B. Silber (höhere Trägerdichte) und Kupfer (niedrigere Trägerdichte) zur Berührung, so diffundieren vom Körper mit der höheren Trägerdichte solange Elektronen in den Körper mit der niedrigeren Trägerdichte hinüber, bis sich der Unterschied der Trägerdichte in beiden Körpern ausgeglichen hat (Bild 2). Die Folge ist eine Diffusionsspannung oder auch Kontaktspannung, welche dadurch entsteht,

dass sich der ursprünglich elektronenärmerer Körper gegenüber dem zuvor elektronenreicheren Körper negativ auflädt.

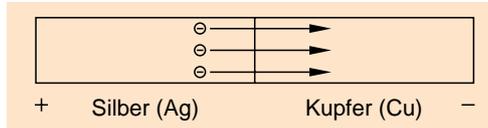


Bild 2
Der Ladungsträgerausgleich

Die Elektronenwanderung lässt sich über die kinetische Energie erklären. Diese müssen gegenüber den Bindungskräften eine gewisse Arbeit verrichten. Ist der Körper jedoch im thermischen Gleichgewicht, so heben sich die jeweiligen Elektronengas-Druckunterschiede und die durch die Kontaktspannung (elektrisches Feld) ausgeübten Kräfte auf.

Theoretisch müsste man diese Kontaktspannung messen können. Sobald man aber ein Voltmeter anschliesst, entstehen an den Übergangsstellen vom Thermoelement zu den Messleitungen (meist Kupfer) zusätzliche Thermospannungen. Diese kompensieren genau die Spannung des Thermoelements (bewiesen in der Berechnung der Verschaltungsmöglichkeit des Thermoelements, Version 1).

Es gilt die Regel:

Die algebraische Summe aller Thermospannungen eines Stromkreises mit beliebig vielen verschiedenen Metallen ist Null, wenn sich alle Teile des Kreises auf gleicher Temperatur befinden. Eine Thermospannung tritt nur dann auf, wenn eine Temperaturdifferenz vorhanden ist.

Temperaturbereiche der Thermoelemente

Mit Thermoelementen kann man praktisch in allen für die Technik relevanten Temperaturbereichen messen. Der Bereich erstreckt sich von sehr tiefen -270 °C (AuFe-NiCr) bis hinauf zu $+2800\text{ °C}$ (Wolfram-Rhenium Re3-Wre25). Thermoelemente aus nichtmetallischen Werkstoffen lassen sich bei noch höheren Temperaturen einsetzen. Mit Niocarbide-Zirkoncarbide-Kombinationen lassen sich Temperaturen bis 3000 °C messen.



Das HM8112 Multimeter dient zur Messung von Gleich-/Wechselspannung, Gleich-/Wechselstrom, Frequenz und Temperatur mittels Thermoelement, Pt-Fühlern und Thermistoren.

Thermoelektrische Spannungsreihe

Die thermoelektrische Spannungsreihe gibt einen Überblick, welche Thermospannungen bei verschiedenen Kombinationen von Materialien zu erwarten sind. Hierbei betrachtet man ein Thermopaar, dessen erster Schenkel aus Platin und dessen zweiter aus verschiedenen zu untersuchenden Werkstoffen besteht. Bringt man die Messstelle auf 100 °C und die Vergleichsstelle auf 0 °C , so ist die gemessene Thermospannung charakteristisch für das Material des zweiten Thermoschenkels. Die Werte der thermoelektrischen Spannungsreihe (Tabelle 1) entsprechen der Thermoempfindlichkeit K_{xp} eines Materials X gegen Platin P in $\text{mV}/100\text{ K}$ im betrachteten Temperaturbereich. In der Praxis verwendet man aus Kostengründen nur selten Platinthermoelemente. Die Berechnung der Thermospannung beliebiger Metallkombinationen erfolgt folgendermassen:

Die Thermoempfindlichkeit K_{AB} eines Materials A gegen ein Material B berechnet sich aus den Thermoempfindlichkeiten K_{AP} , K_{BP} der Materialien A und B zu

$$K_{AB} = K_{AP} - K_{BP}.$$

Material X	Proportionalitätsfaktor K_{xp} in $\text{mV}/100\text{ K}$
Konstantan (Cu-Ni)	- 3,47
Nickel	- 1,94
Palladium	- 0,28
Platin	0,00
Wolfram	+ 0,65
Kupfer	+ 0,72
Manganin	+ 0,57
Eisen	+ 1,87
Nickelchrom	+ 2,20
Silizium	+ 44,8

Tabelle 1
Thermoelektrische Spannungsreihe für eine Temperaturdifferenz zwischen den Punkten 0 °C und 100 °C .

Beispiel:

Fe-Konst $\rightarrow K_{\text{Konst}} - K_{\text{FE}} = -3,47 - 1,87 = 5,34\text{mV}/100\text{K}$, laut DIN-Norm $5,5\text{mV}/100\text{K}$
 Die Berechnung der Thermospannung U_T ergibt sich zu:

$$U_T = K_T (T_M - T_V) \text{ mit}$$

$K_T =$ Thermoempfindlichkeit abhängig von der Werkstoffart
 $T_M =$ Temperatur der Messstelle
 $T_V =$ Temperatur der Vergleichsstelle

Beispiel: Ein Kupfer-Konstantan-Thermoelement mit einer Thermoempfindlichkeit $K = 0,05\text{mV}/\text{K}$ liefert eine Ausgangsspannung von 16mV . Wie gross ist die Messtemperatur, wenn die Vergleichsstelle in einer Eisflasche ($= 0^\circ\text{C}$) liegt?

$$T_M - T_V = U_T / K_T$$

$$T_M - T_V = 16\text{mV} / 0,05\text{mV}/\text{K} = 320\text{K}$$

da $T_V = 0^\circ\text{C}$ (Eisflasche) $\rightarrow T_M = 320^\circ\text{C}$

Thermoelement-Typen und deren Unterscheidungsmerkmale

Um die einzelnen Thermoelemente voneinander unterscheiden zu können, wurde jedem Paar ein Buchstabe zugeordnet. Man spricht von Thermoelement-Typ «J», Typ «K» etc. In der Typen-Tabelle der Thermoelemente (Tabelle 2) ist nur die DIN IEC 584 aufgeführt. Zusätzlich gibt es die alten DIN-Normen 437/-10/13/-14, die englische Norm BS 4937 und die französische Norm NF C 42-324. Jede Norm hat ihre eigene Farbe, so ist z.B. ein Thermoelement des Typs «K» nach der alten DIN-Norm 43710 rot/grün, nach der englischen Norm braun/blau und nach der französischen gelb/purpurrot gekennzeichnet. Dies erschwert die Bestimmung eines nicht bekannten Thermoelementes, welches bereits im Einsatz ist und ausgewechselt werden

muss, ungem. Die Bestimmung über die Farbcodes allein reicht oft nicht aus. Praktiker helfen sich dann mit folgendem «Trick» weiter. Die Werkstoffe wie Eisen, Nisil und Nickel ohne Chrom sind magnetisch. Nach dieser Prüfung kann das verwendete Thermoelement weiter eingeschränkt werden.

Tip vom Praktiker: Wie gezeigt, kann die Bestimmung eines unbekanntes, bereits eingesetzten Thermoelementes, aufgrund der verschiedenen Normen, schwierig sein. Bei der Auswahl eines geeigneten Thermoelementes müssen wegen der vielen unterschiedlichen Einflussfaktoren (Mess-/Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit, elektromagnetische Felder etc.) viele Dinge berücksichtigt werden. Die Firma Condustrie-MET AG in 8260 Wetzikon hat sich ausschliesslich auf die Entwicklung und Fertigung von Temperaturmessfühlern spezialisiert.

Ausgleichsleitungen

Liegt die Vergleichsstelle im Bereich des Temperaturgefälles der Messstelle, so werden beide Schenkel des Thermoelementes mit einer Ausgleichsleitung bis zu einem Punkt konstanter Temperatur verlängert. Die Ausgleichsleitungen bestehen aus einem Leiterpaar, das in den Anschlussstellen bis etwa 200°C die gleiche Thermospannung erzeugt, wie das zugehörige Thermopaar. Dadurch entstehen an den Anschlussstellen keine neuen Thermospannungen.

Vorteile der Ausgleichsleitungen

Ausgleichsleitungen sind günstiger als Thermoelemente (vor allem bei Platin und Rhodium). Sie sind flexibel und weisen aufgrund des grösseren Querschnittes einen geringeren Leitungswiderstand auf. Über-

Tabelle 2
 Verschiedene Thermoelement-Typen im Vergleich

Typ	Werkstoff (+)-Leitung (-)-Leitung		Temperatur-Bereich	Genauigkeit Messfühler Klasse 1 (A)	Farbe nach DIN IEC 584 (+)-Leitung (-)-Leitung		Thermosp. in mV bei 100°C
T	Cu	Cu-Ni	-40 bis $+350^\circ\text{C}$	$0,5^\circ\text{C}$	Braun	Weiss	4,277
J	Fe	Cu-Ni	-40 bis $+750^\circ\text{C}$	$1,5^\circ\text{C}$	Schwarz	Weiss	5,268
E	Ni-Cr	Cu-Ni	-40 bis $+800^\circ\text{C}$	$1,5^\circ\text{C}$	Rot	Weiss	6,317
K	Ni-Cr	Ni	-40 bis $+1000^\circ\text{C}$	$1,5^\circ\text{C}$	Grün	Weiss	4,095
N	Ni-Cr-Si	Ni-Si	-40 bis $+1000^\circ\text{C}$	$1,5^\circ\text{C}$	Rot	Weiss	2,774
R	Pt-Rh (13%)	Pt	0 bis $+1600^\circ\text{C}$	1°C	Gelb	Weiss	0,647
S	Pt-Rh (10%)	Pt	0 bis $+1600^\circ\text{C}$	1°C	Gelb	Weiss	0,645
B	Pt-Rh (30%)	Pt-Rh (6%)	$+600$ bis $+1700^\circ\text{C}$	$1,5^\circ\text{C}$	k.A.	k.A.	0,033

Cu-Ni = Konstantan; Ni-Cr-Si = Nickel-Chrom-Silizium = Nicrosil; Ni-Si = Nickel-Silizium = Nisil

wiegend werden sie dort eingesetzt, wo es gilt, grössere Entfernungen zu überbrücken.

In der Praxis haben sich für den Anschluss eines Thermoelementes zwei Stecker etabliert (Bild 3). Bei dem grünen Thermostecker mit Kupplung handelt es sich um einen Standardstecker für die Thermoelemente der Typen «R» und «S». Diese Stecker werden überwiegend im Schaltschrankbau eingesetzt. Für die Handmessgeräte haben sich die Miniaturstecker etabliert, welche auf fast jedes Temperaturmessgerät passen. Der abgebildete gelbe Miniaturstecker inkl. Kupplung ist für Thermoelemente des Typs «K» gedacht. Der metallische Stab ist ein sogenanntes Mantelthermoelement. Die Thermodrähte sind in Magnesiumoxid eingebettet und komplett von einem Schutzrohr aus rostfreiem Stahl umgeben. Durch Biegen oder Verformen können daher keine Kurzschlüsse auftreten.

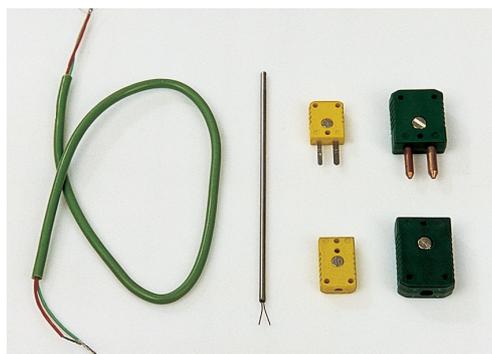


Bild 3
Thermoelement-Typ «K» mit Steckern und Ausgleichsleitung.

Mantelthermoelemente werden hauptsächlich in der Industrie eingesetzt, wenn die Messstellen schlecht zugänglich sind (biegbar) oder Erschütterungen auftreten können. Mantelthermoelemente können an spezielle Klemmverschraubungen oder – wie abgebildet – an eine zum Thermoelement passende Ausgleichsleitung (hier Typ «K») angeschlossen werden.

Verschaltungsmöglichkeiten, Vergleichsstelle und Kompensationsdose

Generell verschaltet man Thermoelemente nach zwei Möglichkeiten. Abbildung 4 zeigt die technische Ausführung. In der Version (Bild 4) ist die Vergleichsstelle Punkt 2 und

3. Für Absolutmessungen spielt sie eine grosse Rolle. Sie muss immer auf einem konstanten Wert gehalten werden (beispielsweise Eisflasche) und bekannt sein. Für Langzeitmessungen ist der Gebrauch einer Eisflasche sehr umständlich. In der Praxis wird die sogenannte Kompensationsdose verwendet. In dieser ist die Vergleichsstelle und in der Regel ein NTC eingebettet, der Spannungsänderungen der Vergleichsstelle aufgrund von Änderungen der Umgebungstemperatur kompensiert. Die Vergleichsstelle ist meist in Form eines isothermischen Blocks realisiert. Dieser ist sowohl eine elektrische Isoliereinrichtung als auch ein guter Wärmeleiter. Der eingangs abgebildete Datenlogger zur Tempe-

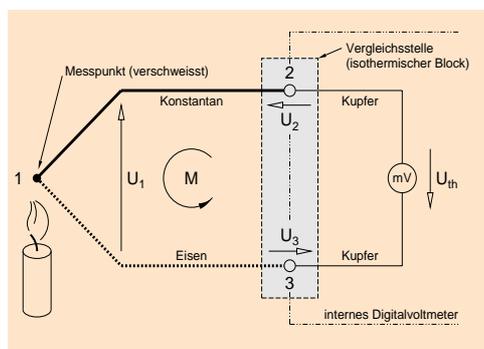


Bild 4
Temperaturmessung mit Thermoelement.

raturmessung von HP und die Multimeter von Fluke haben die Vergleichsstelle zur Temperaturmessung bereits integriert.

Mit dem neuesten Multimeter von Fluke (Flk 16) lassen sich folgende Grössen messen: Gleich-, Wechselfeldspannung, Kapazität, Widerstand, Mikroampere und Temperatur mittels K-Thermoelement. Mit dem Aufsteckmodul 80TK wird aus jedem beliebigen Multimeter (10M Ω Eingangsimpedanz) ein Temperaturmessgerät. Für beide Geräte stehen zahlreiche Fühler (Universal-, Oberflächen-, Tauchmessfühler etc.) zur Verfügung.

Behauptung und Beweis

Es wird behauptet:

Die algebraische Summe aller Thermospannungen eines Stromkreises mit beliebig vielen verschiedenen Metallen ist Null, wenn sich alle Teile des Kreises auf gleicher Temperatur befinden. Eine Thermospannung tritt nur dann auf, wenn eine Temperaturdifferenz vorhanden ist.

Den Beweis für die Richtigkeit dieser Aussage liefert folgende Berechnung:

Maschenumlauf: $-U_1 + U_2 + U_3 = 0 \rightarrow U_1 = U_2 + U_3$

U_1 : Eisen – Konstantan $\rightarrow K_{\text{Fe-CuNi}} = K_{\text{Fe}} - K_{\text{CuNi}}$
 $\rightarrow 1,87 - (-3,47) = 5,34\text{mV}/100^\circ\text{C}$

U_2 : Kupfer – Konstantan $\rightarrow K_{\text{Cu-CuNi}} = K_{\text{Cu}} - K_{\text{CuNi}}$
 $\rightarrow 0,72 - (-3,47) = 4,19\text{mV}/100^\circ\text{C}$

U_3 : Eisen – Kupfer $\rightarrow K_{\text{Fe-Cu}} = K_{\text{Fe}} - K_{\text{Cu}}$
 $\rightarrow 1,87 - (0,72) = 1,15\text{mV}/100^\circ\text{C}$

nach Maschengleichung: $U_1 = U_2 + U_3$

$5,34\text{mV}/100^\circ\text{C} = 4,19\text{mV}/100^\circ\text{C} + 1,15\text{mV}/100^\circ\text{C}$
 $5,34\text{mV}/100^\circ\text{C} = 5,34\text{mV}/100^\circ\text{C}$ (wahre Aussage)

Diese Berechnung beweist, dass keine Spannung gemessen werden kann, wenn an ein Thermoelement direkt ein Voltmeter angeschlossen wird und sich alle Teile des Messkreises auf der gleichen Temperatur befinden. Eine Thermospannung wird erst dann gemessen, wenn eine Temperaturdifferenz zur Vergleichsstelle besteht, das heisst, erst wenn das Thermoelement erhitzt wird, kann abhängig von der Vergleichsstellentemperatur eine Thermospannung gemessen werden.

Die zweite Möglichkeit, ein Thermoelement zu verschalten, ist in Bild 5 aufgeführt. Diese Version wird oft in der Literatur aufgeführt. Die Vergleichsstelle ist im Gegensatz zu Bild 4 nicht mehr der Übergang auf die Kupferleitung, sondern Punkt 2. Für Absolutmessungen muss Punkt 2 ebenfalls

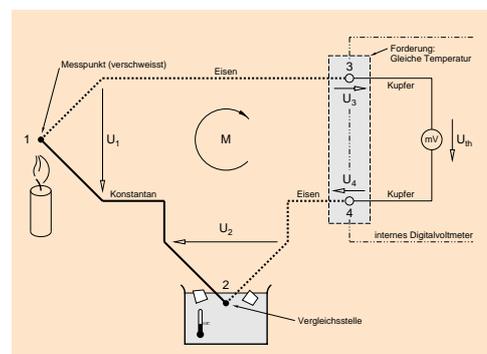


Bild 5
 Thermoelement mit Vergleichsstelle

konstant gehalten oder rechnerisch korrigiert werden. Beim Übergang auf die Kupferleitung (Punkt 3 und 4) ist zu beachten, dass beide Punkte immer auf der gleichen Temperatur liegen müssen, um sich gegenseitig zu kompensieren.

Vorteile eines Thermoelementes

- Wirtschaftlichkeit
- Langzeitstabilität
- geringe äussere Abmessungen und geringe Wärmekapazität
- schnelle Reaktionszeit
- aktiver Sensor
- grosser Temperaturbereich (0 bis 2800 °C) und
- Robustheit.

Nachteile eines Thermoelementes

- Jedes Paar unterschiedlicher Metalle stellt ein Thermoelement dar (auch Löt-zinn/Kupfer, ca. $3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$). Deshalb ist besonders darauf zu achten, dass keine ungewollten Thermoelemente beim Schaltungsaufbau entstehen.
- Thermoelemente erzeugen nur sehr kleine Spannungen. Um Auflösungen von $0,1^\circ\text{C}$ zu erreichen, sind driftarme Verstärkerschaltungen notwendig.
- Je nach Typ des Thermoelementes treten mittlere bis grosse Nichtlinearitäten auf. Es ist eine rechnerische Korrektur erforderlich.
- Nur sehr kleine Signale können gewonnen werden (je nach Typ 7 bis $75\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).
- Die Vergleichsstellentemperatur muss konstant gehalten oder korrigiert werden.

Die häufigsten Fehler aus der Praxis

Ein Thermoelement wird in der Regel durch Verschweissen oder Verlöten von zwei Drähten hergestellt. Eine schlechte Schweiss-/Lötnaht kann zu Fehlern in der Thermoelementmessung führen. Wird ein Thermodraht zu stark gebogen, kann er brechen oder einen Kurzschluss erzeugen. Dies führt ebenso wie das Verpolen zu Fehlmessungen.

Fehlererkennung und deren Behebung

Erhitzt man den Messpunkt und misst mit einem Voltmeter immer die Thermospannung von 0V, kann von einer Unterbrechung (innerhalb des Temperaturmesskreises)

ausgegangen werden. Schlechte oder fehlerhafte Löt-/Übergangsstellen werden mit Hilfe einer Ohmmessung erkannt. Wird ein Widerstand von grösser als 1 k Ω gemessen, kann von einem Fehler ausgegangen werden. Ein Kurzschluss an einer beliebigen Stelle bedeutet nicht etwa eine Thermospannung von 0V, sondern dass an der Stelle des Kurzschlusses ein Thermoelement gebildet wurde, welches zu Fehlmessungen führt. Dieser Zustand lässt sich feststellen, indem man die Messstelle erhitzt und beobachtet, ob sich die Thermospannung ändert. Ändert sie sich nicht, oder ist die Änderung viel geringer als erwartet, liegt mit hoher Sicherheit ein Kurzschluss vor.

Ein verpoltes Thermoelement kann nicht daran erkannt werden, dass beispielsweise statt +150 °C nun -150 °C gemessen werden. Je nach verwendetem Messgerät wird ein Wert dazwischen angezeigt. Geprüft wird auf dieselbe Weise wie bei der Kurzschlussprüfung. Verringert sich die angezeigte Thermospannung beim Erhitzen der Messstelle, liegt ein Verpolungsfehler vor.

Ein sogenannter Diffusionsfehler liegt vor, wenn Partikel aus der Atmosphäre in ein Thermoelement diffundieren. Dies geschieht überwiegend bei starker mechanischer Beanspruchung (durch Dehnung oder Vibration) und bei hohen Temperaturen (>1000 °C). In der Praxis spricht man von einem «vergifteten» Thermoelement. Dieser Fehler lässt sich nur schwer feststellen, da das Thermoelement auf Temperaturänderungen nahezu mit dem richtigen Ergebnis reagiert. Den Diffusionsfehler erkennt man an einem langsamen Abdriften der Messwerte. Beim Ersatz eines «vergifteten» Thermoelementes ist darauf zu achten, dass die Anschlussverbindungen und Ausgleichsleitungen ebenfalls diffusionsanfällig sind und eventuell auch ausgetauscht werden müssen.