

## Temperaturmessungen beim Weichlöten

Hans Bell, Lutz Bruderreck, Christian John

- Dr. Hans Bell ist Leiter der Entwicklung/Technologie bei rehm Anlagenbau GmbH in Blaubeuren-Seißen, mail: h.bell@rehm-anlagenbau.de
- Lutz Bruderreck ist Geschäftsführer Technologie bei der TechnoLab GmbH in Berlin, mail: lutz.bruderreck@technolab.de
- Christian John ist Geschäftsführer der globalPoint ICS GmbH in Berlin, mail: christian.john@gp-ics.com, Tel.: 030 72019010

### Einleitung

Bei allen Weichlötverfahren (Reflowlötten, Wellenlötten, Selektivlötten usw.) ist die Übertragung von Wärme auf das Lot und das Lötgut notwendig. Der Wärmestrom kann hierbei durch die vereinfachte Beziehung

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}$  Wärmestromdichte [W/m<sup>2</sup>]  
 $\alpha$  Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]  
 $\Delta T$  Temperaturdifferenz [K]

beschrieben werden [1]. Unter der Annahme, dass für ein bestehendes Lötssystem und die zu verarbeitende Baugruppe (Lötgut) der Wärmeübergangskoeffizient annähernd konstant ist, hängt die Wärmestromdichte vor allem von der Temperaturdifferenz ab. Daher sind Temperaturmessungen im Weichlötverfahren unerlässlich.

Dieser Artikel beschreibt die Möglichkeiten der Temperaturmessung in der Baugruppenfertigung. Es werden die Einsatzmöglichkeiten von handelsüblichen Thermoelementen und deren Kontaktierung am Messort auf der elektronischen Baugruppe vorgestellt. Der Einsatz von konventionellen Baugruppen und eines speziellen, kalibrierbaren robusten Messboards wird verglichen.

Die Messung der Temperatur ist mittels verschiedener Wirkprinzipien möglich:

<u>Wirkprinzip</u>	<u>Beispiel</u>
Strahlung eines Körpers	Pyrometer
Änderungen der Eigenschaften eines Halbleiters	IC / Chip
Änderungen des Widerstands einer Keramik	Thermistoren
Änderungen des Widerstands einer Metallstücks	Pt 100
Seebeck Effekt	Thermoelement

Die gestellte Messaufgabe bestimmt dabei, welches Wirkprinzip zur Anwendung gelangt. In einer Baugruppen-/Elektronikfertigung ergeben sich für die Temperaturmessung einige spezielle Anforderungen, die die Auswahl des Wirkprinzips einschränken:

- Temperaturbereich ab -65° bis etwa 300°C
- Variable Anzahl von Messkanälen
- Schnelle Inbetriebnahme der Messanordnung
- Möglichst universelle Zuordnung von Sensor zu Messkanal
- Mechanische und thermische Robustheit von Sensor und Messschaltung
- Hohe Langzeitstabilität
- Kosten für Anschaffung und Wartung

Messfühler, wie der Pt 100, liegen in einer großen Bandbreite von Ausführungsformen und Toleranzen vor. Gemeinsam ist ihnen das passive Wirkprinzip. Messsysteme auf der Basis des

Pt 100 benötigen zum Betrieb eine geregelte Versorgungsspannung angepasster Impedanz und Abgleichorgane, entsprechend der Länge der Zuleitungen. Dies schränkt ihre Anwendbarkeit für Messungen auf der Baugruppe erheblich ein.

Ausführungen als Chipwiderstände sind am Markt erhältlich und gestatten im Zusammenhang mit speziellen Baugruppendesigns gute Messergebnisse. Allerdings ist ein einfacher Austausch gerade der kleinen Chip-Baugrößen auf Grund der Toleranzen meist nur unter Einschränkungen möglich.

Die derzeit gebräuchlichsten Messmittel in der Baugruppenfertigung sind die Thermoelemente.

## Thermoelemente

Die Grundlage der elektrischen Temperaturmessung mittels Thermoelement bildet ein physikalischer Wandlungseffekt: Wird in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen Metallen, die Kontaktstelle der Metalle unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt, so tritt eine Thermospannung auf. Dieser Effekt wurde 1821 von Thomas Seebeck entdeckt und nach ihm benannt. Nach dem Seebeck-Effekt ist die Berührungsstelle zweier Metalle oder Legierungen (A und B) mit verschiedenen Elektronenaustrittspotentialen Sitz einer Gleich-Elektromotorischen-Kraft (EMK). Verwendet werden Drahtkombinationen (Thermopaare) z.B. aus Kupfer/Konstantan für Temperaturen von  $-250$  bis  $500$  °C, Platin/Platin-Rhodium für Temperaturen bis  $1600$  °C, Wolfram/Wolfram-Molybdän für Temperaturen bis  $3300$  °C und Nickel/Nickel-Chrom (Ni/NiCr) für Temperaturen bis  $1200$  °C. Die Drahtenden werden zusammengelötet/geschweißt und der Mess-temperatur  $T_M$  ausgesetzt. An der Messstelle, sowie an den der Umgebungstemperatur  $T_U$  ausgesetzten Anschlussstellen, entstehen Thermo-EMK [2].

Eine Thermospannung deren Größe annähernd proportional der absoluten Temperatur  $T$  der Messstelle  $T_M$  ist, kann durch nachfolgenden Messaufbau (Bild 1) mit  $0^\circ\text{C}$  Referenz erzielt werden. A und B symbolisieren die zwei Metalle des Thermopaars.

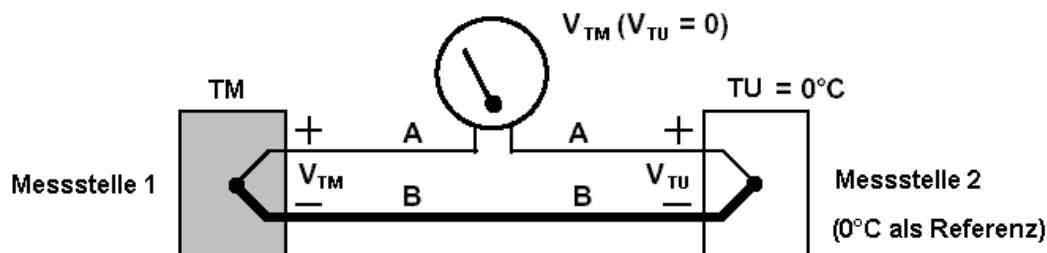


Bild 1: Wirkprinzip (mit  $0^\circ\text{C}$  Referenznormal / Eisblock)

In der Praxis ist oft davon auszugehen, dass keine  $0^\circ\text{C}$  Referenzen zur Verfügung stehen, sondern von veränderlichen Umgebungstemperaturen  $T_U$  auszugehen ist.

Bei den im Weichlötbereich verwendeten Temperatur-Messwertaufnehmern wird de facto immer die Kompensation des Einflusses der Umgebungstemperatur  $T_U$  durch die Einspeisung einer Korrekturspannung realisiert. Diese Kompensationsspannung  $V_{\text{komp}}$  wird durch spezielle elektronische Schaltungen (IC's) bereitgestellt und entgegen polarisiert eingespeist. Bild 2 zeigt das entsprechende Wirkprinzip.

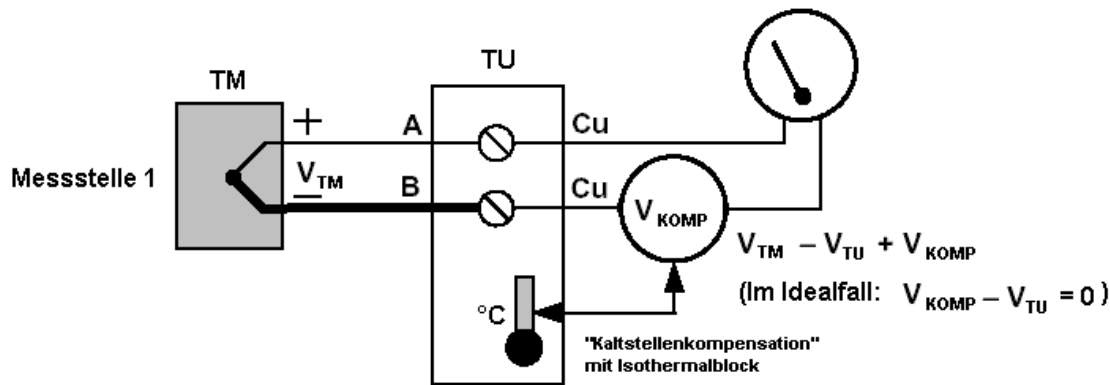


Bild 2: Wirkprinzip (mit Fehlerkompensation)

In der DIN IEC 584 [3] sind verschiedene Materialpaarungen beschrieben. Zum Beispiel wird beim Typ K das Thermopaar aus einem Nickel- und einem Chrom-Nickel-Draht gebildet (Ni/CrNi).

Die Auswahl einer Thermopaarung richtet sich nach dem geforderten Einsatztemperaturbereich, der Linearität in einem bestimmten Temperaturbereich, der Verfügbarkeit in einer bestimmten Ausführungsform und dem Preis.

Für Messungen im Weichlötbereich haben sich weltweit Ni/CrNi-Thermoelemente verbreitet, die sich durch ein günstiges Verhältnis von Messwerttoleranz und Preis auszeichnen. Ni/CrNi-Thermoelemente haben, in dem für das Löten notwendigen Temperaturbereich (bis 400°C), einen annähernd linearen Spannungsverlauf (siehe Tabelle 1).

T[°C]	$U_{Th}$ [mV]
0	0
10	0,397
50	2,022
100	4,095
150	6,137
200	8,137
250	10,151
300	12,207
350	14,292
400	16,395

Tabelle 1 [3]: Spannungswerte für Ni/NiCr-Thermoelemente

Thermoelemente sind in einer Fülle von Ausführungsformen (Bild 3) am Markt erhältlich. Allgemein gilt die Regel, dass die Ansprechgeschwindigkeit mit der Größe der Verbindungsstelle und der Masse der Umhüllung sinkt. Je dicker das Thermoelement ist, umso länger muss die Messzeit werden.

Dickwandige Schutzrohre können erforderlich sein, um beispielsweise die Temperatur in Lottiegeln langzeitstabil erfassen zu können.

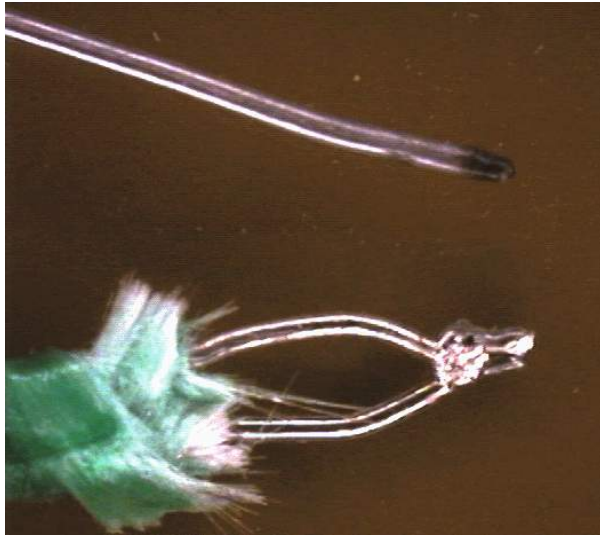
Im Falle der Messungen an kleinen Messobjekten (Bauelementen), wie sie auf Elektronikbaugruppen vorliegen, sind folgende Regeln zu berücksichtigen:

Die Masse des Thermoelements (entscheidend ist hier die Masse der Verbindungsstelle) sollte wesentlich kleiner sein, als die Masse des Messobjektes/-ortes.

Der Durchmesser der Messspitze sollte kleiner sein als die Dimensionen am Messort (z.B. Gullwing-Anschluss eines Bauelements).

Die Verbindungsstelle muss sich in einer engen thermischen Kopplung mit dem Messort befinden.

Die Anschlussdrähte sollen die Temperatur am Messort nicht beeinflussen.



*Bild 3: Mantel-Thermoelement (oben) und Thermoelement in Glasfaserisolierung (unten)*

Bei den Mantelthermoelementen vom Typ K besteht der Mantel aus Edelstahl (bis 1100°C einsetzbar, mit guter Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit sowie ausgezeichneter Verformbarkeit) und die innere Isolation aus einem Keramikpulver (MgO).

Bei Mantelthermoelementen wird zwischen drei Ausführungsformen unterschieden:

- Mantel und Verbindungsstelle sind voneinander elektrisch isoliert.
- Mantel und Verbindungsstelle sind miteinander elektrisch verbunden.
- Die Verbindungsstelle liegt außerhalb des Mantels.

Auf Grund der Potentialtrennung und der elektrischen Schirmwirkung des Mantels ist für die meisten Messapplikationen auf Baugruppen das Mantelthermoelement mit einer elektrisch isolierten Verbindungsstelle am besten geeignet.

Der Nachteil der Mantelthermoelemente gegenüber nicht ummantelten Thermoelementen ist der höhere Anschaffungspreis.

Für die unverfälschte Übertragung der Thermoelement-Spannungen ist es wichtig, dass in der gesamten Messkette, angefangen bei der Messspitze bis hin zur Auswerte-Elektronik, ausschließlich Thermoelement-Material verwendet wird. Dies trifft sowohl auf die zur Verlängerung verwendeten Kabel, als auch auf die Verbindungs- und Übergangsstellen zu.

An den Verbindungen der Thermoelement-Metalle A und B zum Messaufbau (Voltmeter / Messelektronik) entstehen zwei weitere Thermospannungen, da die Zuleitungen i.a. aus einem anderen Metall (üblicherweise aus Kupfer) bestehen. Da die entstehenden EMK-Spannungen an den Verbindungsstellen (A/Cu und B/Cu) innerhalb der Schaltung (Bild 2) entgegengesetzte Spannungen produzieren, entstehen solange keine Messfehler, wie beide Verbindungsstellen die gleiche Temperatur besitzen. Diese Anforderung kann und wird in der konstruktiven Umsetzung durch einen Isothermal-Block realisiert.

Die sicherste Methode für die Verbindung sind deshalb Thermoelement-Steckverbinder, welche mit Kontakten aus original Thermoelement-Material ausgeführt sind, wodurch eine Verfälschung der Messspannung ausgeschlossen wird. Das Steckermaterial sollte stets den Einsatzbedingungen (Reflowtemperaturen) entsprechend ausgewählt werden. Es stehen Versionen bis 220°C (Normalausführung), bis 320°C (Hochtemperatur) und bis 420°C (Super-Hochtemperatur) zur Verfügung.

## Genauigkeit von Thermoelementen / Messgenauigkeit

Die Grenzabweichungen der Thermoelemente sind in der DIN IEC 584 (Deutsche und Internationale Norm) für den Typ K in der besten Klasse 1 im Temperaturbereich  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+375^{\circ}\text{C}$  mit  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$  angegeben. Das heißt, dass bei dem Einsatz von handelsüblichen Thermoelementen dieser Klasse, sofern keine weiteren Maßnahmen (Selektion bzw. Fehlerkorrektur) vorgenommen werden, Messabweichungen von maximal  $+1,5^{\circ}\text{C}$  oder  $-1,5^{\circ}\text{C}$  vom wahren Wert möglich sind. Dabei ist die Toleranz des Messsystems, an das das jeweilige Thermoelement angeschlossen wird, im allgemeinen noch nicht berücksichtigt. Werden genauere Thermoelemente benötigt, müssen diese vorher in einem aufwändigen Verfahren selektiert werden.

Um mit Thermoelementen eine brauchbare Temperaturmessung am gewünschten Messort zu erzielen, ist ein einfacher Grundsatz zu beachten:

Nicht das Thermoelement allein misst, sondern das ganze Messsystem

Häufig verlangt die Messaufgabe eine sehr hohe Messgenauigkeit. Dabei wird von vielen Anwendern leicht übersehen, dass dann immer die Genauigkeit des gesamten Messsystems gefordert ist. Für die Ermittlung der Genauigkeit des Messsystems ist eine Bewertung der Einzelkomponenten erforderlich. Das Thermoelement selber ist nur ein Teil des Systems, dessen Genauigkeit keinesfalls die alleinige Bezugsgröße ist.

Die Systemgenauigkeit ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Teilkomponenten:

- Thermoelement als Temperaturfühler
- Anschlussstellen am Thermoelement
- Ausgleichsleitungen zum Messgerät hin
- Verbindungsstellen zwischen Ausgleichsleitungen und Messgerät

Das Messgerät übernimmt die Filterung und Umsetzung der Thermospannung.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass selbst hergestellte Messboards, meist aus realen Baugruppen gefertigt, an die Thermoelemente fixiert werden, nicht sinnvoll kalibrierfähig sind. Von [7] wurde berichtet, dass von verschiedenen Teilnehmern an einem Lötseminar gleiche Messboards präpariert wurden, die nach dem Ausmessen Abweichungen von 24,5 K aufwiesen. Reale Baugruppen überstehen meist nur wenige Messdurchläufe. Daher ist die Verwendung von professionellen kalibrierfähigen Messboards und Messsystemen, wie dem Professional Temperature Profiler PTP von der globalPoint ICS GmbH [4] unbedingt zu empfehlen.

## Zeitverhalten von Thermoelementen

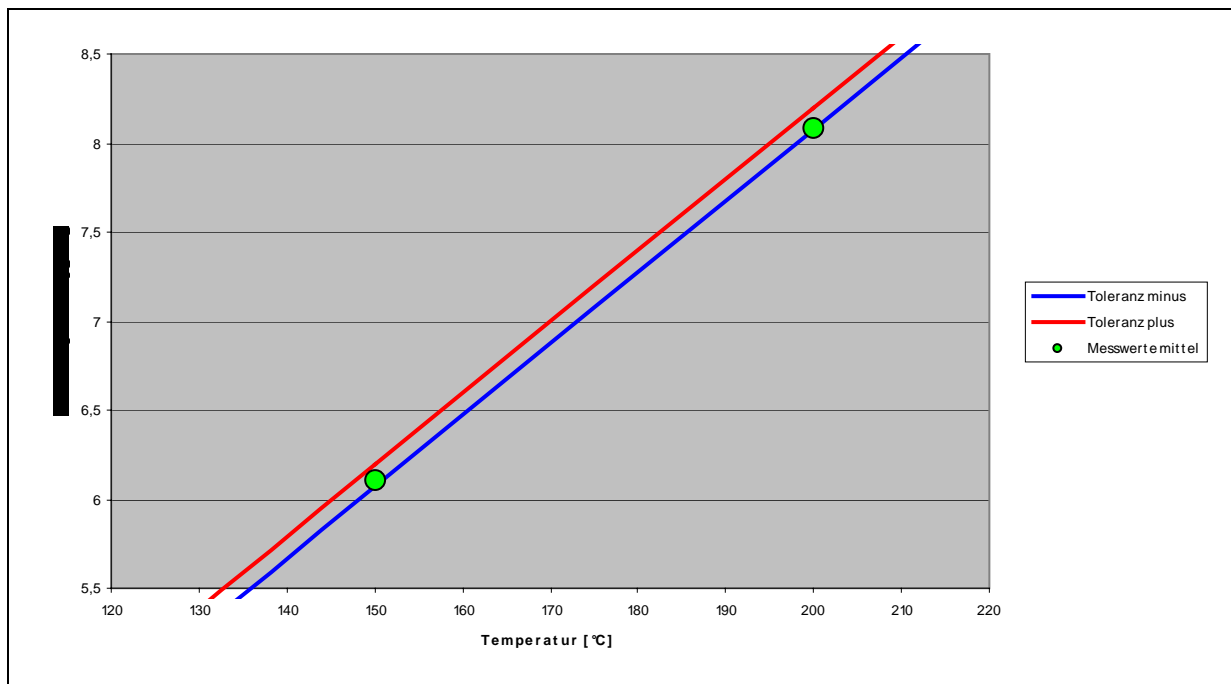
Die Grenzabweichungen in den Tabellen der DIN IEC 584 [3] beschreiben stets den Auslieferungszustand / Idealzustand eines Thermoelements. Thermoelemente unterliegen jedoch einem Alterungsverhalten, das zu einer Drift der Thermospannung führen kann. Eine genaue Voraussage über das Alterungsverhalten und die Lebensdauer eines Thermoelements ist leider nicht möglich, da die Einsatzbedingungen hierfür entscheidend sind:

- Einsatztemperatur
- Temperaturwechselbelastung
- Betriebsatmosphäre
- Mechanische Wechselbelastung

Bei [5] wird für ein K Typ Thermoelement z.B. eine Drift von ca. 1K nach  $10^4$  Stunden bei einer Betriebstemperatur von  $649^{\circ}\text{C}$  angegeben. Für das Weichlöten sind diese Werte jedoch nicht übertragbar, da hier weit geringere Betriebstemperaturen ( $\leq 300^{\circ}\text{C}$ ) herrschen.

Will man das Alterungsverhalten von Thermoelementen bei Langzeit-Messaufgaben berücksichtigen, ist der Einsatz von vorgealterten Thermoelementen sinnvoll. Allerdings erhöht dies ebenfalls ihren Preis.

Um die Drift von Thermoelementen unter Weichlötbedingungen zu bestimmen hat rehm Anlagenbau in Zusammenarbeit mit TechnoLab eine große Zahl von Thermoelementen untersucht, die durchschnittlich 6,5 Jahre in Reflowöfen in unterschiedlichen Fertigungsstätten im Einsatz waren. Bild 4 zeigt den Verlauf der Thermospannung im Bereich der Referenztemperatur von  $120$  bis  $220^{\circ}\text{C}$ .



*Bild 4: Driftverhalten von Thermoelementen nach einem Einsatz im Reflowofen*

Über den untersuchten Temperaturbereich von  $0$  bis  $300^{\circ}\text{C}$  wurde von TechnoLab eine Drift der „gealterten“ Thermoelemente innerhalb der in der DIN IEC 584 zulässigen Grenzen festgestellt.

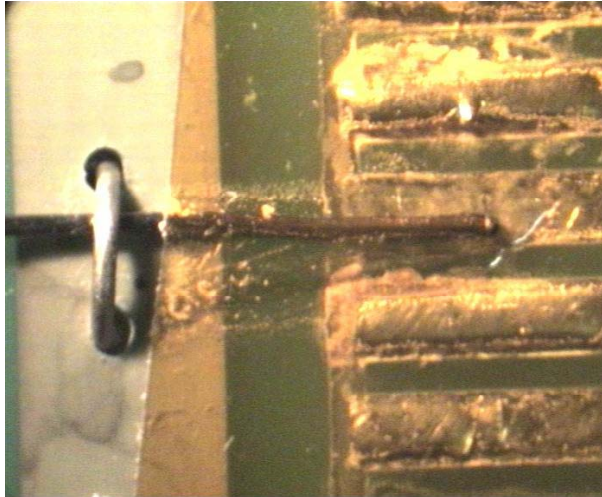
### Fixierung der Thermoelemente am Messort

Bei der Kontaktierung der Thermoelemente am Messort (auf der Baugruppe) gilt der Grundsatz: „Herstellung einer dauerhaften Verbindung mit einer ausgezeichneten thermischen Leitfähigkeit, bei gleichzeitig sicherer mechanischer Fixierung“. Hierfür eröffnen sich wiederum mehrere Möglichkeiten:

- Einfaches mechanisches Klemmen
- Löten oder Schweißen
- Kleben

Bei guter Ausführung werden mit allen Fixierungsarten die gleichen Messergebnisse erzielt.

Bild 5 zeigt die Fixierung eines Thermoelements mittels eines Klebestreifens. Hierfür stehen Tapes aus Kapton, Aluminium, leitfähigem Flex und Glasfasergewebe zur Verfügung. Um die Verbindung zu sichern, sollte das Thermoelement stets mechanisch entlastet werden.



*Bild 5: Fixierung eines Thermoelements mittels eines Kaptontapes*

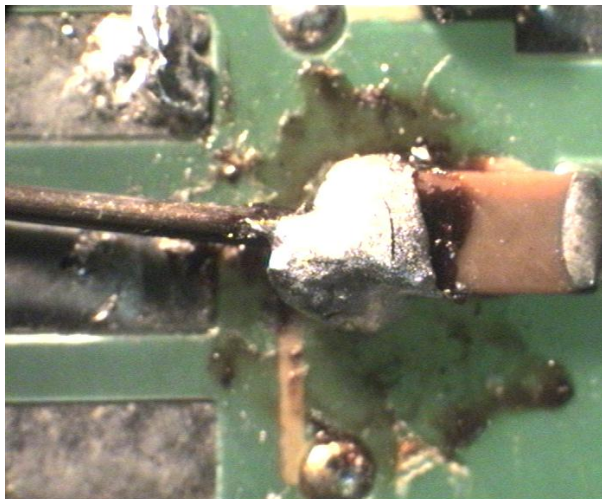
Der Nachteil bei der kostengünstigen und schnell realisierbaren Fixierung mittels eines Tapes liegt in dem relativ großen Flächenbedarf auf der Baugruppe und der geringen Langzeitstabilität. Oft sind die Verbindungen bereits nach wenigen Reflowdurchläufen unbrauchbar. Für eine dauerhafte Montage mit einer höheren Zyklenzahl ist eine Hochtemperaturlötung (Bild 6) empfehlenswert. In der Praxis ist diese Montagevariante allerdings mit Problemen verbunden:

Das verwendete Lot ist meist ein hoch bleihaltiges Lot (Pb90Sn), welches sich schwer verarbeiten lässt.

Der Edelmantel des Thermoelements ist wenig benetzungsfreudig.

Die Baugruppe wird meist irreparabel beschädigt.

An der Messstelle wird die thermische Masse um die Lotmenge erhöht.



*Bild 6: Fixierung eines Thermoelements mittels Hochtemperaturlotes*

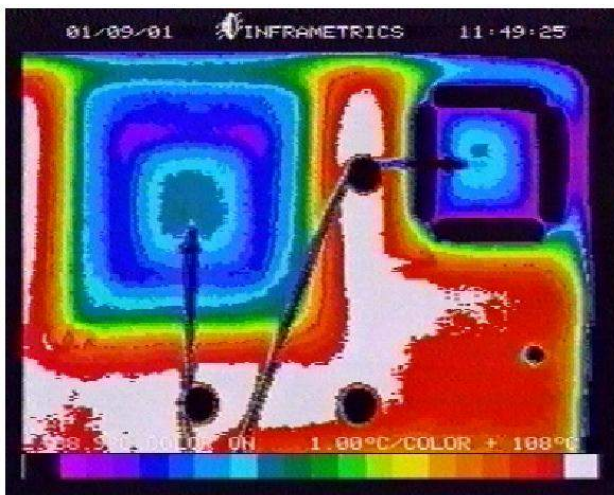
Die in der Alltagspraxis einer Baugruppenfertigung empfehlenswerteste Methode ist die Kontaktierung mittels temperaturbeständigem Klebstoff. Solche Klebstoffe sind in fast jeder Baugruppenfertigung verfügbar, da sie zur Montage von SMD benötigt werden. Beim Kleben an den Messort muss zunächst eine sehr gute mechanische Kontaktierung zwischen dem Thermoelement und dem Messort (z.B. einem Bauelement) hergestellt werden, bevor der Klebstoff appliziert wird. Um die Masseverhältnisse am Messort nicht wesentlich zu verändern, darf nur soviel Klebstoff verwendet werden, wie zur Fixierung unbedingt erforderlich ist (siehe Bild 7).



*Bild 7: Fixierung eines ungemantelten Thermoelements mittels SMD-Klebstoffs*

Nach [6] sind systematische Messfehler von mehreren Kelvin nicht ausgeschlossen, wenn die Präparation des Messboards nicht optimal ist. Einerseits kann die den Thermoelementdraht umgebende Atmosphäre (noch in einigen Millimeter Entfernung von der Messspitze) die Temperatur an der Messspitze verfälschen. Andererseits sind Messfehler vorprogrammiert, wenn die thermische Ankoppelung zwischen Messspitze und Messgut (Baugruppe) nicht ideal hinsichtlich eines kleinen thermischen Widerstands ist.

Die Anbindung der Thermoelemente ist auf dem PTP-Messboard ideal gelöst. Das Thermobild 8 zeigt, dass die Messspitzen der Thermoelemente über einige Millimeter die Temperatur der Messstelle angenommen haben.



*Bild 8: Thermobild von zwei Messstellen auf dem PTP*



## Applikationsbeispiele

### Quer-/Breitenprofile

Sowohl beim Wellenlöten als auch beim Reflowlöten sind Temperaturprofile wichtig, die das Verhalten des Lötanlage über die Transportbreite widerspiegeln. Größere Temperatur-Differenzen über der Transportbreite, die nicht durch eine Nachjustage der Anlage beseitigt werden können, müssen bei der Erstellung der Lötparameter berücksichtigt werden.

Bild 9 zeigt das Breitenprofil einer Wellenlötanlage, mit dem Aussagen zur Parallelität gemacht werden können. Sind beim Messdurchlauf die ermittelten Benetzungszeiten und die erreichten Endtemperaturen annähernd gleich, kann von der Parallelität der Transportebene zur Lotwelle ausgegangen werden. Taucht das Messbord jedoch auf einer Seite des Transports stärker in das Lot als auf der anderen Seite, werden die ermittelten Endtemperaturen und die Benetzungszeiten zwischen den drei Thermoelementen voneinander differieren.

In der Praxis wird es stets geringe Abweichungen in der Benetzungszeit geben, da die Benetzungsfront der Lotwelle im allgemeinen keine ideale Linie ausbildet. Meist ist die Benetzungsfront zur Mitte konvex gewölbt, wodurch die längeren Benetzungszeiten am Sensor Mitte erklärbar sind. Die Temperaturdifferenzen zwischen den Sensoren Links und Rechts geben dem Anlagenbediener einen Hinweis auf ein hier nicht optimales Parallelitätsverhalten.

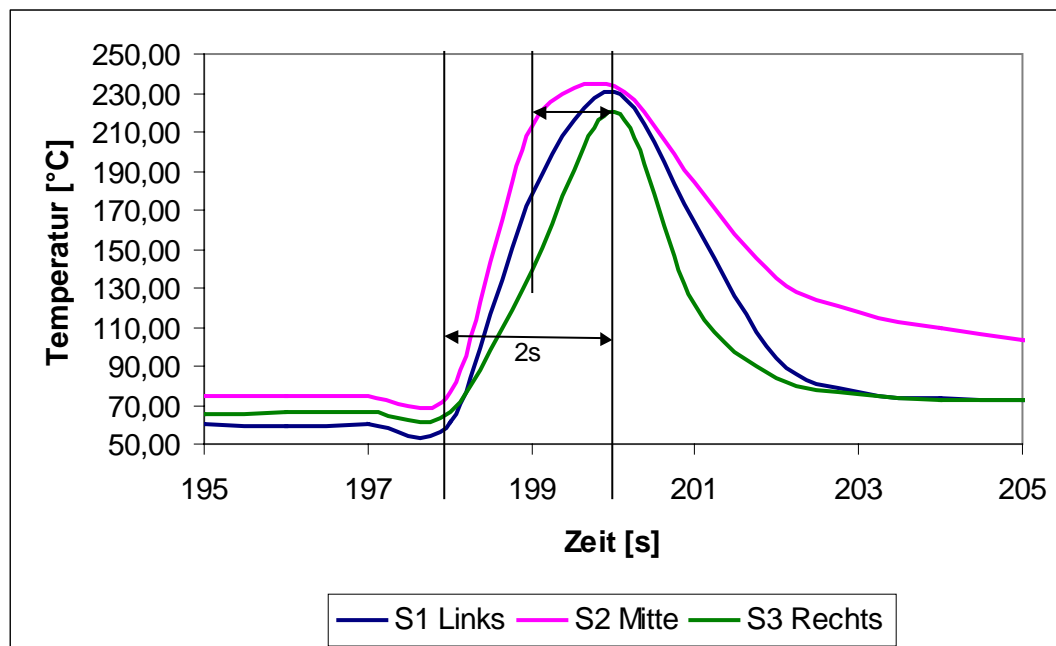


Bild 9: Parallelität Lotwelle / Transportsystem

### Messstandards

Das PTP Messboard bietet die Möglichkeit, die thermischen Verhältnisse vieler Baugruppen auf einem langzeitstabilen Messboard abzubilden. Durch die Langzeitstabilität der verwendeten Thermoelemente und deren Verbindungsstellen ist die Voraussetzung dafür geschaffen worden, eine Kalibrierung vornehmen zu können.

Der Temperaturverlauf der Messstandards entspricht dem von Messstellen auf einem realen Board. Hierdurch kann die aufwändige Präparation von Messboards aus realen Boards entfallen (Golden Boards), die überdies sowieso nicht für mehrere Messdurchläufe geeignet sind, da sich die Bauelemente- und Leiterplattenmaterialien durch die thermische Belastung stetig verändern. Bild 10 zeigt das simulierte Temperaturverhalten eines SMD auf der Wellenlötseite (S13 unten) im Vergleich zum Aufheizverhalten von simulierten Elektrolytkondensatoren (S14, 15, 16).

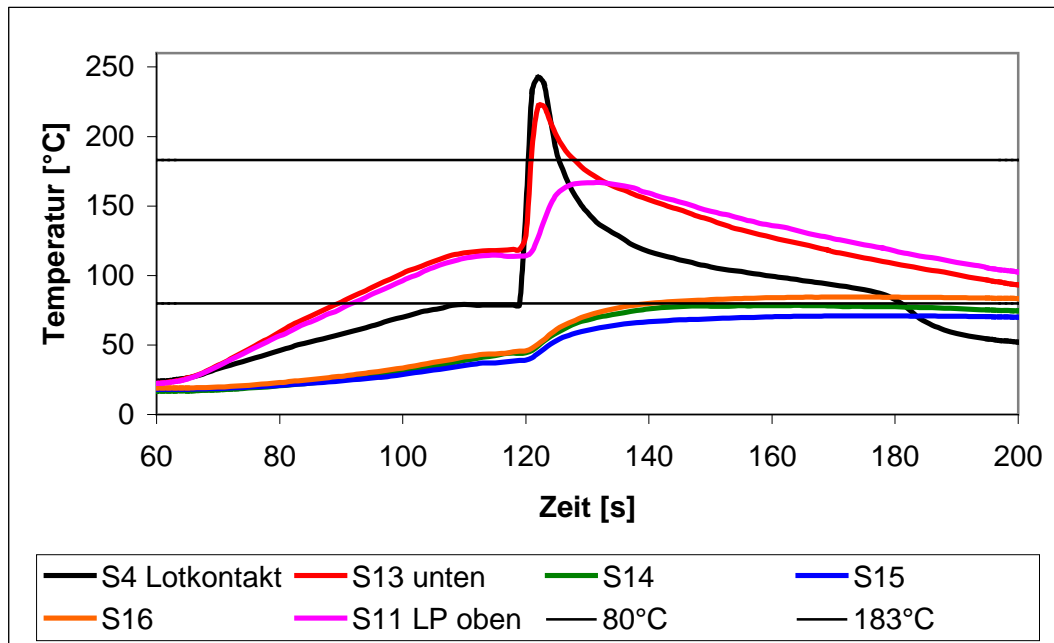


Bild 10: Wellenlötten, Temperaturkurven unterschiedlicher Messstandards

Auf Bild 11 sind die Temperaturkurven von unterschiedlichen Messstandards für eine lineare Reflowprofilierung gezeigt. Diese Kurvenschar gestattet die Abbildung realen Baugruppenverhaltens über einen weiten Temperaturbereich, also die Simulation von unterschiedlichen Messorten auf einer Baugruppe.

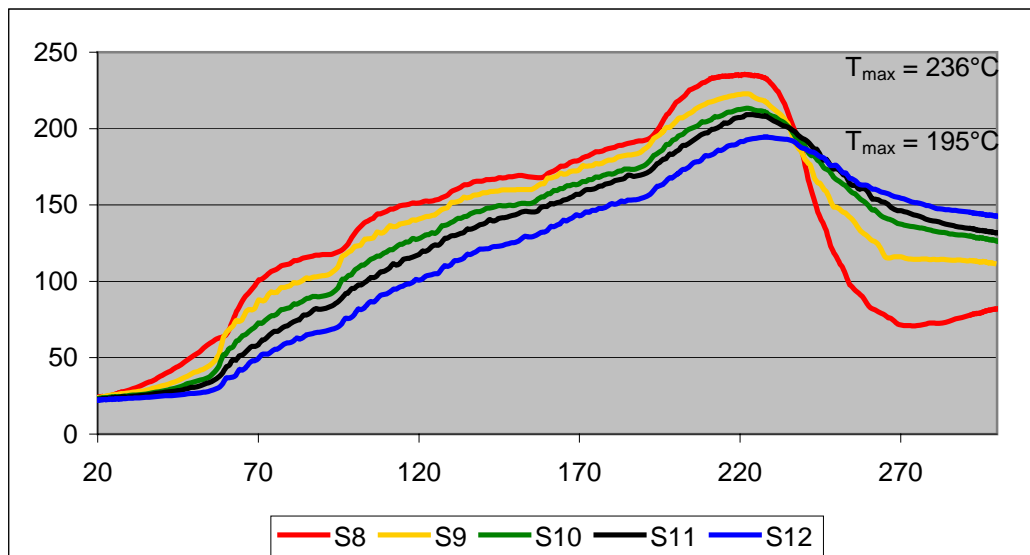


Bild 11: Reflowlötten, Temperaturkurven unterschiedlicher Messstandards

### Wellenhöhe / Wellendruck

Eine spezielle stufenförmige Anordnung der Sensoren ermöglicht Aussagen über die eingestellte Wellenhöhe und den Wellendruck einer Lötanlage. Ein Kontakt des Sensors mit der Lotwelle führt stets zu einem ausgeprägten Temperaturpeak mit sehr steilen Aufheizflanken. Fehlt dieser Peak an einer Messstufe kann davon ausgegangen werden, dass die Wellenhöhe zu gering ist. Auf dem Bild 12 ist ein solcher Fall zu sehen.

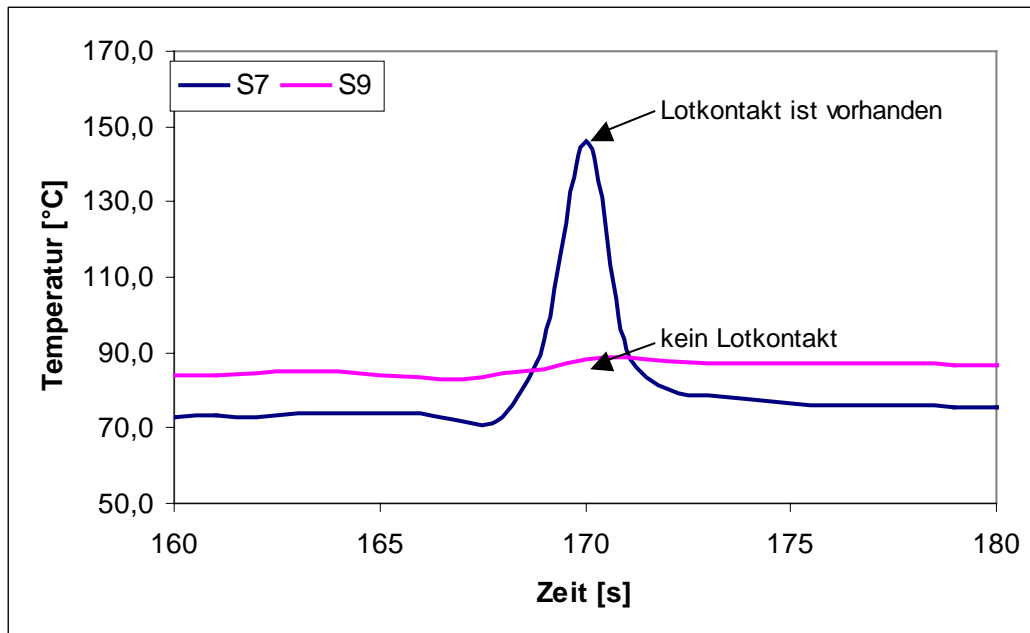


Bild 12: Wellenhöhe / Wellendruck

## Fazit

Temperaturmessungen beim Weichlöten von elektronischen Baugruppen sind immer mit Toleranzen verbunden, die einerseits von der Wahl der Thermoelemente sowie dem verwendeten Messsystem, und andererseits von der Kontaktierung der Thermoelemente am Messort abhängig sind. Diese Toleranzen sind bei der Einstellung der Lötparameter stets zu berücksichtigen.

Reale Baugruppen sind für Messaufgaben im Rahmen eines Qualitätsmanagements (ISO 9000+) kaum geeignet. Sie sind nur bedingt kalibrierfähig und verändern nach wenigen Messdurchläufen ihr thermisches Verhalten.

Das PTP Messboard bietet die Möglichkeit, die thermischen Verhältnisse vieler Baugruppen auf einem langzeitstabilen Messboard abzubilden. Durch die Langzeitstabilität der verwendeten Thermoelemente und deren Verbindungsstellen ist die Voraussetzung dafür geschaffen worden, eine Kalibrierung vornehmen zu können.

## Literatur

- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| [1] Heinz Herwig              | Wärmeübertragung A-Z, S. 377 ff, Springer Verlag Berlin, 2000  |
| [2] Brockhaus                 | Brockhaus abc Physik, Brockhaus Verlag Leipzig 1973, S. 1559   |
| [3] DIN IEC 584               | Thermopaare, Grundwerte der Thermospannungen<br>Beuth Verlag Berlin, Januar 1984                                   |
| [4] globalPoint ICS GmbH      | Firmenprospekt, Malteserstr. 170-172, 12277 Berlin<br>Tel.: 030 72019010, info@gp-ics.com                          |
| [5] Unitherm Messtechnik GmbH | Präsentation Thermoelemente, Bruchköbel 2001   |
| [6] M. Poech, H. Bell         | Gibt es ein optimales Reflow-Profil, Proceedings der<br>DVS/GMM-Fachtagung, 6./7.Feb.2002 Fellbach, S. 383 ff      |
| [7] Jürgen Friedrich          | Lötsysteme in der bleifreien Elektronikfertigung, Konferenz-<br>band zur 11. FED-Konferenz, Ludwigsburg 20.09.2003 |