

Reflowlöten

Grundlagen, Verfahren,
Temperaturprofile und Lötfehler

Dr. Hans Bell

Erste Auflage mit 217 Abbildungen
und 41 Tabellen

Fachverlag für
• Oberflächentechnik – Galvanotechnik
• Produktion von Leiterplatten
und Systemen
(Baugruppenteknik)

EUGEN G.
LEUZE
VERLAG

103 JAHRE 1902 – 2005

BAD SAULGAU
GERMANY

Vorwort

Das Reflowlöten ist das wichtigste Masselötverfahren in der elektronischen Baugruppenfertigung. Seine Robustheit und Flexibilität beweist der Reflowprozess weltweit bei der Verarbeitung unterschiedlicher Weichlote, vielfältiger Bauelementegeometrien und sehr verschieden lötbaren Oberflächen. Die große Anzahl differenter technischer Ausrüstungen widerspiegelt die Vielfalt der Möglichkeiten, Lötverbindungen mittels Reflow herzustellen.

Dieses Buch soll die Praktiker in der Baugruppenfertigung mit den zahlreichen Facetten des Reflowprozesses vertraut machen, wobei die wesentlichen Grundzüge des Weichlötens und die Prinzipien der Wärmeübertragung erläutert werden. Dabei werden Hilfestellungen zur Erstellung und Bewertung von Reflowprofilen gegeben und wichtige Fehlermechanismen und -ursachen diskutiert. Es ist weder ein Nachschlagewerk für Lotwerkstoffe und deren Parameter, noch für internationale Normen und Vorschriften. Vielmehr wird beabsichtigt, anhand von Beispielen das ganzheitliche Denken anzuregen und die komplexen Mechanismen des scheinbar trivialen Reflowlötens aufzuzeigen.

„Kinder betet – Vater lötet!“ (*Alter Spruch der Goldschmiede*)

Dr. Hans Bell

Berlin im Oktober 2004

Danksagung

Zahlreiche in diesem Buch verwendete oder zitierte Erkenntnisse sind im Laufe einer langen, fruchtbaren Zusammenarbeit mit vielen Fachkollegen entstanden. Dafür danke ich insbesondere: *Thomas Ahrens, Dietmar Birgel, Harry Berek, Lutz Bruderreck, Jochen Burkhardt, Joachim Erhard, Felix Haas, Klaus Halser, Karl-Peter Hauptvogel, Heinz Herwig, Christian John, Frank Karger, Marco Kämpfert, Isabella Koenen, Wilfried Kolb, Michael Kröhl, Bernhard Lange, Andreas Moschallski, Mathias Nowotnick, Max Poech, Johannes Rehm, Gundolf Reichelt, Ulrich Rosemeyer, Bernd Rues, Karl-Heinz Schaller, Wolfgang Scheel, Harry Trip, Jürgen Villain, Eli Westerlaken, Heinz Wohlrabe, Wolfgang Zeifang.*

Besonderer Dank gilt meiner Frau *Franziska Bell* für die tatkräftige Hilfe bei der Entstehung des Buchs und meiner Kollegin *Annick Vernet* für die geduldige Erstellung einiger Grafiken.

Dr. Hans Bell

1 Grundlagen des Reflowlötens

1.1 Weichlöten/Weichlote

Die sehr guten elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften von Weichlötverbindungen und ihre hohe Kosteneffizienz sind die wesentlichen Gründe dafür, dass das *Löten* nach wie vor die wichtigste Technologie zur Realisierung der elektrischen und mechanischen Verbindungen in der Flachbaugruppenfertigung darstellt. Dabei ist das Reflowlöten das wesentliche Maschinenlötverfahren für elektronische Flachbaugruppen. Beim Reflowlöten wird das Lot meist in Form einer Lotpaste auf die Leiterplatte aufgebracht und in einem Reflowofen umgeschmolzen (*Abb.-sequenz 1.1*).



Abb. 1.1: Der Reflowprozess an einem 0402-Chip

Weichlöten ist ein stoffschlüssiges Verbindungsverfahren, bei dem Metalle oder Legierungen durch andere Lot-Metalle oder -Legierungen verbunden werden, wobei der Schmelzpunkt der Grundwerkstoffe (z. B. Kupfer) nicht erreicht wird. Der Bereich des Weichlötens ist bis zu einem Schmelzpunkt des Lotes ≤ 450 °C definiert – beim Löten über 450 °C spricht man vom Hartlöten. Bleifreies Löten mit z. B. den in der *Tabelle 1.1* aufgeführten Lötens ist also ebenfalls Weichlöten bei erhöhter Temperatur, im Vergleich zu dem bisherigen Sn63Pb-Standardlötprozess.

Die europäische Initiative *Directive on Waste Electrical and Electronical Equipment (WEEE)* fordert ein Verbot von Blei in neu in den Verkehr gebrachte Elektro- und Elek-

Tabelle 1.1: Legierungen

<i>Legierung</i>	<i>Schmelzpunkt [°C]</i>	<i>Homologe Temperatur bei 150 °C</i>	<i>Bemerkungen</i>
Sn63Pb	183	0,93	Standardlot
SnPb36Ag2	179	0,94	Standardlot
SnIn20Ag2,8	179 - 189	0,94	Hoher In-Gehalt teuer
SnZn9	199	0,90	Korrosion
SnBi4,8Ag3,3	212	0,88	Bi-Gehalt Zuverlässigkeit
SnAg4Cu0,5	216 - 217	0,86	Gute Lötergebnisse
SnAg3,5	221	0,86	Hohe Cu-Lösegeschwindigkeit
SnCu1	227	0,85	Hoher Schmelzpunkt

tronikgeräte ab dem 1. Juli 2006 [1.1]. Daher erfährt der seit ca. 4000 Jahren (das Weichlöten wurde ca. 2000 v. Chr. in Mesopotamien und Ägypten entdeckt) bekannte Weichlötprozess mit Zinn-Blei-Lot gegenwärtig einen qualitativen Wandel hin zu der Verarbeitung von bleifreien Loten.

Sehr viele Lotlegierungen sind seit langem bekannt und werden je nach ihren charakteristischen Eigenschaften in unterschiedlichen Applikationen verwendet. Insbesondere die höheren Betriebstemperaturen elektronischer Systeme begrenzen den Einsatz niedrigschmelzender Lotwerkstoffe. So werden für einige elektronische Systeme in Kraftfahrzeugen Betriebstemperaturen von 160 °C erreicht, wie die *Tabelle 1.2* zeigt. Daher ist in der Automobilelektronik-Industrie das bleifreie Lot Zinn-Silber SnAg3,5 mit einem Schmelzpunkt von 221 °C und im Vergleich mit Sn63Pb niedrigeren homologen Temperatur eine seit Jahren eingeführte Legierung.

Tabelle 1.2: Betriebs-/Einsatztemperaturen für Weichlote im Automobil

<i>Einsatzbereich</i>	<i>Betriebstemperatur [°C]</i>	<i>Spitzentemperatur [°C]</i>
Fahrzeuginnenraum	- 40 bis + 90	+105
Motorraum	- 40 bis +120	+120
Direkt am Motor	- 40 bis +140	+150
Direkt im Getriebe	- 40 bis +140	+160

1.2 Homologe Temperatur

Die dimensionslose homologe Temperatur gibt das Verhältnis der Betriebstemperatur zur Schmelztemperatur einer Legierung an. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei der Be-

rechnung der homologen Temperatur in Kelvin gerechnet wird ($0\text{ °C} = 273\text{ K}$). Mit einer homologen Temperatur von 1 ist das Lot also flüssig und leicht deformierbar, während es mit einer kleineren homologen Temperatur schwerer deformierbar wird. Die normierte Festigkeit der Metalle nimmt ab etwa einer homologen Temperatur von 0,4 progressiv ab [1.2]. Lote werden noch mit homologen Temperaturen von $\leq 0,9$ eingesetzt. Für Einsatzbereiche direkt am Motor wäre also Zinn-Blei-Lot Sn63Pb mit einer homologen Temperatur von 0,93 nicht geeignet. Das Kriechen wird dann zu einem wesentlichen Deformationsmechanismus. Aus diesem Grund werden üblicherweise Metalle in Standardanwendungen (z. B. im Stahlbau) immer bei homologen Temperaturen von $\leq 0,5$ verwendet. Dies ist mit Weichlotverbindungen kaum möglich – SnAg3,5-Lot hat bereits bei Raumtemperatur eine homologe Temperatur von 0,6! Daher sind Zuverlässigkeitsprüfungen an ausgewählten Weichlotverbindungen unerlässlich.

Notiz

Die homologe Temperatur (Betriebstemperatur dividiert durch Schmelztemperatur) ist ein normiertes Maß für die Festigkeit der Metalle.

1.3 Struktur der Weichlote

Bei der Erstarrung bilden Metalle meist einfache Kristallstrukturen – z. B. das kubisch flächenzentrierte (hexagonal dichteste Kugelpackung) und das kubisch raumzentrierte Gitter. Kupfer (Cu), Silber (Ag) und Blei (Pb) kristallisieren im kubisch flächenzentrierten Gitter, welches die *Abbildung 1.2* zeigt.

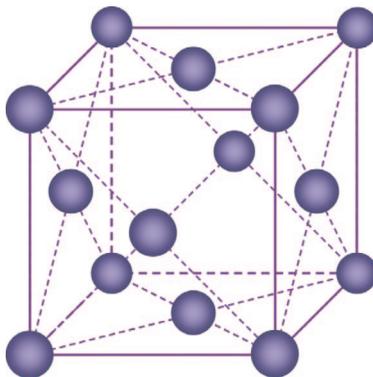


Abb. 1.2: Kubisch flächenzentrierten Gitter/hexagonal dichteste Kugelpackung

Reines Zinn kommt in drei Modifikationen vor. Aus der Schmelze (Schmelzpunkt $T_s = 231,85 \text{ °C}$ [1.3]) kristallisiert normalerweise das tetragonale weiße metallische β -Zinn. Erhitzt man metallisches Zinn von Raumtemperatur auf über 162 °C , wandelt sich das β -Zinn in rhombisches sehr sprödes γ -Zinn um. Kühlt man metallisches Zinn unter 13 °C ab, entsteht die nichtmetallische kubische Modifikation, das α -Zinn. Diese Umwandlung geht einher mit einer drastischen Änderung der Dichte (β -Zinn: $7,28 \text{ g/cm}^3$, α -Zinn: $5,85 \text{ g/cm}^3$ [1.4]) und der Freisetzung von Wärme. Mit abnehmender Temperatur nimmt die Umwandlungsgeschwindigkeit zu und erreicht bei -48 °C ein Maximum. Lötstellen aus reinem Zinn können bei tiefen Temperaturen vollständig zerstört werden, sie werden aufgrund der enormen Volumenzunahme bei der Umwandlung in α -Zinn geradezu pulverisiert. Diese Erscheinung nennt man Zinnpest. Normalerweise gehen die Umwandlungsprozesse sehr langsam vonstatten. Metallische Verunreinigungen im Zinn können ebenfalls die Umwandlungsgeschwindigkeit stark beeinflussen. So ist bei [1.5] zu lesen, dass Spuren von Aluminium (Al), Zink (Zn), Kupfer (Cu) oder Mangan (Mn) beschleunigend wirken, während Blei (Pb), Silber (Ag), Wismut (Bi), Antimon (Sb) und Gold (Au) die Umwandlung verzögern. Das Beispiel des reinen Zinns zeigt, dass für die Zuverlässigkeit einer Weichlotverbindung nicht nur das gewählte Metall entscheidend ist, sondern auch seine Struktur.

Die Zinnpest spielt bei modernen Weichloten keine Rolle. Reines Zinn ist überdies aufgrund seines relativ hohen Schmelzpunktes nicht für das Weichlöten von elektronischen Baugruppen geeignet.

Abbildung 1.3 zeigt das Gefüge einer SnPb-Lötstelle. Im Gefüge sind unterschiedlich orientierte Kristalle (Körner) nebeneinander zu erkennen, die durch Korngrenzen (rot) voneinander getrennt sind. In den einzelnen Körnern sind die bleireichen Phasen (dunkel) von den zinnreichen Phasen deutlich unterscheidbar.

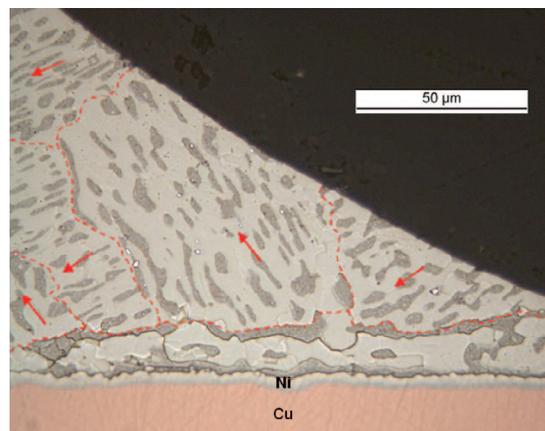


Abb. 1.3: Gefüge einer SnPb-Lötstelle (die Pfeile kennzeichnen die Orientierung der Körner, die roten Linien die Korngrenzen)

2 Lotpasten und Schablonendruck

2.1 Eigenschaften von Lotpasten

Lotpasten sind der wesentliche Hilfsstoff beim Reflowlöten. Sie bestehen aus Metallpulvern und einer zähflüssigen (viskosen) Phase aus organischen (z. B. Harze) und anorganischen (z. B. Aktivatoren) Stoffen, die sowohl die Druckeigenschaften (rheologische Eigenschaften) als auch die Löteneigenschaften der Paste bestimmen sollen. Die großen Dichtedifferenzen zwischen dem Lot und der viskosen Phase führen zu erheblichen Unterschieden zwischen dem Volumenverhältnis und dem Gewichtsverhältnis der Pastenbestandteile, wie die *Tabelle 2.1* schematisch zeigt.

Tabelle 2.1: Mengenverhältnis

	<i>Metallpulver Lot</i>	<i>Viskose Phase (Flussmittel)</i>
Volumen [%]	51	49
Gewicht [%]	90	10

Aufgrund der geringeren Dichte bleifreier Legierungen gegenüber dem SnPb nimmt deren Gewichtsanteil entsprechend ab (*Tab. 2.2*).

Tabelle 2.2: Dichte der Lotlegierungen nach [2.1]

<i>Lot</i>	<i>Dichte [g/cm³]</i>	<i>Gewichtsanteil gegenüber Sn63Pb [%]</i>
Sn63Pb	8,8	100
SnCu0,7	7,321	83,2
SnAg3,2	7,422	84,3
SnBi9,5Cu0,5	7,550	85,8
SnAg4,5Bi1,5Cu1,5	7,514	85,4
SnAg4,6Cu1,7Sb0,8	7,479	85
SnBi4,8Ag3,5	7,534	85,6

Insbesondere bei der Dimensionierung von Lötstellen aufgrund von Paddesigns und Schablonenöffnungen (Aperturen) sind die unterschiedlichen Volumenanteile Lotmetall und Flussmittel von Bedeutung (siehe hierzu *Abschnitt 2.2.4 Layout der Aperturen*).

Moderne Lotpasten enthalten fast ausschließlich Metallpulver, welches aus *idealen* runden Kugeln *besteht* (Abb. 2.1 und 2.2). Kugeln verleihen vor allen anderen Formen der Paste die besten Fließ- und Rolleigenschaften. Die Kugelgröße muss den Layoutgegebenheiten entsprechen, d. h. der Pastentyp sollte entsprechend der kleinsten Schablonenöffnung oder dem kleinsten Rastermaß ausgewählt werden. Für Finepitch-Applikationen von 0,5 mm Rastermaß werden 150 μm dicke Druckschablonen und Typ-3-Lotpasten, mit einer Kornverteilung von 25 bis 45 μm häufig verwendet. Die Korngrößenverteilung in den Lotpasten ist international normiert (siehe J-STD-005 und DIN 32513).

Geringe Rastermaße erfordern eine hohe Konturenstabilität der Lotpaste nach dem Druck, d. h. einen geringen bzw. gar keinen Slump. Unter Slumping wird das zeitabhängige Aus-

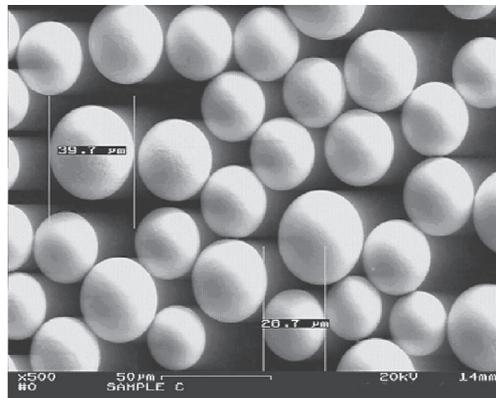


Abb. 2.1: Lotpulver Typ 3
Sn95,5Ag4Cu0,5



Lotkorn Sn63Pb

Lotkorn Sn91Zn9

Lotkorn Sn95,5Ag4Cu0,5

Abb. 2.2: Lotkörner verschiedener Legierungen

einanderlaufen eines gedruckten Pastendepots verstanden. Insbesondere die thixotropen Eigenschaften (Steifigkeit der Paste, Definition siehe *Notiz*) der Lotpaste beeinflussen deren Slumpverhalten. Slumping kann nach dem Reflow zu Brückenbildung und/oder Lotperlen (siehe *Abschnitt 6*) führen (*Abb. 2.3*).

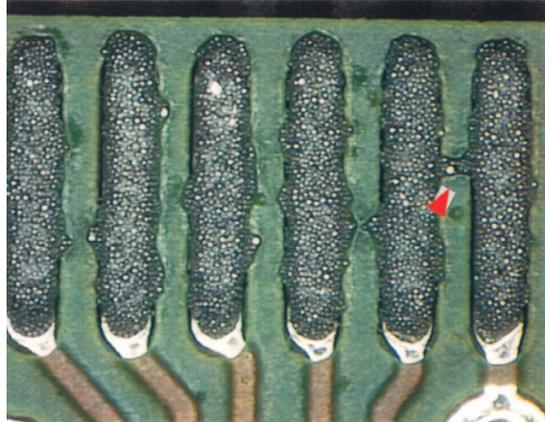


Abb. 2.3: Slumping von Lotpastendepots, QFP Pitch 0,5 mm

Nach dem Löten verbleiben die Flussmittelreste auf der Baugruppe, wie auf der *Fluoreszenzabbildung 2.4* sehr schön zu sehen ist. Diese Reste (Residues) sind chemisch so formuliert, dass sie nicht korrosiv wirken und Elektromigration (die Wanderung von Ionen in einem Potentialfeld) nicht fördern. Zum Teil wird auch das einhüllende Verhalten der Harze im Flussmittel genutzt, um die Lötstelle vor Umwelteinflüssen zu schützen.

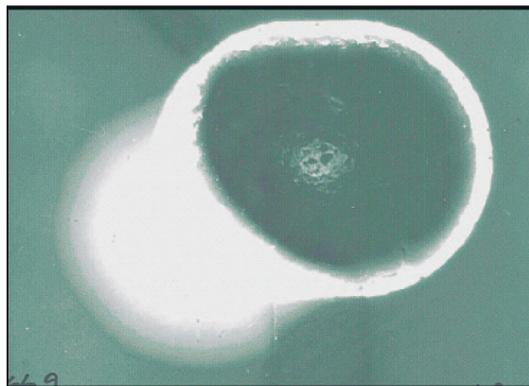


Abb. 2.4: Flussmittelreste an einer Reflowlötstelle/Fluoreszenzbild

No-clean-Prozesse verlangen die sparsame Verwendung von Flussmitteln und anderen Zusatzstoffen (viskose Phase) in der Paste. Dies ist in zweierlei Hinsicht kritisch. Mit der Verkleinerung der Korngrößen von z. B. 45 auf 25 μm in der Paste steigt die freie Oberfläche der Körner annähernd auf 165 % (bezogen auf einen Würfel von 1 mm^3). Bezogen auf ein QFP-Pad mit den Abmessungen von 250 x 1000 x 150 μm^3 nimmt die freie Kornoberfläche nochmals zu und erreicht ca. 180 %. Die wesentlich größere freie Oberfläche von Pasten mit kleineren Korndurchmessern erfordert einen besseren Schutz vor Oxidation, was meist durch Anpassung der Flussmittel dieser Pasten erreicht werden kann.

Allgemein kann formuliert werden: Jede Paste besitzt individuelle Eigenschaften, auch wenn *nur* die Korngröße geändert wurde, Legierung und Flussmittel aber gleich blieben. Eine Fertigungserprobung ist daher stets empfehlenswert.

Flussmittel und viskosen Zusätze machen aus dem Korngebände erst eine druckfähige Paste. Die Klebkraft dieser Stoffe hält die Körner zusammen. Für jede Kombination Lotkörner und viskoser Phase gibt es ein natürliches Mengenverhältnis, welches über ein optimales Druckverhalten entscheidet. Ein Zuwenig an dieser Phase (Flussmittel) kann zu ungenügenden Gebrauchseigenschaften der Paste führen, wie auf der *Abbildung 2.5* zu sehen ist.

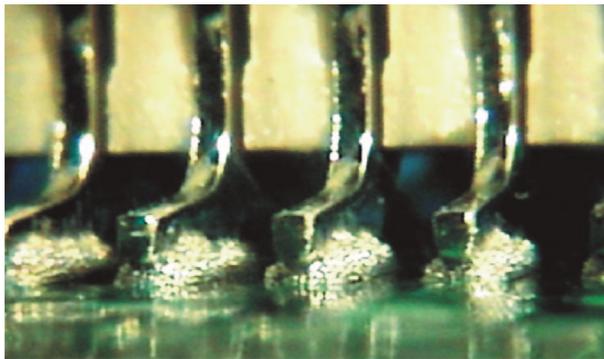


Abb. 2.5: Flussmittelarme Paste – völlig unzureichendes Umschmelzergebnis

Neben den reduzierenden Eigenschaften (Beseitigung von Oxiden) hat das Flussmittel (bzw. die viskose Phase) auch die Aufgabe, der Paste eine bestimmte Klebkraft (Tackiness) zu verleihen, um ein gutes Haften der bestückten Bauelemente auf der Leiterplatte zu garantieren. Mit Messverfahren, bei denen z. B. ein Stift für eine kurze Verweilzeit mit definiertem Druck auf ein Pastendepot aufgesetzt wird, und anschließend beim vertikalen Abheben des Stifts die Kraft gemessen wird, kann die Klebkraft bestimmt werden (*Abb. 2.6*). Die Verarbeitungseigenschaften einer Lotpaste sollten über einen längeren Zeitraum nach dem Öffnen eines neuen vorher verschlossenen Gebindes erhalten bleiben. Den Zeitraum gleichbleibender Eigenschaften nennt man Offenzeit (auch Topfzeit genannt).

3 Temperaturmessungen beim Weichlöten

3.1 Einleitung

Die Temperatur ist eine Zustandsgröße, die Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht charakterisiert. Die Bedeutung der Temperatur für die Beschreibung von Reflowprozessen wird bei der Diskussion von Phasendiagrammen von Lotlegierungen klarer (siehe hierzu *Abschnitt 1, Abb. 1.4*). Für eine gegebene Zusammensetzung der Lotlegierung (z. B. SnAg3,5) ändert sich der Zustand dieser Legierung (fest, flüssig, usw.) in Abhängigkeit von ihrer Temperatur.

Der Begriff der Temperatur muss klar von dem der Wärme unterschieden werden. Temperaturen können nicht übertragen werden – Wärme wird übertragen, wodurch die Temperatur eines Systems steigt!

Im Gleichgewicht haben zwei Systeme (z. B. die Ofenatmosphäre und die Baugruppe) überall die selbe Temperatur. In diesem Fall kann keine Wärme mehr übertragen werden.

Die Temperatur hat in der Kelvinskala am Tripelpunkt des Wassers 273,16 K. Auf Grund dieser Definition ist die Differenz zwischen Tripelpunkt und Siedepunkt des Wassers bei 1 Atmosphäre 100 K. Hierdurch haben die Temperaturdifferenzen in der Kelvin- und in der Celsius-Skala die gleichen Zahlenwerte:

$$1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Bei allen Weichlötverfahren (Reflowlöten, Wellenlöten, Selektivlöten usw.) ist die Übertragung von Wärme auf das Lot und das Lötgut notwendig. Der Wärmestrom vom Ofen auf die Baugruppe kann durch die vereinfachte Beziehung <3.1>

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T_{\text{Ofen}} \quad \begin{array}{ll} \text{Wärmestromdichte [W/m}^2\text{]} & \text{<Gl. 3.1>} \\ \alpha & \text{Wärmeübergangskoeffizient [W/m}^2\text{K]} \\ \Delta T_{\text{Ofen}} & \text{Temperaturdifferenz [K]} \end{array}$$

$$\Delta T_{\text{Ofen}} = T_{\text{Ofen}} - T_{\text{BG}} \quad \begin{array}{ll} T_{\text{Ofen}} & \text{Temperatur des Ofens} \\ T_{\text{BG}} & \text{Temperatur der Baugruppe} \end{array}$$

beschrieben werden [3.1]. Unter der Annahme, dass für ein bestehendes Lötssystem und die zu verarbeitende Baugruppe (Lötgut) der Wärmeübergangskoeffizient annähernd kon-

stant ist, hängt die Wärmestromdichte vor allem von der Temperaturdifferenz ab. Die auf die Baugruppe übertragene Wärme führt zu einer Erhöhung ihrer Temperatur. Wenn man die Baugruppe vereinfacht als einen homogenen Stoff ansieht, lässt sich die zu ihrer Erwärmung erforderliche Wärmemenge wie folgt berechnen <3.2>:

$$q = c \cdot m \cdot \Delta T_{\text{Löten}} \quad \begin{array}{ll} q & \text{Wärmemenge} \\ c & \text{Spezifische Wärme [J/kg} \cdot \text{K]} \\ m & \text{Masse [kg]} \\ \Delta T_{\text{Löten}} & \text{Temperaturdifferenz [K]} \end{array} \quad \text{<Gl. 3.2>}$$

$$\Delta T_{\text{Löten}} = T_{\text{BG}} - T_{\text{RT}} \quad [\text{K}]$$

T_{RT} Raumtemperatur
 T_{BG} Temperatur der Baugruppe
 Löttemperatur

Mit Hilfe der Gleichungen <3.1> und <3.2> lässt sich nach folgender vereinfachter Beziehung abschätzen, welche Temperatur eine Baugruppe zum Zeitpunkt t in einem Reflow-ofen mit der Temperatur T_{Ofen} erlangt <3.3>:

$$\frac{T_{\text{BG}} - T_{\text{Ofen}}}{T_{\text{RT}} - T_{\text{Ofen}}} = \exp\left(-\frac{\alpha \cdot A}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot t\right) \quad \text{<Gl. 3.3>}$$

$$T_{\text{BG}} = T_{\text{Ofen}} + (T_{\text{RT}} - T_{\text{Ofen}}) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot A}{c \cdot m} \cdot t\right)$$

α Wärmeübertragungskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
 c Spezifische Wärme [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
 ρ Dichte [kg/m^3]
 V Volumen [m^3]
 m Masse [kg]
 A Fläche [m^2]
 t Zeit [s]
 T_{Ofen} Temperatur des Ofens [$^{\circ}\text{C}$]
 T_{BG} Temperatur der Baugruppe [$^{\circ}\text{C}$]
 T_{RT} Raumtemperatur bzw. Starttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Die Messung der Temperatur ist mittels verschiedener bekannter Wirkprinzipien möglich [3.2]:

<i>Wirkprinzip</i>	<i>Beispiel</i>
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 den Baugruppen-/Elektronikfertigungen haben sich vor allem Messungen mit Thermoelementen verbreitet.

3.2 Thermoelemente

Die Grundlage der elektrischen Temperaturmessung mittels Thermoelement bildet ein physikalischer Wandlungseffekt, der 1821 von Thomas Seebeck entdeckt und nach ihm benannt wurde. Wird in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen Metallen (A und B) die Kontaktstelle der Metalle unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt, so tritt an der Berührungsstelle eine Thermospannung auf. 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 zusammengeschweißt und der Mess Temperatur T_M ausgesetzt. An der Messstelle, sowie an den der Umgebungstemperatur T_U ausgesetzten Anschlussstellen, entstehen thermo-elektromotorische Kräfte (EMK) [3.3].

Eine Thermospannung deren Größe annähernd proportional der absoluten Temperatur T der Messstelle T_M ist, kann durch nachfolgenden Messaufbau (Abb. 3.1) mit 0 °C Referenz erzielt werden. Eine 0 °C Referenz kann z. B. mit Hilfe von Eiswasser (Eiswürfel + Wasser) realisiert werden. A und B symbolisieren die zwei Metalle des Thermopaars.

In der Praxis ist oft davon auszugehen, dass keine 0 °C Referenzen zur Verfügung stehen, sondern von veränderlichen Umgebungstemperaturen T_U auszugehen ist.

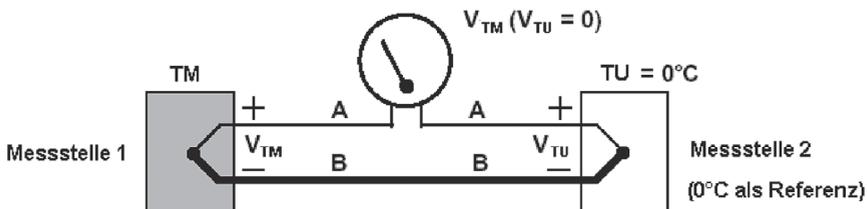


Abb. 3.1: Wirkprinzip mit 0 °C Referenznormal (Eiswasser) nach [3.4]

Bei den im Weichlötbereich verwendeten Temperatur-Messwertaufnehmern wird de facto immer die Kompensation des Einflusses der Umgebungstemperatur T_U durch die Einspeisung einer Korrekturspannung V_{komp} realisiert. Diese Kompensationsspannung V_{komp} wird durch spezielle elektronische Schaltungen (IC's) bereitgestellt und entgegen polarisiert eingespeist. *Abbildung 3.2* zeigt das entsprechende Wirkprinzip.

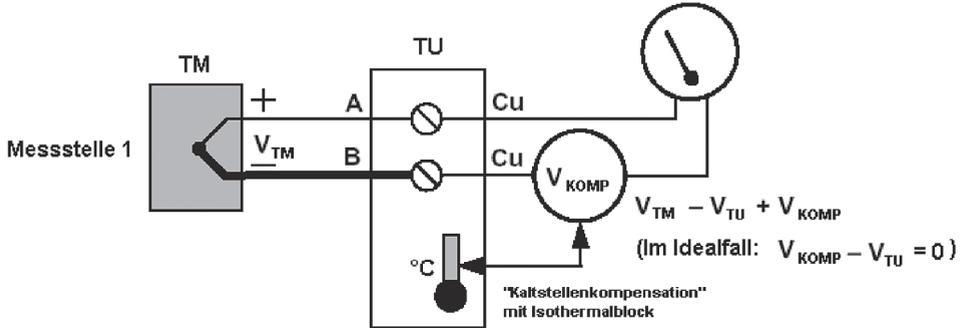


Abb. 3.2: Wirkprinzip mit Fehlerkompensation nach [3.4]

In der DIN IEC 584 [3-5] sind verschiedene Materialpaarungen beschrieben. Zum Beispiel wird das bevorzugt im Weichlötbereich verwendete Typ-K-Thermopaar aus einem Nickel- und einem Chrom-Nickel-Draht gebildet (Ni/CrNi).

Ni/CrNi-Thermoelemente haben in dem für das Löten notwendigen Temperaturbereich (bis 400 °C) einen annähernd linearen Spannungsverlauf (*Abb. 3.3*).

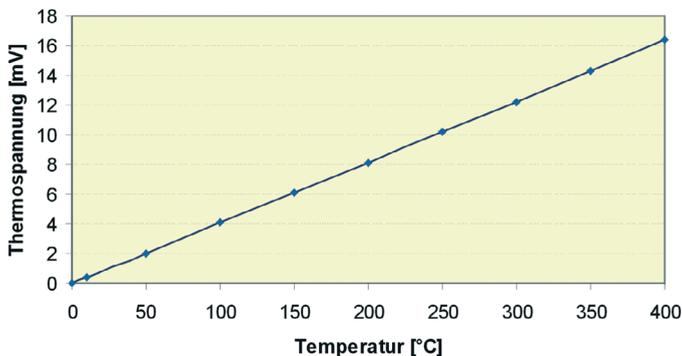


Abb. 3.3: Spannungswerte für Ni/NiCr-Thermoelemente nach [3.5]

Thermoelemente sind in einer Fülle von Ausführungsformen (*Abb. 3.4*) am Markt erhältlich. Allgemein gilt die Regel, dass die Ansprechgeschwindigkeit mit der Größe der Ver-