

Thermische Charakterisierung eines Widerstandslötprozesses

Dr. Martin Justinek, Dr. Martin Fasching, mfTEC Fasching KG

Das Temperatur-Zeit-Verhalten eines Widerstandslötprozesses, bei dem Kupferlackdrähte auf verzinnnte Kontaktstücke aufgelötet werden, wurde experimentell untersucht. Dabei wurden der Kupferlackdraht selbst und ein zusätzlicher im Widerstandslötprozess verlöteter Nickeldraht als Thermoelement verwendet. Durch die Auswertung der Thermospannung erhält man Auskunft über die im Lotvolumen herrschende Temperatur sowie über das Auskühlverhalten der Lötstelle, welches wichtige Informationen für die Optimierung der Prozessparameter sind.

This paper deals with the experimental investigation of the temperature-time profile of a resistance soldering process in which an enamelled copper wire is soldered to a tin-coated contact pad. The copper wire itself and an additional nickel wire have been used to form a thermocouple during the soldering process. Evaluation of the thermoelectric voltage reveals the temperature of the solder joint as well as its cooling behaviour. These results are important for the optimisation of process parameters.

1 Einleitung

Für die Kontaktierung von dünnen Lackdrähten kommen unterschiedliche Verfahren in Betracht. Grundsätzlich sind Schweißen, Löten und Thermokompressionsbonden möglich, wobei sich für sehr dünne Drähte (<100 µm) vorwiegend das Löten und Thermokompressionsbonden eignen. Die Schwierigkeit bei der Kontaktierung von Lackdrähten ist, dass im Kontaktierungsprozess zwei Vorgänge ablaufen müssen: Die Entfernung des Drahtlacks und die Herstellung der mechanischen und elektrischen Verbindung. In automatisierten Fertigungen kommt noch die Anforderung nach einer möglichst kurzen Taktzeit (typischerweise im Bereich von 1 Sekunde) hinzu. Berücksichtigt man die für die Produktpositionierung sowie für das Abklingen von aus dem Produktvorschub herrührenden Vibrationen benötigte Zeit, so bleiben für den Kontaktierungsprozess nicht mehr als einige hundert Millisekunden übrig.

Beim Thermokompressionsbonden wird mit relativ hohen Temperaturen (500-700 °C) gearbeitet [1, 2]. Diese Temperaturen ermöglichen die rasche Entfernung des Drahtlacks und die Herstellung der Kontaktierung. Die elektrisch leitende Verbindung kommt dabei durch Interdiffusion der Metallatome in der Grenzschicht der Fügepartner zustande. Ein Nachteil bei dem Verfahren ist, dass die Kontaktierungsstelle mit einem Sicherungskleber mechanisch und gegen Korrosion geschützt werden muss.

Für das hier behandelte Löten ist die Verzinnzeit des Lackdrahtes ein entscheidender Parameter. Die Verzinnzeit der in dieser Arbeit verwendeten Kupferlackdrähte beträgt bei gängigen Löttemperaturen mehrere hundert Millisekunden (300-400 ms bei 370 °C) und reduziert sich mit steigender Löttemperatur. Ein Standardlötverfahren kann hier nicht zum Einsatz kommen, da der Prozess zu langsam wäre. Es wird daher das im Folgenden beschriebene Sonderlötverfahren eingesetzt.

Um eine sichere Lötverbindung bei der geforderten Taktzeit zu erzielen, muss bei deutlich erhöhter Temperatur gelötet werden (500-700 °C). Andererseits darf der Wärmeeintrag in die Lötstelle nicht zu hoch sein beziehungsweise nicht zu lange dauern, da hierdurch das Gefüge des Drahtes nachteilig verändert wird (Kornvergrößerung, Wachstum intermetallischer Phasen) und es zur Minderung der Verbindungsqualität beziehungsweise zu Lebensdauerproblemen der Kontaktstelle kommen kann. Aus dem gerade Gesagten resultiert die Notwendigkeit, den Temperaturverlauf während des Lötprozesses messbar zu machen, um die Prozessparameter im Sinne der Null-Fehler-Qualitätsphilosophie optimal definieren zu können.

Dem Prinzip nach handelt es sich beim untersuchten Verfahren um eine Widerstandslötung. Der Lackdraht wird in einen V-förmigen verzinnnten Kontakt eingelegt. Anschließend werden die Schenkel des Kon-

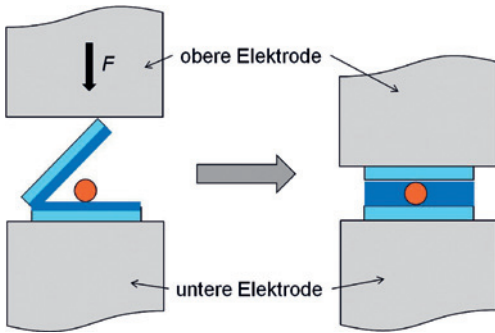


Abb. 1: Prinzip des untersuchten Widerstands­lötprozesses

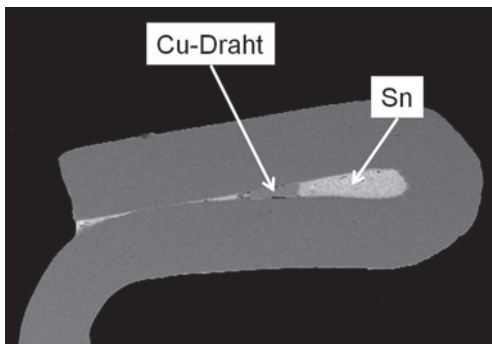


Abb. 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Schliffes durch den Löt­kontakt

takts mithilfe von Löt­elektroden unter Einwirkung einer Kraft F geschlossen, wodurch die Lackisolation gequetscht wird. Gleichzeitig wird der Lötstrom in Form eines kurzen Pulses appliziert. Nach einer Abkühlzeit werden die Elektroden geöffnet, und das fertig gelötete Produkt wird weitertransportiert. Eine schematische Darstellung des Prozesses gibt *Abbildung 1*. *Abbildung 2* zeigt ein Schliffbild eines gelöteten Kontakts.

2 Messaufbau

Zu Untersuchungs- und Optimierungszwecken wurde das im Folgenden beschriebene Messverfahren erarbeitet.

2.1 Messverfahren

Das Messverfahren basiert auf der Auswertung der Thermospannung von etwa $25 \mu\text{V}/\text{K}$, die zwischen dem zu lö­temen Kupferlackdraht und einem zusätzlich eingefügten blanken Nickeldraht aufgrund des Seebeckeffektes entsteht. Der Ablauf einer Messung kann in folgenden Phasen beschrieben werden:

1. Zubiegen des Kontaktanschlusses mit eingele­gtem verdrehtem Kupferlackdraht-Nickeldrahtpaar (ähnlich *Abb. 2*)

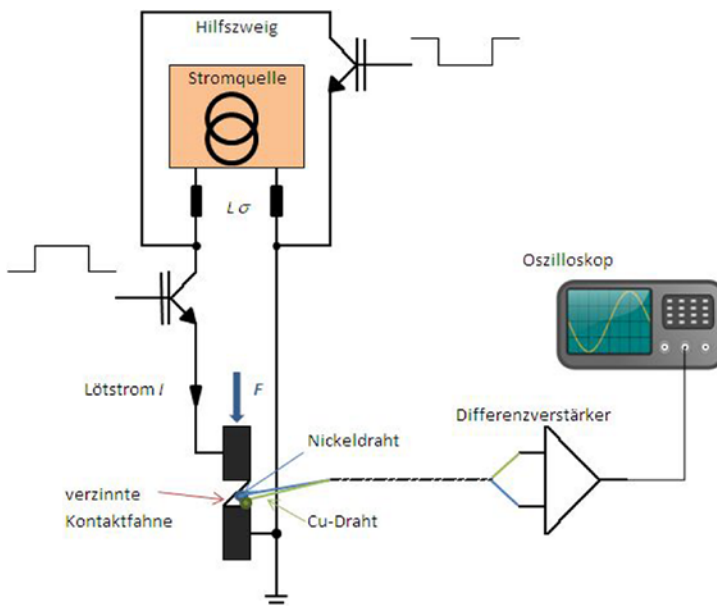


Abb. 3: Messaufbau (schematisch)

2. Start des Lötstromimpulses, der Kontaktanschluss wird durch die Joulesche Verlustwärme erhitzt, das Zinn schmilzt
3. Während der voreingestellten Stromflussdauer entsteht das Thermoelement durch die Verlötung des Nickeldrahtes mit dem Kupferlackdraht.
4. Abruptes Abkommutieren des Lötstromes nach einer voreingestellten Zeit durch Umschalten auf einen Hilfszweig (<200 ns) (Abb. 3)
5. Unmittelbar nach dem Stromfluss wird über einen Messverstärker der zeitliche Verlauf der Thermospannung und somit der Temperaturverlauf in der Lötstelle während der Abkühlphase erfasst

Die *Abbildung 3* zeigt den Messaufbau schematisch. Der zu verlötende Kupferlackdraht wird zum Differenzverstärker elektrisch verbunden. Der Nickeldraht wird zum zweiten Eingang des Differenzverstärkers verdrahtet.

Der Hilfszweig wurde eingesetzt, um Spannungsspitzen an Streuinduktivitäten (Kabelzuleitungen) durch die hohe Stromsteilheit im Abschaltzeitpunkt zu vermeiden. Er ist niederinduktiv zum LötKreis angeordnet

Während des Lötprozesses ändert sich die elektrische Spannung an den Kontaktpartnern stark, was mit dem Aufschmelzen des Zinns sowie der Lackisolation und dem in Folge einhergehenden Benetzen des Drahtes zusammenhängt [3]. Schaltungstechnisch ist dabei darauf zu achten, dass der Verstärker während der Stromflussdauer nicht sättigt. Dies würde das Messsignal gerade in der interessierenden Zeit unmittelbar nach dem Abschalten des Lötstroms verfälschen.

2.2 Kalibrierung

Das Thermoelement in dieser Untersuchung wird aus dem Kupferlackdraht und einem blanken Nickeldraht gebildet. Da diese Materialpaarung kein Standard-Thermoelement ergibt, ist ein Kalibriervorgang nötig. Für die Kalibrierung wurden die das Thermoelement bildenden Drähte verlötet und auf einem Kupferblech positioniert, auf welchem weiters ein kalibriertes Referenz-Thermoelement befestigt ist. Das Kupferblech wird mithilfe eines Infrarotstrahlers sukzessive erwärmt. Die Thermospannung und die Referenztemperatur werden in regelmäßigen Abständen abgelesen. Die experimentell ermittelte Kalibrierkurve sowie die lineare Regression sind in *Abbildung 4* gezeigt.

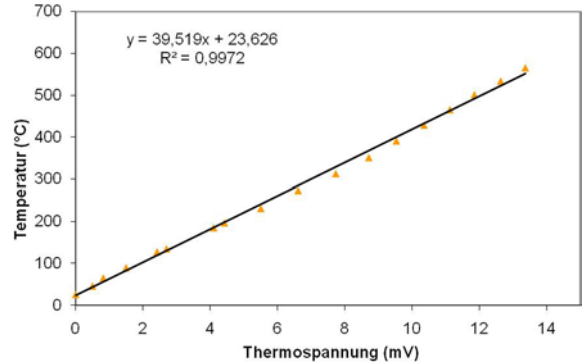


Abb. 4: Kalibrierkurve des Cu-Ni-Thermoelements

3 Ergebnisse der thermischen Analyse von Lötprozessen

Die Messergebnisse liegen als Oszilloskopbilder des Temperatur-Zeit-Verlaufs vor. Ein Beispiel ist in *Abbildung 5* gezeigt. Neben der Thermospannung ist auch der Lötstrom zu sehen, welcher am Ende der Pulsdauer abrupt ausgeschaltet wird. Erst nach dem Abfall des Lötstroms auf null ist das Signal des Thermoelements auswertbar, da es davor zu Störungen aufgrund des Lötstroms kommt, beziehungsweise das Thermoelement erst während der Lötung gebildet wird (der Kupferdraht ist vor der Lötung noch durch den Lack isoliert).

Ein wesentliches Resultat der Arbeit ist das zeitliche Temperatur-Abkling-Verhalten. Eine typische Abklingkurve ist in *Abbildung 6* gezeigt. Nach 100 ms ist die Temperatur so weit gesunken, dass sie mit

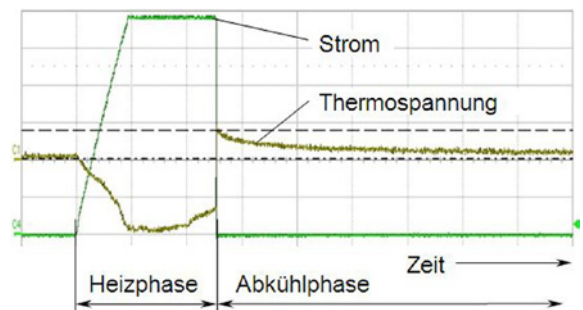


Abb. 5: Typisches Oszilloskop-Bild des Lötstromes (grün) und der Thermospannung (oliv) während der Widerstands-lötung. Die Thermospannung kann nach dem Abfall des Lötstromes auf null ausgewertet werden

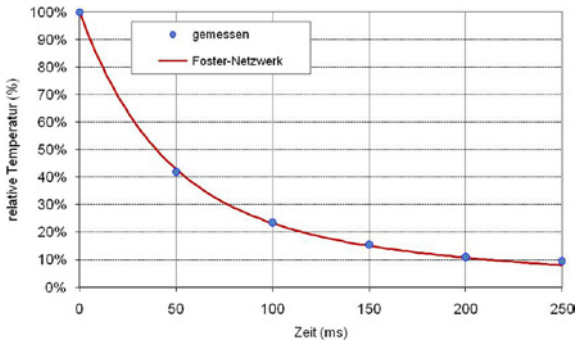


Abb. 6: Die Temperatur-Abklingkurve nach Ende des Lötimpulses (blau: Messung, rot: Modell Foster-Netzwerk)

Sicherheit unter der Schmelztemperatur des Zinns (232 °C) liegt. Der Temperaturverlauf in der Lötstelle kann sehr gut durch zwei thermische Zeitkonstanten angenähert werden (2-stufiges Foster-Netzwerk), wie die rote Kurve in *Abbildung 6* zeigt. Dieses einfache Modell ermöglicht es, rechnerisch den Temperaturverlauf in der Lötstelle bei unterschiedlichen Strom-Zeit-Verläufen des Lötstromes abzuschätzen. Es kann nun die Temperatur der Lötstelle auch schon während der Stromflussdauer berechnet werden, also bevor das Thermoelement entstanden ist und daher eine Messung auf diese Art gar nicht möglich ist. Auch wenn dies nur eine Abschätzung sein kann, so lässt es doch eine quantitative Optimierung des Lötstromes als Funktion der Zeit $I(t)$ zu.

Die Abklingzeit ist relevant für die zeitliche Auslegung des automatisierten Lötprozesses. Der zeitliche Verlauf der automatisierten Lötung ist in *Abbildung 7*

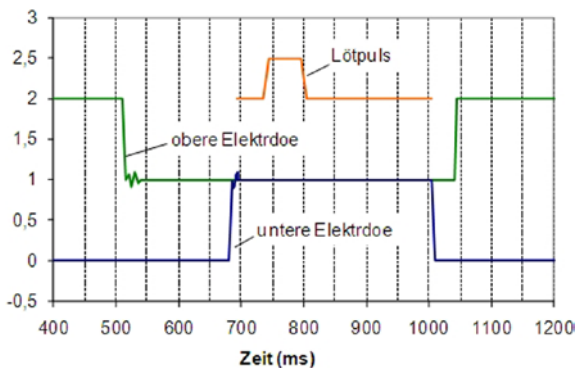


Abb. 7: Zeitlicher Ablauf des Lötvorgangs im automatisierten Prozess: Elektrodenpositionen und Lötimpuls als Funktionen von der Zeit

dargestellt. Zunächst wird die eine Elektrode in Position gebracht (obere Elektrode, grüne Linie in der *Abbildung*). Mithilfe einer Highspeed-Kamera wurde ein kurzes Nachschwingen beobachtet, welches durch die Welle in der Linie angedeutet ist. Nach einer Verzögerungszeit wird die zweite Elektrode (untere Elektrode, blaue Linie) in Position gebracht, dabei wird der Lötkontakt geschlossen (vergleiche *Abb. 1*). Nachdem wiederum das Nachschwingen abgewartet wurde, setzt der Lötimpuls ein (orange Linie in *Abb. 7*). Nach dem Lötimpuls bleiben die Elektroden noch eine gewisse Zeit lang geschlossen, um das Abkühlen der Lötstelle abzuwarten. Die minimal notwendige Haltezeit der Elektroden nach dem Lötimpuls kann nun sehr einfach und zuverlässig aus der durch die beschriebene Messung zugänglichen Temperatur-Abkling-Kurve ermittelt werden.

Eine weitere interessante Anwendung der Temperaturmessung ist die Analyse des Zusammenhangs zwischen Löttemperatur und Pulsdauer beziehungsweise Lötstrom. Wie bereits in der Einleitung angedeutet, ist das Prozessfenster sehr schmal: Ist die Löttemperatur zu gering, kommt es zu ungenügender Entfernung des Drahtlacks, schlechter Benetzung und folglich zu einer kalten Lötstelle. Dies kann unter Umständen bei der Nullstundenprüfung des Bauteils unentdeckt bleiben und erst nach einer gewissen Alterung zutage treten und zu Feldausfällen führen, was als kritisches Qualitätsproblem zu werten ist. Ist die Löttemperatur hingegen zu hoch, kommt es zu einer Kornvergrößerung im Gefüge des Kupferdrahtes und somit zu einer Schwächung der mechanischen Eigenschaften. Folglich ist es von großer Wichtigkeit, die korrekte Temperatur im Lötprozess sicherzustellen.

Die erzielte Temperatur ist wie schon erwähnt abhängig von der Pulsdauer und vom Lötstrom. Diese Zusammenhänge konnten mithilfe der Temperaturmessung quantitativ charakterisiert werden und sind in *Abbildung 8* und *Abbildung 9* dargestellt. Die Temperatur zeigt durch die Wärmeausbreitung bedingt einen annähernd logarithmischen Zusammenhang mit der Pulsdauer, das heißt es liegt ein Sättigungsverhalten vor. Die Abhängigkeit der Temperatur vom Lötstrom hingegen ist im untersuchten Bereich annähernd linear.

Neben den Einstellparametern Pulsdauer und Lötstrom hängt die Temperatur auch von der Geometrie

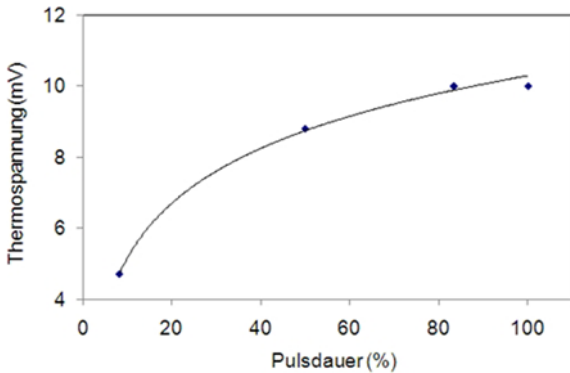


Abb. 8: Die gemessene Spitztemperatur (hier dargestellt als die gemessene Thermospannung) zeigt einen annähernd logarithmischen Zusammenhang mit der Dauer des Löt-pulses

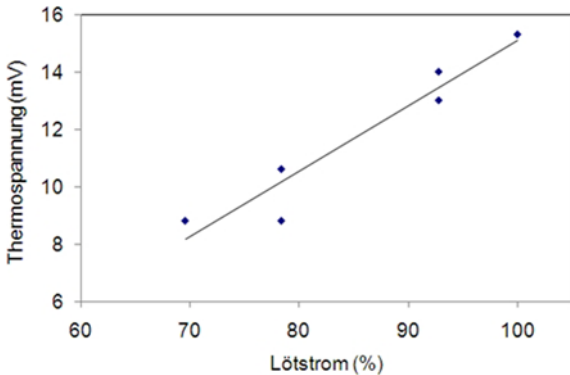


Abb. 9: Die gemessene Spitztemperatur (hier dargestellt als die gemessene Thermospannung) zeigt einen linearen Zusammenhang mit dem Lötstrom

des Kontakts und der Elektroden ab. Die Temperaturmessung hat sich als ein wichtiges Werkzeug etabliert, um für unterschiedliche Geometrieverhältnisse rasch die optimalen Prozessparameter zu finden.

4 Zusammenfassung

Das Temperatur-Zeit-Verhalten eines Widerstands-lötprozesses, bei dem Kupferlackdrähte auf verzinnte Kontaktstücke aufgelötet werden, wurde experimentell untersucht. Es wurden für die thermische Charakterisierung des Lötprozesses der Kupferlackdraht selbst und ein zusätzlicher im Widerstands-lötprozess verlöteter Nickeldraht als Thermoelement verwendet. Durch die Auswertung der Thermospannung erhält man unmittelbar nach der Lötung Auskunft über die im Lotvolumen herrschende Temperatur sowie über das Auskühlverhalten der Lötstelle.

Diese Informationen sind wichtig für die Einstellung der Prozessparameter. Einerseits kann bei bekanntem Auskühlverhalten die Prozesszeit des Verfahrens für die Massenproduktion optimiert werden, und andererseits bestimmt die erreichte Löttemperatur die Qualität der Lötung.

Literatur

- [1] D. Palmer, F. Ganyard: Aluminum Wire to Thick-Film Connections for High-Temperature Operation, Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on , vol.1, no.3, pp. 219- 222, Sep 1978
- [2] S. K. Kang: Gold-to-aluminum bonding for TAB applications, Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on , vol.15, no.6, pp.998-1004, Dec 1992
- [3] J. Nicolics: Laser soldering of thin enamelled copper wires, DVS Proc. of 5th Int. Conf. on Interconnection Technology in Electronics, Fellbach, Feb. 1990, Vol. 129, pp. 190-193