

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, Fraunhofer IZM

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16.174 N**

Prozessoptimierung beim Selektivlöten für Anwendungen in der Leistungselektronik

(Bevilligungszeitraum: 01.08.2009 - 31.07.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Wessling, 23.11.2011

Ort, Datum

Dr. Sonja Wege

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 2, Fraunhofer ISIT

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16.174 N**

Prozessoptimierung beim Selektivlöten für Anwendungen in der Leistungselektronik

(Bevilligungszeitraum: 01.08.2009 - 31.07.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Itzehoe, 23.11.2011

Ort, Datum


Helge Schimanski

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:

Förderhinweis



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 16.174 N / DVS-Nr. 10.056 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben IGF-Nr.: 16.174 N / DVS-Nr.: 10.056 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde im Programm zur Förderung der „industriellen Gemeinschaftsforschung“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AIF finanziert. Für diese Förderung und Unterstützung sei gedankt.

Für die Unterstützung dieses Vorhabens durch ihre Mitwirkung im projektbegleitenden Ausschuss sowie für Proben, Dienstleistungen und fachliche Unterstützung bedanken wir uns bei folgenden Firmen und deren Mitarbeitern:

Herr H. Müller	Airbus Operations GmbH
Herr J. Niemeier	ATN Automatisierungstechnik GmbH
Herr B. Petermann	Miele & Cie KG
Herr D. Birgel	Endress + Hauser GmbH & Co. KG
Herr Dr. Th. Ahrens	Trainalytics
Herr Dr. W. Kruppa	Stannol GmbH
Herr Qasim	ESW
Herr Loose	Treichel Elektronik GmbH
Herr Grimsmann	ESCD

Für die kostenlose Bereitstellung der Leiterplatten und die Durchführung der Lötversuche gilt folgenden Firmen besonderer Dank:

Herr M. Grimmeisen	Schweizer Elektronik AG
Herr J. Friedrich	Ersa GmbH
Herr M. Fehrenbach	Eutect Technologies
Herr E. Wolf	Wolf Produktionssysteme
Herr J. Pansa	Wolf Produktionssysteme

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden die Einflussparameter beim Selektivlöten auf die Qualität der Lötverbindungen in Abhängigkeit von der Kupferschichtdicke, dem Leiterplatten-Layout und der Bauteilkonfiguration systematisch untersucht. Es wurde ein repräsentativer Querschnitt von Bauteilen, die in Baugruppen der Leistungselektronik Anwendung finden, ausgewählt. Unterschiede in der thermischen Masse der Leiterplatte wurden durch unterschiedliche Kupferschichtdicken und unterschiedliche Anbindungen von Wärmefallen realisiert. Als Lötverfahren kamen das Laserlöten, das Kolbenlöten und das selektive Wellenlöten zum Einsatz. Die Lötverbindungen wurden nach den Vorgaben der IPC-A-610 bewertet.

Beim Laserlöten zeigte sich, dass geringe Änderungen im Padlayout, in den Anbindungsvarianten oder Materialschwankungen zu deutlich schwankenden Lötgergebnissen führen. Dies bedeutet, es steht nur ein geringes Prozessfenster zur Verfügung, in dem ausreichend Wärme in die Lötstelle eingebracht werden kann, ohne die Leiterplatte zu schädigen. Es hat sich somit herausgestellt, dass dieses Verfahren nicht geeignet ist, um Bauteile der Leistungselektronik in Verbindung mit Dickkupferleiterplatten zu verarbeiten.

Bei den Kolbenlötversuchen konnten nur in Verbindung mit einer Kupferschichtdicke von 70 µm zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden. Bei den Varianten 2 und 3 waren Vorheiztemperaturen bis zu 180 °C und Lötkolbentemperaturen bis 400 °C notwendig, was zu unzulässigen Laminatschädigungen führte. Somit ist das automatische Kolbenlöten für thermisch massive Aufbauten ebenfalls nicht geeignet. Lediglich bei Leiterplatten mit maximal 4 x 70 µm Kupferlagen kann dieses Verfahren mit Einschränkung empfohlen werden.

Das selektive Wellenlöten hat sich unter bestimmten Voraussetzungen als geeignet herausgestellt. Allerdings ist festzustellen, dass bei den gewählten Konfigurationen unbedingt eine Vorheizung erforderlich ist. Erwartungsgemäß gilt für alle Bauteile, dass die Leiterplattenvariante 3 mit Kupferschichtdicken von 400 µm am schwierigsten zu löten ist und in Kombination mit vollflächig angebundenen Anschlüssen kein zufriedenstellendes Lötgergebnis erzielt werden kann. Ein deutlicher Einfluss ergibt sich auch durch die Auswahl der Wärmefallen. Unabhängig von der Bauteilform kann durch die Wärmefalle 2 ein besseres Lötgergebnis als mit der Wärmefalle 1 erzielt werden. Durch das Anbringen von thermal vias im Pad der Durchkontaktierung wird dieser Effekt noch verstärkt. Thermal vias sind allerdings nicht ausreichend, um bei einer vollflächigen Anbindung an eine 400 µm starke Masselage einen Lotdurchstieg zu erreichen. Eine solche Kombination ist deshalb unbedingt zu vermeiden. Ein weiterer Einfluss ist erwartungsgemäß auch durch die Form des Bauteils bedingt. Während bei den kleineren Bauteilen, selbst in Verbindung mit 400 µm Kupfer, Lötparameter gefunden werden konnten, um zufriedenstellende Lötgergebnisse zu erhalten, traten bei den größeren Bauformen erhebliche Probleme auf.

Aus den erzielten Ergebnissen kann geschlossen werden, dass unter Verwendung des selektiven Wellenlötens anspruchsvolle Baugruppen aus dem Bereich der Leistungselektronik verarbeitet werden können. Prozessfenster in Abhängigkeit vom Leiterplattenaufbau und der Bauteilform, die direkt auf die Serienfertigung übertragbar sind, konnten ermittelt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangssituation und Zielsetzung des Projektes	3
2.	Stand der Technik	4
2.1	Anforderungen an Leiterplatten und Baugruppen für die Leistungselektronik	4
2.2	Anforderungen an die Lötverbindungen	5
2.3	Selektivlötverfahren	6
2.3.1	Beschreibung der selektiven Lötverfahren	6
2.3.2	Anforderungen an selektive Lötverfahren und aktuelle Problemstellungen	7
3.	Versuchsdurchführung	9
3.1	Ausgewählte Bauteile und deren Eigenschaften	9
3.2	Konzeption der Testboards und Testboardaufbau	9
3.3	Lötverfahren	15
3.3.1	Laserlöten	15
3.3.2	Kolbenlöten	17
3.3.3	selektives Wellenlöten	22
3.4	Temperaturmessung	25
3.5	Lötstellenbewertung und Bewertung der Leiterplatten	28
3.5.1	Optische Beurteilung	28
3.5.2	Röntgenuntersuchung	28
3.5.3	Metallographie	28
3.6	Thermische Simulation	28
3.6.1	Modellbetrachtung der Wärmeleitfähigkeit einer Leiterplatte	29
3.6.2	Modellbetrachtung der Stromtragfähigkeit	29
3.6.3	Modellbetrachtung der Lötstelle als Wärmesenke	31
3.6.4	Wärmesenke Bauteil	33
3.6.5	Der selektive Lötvorgang	35

4.	Ergebnisse der Lötversuche	36
4.1	Laserlöten	36
4.2	Kolbenlöten	39
4.2.1	Einfluss der Unterheizung auf das Lötergebnis	39
4.2.2	Lötung Stift 1,4 mm auf LP-Variante 1	41
4.2.3	Lötung Stift 1,4 mm auf LP-Variante 2	43
4.2.4	Lötung Stift 1,4 mm auf LP-Variante 3	46
4.3	Selektives Wellenlöten	50
4.3.1	Versuche mit der Versaflow	50
4.3.2	Versuche mit der Miniwelle der Fa. Eutect	74
5.	Diskussion der Ergebnisse	76
5.1	Einflussparameter auf das Lötergebnis	77
5.2	Vergleich der Lötergebnisse mit den Ergebnissen aus der thermischen Simulation	81
6.	Zusammenfassung	82
7.	Ergebnistransfer	84
7.1	Spezifische Transfermaßnahmen	84
7.2	Einschätzung der Realisierbarkeit	85
8.	Literaturverzeichnis	87

1. Ausgangssituation und Zielsetzung des Projektes

Die zunehmende Bedeutung der Elektronik in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen führt zu einer Erhöhung der Komplexität der Baugruppen und daraus resultierend zu erhöhten Anforderungen an die Verbindungstechnik und die damit verbundenen Prozesse. Mit dem Trend zur Elektromobilität sind hohe Ströme und Frequenzen notwendig, die erhebliche Auswirkungen auf die Bauteilwahl und den Aufbau der Leiterplatten mit sich bringen. Dickkupferleiterplatten mit Kupferschichtdicken bis 400 μm in Verbindung mit großen, wärmeintensiven Bauteilen sind für Baugruppen aus der Leistungselektronik (Abb. 1.1) unumgänglich.

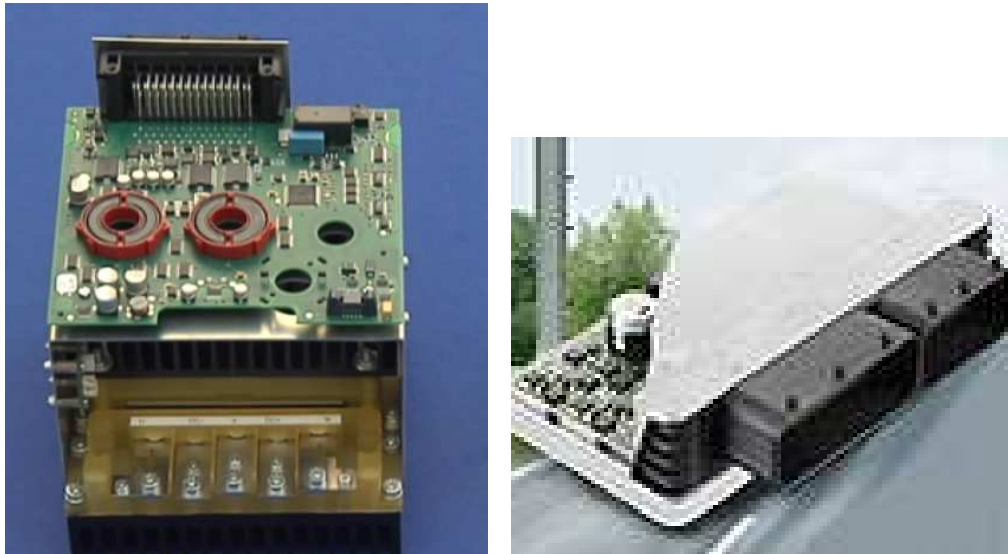


Abb. 1.1: Beispiele für Baugruppen aus der Leistungselektronik

Zusätzlich ergibt sich durch die Erhöhung der Funktionsdichte auf elektronischen Baugruppen bei gleichzeitiger Verringerung des Platzbedarfes ein stetiger Anstieg der Verwendung von SMD-Bauteilen. Die Verarbeitung dieser Baugruppen erfolgt vorwiegend im doppelseitigen Reflowlötprozess. Anschließend werden die Durchsteckbauteile, zu denen u.a. HF-Stecker, Relais, Elko's, Übertrager und Steckerleisten gehören, unter Verwendung von Selektivlötverfahren mit der Leiterplatte verbunden. Derzeit stehen verschiedene verfahrenstechnische Varianten für das Selektivlöten zur Verfügung. Seit der Umstellung auf den bleifreien Prozess treten, bedingt durch die höheren Prozesstemperaturen und das engere Prozessfenster, vermehrt Probleme im Bereich des Selektivlötprozesses auf. Mangelhafter Lotdurchstieg, Nichtlötungen und die Beschädigung benachbarter Bauteile und der Durchkontaktierungen sind häufig beobachtete Fehler. Einen entscheidenden Einfluss zeigen hier der Aufbau der Baugruppen und die Auswahl der Bauteile. Die Verarbeitung von Baugruppen der Hochleistungselektronik, wenn Wärmesenken, große Kupferflächen und dicke Kupferlagen auf und in den Leiterplatten vorhanden sind und gleichzeitig Bauteile mit hoher Wärmekapazität verlötet werden müssen bietet hier eine besondere Herausforderung. Entscheidend ist hier im ersten Schritt die Auswahl eines geeigneten Verfahrens. Um dann akzeptable Lötverbindungen zu erreichen, ist es erforderlich für jeden spezifischen Anwendungsfall eine Optimierung der Prozessparameter vorzunehmen. Dabei müssen häufig Kompromisslösungen gefunden werden, um gute Lötergebnisse zu erreichen ohne eine thermische Schädigung der Bauteile bzw. Leiterplatten zu verursachen. Die meisten Anwender arbeiten bei der Einführung des

bleifreien Selektivlötprozesses derzeit nach dem Trial- and Error-Verfahren, da teilweise noch keine umfassenden Erkenntnisse über die Einflussparameter beim Selektivlöten vorliegen und bisher gesammelte Erfahrungen nicht systematisch ausgewertet und zusammenfassend dargestellt wurden. Eine Aussage zur Prozessfähigkeit ist nur schwer möglich, da auftretende Lötfehler nicht eindeutig einer Ursache zugeordnet werden können. Weiterhin existieren keine Vorgaben von Prozessfenstern und Lötprofilen, wie es sie für SMD-Bauteile für die Verarbeitung im Wellenlötprozess /1/ und im Reflowprozess /2/ gibt. Ebenso ist auch eine thermische Simulation, wie inzwischen für das Konvektions-Reflowlöten für den Anwender verfügbar, für das Selektivlöten nicht vorhanden.

Resultierend aus den dargestellten Problemstellungen taucht in der Elektronikfertigung immer wieder die Fragestellung von Anwendern auf, welches Selektivlötverfahren für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeignet ist und wie die Prozessparameter zu optimieren sind, um THT-Bauteile in Verbindung mit Dickkupferleiterplatten so zu verarbeiten, dass reproduzierbare und nach gültigen Standards akzeptable und zuverlässige Lötstellen erreicht werden, ohne die Bauteile bzw. Leiterplatten zu schädigen.

Ziel des geplanten Forschungsvorhabens ist es deshalb die Einflussparameter beim Selektivlöten auf die Qualität der Lötverbindungen in Abhängigkeit vom Verfahren und der Baugruppenkonstruktion systematisch zu untersuchen. Als Endergebnis soll ein Leitfaden erstellt werden, aus dem hervorgeht welches Verfahren für welche Baugruppenkonstellation am geeignetsten ist und welche Prozessparameter zu wählen sind, um akzeptable, zuverlässige Lötverbindungen zu erreichen.

2. Stand der Technik

2.1 Anforderungen an Leiterplatten und Baugruppen für die Leistungselektronik

Im Bereich der Leistungselektronik kommen vielfach große THT-Bauelemente mit großen Massen zum Einsatz. Zusätzlich existieren spezielle Anforderungen an die Stromtragfähigkeit, sowie an die Wärmezufuhr /3/. Dies erfordert den Einsatz von Dickkupfer-Leiterplatten mit Kupferlagen im Bereich von 70 μm und für extremere Anwendungsfälle bis 400 μm , was erhebliche Auswirkungen auf den Lötprozess hat. So hat die Berechnung von Temperaturprofilen gezeigt /4/, dass sich abhängig von der Kupferschichtdicke bei gleicher Lötzeit und gleicher Löttemperatur unterschiedliche Temperaturen an den Kupferbahnen bzw. Lötstellen ergeben (Abb. 2.1.1).

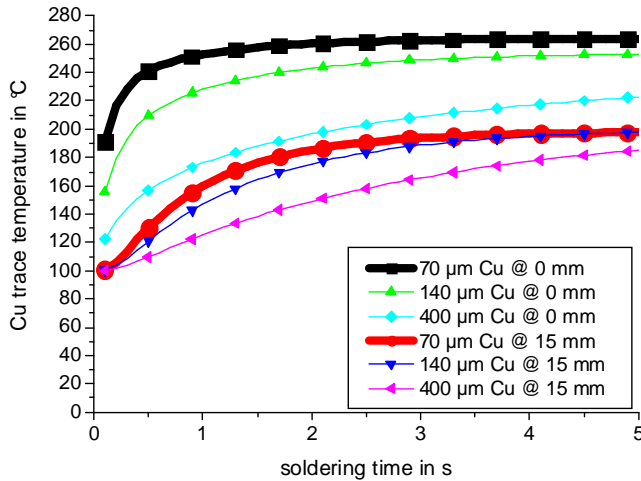


Abb. 2.1.1: Einfluss der Lötzeit und der Kupferschichtdicke auf die Erwärmung von Kupferbahnen /4/

2.2 Anforderungen an die Lötverbindungen

Die Beurteilung der Qualität der Lötverbindungen erfolgt durch eine optische Inspektion, die in der Serienfertigung zu 100 % durchgeführt wird. Als Abnahmekriterien gelten die Vorgaben der aktuellen Normen und Richtlinien. Dazu gehören die IPC-A-610, Revision E /5/, die J-STD-001 /6/ und die DIN EN 61192 /7/, wobei sich die IPC-A-610 inzwischen als das Standardwerk in der Elektronikfertigung etabliert hat. Für durchkontaktierte Verbindungen gelten die in der in Abb. 2.2.1 enthaltenen Tabelle aufgelisteten Kriterien. Dabei sind die unterschiedlichen Klassen wie folgt definiert:

- Klasse 1 – Allgemeine Elektronikprodukte
- Klasse 2 – Elektronikprodukte mit höheren Ansprüchen
- Klasse 3 – Hochleistungselektronik

Tabelle 7-4 Durchmetallisierte Löcher mit Bauteilanschlüssen - Mindestanforderungen an Lötstellen¹

Kriterien	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
A. Vertikaler Lotdurchstieg ^{2,3} (siehe 7.3.5.1)	Nicht spezifiziert	75%	75%
B. Umlaufende Benetzung des Bauteil-Anschlusses und der Hülse auf der Lot-Zielseite (siehe 7.3.5.2)	Nicht spezifiziert	180°	270°
C. Prozentsatz des ursprünglichen Anschlussflächenbereichs auf der Lot-Zielseite, der mit Lot benetzt ist (siehe 7.3.5.3)	0	0	0
D. Umlaufende Benetzung des Bauteil-Anschlusses und der Hülse auf der Lot-Quelleiseite (siehe 7.3.5.4)	270°	270°	330°
E. Prozentsatz des Anschlussflächenbereichs auf der Lot-Quelleiseite, der mit Lot benetzt ist (siehe 7.3.5.5)	75%	75%	75%

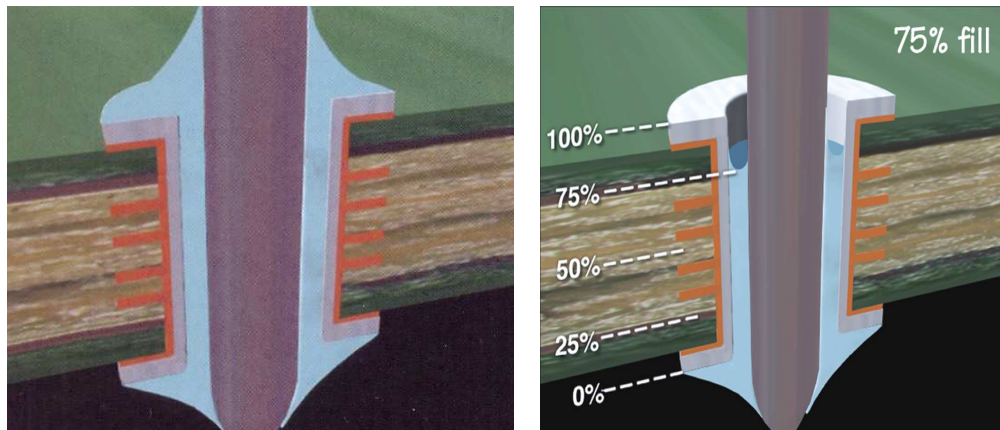
Hinweis 1: Benetzung mit Lot bezieht sich auf Lot, das durch den Lötprozess aufgebracht wird. Beim Intrusivlöten entsteht eventuell kein äußerer Lotkegel zwischen Anschluss und Anschlussfläche.

Hinweis 2: Die 25% nicht befüllte Höhe beinhaltet Vertiefungen sowohl der Quell- als auch der Zielseite.

Hinweis 3: Bei Klasse 2 kann die befüllte Höhe, wie in 7.3.5.1 beschrieben, weniger als 75% betragen.

Abb. 2.2.1: Beurteilungskriterien für durchkontaktierte Lötverbindungen nach der IPC-A-610 /5/

Beispielhaft ist in Abb. 2.2.2 das Kriterium für den vertikalen Lotdurchstieg dargestellt.



Anzustreben – Klasse 1, 2, 3

zulässig – Klasse 1, 2, 3

Abb. 2.2.2: Abnahmekriterium vertikaler Lotdurchstieg – Auszug aus der IPC-A-610 /5/

2.3 Selektivlötverfahren

2.3.1 Beschreibung der selektiven Lötverfahren

Die Selektivlötverfahren lassen sich in serielle und sequentielle Verfahren einteilen. Die seriellen Verfahren sind durch einen hohen Durchsatz bei geringer Flexibilität gekennzeichnet. Dazu gehören das Hubtauch- und das Multiwellenlöten /8/. Beide gehören zu den Flow-Verfahren, bei denen die Lötwärme durch das flüssige Lot zugeführt wird. Vorteil dieser Verfahren ist eine gleichmäßige Wärmeverteilung auf alle Lötstellen gleichzeitig.

Sequentielle Verfahren sind das Miniwellen-, das Laser-, das Kolben- sowie das Induktionslöten. Hier wird jedes Bauteil einzeln angesteuert, positioniert und verlötet. Die Ansteuerung der zu lötenden Stellen erfolgt dabei über Programme. Es werden keine baugruppenspezifischen Werkzeuge benötigt. Auch das Miniwellenlöten /9/ (Abb. 2.3.1) ist ein Flow-Verfahren. Im Gegensatz dazu wird bei den anderen sequentiellen Verfahren die Lötwärme über Laserstrahlen, Kolbenspitzen oder induktiv eingebracht.

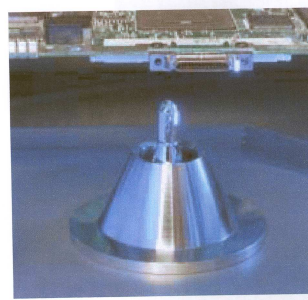
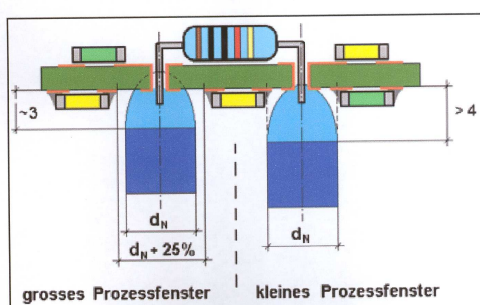


Abb. 2.3.1: Miniwellenlötverfahren (schematisch und Beispiel für eine Düse) – Quelle: Ersa /9/

Bei den Flow-Verfahren zeigen folgende Einflussparameter erhebliche Auswirkungen auf das Lötresultat: die Art der Vorheizung, die Art und die Auftragsmethode des Flussmittels, die Lotbadtemperatur, die Bewegungsgeschwindigkeit bzw. Verweil-

dauer an der Lötstelle, die Lötdüsen bzw. das Vorratsvolumen an Lotschmelze im Lötstempel, das Oberflächenfinish der Durchkontaktierung und der Bauteilanschlüsse und die Größe des Bauteils. Versuche mit unterschiedlichen Steckertypen haben z.B. gezeigt, dass unter gleichen Prozessbedingungen bei einem 96-poligen Stecker im Kunststoffgehäuse wesentlich bessere Ergebnisse erzielt werden konnten, als bei einem 50-poligen Stecker im Metallgehäuse. Ein Hauptproblem bildet die ungenügende Durchwärmung der Bauteile und Leiterplatten bevor sie in das Lotbad eintauchen, was einen mangelhaften Lotdurchstieg zur Folge hat. Um den Durchstieg zu verbessern wird häufig die Lotbadtemperatur erhöht, was jedoch zu einer Schädigung der Leiterplatten oder der Bauteile führen kann. Ein weiterer, wichtiger Einflussfaktor ist die Anordnung der Bauteile auf der reflowgelöteten Seite, da zu geringe Abstände der SMD-Bauteile zu den Durchkontaktierungen das Prozessfenster zusätzlich einengen und das Lötergebnis negativ beeinflussen.

Ein sequentielles Selektivlötverfahren, das durch die Bleifreitechnologie zunehmend an Bedeutung gewinnt ist das Laserlöten /10/. Vorteil dieses Verfahrens ist vor allem die exakte Fokussierung des Wärmestrahls und die berührungslose Wärmeeinbringung. Somit lassen sich auch schwer zugängliche Lötstellen verbinden. Der Laser ermöglicht zudem eine exakte Temperaturführung an der Fugestelle innerhalb einer kurzen Zeit. Geeignet ist das Laserlöten deshalb für Einzelpunktlötungen bei temperaturempfindlichen Bauteilen und bei Bauteilen, die ein spezielles Temperaturprofil benötigen. Für die Lotzufuhr kann sowohl Lotdraht als auch Lotpaste verwendet werden. Wesentliche Einflussfaktoren bei diesem Verfahren sind die Laserleistung und die Kontaktzeit.

Kostengründe und gestiegene Qualitätsanforderungen führen dazu, dass Speziallötaufgaben, wie z.B. das Anbringen von Kabeln und Litzen oder die Verarbeitung von Kupferspulen, die bisher von Hand gelötet wurden zunehmend automatisiert werden. Beim automatischen Kolbenlöten /10/ haben die Lagetoleranz der Lötstellen, das Aufsetzen der Lötspitze und die Anpresskraft, die Lotdrahtdicke und natürlich die Lötspitzentemperatur und die Haltezeit einen erheblichen Einfluss auf das Lötergebnis. Problematisch beim Übergang auf bleifreies Löten ist beim Kolbenlöten der um einen Faktor 10 erhöhte Lötspitzenverschleiß. Aus diesem Grund wird für die Kabelverarbeitung auch das Induktionslöten /11/ als berührungsloses Verfahren eingesetzt und weiter evaluiert.

2.3.2 Anforderungen an selektive Lötverfahren und aktuelle Problemstellungen

Ein wesentliches Problem bildet der bereits erwähnte mangelhafte Lotdurchstieg bei Verwendung der selektiven Welle (vgl. Bild 2.3.1). Da teilweise ohne Vorheizung oder mit den verfahrensbedingten kurzen Vorheizzeiten gearbeitet wird und die Lotbadtemperatur auf maximal 320 °C eingestellt werden kann, um die Leiterplatte und die Bauteile nicht zu schädigen, ist die zugeführte Wärmemenge nicht ausreichend, um die Leiterplatte und die Bauteile so zu durchwärmen, dass ein einwandfreier Lotfluss gewährleistet ist. Dieser Effekt verstärkt sich noch in Verbindung mit großen, wärmeintensiven THT-Bauteilen bei gleichzeitiger Anbindung größerer Kupferflächen oder beim Vorhandensein großer Kupferschichtdicken bis 400 µm, wie sie für Anwendungen in der Hochleistungselektronik heute bereits üblich sind. Erhöht man die Lotbadtemperatur, um das Wärmeproblem zu bewältigen, wird das Kupferleaching erhöht und neben der Bauteil- und Leiterplattenschädigung besteht zusätzlich die

Gefahr, dass die Durchkontaktierungen im Kantenbereich vollständig aufgelöst und unterbrochen werden (Abb. 2.3.2). Zusätzlich können große Temperatursprünge zwischen Vorheizung und Lotbadtemperatur dazu führen, dass Keramikbauteile, die in der Nähe der Selektivlötstellen angeordnet sind, brechen.

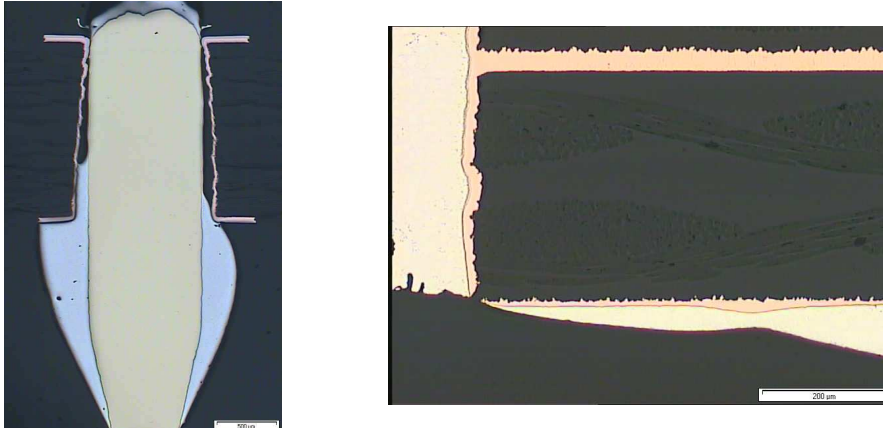


Abb. 2.3.2: Mögliche Fehler beim selektiven Wellenlöten (links: mangelhafter Lotdurchstieg; rechts: Ablagerung einer Kupferhülse)

Beim Laserlöten treten z. B. Probleme durch die schnellen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten auf, die selbst bei bleihaltigen Loten zu Erstarrungsrissen an der Lötstellenoberfläche führen. Weiterhin besteht auf Grund der lokalen, hohen Wärmebringung oder durch Reflexionen der Laserstrahlung die Gefahr von Verbrennungen des Lötstopplackes oder der Leiterplatte.

Beim Übergang vom manuellen Handlöten zum automatischen Kolbenlöten treten z. B. bei komplizierten Aufbauten mit schwer zugänglichen Lötstellen Probleme auf. Anders als beim Handlöten kann beim Maschinenlöten das Aufsetzen der LötKolbenspitze und die Zuführung des Lotdrahtes nicht individuell an die einzelne Lötstelle angepasst werden, was zu einer erheblichen Erhöhung der Lötfehlerraten führt. Hier hat sich gezeigt, dass der Umstieg auf das automatische Kolbenlöten deshalb für bestimmte Anwendungen nicht geeignet ist.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Ausgewählte Bauteile und deren Eigenschaften

Für die Lötversuche wurde ein repräsentativer Querschnitt von Bauteilen, die in Baugruppen der Leistungselektronik Anwendung finden, ausgewählt (Abb. 3.1.1). Um den Layouteinfluss unterschiedlicher Anbindungen und den Einfluss des Verhältnisses Loch- / Pindurchmesser auf das Lötresultat noch gezielter und differenzierter untersuchen zu können wurden zusätzlich Stifte verarbeitet.

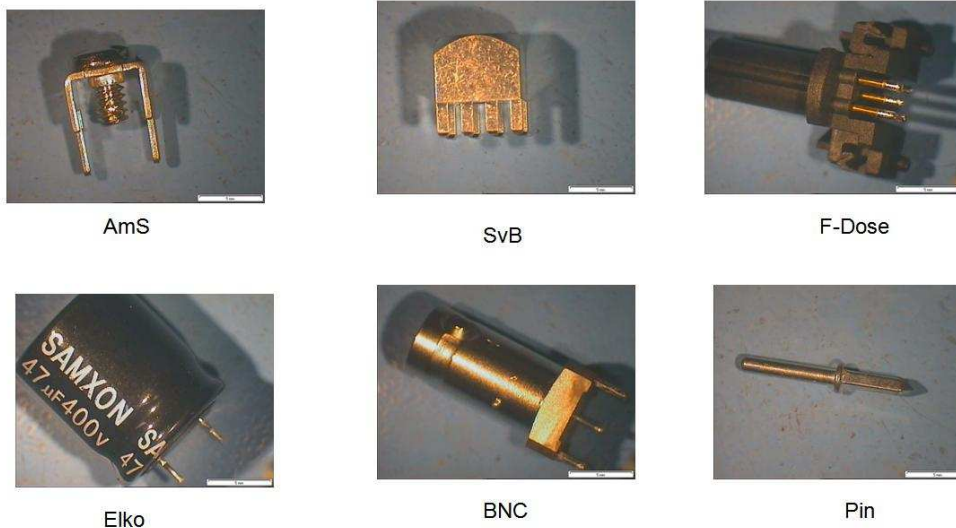


Abb. 3.1.1: ausgewählte Bauteile

Bei dem Elektrolytkondensator (Elko) handelt es sich um eine spezielle und weitverbreitete Bauform für Kondensatoren mit einem breiten Anwendungsgebiet. Verwendet wurden Elkos der Firma Smaxon, Typ RR, die eine hohe Betriebssicherheit haben und für Betriebstemperaturen von -25°C bis $+105^{\circ}\text{C}$ ausgelegt sind. Es handelt sich um eines der größeren Bauteile mit einem unterschiedlich hohen Wärmebedarf an beiden Anschlüssen. Weiterhin reagiert das Bauteil durch den im Gehäuse vorhandenen flüssigen Elektrolyten empfindlich bei zu hohen Temperaturen.

Der als Bananenstecker bezeichnete BNC-Stecker (Bayonet Neill Concelman) dient als Anschluss für Axialkabel und zeichnet sich durch ein großes metallisches Gehäuse aus. Probleme können sich bei diesem Bauteil dadurch ergeben, dass eine große Masse erwärmt werden muss. Weitere ausgewählte Bauteile waren ein Anschlussstück mit einer Schraube (AmS), eine Stromversorgungsbuchse (SvB) und eine Flanschdose. Zusätzlich wurden Stifteleiten mit 1 mm Durchmesser in einer Durchkontaktierung mit 1,3 mm \varnothing bzw. quadratische Stifte mit 1,4 mm Kantenlänge in einer Durchkontaktierung mit 1,7 mm \varnothing verarbeitet.

3.2 Konzeption der Testboards und Testboardaufbau

Um die verschiedenen Lötverfahren miteinander vergleichen und insbesondere Unterschiede herausarbeiten zu können, wurde ein Testboard konzipiert, das mit einfachen Strukturen sowie sinnvoller Komponentenauswahl diese Aufgaben erfüllen kann. Die Komponenten stellen hierbei typische Vertreter für Lötverfahren in der Leistungselektronik dar. Das Testboard wurde in enger Abstimmung mit den Mitglie-

dem des PBA definiert. Ebenfalls sind Anregungen von weiteren Anwendern der Leistungselektronik bei der Layoutgestaltung berücksichtigt worden. Insbesondere seitens der Firma Schweizer Elektronik /12/, welche die Leiterplatten beigestellt hat, sind „Design Rules“ zur technischen Realisierung beim Leiterplattenhersteller eingeflossen, die direkt in das Layout umgesetzt wurden. Für das Board wurde als Basismaterial FR 4 mit einem Tg von 150°C und als Lötobefläche HAL-bleifrei gewählt. Es wurde ein 12-fach Nutzen (4 x 3) mit einer Einzelleiterplattengröße von 82 mm x 72 mm aufgebaut (Abb. 3.2.1 und 3.2.2). So konnte eine optimale Ausnutzung des Fertigungspanels realisiert werden.

Unterschiede in der thermischen Masse der Leiterplatte und somit Unterschiede im Lötwärmebedarf wurden durch drei Leiterplattenvarianten mit jeweils 4 Kupferlagen und einer Gesamtdicke von 1,5 mm realisiert:

- LP-Variante 1: 4 x 70µm Cu-Stärke (Außen- und Innenlagen)
- LP-Variante 2: 2 x 70µm Cu-Stärke (Außenlagen),
2 x 200µm Cu-Stärke (Innenlagen)
- LP-Variante 3: 2 x 70 µm Cu-Stärke (Außenlagen),
2x400µm Cu-Stärke (Innenlagen).

Damit auf allen Leiterplatten vergleichbare Strukturen vorhanden sind, wurde das Layout so gestaltet, dass diese auch noch bei einer Kupferstärke von 400 µm prozesssicher herzustellen sind.

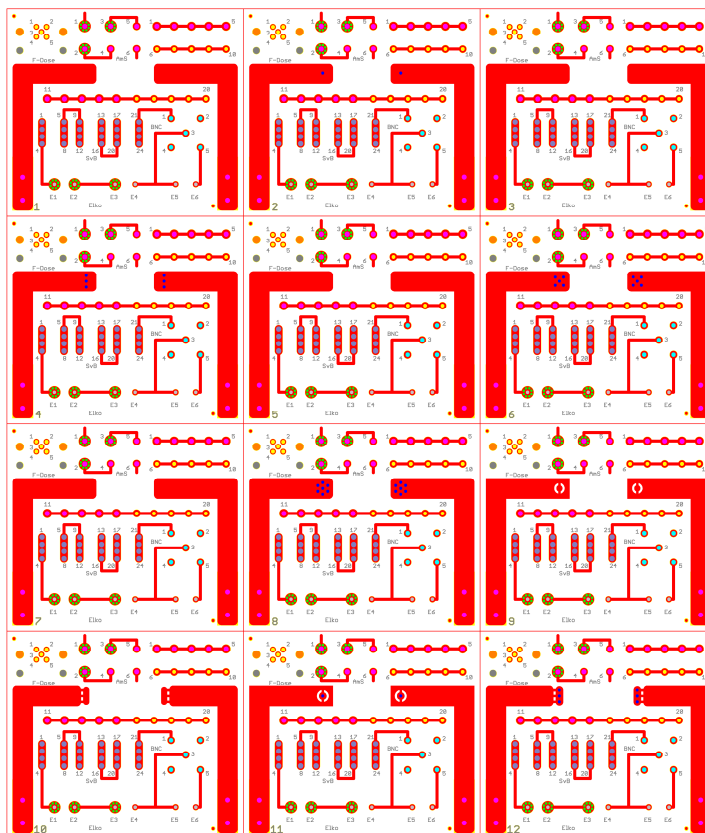


Abb. 3.2.1: Fertigungsnutzen Top-Side

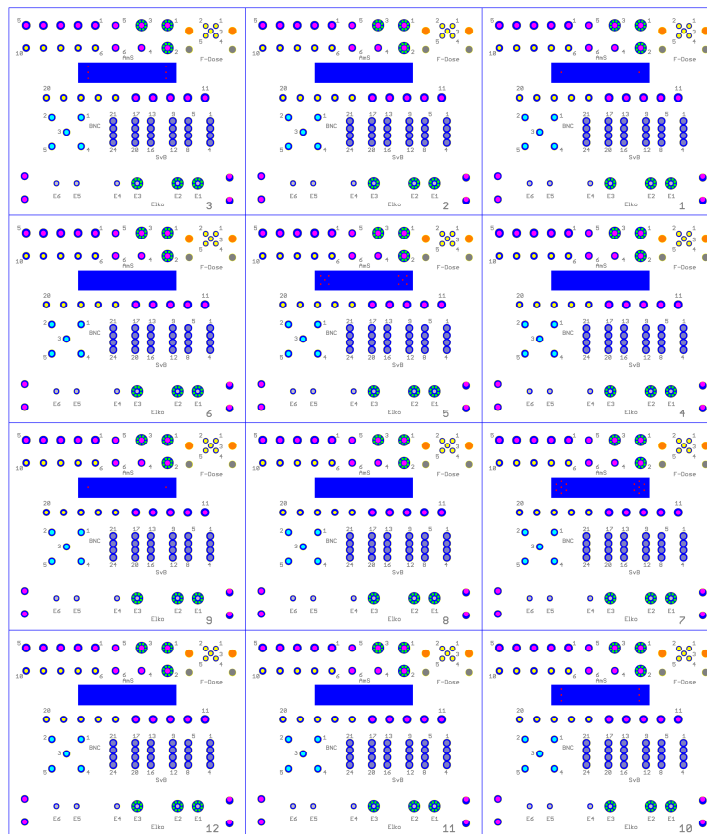


Abb. 3.2.2: Fertigungsnutzen Bottom Side

Die Stiftleisten und die quadratischen Stifte wurden zum Einfahren der Lötprozesse und somit zur Erstellung eines Ausgangsparametersatzes für die jeweiligen Lötverfahren eingesetzt. Diese eigneten sich auch besonders gut, um die Temperaturmessungen für den Abgleich der thermischen Simulation durchzuführen. Ausgehend von diesen Basiswerten konnten dann die Prozessparameter für die thermisch massiven Komponenten wie AmS, SvB und BNC-Adapter ermittelt werden. Weitere Komponenten mit erhöhten Anforderungen an den Lötprozess waren die Flanschdose sowie die Elkos. Für die Ermittlung der Stromtragfähigkeit wurde eine 7 mm breite Leiterbahn mit einer Variation von Durchkontaktierungen integriert (Abb. 3.2.3).

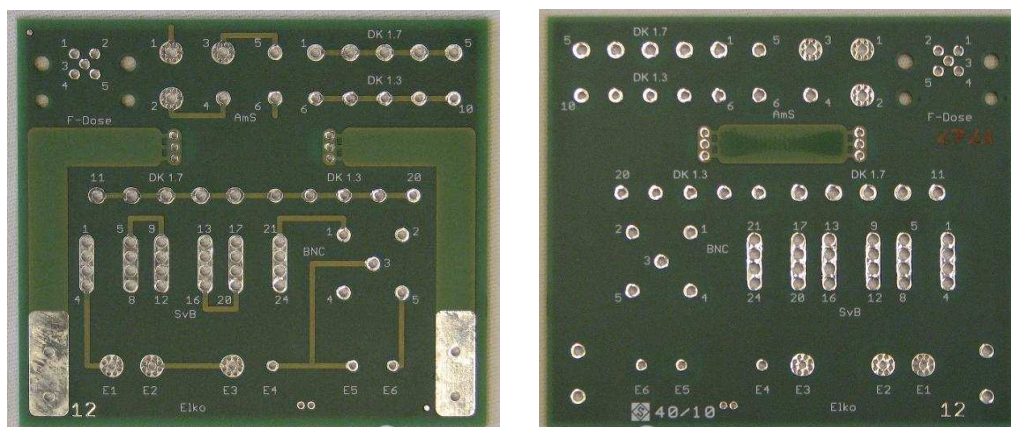


Abb. 3.2.3: Testleiterplatte (links: Top-Side; rechts: Bottom-Side)

Neben dem Ziel, in diesem Projekt Prozessfenster für die verschiedenen Lötverfahren zu definieren, sollten auch für die Leiterplattenanschlüsse Layoutempfehlungen erarbeitet werden. Dazu wurden unterschiedliche Anbindungen von Wärmefallen (WF) realisiert (Abb. 3.2.4 – 3.2.6):

- WF1: einfach, Freistellung und Leiterbahn je 800µm,
- WF2: doppelt, Freistellung und Leiterbahn je 800µm,
- WF3: wie Variante 1, Freistellung 1600 µm.

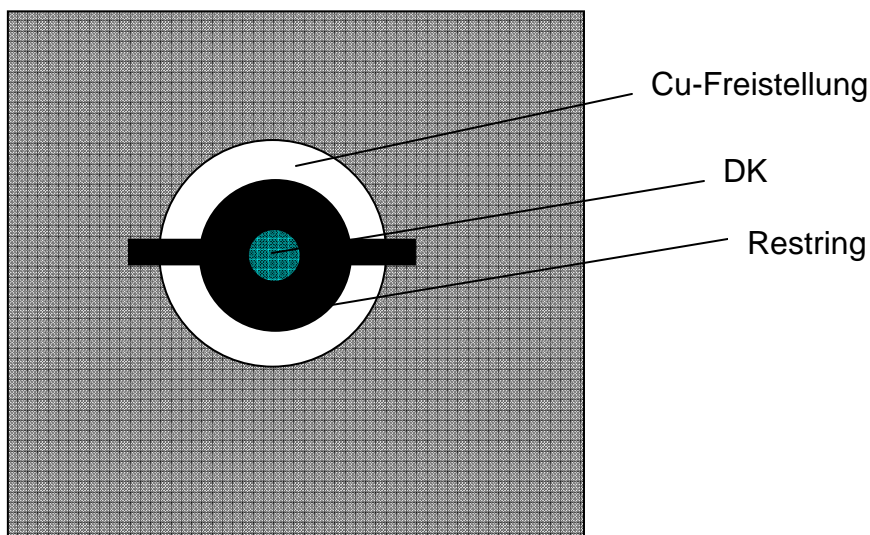


Abb. 3.2.4: WF1...einfach, Freistellung und Leiterbahn je 800µm

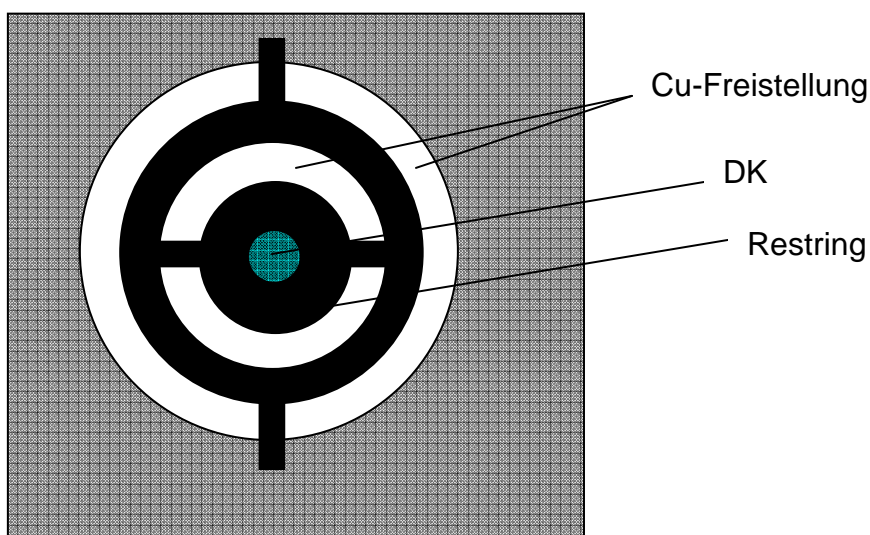


Abb. 3.2.5: WF2...doppelt, Freistellung und Leiterbahn je 800 µm

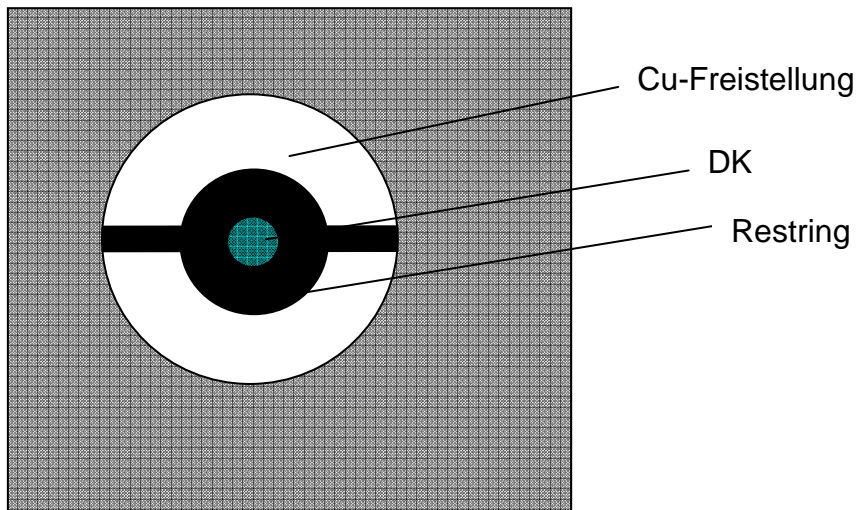


Abb. 3.2.6: WF3...wie 1 nur Freistellung 1600 μm

Des Weiteren wurden einzelne Anschlüsse ohne Anbindung bzw. mit vollflächiger Anbindung aufgebaut. Die verschiedenen Anbindungsvarianten sind in den Röntgenbildern der Abb. 3.2.7 dargestellt.

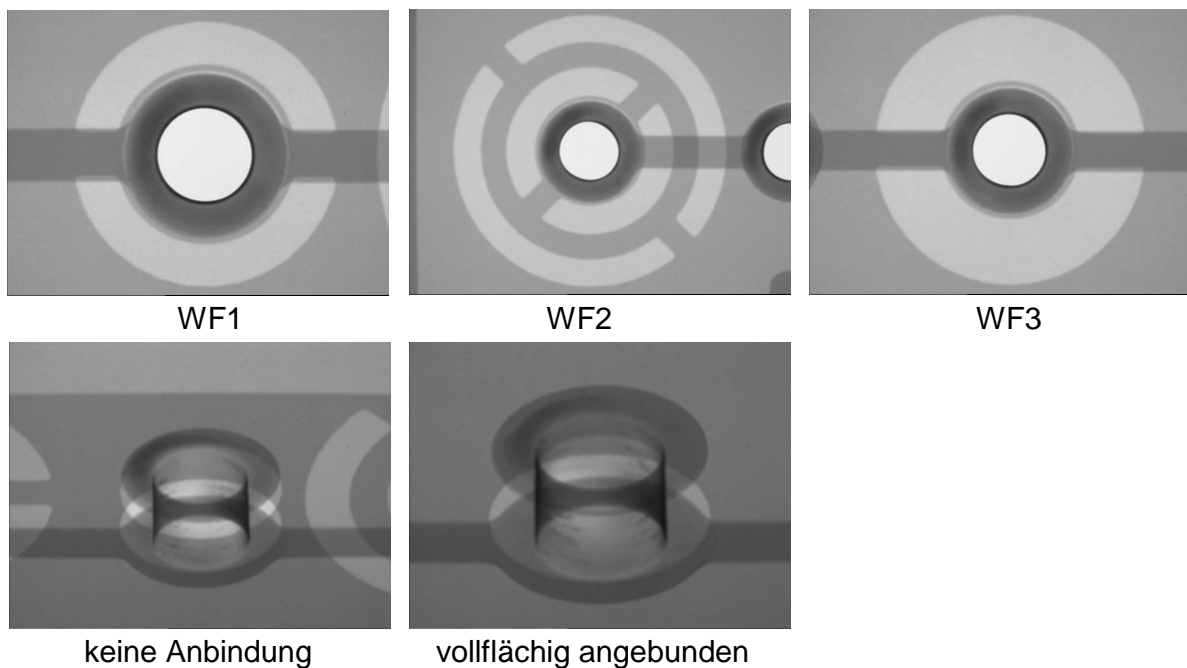


Abb. 3.2.7: Röntgendarstellung der Anbindungsvarianten

Die nachfolgenden Tabellen 3.2.1 – 3.2.7 zeigen die Anbindungen der einzelnen Bauelementanschlüsse. Bei den Komponententypen AmS und Elko wurden zur besseren Wärmeeinbringung auch thermal vias, acht durchkontaktierte Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,7 mm, die ringförmig um den Anschlusspin angebracht wurden, eingesetzt. L1 – L4 bedeutet Lage 1 – 4, das Zeichen -.... ohne Anbindung.

AmS	AmS1	AmS1	AmS2	AmS2	AmS3	AmS3
	Pin 1	Pin 2	Pin 1	Pin 2	Pin 1	Pin 2
lfd. Nr.	1	2	3	4	5	6
thermal vias	x	x	x	-	-	-
L1	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn
L2	-	-	-	-	-	-
L3	vollflächig	WF2	WF1	vollflächig	WF1	WF2
L4	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.2.1: Anbindung AmS

SvB	SvB1	SvB1	SvB2	SvB2	SvB3	SvB3
	Pin1-4	Pin 5-8	Pin1-4	Pin 5-8	Pin1-4	Pin 5-8
lfd. Nr.	1-4	5-8	9-12	13-16	17-20	20-24
L1	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn
L2	-	-	-	-	-	-
L3	WF3	WF1	vollflächig	-	WF3	WF1
L4	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.2.2: Anbindung SvB

Flanschdose	Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5
L1	-	-	-	-	-
L2	-	-	-	-	-
L3	vollflächig	WF1	-	WF1	vollflächig
L4	-	-	-	-	-

Tab. 3.2.3: Anbindung Flanschdose

BNC-Adapter	Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5
L1	Leiterbahn	-	Leiterbahn	-	Leiterbahn
L2	-	-	-	-	-
L3	vollflächig	WF1	WF1	WF2	-
L4	-	-	-	-	-

Tab. 3.2.4: Anbindung BNC-Adapter

Stift quadr. 1,4 mm (DK1,7)	Pin 1, 15	Pin 2, 12	Pin 3, 13	Pin 4, 14	Pin 5, 11	Pad 3,0mm
L1	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	
L2	-	-	-	-	-	
L3	WF1	vollflächig	WF3	-	WF2	
L4	-	-	-	-	-	

Tab. 3.2.5: Anbindung Stift quadr. 1,4 mm (DK1,7)

Stift rund 1mm (DK1,3)	Pin 6, 20	Pin 7, 17	Pin 8, 16	Pin 9, 19	Pin 10, 18	Pad 2,5mm
L1	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	
L2	-	-	-	-	-	
L3	WF1	vollflächig	WF2	-	WF3	
L4	-	-	-	-	-	

Tab. 3.2.6: Anbindung Stift rund 1mm (DK1,3)

Elko	Elko1 Pin 1	Elko1 Pin 2	Elko2 Pin 1	Elko2 Pin 2	Elko3 Pin 1	Elko3 Pin 2
lfd. Nr.	1	2	3	4	5	6
thermal vias	x	x	x	-	-	-
L1	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn	Leiterbahn
L2	-	-	-	-	-	-
L3	vollflächig	WF2	WF1	vollflächig	WF2	WF1
L4	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.2.7: Anbindung Elko

3.3 Lötverfahren

3.3.1 Laserlöten

Ursprünglich war geplant die Laserlötversuche am ISIT mit dem dort vorhandenen Laserlötssystem durchzuführen. Versuche haben jedoch gezeigt, dass sich das vorhandene Gerät für diese Aufgabe als ungeeignet erwies. Es war nicht möglich, hinsichtlich Benetzung und Durchstieg gute Lötstellen herzustellen, ohne die Leiterplatte oder das Bauteil sichtbar zu beschädigen. Nach Rücksprache mit dem Gerätehersteller, der Firma Wolf Produktionssysteme (die ebenfalls Mitglied im PBA ist), wurde beschlossen die Versuche auf einem für diese Anforderung geeigneten System direkt bei der Firma Wolf durchzuführen. Hierzu wurde ein Laserlötwerkzeug des Typs LLW03 eingesetzt (Abb. 3.3.1).

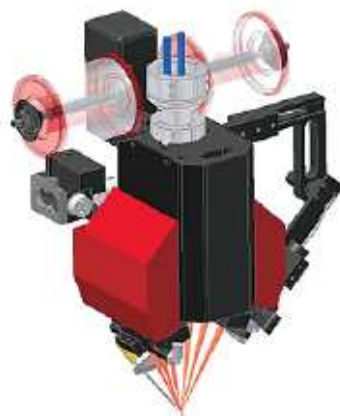


Abb. 3.3.1: Laserlötwerkzeug Typ LLW03 /10/

Dieses System hat eine Leistung von 60 W, die auf 6 Diodenlaserquellen verteilt sind (Abb. 3.3.2). Es arbeitet bei einer Wellenlänge von 940 nm und erzeugt einen Lichtfleck mit minimal ca. 1,0 mm Durchmesser.

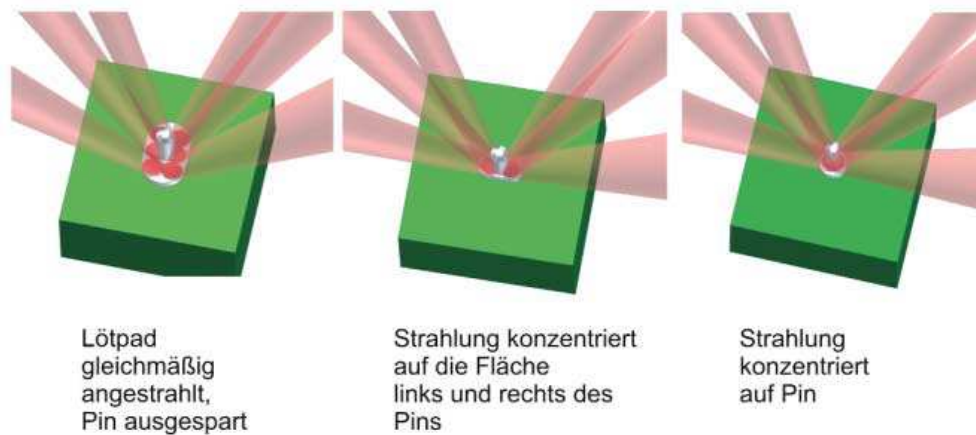


Abb. 3.3.2: Strahlformung mit Laserlötwerkzeug Typ LLW03 /13/

Durch den Einsatz von sechs separaten Laserquellen mit jeweils maximal 10 Watt Laserleistung, die aus unterschiedlichen Richtungen auf die Lötstelle einwirken, kann das Lötwerkzeug optimal auf die Lötstellengeometrie abgestimmt werden. Die Verteilung der Laserenergie auf mehrere Lichtquellen verkleinert die Strahlungsintensität und die Gefahr von Beschädigungen der Baugruppe.

Für die Versuche wurde ein handelsüblicher SnAg3,0Cu0,5-Lotdraht mit Flussmittelseele (3,5% Flussmittelanteil) und einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet. Weitere Zusatzflussmittel wurden nicht eingesetzt. Da sich schnell zeigte, dass die Lötresultate ohne Vorwärmung nicht zufriedenstellend ausfielen, wurden die Leiterplatten im weiteren Verlauf der Untersuchungen vorgewärmt. Die Baugruppe wurde dazu in der Einspannvorrichtung auf 90°C vorgewärmt (LPT = Leiterplattenoberflächentemperatur). Dann erfolgte der Wärmeeintrag durch den Laser (LL = Laserleistung). Folgende weitere Parameter wurden für den Prozess definiert:

- VWZ: Vorwärmen ohne Lotdrahtzufuhr
- LZ: Lötzeit, bei der gleichzeitig Lotdraht zugeführt wird
- NWZ: Halte- oder Nachwärmzeit, bei der bei eingeschalteter Laserleistung weiter Wärme zugeführt wird
- LZoL: Lotdrahtzufuhr ohne Leistung, bei der weiter Lotdraht zugeführt, aber keine Laserleistung mehr eingetragen wird
- LRZ: Lotrückzugszeit, bei der der Lotdraht wieder definiert zurückgezogen wird.

Die Versuche wurden an allen drei Leiterplattenvarianten durchgeführt. Die Tabelle 3.3.1 zeigt die optimierten Prozessparameter für das Laserlöten der angegebenen Komponenten auf der Leiterplattenvariante 1.

Bauteil	LL [W]	LPT [°C]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]	LRZ [s]	Geschw. [%]	LZoL [s]
DK 1.3	45	ca. 90	0,2	0,9	0,5	0,2	100	0,1
DK 1.7	45	ca. 90	0,4	1,3	0,5	0,2	100	0,1
Elko	45	ca. 90	0,2	0,7	0,5	0,2	100	0,1
BNC-Adapter	45/50	ca. 90	0,4	1,3	0,5	0,2	100	0,1
Flanschdose	45	ca. 90	0,3	0,6	0,4	0,2	100	0,1

Tab. 3.3.1: Prozessparameter Laserlöten LP-Variante 1

3.3.2 Kolbenlöten

Für die Versuche wurde ein Kolbenlötautomat, Typ „Vario A16-fra“ der Firma ATN (Mitglied im PBA) verwendet (Abb. 3.3.3).

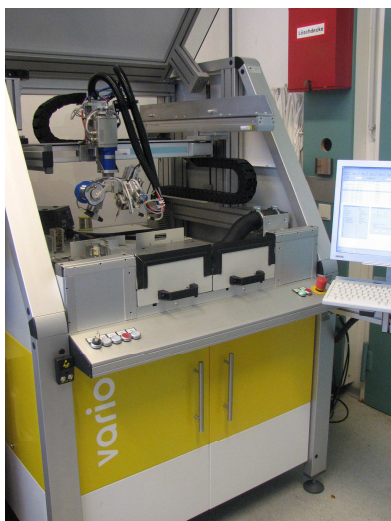
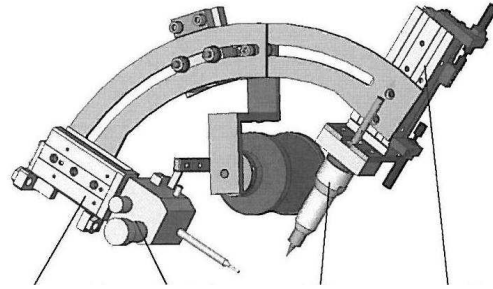


Abb. 3.3.3: Kolbenlötautomat /14/

Der Kolbenlötautomat besitzt eine 2-Achs-Kinematik (XY-Achsen-System) mit Verfahrbereichen von 400 x 400 mm, sowie einen elektrischen Schwenkantrieb. Die Achsen werden mit Schrittmotor-Antrieb mit Positionsregelung und Lageüberwachung betrieben. Ebenfalls vorhanden ist ein pneumatischer Z-Hub. Die Wiederholgenauigkeit der Anlage liegt bei $\pm 0,02$ mm. Der Löt Kopf ist über eine Kreisbogenführung mit den XY-Achsen verbunden (Abb.3.3.4). Das Pneumatikmodul bewegt den Kopf bis zu 50 mm in Z-Richtung. Der Lotdrahtvorschub befindet sich an einem Pneumatikmodul mit 30 mm Reichweite. Dieser wird über einen 12 V DC-Motor angetrieben. Hierbei sorgt eine Untersetzung mit einem Radgetriebe für ein hohes Drehmoment bei exaktem Vorschub. Lotdrähte (mit und ohne Flussmittelsee) von 0,5 mm bis 1,5 mm Durchmesser können verwendet werden. Es besteht die Möglichkeit das Lötwerkzeug von einem Löt Kolben zu einem Induktionskopf umzubauen. Diese Variante wurde jedoch in diesem Projekt nicht weiter untersucht.



Pneum. Hub Lotdrahtvorschub Kolben Pneum. Hub
Lotdrahtvorschub Kolben

Abb. 3.3.4: Prinzipskizze Kolbenlöten

Der standardmäßige eingebaute LötKolben wurde durch eine digitale Lötstation „i-con 1“ der Firma Erska /15/ ersetzt (Abb. 3.3.5). Diese besitzt ein Mikro-Hochleistungs-Heizelement mit einer Leistungsaufnahme von 80 W. Für diese Lötstation gibt es unterschiedliche Lötspitzen, die angepasst an die Bauteilgröße ausgewählt wurden.



Abb. 3.3.5: Erska Lötstation „i-con 1“ /15/

Die in der Lötanlage vorhandene automatische Reinigungsstation wurde durch eine manuelle Reinigungsstation mit Metallwolle ersetzt. Während der Versuchsdurchführung wurde deutlich, dass eine Reinigung von Hand sehr viel effektiver und zeitsparender ist, als die automatische Reinigung. Der Reinigungsschritt wird daraufhin aus dem Programm entfernt. Vor jeder Lötung wurde die Lötspitze von Hand gereinigt und neu verzinnt. Eine passende Leiterplattenhalterung wurde entwickelt und eingebaut (Abb. 3.3.6).

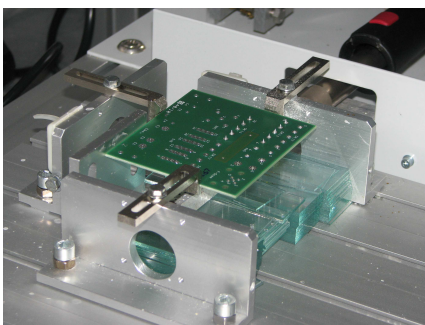


Abb. 3.3.6: Leiterplattenhalterung

Zur Dokumentation der Lötprozesse wurde in der Anlage eine Kamera installiert. Die für das Lötergebnis relevanten Parameter sind:

- Vorwärmzeit (VWZ) in Sekunden
- Lötzeit (LZ) in Sekunden
- Nachwärmzeit (NWZ) in Sekunden
- Lotgeschwindigkeit (LG) in Millimeter pro Sekunde

Die Vorwärmzeit ist die Zeit, in der der LötKolben die Leiterplatte aufheizt, bevor der Lotdraht zugeführt wird. Die Lötzeit in Sekunden gibt an, wie lange der Lotdraht zugeführt wird. Für die Dauer der eingestellten Nachwärmzeit verbleibt die LötKolbenspitze in der Lötstelle. Über die Lotgeschwindigkeit wird die Zuführgeschwindigkeit des Lotdrahts und somit die Lotmenge definiert.

Für die ersten Versuche zum Kennenlernen der Anlage wurden runde Stifte mit 1 mm Durchmesser in der Durchkontaktierung 1,3 mm verlötet. Es wurde ein bleifreies Zinn-Silber-Kupfer-Röhrenlot mit einem Durchmesser von 0,5 mm und einem Flussmittelgehalt von 2,2 % (SnAg3,8Cu0,7) verwendet. Um den Lötprozess zu verbessern wurde vor der Lötung zusätzlich ein No-Clean-Flussmittel aufgetragen. Nach einigen Testlötungen wurde deutlich, dass die gewählte Position von Kolben und Lotdrahtzufuhr (s. Abb.3.3.4) nicht optimal ist. Problem bei dieser Anordnung ist, dass durch die gegenüberliegende Anordnung von Kolben und Lotdrahtzufuhr das Lot nicht direkt vom Kolben erwärmt und der Lötprozess negativ beeinflusst wird. Daher wurde die Lotdrahtzufuhr im rechten Winkel zum Kolben ausgerichtet. In Abb. 3.3.7 ist die optimierte Werkzeugposition und die Lotdrahtzufuhr dargestellt. Durch diese Anordnung ist eine gute Wärmeübertragung vom LötKolben zum Lot und somit auf die Leiterplatte und den Bauelementanschluss gesichert und die Vorwärmzeit kann verringert werden.

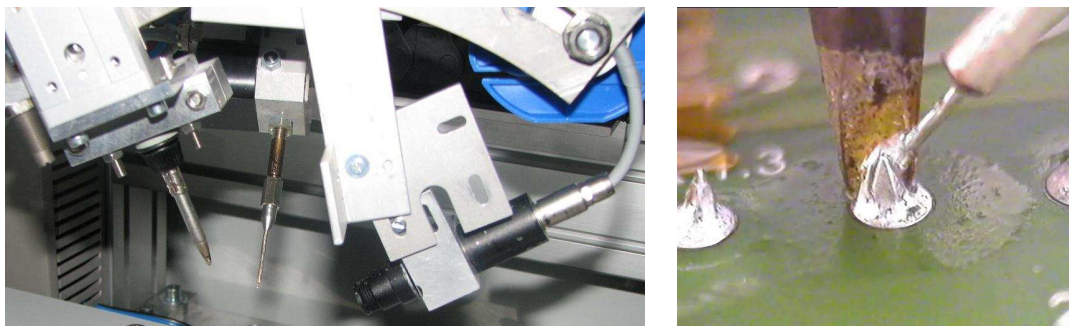


Abb. 3.3.7: Werkzeugposition für optimierte Lotdrahtzufuhr und Lotdrahtzufuhr

Die Versuche ohne Unterheizung zeigten je nach Anbindung teilweise nur unbefriedigende Lötresultate. Daher wurde in den Versuchsaufbau eine Unterheizung integriert. Sowohl mit einer Heißgasunterheizung (JBC Advanced JT 7800, 1000W, Temperaturbereich: RT – 450°C; Luftmenge: 6 – 45 l/min) als auch mit einer Infrarotunterheizung, Abb. 3.3.8, (Keramik-Flächen-Infrarotstrahler, 150W, Wellenlänge 2 – 10 µm) zeigte sich eine deutliche Ergebnisverbesserung.

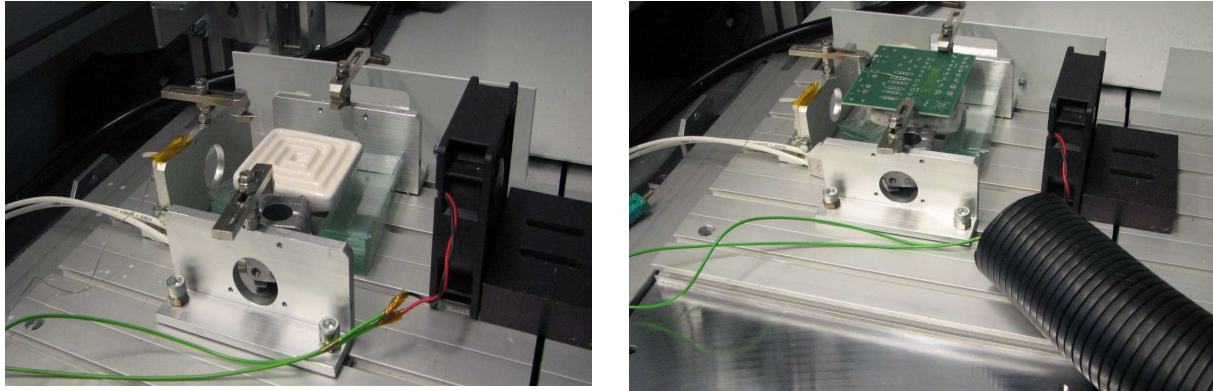


Abb. 3.3.8: Infrarotunterheizung und Leiterplatte in Lötposition

Um einen Basisparametersatz für die drei LP-Varianten zu ermitteln, wurden die Versuche zunächst an den quadratischen Stiften mit 1,4 mm Kantenlänge durchgeführt. Die Tabellen 3.3.2 - 3.3.4 zeigen eine Übersicht von Lötparametern. Insbesondere bei den LP-Varianten 2 und 3 musste die Leiterplattentemperatur deutlich erhöht werden, um das Lötresultat zu verbessern. Hier ist wichtig zu überprüfen, inwieweit dies Auswirkungen auf die Baugruppe hat (s. Kap. 4.2).

Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [°C]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]	LG [mm/s]
1	WF1	350	-	3	4	3	3
2	vollflächig	350	130	4	4	4	4
3	WF3	350	-	4	4	4	4
4	-	350	-	3	4	2	3
5	WF2	350	-	3	4	2	3
11	WF2	400	-	3	4	3	3
12	vollflächig	400	130	4	4	4	4
13	WF3	400	-	4	4	4	4
14	-	400	-	3	4	3	3
15	WF1	400	130	4	4	4	4

Tab. 3.3.2: Lötversuche, LP-Variante 1 mit 4 x 70 µm Cu

Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [C]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]	LG [mm/s]
1	WF1	350	110	3	4	4	4
2	vollflächig	350	160	4	4	4	4
3	WF3	350	140	3	4	4	4
4	-	350	100	3	4	2	4
5	WF2	350	110	3	4	3	4
11	WF2	400	120	4	4	4	4
12	vollflächig	400	160	4	4	4	4
13	WF3	400	160	4	4	4	4
14	-	400	100	3	4	3	4
15	WF1	400	160	4	4	4	4

Tab. 3.3.3: Lötversuche, LP-Variante 2 mit 2 x 70µm und 2 x 210 µm Cu

Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [C]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]	LG [mm/s]
1	WF1	350	160	4	4	4	4
2	vollflächig	350	180	4	4	4	4
3	WF3	350	180	4	4	4	4
4	-	350	140	4	4	4	4
5	WF2	350	140	4	4	4	4
11	WF2	400	160	4	4	4	4
12	vollflächig	400	180	4	4	4	4
13	WF3	400	180	4	4	4	4
14	-	400	160	4	4	4	4
15	WF1	400	180	4	4	4	4

Tab. 3.3.4: Lötversuche, LP-Variante 3 mit 2 x 70µm und 2 x 400 µm Cu

Die angegebenen Parameter in den Tabellen sind wie folgt definiert:

- KT: Kolbentemperatur
- LPT: Leiterplattentemperatur
- VWZ: Vorwärmzeit
- LZ: Lötzeit in Sekunden
- NWZ: Nachwärmzeit in Sekunden
- LG: Lotgeschwindigkeit (Vorschub) in Millimeter pro Sekunde.

3.3.3 Selektives Wellenlöten

Versuche mit der selektiven Welle wurden unter Verwendung von Selektivlötanlagen von zwei unterschiedlichen Herstellern durchgeführt und zwar mit einer Versaflow 3 / 45 der Fa. Ersä und einer Miniwellenlötanlage der Fa. Eutect /16/. Da sich die Lötanlagen herstellerbedingt hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise etwas unterscheiden, bestand dadurch die Möglichkeit einen eventuell vorhandenen Maschineneinfluss auf das Lötergebnis zusätzlich zu berücksichtigen.

3.3.3.1 Versuche mit der Versaflow

Bei der Versaflow 3 / 45 der Fa. Ersä /15/ (Abb. 3.3.9) handelt es sich um eine In-Line-Selektiv-Lötmaschine bei der mehrere Löt-, Flux- und Vorheizmodule integriert werden können. Das Design der Lötdüse und des Löttiegels ermöglicht eine Prozesskontrolle der Lötstelle. Lotniveau, Lötwellenhöhe und Temperatur werden kontinuierlich überwacht. Die elektromagnetische Lotpumpe ohne bewegliche Teile gewährleistet eine konstante Durchflussrate und die Wellenhöhe ist präzise einstellbar. Mit dem Sprühfluxer können sowohl Punkte als auch Bahnen aufgetragen werden. Das Flussmittel kann sehr gezielt auf die Lötstelle aufgebracht werden, so dass die benetzten Flächen lediglich 3 mm im Durchmesser betragen. Die Vorheizung besteht aus kurzwelligen IR-Strahlern auf der Leiterplattenunterseite und einer Konvektions- oberheizung.



Abb. 3.3.9: Selektivlötanlage Versaflow der Fa. Ersä /15/

Als Lotwerkstoff wurde das Weichlot SAC305 mit einer Zusammensetzung von 96,5 % Zinn, 3 % Silber und 0,5 % Kupfer verwendet. Dieses Lot ist derzeit am weitesten verbreitet und wird standardmäßig in allen Anwendungsbereichen der Elektronikfertigung eingesetzt. Die Lötversuche erfolgten bei drei verschiedenen Lotbadtempera-

turen, 285 °C, 300 °C und 320 °C. Die Kontaktzeit je Lötstelle variierte zwischen 0,5 bis 6 Sekunden. Stichversuche wurden mit Kontaktzeiten von 10, 12 und 30 Sekunden durchgeführt. Die Vorheizung wurde mit einer Temperatur von 125 °C und einer Vorwärmzeit von 100 Sekunden betrieben. Die Tabellen 3.3.5 und 3.3.6 enthalten eine Übersicht der gewählten Lötparameter und Lötversuche.

Leiterplatte	Löttemperatur	Kontaktzeit (in s)	Bauelemente
Variante 1	285 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, BNC, SvB
Variante 1	320 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, BNC, SvB, DK 1.7 - Pin 12
Variante 1	300 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, SvB
Variante 2	285 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, BNC, SvB
Variante 2	320 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, BNC, SvB, DK 1.7 - Pin 12
Variante 2	300 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, SvB
Variante 3	285 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, BNC, SvB, F-Dose, Elko
Variante 3	320 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, BNC, SvB
Variante 3	300 °C	0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	AmS, SvB, DK1.7 – Pin 12
Variante 3	285 °C	2,0; 4,0; 6,0;	DK 1,7 - Pin 12,14,15 DK 1,3 – Pin 16,19,20
Variante 3	285 °C	8,0; 10,0; 12,0;	DK 1,7 – Pin 12 DK 1,3 – Pin 17,20
Variante 3	300 °C	1,0;	DK 1,3 – Pin 16, 18
Variante 3	300 °C	2,0; 3,0;	DK 1,3 – Pin 16, 18 DK 1,7 – Pin 12
Variante 3	300 °C	4,0;	DK 1,3 – Pin 16, 18, 20 DK 1,7 – Pin 12
Variante 3	300 °C	6,0; 8,0;	DK 1,3 – Pin 16,17,18, 20 DK 1,7 – Pin 12
Variante 3	300 °C	10,0;	DK 1,3 – Pin 17 DK 1,7 – Pin 12
Variante 3	320 °C	0,5; 1,0; 2,0;	DK 1,3 – Pin 16, 18, 20
Variante 3	320 °C	2,0; 4,0; 6,0,	DK 1,3 – Pin 17, 20

Tab. 3.3.5: Lötversuche mit der Lötanlage Versaflo der Fa. Ersa

Variante 1	285 °C	3,0; 4,0; 6,0;	Elko
Variante 1	320 °C	30	DK 1.7
Variante 2	285 °C	30	DK 1.7
Variante 2	285 °C	3,0; 4,0; 6,0;	Elko
Variante 3	285 °C	1,0; 2,0; 3,0;	DK 1,7 – Pin 13
Variante 3	285 °C	0,5; 1,0; 2,0;	DK 1,7 – Pin 11
Variante 3	300 °C	2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	Elko
Variante 3	300 °C	12,0;	DK 1,7 – Pin 12
Variante 3	320 °C	2,0; 3,0; 4,0; 6,0;	Elko

Tab. 3.3.6: Lötversuche mit der Lötanlage Versaflo – Stichversuche zur Ergänzung

3.3.3.2 Versuche bei der Fa. Eutect

Für die Selektivlötversuche bei der Fa. Eutect wurde eine Miniwellenlötanlage verwendet. Als Lot kam ebenfalls ein SAC 305 zum Einsatz. Im einzelnen wurden die in Tabelle 3.3.7 aufgelisteten Parameter ausgewählt.

Leiterplatte	Lötzeit [s]	Löttemp. [°C]	Vorwärmtemp. [°C]	Vorwärmzeit [s]	Bauelement
Variante 1	5	300	-	-	SvB
Variante 2	5	300	-	-	SvB
Variante 3	5	300	-	-	SvB
Variante 1	3	300	-	-	AmS
Variante 2	3	300	-	-	AmS
Variante 3	3	300	-	-	AmS
Variante 2	3	300	-	-	Elko
Variante 3	3	300	-	-	Elko
Variante 2	5	300	ca. 100	ca. 30s	SvB
Variante 3	5	300	ca. 100	ca. 30s	SvB
Variante 2	3	300	ca. 100	ca. 30s	AmS
Variante 3	3	300	ca. 100	ca. 30s	AmS
Variante 2	3	300	ca. 100	ca. 30s	Elko
Variante 3	3	300	ca. 100	ca. 30s	Elko
Variante 1	5	350	ca. 100	ca. 30s	SvB
Variante 2	5	350	ca. 100	ca. 30s	SvB
Variante 3	5	350	ca. 100	ca. 30s	SvB
Variante 1	3	350	ca. 100	ca. 30s	AmS
Variante 2	3	350	ca. 100	ca. 30s	AmS
Variante 3	3	350	ca. 100	ca. 30s	AmS
Variante 2	3	350	ca. 100	ca. 30s	Elko
Variante 3	3	350	ca. 100	ca. 30s	Elko
Variante 2	10	350	ca. 100	ca. 30s	SvB
Variante 3	10	350	ca. 100	ca. 30s	SvB

Tab. 3.3.7: Lötversuche mit der Lötanlage der Fa. Eutect

3.4 Temperaturmessung

Zur Prozessqualifikation wurden Temperaturmessungen durchgeführt. Hierzu wurde das Temperaturmesssystem PTP der Firma globalPoint ICS GmbH mit 0,25mm starken NiCr/Ni-Thermoelementen verwendet. Die Temperaturfühler wurden in den Durchkontaktierungen (Lötstellen), auf den Bauteiloberseiten und auf der Leiterplattenober- und unterseite in der Nähe der Lötstellen angebracht. So ergab sich ein umfassender Überblick der Temperaturverteilung. Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Temperaturverläufe, die beim selektiven Wellenlöten auf einer Versaflo der Firma Ersa unter verschiedenen Bedingungen gemessen wurden. Die Messkurven wurden am Bauelementtyp Elko auf der Leiterplatte mit der Variante 3 aufgenommen. Abb. 3.4.1 zeigt den Einfluss der Wärmefallen bei 110°C Vorwärmtemperatur, 285°C Lotbadtemperatur (=Lötwellentemperatur) und 5 s Lötzeit je Lötstelle.

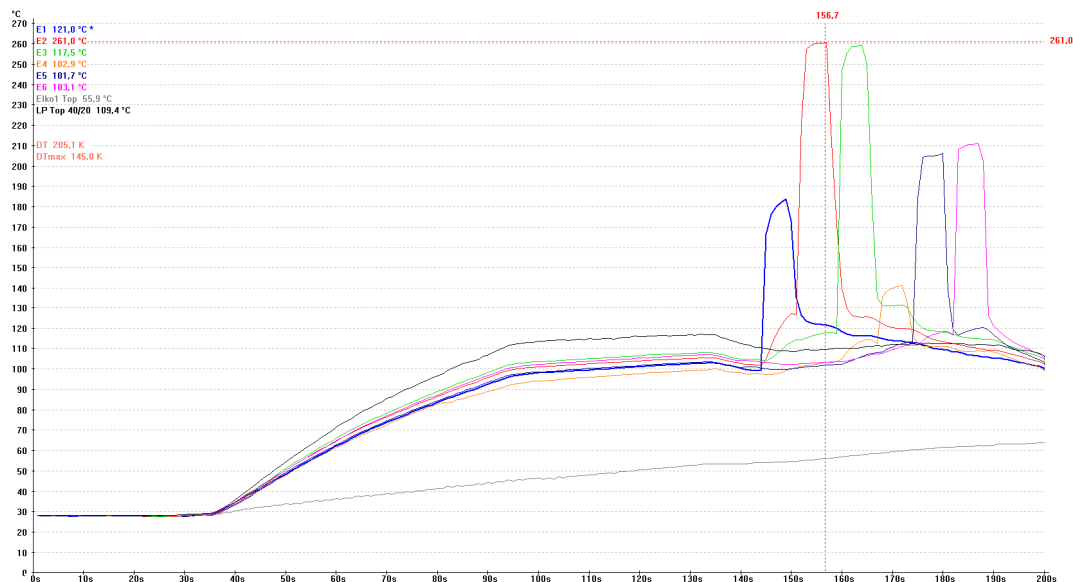


Abb. 3.4.1: Einfluss von Wärmefallen

Dargestellt sind die Lötstellentemperaturen der einzelnen Anschlüsse. Nur die Anbindungsvarianten über Wärmefallen (WF1, E3 = Kurve 3 und WF2 E2 = Kurve 2) zeigen eine Lötstellenerwärmung, die signifikant über der Schmelztemperatur des SnAgCu-Lotes liegt und somit eine erfolgreiche Lötung ermöglichen kann. Voraussetzung ist hierfür allerdings auch, dass zusätzliche thermal vias für den Wärmetransport in das Layout integriert sind. Dies ist bei den Anschlüssen E1 – E3 der Fall. Hier ist ein deutlicher Unterschied zu den jeweils korrespondierenden Anschlüssen E4 – E6 sichtbar (E1 zu E4, E2 zu E5, E3 zu E6). Allerdings reicht auch die Anbindung über zusätzliche thermal vias nicht aus, wenn die Durchkontaktierung vollflächig an eine 400 µm starke Masselage angebunden ist (E1).

Den Einfluss der längeren Lötzeit bei 110°C Vorwärmtemperatur, 285°C Lotbadtemperatur und 5 s bzw. 10 s Lötzeit an der Lötstelle zeigt Abb. 3.4.2. In diesem Beispiel wird die Lötstellentemperatur nur von 184°C auf 189°C angehoben.

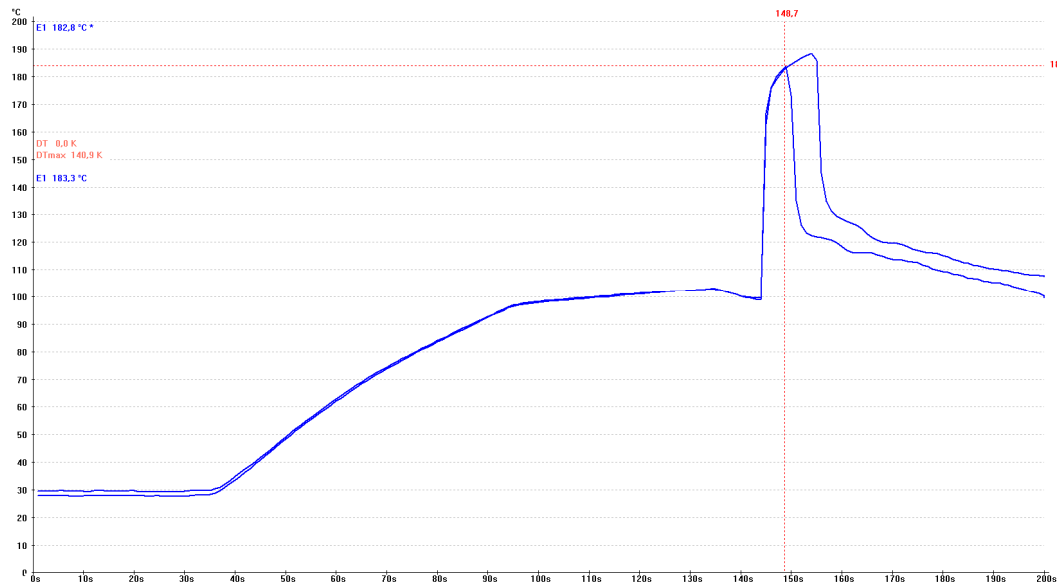


Abb. 3.4.2: Einfluss längerer Lötzeit

Der Einfluss der Vorheiztemperatur wird in Abb. 3.4.3 aufgezeigt. Dargestellt sind die Lötstellentemperaturen der einzelnen Anschlüsse E1 – E6 in Abhängigkeit der Wärmefallen. Lötparameter sind 285°C Lotbadtemperatur, 5 s Lötzeit und 110°C bzw. 130°C Vorheiztemperatur. Zwar ist teilweise ein deutlicher Anstieg sichtbar, dieser fällt jedoch bei fehlender zusätzlicher Anbindung der Lötstelle über thermal vias (E4-E6) gering aus. Ist eine Lötstellentemperatur von ca. 260°C erreicht erfolgt keine signifikante Erwärmung der Lötstelle mehr (E3). Das macht deutlich, wie wichtig die optimale Anpassung von Layout und Lötprozessparameter für den Einsatz der Selektivlöttechnik in der Leistungselektronik ist.

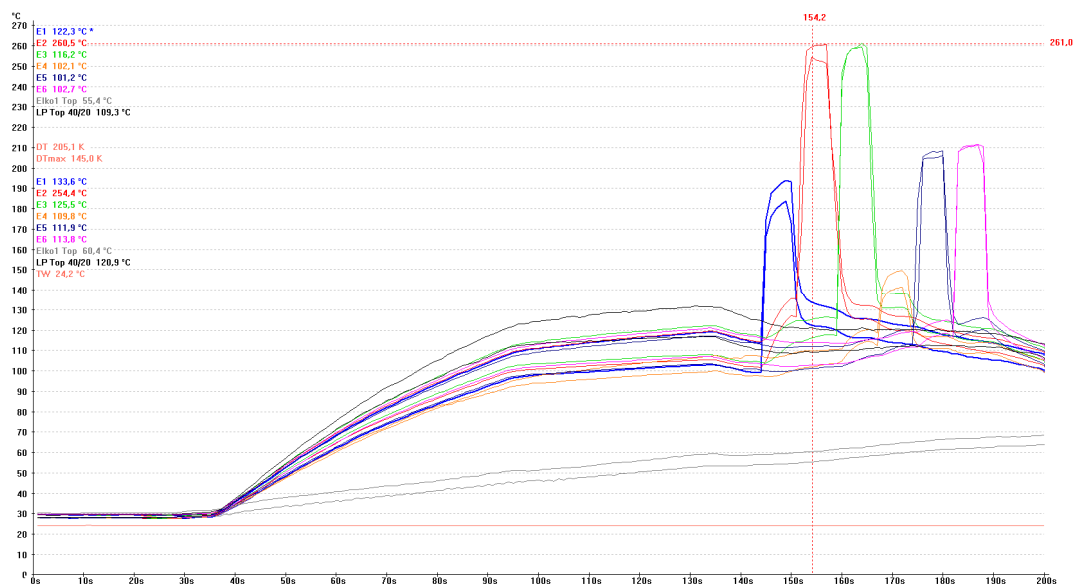


Abb. 3.4.3: Einfluss der Vorheiztemperatur

Abb. 3.4.4 zeigt an Hand von zwei Messkurven den Einfluss der Vorheiztemperatur im Vergleich mit einer längeren Lötzeit. Die Kurven unterscheiden sich in der Vorheiztemperatur (110°C bzw. 130°C) sowie der Lötzeit (5s zu 10s). Beide Versuche wurden mit einer Lotbadtemperatur von 285°C durchgeführt. Deutlich sichtbar ist, dass die Erhöhung der Vorheiztemperatur einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Endtemperatur hat als die Verlängerung der Lötzeit (194°C zu 189°C).

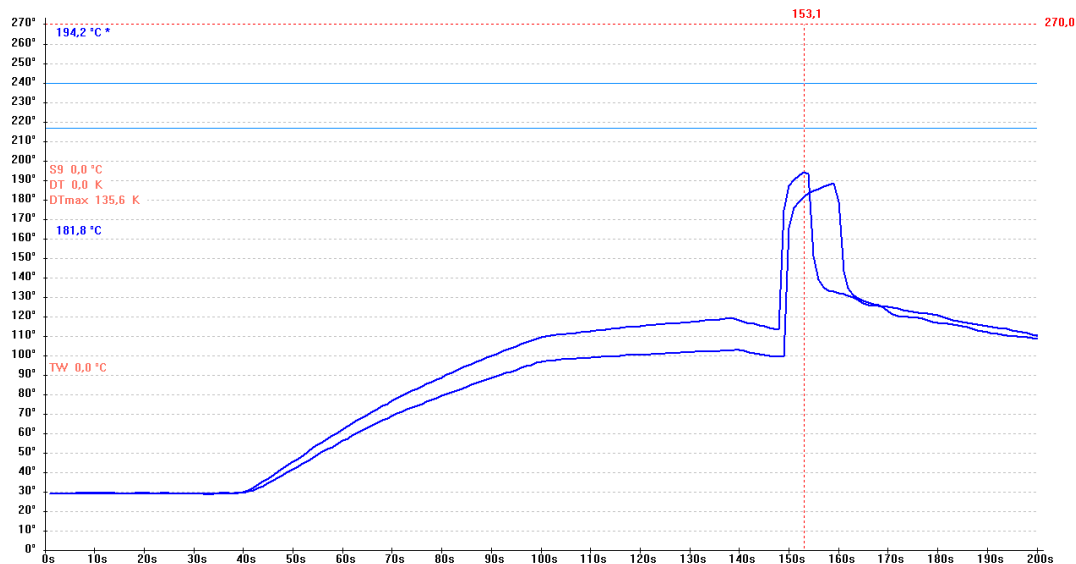


Abb. 3.4.4: Vergleich Vorheiztemperatur gegen längere Lötzeit

Die Abb. 3.4.5 zeigt den Einfluss einer höheren Lötwellentemperatur auf die Lötstellenerwärmung. Bei einer Vorheiztemperatur von 130 °C wurde die Lötwellen bei einer Lötzeit von 5 s von 285°C auf 300°C erhöht. Durch diese Maßnahme ergibt sich nur eine geringe Erhöhung der Lötstellentemperatur, im besten Fall von 261°C auf 266°C. Die Wärme wird über die dicken Kupferlagen abgeführt und mit dem selektiven Wärmeeintrag kann dieser Verlust nicht ausgeglichen werden. Hier zeigen sich die Grenzen der selektiven Wärmeeinbringung.

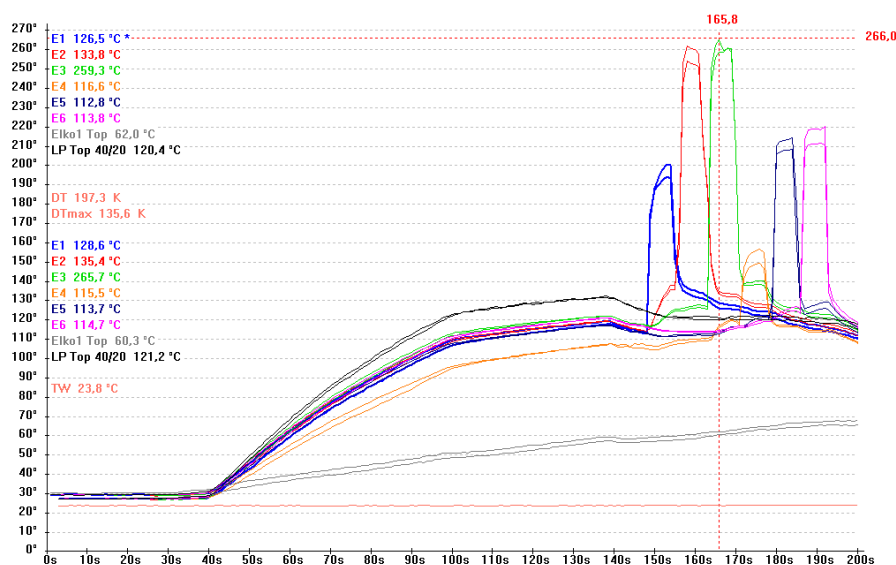


Abb. 3.4.5: Einfluss höherer Löttemperatur

3.5 Lötstellenbewertung und Bewertung der Leiterplatten

3.5.1 Optische Beurteilung

Die Lötverbindungen wurden optisch bei einer 40-fachen Vergrößerung unter Verwendung eines Stereomikroskopes inspiziert. Für die Beurteilung wurden die Abnahmekriterien der IPC-A-610, Revision E für Klasse 3 herangezogen. Bei allen vorhandenen Lötverbindungen wurden die Benetzung des Lötages auf der Lötseite und auf der Bauteilseite und der Lotdurchstieg, soweit optisch möglich, begutachtet. Hier wurde unterschieden zwischen 100 % Durchstieg und unvollständigem Lotdurchstieg. Der tatsächliche Füllgrad konnte, bedingt durch die große Menge der Lötversuche und die benötigten Untersuchungsmethoden Metallographie oder Röntgenanalyse, nur stichprobenmäßig erfolgen. Weiterhin wurden die Leiterplatten makroskopisch begutachtet, um festzustellen inwieweit optisch sichtbare Schädigungen während des Selektivlötprozesses aufgetreten sind. Für die Bewertung dienten hier die Vorgaben der IPC-A-600G /17/.

3.5.2 Röntgenuntersuchung

Bei den Bauteilen, bei denen bauteilseitig die optische Inspektion nur eingeschränkt möglich war, wurde zur Überprüfung des Füllgrades der Durchkontaktierung zusätzlich eine 2 D- Röntgenuntersuchung durchgeführt. Durch die Verwendung einer Schrägdurchstrahlung und das Kippen und Drehen der Baugruppen kann über diese Methode eine grobe Abschätzung des Lotdurchstieges erfolgen.

3.5.3 Metallographie

Zur Überprüfung des Füllgrades, der Ausbildung der Lötverbindungen an den Grenzflächen und der Schädigungen der Leiterplatte wurden an ausgewählten Baugruppen und Bauteilen metallographische Schlitze angefertigt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf folgende mögliche Fehler innerhalb der Leiterplatte gerichtet: Kupferablegerung, Innenlagenanbindung, Padlifting, Harzrückzug und Laminatfehler.

3.6 Thermische Simulation

Die lokale Erwärmung der Lötstelle in einem bestimmten Temperatur-Zeit-Fenster ist Voraussetzung für die Benetzung und Ausformung der Lötverbindung. Die Lötstelle und ihre Umgebung erfordert je nach Geometrie und Material eine entsprechende Wärmezufuhr. Es wird gezeigt, dass die thermischen Vorgänge mit einfachen Modellansätzen zu beschreiben und welche Parameter als wesentliche Einflussgrößen zu berücksichtigen sind.

Um dem Anwender die thermische Modellierung näher zu bringen, wurden einzelne thermische Berechnungen, teils in stark idealisierter Form, in einer Serie von Arbeitsblättern unter MS-Excel zusammengefasst. Diese Anwendung wurde zunächst im Rahmen des AiF Projekts "Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen im manuellen Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen" (DVS-Nr./IGF-Nr.:7.057/15.535N) /18/ entwickelt. Im Rahmen des vorliegenden AiF-Projektes sind einige Erweiterungen entstanden. Das MS-Excel Arbeitsblatt „LP und DK_Modell.xls“ ist eine Art "Formelsammlung" zur näherungsweise Berechnung

bestimmter thermischer Eigenschaften von Leiterplatten (LP) mit Durchkontaktierungen (DK), welche z.B. für den Lötprozess von Bedeutung sind. Sinn und Ziel dieses Werkzeugs ist, mit wenigen Zahleneingaben eine Abschätzung zu errechnen und Tendenzen aufgrund von Parametervariationen schnell zu erarbeiten.

Disclaimer:

Da alle mathematisch-physikalischen Zusammenhänge ungeschützt weitergegeben werden (und daher ggf. nicht erkennbar verändert worden sein könnten) und weil die Qualität der Ergebnisse von der Eingabe sinnvoller Parameter abhängt, kann der Autor keine Gewähr für die Richtigkeit der Ergebnisse übernehmen. Die Nutzung dieser Anwendung und der berechneten Ergebnisse erfolgt in eigener Verantwortung.

3.6.1 Modellbetrachtung der Wärmeleitfähigkeit einer Leiterplatte

Die laterale Wärmeleitfähigkeit einer Leiterplatte kann in weiten Grenzen variieren, abhängig vom Layout der Cu-Lagen. Insbesondere bei Dickkupfer-(Hochstrom)-Leiterplatten kann die Wärmeleitfähigkeit 50% und mehr des Wertes für Cu erreichen. Da eine geometrisch exakte Betrachtung des Layouts z.B. mit einem Finite-Elemente-Modell (FEM) sehr aufwendig werden kann, werden die Cu-Lagen in der vorliegenden Betrachtung vereinfacht, mit ihren in der jeweiligen Richtung wirksamen Anteilen berücksichtigt (Abb. 3.6.1).

Eingaben zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten einer Leiterplatte bei gegebenem Lagenaufbau							
Cu Lagen	Anzahl	Dicke [µm]	Belegung	Wärmeleitfähigkeit	Dicke	eff.	
strukturiert		35	0.05	380		0	
strukturiert	2	90	0.05	380		180	
vollflächig		35	0.95	380		0	
vollflächig	2	70	0.9	380		140	
gesamt	4	1600 µm		0.5		1280	
Iso-Lagen	3	426.6666667 µm					
Durchkontaktierungen DK						Querschnitt	WL
Durchmesser [mm]		1				0.7853975	
Cu-Dicke [µm]		25				0.07853975	
Abstand [mm]		3				8.13606275	0
Ergebnis Wärmeleitfähigkeiten							
lateral		32.52	W/m K				
senkrecht		0.54	W/m K				
senkrecht		3.81	W/m K		im Bereich von Durchkontaktierungen		
senkrecht		7.30	W/m K		im Bereich von Durchkontaktierungen, die mit Lot gefüllt sind		
Grundlage	Berechnung der Leitfähigkeiten nach Parallel- bzw. Serienmodellansatz.						

Abb. 3.6.1: Arbeitsblatt „Wärmeleitfähigkeit“

3.6.2 Modellbetrachtung der Stromtragfähigkeit

Das Modell betrachtet idealisiert einen geraden, langen Leiterzug als Wärmequelle aufgrund des von der Temperatur abhängigen spezifischen Widerstands des Cu, der Leitergeometrie (Breite, Dicke) und des Stromflusses (Abb. 3.6.2). Mit der Wärmeleitfähigkeit der Leiterplatte (siehe oben) und dem Wärmeübergang an die umgebende

Luft ergibt sich eine Wärmespreizung zu beiden Seiten der Leiterbahn in die Fläche. Es stellt sich die charakteristische thermische Breite b_{TH} ein. Damit lässt sich ein thermischer Widerstand bestimmen. Somit stehen Strom, Verlustleistung, Temperatur, Geometrie- und Materialdaten in einem festen Zusammenhang miteinander in Beziehung.

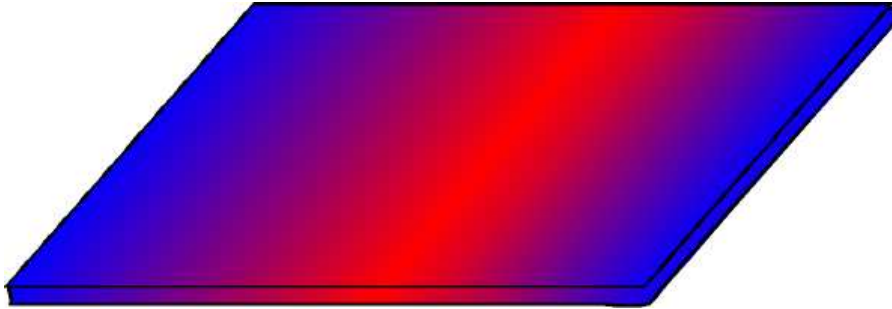


Abb. 3.6.2: Schematische Darstellung der lokalen Erwärmung einer Leiterbahn auf einer Leiterplatte

Die charakteristische thermische Breite b_{TH} seitlich der Leiterbahn berechnet sich durch Gleichsetzen der Wärmeströme P_L und P_K zu (linearisierter Ansatz):

Wärmeleitung in LP neben Leiterzug:	$P_L = \frac{\lambda \cdot L \cdot d}{b_{TH}} \cdot (T_i - T_a)$
Konvektion (eine oder beide Seiten):	$P_K = n_{Seiten} \cdot \alpha \cdot L \cdot b_{TH} \cdot \left(\frac{T_i + T_a}{2} - T_a \right)$

$$b_{TH} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot d}{n_{Seiten} \cdot \alpha}}$$

d ... Dicke der Leiterplatte

λ ... laterale Wärmeleitfähigkeit (typisch 1 ... 20 W m⁻¹ K⁻¹, entsprechend der Cu Lagen, bis zu und über 200 W m⁻¹ K⁻¹ bei Dickkupfer)

α ... Wärmeübergangskoeffizient (typisch 5 ... 15 W m⁻² K⁻¹), entsprechend der Kühlbedingungen

Des Weiteren werden ein- und beidseitiger Wärmeübergang an Luft ($n=1$ bzw. 2), sowie eine einseitige oder beidseitige Wärmespreizung (d.h. Leiterzug am Rand oder Leiterzug mittig) berücksichtigt. Bei begrenzter Leiterplattenfläche oder bei hoher Wärmeleitfähigkeit erwärmt sich auch der Randbereich der Leiterplatte (Abb. 3.6.3), da keine ausreichende Fläche für die Wärmeübertragung an die Umgebung zur Verfügung steht ($b < b_{TH}$).

derstands R_{TH} zwischen Zentrum (Lötstelle, DK) und Umgebung der Lötstelle (LP, Luft) (Abb. 3.6.5).

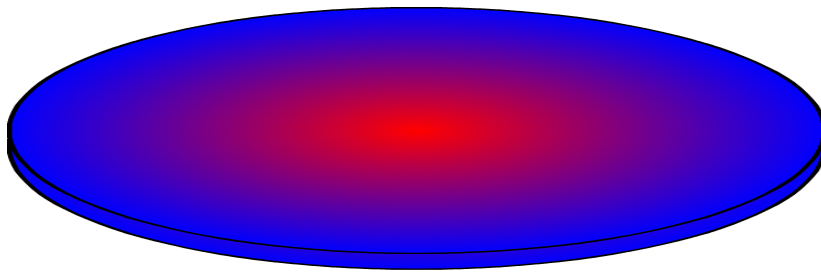


Abb. 3.6.5: Schematische Darstellung des Modells, Kreisscheibe, Wärmequelle im Zentrum (z.B. eine DK), Wärmespreizung radial in die Fläche, Wärmeabgabe über gesamte Oberfläche

Der Radius r_a der wärmebeeinflussten Zone im thermischen Gleichgewicht sowie der thermische Widerstand R_{TH} der Leiterplatte um die DK lassen sich wie folgt bestimmen:

$$\begin{array}{l} \text{Wärmeleitung in LP radial} \\ \text{um DK:} \end{array} \quad P_L = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot d}{\ln(r_a / r_i)} \cdot (T_i - T_a)$$

$$\text{Konvektion (beide Seiten):} \quad P_K = 2 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot r_a^2 \cdot \left(\frac{T_i + T_a}{2} - T_a \right)$$

Mit dem Ansatz $P_L = P_K$ und mit Hilfe der Vereinfachung $\ln(r_a / r_i) \approx 4$ (d.h. $r_a / r_i \approx 50$) ergeben sich folgende Näherungsformeln:

$$r_a = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d}{2 \cdot \alpha}} \quad \text{und} \quad R_{th} = \frac{(T_i - T_a)}{P} = \frac{2}{3 \cdot \lambda \cdot d}$$

d ... Dicke der Leiterplatte

λ ... laterale Wärmeleitfähigkeit (typisch 1 ... 20 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, entsprechend der Cu Lagen, bis zu und über 200 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ bei Dickkupfer)

α ... Wärmeübergangskoeffizient (typisch 5 ... 15 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

Bei geringer Wärmeleitfähigkeit der Leiterplatte ergeben sich wenige mm Radius und ein R_{TH} über 100 K/W. Höhere Wärmeleitfähigkeiten ergeben ca. 30 mm Radius und einen R_{TH} von ca. 10 K/W.

Im Arbeitsblatt „DK Modell“, Abb. 3.6.6 wird einerseits die oben beschriebene Lösung bestimmt, andererseits wird der thermische Widerstand mit einem grob diskretisierten Ringscheiben-Modell berechnet. In Letzterem ist eine Durchkontaktierung (DK) mit einer Wärmefalle (WF) im Zentrum der Modellgeometrie vorgesehen, jeweils mit änderbaren Geometrien (Tabelle 3.6.1).

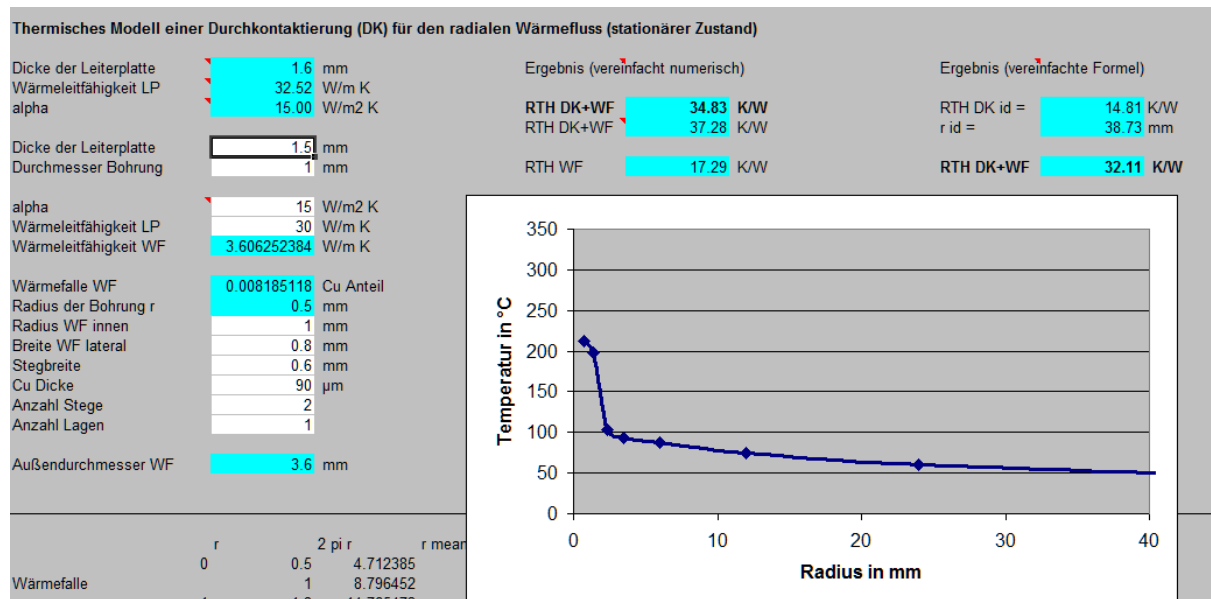


Abb. 3.6.6: Arbeitsblatt „DK Modell“

R _{TH} der DK in K/W	70 µm Cu	200 µm Cu	400 µm Cu
Ohne WF	20	7	4
Einfache WF (WF1)	37	14	8
Breite WF (WF3)	54	22	12
Doppelte WF (WF2)	86	42	24

Tab. 3.6.1: Abschätzung des thermischen Widerstands R_{TH} einer DK, abhängig von der Anbindung und der Dicke der angebrachten Cu-Lage, Beispiele von den vorliegenden Testleiterplatten

3.6.4 Wärmesenke Bauteil

Für THT-Bauteile wird zunächst der Bauteilanschluss (Pin) erwärmt. Die folgende Modellrechnung gilt für die Erwärmung der Spitze eines Pins hinreichender Länge (Abb. 3.6.7). Unterschiedliche Bauteilkörper wurden hier nicht berücksichtigt.

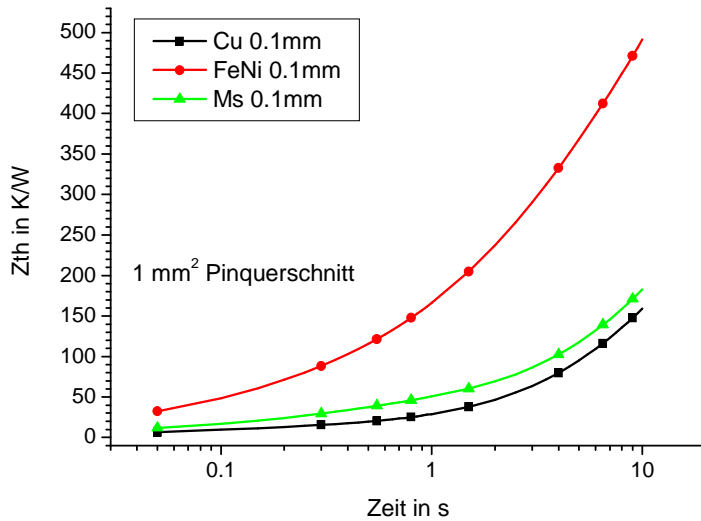


Abb. 3.6.7: Modellrechnung für die Erwärmung der Spitze eines Pins aus unterschiedlichen Materialien

Die Temperatur an der Pinspitze nach der Zeit t berechnet sich wie folgt mit der Leistung P und dem Pinquerschnitt A, wobei Z_{TH} die an den Kurvenverlauf angepasste Fit-Funktion (Tabelle 3.6.2) darstellt:

$$T(t) = T_{Raum} + \frac{Z_{TH}(t)}{A[mm^2]} \cdot P$$

	Z_{TH} Verlauf in $KW \cdot 1mm^2$	ΔT in K über 2mm Pinlänge ($1mm^2, 1W$)
Cu	$Z_{TH} = 10 \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{0.1}}\right) + 335 \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{17}}\right)$	4
FeNi	$Z_{TH} = 95 \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{0.2}}\right) + 530 \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{7}}\right)$	130
Ms	$Z_{TH} = 31 \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{0.2}}\right) + 341 \cdot \left(1 - e^{\frac{t}{17}}\right)$	15

Tab. 3.6.2: Fit-Funktionen, aus der Modellrechnung für die Erwärmung der Spitze eines Pins aus unterschiedlichen Materialien

Pins aus Kupfer (Cu) bzw. Messing (Ms) benötigen mehr Wärme (höhere Leistung über kurze Zeit), da sie diese erheblich schneller in den Pin ableiten als Pins aus FeNi. Dies erklärt z.B. den schlechter erreichbaren Lotdurchstieg bei FeNi-Pins, wie sie häufig bei THT-Elkos anzutreffen sind.

3.6.5 Der selektive Lötvorgang

Rechnerisch ist für das Zusammenführen von Wärmequelle und Wärmesenke die Wärmebilanz aufzustellen. Die zeitliche Abhängigkeit und die unterschiedlichen Parameter erfordern selbst bei erheblicher Idealisierung eine umfangreiche numerische Berechnung, welche hier nicht in überschaubarer Form wiedergegeben werden kann. Jedoch haben die durchgeführten Modellrechnungen gezeigt, dass schon die Betrachtung des stationären Zustands allein (wiederum als erhebliche Idealisierung) eine Abschätzung ermöglicht, ob unter gegebenen Randbedingungen eine hinreichende Erwärmung für den Lötvorgang sichergestellt werden kann.

Thermisches Gleichgewicht - der stationäre Endzustand			
Temperatur °C	Rth K/W	Wärmefluß W	Ort
350.0			Heizung, LötKolben-Regeltemperatur
	25.000	4.34	Lötspitze
241.4		0.671	Lötspitze, Ende
	1.000		Übergang, Kontakt Lötspitze - Lötgut
237.1		0.658	Lötgut, Lötstelle
	50.000		Lötgut, Leiterplatte
20.0			Umgebung, Vorwärmtemperatur

Abb. 3.6.8: Arbeitsblatt „Lötstelle“

Für den Wärmefluss ergibt sich eine Serienschaltung von (thermischen) Widerständen, aus der sich die maximal erreichbare Lötstellentemperatur T_{LS} analog zu einem Spannungsteiler bestimmen lässt (vgl. Arbeitsblatt „Lötstelle“, Abb. 3.6.8). Die Regeltemperatur T_R ist über den thermischen Widerstand der Lötspitze R_{THLS} mit der Lötstellentemperatur T_L verbunden, diese wiederum über den thermischen Widerstand des Lötguts mit der Ausgangstemperatur T_0 , d.h. Raum- oder entsprechend erhöhter Vorwärmtemperatur. Der thermische Widerstand des Lötguts wird maßgeblich durch die Leiterplatte bestimmt (R_{THLP}). Die Lötstellentemperatur T_{LS} (der „Spannungsabgriff“) ergibt sich dann folgendermaßen:

$$T_{LS} = T_0 + (T_R - T_0) \cdot \frac{R_{THLP}}{R_{THLP} + R_{THLS}}$$

Solange R_{THLP} groß gegen R_{THLS} ist, kann T_{LS} hinreichend groß werden. Bei Annahme gleicher R_{TH} -Werte würde maximal der Mittelwert zwischen den Temperaturen T_R und T_0 erreicht, für 350 °C und 20°C also nur 185°C (d.h. ungeeignet für bleifrei). Bei Verwendung einer feinen Lötspitze auf einer Leiterplatte mit hoher lateraler Wärmeleitfähigkeit (angebundene vollflächige Cu-Lagen) kann der thermische Widerstand der Leiterplatte kleiner sein als derjenige der Lötspitze, d.h. nur eine erhebliche Erhöhung der Regeltemperatur (kritisch wegen möglicher Überhitzung) oder eine passende Vorwärmtemperatur T_0 wird den Lötprozess ermöglichen.

Sinngemäß gilt diese Betrachtung ebenso für die Selektivwelle, wobei deren thermischer Widerstand kleiner ist als derjenige einer Lötspitze, aber dafür liegt auch die Lotwellentemperatur niedriger.

4. Ergebnisse der Lötversuche

4.1 Laserlöten

Am Beispiel eines Stiftkontaktes soll dargestellt werden, wie sich die unterschiedlichen Anbindungen bei gleicher Parametereinstellung des Lötensystems (vgl. Tab. 3.3.1) auf das Lötresultat auswirken (Abb. 4.1.1 – 4.1.6).

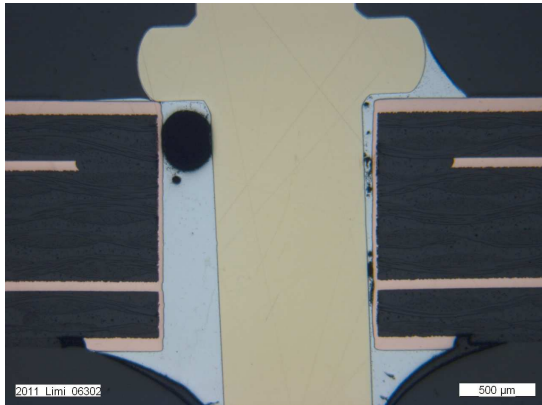


Abb. 4.1.1: Anbindung vollflächig - guter Durchstieg, kein Harzrückzug

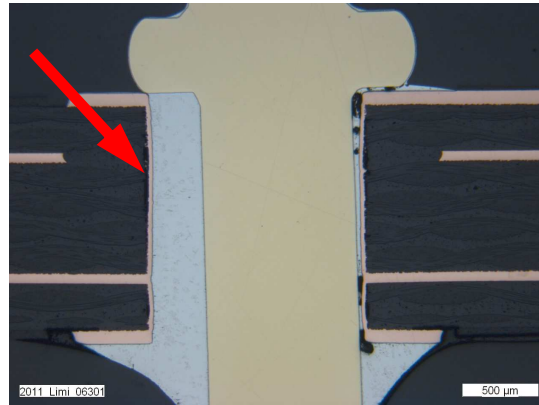


Abb. 4.1.2: WF1 - guter Durchstieg beginnender Harzrückzug

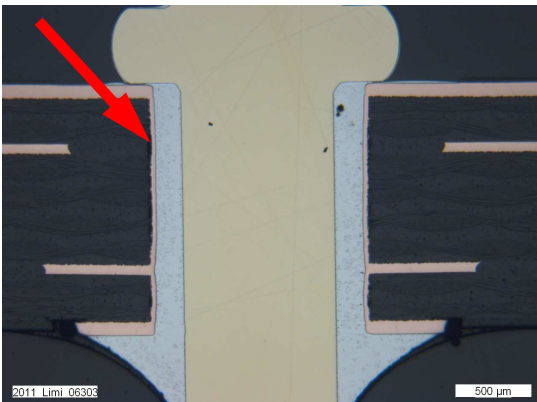


Abb. 4.1.3: WF2 – guter Durchstieg, beginnender Harzrückzug

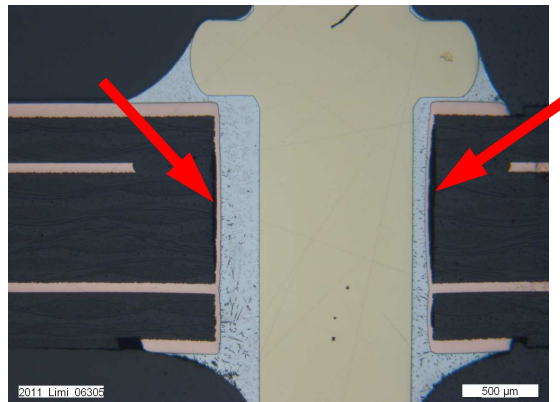


Abb. 4.1.4: WF3 – guter Durchstieg deutlicher Harzrückzug

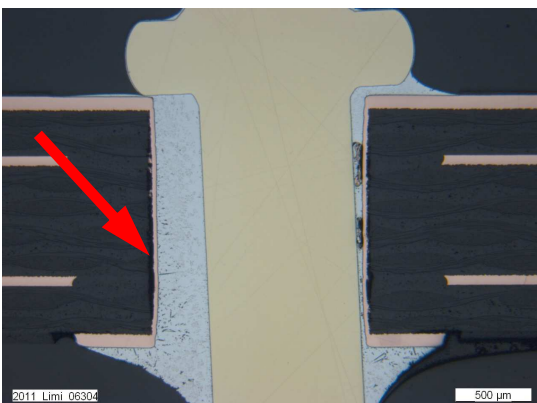


Abb. 4.1.5: ohne Anbindung – guter Durchstieg, deutlicher Harzrückzug

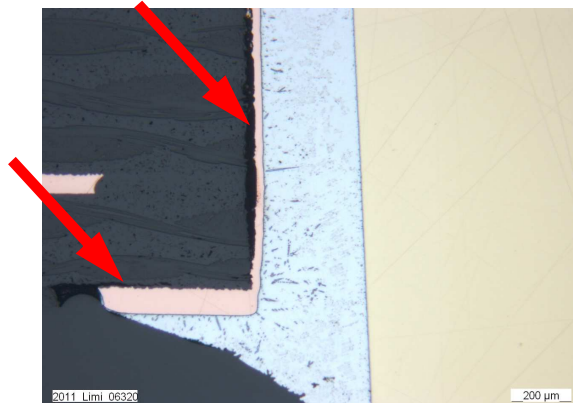


Abb. 4.1.6: Detailvergrößerung – deutlicher Harzrückzug, Laminatriss im Restringbereich

Problematisch bei der Durchführung der Selektivlötlung ist, dass oftmals der Anwender (z.B. ein Baugruppenfertigungsdienstleister) keine detaillierten Informationen über die Baugruppe hat. Insbesondere beim Laserlöten zeigt sich, dass geringe Änderungen im Padlayout, in den Anbindungsvarianten oder Materialschwankungen zu deutlich schwankenden Lötresultaten führen. Das bedeutet, es steht nur ein geringes Prozessfenster zur Verfügung, in der ausreichend Wärme in die Lötstelle eingebracht werden kann, ohne die Leiterplatte zu schädigen.

Die Bilder 4.1.7 und 4.1.8 zeigen das Lötresultat von einem Elko mit einem vollflächig angeschlossenen Pin, gelötet auf der Leiterplattenvariante 1. Der Elko steht für ein Bauteil mit erhöhter Wärmekapazität, das gleichzeitig hinsichtlich seiner maximalen Wärmebelastbarkeit eine Beschränkung aufweist. Lötseitig ist eine gute Lötstelle sichtbar, die eine gute Benetzung bauteil- und leiterplattenseitig aufweist. Jedoch sind in der Röntgendurchstrahlung und im Querschliff (Abb. 4.1.9) der unvollständige Durchstieg und die unzureichende Benetzung deutlich zu erkennen.

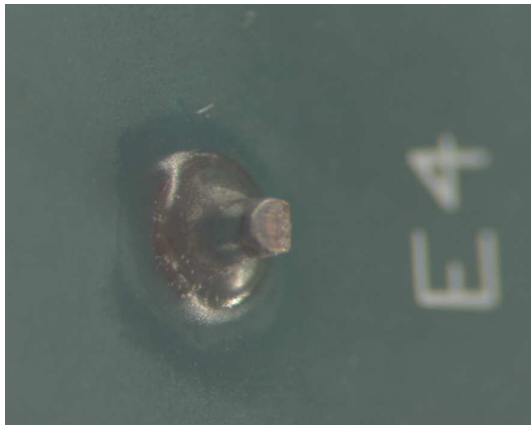


Abb. 4.1.7: Anbindung vollflächig – Lötseite

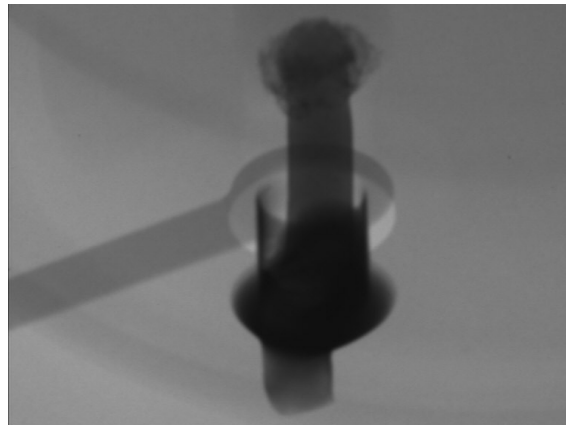


Abb. 4.1.8: Anbindung vollflächig - unvollständiger Durchstieg

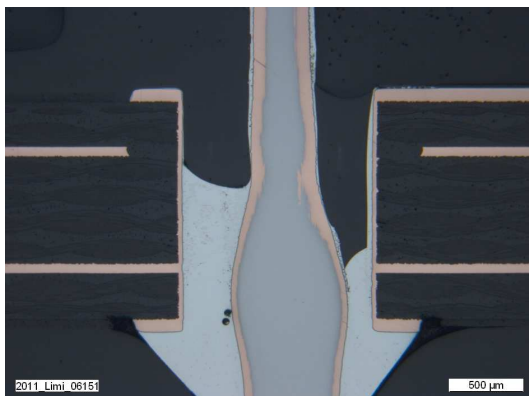


Abb. 4.1.9: Anbindung vollflächig - unvollständiger Durchstieg, mangelhafte Benetzung

Besser sieht das Ergebnis bei einer Anbindung über die Wärmefalle 1 aus (Abb. 4.1.10 und 4.1.11). Hier beträgt der Durchstieg fast die nach IPC-A-610 geforderten 75% der Durchkontaktierungslänge. Jedoch ist deutlich die mangelhafte Benetzung am Pin sichtbar. Die Lötwärme hat nicht ausgereicht, um Lot und Vorverzinnung des Pins über die gesamte Pinlänge aufzuschmelzen. Somit ist keine stoffschlüssige

Verbindung entstanden, wie eindeutig an der Trennungslinie zwischen Lot und Anschlussverzinnung sichtbar ist (Abb. 4.1.12. und 4.1.13).



Abb. 4.1.10: WF1 - Lötseite

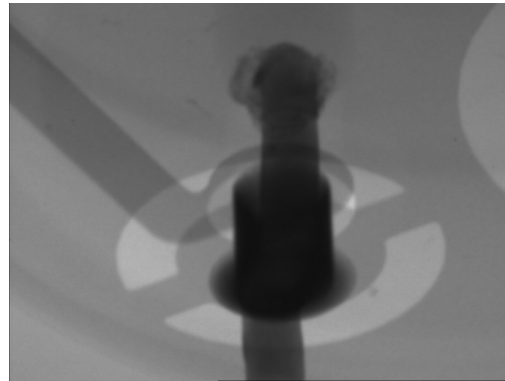


Abb. 4.1.11: WF1 - unvollständiger Durchstieg

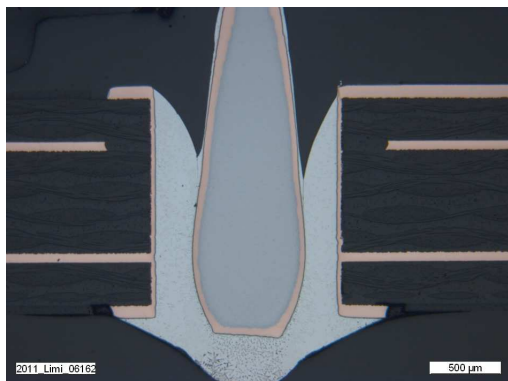


Abb. 4.1.12: WF1 - unvollständiger Durchstieg

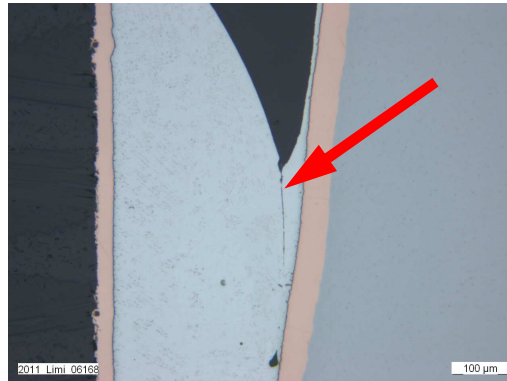


Abb. 4.1.13: WF1 - Benetzungsdefizit

Erst die Anbindung über die optimierte Wärmefalle 2 bringt ein verbessertes Lötresultat hinsichtlich des Lotdurchstiegs (Abb. 4.1.14 - 4.1.16).



Abb. 4.1.14: WF2 - Lötseite



Abb. 4.1.15: WF2 – verbesserter Durchstieg

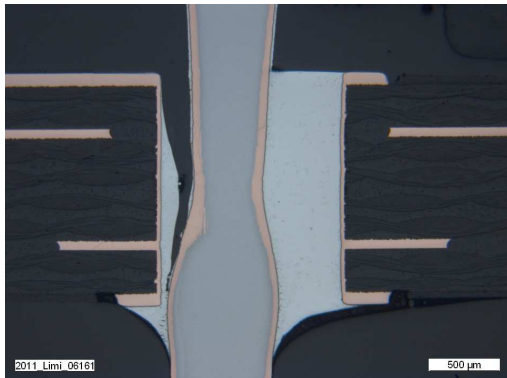


Abb. 4.1.16: WF2 - verbesserter Durchstieg

Die Lötresultate wurden auf einer Sitzung dem PBA vorgestellt und diskutiert. Dort wurde entschieden, dass auf weitere Versuche verzichtet wird, da diese als nicht zielführend angesehen werden.

Die Versuche mit dem Laserlötprozess ergeben zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Die Leiterplattenvariante 1 ist mit dem Laserlötprozess eingeschränkt lötbar.
- Bei größer werdender thermischer Masse der Komponenten oder der Leiterplatte beginnen Prozessprobleme (mangelnder Durchstieg, Benetzungsschwierigkeiten, Baugruppenschädigung).
- Die Leiterplattenvarianten 2 und 3 sind für den Laserlötprozess ungeeignet.
- Der Unterschied im Lötresultat gut / schlecht schwankt bei nahezu identischen Lötparametern auf Grund von Baugruppentoleranzen stark.
- Das Lötprozessfenster ist eng und nur schwer einzuhalten.

4.2 Kolbenlöten

4.2.1 Einfluss der Unterheizung auf das Lötresultat

Die folgenden Bilder zeigen den Einfluss der Unterheizung beim automatischen Kolbenlöten am Beispiel der Lötung von Stiften mit 1,0 mm Durchmesser. Ohne Unterheizung ist bei der vollflächig angebundenen DK selbst bei der LP-Variante 1 nur ein unzureichender Lotdurchstieg sichtbar. Auch bei der mit Wärmefalle angebundenen DK ist noch kein vollständiger Lotdurchstieg zu erreichen (Abb. 4.2.1). Erst bei Einsatz einer Unterheizung (hier 83°C Leiterplattentemperatur, gemessen auf der Lötseite) ist bei der mit Wärmefalle angebundenen DK ein vollständiger Durchstieg zu erreichen, siehe Abb. 4.2.2 und 4.2.3. Wird die Unterheizungstemperatur auf 90°C erhöht ergibt sich auch bei vollflächiger Anbindung ein vollständiger Durchstieg, Abb. 4.2.4.

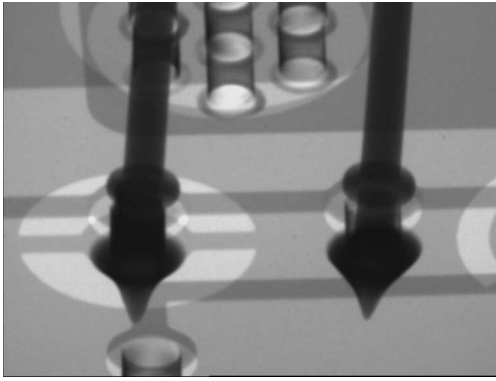


Abb. 4.2.1: Lötung ohne Unterheizung

Links: Stift 1,0; Anbindung: WF3, KT: 350°C, VWZ: 4s, LZ: 1,3s, NWZ: 4s

Rechts: Stift 1,0; Anbindung: vollfl. KT: 350°C, VWZ: 20s, LZ: 1,3s, NWZ: 30s

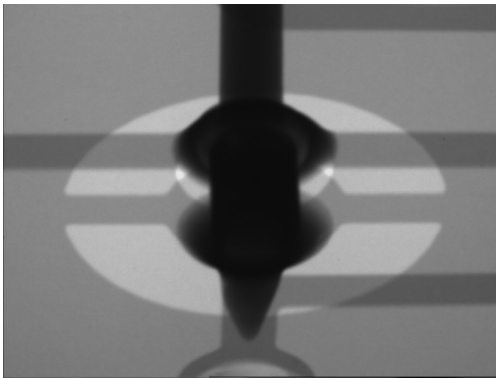


Abb. 4.2.2: Lötung mit Unterheizung

Stift 1,0 Anbindung: WF3, KT: 350°C, LPT: 83°C, VWZ: 3s, LZ: 3,5s, NWZ: 4s,

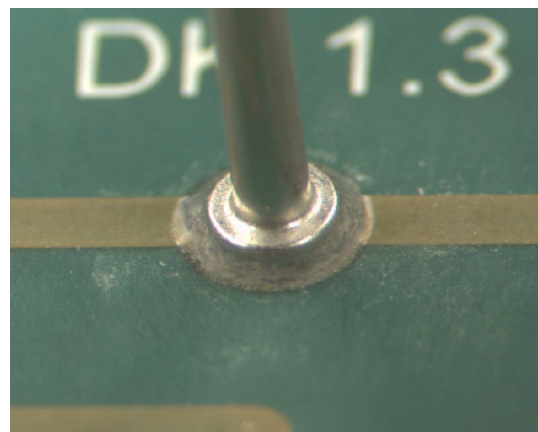
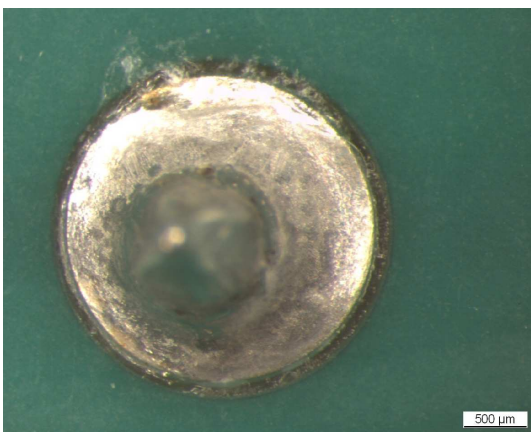


Abb. 4.2.3: Lötung mit Unterheizung (Lötseite links, Bauelementseite rechts)

Stift 1,0 Anbindung: WF3, KT: 350°C, LPT: ca. 83°C, VWZ: 3s, LZ: 3,5s, NWZ: 4s,

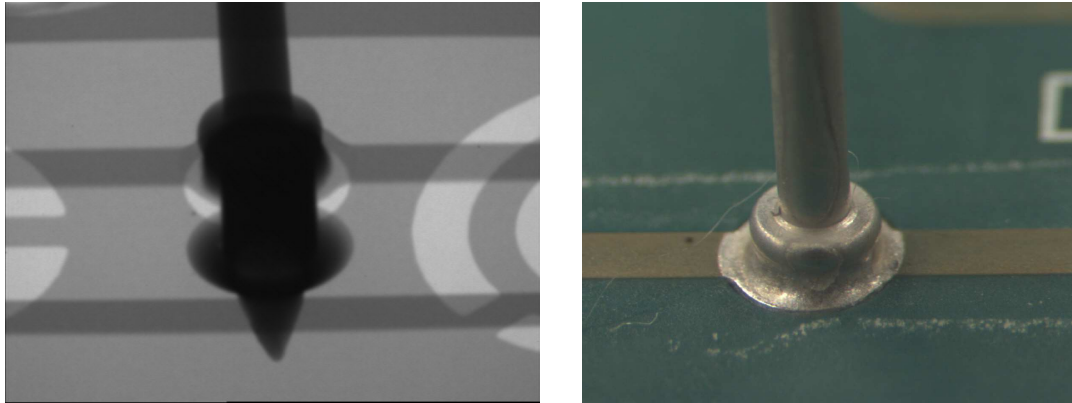


Abb. 4.2.4: Lötung mit Unterheizung (Röntgendarstellung links, Bauelementseite rechts)
Stift 1,0 Anbindung: vollflächig, KT: 350°C, LPT: ca. 90°C, VWZ: 4s, LZ: 3,5s, NWZ: 6s

Die Tabelle 4.2.1 zeigt die Lötparameter für den Kolbenlötprozess auf der LP-Variante 1, die eine qualitativ gute Verarbeitung von Stiften mit 1,0 mm Durchmesser unter Berücksichtigung verschiedener Anbindungsvarianten ermöglichen.

BT	Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [°C]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]
Stift 1,0	6	WF1	350	82	3	3,5	4
Stift 1,0	7	vollflächig	350	91	4	3,5	6
Stift 1,0	8	WF2	350	81	3	3,5	4
Stift 1,0	9	-	350	-	3	3,5	4
Stift 1,0	10	WF3	350	82	3	3,5	4
	...						
Stift 1,0	16	WF2	350	85	3	3,5	4
Stift 1,0	17	vollflächig	350	92	4	3,5	6
Stift 1,0	18	WF3	350	83	3	3,5	4
Stift 1,0	19	-	350	-	3	3,5	4
Stift 1,0	20	WF1	350	80	3	3,5	4

Tab.4.2.1: Lötparameter Stift 1,0 mm

Aus den Daten ist ersichtlich, dass insbesondere die vollflächig angebotenen Stifte nur erfolgreich zu löten sind, wenn die Leiterplattentemperatur deutlich angehoben wird. Zusätzlich erhöhen sich hier die Lötzeiten ebenfalls deutlich. Insbesondere für einen Serienlötprozess bedeutet dies längere Taktzeiten.

4.2.2 Lötung Stift 1,4 mm auf LP-Variante 1

Die Tabelle 4.2.2 zeigt Versuchsparameter, mit denen die Stifte 1,4 mm auf der LP-Var 1 verarbeitet wurden. Deutlich zu erkennen ist, dass die vollflächige Anbindung nur bei Verwendung einer Unterheizung zu löten ist. Die weiteren Stifte (Pin 1, 3-5) ließen sich auch ohne Unterheizung gut verlöten. Dies ist nur ein scheinbarer Widerspruch zu der o.a. Tabelle, da die hier gelöteten Stifte deutlich näher am Leiterplattenrand sitzen und somit weniger Wärmeenergie für eine gute Lötung erforderlich ist.

Die Stifte 11-15 wurden mit erhöhter Lötspitzentemperatur gelötet, um den Einfluss eines erhöhten selektiven Wärmeeintrages zu untersuchen. Der an Wärmefalle 1 angebundene Stift (Pin15) benötigt höhere Prozesszeiten als sein Pendant (Pin1). Bei den anderen Stiften führen gleiche Prozesszeiten und Unterheizungsbedingungen wie oben zu gleich guten visuellen Ergebnissen.

BT	Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [°C]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]
Stift 1,4	1	WF1	350		3	4	3
Stift 1,4	2	vollflächig	350	130	4	4	4
Stift 1,4	3	WF3	350		4	4	4
Stift 1,4	4	-	350	-	3	4	2
Stift 1,4	5	WF2	350		3	4	2
Stift 1,4	11	WF2	400	-	3	4	3
Stift 1,4	12	vollflächig	400	130	4	4	4
Stift 1,4	13	WF3	400	-	4	4	4
Stift 1,4	14	-	400	-	3	4	3
Stift 1,4	15	WF1	400	130	4	4	4

Tabelle 4.2.2: Lötversuche Stift 1,4 mm, LP-Variante 1 mit 4x70µm Cu

Im Querschliff weisen die Pins 1-5 einen erhöhten Anteil kleinerer Poren und deutliche aber noch als unkritisch eingestufte Harzrückzüge auf. Beginnendes Padlifting wird sichtbar. Der vollständig angebundene Pin 2 zeigt Benetzungsdefizite bei der Anbindung Lot-LP-Metallisierung, siehe Abb. 4.2.5. Dies ist auf eine unzureichende Lötwärme zurückzuführen.

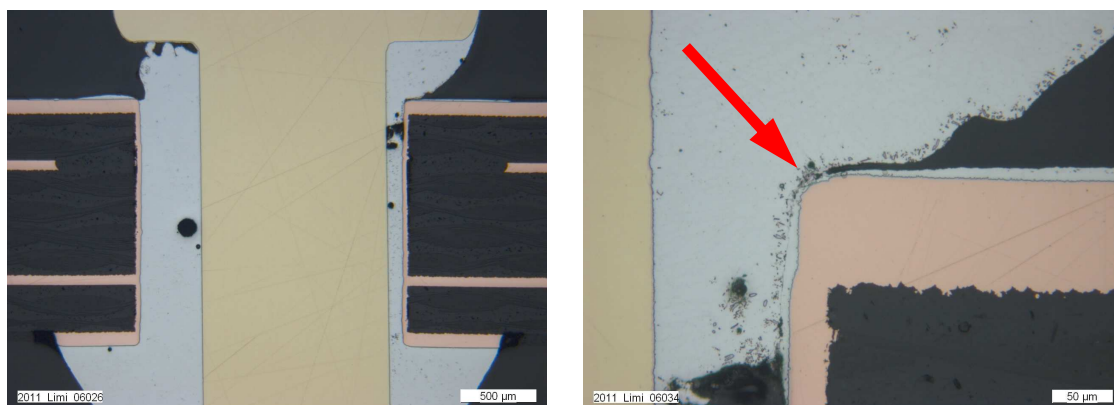


Abb. 4.2.5: Benetzungsdefizite, links Übersicht, rechts Detaildarstellung
Stift 1,4 Anbindung: vollflächig, KT: 350°C, LPT: ca. 130°C, VWZ: 4s, LZ: 4s, NWZ: 4s

Bei erhöhter Lötspitzentemperatur (Pins 11-15) ist eine deutliche Erhöhung der Porenanzahl sowie eine sichtbar vermehrte Ausbildung großer Poren zu erkennen. Dies kann an dem Zusatzflussmittel liegen, das verwendet wurde. Es kann sich aber auch um Ausgasungen aus dem Leiterplattenmaterial handeln. Auch sind hier deutlich stärkere Harzrückzüge sichtbar, die das Hülsenkupfer stark deformieren. Hier ist eine grenzwertige Leiterplattenschädigung zu beobachten, die für den jeweiligen Anwendungsfall separat bewertet werden muss, siehe Abb. 4.2.6 – 4.2.7.

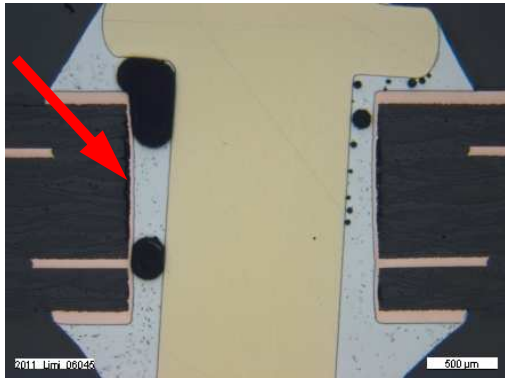


Abb. 4.2.6: Harzrückzug
Stift 1,4 Anbindung: WF2, KT: 400°C, LPT: -, VWZ: 3s, LZ: 4s, NWZ: 3s

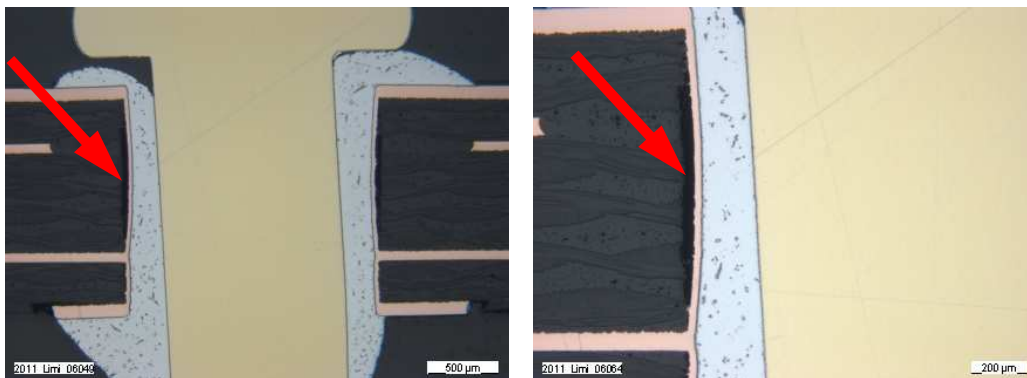


Abb. 4.2.7: Harzrückzug, links Übersicht, rechts Detaildarstellung
Stift 1,4 Anbindung: WF1, KT: 400°C, LPT: 13 0°C, VWZ: 4s, LZ: 4s, NWZ: 4s

4.2.3 Lötung Stift 1,4 mm auf LP-Variante 2

Die Tabelle 4.2.3 zeigt Versuchsparameter, mit denen die Stifte 1,4 mm auf der LP-Variante 2 verarbeitet wurden. Bei 350°C Kolbentemperatur und 110°C Leiterplattentemperatur ist das Lötresultat schwankend, sowohl eine nahezu vollständige Füllung der DK ist möglich bei einer Prozesszeit von 11s (ohne Vorheizzeit, Anbindung über die Wärmefalle 1) Abb. 4.2.8, als auch eine nur unzureichend ausgebildete Lötstelle (Anbindung über die Wärmefalle 2 und Prozesszeit von 10s (ohne Vorheizzeit)), Abb. 4.2.9.

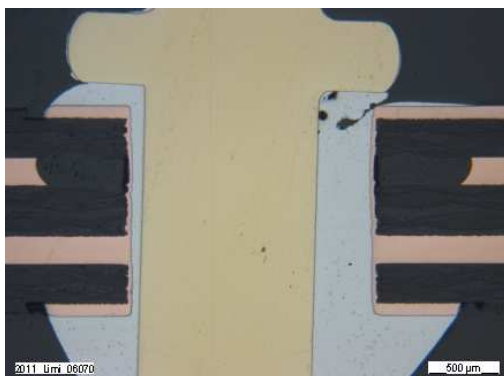


Abb. 4.2.8: nahezu vollständige Anbindung
Stift 1,4 Anbindung: WF1, KT: 350°C, LPT: 11 0°C, VWZ: 3s, LZ: 4s, NWZ: 4s

BT	Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [°C]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]
Stift 1,4	1	WF1	350	110	3	4	4
Stift 1,4	2	vollflächig	350	160	4	4	4
Stift 1,4	3	WF3	350	140	3	4	4
Stift 1,4	4	-	350	100	3	4	2
Stift 1,4	5	WF2	350	110	3	4	3
Stift 1,4	11	WF2	400	120	4	4	4
Stift 1,4	12	vollflächig	400	160	4	4	4
Stift 1,4	13	WF3	400	160	4	4	4
Stift 1,4	14	-	400	100	3	4	3
Stift 1,4	15	WF1	400	160	4	4	4

Tabelle 4.2.3: Lötversuche Stift 1,4 mm, LP-Var 2 mit 2x70µm + 2+210µm Cu



Abb. 4.2.9: unvollständige Anbindung

Stift 1,4 Anbindung: WF2, KT: 350°C, LPT: 110°C, VWZ: 3s, LZ: 4s, NWZ: 3s

Nur Stifte ohne Anbindung lassen sich mit einer Leiterplattentemperatur von 100°C und einer Prozesszeit von 9s (ohne Vorheizzeit) gut verarbeiten, Abb. 4.2.10. Die Leiterplatte neigt dann aber vermehrt zu Harzrückzügen. Bei einer Kolbentemperatur von 400°C stellen sich dann Padlifting und Laminatrisse ein, Abb. 4.2.11.

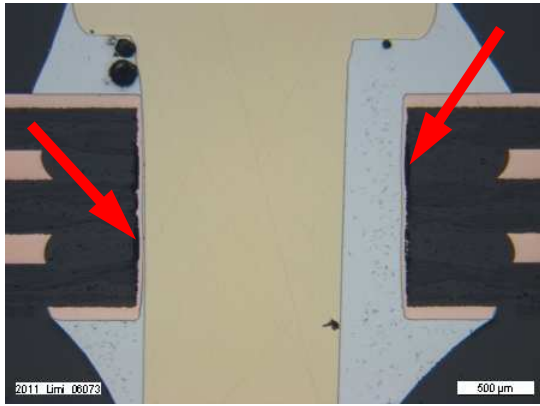


Abb. 4.2.10: gute Lötstelle mit deutlichen Harzrückzügen
Stift 1,4 ohne Anbindung, KT: 350°C, LPT: 100°C, VWZ: 3s, LZ: 4s, NWZ: 2s

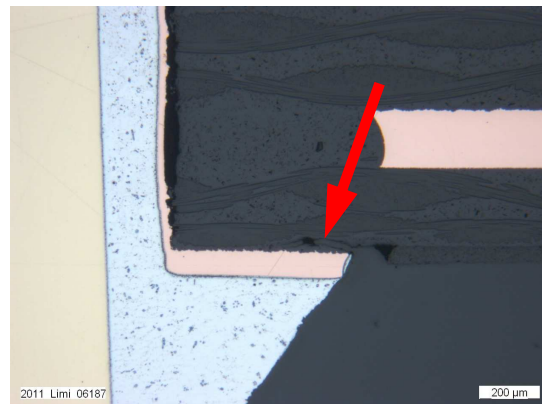
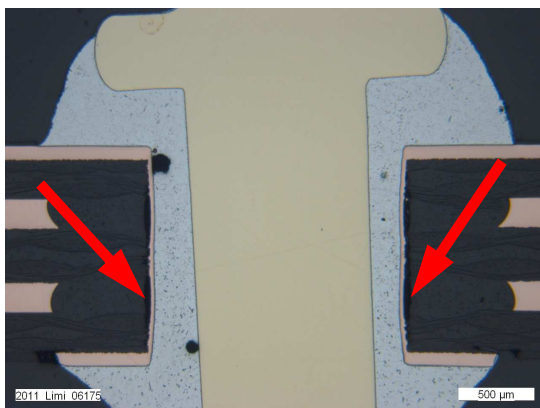


Abb. 4.2.11: Lötstelle mit deutlichen Harzrückzügen und Laminatriss (rechts)
Stift 1,4 ohne Anbindung, KT: 400°C, LPT: 100°C, VWZ: 3s, LZ: 4s, NWZ: 3s

Bei einer vollflächigen Anbindung ist selbst bei einer Leiterplattentemperatur von 160°C und einer Prozesszeit von 12 Sekunden (ohne Vorheizzeit) keine vollständige Benetzung mehr zu erreichen, Abb. 4.2.12.

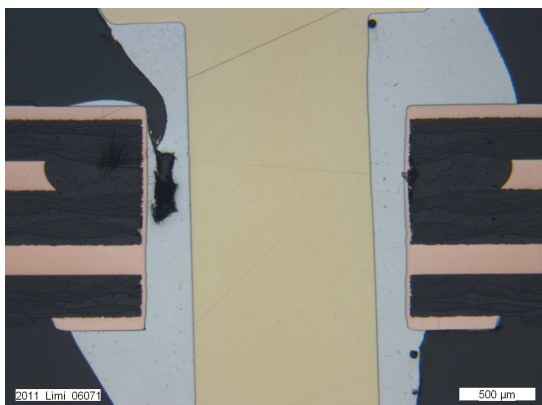


Abb. 4.2.12: keine vollständige Benetzung mehr, deutliche Harzrückzüge
Stift 1,4 vollflächige Anbindung, KT: 350°C, LPT: 160°C, VWZ: 4s, LZ: 4s, NWZ: 4s

4.2.4 Lötung Stift 1,4 mm auf LP-Variante 3

Die Tabelle 4.2.4 zeigt Versuchsparameter, mit denen die Stifte 1,4 mm auf der LP-Variante 3 verarbeitet wurden. Um überhaupt einen Lötterfolg zu erzielen, wurde die Leiterplattentemperatur auf für den manuellen Lötprozess unüblich hohe Temperaturen von bis zu 180°C erhöht.

Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [C°]	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]
1	WF1	350	160	4	4	4
2	vollflächig	350	180	4	4	4
3	WF3	350	180	4	4	4
4	-	350	140	4	4	4
5	WF2	350	140	4	4	4
11	WF2	400	160	4	4	4
12	vollflächig	400	180	4	4	4
13	WF3	400	180	4	4	4
14	-	400	160	4	4	4
15	WF1	400	180	4	4	4

Tabelle 4.2.4: Lötversuche, LP-Variante 3 mit 2x70µm + 2+400µm Cu

Bei vollflächiger Anbindung ist selbst mit 180°C Vorwärmtemperatur keine vollständige Füllung der DK zu erreichen. Allerdings treten extreme Harzrückzüge mit deutlicher Deformation der Kupferhülse auf, Abb. 4.2.13. Diese sind als grenzwertig anzusehen.

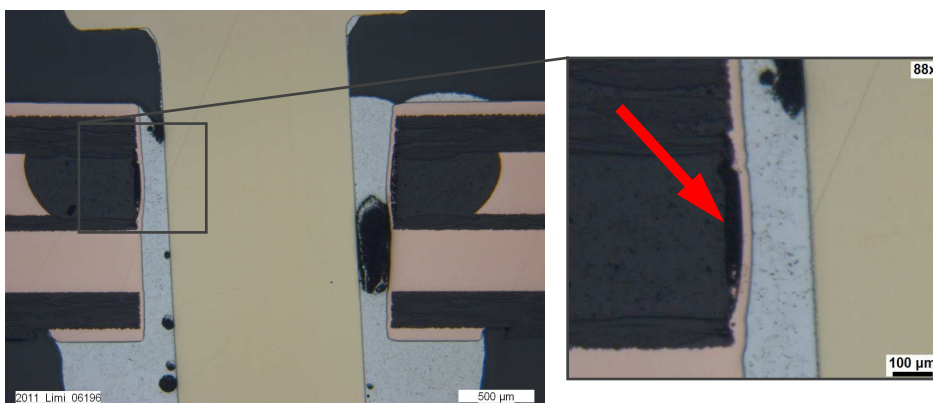


Abb. 4.2.13: keine vollständige Benetzung mehr, deutliche Harzrückzüge
Stift 1,4 Anbindung vollflächig, KT: 350°C, LPT: 180°C, VWZ: 4s, LZ: 4s, NWZ: 4s

Das gleiche Verhalten ist bei Anbindung über die Wärmefalle 1 zu sehen, Abb. 4.2.14. Da sich diese Lötstelle in der Mitte der Leiterplatte befindet, wurde die Löttemperatur auf 400°C erhöht.

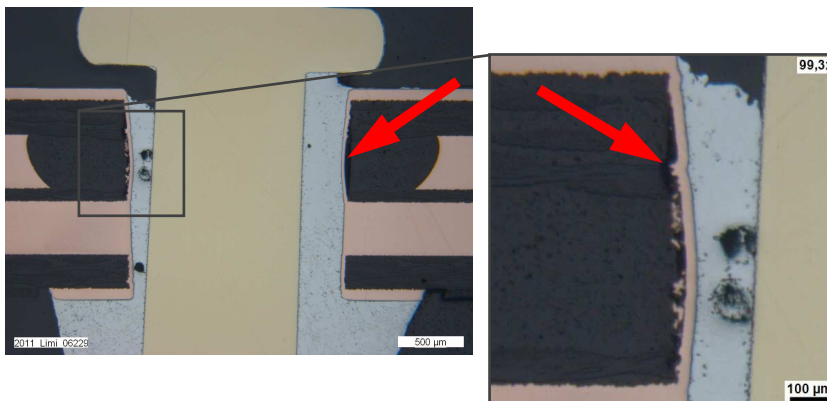


Abb. 4.2.14: keine vollständige Benetzung mehr, deutliche Harzrückzüge
Stift 1,4 Anbindung WF1, KT: 400°C, LPT: 180°C, VWZ: 4s, LZ: 4s, NWZ: 4s

Die Tabellen 4.2.5 – 4.2.7 verdeutlichen die im Querschliff beobachteten Auffälligkeiten hinsichtlich Benetzung von Hülse und Bauteil sowie Harzrückzug des Laminats vom Hülsenkupfer.

Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [°C]	Benetzung	Harzrückzug	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]
1	WF1	350		+	o	3	4	3
2	vollflächig	350	130	+	o	4	4	4
3	WF3	350		+	-	4	4	4
4	-	350	-	+	-	3	4	2
5	WF2	350		+	o	3	4	2
11	WF2	400	-	+	--	3	4	3
12	vollflächig	400	130	+	-	4	4	4
13	WF3	400	-	+	-	4	4	4
14	-	400	-	+	-	3	4	3
15	WF1	400	130	+	--	4	4	4

Tabelle 4.2.5: Bewertung Lötversuche LP-Variante 1

Die Bewertung wurde wie folgt vorgenommen:

Benetzung:

+...100% Durchstieg sowie gute Anbindung an Hülse und Pin

o...nahezu 100% Durchstieg sowie überwiegend gute Anbindung an Hülse und Pin

-...deutliche Defizite bei Durchstieg und Benetzung

Harzrückzug:

o...sichtbarer Harzrückzug, noch im akzeptablen Bereich

-...deutlich erhöhter Harzrückzug, grenzwertig

--...stark erhöhter Harzrückzug mit Hülsendeformation, nicht mehr akzeptabel

Deutlich sichtbar ist, dass bei der LP-Variante 1 eine vollflächige Anbindung bei 350°C Kolbentemperatur nur noch mit Unterheizung sicher zu bearbeiten ist. Je günstiger die Wärmefalle ist (hier WF2) desto besser das Lötergebnis. DK's ohne Anbindung lassen sich am besten löten, jedoch ist hier die Schädigung der Leiterplatte am größten. Mehr Wärme (Vorheizung und/oder höhere LötKolbentemperatur bzw. längere Lötzeit) fördert eine gute Lötstellenausbildung, bewirkt aber einen erhöhten Harzrückzug.

Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [C°]	Benetzung	Harzrückzug	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]
1	WF1	350	110	o	-	3	4	4
2	vollflächig	350	160	-	o	4	4	4
3	WF3	350	140	+	-	3	4	4
4	-	350	100	+	--	3	4	2
5	WF2	350	110	-	-	3	4	3
11	WF2	400	120	+	-	4	4	4
12	vollflächig	400	160	+	o	4	4	4
13	WF3	400	160	+	-	4	4	4
14	-	400	100	+	--	3	4	3
15	WF1	400	160	+	-	4	4	4

Tabelle 4.2.6: Bewertung Lötversuche LP-Variante 2

Pin	Anbindung	KT [°C]	LPT [C°]	Benetzung	Harzrückzug	VWZ [s]	LZ [s]	NWZ [s]
1	WF1	350	160	o	-	4	4	4
2	vollflächig	350	180	-	-	4	4	4
3	WF3	350	180	+	-	4	4	4
4	-	350	140	+	-	4	4	4
5	WF2	350	140	-	-	4	4	4
11	WF2	400	160	+	-	4	4	4
12	vollflächig	400	180	+	-	4	4	4
13	WF3	400	180	+	-	4	4	4
14	-	400	160	+	--	4	4	4
15	WF1	400	180	o	-	4	4	4

Tabelle 4.2.7: Bewertung Lötversuche LP-Variante 3

Bei der Leiterplattenvariante 2 und 3 ist ersichtlich, dass das automatische Kolbenlöten hier seine Prozessgrenzen sieht. Gute Benetzung ist nur noch mit deutlich erhöhten Vorheiztemperaturen (teilweise bis 180°C) und / oder 400°C LötKolbentemperatur zu erreichen. Jedoch nimmt in gleichem Maße die Laminatschädigung zu. Ob dies zu tolerieren ist, muss für den jeweiligen Anwendungsfall separat betrachtet werden. Versuche mit massereicheren Komponenten (AmS, SvB) als die untersuchten Stifte haben keine zufriedenstellenden Lötresultate gezeigt. Somit lässt sich als Ergebnis formulieren, dass das automatische Kolbenlöten für thermisch massive Aufbauten (massereiche Komponenten oder Dickkupferleiterplatten) nicht geeignet ist. Einzig bei Leiterplatten mit maximal 4 x 70µm Kupferlagen ist das Kolbenlöten eingeschränkt zu empfehlen. Eine zusätzliche Erwärmung (Unterheizung) ist bei ungünstiger Anbindung des Lötanschlusses unbedingt notwendig.

Ergebnisse des automatischen Kolbenlötens in der Zusammenfassung:

- auch bei 400°C Lötspitzentemperatur und Leiterplattenvorwärmung auf 180°C visuell keine Auffälligkeit auf der Leiterplatte sichtbar
- Bei 350°C Lötspitzentemperatur sichtbare Harzrückzüge
- Bei 400°C Lötspitzentemperatur starke bis vollflächige Harzrückzüge
- Lötparameter sind deutlich abhängig von der örtlichen Lage der Lötstelle
- Padlifting und Laminatrisse bei 400°C Lötspitzentemperatur
- Restringe minimieren Harzrückzüge
- Einsatz für Kupferstärken größer 4x70µm nicht geeignet.

4.3 Selektives Wellenlöten

4.3.1 Versuche mit der Versaflo

Bauteil AmS

Bei diesem Bauteil kann auch die Bauteilseite und somit der Lotdurchstieg optisch inspiziert werden, weshalb hier keine zusätzliche Röntgenanalyse durchgeführt wurde. In Abb. 4.3.1 sind Beispiele für das Lötergebnis dargestellt.

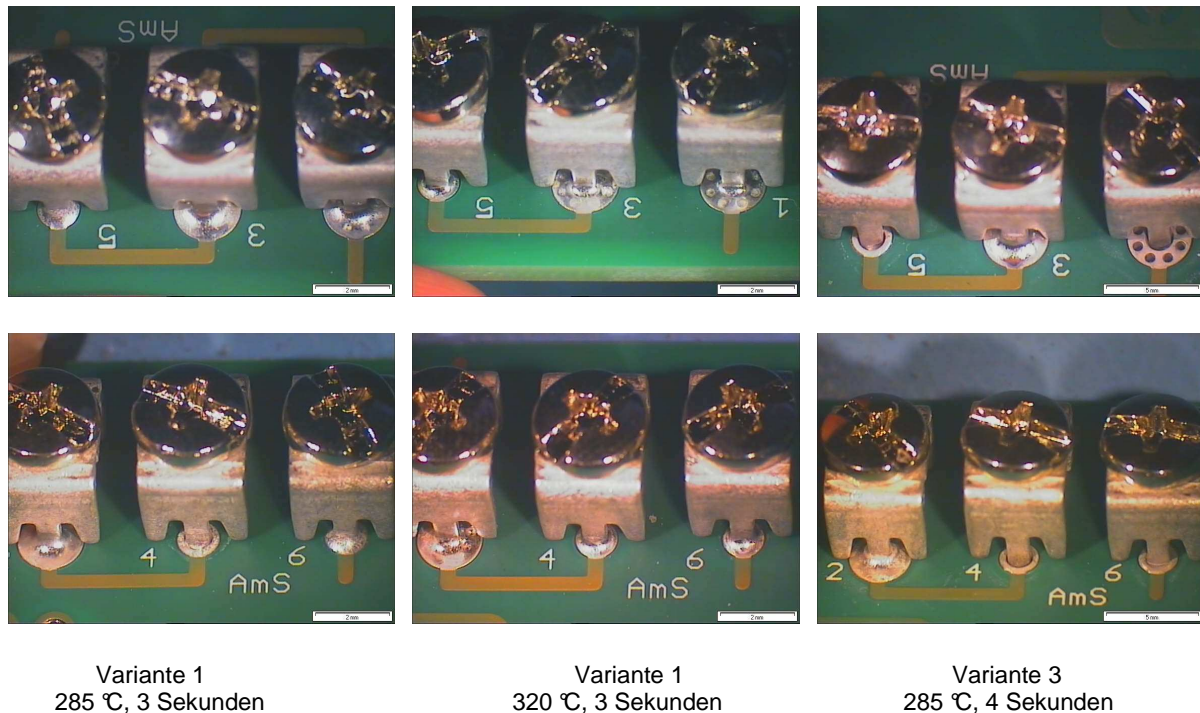


Abb. 4.3.1: Bauteil AmS – Beispiele für die Lötergebnisse

In Abb. 4.3.2 und 4.3.3 sind die Ergebnisse bei einer Löttemperatur von 285 °C in Abhängigkeit von der Leiterplattenvariante und der Lötzeit für einzelne Pins enthalten. Pin 1 und Pin 4 sind vollflächig angebunden, wobei bei Pin 1 thermal vias im Pad angebracht sind. Bei Pin 2 liegt eine Wärmefalle der Variante 2 mit thermal vias im Pad und bei Pin 5 eine Wärmefalle der Variante 1 ohne thermal vias vor. Bei dieser Auswertung steht ein vorhandener Balken für einen Lotdurchstieg von 100 % und einer vollständigen Benetzung des Lötages auf der Bauteilseite. Ein fehlender Balken bedeutet, dass zwar Lot in der Hülse hochgestiegen ist, aber bauteilseitig kein Lotmeniskus ausgebildet wurde. Der Füllgrad in der Durchkontaktierung wurde nicht berücksichtigt. Abb. 4.3.4 enthält die Ergebnisse für das Bauteil AmS in Abhängigkeit von der Lötzeit, der Leiterplatten- und Pinvariante.

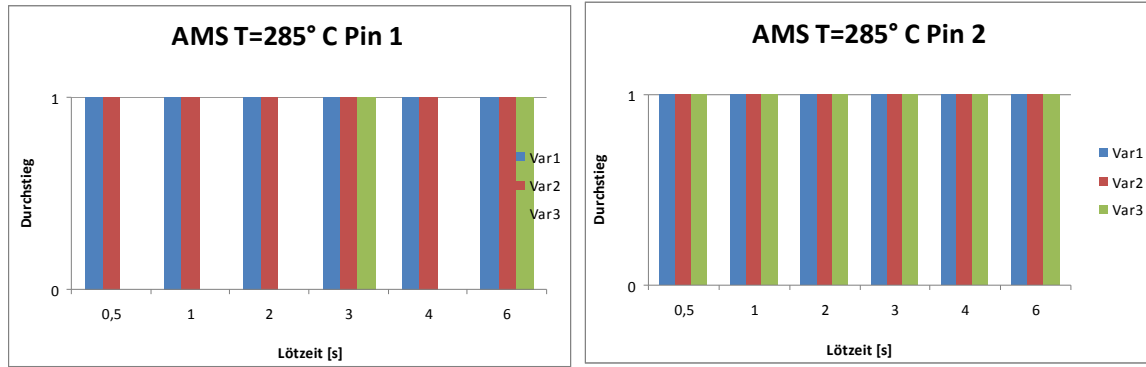


Abb 4.3.2: Bauteil AmS – Auswertung des Lotdurchstieges für Pin 1 und 2 in Abhängigkeit von der Lötzeit und der Leiterplattenvariante

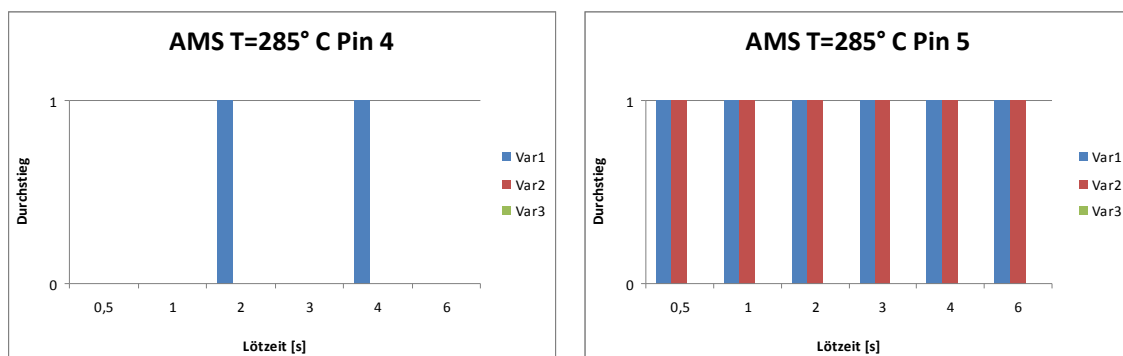


Abb. 4.3.3: Bauteil AmS – Auswertung des Lotdurchstieges für Pin 4 und 5 in Abhängigkeit von der Lötzeit und der Leiterplattenvariante

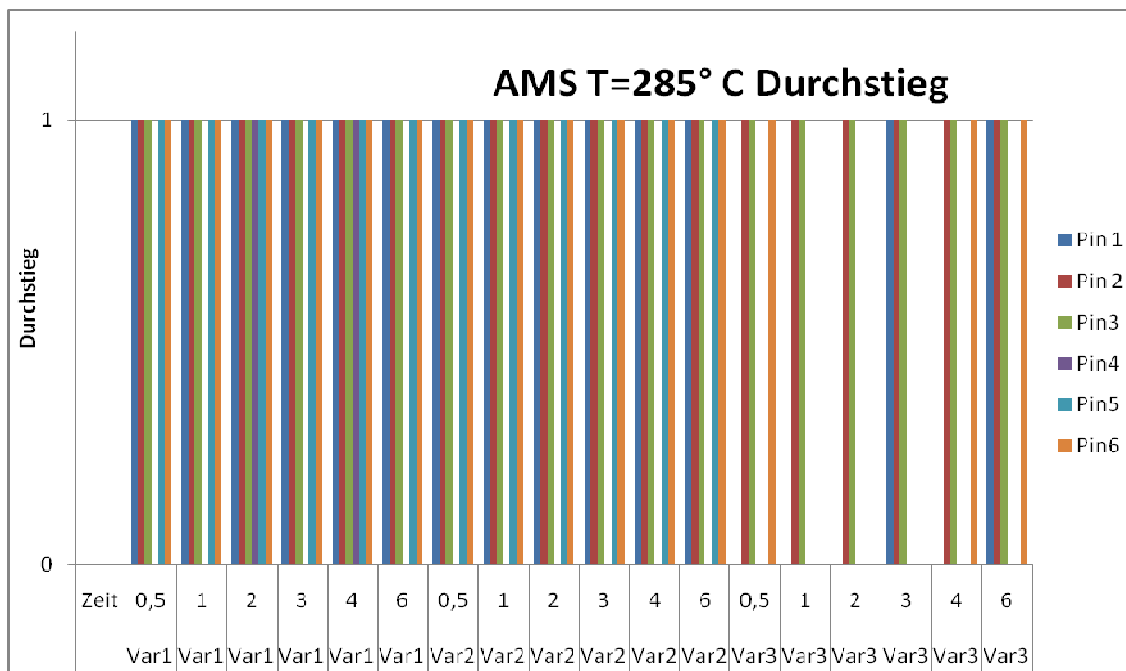


Abb. 4.3.4: Bauteil AmS – Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Leiterplattenvariante und Pin bei einer Löttemperatur von 285 °C

Beim Vergleich der Ergebnisse fällt schon auf den ersten Blick auf, dass es bei Pin 4 zu Problemen kam. Selbst bei Variante 1 mit einer Kupferschichtdicke von 70 μm wurde hier nur selten ein Durchstieg beobachtet. Grund dafür ist, dass dort in dritter Lage eine vollflächige Anbindung an die Kupferbahn vorliegt. Dadurch kommt es zu einem starken Wärmeabfluss in die Leiterplatte und einer verminderten Durchwärmung in der Durchkontaktierung mit der Folge einer schlecht ausgebildeten Lötstelle. Bei Pin 1, der ebenfalls eine vollflächige Anbindung in der dritten Lage aufweist, wird die Durchwärmung durch das Vorhandensein von thermal vias im Pad der Durchkontaktierung unterstützt und das Lötresultat erheblich verbessert. Erwartungsgemäß ergeben sich bei der Variante 3 mit Kupferschichtdicken von 400 μm die schlechtesten Ergebnisse. Betrachtet man sich Pin 5 (WF1 bei Lage 3) und Pin 6 (WF2 bei Lage 3) so fällt auf, dass es bei Variante 3 nur Durchstiege bei Pin 6, jedoch nicht bei Pin 5 gegeben hat. Daraus lässt sich schließen, dass die Wärmefalle 2 besser funktioniert als Wärmefalle 1.

Als nächstes werden die Ergebnisse bei einer Löttemperatur von 300°C betrachtet. Abb. 4.3.5 zeigt hierzu ein Diagramm, das den Durchstieg der Pins bewertet. Sofort fällt auf, dass die Ergebnisse erwartungsgemäß besser ausfallen als bei einer Temperatur von 285°C. Während bei Variante 1 alle Pins gelötet wurden, erfolgte bei Variante 2 und 3 besonders bei Pin 4 oft kein Durchstieg. Dies lässt sich wieder durch die vollflächige Anbindung dieses Pins in der dritten Lage erklären.

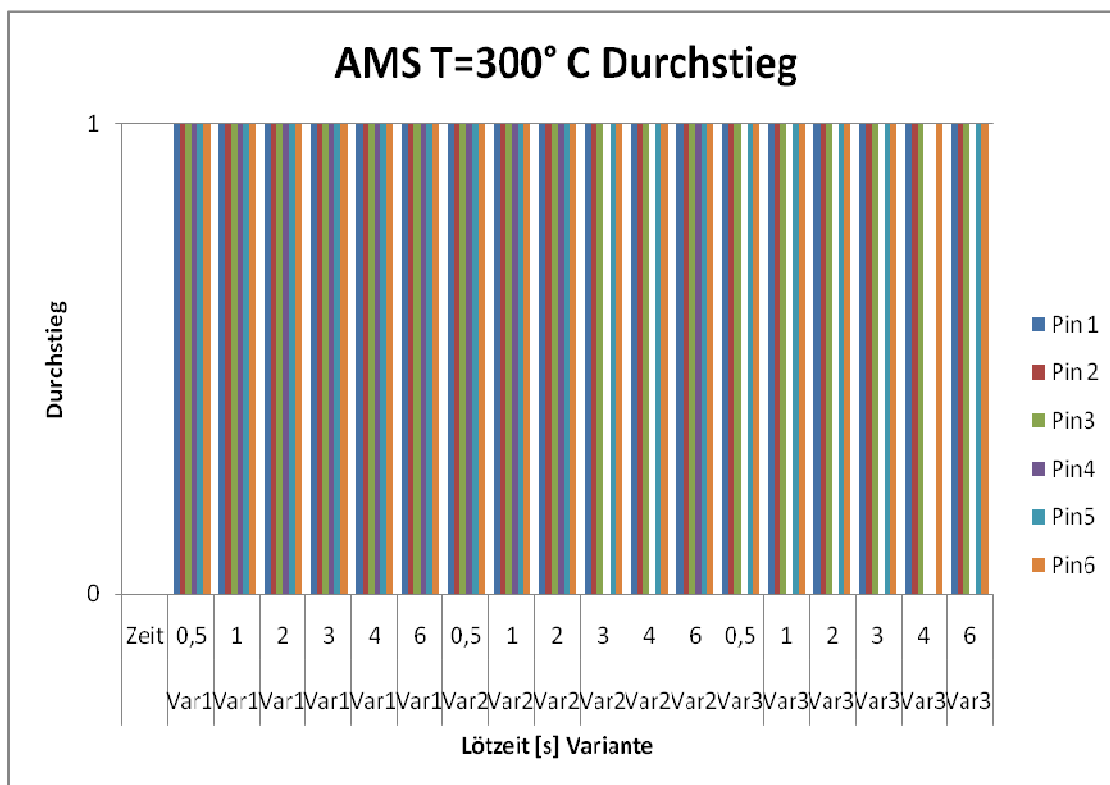


Abb. 4.3.5: Bauteil AmS – Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Leiterplattenvariante und Pin bei einer Löttemperatur von 300 °C

Bei einer Löttemperatur von 320°C (Abb. 4.3.6) konnten bei den Varianten 1 und 2 alle Pins erfolgreich gelötet werden. Bei Variante 3 lag bei allen Pins mit Ausnahme von Pin 4 ein vollständiger Lotdurchstieg vor, während bei Pin 4 selbst bei einer Lötzeit von 6 Sekunden keine akzeptable Lötverbindung zu erreichen war.

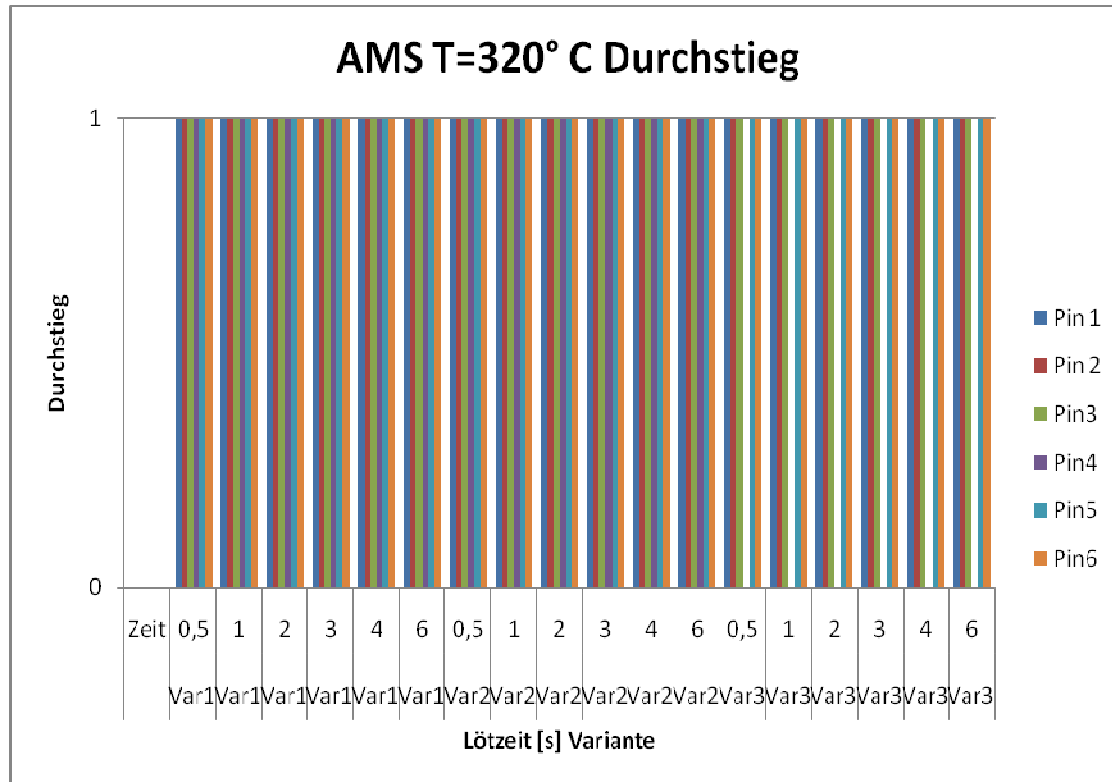


Abb. 4.3.6: Bauteil AmS – Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Leiterplattenvariante und Pin bei einer Löttemperatur von 320 °C

Zur Beurteilung der Lötstellen und zur Überprüfung, inwieweit Schädigungen an der Leiterplatte aufgetreten sind, wurden an der Baugruppe, die bei 285 °C mit einer Lötzeit von sechs Sekunden gelötet wurde, metallographische Schliffe angefertigt. Abb. 4.3.7 zeigt die Ergebnisse für die Pins 1, 3 und 5 der Variante 1. Bei allen Anschlüssen liegt ein vollständiger Lotdurchstieg vor. Alle Lötstellen enthalten etliche Poren. Nach den Vorgaben der IPC-A-610 / 5/ sind Poren kein Abnahmekriterium und somit zulässig. Bei allen drei Pins ist ein Harzrückzug (Abb. 4.3.8) vorhanden, der aber nach den Vorgaben der IPC-A-600G /17/ zulässig ist.

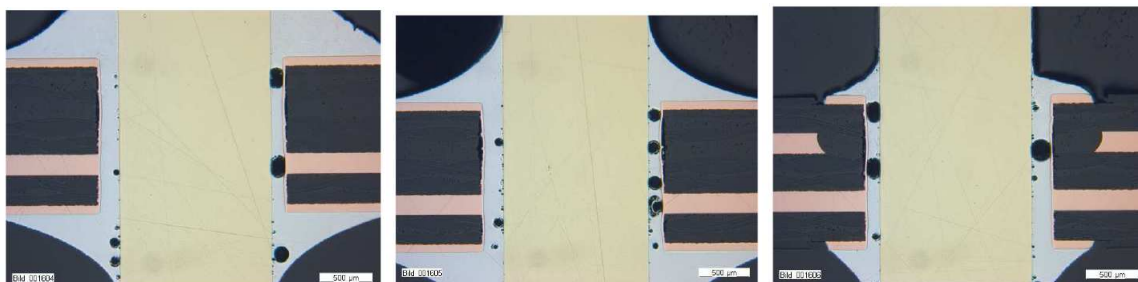


Abb. 4.3.7: Schliffbilder AmS - Pin 1 (links) Pin 3 (mitte) und Pin 5 (rechts), Variante 1, 285 °C

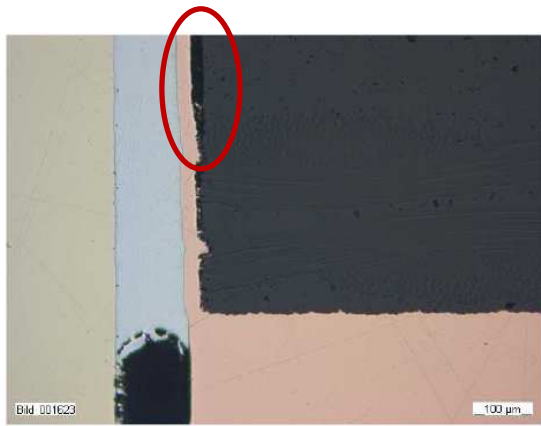


Abb. 4.3.8: Harzrückzug am Pin 1, Variante 1, 285 °C

Auch die Pins 1, 3 und 5 der Variante 2 wurden metallographisch untersucht und bewertet. Sie zeigen ähnliche Ergebnisse wie die Variante 1, d.h. Poren in der Durchkontaktierung der Lötverbindungen und einen großflächigen Harzrückzug. Schädigungen des Laminats und Risse in der Kupfermetallisierung bzw. Risse an den Innenlagenanbindungen sind nicht vorhanden. Abb. 4.3.9 zeigt Schliffbilder der Variante 3. Hier bestätigen sich die Ergebnisse der optischen Kontrolle. Während bei Pin drei eine sehr gut ausgebildete Lötstelle vorliegt zeigen die Pins 1 und 5 unvollständig ausgebildete Lötstellen mit einem Füllgrad unterhalb der geforderten 75 %.

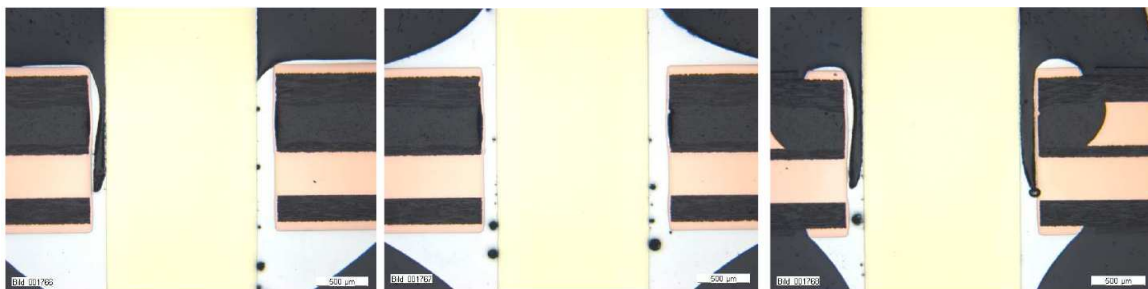


Abb. 4.3.9: Schliffbilder AmS - Pin 1 (links), Pin 3 (mitte) und Pin 5 (rechts), Variante 3, 285 °C

Bei den Proben, die mit 320°C gelötet wurden sind bei der Variante 1 alle Pins vollständig gelötet. Alle Lötverbindungen enthalten die bereits beobachteten Voids. Bei Pin 3 kann bei einer Lötzeit von sechs Sekunden eine Kupferablösung in der Kupferhülse gefunden werden (Abb. 4.3.10). Laminatriss und Risse in der Kupfermetallisierung waren selbst bei dieser hohen Löttemperatur nicht zu finden.

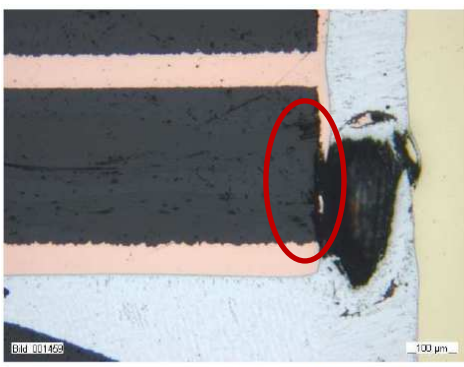


Abb. 4.3.10: Pin 3 der Variante 1 – 320 °C, Lötzeit 6 Sekunden - Auflösung der Kupfermetallisierung

Bei den Boards der Variante 2 wurden die Pins 2, 4 sowie 6 untersucht. Die Ergebnisse sind mit denen der Variante 1 vergleichbar, d.h. es liegt ein vollständiger Lotdurchstieg vor. Unzulässige Schädigungen des Leiterplattenmaterials oder der Kupfermetallisierung und Innenlagenanbindungen sind nicht zu finden. Die Ergebnisse für die Variante 3 fallen erwartungsgemäß schlechter aus. Die Lötverbindungen von Pin 2 und 6 zeigen eine hohe Porosität. Bei Pin 4 wird der geforderte Füllgrad nicht erreicht.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so lässt sich sagen, dass eine Löttemperatur von 285°C und eine geringe Lötzeit ausreicht um „anspruchslöse“ Lötstellen zu verarbeiten. Um Leiterplatten mit dickeren Kupferschichten von über 200µm verlöten zu können bedarf es schon höherer Temperaturen. Abhängig von der Anbindung sind sogar Löttemperaturen bis 320°C erforderlich. Besonders problematisch war Pin 4 mit einer vollflächigen Anbindung. In Kombination mit einer Kupferschichtdicke von 400 µm konnte, selbst bei 320 °C, keine brauchbare Lötung erzielt werden. Bei einer vollflächigen Anbindung kann dann nur durch das Anbringen von thermal vias im Pad der Durchkontaktierung eine zufrieden stellende Lötung erreicht werden, wie bei Pin 1 zu beobachten ist. In diesem Fall reichen dann jedoch schon Löttemperaturen von 300°C aus, um eine gut ausgebildete Lötverbindung zu erreichen.

Bauteil BNC-Adapter

Der BNC-Stecker hat im Gegensatz zum AmS-Bauteil eine größere metallische Oberfläche. Daraus resultiert eine bessere Wärmeableitung, was sich negativ auf die Lötbarkeit auswirken kann. Beispiele für die Ergebnisse aus der optischen Lötstelleninspektion sind in Abb. 4.3.11 enthalten.

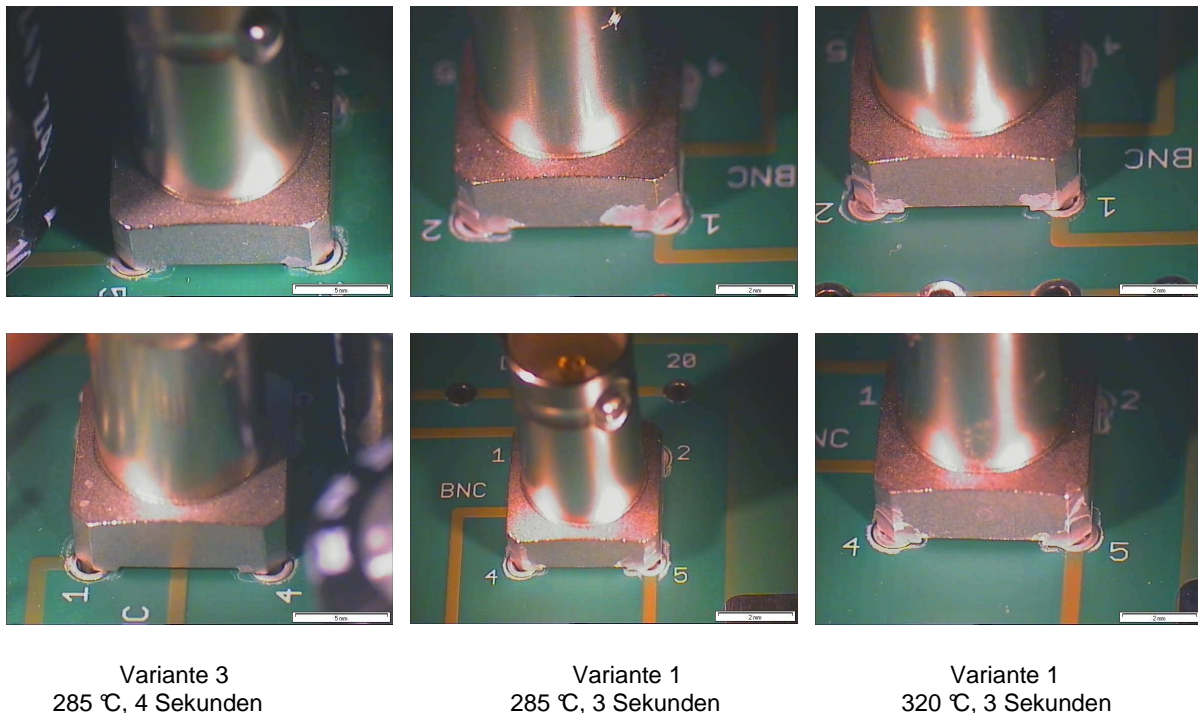


Abb. 4.3.11: Bauteil BNC-Adapter – Beispiele für die Lötergebnisse

Im nachfolgenden Diagramm sind die Lötgergebnisse bei 285°C (Abb. 4.3.12) und die Ergebnisse für 320°C (Abb.4.3.13) dargestellt.

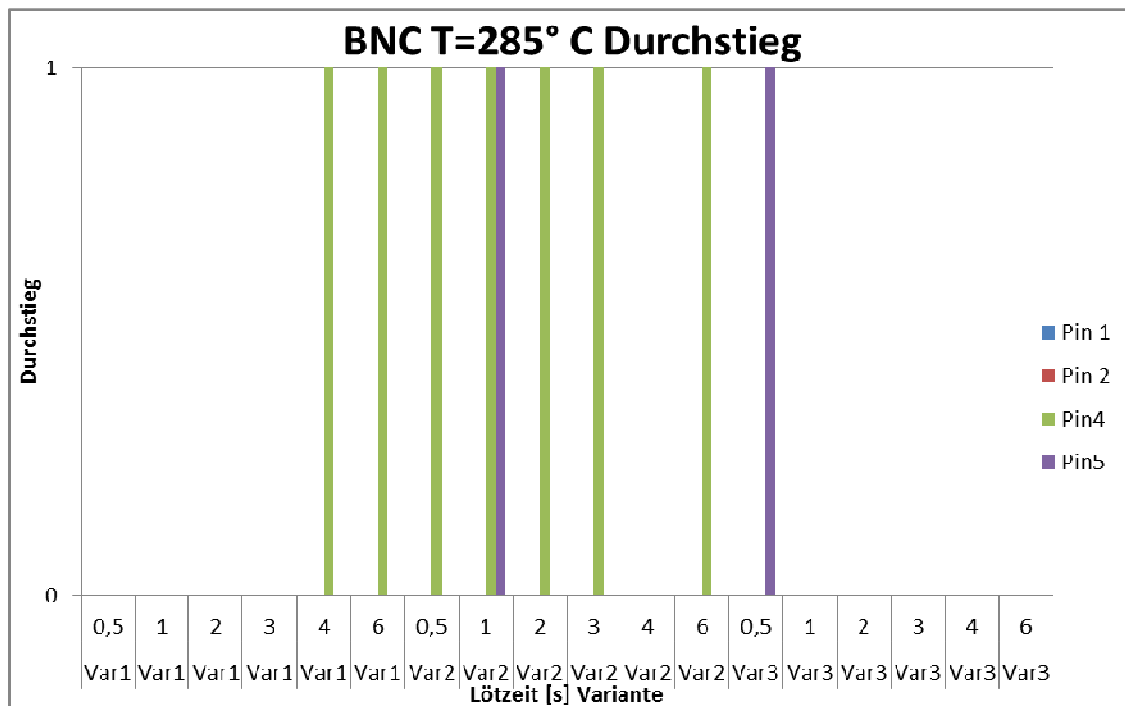


Abb. 4.3.12: Bauteil BNC-Adapter – Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Leiterplattenvariante und Pin bei einer Löttemperatur von 285 °C

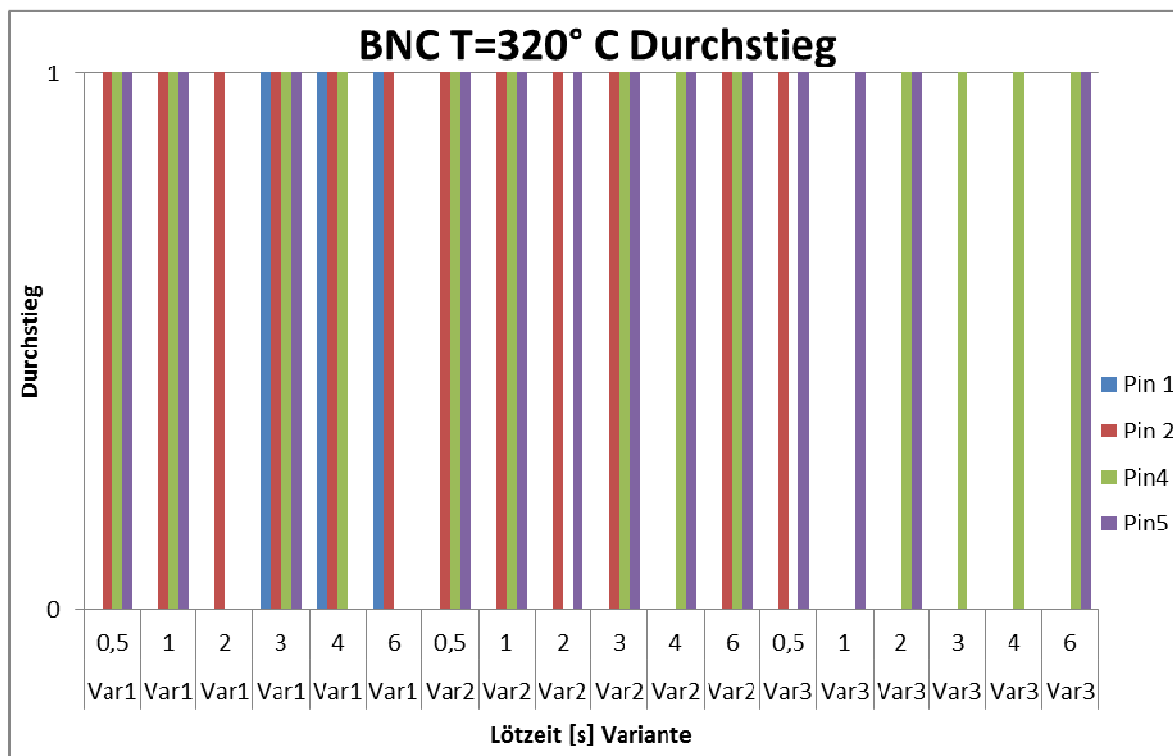


Abb.4.3.13: Bauteil BNC-Adapter – Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Leiterplattenvariante und Pin bei einer Löttemperatur von 320 °C

Bei 285° C sind nur selten erfolgreiche Lötungen gelungen. Weiterhin sind starke Schwankungen bei den Lötresultaten vorhanden, d.h. es lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang finden. Zufriedenstellende Lötresultate wurden fast ausschließlich bei Pin 4 erreicht. Allerdings sind auch hier Abweichungen dahingehend zu beobachten, dass die besten Ergebnisse bei der Variante 2 und nicht bei der Variante 1 mit der dünneren Kupferschicht erzielt wurden. Das Lötverhalten des Bauteils erklärt sich durch die Betrachtung der Anbindungen. Pin 4 hat nur in der dritten Lage eine Anbindung und zwar mit der Wärmefalle 2. Ebenfalls nur eine Anbindung hat Pin 2, jedoch mit Wärmefalle 1. Dadurch bestätigt sich die Vermutung, die bereits bei dem AmS-Bauteil auftrat, dass durch die Wärmefalle 2 eine bessere Durchwärmung der Durchkontaktierungen als durch die Wärmefalle 1 und damit ein besseres Lötresultat erreicht wird.

Bei einer Löttemperatur von 320° C konnten erwartungsgemäß erheblich bessere Lötresultate erreicht werden. Allerdings zeigten sich auch bei dieser hohen Temperatur größere Schwankungen und bei der Variante 1 konnten selbst bei einer Lötzeit von sechs Sekunden nicht alle Pins zufrieden stellend verlötet werden. Bei der Variante 3 konnte nur am Pin 4, unabhängig von der gewählten Lötzeit ein vollständiger Lotdurchstieg erreicht werden. Begründet durch die nicht eindeutigen Ergebnisse bei dieser Bauteilform wurde noch eine zusätzliche Versuchsreihe mit der Variante 3 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.3.14 zusammengefasst. Mit Ausnahme von Pin 1 konnten dieses Mal sehr gute Lötresultate erzielt werden. Die Versuche haben somit gezeigt, dass bei dieser Bauteilform mit einer vollflächigen Anbindung, auch bei hohen Löttemperaturen keine akzeptabel ausgebildete Lötverbindung erreicht werden kann und hier das Anbringen von Wärmefallen unumgänglich ist.

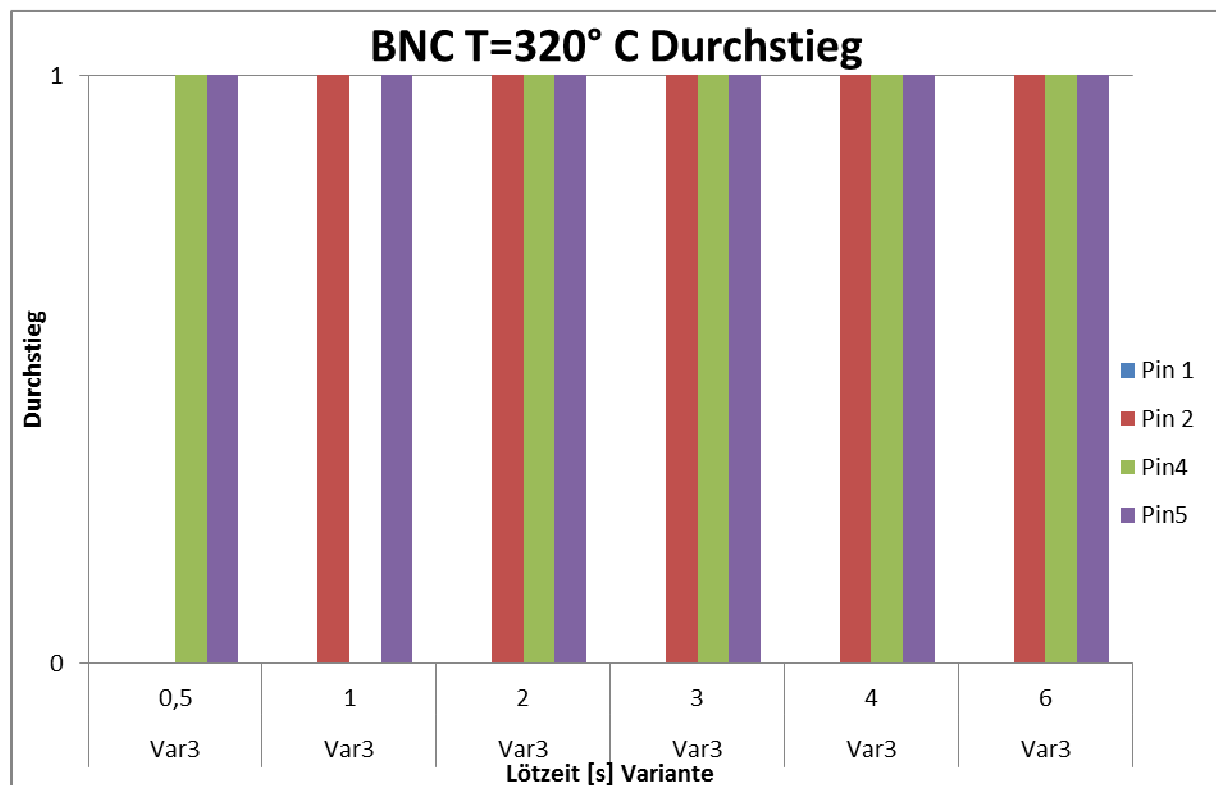


Abb.4.3.14: Bauteil BNC-Adapter – Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Pin für die Leiterplattenvariante 3 bei einer Löttemperatur von 320 °C

Auch bei den BNC-Adaptoren wurden Schliffbilder zur genaueren Beurteilung der Lötverbindungen angefertigt und ausgewertet. Untersucht wurden jeweils die Pins 4 und 5. Bei 285 °C kann selbst bei der Variante 1 und einer Lötzeit von sechs Sekunden kein vollständiger Lotdurchstieg erreicht werden. Ein Füllgrad von 75 % wird gerade noch erreicht. Allerdings enthalten die Lötstellen eine erhebliche Porosität mit Porensäumen entlang des Anschlusses (Abb. 4.3.15). Dies ist ein Hinweis darauf, dass hier eine verzögerte Benetzung des Anschlusses durch das Lot stattfindet, was auf die nicht ausreichende Erwärmung des Anschlusses zurückzuführen ist. Die Ergebnisse für die Variante 2 (Abb. 4.3.16) gleichen denen der Variante 1, d.h. bei beiden untersuchten Pins wird ein Füllgrad von 75 % erreicht und es ist ein Porensaum an der Grenzfläche zum Anschluss vorhanden. Bei höherer Vergrößerung (Abb. 4.3.17) ist zu erkennen, dass die Bauteilanschlüsse in Teilbereichen immer wieder Benetzungsprobleme aufweisen, was ebenfalls auf eine zu geringe Durchwärmung der Anschlüsse hinweist, da eine ungenügende Lötbarkeit der Anschlüsse als Ursache eher auszuschließen ist.

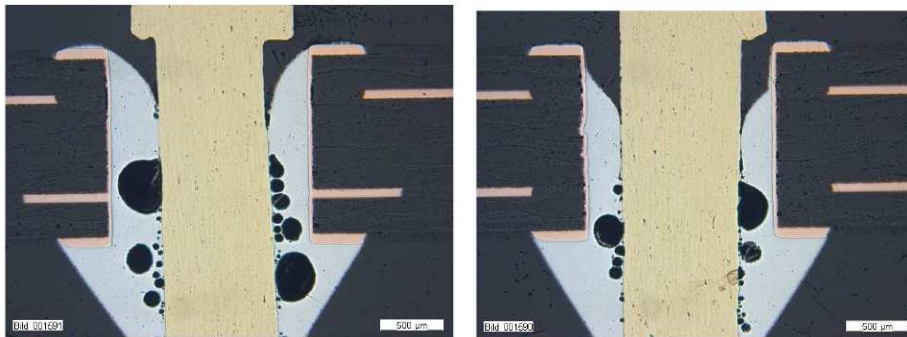


Abb. 4.3.15: Schliffbilder BNC-Adapter - Pin 4 (links), Pin 5 (rechts), Variante 1, 285 °C

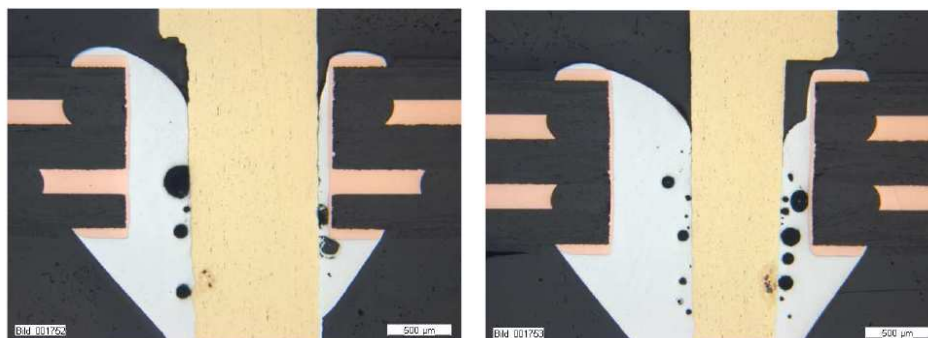


Abb.4.3.16: Schliffbilder BNC-Adapter - Pin 4 (links), Pin 5 (rechts), Variante 2, 285°C

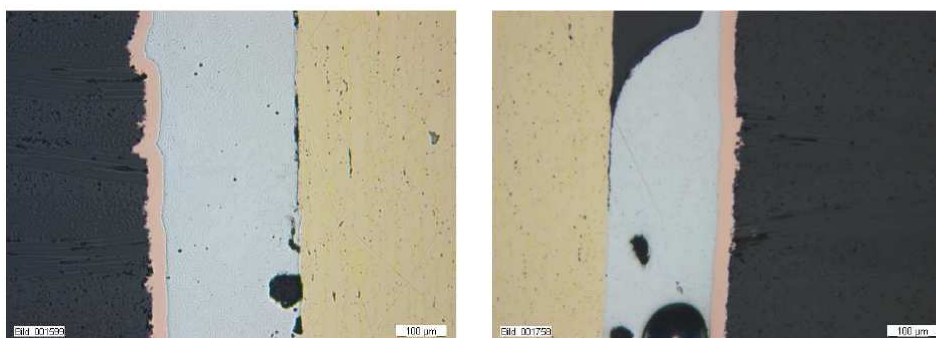


Abb. 4.3.17: Schliffbilder BNC-Adapter – Variante 1, Pin 5 (links), Variante 2, Pin 5 (rechts) – 285 °C

Bei den Testboards, die bei 320°C gelötet wurden, ergeben sich im Hinblick auf den Füllgrad für die Varianten 1 und 2 durchgehend befriedigende Ergebnisse, doch auch diese Lötstellen enthalten eine größere Anzahl Poren. Bei der Variante 3 wird zwar größtenteils ein Füllgrad über 75 % erreicht. Vereinzelt können aber auch hier Benetzungsfehler am Anschluss gefunden werden, Abb. 4.3.18.

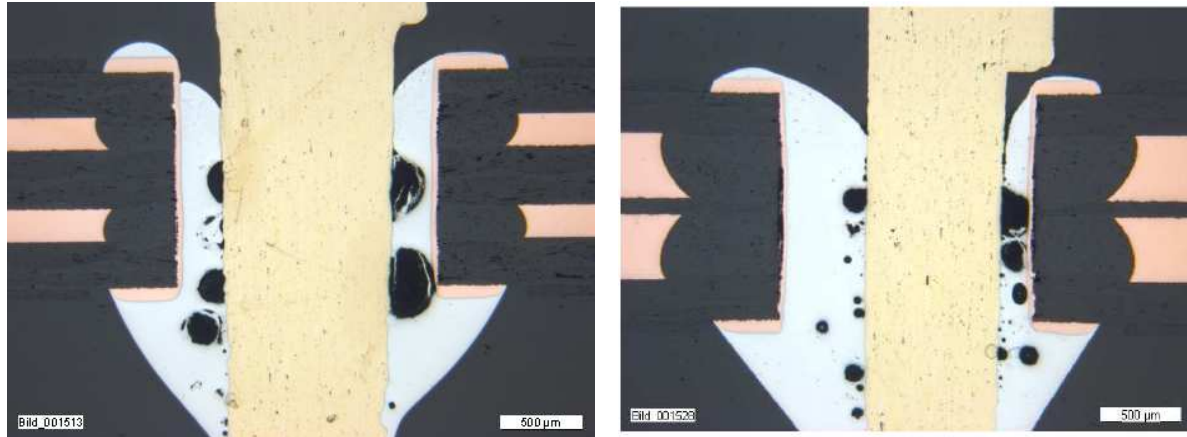


Abb. 4.3.18: Schliffbilder BNC-Adapter – Variante 1, Pin 4 (links), Variante 3, Pin 4 (rechts) – 320 °C

Zusammenfassend stellt man für den BNC-Adapter fest, dass dieses Bauteil im Vergleich zum AmS-Bauteil erheblich problematischer zu handhaben ist und dass wiederum der vollflächig angebundene Pin am schwersten zu löten ist. Grund dafür ist das relativ große, metallische Gehäuse, das einen größeren Wärmeeintrag erfordert, um eine ausreichende Temperatur an den Anschlüssen zu erreichen. Die, auch in den als gut zu bewertenden Lötstellen vorhandenen Poren, die an der Grenzfläche zum Anschluss konzentriert sind, weisen auf eine durch eine zu geringe Durchwärmung verursachte verzögerte Benetzung hin.

Bauteil SvB

Als erstes werden die Ergebnisse bei 285°C für die Varianten 1 und 2 betrachtet. Gelötet wurden Pin 5 bis Pin 12. Auch bei dieser niedrigen Löttemperatur zeigten sich durchgehend gute Ergebnisse, d.h. bei allen Pins erfolgte ein vollständiger Durchstieg (Abb. 4.3.19).

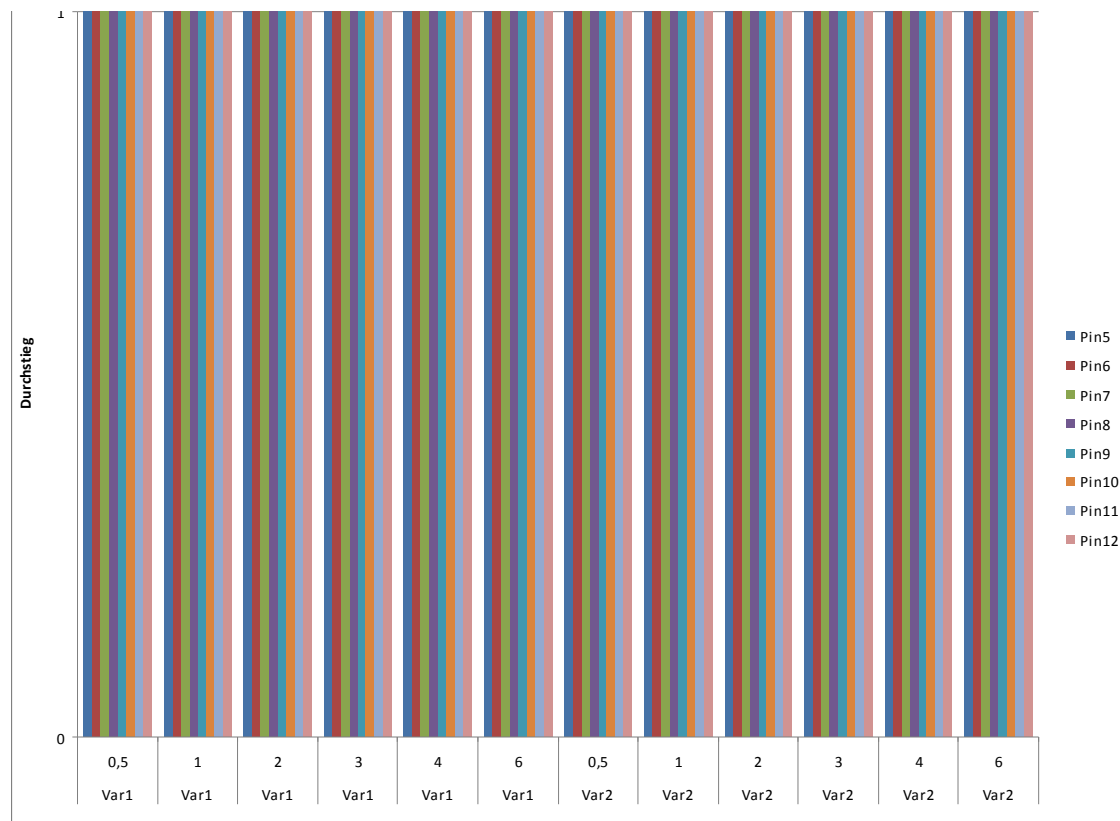


Abb. 4.3.19: Bauteil SvB - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Pin für die Leiterplattenvariante 1 und 2 bei einer Löttemperatur von 285 °C

Bei der Variante 3 wurden bei 285°C alle Pins von 1 bis 16 verarbeitet. Hier ergeben sich erhebliche Schwankungen bei den Lötgergebnissen und es kann kein eindeutiger Zusammenhang gefunden werden (Abb. 4.3.20). Es erfolgte nicht immer ein Durchstieg. Lötprobleme traten vor allem im Bereich der Pins 5-12 auf, wo selbst bei Lötzeiten von 6 Sekunden zum Teil kein Durchstieg zu erreichen war. Bei Betrachtung der Anbindungen zeigt sich folgender Sachverhalt. Pin 1-4 hat in der dritten Lage eine Wärmefalle 3, während Pin 5-8 die Wärmefalle 1 hat. Pin 9-12 hat eine vollflächige Anbindung und Pin 13-16 besitzt keine Anbindung in der dritten Lage. Wie bereits bei den anderen Bauteilen beobachtet, ergeben sich auch hier bei der vollflächigen Anbindung die schlechtesten Ergebnisse. Da sich bei den Pins 1-4 ein besseres Lötgergebnis, verglichen mit den Pins 5-8 einstellt, kann daraus geschlossen werden, dass durch die Wärmefalle 3 ein besseres Lötverhalten als mit der Wärmefalle 1 erreicht wird.

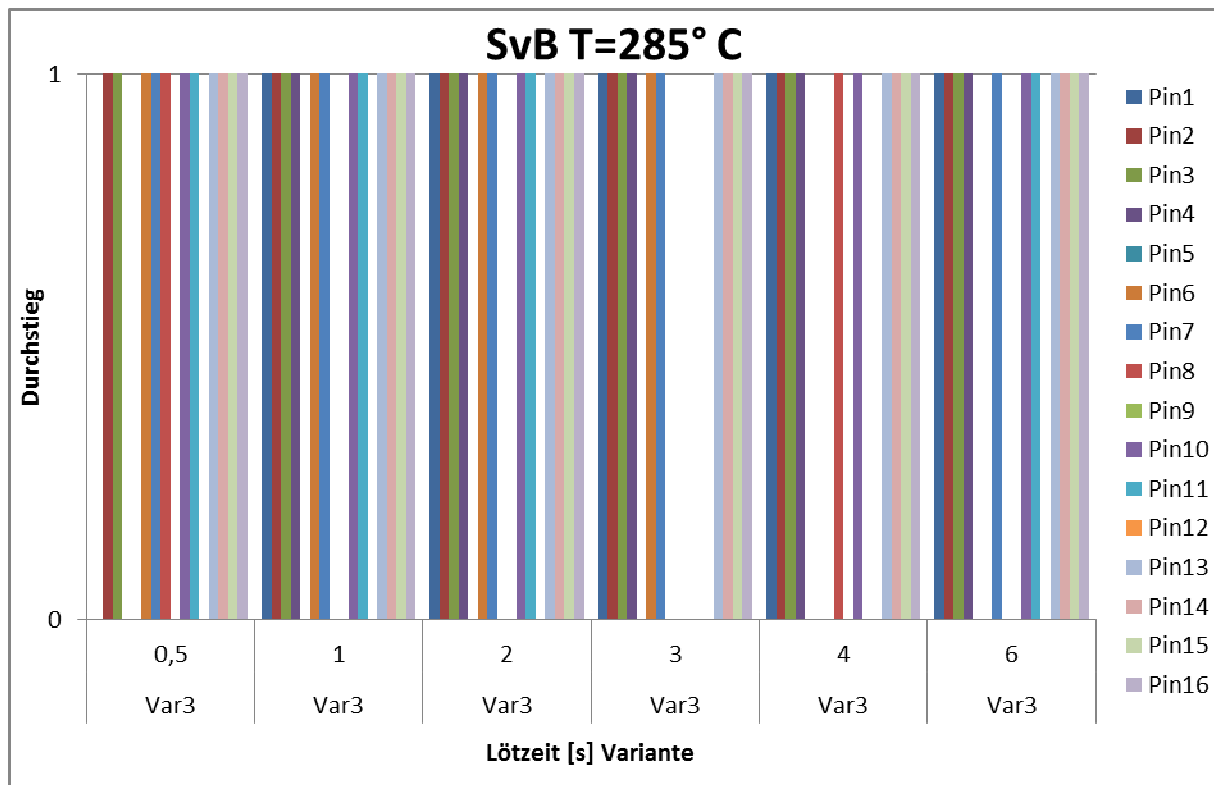


Abb.4.3.20: Bauteil SvB - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Pin für die Leiterplattenvariante 3 bei einer Löttemperatur von 285 °C

Bei einer Löttemperatur von 300°C, bei der wieder die schwierigeren Pins 5 -12 verarbeitet wurden ergaben sich folgende Ergebnisse. Erwartungsgemäß wurden die Varianten 1 und 2 problemlos gelötet, während bei der Variante 3 bei den kürzeren Lötzeiten noch unvollständig ausgebildete Lötstellen vorhanden waren. Erst bei einer Kontaktzeit von sechs Sekunden gelang es auch diese Variante nahezu vollständig zu verlöten. Die Erhöhung der Lotbadtemperatur auf 320°C führte zu einer erfolgreichen Verlöten aller Pins, auch bei der Variante 3, selbst bei geringeren Lötzeiten (Abb. 4.3.21).

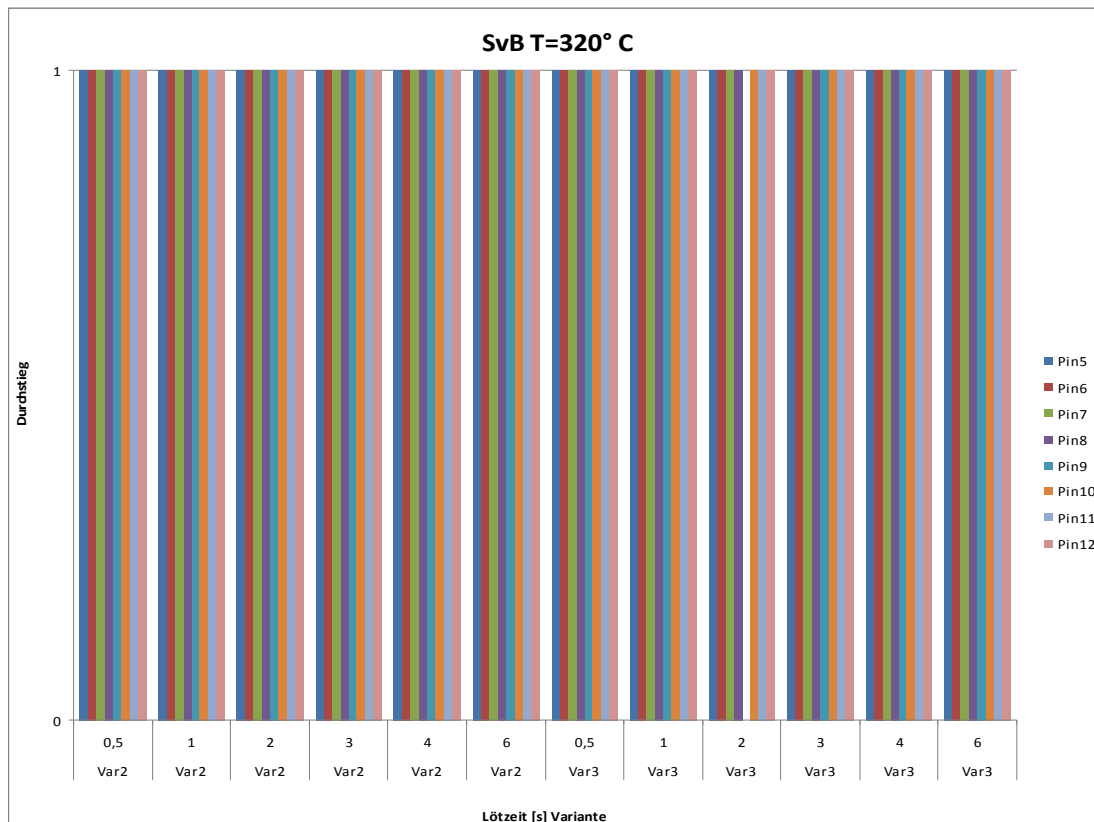


Abb. 4.3.21: Bauteil SvB - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Pin für die Leiterplattenvariante 3 bei einer Löttemperatur von 320 °C

Für die metallographische Untersuchung wurden die Boards, die bei 285° C und 6 Sekunden gelötet wurden, herangezogen. Untersucht wurden die Pins 5 bis 8 der Varianten 1 – 3, sowie Pin 13 bis 16 der Variante 3, Abb. 4.3.22 und 4.3.23. Bei Variante 1 treten bei allen 4 Lötstellen größere Voids auf. Zudem ist ein erhöhter Harzrückzug zu beobachten. Bei Variante 2 ergeben sich, verglichen zur Variante 1 bessere Ergebnisse dahingehend, dass in den Lötstellen erheblich weniger Luft einschüsse vorliegen. Bei der Variante 3 ist, verglichen zur Variante 1 und 2, ein etwas schlechterer Füllgrad vorhanden, der jedoch noch im Rahmen der von der IPC geforderten 75 % liegt. Die Anzahl der Voids ist ebenfalls erheblich kleiner als bei der Variante 1.

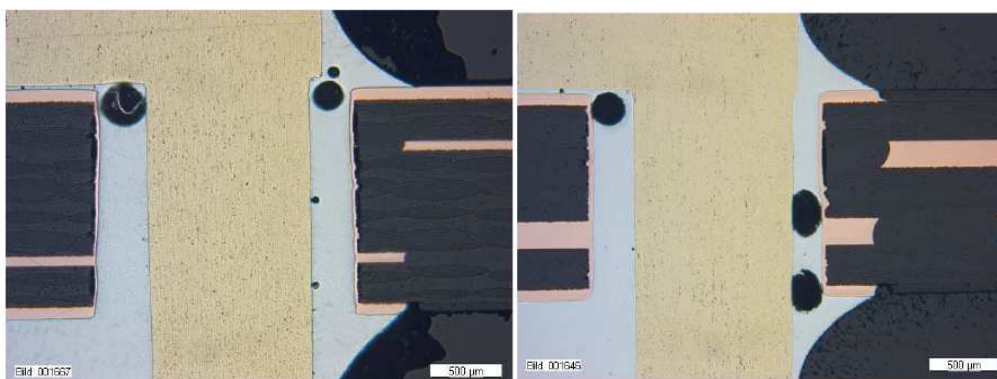


Abb. 4.3.22: Schliffbilder Bauteil SvB - Variante 1, Pin 5 (links); Variante 2, Pin 5 (rechts), 285 °C

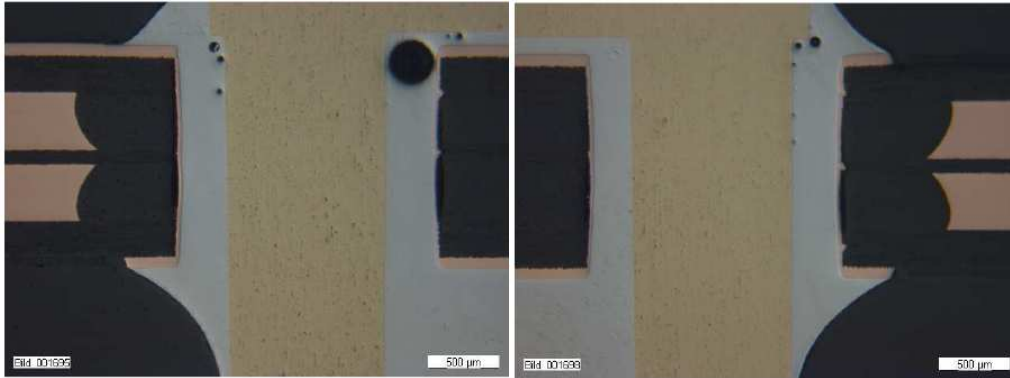


Abb. 4.3.23: Schliffbilder Bauteil SvB - Variante 3, Pin 13 (links); Variante 3, Pin 16 (rechts), 285 °C

Bei der Stromversorgungsbuchse handelt es sich somit um ein Bauteil, das sich gut verarbeiten lässt und bei dem selbst bei niedrigen Löttemperaturen gute Lötresultate erzielt werden. Lediglich in Verbindung mit der Variante 3 ist bei den Anschlüssen mit einer vollflächigen Anbindung bzw. einer Wärmefalle 1 eine höhere Temperatur notwendig, um einen vollständigen Lotdurchstieg zu erreichen, während bei den Anschlüssen mit einer Wärmefalle 3 die niedrige Temperatur mit einer geringen Verlängerung der Kontaktzeit ausreichend ist, um gute Lötresultate zu erzielen.

Bauteil F-Dose

Im Folgenden soll nun die Verlotung der F-Dose betrachtet werden. Hierbei wurden nur Versuche an den Boards der Variante 3 und lediglich bei einer Löttemperatur von 285°C durchgeführt. Während bei kurzen Lötzeiten (unter 3 Sekunden) nur schlechte Ergebnisse erreicht werden und es lediglich bei Pin 2 und 3 zu einem Durchstieg kam, verbesserte sich das Ergebnis bei längeren Lötzeiten erheblich. So konnten bei Lötzeiten ab 3 Sekunden die Pin 2 und 4 erfolgreich verlötet werden, die eine Anbindung in der dritten Lage mit einer Wärmefalle 1 besitzen. Als problematisch erwiesen sich jedoch erwartungsgemäß wieder Anschlüsse, die eine vollflächige Anbindung besitzen. Bei diesen Pins (Nummer 1 und 5) erfolgte kein Durchstieg (Abb. 4.3.24 und Abb. 4.3.25).

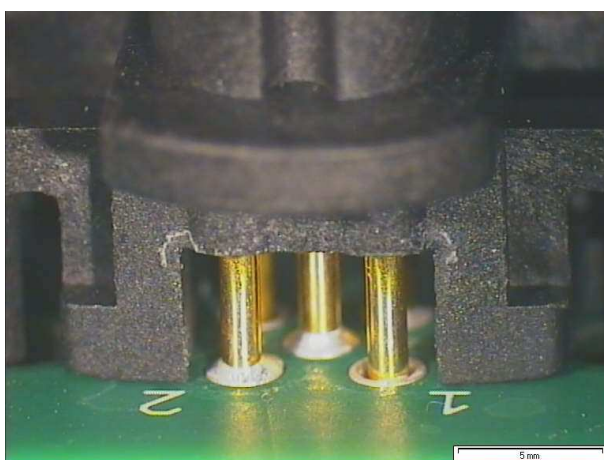


Abb. 4.3.24: Bauteil F-Dose – optische Inspektion - Beispiel für die Lötresultate Variante 3, 285 °C, 4 Sekunden

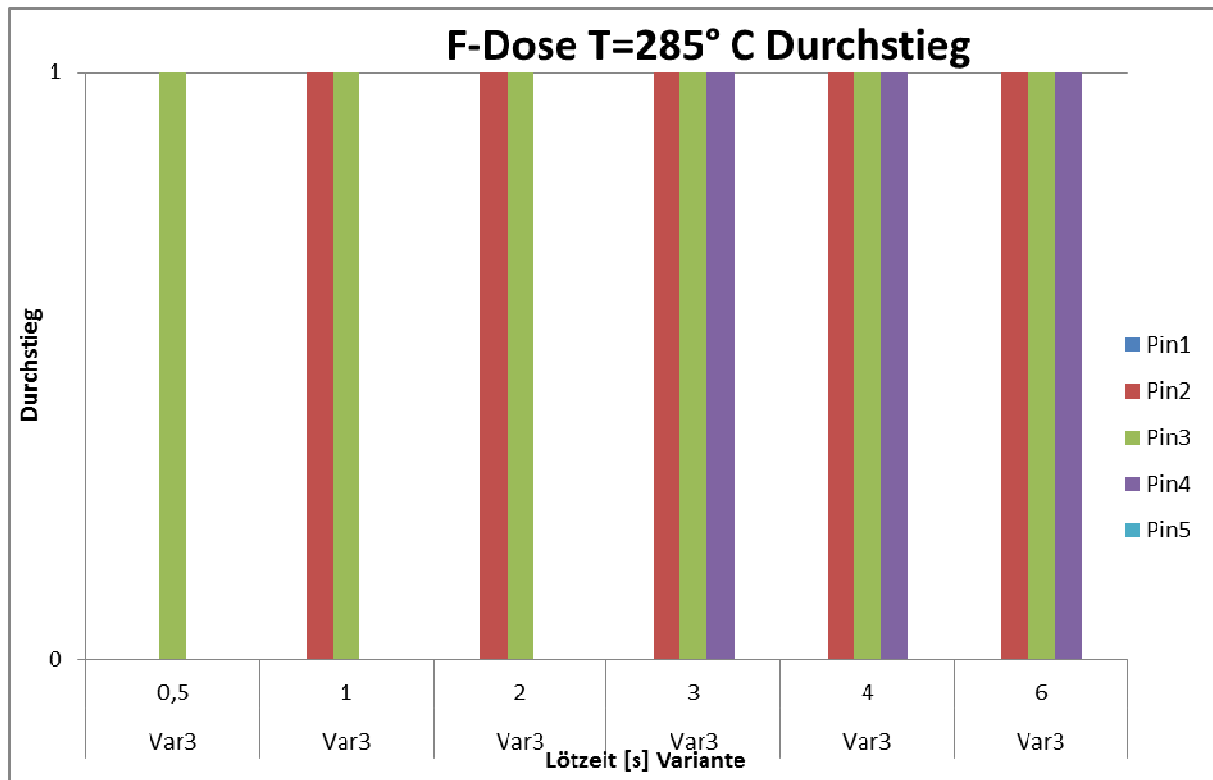
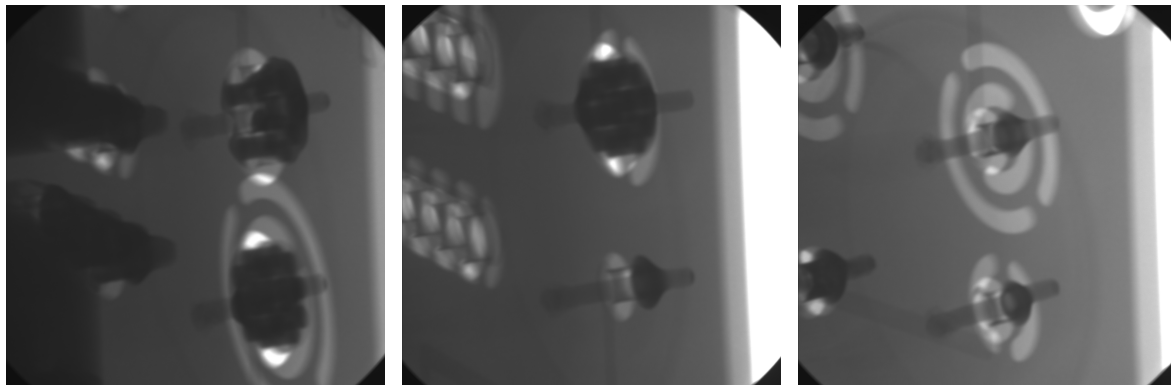


Abb. 4.3.25: Bauteil F-Dose - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Pin für die Leiterplattenvariante 3 bei einer Löttemperatur von 285 °C

Bauteil Elko

Bei den Elkos konnte im Gegensatz zu den anderen Bauteilen die Überprüfung des Durchstieges nicht rein optisch erfolgen, da der Bauteilkörper auf der Leiterplatte aufliegt. Deshalb erfolgten hier ergänzend 2 D – Röntgenuntersuchungen, um den Füllgrad abzuschätzen. In Abb. 4.3.26 sind Ergebnisse der Röntgenuntersuchung dargestellt. Hier wird der Einfluss der Art der Anbindungen und der Wärmefallen deutlich. Bei den angebotenen Pins zeigt sich ein unvollständiger Lotdurchstieg der weit unterhalb der 75 % liegt und auch bei einer Erhöhung der Lötzeit nicht erheblich verbessert werden kann. Weiterhin wird deutlich, dass durch das Anbringen von thermal vias im Pad der Durchkontaktierung auch bei diesem Bauteil der Lotdurchstieg erheblich verbessert wird. Allerdings kann auch durch diese Maßnahme bei dem vollflächig angebotenen Pin 1 immer noch kein zufrieden stellender Durchstieg, auch bei langen Lötzeiten, erreicht werden.

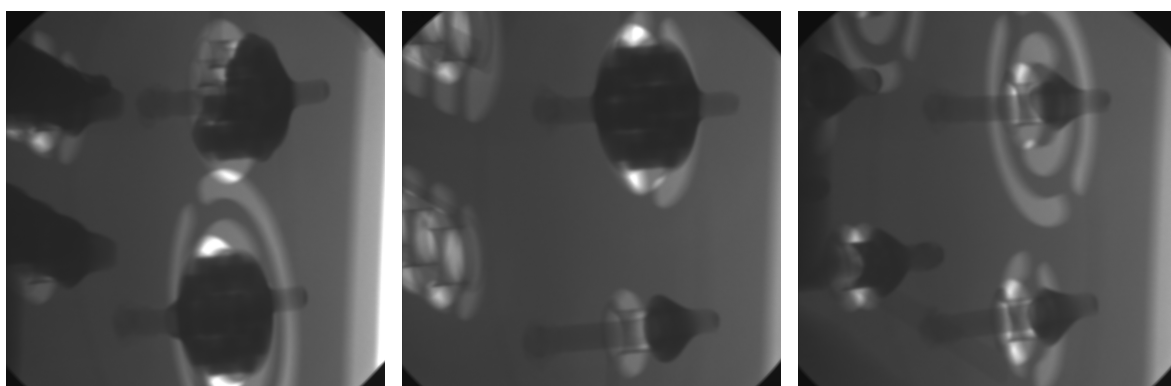


Elko 1 (Pin 1 und 2)

Elko 2 (Pin 3 und 4)

Elko 3 (Pin 5 und 6)

Variante 3 - 285 °C, 3 Sekunden



Elko 1 (Pin 1 und 2)

Elko 2 (Pin 3 und 4)

Elko 3 (Pin 5 und 6)

Variante 3 - 285 °C, 6 Sekunden

Abb. 4.3.26: Bauteil Elko – Ergebnisse der 2 D - Röntgenuntersuchung

Bei diesem Bauteil wurde nun anhand der Röntgenbilder versucht die Auswertung so zu gestalten, dass der tatsächlich vorhandene Füllgrad bestimmt wurde. Bei einer Löttemperatur von 285 °C (Abb. 4.3.27) können bei der Variante 1 bei allen Anschlüssen, mit Ausnahme von Pin 4, ein vollständiger Lotdurchstieg, auch bereits bei einer Kontaktzeit von drei Sekunden, erreicht werden. Bei Pin 4 wird, obwohl hier eine vollflächige Anbindung vorliegt trotzdem ein Füllgrad von 75 % überschritten, so dass auch diese Lötverbindungen als ausreichend eingestuft werden können. Bei der Variante 2 ist ein vollständiger Lotdurchstieg nur noch bei den Anschlüssen 1 – 3 und 5 vorhanden. Bei dem Anschluss 6 mit einer Wärmefalle 1 wird kein vollständiger, aber zumindest ein akzeptabler Lotdurchstieg von über 75 % erreicht, während Pin 4 unter diesen Bedingungen nicht mehr zu verlöten ist. Bei der Variante 3 ist das Lötresultat erheblich schlechter. Hier kann nur bei den Anschlüssen 2 und 3 mit Wärmefallen und thermal vias ein vollständiger Lotdurchstieg erreicht werden. Die Anschlüsse 4 – 6 zeigen keinen Durchstieg und bei Anschluss 1 ergibt sich ein Füllgrad von ca. 50 % bei Kontaktzeiten von 3 und 4 Sekunden und bei sechs Sekunden werden sogar 100 % erreicht.

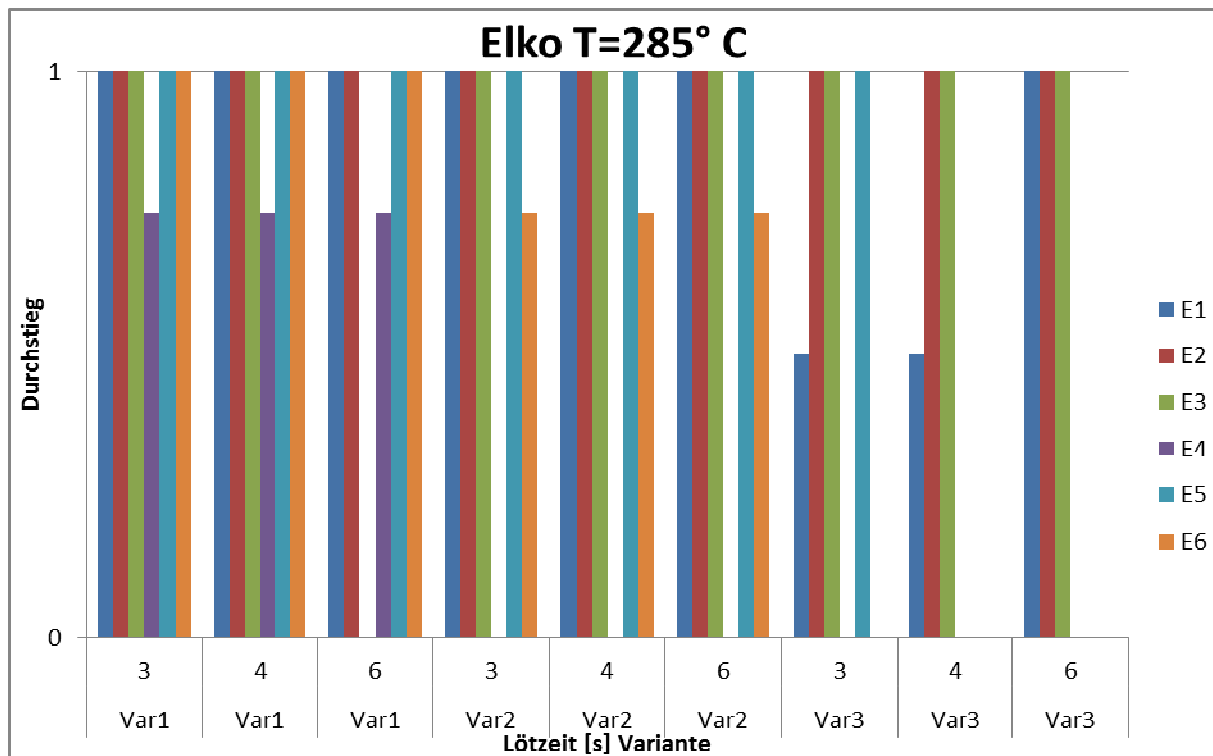


Abb. 4.3.27: Bauteil Elko - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Pin und Leiterplattenvariante bei einer Löttemperatur von 285 °C

Bei einer Temperatur von 300 °C wurde lediglich die Variante 3 untersucht (Abb. 4.3.28).

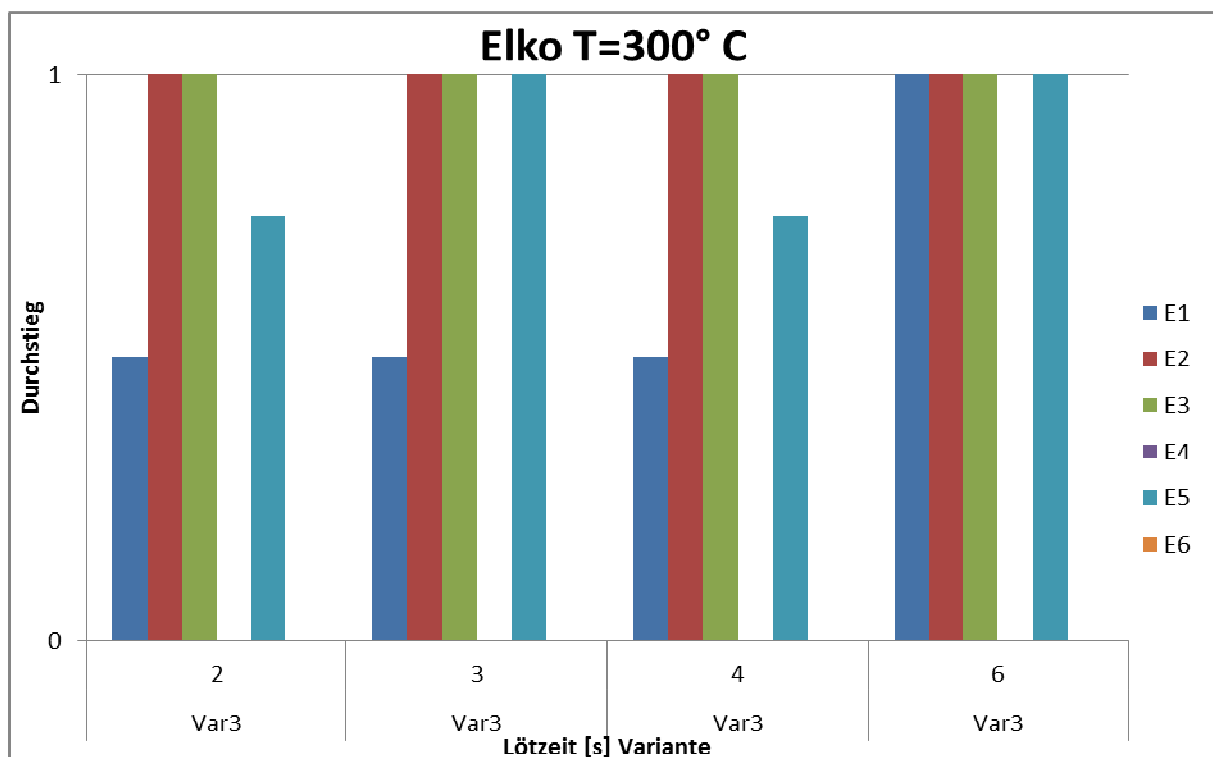


Abb.4.3.28: Bauteil Elko - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Pin für die Leiterplattenvariante 3 bei einer Löttemperatur von 300 °C

Selbst bei Erhöhung der Temperatur auf 300 °C kann Variante 3 nur schwer gelötet werden. Lediglich die Anschlüsse 2 und 3 lassen sich auch bei der niedrigsten Kontaktzeit von 2 Sekunden optimal verlöten. Bei Pin 1 mit vollflächiger Anbindung und thermal vias ist bei einer Lötzeit von 6 Sekunden ein vollständiger Lotdurchstieg vorhanden. Bei kürzeren Lötzeiten wird lediglich ein Füllgrad von 50 % erreicht. Ebenfalls akzeptable Lötresultate enthält man bei Pin 5 mit sechs Sekunden Lötzeit, während sich Pin 1 und 6 auch bei der höheren Temperatur nicht löten lassen. Erst bei einer Löttemperatur von 320 °C (Abb. 4.3.29) ergibt sich bei Pin 6 zwar kein vollständiger, aber ausreichender Lotdurchstieg. Bei Pin 4 mit einer vollflächigen Anbindung ohne thermal vias ist auch diese hohe Löttemperatur nicht ausreichend, um ein gutes Lötresultat zu erhalten.

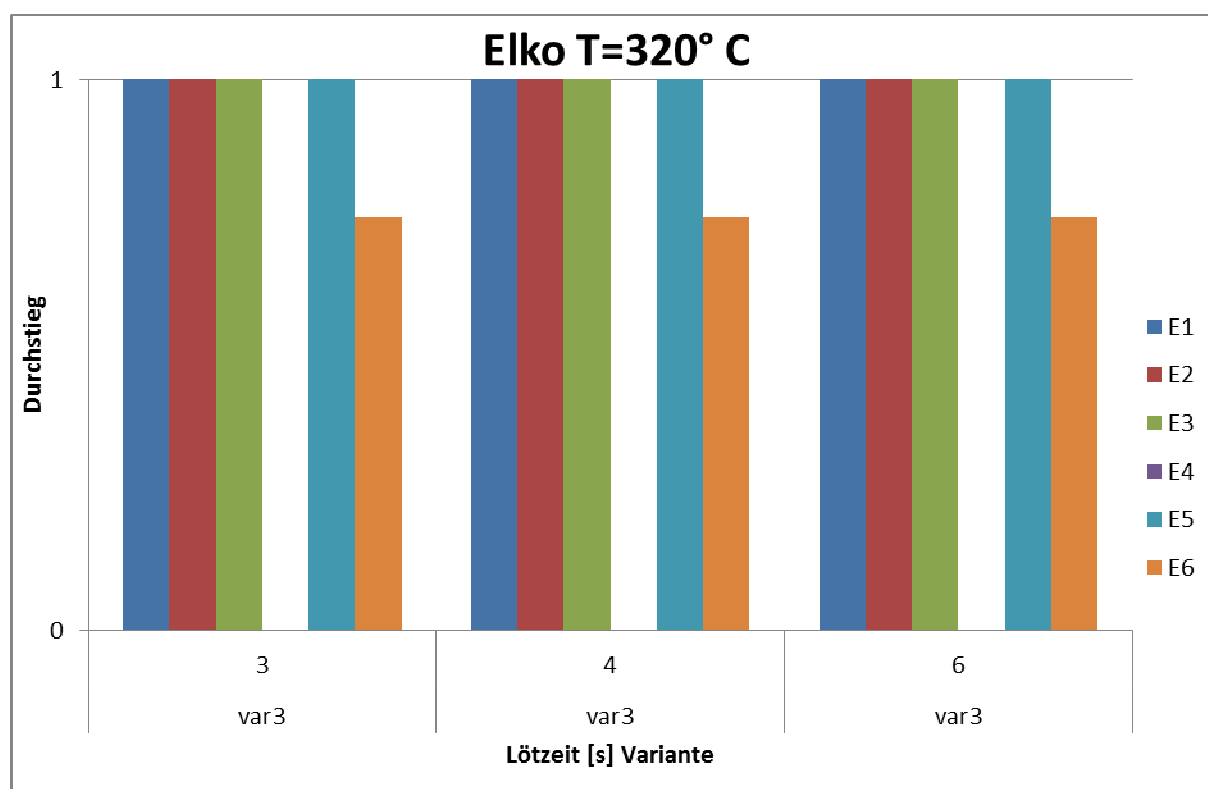


Abb.4.3.29: Bauteil Elko - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Pin für die Leiterplattenvariante 3 bei einer Löttemperatur von 320 °C

Schliffbilder wurden nur von der Variante 3 angefertigt. Untersucht wurden Proben die bei 285°C und 2 bzw. 6 Sekunden gelötet wurden. Schliffe wurden von allen Pins angefertigt. Vergleicht man die Bilder im Hinblick auf den Durchstieg mit den Röntgenaufnahmen so stellt man fest, dass die Ergebnisse übereinstimmen (Abb. 4.3.30 – 4.3.32). Bei Pin 2 und 3 liegt ein Lotdurchstieg von 100 % mit vollständiger Benetzung des bauteilseitigen Pads vor. Bei Pin 1 wird ein Füllgrad von 75 % nicht mehr erreicht und bei den Anschlüssen 4 – 6 entsprechen die Lötstellen einer einseitigen und damit unzulässigen Verbindung, d.h. das Pad auf der Lötseite ist zwar vollständig benetzt aber es hat kein Lotfluss in die Durchkontaktierung stattgefunden. Auffallend ist noch, dass im Vergleich zu den anderen Bauteilen nur eine geringe Zahl an Voids vorhanden ist. Die Leiterplatten weisen, außer dem zulässigen Harzrückzug, keinerlei Schädigungen in Form von Laminatrissen oder Rissen in der Kupfermetallisierung auf.



Abb. 4.3.30: Schliffbilder Elko - Pin 1 (links) und Pin 2 (rechts) - Variante 3, 285 °C, 2 Sekunden

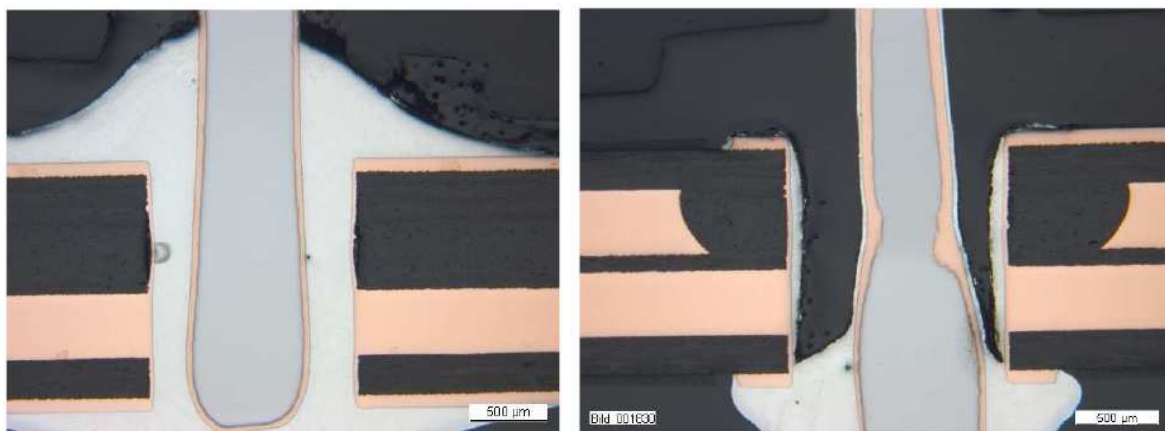


Abb. 4.3.31: Schliffbilder Elko - Pin 3 (links) und Pin 4 (rechts) - Variante 3, 285 °C, 2 Sekunden

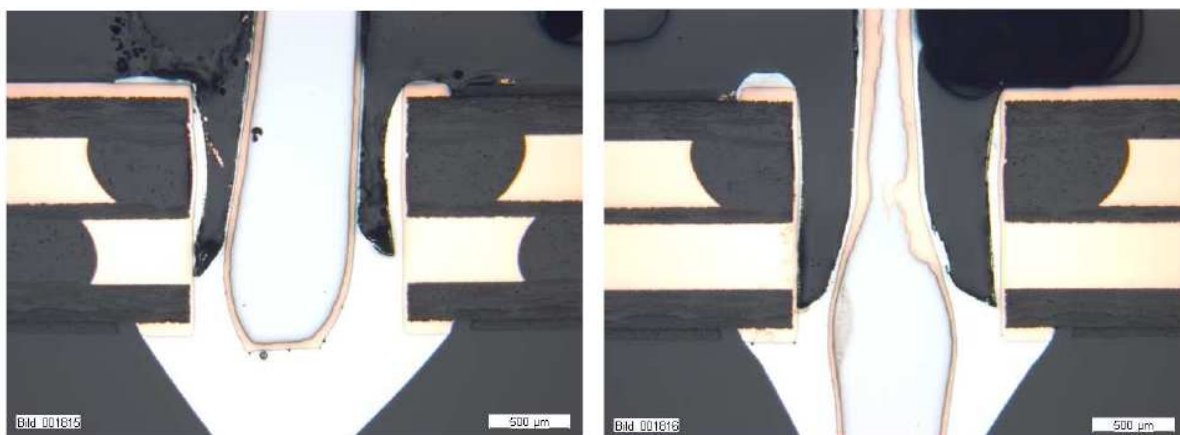


Abb. 4.3.32: Schliffbilder Elko - Pin 5 (links) und Pin 6 (rechts) - Variante 3, 285 °C, 2 Sekunden

Vergleicht man die Schliffbilder der Probe, die bei 6 Sekunden gelötet wurde, so bestätigen sich ebenfalls die Ergebnisse der Röntgenuntersuchung und die Ergebnisse der Schliffuntersuchung bei einer Kontaktzeit von 2 Sekunden. Bei Pin 1 bis 3 sind die Durchkontaktierungen vollständig gefüllt und Pin 4 bis 6 sind nicht ausreichend verlötet. Alle Lötstellen enthalten wiederum nur wenige Poren.

Ebenfalls metallographisch untersucht wurden die Proben der Variante 3, die bei 320 °C und einer Zeit von 6 Sekunden gelötet wurden. Die Ergebnisse decken sich im Großen und Ganzen ebenfalls mit denen der Röntgenuntersuchung. So zeigt sich nur bei Pin 4 keine ausreichende Füllung (Abb. 4.3.33). Bei allen anderen Pins zeigen sich durchgehend zufrieden stellende Lötresultate. Es sind im Vergleich zu anderen Bauteilen nur wenig Lufteinschlüsse vorhanden. Bei Pin 2 konnte ein größerer Riss in der Lötstelle gefunden werden, der jedoch bedingt durch die Lage und die Erscheinungsform als unkritisch zu betrachten ist (Abb. 4.3.34). Vergleicht man die Ablegerung im Bereich des Knies der Durchkontaktierung (Abb. 4.3.35) zeigt sich, dass erwartungsgemäß bei einer Löttemperatur von 320 °C die noch vorhandene Kupfermetallisierung in diesem Bereich erheblich dünner ist als bei einer Löttemperatur von 285 °C. Während bei 285 °C die nach der IPC -6012 /19/ geforderte Dicke der Kupfermetallisierung von mind. 25 µm noch erfüllt wird, liegt der Wert bei 320 °C im Bereich von ca. 10 µm und damit außerhalb der zulässigen Grenze.

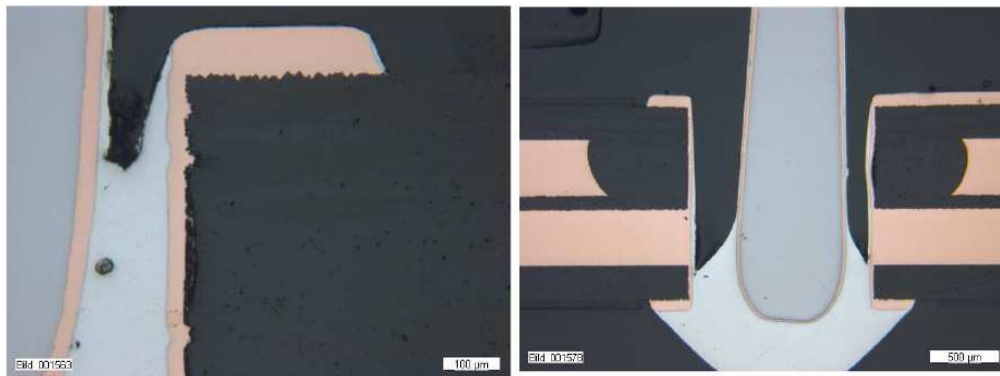


Abb. 4.3.33: Schliffbilder Elko - Pin 5 (links) und Pin 4 (rechts) - Variante 3, 320 °C , 6 Sekunden

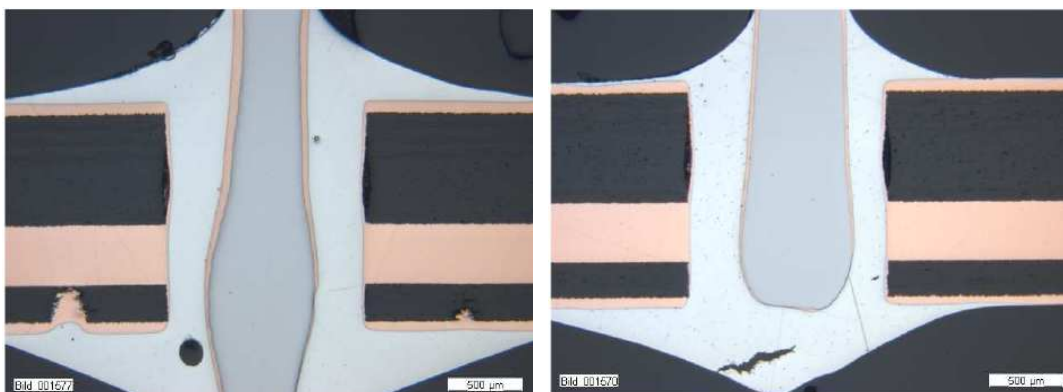


Abb. 4.3.34: Schliffbilder Elko - Pin 3 (links) und Pin 2 (rechts) - Variante 3, 320 °C , 6 Sekunden

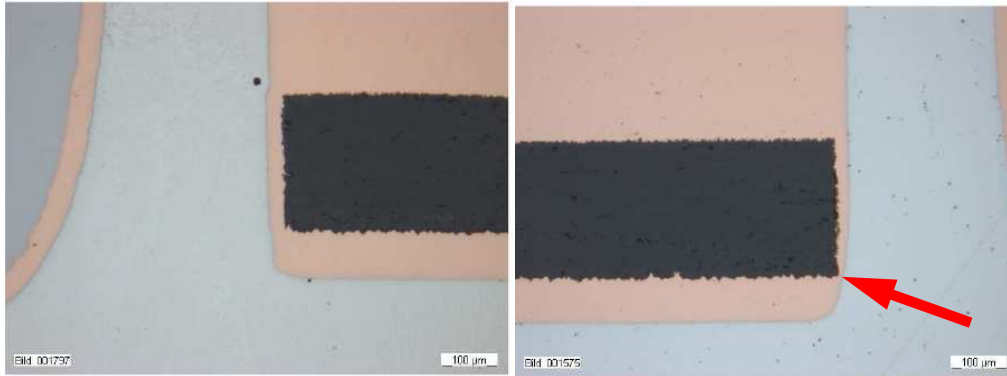


Abb. 4.3.35: Schliffbilder Elko – Pin 1 - links: 285 °C und Pin 1 (rechts) - Variante 3, 320 °C , 6 Sekunden

Fast man die Ergebnisse für den Elko zusammen so ist Pin 4 mit einer vollflächigen Anbindung in der 3. Lage am problematischsten. Hier lässt sich sogar bei der höchsten Löttemperatur in Verbindung mit der längsten Kontaktzeit kein Lotfluss in die Durchkontaktierung erreichen. Auch bei diesem Bauteil zeigt sich, dass das Anbringen von thermal vias das Lötverhalten erheblich verbessert und mit diesem Layout auch bei einer vollflächigen Anbindung ein Durchstieg von 100 %, selbst bei der Variante 3, zu erreichen ist. Die Wärmefalle 2 erweist sich, wie bereits bei den anderen Bauteilen, als geeigneter als die Wärmefalle 1.

Stifte DK 1.3 und DK 1.7

Zuletzt sollen noch die Ergebnisse bei der Verlotung der Stifte betrachtet werden. Als eher unkritisch erweist sich der runde Stift mit einem Durchmesser von 1,3 mm. Als einzig wirklich problematische Anordnung erwies sich hier Pin 17, bei dem es sich wieder um einen Anschluss mit vollflächiger Anbindung handelt. Bei diesem kam es bei 285° C Lötbadtemperatur zu keinem Durchstieg. Bei einer Erhöhung jedoch auf 300°C konnte auch dieser Pin erfolgreich verlötet werden (Abb. 4.3.36).

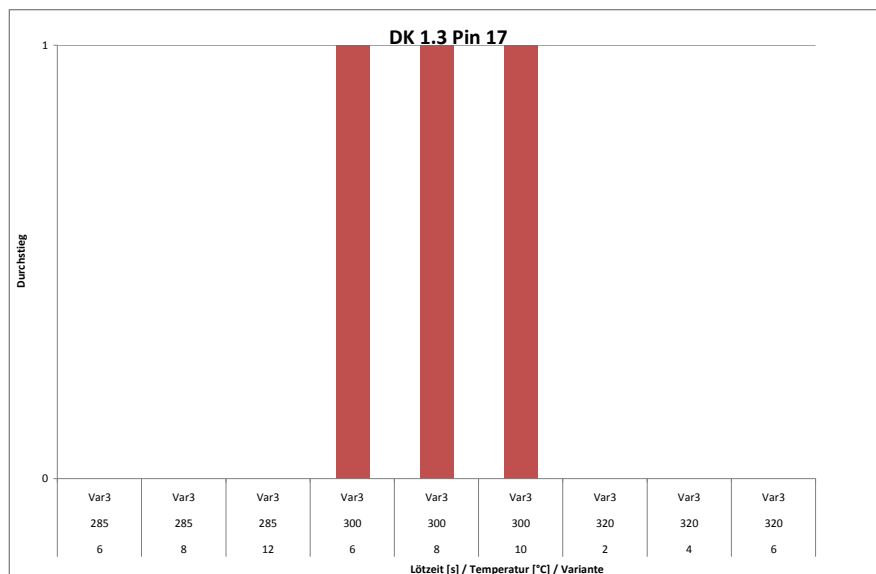


Abb. 4.3.36: Stift DK 1.3 - Lotdurchstieg für Pin 17 in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Löttemperatur für Leiterplattenvariante 3

Zum Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Wärmefallen können ebenfalls die Ergebnisse des Stifts herangezogen werden. Pin 16 mit der Wärmefalle 2 war problemlos, auch bei niedrigen Löttemperaturen und kurzen Lötzeiten zu verarbeiten (Abb. 4.3.37). Pin 18 besitzt die Wärmefalle 3. Hier gab es doch einige Schwierigkeiten. So kam es bei niedrigen Temperaturen und geringen Lötzeiten zu keinem Löt-durchstieg. Eine Verlängerung der Lötzeit bzw. eine Erhöhung der Temperatur kann hier jedoch abhelfen (Abb. 4.3.38). Pin 20 mit der Wärmefalle 1 zeigt ein etwas schlechteres Verhalten als Pin 16. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich folgendes Ranking bezüglich der Wirksamkeit der Wärmefallen aufstellen. Die Variante zwei verbessert das Lötverhalten am meisten, gefolgt von der Variante 1, während Variante 3 den geringsten Effekt bringt.

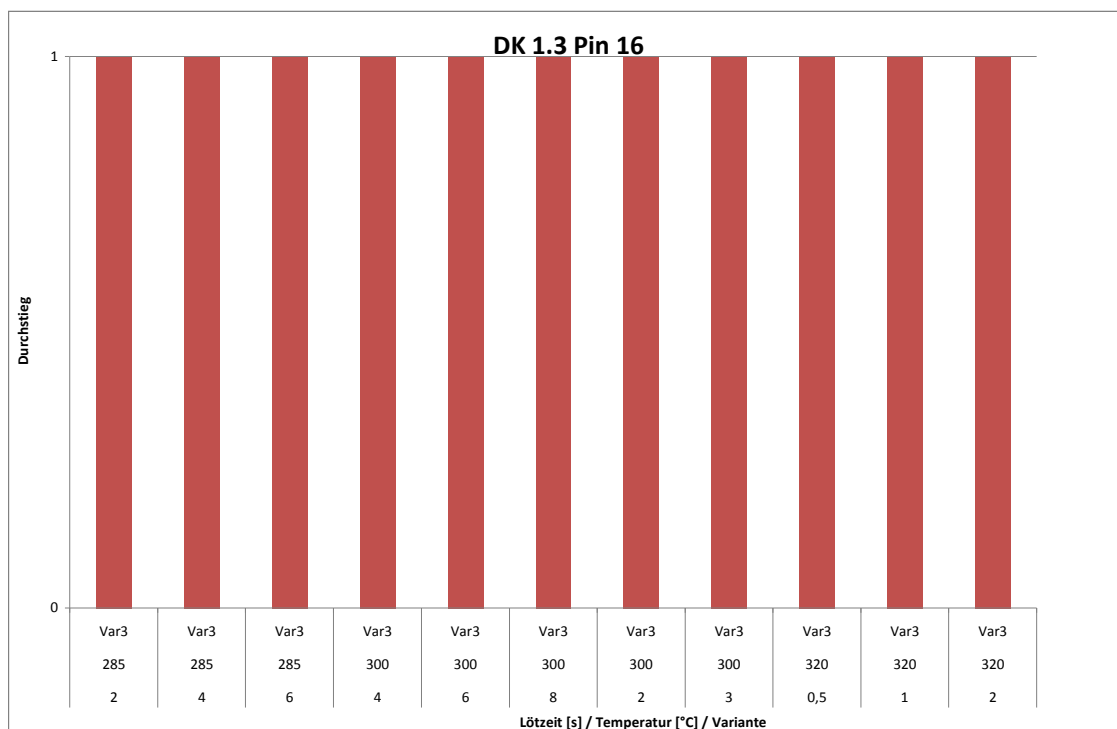


Abb. 4.3.37: Stift DK 1.3 - Lotdurchstieg für Pin 16 in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Löttemperatur für Leiterplattenvariante 3

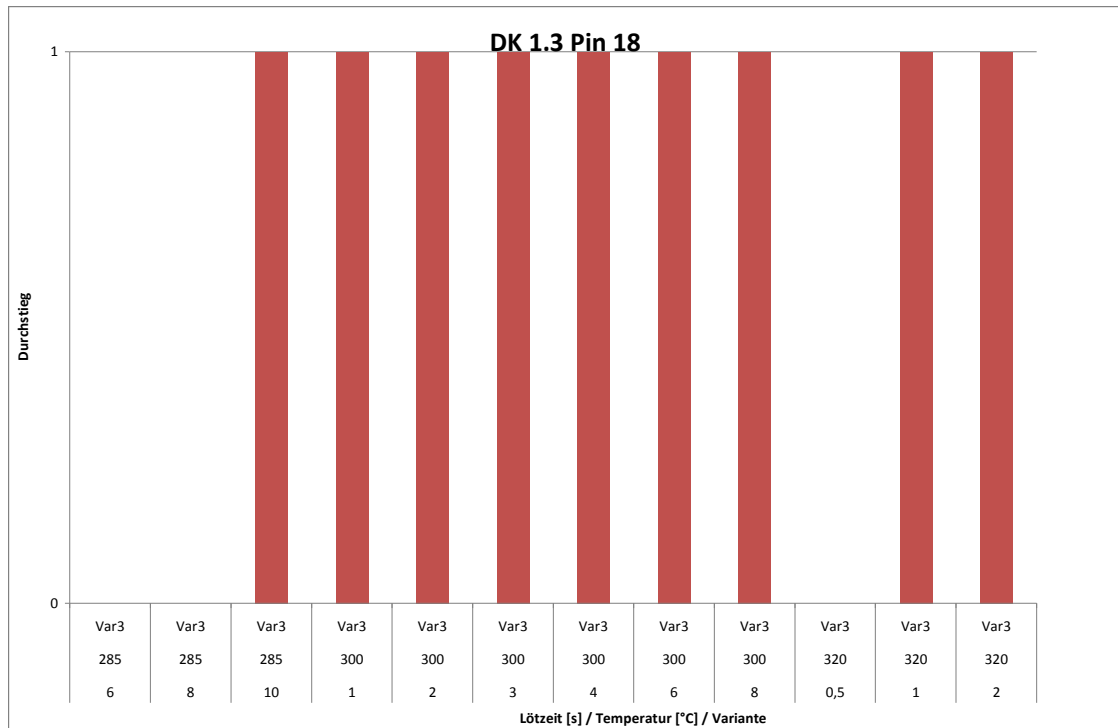


Abb. 4.3.38: Stift DK 1.3 - Lotdurchstieg für Pin 18 in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Löttemperatur für Leiterplattenvariante 3

Ähnlich fallen auch die Ergebnisse für den Stift DK 1,7 aus. Wie erwartet war wieder der Anschluss mit vollflächiger Anbindung (Pin 12) am schwierigsten zu löten. Bei der Variante 3 war eine Löttemperatur von 320 °C erforderlich, um einen vollständigen Lotdurchstieg zu bekommen. Ausreichend war hier allerdings bereits eine Lötzeit von 0,5 Sekunden (Abb. 4.3.39). Bei allen anderen Pins, bei denen sich die Variante der Wärmefallen unterschied, kam es zu keinerlei Problemen. Bereits bei 285°C kam es bei allen Anschlüssen ab 2 Sekunden Lötzeit zu einem Durchstieg von 100 % (Abb. 4.3.40).

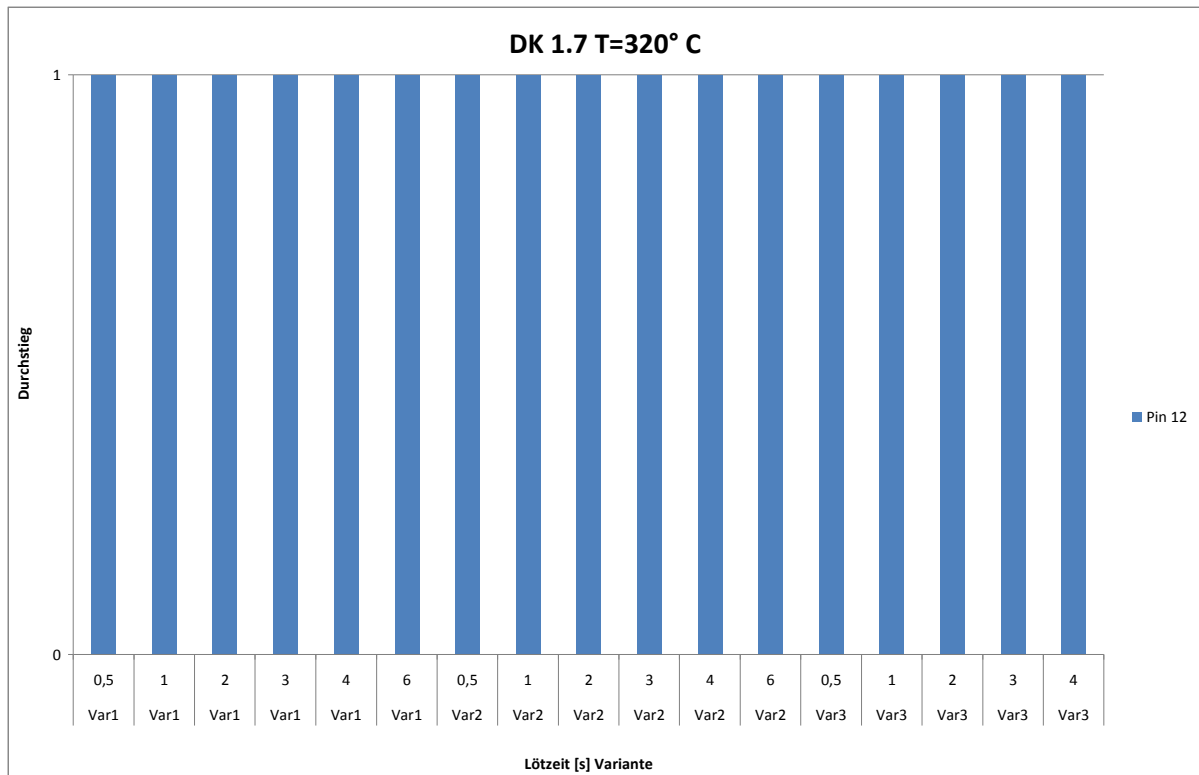


Abb. 4.3.39: Stift DK 1.7 - Lotdurchstieg für Pin 12 in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit und Leiterplattenvariante bei 320 °C Löttemperatur

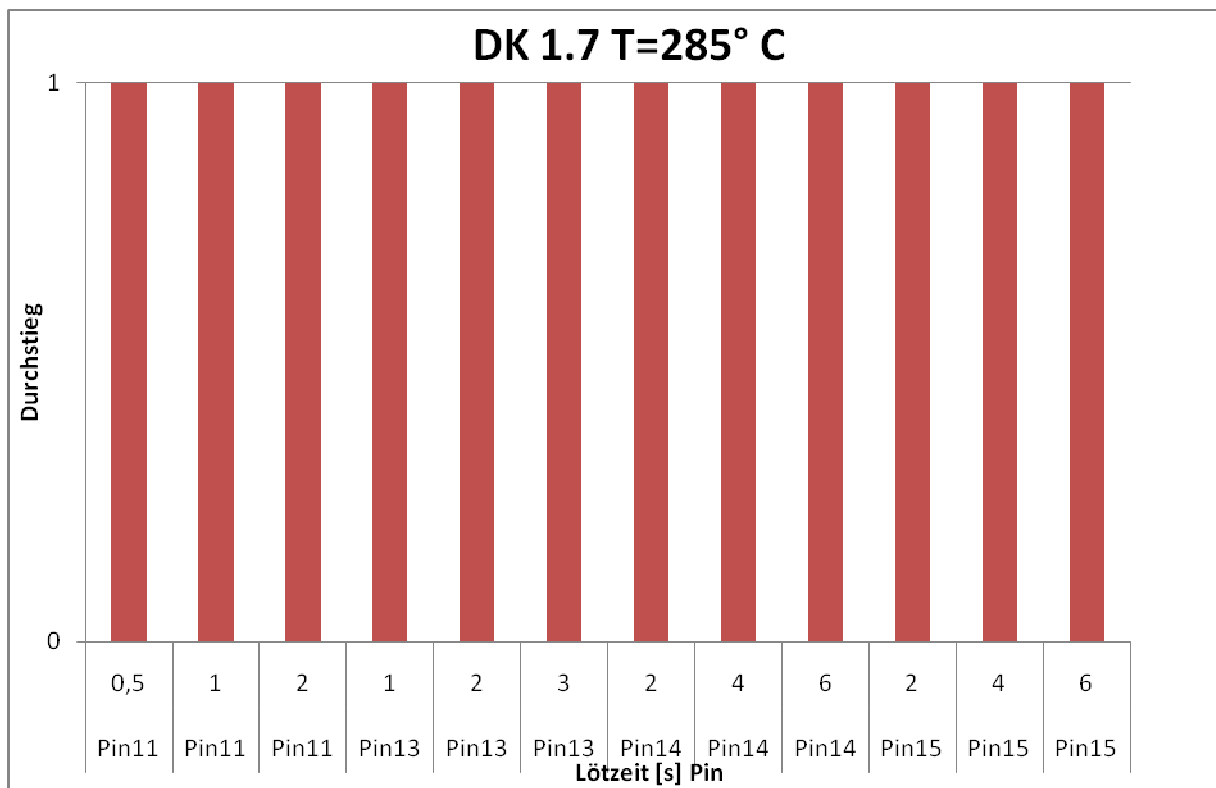


Abb. 4.3.40: Stift DK 1.7 - Lotdurchstieg für Pin 11, 13, 14 und 15 in Abhängigkeit von der Lötzeit für die Leiterplattenvariante 3 bei 285 °C Löttemperatur

4.3.2 Versuche mit der Miniwelle der Fa. Eutect

Um herauszufinden inwieweit die herstellerabhängigen Unterschiede der Selektivlötanlagen einen Einfluss auf das Lötverhalten und die Prozessparameter haben, wurden stichprobenartig weitere Tests mit einer Miniwellenanlage der Fa. Eutect durchgeführt. Zusätzlich sollte nochmals die Auswirkung einer Vorheizung betrachtet werden. Für diese Versuche wurden die Bauteile AmS, SvB und Elko ausgewählt.

Bauteil AmS

Die Ergebnisse der optischen Untersuchung sind im nachfolgenden Diagramm in Abb. 4.3.41 dargestellt. Wie erkennbar ist konnten durchwegs gute Lötresultate erzielt werden. Lediglich bei der Variante 3 war ohne Vorheizung eine Lötbadtemperatur von 300 °C nicht ausreichend. Bei diesen Bedingungen konnten die Anschlüsse 1, 4 und 5 nicht zufrieden stellend verlötet werden. Dabei handelt es sich um die Anschlüsse, die auch bereits bei den Versuchen mit der Versaflo Probleme bereiteten. Allerdings konnte hier beim Einsatz einer Vorwärmung auch bei diesen Anschlüssen ein Durchstieg von 100 % erreicht werden.

Wie schon vermutet bestätigt sich auch bei diesen Versuchen, dass die Leiterplatten der Variante 3 mit den 400 µm dicken Kupferlagen und Pins mit vollflächiger Anbindung oder mit Wärmefalle 1 am problematischsten zu löten sind. Bei der hier verwendeten Konfiguration der Miniwelle konnten auch bei diesen schwierigen Pins durch das Zuschalten einer Vorheizung bereits bei 300 °C gute Lötresultate erzielt werden.

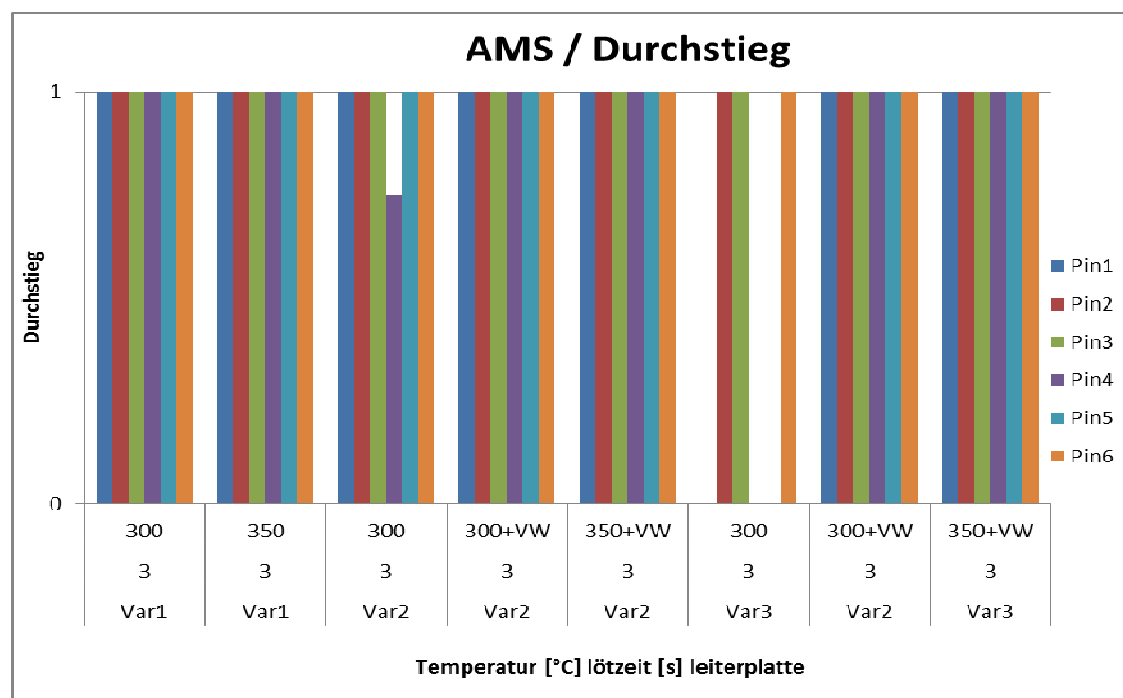


Abb.4.3.41: Bauteil AmS - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Pin, Leiterplattenvariante und Löttemperatur

Bauteil SvB

Auch bei diesem Bauteil zeigten sich durchgehend gute Ergebnisse (Abb. 4.3.42). Auffallend ist nur, dass es gerade bei der Variante 2 und 3 bei der hohen Löttemperatur von 350 ° in Verbindung mit langen Lötzeiten von 10 Sekunden bei einigen Pins zu keiner Lötung kommt. Betroffen sind hier vor allem die vollflächig angebrachten Pins 9 – 12.

Bauteil Elko

Bei den Elkos wurden nur die Variante 2 und 3 für die Versuche herangezogen. Wie erwartet zeigte vor allem Pin 4, der vollflächig angebrachten ist, Probleme. Während es bei der Leiterplatte mit der Variante 2 bei allen Pins zu dem erforderlichen Durchstieg von 75 % kam, konnte bei den Boards mit der Variante 3 der Anschluss 4, selbst bei 350 ° C Löttemperatur mit zusätzlicher Vorheizung, nicht gelötet werden (Abb. 4.3.43).

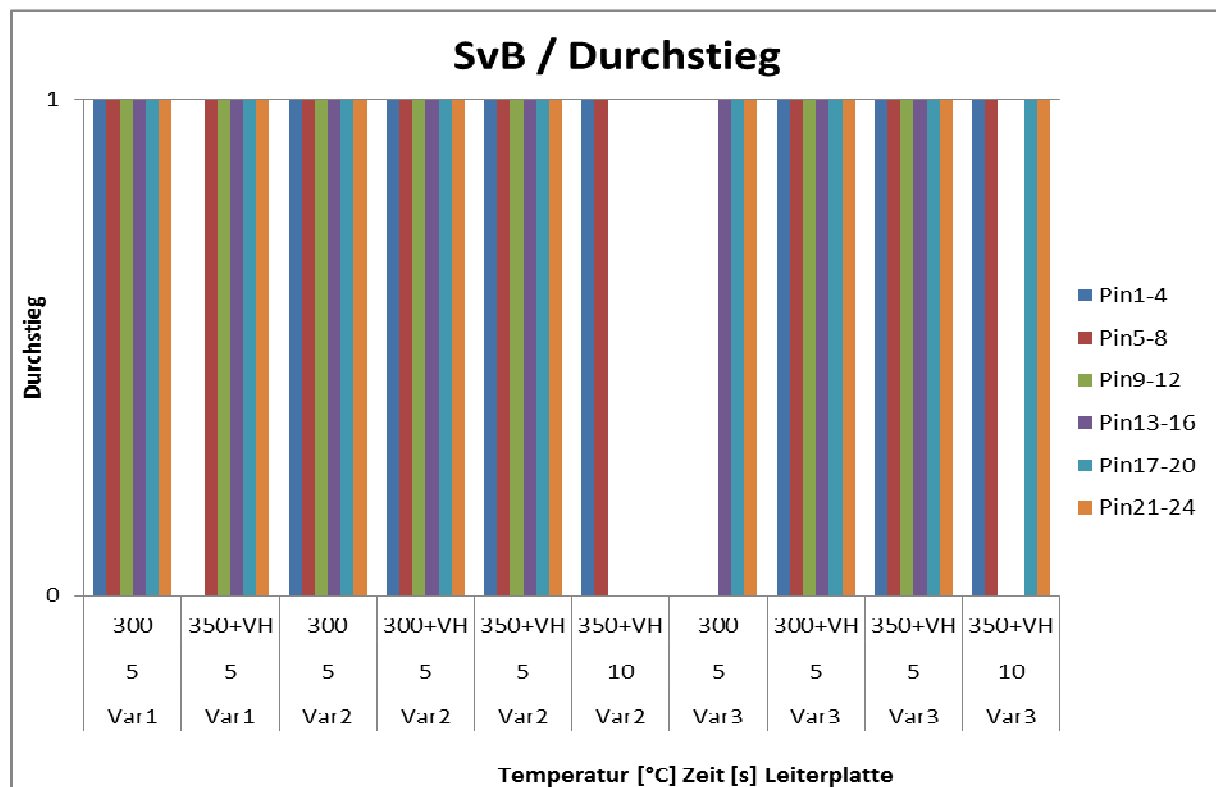


Abb.4.3.42: Bauteil SvB - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Pin, Leiterplattenvariante und Löttemperatur

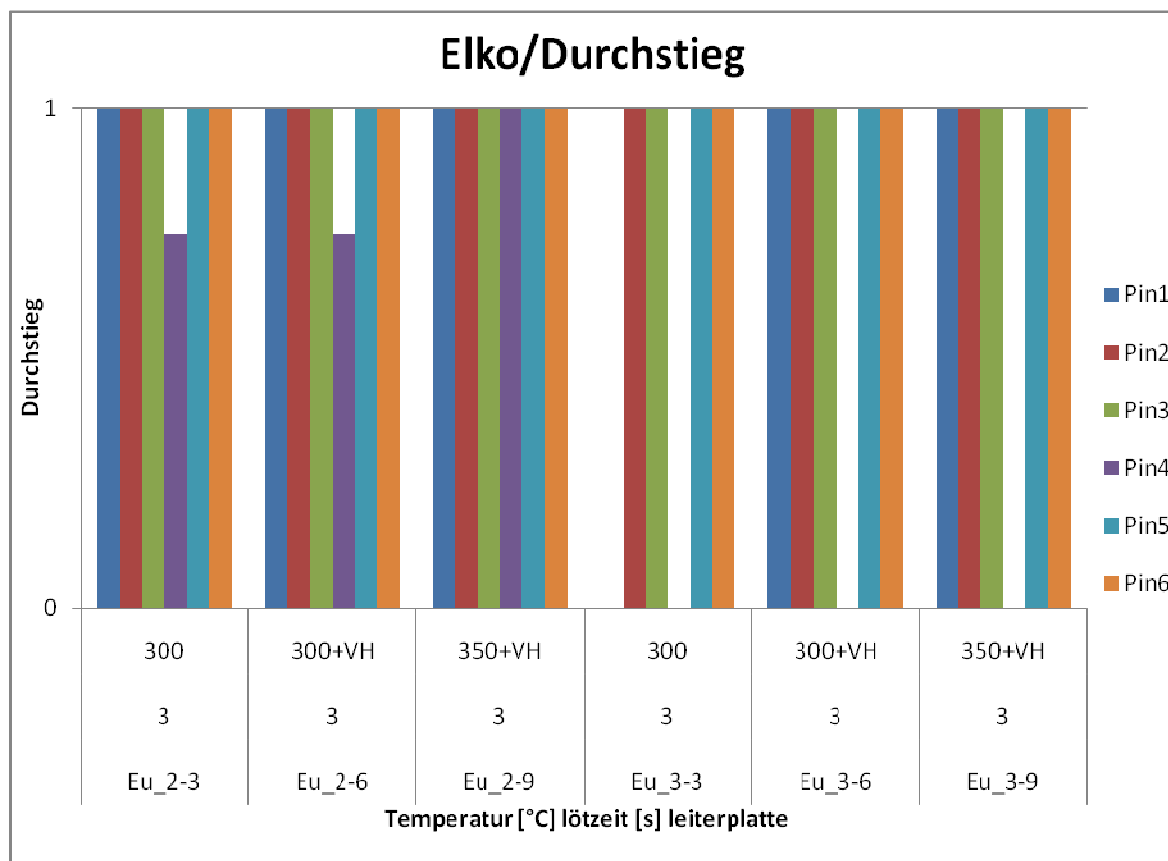


Abb.4.3.43: Bauteil Elko - Lotdurchstieg in Abhängigkeit von den Parametern Lötzeit, Pin, Leiterplattenvariante und Löttemperatur

5. Diskussion der Ergebnisse

5.1 Einflussparameter auf das Lötergebnis

Um einen Vergleich der Lötergebnisse und eine Bewertung der Einflussparameter zu ermöglichen sind in den nachfolgenden Tabellen 5.1.1 – 5.1.5 abhängig von der Leiterplattenvariante für jeden Pin die Temperatur und Zeit angegeben, die notwendig war um einen sicheren Lotdurchstieg von 100 % zu erreichen. Betrachtet wurden hier die Ergebnisse, die mit der Versaflow erzielt wurden.

	Pin 1 vollfl. , via	Pin 2 WF 2, via	Pin 3 WF 1, via	Pin 4 vollfl.	Pin 5 WF 1	Pin 6 WF 2
Variante 1	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s	300 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s
Variante 2	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s	300 °C 6,0 s	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s
Variante 3	285 °C 6,0 s	285 °C 0,5 s	285 °C 6,0 s	nicht lötbar	300 °C 0,5 s	285 °C 6,0 s

Tab. 5.1.1: Bauteil AmS – erforderliche Lötparameter für einen Lotdurchstieg von 100 %

	Pin 1 vollfl.	Pin 2 WF 1	Pin 3 WF 1	Pin 4 WF 2	Pin 5 ohne
Variante 1	320 °C 3,0 s	320 °C 0,5 s	nicht auswertbar	285 °C 4,0 s	320 °C 0,5 s
Variante 2	nicht lötbar	320 °C 0,5 s	nicht auswertbar	320 °C 1,0 s	320 °C 0,5 s
Variante 3	nicht lötbar	320 °C 2,0 s	nicht auswertbar	320 °C 2,0 s	320 °C 0,5 s

Tab. 5.1.2: Bauteil BNC – erforderliche Lötparameter für einen Lotdurchstieg von 100 %

	Pin 1 - 4 WF 3	Pin 5 - 8 WF 1	Pin 9 - 12 vollfl.	Pin 13 –16 ohne
Variante 1	-----	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s	-----
Variante 2	-----	285 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s	-----
Variante 3	285 °C 1,0 s	300 °C 6,0 s	320 °C 0,5 s	285 °C 0,5 s

Tab. 5.1.3: Bauteil SvB – erforderliche Lötparameter für einen Lotdurchstieg von 100 %
(-----: nicht untersucht)

	Pin 1 vollfl.	Pin 2 WF 1	Pin 3 ohne	Pin 4 WF 1	Pin 5 vollfl.
Variante 1	-----	-----	-----	-----	-----
Variante 2	-----	-----	-----	-----	-----
Variante 3	nicht lötfar bei 285 °C	285 °C 1,0 s	285 °C 0,5 s	285 °C 3,0 s	nicht lötfar bei 285 °C

Tab. 5.1.4: Bauteil F-Dose – erforderliche Lötparameter für einen Lotdurchstieg von 100 %
(-----: nicht untersucht)

	Pin 1 vollfl., via	Pin 2 WF 2, via	Pin 3 WF 1, via	Pin 4 vollfl.	Pin 5 WF 2	Pin 6 WF 1
Variante 1	285 °C 3,0 s	285 °C 3,0 s	285 °C 3,0 s	nicht lötfar	285 °C 3,0 s	285 °C 3,0 s
Variante 2	285 °C 3,0 s	285 °C 3,0 s	285 °C 3,0 s	nicht lötfar	285 °C 3,0 s	nicht lötfar
Variante 3	285 °C 6,0 s	285 °C 3,0 s	285 °C 3,0 s	nicht lötfar	300 °C 6,0 s	nicht lötfar

Tab. 5.1.5: Bauteil Elko – erforderliche Lötparameter für einen Lotdurchstieg von 100 %

Um einen Vergleich der Einflussparameter zu ermöglichen wurde als Kriterium ein Lotdurchstieg von 100 % herangezogen. Hierfür gab es zwei Gründe. Der tatsächlich erreichte Füllgrad kann nur über metallographische Untersuchungen bestimmt werden. Bedingt durch die große Anzahl der Lötversuche konnten metallographische Schliffe deshalb nur an einigen ausgewählten Bauteilen vorgenommen werden. Bei der Röntgenanalytik ist nur eine grobe Abschätzung des Füllgrades möglich, häufig auch deshalb weil es durch die notwendige Schrägdurchstrahlung zu einer Überdeckung der Anschlüsse im Röntgenbild kommt und so die einzelnen Lötstellen nicht aufgelöst werden können. Weiterhin wird, trotz der Vorgaben der IPC-A-610 mit einem zulässigen Füllgrad von 75 % für die höchste Klasse, von vielen Anwendern die ideale Lötstelle, d.h. ein 100 % - Durchstieg angestrebt bzw. sogar gefordert, um eine sichere und zuverlässige Lötverbindung zu garantieren.

Unabhängig von der Art des Bauteils, der Kupferschichtdicke und dem Leiterplattenlayout ist festzustellen, dass bei diesen Konfigurationen ein Selektivlötprozess ohne Vorheizung nicht anwendbar ist. Eine Vorwärmtemperatur von 125 °C mit einer Vorwärmzeit von 100 Sekunden hat sich bei den Versuchen als praktikabel erwiesen. Die Wichtigkeit der Vorheizung wird auch durch die Temperaturmessungen während der Lötversuche bestätigt. Hier zeigte sich eindeutig, dass die Vorheiztemperatur einen erheblichen Einfluss auf die Endtemperatur hat und die Auswirkung einer Vorheizung erheblich stärker ist als eine Verlängerung der Lötzeit.

Bei Betrachtung der Löttemperaturen und Lötzeiten, die bei der selektiven Welle mindestens erforderlich waren, um einen vollständigen Lotdurchstieg zu erreichen, können eindeutige Zusammenhänge gefunden werden. Erwartungsgemäß gilt für alle Bauteile, dass die Leiterplattenvariante 3 mit Kupferschichtdicken von 400 µm am schwierigsten zu löten ist und in Kombination mit vollflächig angebondenen Anschlüssen kein zufrieden stellendes Lötresultat erzielt werden kann. Ein deutlicher Einfluss ergibt sich auch durch die Auswahl der Wärmefallen. Unabhängig von der Bauteilform kann durch die Wärmefalle 2 (doppelt, Freistellung und Leiterbahn je 800 µm) ein besseres Lötresultat als mit der Wärmefalle 1 (einfach, Freistellung und Leiterbahn je 800 µm) erzielt werden. Durch das Anbringen von thermal vias im Pad der Durchkontaktierung kann dieser Effekt noch verstärkt werden. So kann zum Beispiel bei dem Bauteil AmS (s. Tab. 5.1.1) für die Leiterplattenvariante 3 in Verbindung mit der Wärmefalle 1 die notwendige Löttemperatur und Lötzeit von 300 °C, 6 Sekunden auf 285 °C, 0,5 Sekunden reduziert werden. In Kombination mit der Wärmefalle 2, bei der auch ohne thermal vias bereits eine Löttemperatur von 285 °C ausreichend ist, kann die Lötzeit von 6 Sekunden auf 0,5 Sekunden erniedrigt werden. Die Auswirkung von Wärmefallen auf die Lötstellentemperatur an den Anschlüssen und damit auf das Lötresultat wird auch durch die Temperaturmessungen, die an dem Elko-Bauteil vorgenommen wurden, bestätigt (vgl. Abb. 3.4.1). Nur die Anbindungsvarianten über Wärmefallen zeigen eine Lötstellenerwärmung, die signifikant über der Schmelztemperatur des SnAgCu-Lotes liegt. Weiterhin ist ein deutlicher Unterschied erkennbar, wenn zusätzlich thermal vias für den Wärmetransport in das Layout integriert sind. Allerdings wird, wie bereits oben erwähnt wiederum deutlich, dass die zusätzlichen thermal vias nicht ausreichend sind, um bei einer vollflächigen Anbindung an eine 400 µm starke Masselage einen Lotdurchstieg zu erreichen und deshalb eine solche Kombination unbedingt zu vermeiden ist.

Ein weiterer erheblicher Einfluss ist erwartungsgemäß auch durch die Form des Bauteils bedingt. Während bei den kleineren Bauteilen (AmS und SvB), selbst in Verbindung mit der Leiterplattenvariante 3, Lötparameter gefunden werden können, um zufriedenstellende Lötresultate zu erhalten, traten bei dem BNC-Bauteil mit einem relativ großen metallischen Gehäuse erhebliche Probleme auf (s. Tab. 5.1.2). Anschlüsse mit vollflächiger Anbindung konnten, sogar in Verbindung mit Variante 2 bei einer Löttemperatur von 320 °C nicht erfolgreich verlötet werden. Der positive Einfluss von Wärmefallen auf das Lötverhalten wird auch bei diesem Bauteil deutlich. Bei den Anschlüssen mit Wärmefallen kann zumindest bei einer Löttemperatur von 320 °C in Kombination mit den Leiterplattenvarianten 2 und 3 ein Lotdurchstieg erreicht werden. Abweichend kam es bei diesem Bauteil zu größeren Schwankungen beim Lötresultat (vgl. Bild 4.3.13), so dass die Ergebnisse zunächst nicht ganz eindeutig zuzuordnen waren und deshalb ergänzende Versuchsreihen durchgeführt wurden. Bei diesem Bauteil konnte auch der bei den anderen Bauteilen ermittelte Vorteil der Wärmefalle 2 gegenüber der Wärmefalle 1 nicht so klar herausgefiltert werden.

Auffallend war noch, dass ein Großteil der Lötverbindungen innerhalb der Durchkontaktierungen eine erhebliche Anzahl von Poren aufweist. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die im Vergleich zu Standardbaugruppen verringerte Durchwärmung der Boards und der Bauteilanschlüsse einerseits zu einer verzögerten Benetzung führt und andererseits die während des Lötprozesses entstehenden Gase vor der Erstarrung des Lotes nicht mehr vollständig entweichen können.

Bei Betrachtung der Leiterplatten konnten keine gravierenden Schädigungen gefunden werden. Vor allem zu beobachten war ein Harzrückzug, der auch teilweise bereits bei Löttemperaturen von 285 °C vorhanden war. Laminatrisse traten nur vereinzelt auf. Schädigungen der Kupferhülse oder Anrisse in den Innenlagenanbindungen waren nicht zu beobachten. Bei Löttemperaturen von 320 °C ist eine starke Ablegierung des Kupfers festzustellen. Hier ist vor allem im Bereich des Knies die Kupfermetallisierung so reduziert, dass die in der IPC-6012 /19/ vorgegebenen Mindestschichtdicken unterschritten werden (vgl. Bild 4.3.35).

Bei den Laserlötversuchen hat sich herausgestellt, dass dieses Verfahren nicht geeignet ist, um Bauteile der Leistungselektronik in Verbindung mit Dickkupferleiterplatten zu verarbeiten. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Leiterplattenvariante 1 ist mit dem Laserlötprozess eingeschränkt lötbar.
- Bei größer werdender thermischer Masse der Komponenten oder der Leiterplatte beginnen Prozessprobleme (mangelnder Durchstieg, Benetzungsschwierigkeiten, Baugruppenschädigung).
- Die Leiterplattenvarianten 2 und 3 sind für den Laserlötprozess ungeeignet.
- Der Unterschied im Lötresultat gut / schlecht schwankt bei nahezu identischen Lötparametern auf Grund von Baugruppentoleranzen stark.
- Das Lötprozessfenster ist eng und nur schwer einzuhalten.

Bei den Kolbenlötversuchen, die schwerpunktmäßig an den Stiften durchgeführt wurden, konnten nur in Verbindung mit der Leiterplattenvariante 1 zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden. Allerdings ist auch hier eine vollflächige Anbindung nur mit dem Einsatz einer Unterheizung verarbeitbar. Bei den Leiterplattenvarianten 2

und 3 konnten ziemlich schnell die Prozessgrenzen des Kolbenlötens erkannt werden. Selbst bei den Stiften waren Vorheiztemperaturen bis zu 180 °C und LötKolbentemperaturen bis 400 °C notwendig. Parallel dazu traten jedoch unzulässige Laminatschädigungen auf. Bei Stichversuchen mit den Bauteilen AmS und SvB konnten keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden. Somit lässt sich als Ergebnis für das Kolbenlöten formulieren, dass das automatische Kolbenlöten für thermisch massive Aufbauten nicht geeignet ist. Lediglich bei Leiterplatten mit maximal 4 x 70 µm Kupferlagen kann das Kolbenlöten eingeschränkt empfohlen werden. Hier ist bei ungünstigen Anbindungen der Lötanschlüsse eine zusätzliche Erwärmung durch eine Unterheizung unumgänglich.

5.2 Vergleich der Lötergebnisse mit den Ergebnissen aus der thermischen Simulation

In den Temperaturmessungen hat sich gezeigt, dass bei der LP-Variante 3 (400 µm Cu) die vollflächige Anbindung der Lage 3 den Löterfolg (meist) verhindert. Die thermal vias wirken in jedem Fall günstig. Allerdings spiegeln die unterschiedlichen Wärmefallen nur teilweise den beabsichtigten Temperaturverlauf wieder. Dies kann mit der Freistellung der Lage 2 erklärt werden. Bei den thermal vias hat Lage 2 eine größere Freistellung, ohne thermal vias hat Lage 2 sogar eine geringere Freistellung, als dem Restring der Lage 3 entspricht. Folglich überlappen hier Cu-Lage 2 und 3, was insbesondere bei der Variante 3 (400 µm Cu) mit nur mehr 100 µm Isolation zwischen den Lagen zu einem thermischen Übersprechen führen muss. Dadurch wird der geplante größere thermische Widerstand der doppelten Wärmefalle WF2 nahezu gleich der einfachen Wärmefalle WF1.

Als Empfehlung folgt hieraus, dass sich bei Dickkupfer die Freistellung von vollflächigen Innenlagen an den Außendurchmessern der mit Wärmefallen angebondenen Lagen orientieren muss. Die Messungen zeigen ferner, dass insbesondere bei Dickkupfer einander benachbarte Lötstellen nicht unabhängig voneinander erwärmt werden. Damit kann die Reihenfolge der Lötvorgänge das Lötergebnis beeinflussen.

Hinsichtlich der Abschätzung der Stromtragfähigkeit kann der hier erarbeitete Lösungsansatz (umgesetzt in MS-Excel) als einfaches Werkzeug verstanden und genutzt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die experimentelle Absicherung berechneter Ergebnisse in diesem Projekt nur in Teilbereichen erfolgen konnte. Generelle Tendenzen und die wichtigen Einflussparameter lassen sich in jedem Fall darstellen. Eine Simulation des thermischen Widerstands der Lötstelle ist aufwendig. Die hier in MS-Excel umgesetzte idealisierte Modellrechnung kann jedoch schon die jeweiligen Abhängigkeiten aufzeigen, und erlaubt somit eine Abschätzung der Verhältnisse.

6. Zusammenfassung

Die zunehmende Bedeutung der Elektronik in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen führt zu einer Erhöhung der Komplexität der Baugruppen und daraus resultierend zu erhöhten Anforderungen an die Verbindungstechnik. Verbunden mit dem Trend zur Elektromobilität sind hohe Ströme und Frequenzen, die erhebliche Auswirkungen auf die Bauteilauswahl und den Aufbau der Leiterplatten mit sich bringen. Die Verarbeitung von Baugruppen der Hochleistungselektronik mit Wärmesenken, großen Kupferflächen, dicken Kupferlagen in den Leiterplatten und Bauteilen mit hoher Wärmekapazität bieten eine besondere Herausforderung für den bleifreien, selektiven Lötprozess. Entscheidend ist hier die Auswahl eines geeigneten Verfahrens. Für jeden spezifischen Anwendungsfall gilt es die Prozessparameter so zu optimieren, dass gute Lötergebnisse zu erreichen sind, ohne eine thermische Schädigung der Bauteile bzw. Leiterplatten zu verursachen.

Im Rahmen des Projektes wurden die Einflussparameter beim Selektivlöten auf die Qualität der Lötverbindungen in Abhängigkeit von der Kupferschichtdicke, dem Leiterplatten-Layout und der Bauteilkonfiguration systematisch untersucht.

Für die Lötversuche wurde ein repräsentativer Querschnitt von Bauteilen, die in Baugruppen der Leistungselektronik Anwendung finden, ausgewählt. Dazu gehören u.a. eine Stromversorgungsbuchse, eine Flanschdose und ein BNC-Bauteil. Für das Board wurde als Basismaterial FR 4 mit einer Glasübergangstemperatur von 150°C und als Lötfläche HAL-bleifrei gewählt. Unterschiede in der thermischen Masse der Leiterplatte und somit Unterschiede im Lötwärmebedarf wurden durch drei Leiterplattenvarianten mit jeweils 4 Kupferlagen und einer Gesamtdicke von 1,5 mm realisiert. Die Kupferschichtdicken betragen 70 µm, 200 µm und 400 µm. Weiterhin wurden unterschiedliche Anbindungen von Wärmefallen realisiert. Die Laserlötversuche wurden direkt bei der Fa. Wolf Produktionssysteme durchgeführt. Für die Versuche zum automatischen Kolbenlöten wurde ein Kolbenlötautomat der Fa. ATN verwendet. Für die Hauptversuche zum selektiven Wellenlöten wurde eine Selektivlötanlage der Fa. Ersa eingesetzt. Die Löttemperaturen betragen 285 °C, 300 °C und 320 °C und die Lötzeiten 0,5 bis 6 Sekunden. Während der Lötversuche wurden Temperaturmessungen in den Durchkontaktierungen, auf den Bauteiloberseiten und auf der Leiterplattenober- und unterseite durchgeführt. Die Lötverbindungen wurden optisch inspiziert. Für die Beurteilung wurden die Abnahmekriterien der IPC-A-610, Revision E für Klasse 3 herangezogen. Bewertet wurde die Benetzung des Löttauges auf der Löt- und auf der Bauteilseite und der Lotdurchstieg. Hier wurde unterschieden zwischen 100 % Durchstieg und unvollständigem Lotdurchstieg.

Insbesondere beim Laserlöten zeigt sich, dass geringe Änderungen im Padlayout, in den Anbindungsvarianten oder Materialschwankungen zu deutlich schwankenden Lötresultaten führen. Dies bedeutet, dass nur ein geringes Prozessfenster zur Verfügung steht, in dem ausreichend Wärme in die Lötstelle eingebracht werden kann, ohne die Leiterplatte zu schädigen. Bei den Laserlötversuchen hat sich deshalb herausgestellt, dass dieses Verfahren nicht geeignet ist, um Bauteile der Leistungselektronik in Verbindung mit Dickkupferleiterplatten zu verarbeiten.

Bei den Kolbenlötversuchen, die schwerpunktmäßig an den Stiften durchgeführt wurden konnten nur in Verbindung mit der Leiterplattenvariante 1 zufriedenstellende

Ergebnisse erreicht werden. Bei den Leiterplattenvarianten 2 und 3 waren Vorheiztemperaturen bis zu 180 °C und LötKolbentemperaturen bis 400 °C notwendig. Parallel dazu traten unzulässige Laminatschädigungen auf. Bei Stichversuchen mit den Bauteilen AmS und SvB konnten keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden. Somit ist das automatische Kolbenlöten für thermisch massive Aufbauten nicht geeignet. Lediglich bei Leiterplatten mit maximal 4 x 70 µm Kupferlagen kann dieses Verfahren mit Einschränkung empfohlen werden.

Das selektive Wellenlöten hat sich unter bestimmten Voraussetzungen als geeignet für die im Projekt gestellten Anforderungen durch den Aufbau des Testboards herausgestellt. Unabhängig von der Art des Bauteils, der Kupferschichtdicke und dem Leiterplattenlayout ist festzustellen, dass bei diesen Konfigurationen ein Selektivlötprozess ohne Vorheizung nicht anwendbar ist. Eine Vorwärmtemperatur von 125 °C mit einer Vorwärmzeit von 100 Sekunden hat sich bei den Versuchen als praktikabel erwiesen. Erwartungsgemäß gilt für alle Bauteile, dass die Leiterplattenvariante 3 mit Kupferschichtdicken von 400 µm am schwierigsten zu löten ist und in Kombination mit vollflächig angebondenen Anschlüssen kein zufriedenstellendes Lötergebnis erzielt werden kann. Ein deutlicher Einfluss ergibt sich auch durch die Auswahl der Wärmefallen. Unabhängig von der Bauteilform kann durch die Wärmefalle 2 (doppelt, Freistellung und Leiterbahn je 800 µm) ein besseres Lötergebnis als mit der Wärmefalle 1 (einfach, Freistellung und Leiterbahn je 800 µm) erzielt werden. Durch das Anbringen von thermal vias im Pad der Durchkontaktierung wird dieser Effekt noch verstärkt. Thermal vias sind allerdings nicht ausreichend, um bei einer vollflächigen Anbindung an eine 400 µm starke Masselage einen Lotdurchstieg zu erreichen. Eine solche Kombination ist deshalb unbedingt zu vermeiden. Ein weiterer Einfluss ist erwartungsgemäß auch durch die Form des Bauteils bedingt. Während bei den kleineren Bauteilen (AmS und SvB), selbst in Verbindung mit der Leiterplattenvariante 3, Lötparameter gefunden werden konnten, um zufriedenstellende Lötergebnisse zu erhalten, traten bei dem BNC-Bauteil mit einem relativ großen metallischen Gehäuse erhebliche Probleme auf. Gravierende Schädigungen innerhalb der Leiterplatten konnten nicht gefunden werden. Zu beobachten war vor allem ein Harzrückzug, der auch teilweise bereits bei Löttemperaturen von 285 °C vorhanden war. Laminatrisse traten nur vereinzelt auf. Schädigungen der Kupferhülse oder Anrisse in den Innenlagenanbindungen waren nicht zu beobachten. Bei Löttemperaturen von 320 °C ist zum Teil eine starke Ablegierung des Kupfers vorhanden.

Aus den erzielten Ergebnissen kann geschlossen werden, dass unter Verwendung des selektiven Wellenlötens anspruchsvolle Baugruppen aus dem Bereich der Leistungselektronik so verarbeitet werden können, dass gute Lötergebnisse ohne eine erhebliche Schädigung der Leiterplatten zu erreichen sind. Besonderes Augenmerk ist hier auf das Leiterplatten-Layout zu richten. Über die Anbindung der Anschlüsse an Wärmefallen und das zusätzliche Anbringen von thermal vias können erhebliche Verbesserungen bei den Lötergebnissen erreicht werden.

7. Ergebnistransfer

7.1 Spezifische Transfermaßnahmen

Folgende Transfermaßnahmen haben bereits während der Laufzeit des Vorhabens stattgefunden (Tabelle 7.1.1).

Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
PBA	fortlaufende Diskussion der Ergebnisse und Aktualisierung des Arbeitsplanes	Projektvorstellung, Diskussion der geplanten Arbeiten, Diskussion Testboardlayout, Ergebnisdiskussion, Absprache über Ergänzungen	28.10.2009 über Rundmail und in bilateralen Telefonaten 07.06.2011
Veröffentlichungen	rasche und zeitnahe Verbreitung der Ergebnisse	FED-Tagung und Workshop ECPE-Workshop SMT-Tutorial	Sept. 2010, April 2011, Sept. 2011, Nov. 2011 März 2011 Mai 2011
Weiterbildung / Transfer in die Industrie	rasche Verbreitung der Ergebnisse in kleine und mittlere Unternehmen – Weiterbildung der Mitarbeiter, Unterstützung in der Serienfertigung	Schulung von Mitarbeitern von Firmen im Rahmen von Lehrgängen zu den Themen Selektivlöten, Lötfehler, IPC-Abnahmekriterien Austausch und Diskussion der Ergebnisse mit Maschinenherstellern und Anwendern von Selektivlötverfahren	Okt. / Nov. 2010 Februar – April 2011 Okt. / Nov. 2011 sporadisch

Tabelle 7.1.1: Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Die geplanten Transfermaßnahmen nach Ablauf des Projektes sind in Tabelle 7.1.2 enthalten.

Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Internetseite des IZM und ISIT Zeitschrift „PLUS“ Vorstellung der Ergebnisse bei versch. Veranstaltungen (GMM, SMT, FED, etc.)	I. Quartal 2012 I. Quartal 2012 ab IV. Quartal 2011
Weiterbildung / Transfer in die Industrie	Ergebnistransfer in kleine und mittlere Unternehmen – Weiterbildung der Mitarbeiter, Unterstützung in der Serienfertigung	Schulung von Mitarbeitern von Firmen im Rahmen von Lehrgängen zu den Themen Selektivlöten, Lötfehler, IPC-Abnahmekriterien Austausch und Diskussion der Ergebnisse mit Maschinenherstellern und Anwendern von Selektivlötverfahren Erarbeitung konkreter Layoutvorgaben für Anwender in Zusammenarbeit mit der Fa. Schweizer Elektronik	Okt. / Nov. 2011 Februar – April 2012 Okt. / Nov. 2012 ab IV. Quartal 2011 I. Quartal 2012

Tabelle 7.1.2: Geplante Transfermaßnahmen

7.2 Einschätzung der Realisierbarkeit des Transfers

Da sowohl das Fraunhofer IZM als auch das Fraunhofer ISIT bereits seit vielen Jahren als Beratungs- und Technologietransferstellen, vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen, tätig sind ist auch garantiert, dass die im Projekt erzielten Ergebnisse und gesammelten Erfahrungen direkt an diese Firmen weitergegeben werden. Weiterhin werden laufend Schulungen und Lehrgänge zur Herstellung und Beurteilung elektronischer Baugruppen durchgeführt. An diesen Kursen nehmen u. a. auch Fachleute teil, die direkt in der Fertigung beschäftigt sind. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse wurden bereits in die Inhalte der Lehrgänge integriert und werden deshalb auch nach Abschluss des Projektes an die Teilnehmer direkt und kontinuierlich weitergegeben. Die Bereitschaft der Fa. Schweizer Electronic an einer Layoutvorgabe für Dickkupferleiterplatten mitzuwirken, in der die im Projekt erzielten Ergebnisse verarbeitet werden führt dazu, dass auch über den Leiterplattenhersteller die wesentlichen Punkte, die beim Aufbau von Baugruppen für die Leistungselektronik zu beachten sind an Entwickler, Fertiger und Anwender direkt weitergegeben

werden können. Dadurch können Baugruppen so gestaltet werden, dass Probleme im Lötprozess bereits im Fertigungsvorfeld erkannt und vermieden werden können.

Viele Anwender haben bisher noch keine größeren Erfahrungen mit Dickkupferleiterplatten gesammelt. Durch den zunehmenden Bedarf, u.a. bedingt durch die Elektromobilität, werden viele Firmen in Zukunft mit dieser Problematik konfrontiert. Es ist deshalb davon auszugehen, dass viele dieser Firmen die im Projekt erzielten Ergebnisse als Basis zur Prozessoptimierung für spezifische Anwendungen heranziehen werden.

8. Literatur:

- /1/ DIN EN 61760:
Oberflächenmontagetechnik - Teil 1: Genormtes Verfahren zur Spezifizierung
oberflächenmontierbarer Bauelemente (SMDs)
- /2/ IPC / JEDEC J-STD-020D
Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface
Mount Devices
- /3/ Andus Electronic GmbH Leiterplattentechnik
Die Hochstromleiterplatte – Systemintegration von Stromschienen und Elek-
tronik
PLUS, Heft 9, 2011
- /4/ M.H. Poech
Hochstrom-Leiterplatten und geeignete Verbindungstechnologien
SMT / Hybrid / Packaging, April 2007, Nürnberg
- /5/ IPC-A-610, Revision E
Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen
- /6/ J-STD-001D
Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen
- /7/ DIN EN 61192
Anforderungen an die Ausführungsqualität von Lötverbindungen
- /8/ R. Diehm
Selektives Löten für temperatursensitive Baugruppen
ZVE-Technologieforum, Juli 2008,
- /9/ J. Friedrich
Selektivlöten –der letzte Schritt zur Vollautomation
ZVE-Technologieforum, März 2006
- /10/ E. Wolf
Verfahrensbetrachtung Einzelpunktlöten: neue Entwicklungen beim Kolben-
und Laserlöten
- /11/ www.wolf-produktionssysteme.de
- /12/ M. Grimmeisen
Schweizer Electronic AG
- /13/ Productronic, Heft 3, 2008
- /14/ www.atn-berlin.de
- /15/ www.ersa.de
- /16/ www.eutect.de
- /17/ IPC-A-600G
Abnahmekriterien für Leiterplatten
- /18/ AIF-Projekt Nr. 15.535 N
Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen im manuel-
len Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen
- /19/ IPC-6012
Qualification and Performance Specification for rigid printed boards