

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Einfluss des Lotpastendrucks auf die Zuverlässigkeit der Lötstellen kritischer keramischer SMD-Komponenten auf FR4-Leiterplatten

der Forschungsstelle(n)

Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie

Das IGF-Vorhaben 17.405 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Itzehoe, 25.03.2015

Ort, Datum

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Schimanski'.

Helge Schimanski

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

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde in enger Abstimmung mit den Firmen des beteiligten PA der Einfluss des Lotpastendruckes auf die Zuverlässigkeit der Lötstellen kritischer keramischer SMD-Komponenten auf FR4-Leiterplatten untersucht.

Es wurde nachgewiesen, dass die Zuverlässigkeit von keramischen Komponenten stark von ihrer Größe beeinflusst wird. Durch die Unterschiede der Ausdehnungskoeffizienten von Keramik und FR4-Leiterplattenmaterial führt eine Temperaturwechselbeanspruchung bei großen keramischen Komponenten zum frühzeitigen Ermüdungsausfall der Lötstelle. Die Lötstellenzuverlässigkeit kann durch größere Pads und dementsprechend größere Lötstellen erhöht werden.

Eine Lotspalterhöhung und somit eine Erhöhung der Zuverlässigkeit ist realisierbar, wenn die Komponenten nur unten liegende Anschlussflächen aufweisen, die Leiterplattenpadgeometrien entsprechend angepasst dimensioniert sind und das angebotene Lotvolumen erhöht ist.

Kleine keramische Komponenten (Baugröße 0201, 01005) sind bei gleichem Padlayout deutlich weniger stark vom Lotvolumen abhängig als größere keramische Komponenten.

Durchgeführte Modellrechnungen sind im Einklang mit den gemessenen Ergebnissen.

Die Zuverlässigkeit von gezielt durch Variation von Layout und Lotpastenmenge geänderten Lötstellengeometrien kleiner und großer keramischer Komponenten wurde unter Einsatz von mikrolegierten und niedrig-schmelzenden Loten systematisch betrachtet.

Dadurch wurden Prozessempfehlungen für das Leiterplatten- und Schablonendesign sowie für den Lotpastendruck herausgearbeitet. Insbesondere für kleine Komponenten wurden Prozessgrenzen hinsichtlich des Lotpastendruckes definiert. Zudem wurde eine Bewertung der eingesetzten Lotpasten durchgeführt.

Auf Basis dieser Ergebnisse können insbesondere KMU in ihrer Fertigung einen sicheren Lotpastendruckprozess etablieren. Damit verbunden sind eine Erhöhung der Wertschöpfung und ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung im Reparatursektor, indem durch die Sicherstellung einer gleichmäßigen Qualität die Fehlerrate reduziert wird.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Das IGF-Vorhaben Nr.: 17.405 N / DVS-Nr.: 07.065 der Forschungsvereinigung, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 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.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
1.1	Ausgangssituation	7
1.2	Anlass für den Forschungsantrag.....	9
1.3	Stand der Forschung	10
1.4	Aufgabenstellung.....	12
2	Forschungsziel und Lösungsweg	12
2.1	Angestrebte wissenschaftlich-technische Ergebnisse	12
2.2	Angestrebte wirtschaftliche Ergebnisse.....	13
2.3	Innovativer Beitrag.....	13
2.4	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels.....	14
2.4.1	Methodischer Ansatz	14
2.4.2	Arbeitsschritte	14
3	Durchführung und Ergebnisse	15
3.1	Verwendete Anlagen und Geräte	15
3.1.1	Trockenschrank	15
3.1.2	Temperaturmessgerät.....	15
3.1.3	Mikroskop.....	15
3.1.4	Lotpastendrucker	16
3.1.5	Lotpasteninspektionssystem	18
3.1.6	Bestücker.....	21
3.1.7	Reflowofen	21
3.1.8	Röntgenanlage.....	22
3.1.9	Schertester.....	22
3.1.10	Klimaschrank	22
3.2	Material.....	23
3.2.1	Leiterplatten	23
3.2.2	Bauteile	26
3.2.3	Schablonen	30
3.2.4	Lot.....	37
3.3	Aufbau der Baugruppen	38
3.3.1	Lotpastendruck	38
3.3.2	Raum-Temperatur- und Feuchtemessung	39
3.3.3	Lötprofilerstellung.....	45
3.4	Qualitäts- und Zuverlässigkeitsbewertung.....	52

3.4.1	Manuelle optische Inspektion.....	52
3.4.2	Röntgenanalyse	53
3.5	Verifizierung für schnellere Temperatur-Wechsel.....	54
3.6	Belastung der Testbaugruppen durch schnelle Temperatur-Wechsel.....	55
3.7	Rissanalyse	57
3.8	Schertestanalyse	60
3.8.1	Lotspalterhöhung	76
3.8.2	Bruchflächenanalyse.....	79
4	Simulationen.....	81
4.1	Modell Scherfestigkeit	81
4.2	Quantifizierung der Ermüdungsschädigung - Abnahme der Scherfestigkeit	83
4.3	Modell für die Kriechermüdung von Lötverbindungen	85
4.4	Abschätzung der Lebensdauer.....	86
4.5	Theoretische Betrachtung einer Unsymmetrie	89
5	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	94
6	Verwendung der Zuwendung	96
6.1	Personaleinsatz	96
6.2	Gerätebeschaffung	96
6.3	Leistungen Dritter	96
6.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	96
7	Umsetzung der Ergebnisse in die Industrie, Ergebnistransfer.....	97
7.1	Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens	97
7.2	Spezifische Transfermaßnahmen nach Laufzeitende des Vorhabens.....	98
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	100
9	Literaturverzeichnis	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lötstelle eines Keramikwiderstands.....	7
Abbildung 2: Ausdehnungsfehlانpassung.....	8
Abbildung 3: Rissbildung an einem Keramikquarz	8
Abbildung 4: 2D-Darstellung Lotpastendepot	11
Abbildung 5: 3D-Analyse eines Lotpastendepots	11
Abbildung 6: PTP-Sender	15
Abbildung 7: Thermoelement.....	15
Abbildung 8: Leica-Mikroskop MZ 95	16
Abbildung 9: Lotpastendrucker von DEK.....	17
Abbildung 10: Vakuum Nest - Unterstützung.....	17
Abbildung 11: Magnetpin - Unterstützung.....	17
Abbildung 12: 3D-Inspektionsgerät HS70.....	18
Abbildung 13: 3D-Sensor-Kopf [7].....	18
Abbildung 14: Verwendung eines Fächerlasers [7]	19
Abbildung 15: Darstellung des Laserprofils [7]	19
Abbildung 16: Optische Triangulation [7].....	19
Abbildung 17: 3D-Bildkonstruktion [7].....	20
Abbildung 18: Erfassbare Parameter [7].....	20
Abbildung 19: Bestücker KE 2060RL	21
Abbildung 20: Reflowofen der Firma Rehm	21
Abbildung 21: Röntgenanlage nanome x.....	22
Abbildung 22: Schertester Condor Sigma [8].....	22
Abbildung 23: Layout der „großen“ Leiterplatte	23
Abbildung 24: Layout der „kleinen“ Leiterplatte	24
Abbildung 25: Leiterplatte „groß“	25
Abbildung 26: Leiterplatte „klein“	25
Abbildung 27: Padgeometrie der „kleinen“ Leiterplatte.....	28
Abbildung 28: Padgeometrie der „großen“ Leiterplatte.....	29
Abbildung 29: Bestückte „kleine“ Leiterplatte.....	29
Abbildung 30: Bestückte „große“ Leiterplatte.....	30
Abbildung 31: Schablonenlayout MIN.....	35
Abbildung 32: Schablonenlayout STD	35
Abbildung 33: Schablonenlayout MITTEL.....	36
Abbildung 34: Schablonenlayout MAX	36
Abbildung 35: Temperatur- und Feuchtemessung TC10, SAC305-Fertigung	39
Abbildung 36: Temperatur- und Feuchtemessung TC10, SCANGe-Fertigung.....	40
Abbildung 37: Temperatur- und Feuchtemessung TC10, BSA1-Fertigung	40
Abbildung 38: Temperatur- und Feuchtemessung TC20, SAC305-Fertigung	41
Abbildung 39: Temperatur- und Feuchtemessung TC20, SCANGe-Fertigung.....	41
Abbildung 40: Temperatur- und Feuchtemessung TC20, BSA1-Fertigung	42
Abbildung 41: Vergleichsmessung, Luftfeuchte während der SAC305-Fertigung	43
Abbildung 42: Vergleichsmessung, Temperatur während der SAC305-Fertigung....	43
Abbildung 43: Vergleichsmessung, Luftfeuchte während der SCANGe-Fertigung ...	44
Abbildung 44: Vergleichsmessung, Temperatur während der SCANGe-Fertigung ..	44
Abbildung 45: Vergleichsmessung, Luftfeuchte während der BSA1-Fertigung.....	44
Abbildung 46: Vergleichsmessung, Temperatur während der BSA1-Fertigung.....	45
Abbildung 47: Thermoelementverdrahtung auf der „kleinen“ Leiterplatte	46
Abbildung 48: Thermoelementverdrahtung auf der „großen“ Leiterplatte	47
Abbildung 49: LP „klein“, BSA1 Lötprofil.....	48

Abbildung 50: LP „klein“, BSA1 Profilparameter	48
Abbildung 51: LP „klein“, SAC305 und SCANGe Lötprofil	49
Abbildung 52: LP „klein“, SAC305 und SCANGe Profilparameter	49
Abbildung 53: LP „groß“, BSA1 Lötprofil.....	50
Abbildung 54: LP „groß“, BSA1 Profilparameter	50
Abbildung 55: LP „groß“, SAC305 und SCANGe Lötprofil	51
Abbildung 56: LP „groß“, SAC305 und SCANGe Profilparameter	51
Abbildung 57: Dokumentation der optischen Inspektion	52
Abbildung 58: Farblegende.....	53
Abbildung 59: Übersichts-Röntgenbild der „kleinen“ Leiterplatte	53
Abbildung 60: Temperaturverlauf der Testzyklen	54
Abbildung 61: Hysterese-Kurven im Vergleich	54
Abbildung 62: Temperaturwechsel	55
Abbildung 63: 1_2_1_1 SAC305 STD 0Z	57
Abbildung 64: 1_2_6_1 SAC305 STD 2000Z	57
Abbildung 65: 1_2_4_3 R1218 C1I 1000 Z.....	57
Abbildung 66: 2_2_1_1 BSA1 STD 0Z	58
Abbildung 67: 2_2_6_1 BSA1 STD 2000Z	58
Abbildung 68: 2_2_6_1 BSA1 STD C1 2000Z.....	58
Abbildung 69: Großer Meißel (200kg)	63
Abbildung 70: Großer Meißel, seitlich.....	63
Abbildung 71: Kleiner Meißel (10kg).....	63
Abbildung 72: Kleiner Meißel, seitlich.....	63
Abbildung 73: SI Nano2.....	64
Abbildung 74: SI Nano2 SAC305 STD	64
Abbildung 75: SI Nano2 BSA1 STD	65
Abbildung 76: QFN	65
Abbildung 77: QFN SAC305 STD.....	66
Abbildung 78: 3_4_2 QFN B.....	66
Abbildung 79: 3_4_2 QFN C.....	67
Abbildung 80: 3_4_2 QFN D.....	67
Abbildung 81: R2010	68
Abbildung 82: R2010 SAC305 STD.....	68
Abbildung 83: R(MA)2010	69
Abbildung 84: R(MA)2010 SAC305 STD	69
Abbildung 85: Schemabild vom R(MA)2010	70
Abbildung 86: Querschliff vom R(MA)2010 SAC305 STD	70
Abbildung 87: QCC7V	71
Abbildung 88: QCC7V BSA1 STD	72
Abbildung 89: C1812	72
Abbildung 90: C1812 SCANGe MITTEL/MAX	73
Abbildung 91: 2_2_6_2 C1812 A5 STD.....	76
Abbildung 92: 2_3_6_2 C1812 A5 MAX	76
Abbildung 93: 3_2_1_2 QCC7V A	77
Abbildung 94: 3_2_3_1 QCC7V A	77
Abbildung 95: 3_1_1_1 QCC7V A	77
Abbildung 96: 3_1_3_1 QCC7V A	77
Abbildung 97: 3_2_3_1 QCC7V A links	78
Abbildung 98: 3_2_3_1 QCC7V A rechts	78
Abbildung 99: 3_1_3_1 QCC7V A links.....	78

Abbildung 100: 3_1_3_1 QCC7V A rechts	78
Abbildung 101: Schertests am QCC7V.....	78
Abbildung 102: Bruch in der Metallisierung und im Lot.....	80
Abbildung 103: Bruch im Bauteil.....	80
Abbildung 104: Bruch im Lot und teilweise in der Metallisierung	80
Abbildung 105: Bruchfläche auf der Leiterplatte	80
Abbildung 106: Geometrie der Lötverbindung	81
Abbildung 107: Auszug aus Yageo Datenblatt	82
Abbildung 108: Berechnung der Scherfestigkeiten für SAC305-Lot	82
Abbildung 109: Abnahme der relativen Scherfestigkeit beim R0201	84
Abbildung 110: Abnahme der relativen Scherfestigkeit beim R2010	84
Abbildung 111: Lotkriechraten bei -40°C	85
Abbildung 112: Lotkriechraten bei 25°C	86
Abbildung 113: Lotkriechraten bei 125°C	86
Abbildung 114: Berechnete Zyklenzahl - Bauteilgröße („Nennwerte“)	87
Abbildung 115: Berechnete Zyklenzahl - Variation Lotmenge	88
Abbildung 116: Berechnete Zyklenzahl - Variation Lotspalt.....	89
Abbildung 117: Unsymmetrie linke/rechte Lötstelle	90
Abbildung 118: Betrachtung der Hysterese bei einer Unsymmetrie	91
Abbildung 119: Verhältnis der Verschiebungsgeschwindigkeiten	91
Abbildung 120: Berechnete Ausfall bei unsymmetrischen Querschnitten.....	92
Abbildung 121: Beispiele für eine Unsymmetrie	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauteile und Größen.....	26
Tabelle 2: Verwendete Padmaße der „kleinen“ Leiterplatte.....	27
Tabelle 3: Verwendete Padmaße der „großen“ Leiterplatte.....	28
Tabelle 4: Schablonenvorschlag laut Projektantrag.....	31
Tabelle 5: Schablonenauswahl „klein“	32
Tabelle 6: Schablonenauswahl „groß“	33
Tabelle 7: Theoretisches Lotpastenvolumen	34
Tabelle 8: Klassifizierung der Kugelgrößen [9]	37
Tabelle 9: Lotlegierungen	37
Tabelle 10: Ausschnitt aus einer Fehlertabelle	53
Tabelle 11: Berechnete Lebensdauer.....	55
Tabelle 12: Auslagerung der einzelnen Bauteiltypen.....	56
Tabelle 13: Analyse der Rissbildung R1218 [%].....	59
Tabelle 14: Untersuchte Bauteiltypen, „kleine“ LP.....	60
Tabelle 15: Untersuchte Bauteiltypen, „große“ LP	61
Tabelle 16: Schereinstellungen	62
Tabelle 17: Ergebnis der Scherversuche R(MA)2010	71
Tabelle 18: Ergebnis der Scherversuche C1812	73
Tabelle 19: Ergebnis der Scherversuche R0201	74
Tabelle 20: Ergebnis der Scherversuche C0201	75
Tabelle 21: Ergebnis der Scherversuche R01005	75
Tabelle 22: Lotspalterhöhung am QCC7V, gemessen an Querschliffen	77
Tabelle 23: Ausschnitt einer Bruchflächen-Beurteilungstabelle	79
Tabelle 24: Scherfestigkeiten	83
Tabelle 25: Transfermaßnahmen für die direkt am PA beteiligte Firmen.....	97
Tabelle 26: Transfermaßnahmen für die Forschungsvereinigung	97
Tabelle 27: Transfermaßnahmen über Fachveranstaltungen	98
Tabelle 28: Transfermaßnahmen über Publikationen.....	98

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

In der Elektronikproduktion hat sich die SMD-Technologie (SMD = Surface Mount Device, Bauelement für Oberflächenmontagetechnik) weitgehend als kostengünstiges und fehlerarmes Fertigungsverfahren durchgesetzt. Weichlot und Flussmittel wird in pastöser Form üblicherweise durch ein Schablonendruckverfahren auf die Lötanschlussflächen (Leiterplattenpads) von Trägermaterialien (Substrate/ Leiterplatten) appliziert. Nach der Bauelementbestückung durchläuft die gesamte Baugruppe einen Reflow-Lötprozess, bei dem die Lotpaste umschmilzt und eine stoffschlüssige Lötverbindung zwischen Bauelementanschluss und Kontaktfläche auf dem Substrat hergestellt wird (Abbildung 1).

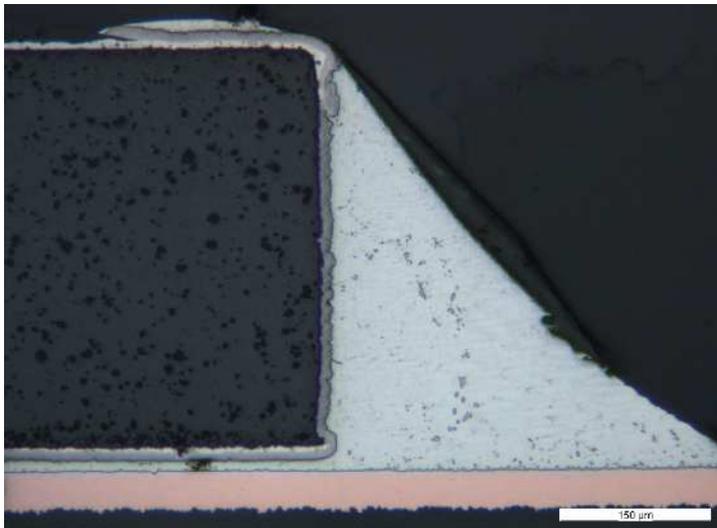


Abbildung 1: Lötstelle eines Keramikwiderstands

Auf der überwiegenden Anzahl der produzierten Baugruppen wird eine Leiterplatte aus FR4 (glasfaserverstärktes Epoxidharz definierter Brennbarkeit) als Träger für die elektronischen Komponenten eingesetzt. Die laterale Ausdehnung des FR4-Materials liegt typischerweise in einem Bereich von ca. 12...16ppm/K. Auf die Leiterplatte werden verschiedenste Komponenten aus unterschiedlichsten Materialien bestückt. Hierbei werden für die Herstellung der Komponenten solche Materialien ausgewählt, die die jeweils günstigsten Eigenschaften für die Funktion des entsprechenden Bauelementtyps bieten. Keramik wird z.B. auf Grund seiner mechanischen und dielektrischen Eigenschaften unter anderem für Quarze, Sensoren und Keramikkondensatoren und Chipwiderstände gewählt. Insbesondere diese keramischen Bauteile weisen einen deutlich niedrigeren Ausdehnungskoeffizienten (Keramik: CTE = Coefficient of Thermal Expansion ca. 6ppm/K) auf als der Schaltungsträger aus FR4, Abbildung 2. Dazu kommt, dass diese Komponenten elementarer Bestandteil fast aller elektronischen Schaltungen sind. Das bedeutet diese kritischen keramischen SMD-Bauelemente sind nahezu alternativlos im Einsatz auf elektronischen Baugruppen.

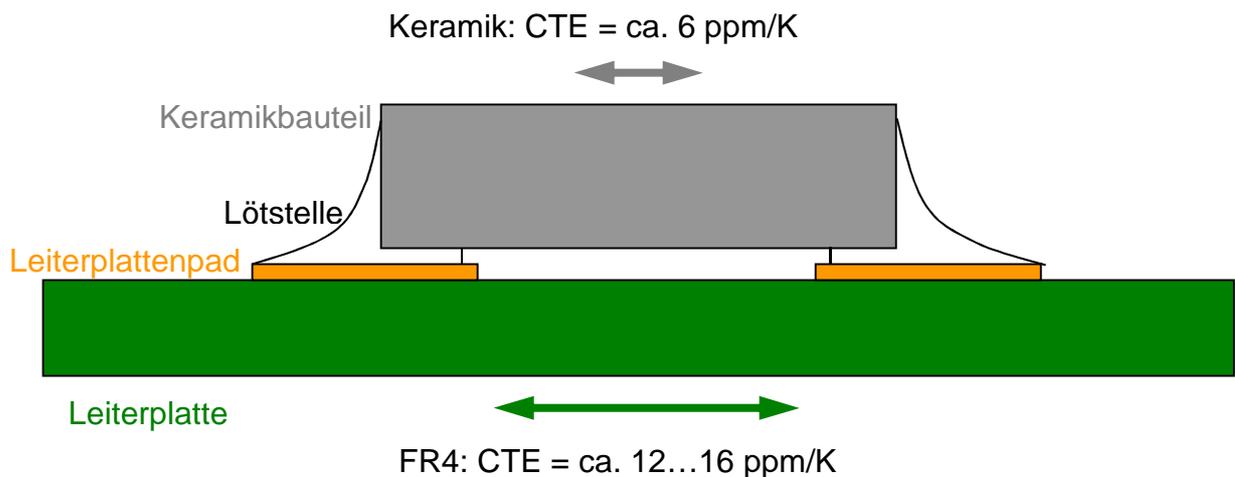


Abbildung 2: Ausdehnungsfehlانpassung

Die auftretende Fehlanpassung (CTE-Mismatch) hinsichtlich ihres Ausdehnungsverhaltens bezogen auf ihren Träger führt insbesondere bei Keramikkomponenten größerer Dimensionen (ab ca. 6mm Kantenlänge) zu vergleichsweise frühen Ausfällen bei Temperaturwechselbelastung.

Das Ausfallverhalten ist typischerweise in Form von Lötstellenermüdung zu beobachten. Die Abbildung 3 stellt so einen Frühausfall dar, der trotz scheinbar ausreichender Lotmenge auf Grund thermomechanischer Belastungen zu einem durchgehenden Riss in der Lötverbindung eines Quarzbauelements in einem Keramikgehäuse geführt hat. In diesem Fall kann man von „Frühausfall“ sprechen, denn meist sind derartige Bauteile Lebensdauer bestimmend, weil sie als erste ihre Belastbarkeitsgrenze erreichen und die Mehrzahl der übrigen Bauelemente unkritisch ist.

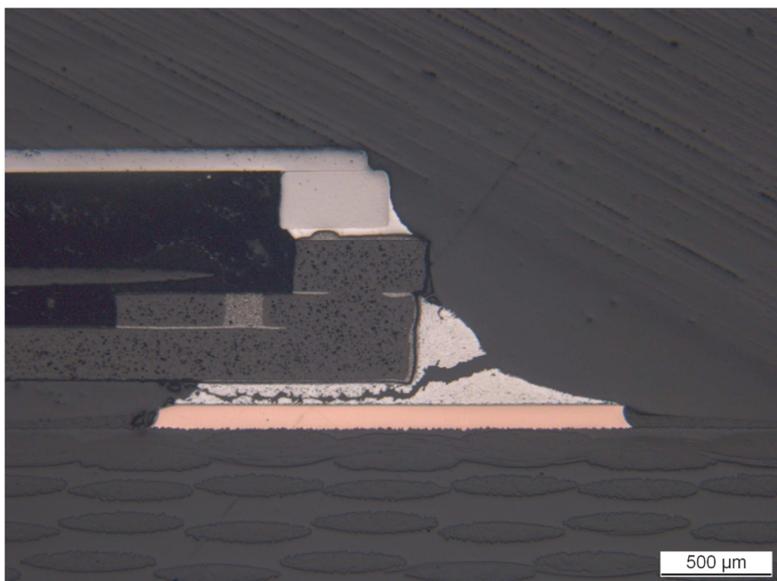


Abbildung 3: Rissbildung an einem Keramikquarz

Insbesondere eine unzureichende Lotpastenmenge führt zu einer weiteren Verschärfung des Problems. Eine magere Lötstelle kann zwar die Anforderungen der „Ab-

nahmekriterien für elektronische Baugruppen“ nach IPC-A-610E [1] erfüllen, wird bei entsprechender thermomechanischer Belastung jedoch noch frühzeitiger ausfallen. Eine Aussage über die zulässige Lötstellenqualität nach IPC-A-610 ist somit für eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Lötstelle nicht ausreichend.

1.2 Anlass für den Forschungsantrag

Die IPC Industriestandards stellen ein weltweit anerkanntes Regelwerk dar, das alle Bereiche der elektronischen Baugruppenfertigung abdeckt. Unter anderen sind hier Vorgaben für Qualitäts- und Leistungsspezifikationen von elektronischen Baugruppen und die dafür benötigten Hilfsstoffe und Komponenten enthalten. Für die Bewertung der Fertigungsqualität wird speziell die IPC-A-610 herangezogen. Auf Basis dieses Standards ist allerdings nur eine Erfassung und Bewertung des Ist-Zustandes direkt nach der Fertigung möglich. Eine Aussage über die Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppen ist nach diesem Standard nicht möglich, da keine allgemeingültige Information über die möglichen Belastungen während des Betriebes einer elektronischen Baugruppe vorhanden ist.

Bei kleinen keramischen Komponenten der Baugröße 0201 und 01005 (z.B. Widerstände und Kondensatoren) ist eine Kombination aus thermomechanischer Fehlanpassung und unzureichender Lotmenge als Ursache für den Ausfall zu sehen. Hier besteht insbesondere die Gefahr, dass ungleiche Lotmengen bei zweipoligen Keramikkomponenten zu einer unsymmetrischen Belastung führen können. Bei genauerer Betrachtung ist auch die Flussmittelmenge relevant, welche ca. die Hälfte des Pastenvolumens ausmacht und die Benetzung der Oberflächen sowie die Ausformung des Lotmeniskus (Lotoberfläche) maßgeblich beeinflusst.

Die aus den kleinen Anschlussgeometrien resultierenden kleinen Schablonenöffnungen führen beim Lotpastendruck zu ungleichmäßigen Lotpastendepots. Diese Unregelmäßigkeit wird mit einfachen Inspektionsmethoden nicht erkannt. Die bisher allgemein übliche eingesetzte Inspektionsmethode im Baugruppenfertigungsprozess ist eine manuelle visuelle Inspektion des Lotpastendruckes zu Beginn eines neuen Fertigungsloses. Seltener erfolgt eine 2D-SPI (2-Dimensional Solder Paste Inspection).

Die manuelle visuelle Prüfung und die 2D-Inspektionsverfahren zeigen jedoch in der Prüfung der Präzision von Lotpasten-Druckprozessen technologiebedingte Nachteile. Scanner oder Kameragestützte 2D-Inspektionssysteme für Lotpaste können ebenso wie die manuell visuelle Inspektion nur die Flächenbedeckung (An- oder Abwesenheit von Lotpaste, Verschmierungen und Kurzschlüsse) und die Positionierung der Depots prüfen. Zudem reagieren die kameragestützten Inspektionssysteme empfindlich auf Farb- und Kontrastabweichungen.

Die Information über die bedruckte Leiterplattenpadfläche ermöglicht jedoch keine Aussage über das aufgetragene Lotpastenvolumen oder die Verteilung auf dem Pad. Zu wenig Lotpaste oder Lotüberschuss führt zwangsläufig zu Lötfehlern (Nichtlötung, Kurzschlüsse) oder Lötstellen mit eingeschränkter Zuverlässigkeit. Besonders deutlich tritt dieser Effekt auf, wenn kleine Lotpastenmengen aufgetragen werden. Hier kann es schnell zu einem nur scheinbar kontrollierten Fertigungsprozess kommen bei dem Qualitätskriterien zur Beurteilung des Lotpastendruckes angewendet werden, die keinen hinreichenden Bezug zur Lötstellenzuverlässigkeit bieten.

Die beantragende Forschungsstelle bietet seit mehr als 15 Jahren Dienstleistungen zur Schadensanalyse sowie Qualitäts- und Zuverlässigkeitsbewertung elektronischer Baugruppen an. Die oben erwähnten Fehlerbilder sind immer wieder zu finden. Das betrifft sowohl Auftragsfertiger in der Elektronikindustrie (hierunter fallen überwiegend klein- und mittelständische Unternehmen) als auch OEM und ist nicht auf einen Industriezweig beschränkt, sondern zeigt sich als bereichsübergreifendes Phänomen. Derzeit wird keine effektive präventive Vermeidungsmaßnahme eingesetzt. Erst seit wenigen Jahren sind überhaupt quantitative analytische Methoden zur Beurteilung des Lotpastenauftrages verfügbar, die es ermöglichen einen Zusammenhang zwischen Lotpastendruckvolumen und Lötstellenzuverlässigkeit herzustellen [2].

1.3 Stand der Forschung

Der Lotpastendruck ist immer noch als eine der Hauptursachen für Lötfehler verantwortlich, also für Fehler, die meist erst nach dem Lötprozess auffällig werden. Hier sind vielfältige Einflussfaktoren vorhanden, die einen direkten Einfluss auf das Druckbild und damit auf das Löttergebnis haben. Das können z.B. Prozessschwankungen im Pastenauftrag sein (unter anderem ungleichmäßiger Rakeldruck, Toleranzen in der Wiederholgenauigkeit, fehlende Abdichtung zwischen Schablone und Leiterplatte, nicht an das Substrat angepasste Rakellänge, Verschmutzungen im System, Zusetzen der Schablonenöffnungen, beschädigte Rakel oder Schablonen).

Materialtoleranzen (z.B. Lotpasteninhomogenität und Alterung, Verzug in der Druckschablone, Substratverzug und Dickenschwankungen) führen oftmals zu einem unregelmäßigen Lotpastenauftrag, der sich direkt auf die Lötstellenzuverlässigkeit auswirken kann. Ist im Produktionsprozess die Lotpasteninspektion nur ungenügend, so werden diese Prozessabweichungen frühestens nach dem Lötprozess erkannt und müssen im Bedarfsfall aufwändig korrigiert werden (z.B. Nacharbeit oder Reparatur von Lötstellen).

Um dies zu vermeiden, ist es sinnvoll, den Lotpastendruck mit einer zuverlässigen Prüfmethode zur Erfassung des Lotpastenvolumens zu kontrollieren. Geschieht dies Inline, so ist eine direkte Aussortierung von betroffenen Substraten möglich. Diese können nach einem einfachen und kostengünstigen Reinigungsprozess wieder in den Fertigungsablauf eingeschleust werden. Mögliche Fehlerquellen, wie z.B. zuge-setzte Schablonenöffnungen auf Grund fehlender Reinigung im Druckprozess können zeitnah abgestellt und der Druckerfolg sofort überprüft werden.

Mittels 3D-SPI (3D-Lotpasteninspektion) können Volumen-, Höhen- und Flächenmessungen vorgenommen werden. Eine topografische Darstellung lässt erkennen, ob die Lotpaste in der richtigen Form aufgetragen wurde (wichtig bei Pin-In-Paste Anwendungen). Der Druckprozess wird optimiert und systematische als auch zufällige Fehler werden sicher detektiert.

Eingesetzt werden hier abhängig vom verwendeten System Laser- bzw. Weißlichtverfahren. Durch verbesserte Kameratechnik ist ein Einsatz im Inlinebetrieb möglich geworden. Software unterstützt sind vielfältige Pastendruckanalysen (Abbildung 4 und Abbildung 5 - Vergleich optische 2D-Inspektion zu 3D-Analyse) und statistische Auswertungen möglich.

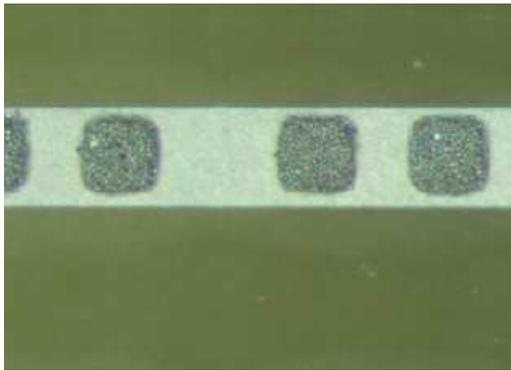


Abbildung 4: 2D-Darstellung Lotpastendepot

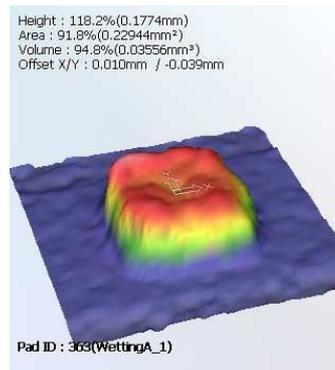


Abbildung 5: 3D-Analyse eines Lotpastendepots

3D-Lotpasteninspektionssysteme der neuesten Generation, die nach dem Laser-Triangulationsverfahren arbeiten, verwenden die Dual-Laser-Technologie. Herkömmliche Messsysteme arbeiten mit einem Laser, der von einer Seite aus die Lotpastendepots vermisst. Dadurch ergeben sich Areale, welche im "Schattenbereich" liegen. Diese werden normalerweise durch hinterlegte Algorithmen berechnet. Allerdings kann die berechnete Form von der realen Form abweichen. Mittels Dual-Laser-Technologie werden die Lotpastendepots gleichzeitig von gegenüberliegenden Seiten vermessen. Hierdurch werden sämtliche Schattenareale aufgedeckt und ausgewertet. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Single-Laser-Technologie ist durch eine Verdoppelung der Messpunkte eine doppelt so gute Auflösung in x-Richtung, was zu einer wesentlich genaueren Höhen-, Flächen- und Volumenbestimmung führt.

Bei Literaturstudien wurden keine Untersuchungen gefunden, die das vorliegende Forschungsthema (Zusammenhang zwischen Lotpastendruckvolumen und thermomechanischer Lötstellenzuverlässigkeit insbesondere kleiner und großer keramischer SMD-Komponenten) behandelt haben.

Die Untersuchung zur „Zuverlässigkeit von Weichloten und Eigenschaften bleifreier Lote“ [3] betrachtete Zusammenhänge von Lötstellendegradation in Abhängigkeit der Belastung. Hier wurden schnelle und langsame Temperaturwechsel miteinander verglichen. Als Hauptdeformationsmechanismus wurde das Kriechen in Form von Korngrenzengleiten und Versetzungsklettern nach Garofalo, Hart bzw. Norton beschrieben. Simulationsergebnisse verschiedener statistischer Ansätze (nach Coffin&Manson, Morrow und Engelmaier) wurden mit Lebensdaueranalysen verglichen. Jedoch wurde in der Arbeit kein Zusammenhang zwischen Lotmenge und Lebensdauer hergestellt, wie dies in dem vorliegenden Projektantrag der Fall ist. Zudem wurde als kleinste Bauelementgröße die Bauform 0603 (1,6mm x 0,8mm) untersucht.

Limaye und Vandeveldel haben in ihrer Arbeit [4] das Risswachstum von Ermüdungsrissen bei CSP und passiven Komponenten untersucht. Hier ist jedoch als kleinste Komponentenbauform ebenfalls nur die Größe 0603 untersucht worden. Zudem wurde in erster Linie bleihaltiges und bleifreies Lot verglichen und kein Bezug von Lot(pasten)menge zum beobachteten Ausfall hergestellt.

Liu hat in seiner Dissertation [5] die Zuverlässigkeit von 01005-Komponenten für Anwendung in portabler Elektronik (Mobilfunk, Navigationssysteme, MP3-Player) unter-

sucht. Hier wurden Belastungsformen wie z.B. ein Falltest durchgeführt. Dies ist eine völlig andere Anforderung an die Lötstellen als die Ermüdungsschädigung durch thermomechanische Belastung, die durch Temperaturwechsel eingebracht werden. Es stellt sich ein vollkommen anderes Schadensbild ein. Mechanischer Schock verursacht Sprödbrüche, die zum sofortigen Versagen führen. Thermomechanische Wechselbelastung dagegen ermüdet die Lötstelle und führt zum Versagen über einen Beanspruchungszeitraum, der je nach Höhe der Belastung schneller oder langsamer zum Ausfall führt.

Eine Untersuchung der Uni Rostock über die „Zuverlässigkeit von Lötverbindungen in Abhängigkeit von der Lotmenge“ [6] beschränkt sich auf zweipolige keramische Komponenten der Baugröße 0402 und 1206.

Aus dem dargestellten Stand der Forschung und Entwicklung ist ersichtlich, dass die Zuverlässigkeit der Lötstellen kritischer keramischer SMD-Komponenten auf Leiterplatten bisher unter dem Fokus des Parameters „Einfluss des Lotpastendrucks“ noch nicht untersucht wurde.

Ergebnisse von Untersuchungen an Lötstellen, die bei gleicher Anschlussgeometrie ein größeres Lotvolumen aufweisen zeigen in Simulationen und in Zuverlässigkeitstests eine höhere Zuverlässigkeit. Bisher wurde jedoch kein Zusammenhang zwischen definiertem Lotpastenvolumen, Lötstellengeometrie, Zuverlässigkeit der Lötstellen und daraus resultierender Eingriffsgrenze beim Lotpastendruck hergestellt.

1.4 Aufgabenstellung

Aufgabe ist die Untersuchung des Einflusses des Lotpastendrucks auf die Qualität und Zuverlässigkeit der Lötstellen kritischer keramischer SMD-Komponenten auf FR4-Leiterplatten. Hierzu soll ein Zusammenhang zwischen Lotpastenmenge, Lotvolumen und Lötqualität sowie Lotpastenmenge, Lotvolumen und Zuverlässigkeit hergestellt werden.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

2.1 Angestrebte wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Ziel des Projektes ist es, den Einfluss des Lotpastendrucks auf die Qualität und Zuverlässigkeit der Lötstellen kritischer keramischer Bauelemente auf FR4-Leiterplatten zu untersuchen. Das erwartete Ergebnis gibt Aufschluss darüber, wie sensitiv Qualität und Zuverlässigkeit auf Unterschiede im Lotpastendruck reagieren. Das ermöglicht die Festlegung von Prozessgrenzen, um den Druckprozess zu stabilisieren. Hierbei wird der verfahrensorientierte Ansatz gewählt, um experimentell nachzuweisen, welche Parametervariation praxistauglich erscheint und sinnvoll in vorhandene Fertigungsumgebungen bzw. bei der Einführung neuer Produkte umgesetzt werden kann. Eine enge Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) soll hier eine schnelle industrielle Umsetzung ermöglichen.

Zwei Ansätze sollen verfolgt werden.

Bei kleinen keramischen Komponenten (Baugröße 0201 und 01005) ist die Anforderung an den Lotpastendruckprozess eine Mindestmenge an Lot auf das Leiterplattenpad zu übertragen. Weitere Baugrößen mit größeren Dimensionen werden ebenfalls in die Untersuchung mit einbezogen, um einen Bezug zu vergleichsweise großen Lotpastendepots herzustellen. Mit der 3D-Lotpasteninspektion soll die Reproduzierbarkeit der aufgetragenen Lotpastenmenge herausgearbeitet werden. Es soll eine Untergrenze des nötigen Lotvolumens definiert werden. Diese kann dann als Eingriffsgrenze in die Überwachung des Lotpastendruckprozesses übernommen werden. So kann vorausschauend z.B. ein Reinigungsprozess der Druckschablone stattfinden, bevor es zu einem Lötfehler und damit entstehenden Nacharbeitsprozessen kommt. Ebenfalls soll untersucht werden, ob ein deutliches Überangebot an Lot zu einer Bauteilbeschädigung führen kann.

Bei großen keramischen Komponenten ist eine Erhöhung des Lotspaltes vorteilhaft für die Lebensdauer der Lötstellen. Hier soll der Zusammenhang zwischen (zusätzlicher) Lotmenge und Lebensdauer untersucht werden.

Die Leiterplatte kann die Dehnungsdifferenzen zur großen Keramikkomponente teilweise durch eine Verbiegung ausgleichen. Erschwert wird dieser Ausgleich durch die Anordnung von einander gegenüberliegenden Komponenten. Auch dieser Aspekt soll hinsichtlich der Lötstellenzuverlässigkeit zumindest theoretisch betrachtet werden.

Aus den Ergebnissen sollen Empfehlungen und Möglichkeiten für die Applikation von Zusatzlot abgeleitet werden.

2.2 Angestrebte wirtschaftliche Ergebnisse

Die Sicherstellung einer gleichmäßigen Qualität von gedruckten Lotpastendepots reduziert die Fehlerrate im Fertigungsprozess. Dadurch wird unnötige Nacharbeit oder sogar Ausschuss vermieden. Durch Vorgabe von sinnvollen Eingriffsgrenzen steigt die Qualität der gefertigten Produkte und es ist eine erhöhte Zuverlässigkeit der Produkte zu erwarten. Feldausfälle, die möglicherweise zu Rückrufaktionen führen können, werden so reduziert. Dies erhöht die Wertschöpfung im Produktionsprozess und festigt die Marktposition insbesondere von KMU bei einem vergleichsweise geringen Investitionsaufwand für das benötigte Inspektionssystem. Das ist letztlich ein Beitrag zur Ressourceneffizienz.

2.3 Innovativer Beitrag

Bisher gibt es keine systematische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Lotdepotvolumen und thermomechanischer Belastbarkeit bei kritischen keramischen Bauelementen. In der Industrie sind diese Komponenten (insbesondere große keramische Bauelemente) unter thermomechanischer Wechselbelastung als Schwachstelle auf der elektronischen Baugruppe und damit Lebensdauer limitierend bekannt. Da Alternativen nicht vorhanden sind, werden unter großem Aufwand Reparaturmaßnahmen sowie regelmäßige Austauschaktionen im Rahmen vorbeugender Wartungsarbeiten durchgeführt.

Kleine keramische Komponenten (0201, 01005) werden erst seit kurzer Zeit zunehmend in der Industrie eingesetzt. Daher fehlen hier noch Ergebnisse systematischer Untersuchungen zur Lötstellen-Zuverlässigkeit in Abhängigkeit vom Lotvolumen. Ins-

besondere besteht hier die Problematik, dass auf Grund der geringen Öffnungsgrößen der Lotpastendruck extrem kritisch und instabil ist.

Die Innovation liegt in der Anwendung des 3D-Lotpasteninspektionsverfahrens, das erst mit jüngster Gerätetechnik die hierzu notwendige Messauflösung für präzise, reproduzierbare Messungen kleinster Lotpastendepots bereitstellt. Somit wird eine systematische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Lotdepotvolumen und thermomechanischer Belastbarkeit von kleinen Lotdepots ermöglicht. Eine untere Eingriffsgrenze für kleine Lotpastendepots zur Prozessstabilisierung kann derzeit nicht auf Basis systematisch ermittelter Messergebnisse definiert werden. Dies soll mit dem angewendeten Verfahren realisiert werden.

Der innovative Beitrag ist eine Aussage über die Sensitivität von Qualität und Zuverlässigkeit der Lötstellen kritischer keramischer Komponenten auf Unterschiede im Lotpastendruck. Es sollen Empfehlungen für Prozess-Eingriffsgrenzen und Designvorschläge für Leiterplattenpad- und Schablonenöffnungsgeometrien erarbeitet werden.

Für große keramische Bauelemente besteht die Innovation insbesondere in den erarbeiteten Empfehlungen zur Lotmengen- und Layoutoptimierung und dem experimentellen Nachweis der Realisierbarkeit.

2.4 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

2.4.1 Methodischer Ansatz

Basierend auf Ergebnissen aus früheren Forschungsprojekten, wird in dem vorliegenden Projektantrag der Fokus auf die verfahrensorientierte Lösung der Problemstellung und somit auf die technische Umsetzung der Lotvolumenvariation (im Produktionsprozess elektronischer Baugruppen) gelegt, die dann als Grundlage für die Zuverlässigkeitsbetrachtung dient.

2.4.2 Arbeitsschritte

Das Vorhaben wird in folgende Arbeitspakete unterteilt:

- ⇒ Systemauswahl/Testboard-Design inkl. Materialbeschaffung (Testboard, Lotmaterial und Druckschablonen sowie Bauteile)
- ⇒ Bestandsaufnahme des Druckprozesses, Erfassung von Toleranzen im Druckprozess und basierend darauf Festlegung von Prozessgrenzen für die Untersuchungen
- ⇒ Bestimmung der optimalen Druckparameter für jede untersuchte Lotpaste
- ⇒ Anpassung und Programmierung SPI
- ⇒ Planung und Durchführung von Versuchsreihen
- ⇒ Auswertung der Ergebnisse, Zuverlässigkeitsanalyse und Modellrechnungen

3 Durchführung und Ergebnisse

3.1 Verwendete Anlagen und Geräte

3.1.1 Trockenschrank

Die Leiterplatten werden vor Bearbeitung in einem Trockenschrank der Firma Thermo Fisher Scientific bei konstant trockenem Klima (relative Luftfeuchtigkeit 1,3%, Temperatur 29,0°C) gelagert.

3.1.2 Temperaturmessgerät

Um die Angaben der Lotpaste aus dem Datenblatt in ein optimales Lötprofil umzusetzen, müssen Temperaturmessungen durchgeführt werden. Für diese Messungen wird das Messgerät PTP, Professional Temperature Profiler, der Firma Globalpoint verwendet. Das Messgerät besteht aus einem Sender und einem Empfänger. Es ist ein kalibriertes Messmittel und besitzt am Sender acht Eingänge für Thermoelemente (Abbildung 6). Über eine Funkstrecke werden die aufgenommenen Daten an den Empfänger gesendet und an einen Computer zur Darstellung und Auswertung weitergegeben. Um die Temperatur zu messen werden Mantelthermoelemente des Typs K verwendet (Abbildung 7).



Abbildung 6: PTP-Sender

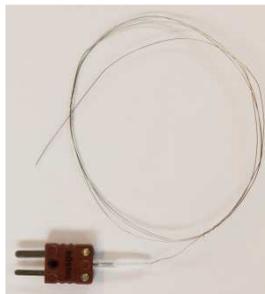


Abbildung 7: Thermoelement

3.1.3 Mikroskop

Zur Inspektion der Baugruppen wird das Mikroskop MZ95 der Firma Leica verwendet. Für die Inspektion wird mit einer 40-fachen Vergrößerung oder mehr gearbeitet.



Abbildung 8: Leica-Mikroskop MZ 95

3.1.4 Lotpastendrucker

Der verwendete Lotpastendrucker Horizon 2 der Firma DEK, vgl. Abbildung 9, ist Teil der SMD-Produktionslinie im ISIT Applikationszentrum.

Mit Hilfe eines Förderbandes werden die Leiterplatten in die Anlage aufgenommen und mit einer „Overtop-Klemmung“ in der Druckposition fixiert. Eine Laser-Markenerkennung richtet Schablone und Leiterplatte zueinander aus.

Die Lotpaste wird mittels Edelstahlrakel aufgetragen. Dieser Drucker arbeitet mit zwei gegenüberliegenden Rakeln.

Damit sich die Leiterplatte unter dem Druck der Rakel nicht wölbt und es somit zu undefinierten Lotdepots bzw. Brückenbildung kommt, wird die Leiterplatte unterstützt. Es gibt verschiedene Arten der Leiterplattenunterstützung, Abbildung 10 zeigt beispielsweise ein Vakuum Nest. Hierbei kann die Form der Leiterplatte an die Unterstützung angepasst werden. Dies ist besonders wichtig, wenn sich bereits Bauteile auf der Leiterplattenrückseite befinden. Mittels Vakuum lässt sich diese Unterstützung für jede Anwendung variabel anpassen. Eine weitere Unterstützungsform sind Magnetpins. Diese haben eine feste Höhe und werden meist bei unbestückten Leiterplatten verwendet. Dargestellt sind diese in Abbildung 11.



Abbildung 9: Lotpastendrucker von DEK



Abbildung 10: Vakuum Nest - Unterstützung



Abbildung 11: Magnetpin - Unterstützung

3.1.5 Lotpasteninspektionssystem

Die SPI HS70 der Firma Parmi ist ein In-Line Solder Paste Inspection System und in Abbildung 12 dargestellt.



Abbildung 12: 3D-Inspektionsgerät HS70

Die Leiterplatte wird über ein Förderband in die Maschine eingebracht. Der in Abbildung 13 dargestellte 3D-Sensor-Kopf scannt mittels Laser die bedruckte Leiterplatte.

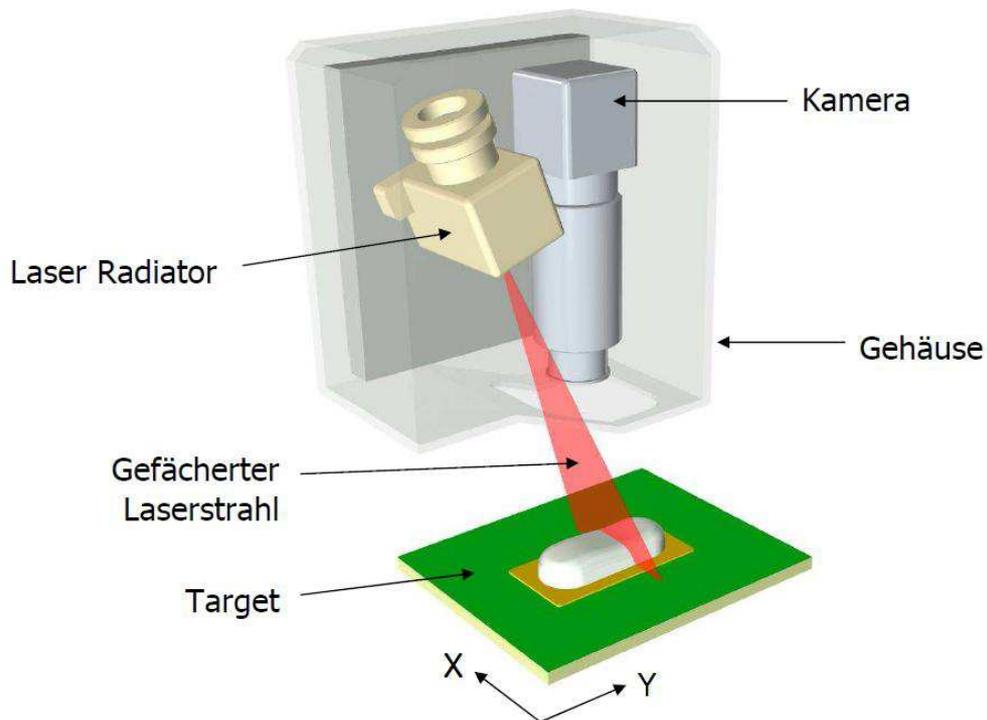


Abbildung 13: 3D-Sensor-Kopf [7]

Durch Verwendung eines Fächerlasers kann die optische Triangulation angewendet werden. Dafür wird ein Laserstrahl auf die Leiterkarte projiziert, wie in Abbildung 14 dargestellt. Dieser Strahl wird über eine Hochgeschwindigkeitskamera aufgefangen und die Berechnung wird durchgeführt. Abbildung 15 zeigt das Profil des Lasers.

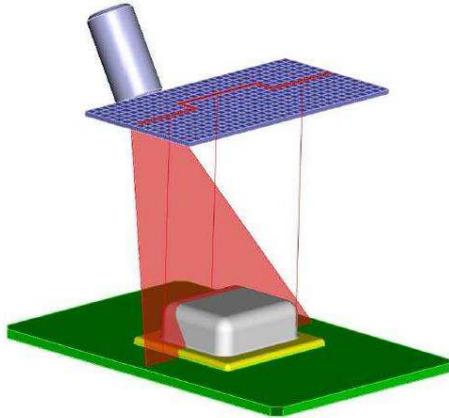


Abbildung 14: Verwendung eines Fächerlasers [7]

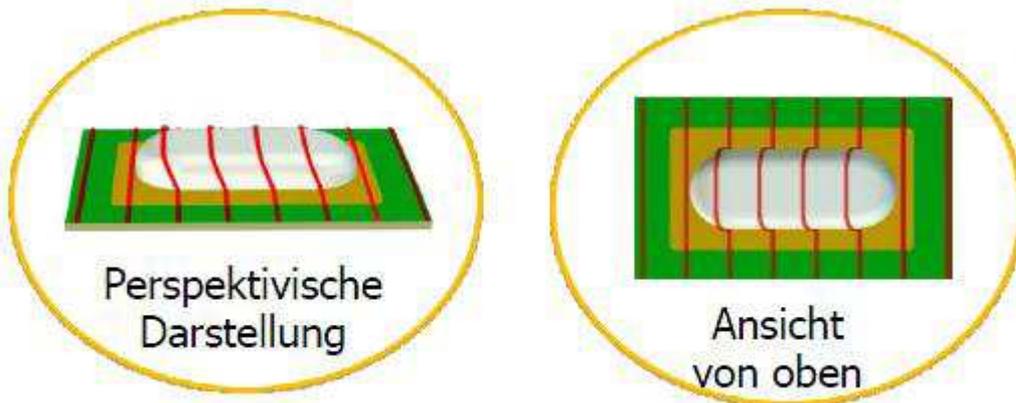


Abbildung 15: Darstellung des Laserprofils [7]

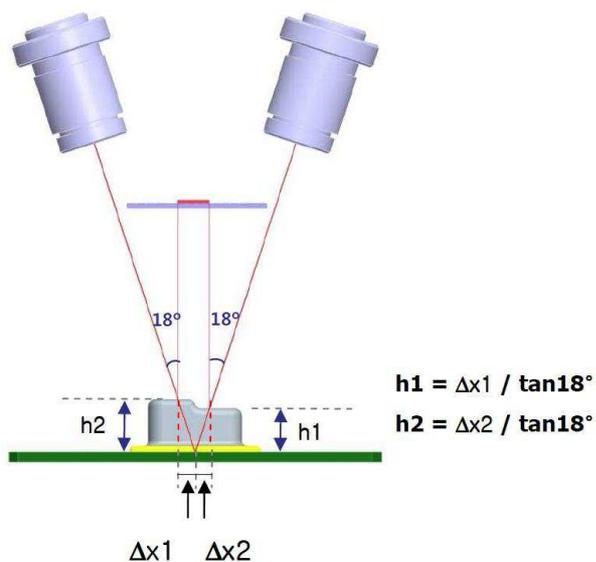


Abbildung 16: Optische Triangulation [7]

Anschließend erfolgen Bildanalyse und Erstellung eines Höhenprofils durch Auswertung der Verschiebung in Δx auf dem Kamerabild (Abbildung 16). Das 3D-Bild wird durch kontinuierliches Scannen der Oberfläche erzeugt (Abbildung 17).

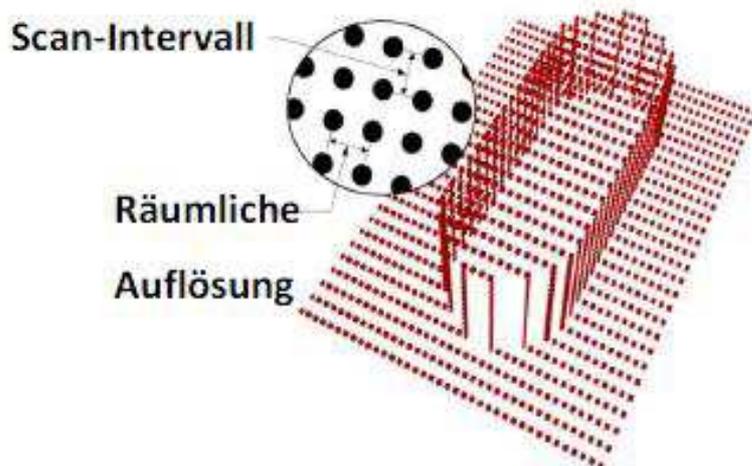


Abbildung 17: 3D-Bildkonstruktion [7]

Die laterale Messauflösung beträgt $7\mu\text{m}$ und die z-Achsen-Auflösung $0,1\mu\text{m}$ bei einer Scangeschwindigkeit von $80\text{cm}^2/\text{s}$. Die erfassbaren Parameter sind in Abbildung 18 dargestellt.

Volume			Nettovolumen
Area			Fläche (Oberseitenansicht)
Height			Mittelwertshöhe
Offset			X- und Y-Abweichung zur Padmitte

Abbildung 18: Erfassbare Parameter [7]

Die Messwerte werden nach Datum in der Anlage gespeichert. Jeder Messwert erhält außerdem einen Index, so dass alle Messungen eindeutig zugeordnet werden können. Dieser Index wird in den Aufzeichnungen immer mit angegeben.

3.1.6 Bestücker

Zur Bauteilbestückung wurde ein Bestücker KE 2060RL der Firma Juki eingesetzt (Abbildung 19).



Abbildung 19: Bestücker KE 2060RL

3.1.7 Reflowofen

In einem Vollkonvektions-Reflow-Lötsystem wird Gas, hier Stickstoff, erhitzt und über ein Düsensystem an die Leiterplatte geführt. In dem verwendeten Ofen Nitro V8 der Firma Rehm befinden sich 4 Vorheizzonen, 2 Peakzonen und 2 Kühlzonen. Der Ofen ist in Abbildung 20 dargestellt.



Abbildung 20: Reflowofen der Firma Rehm

3.1.8 Röntgenanlage

Die nanome|x der Firma Phoenix ist eine 2D-Röntgenanlage und Abbildung 21 dargestellt. Sie wurde für die 100% Röntgeninspektion nach Auslagerung eingesetzt.



Abbildung 21: Röntgenanlage nanome|x

3.1.9 Schertester

Für die Scherversuche an den Aufbauten wird der Schertester Condor Sigma der Firma XYZTEC verwendet, siehe Abbildung 22.



Abbildung 22: Schertester Condor Sigma [8]

3.1.10 Klimaschrank

Im Temperaturschockschrank TS60 der Firma WEISS wurden die Temperatur-Wechsel-Auslagerungen von -40°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ durchgeführt.

3.2 Material

3.2.1 Leiterplatten

Es werden 6-Lagen-Leiterplatten (Signal: L1, L6; Masse: L2, L5; Gridlayer: L3, L4) im Format 110mm x 160mm und 1,6mm Dicke entworfen und durch die Firma Würth gefertigt. Das Basismaterial besteht aus Standard FR4, T_G 135°C und ist ungefüllt (um die Kupferhaftfestigkeit zu erhöhen). Um definierte Leiterplattenpadgeometrien zu erhalten, wurde auf eine Leiterbahnanbindung verzichtet. Die Oberflächenmetallisierung der Leiterplatten besteht aus Nickel-Gold.

Es erfolgt eine Variation des Padlayouts in vier Größen, Variante A bis D. Die Variante C stellt hierbei die vom Bauelementhersteller bzw. vom Anwender empfohlene Padgeometrie dar. A und B sind um 50% bzw. 25% verkleinert, D ist um 25% vergrößert, siehe Tabelle 2 und Tabelle 3. So kann im Zusammenspiel mit der Schablonenvariation die geplante Lotmengen- und Lötstellenvariation realisiert werden. Es wurden nicht für alle Bauelementtypen alle Padvarianten realisiert. Dort wo die Leiterplattenlayouts oder Schablonenlayouts nicht prozessierbare Parameter ergeben oder nicht ausreichend Komponenten zur Verfügung standen, wurde eine Vorauswahl der Padgeometrien in Absprache mit dem PA getroffen.

Um alle ausgewählten Bauelemente optimal auf dem Testboard platzieren zu können und zugleich ausreichend Platz für die späteren Scherversuche zu haben, werden die Bauteile auf zwei Leiterplatten aufgeteilt. Die sogenannte „kleine“ Leiterplatte wird hauptsächlich mit Zweipolern bestückt. Für mehrpolige Bauteile wird die „große“ Leiterplatte verwendet.

Die Layouts der Leiterplatten sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt.

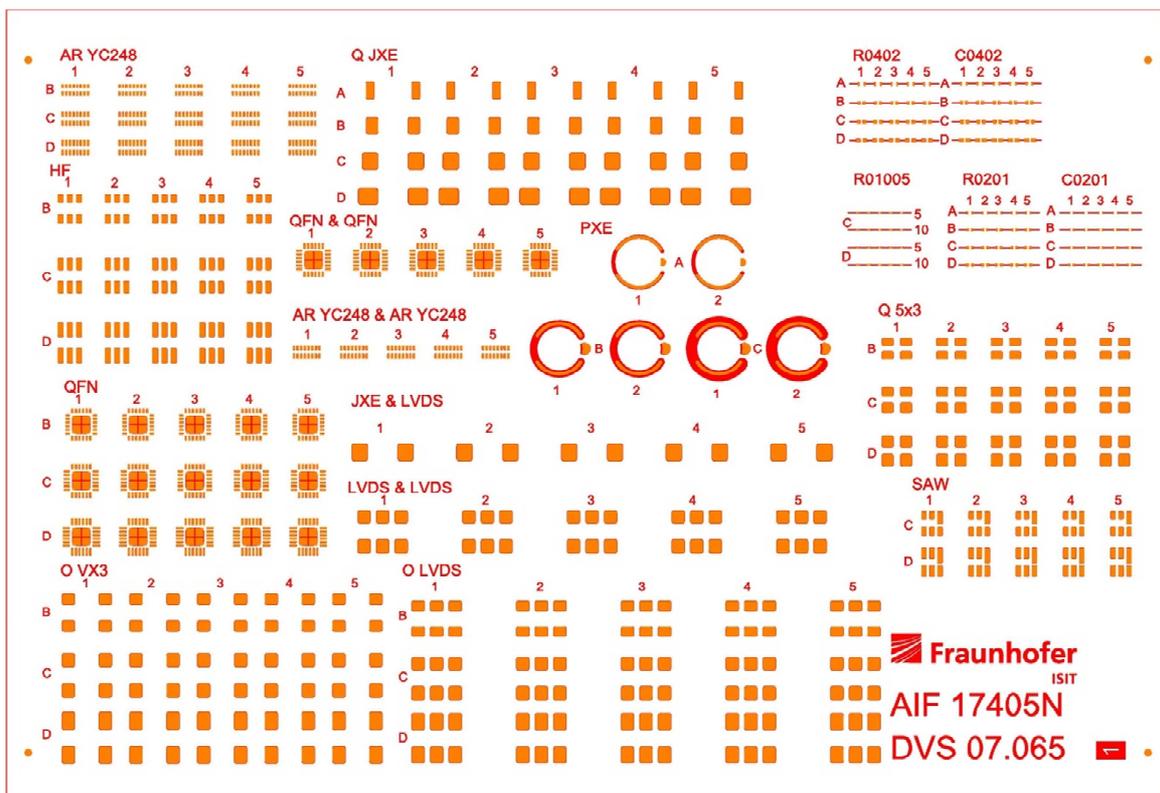


Abbildung 23: Layout der „großen“ Leiterplatte

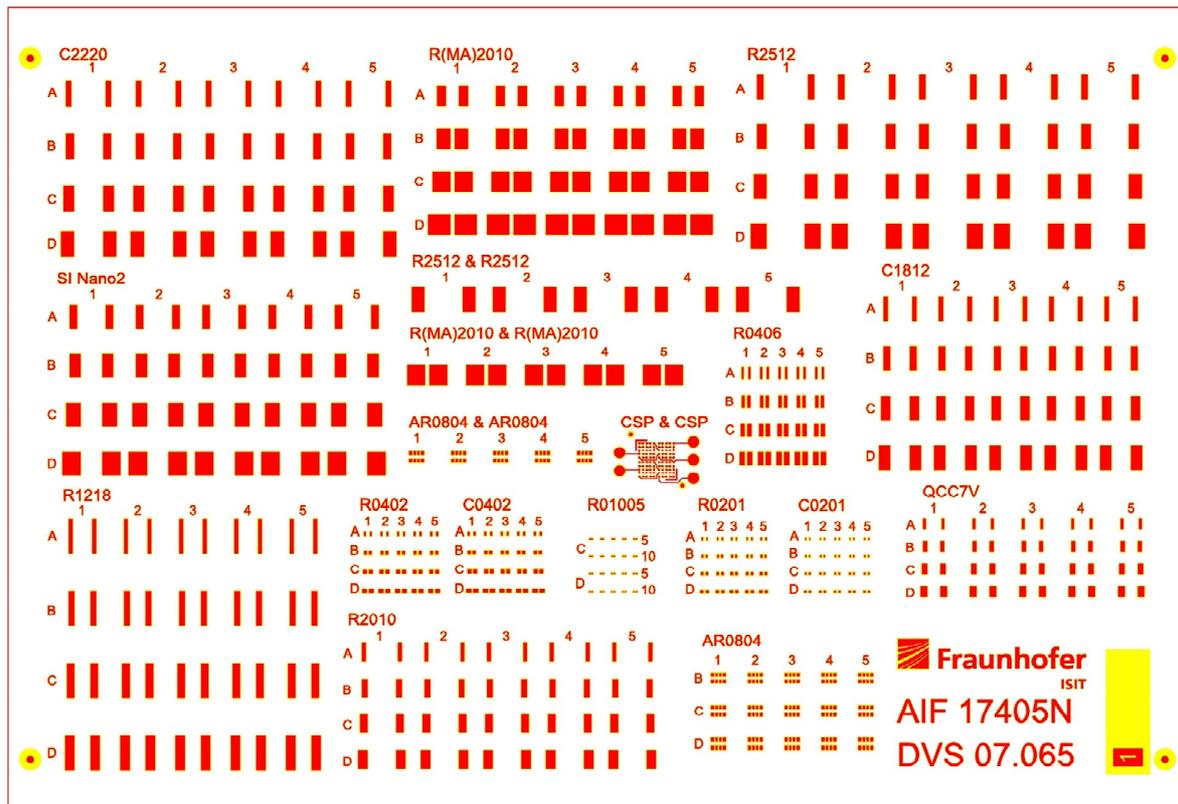


Abbildung 24: Layout der „kleinen“ Leiterplatte

In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist jeweils die Topseite beider Leiterplatten dargestellt.

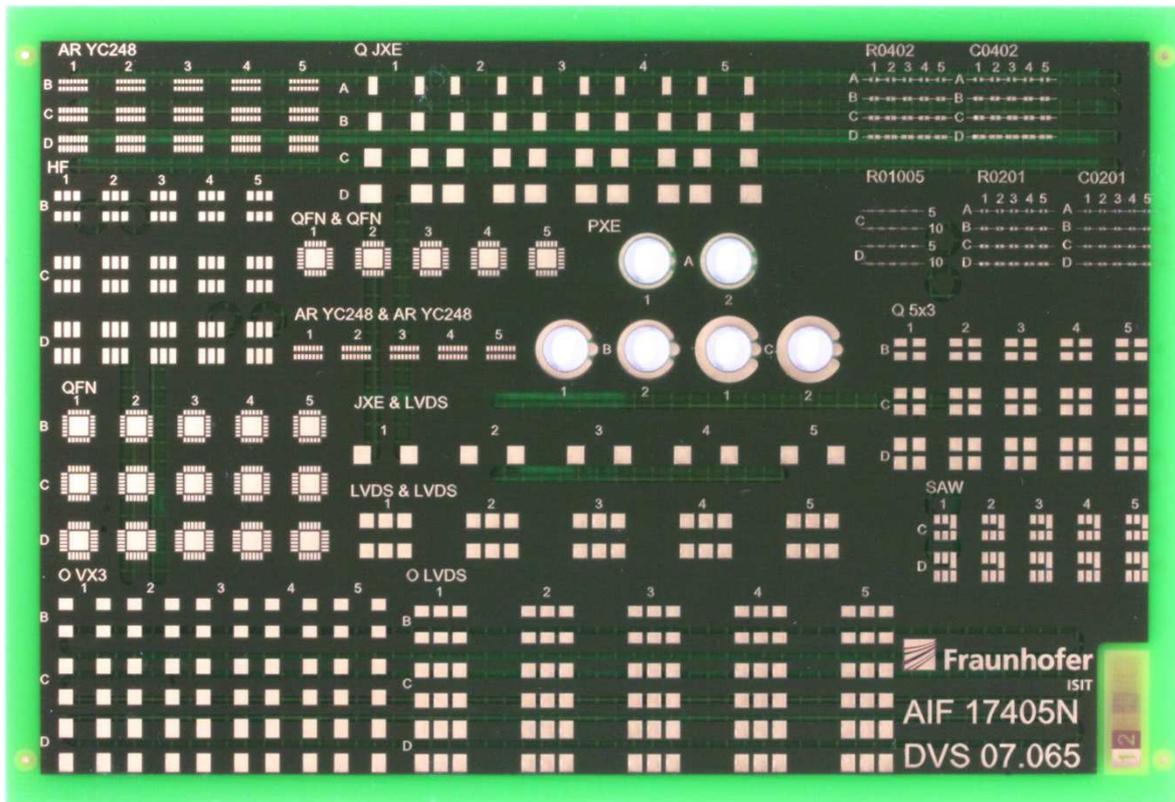


Abbildung 25: Leiterplatte „groß“

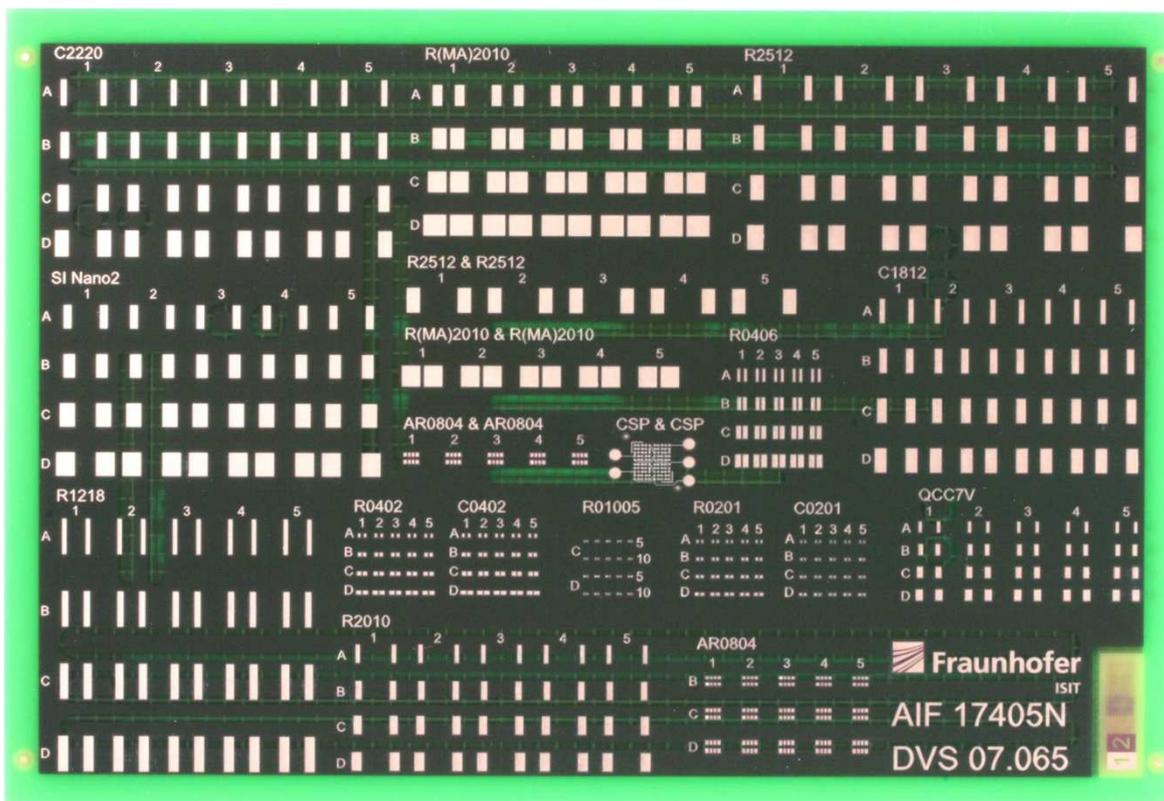


Abbildung 26: Leiterplatte „klein“

Die Lagerung der unbearbeiteten Leiterplatten erfolgte in einem Trockenschrank mit 1,3% Luftfeuchtigkeit und 29°C, um die Gefahr von Delamination während des Lötprozesses zu minimieren.

3.2.2 Bauteile

Die verwendeten Bauteile wurden von den am PA teilnehmenden Firmen vorgeschlagen und bereitgestellt. Dabei handelt es sich um Bauteile, für die die Fragestellung der Zuverlässigkeit für die Industrie von besonderer Bedeutung ist.

Die Geometrien der verschiedenen Bauteile wurden aus dem jeweiligen Datenblatt entnommen. Bauteile, für die kein Datenblatt vorhanden war, wurden vermessen. Die ermittelten Daten wurden anschließend in eine Eagle-Datenbank eingebunden. Eine Liste der verwendeten Bauteile ist in Tabelle 1 zu finden.

Bauteile	Länge x Breite x Höhe [mm]	Leiterplatte
AR 0804	2,0 x 1,0 x 0,4	„klein“
AR YC248	4,0 x 1,6 x 0,5	„groß“
C0201	0,6 x 0,3 x 0,3	„klein“
C0402	1,0 x 0,5 x 0,5	„klein“
C1812	4,5 x 3,2 x 1,8	„klein“
C2220	5,7 x 5,0 x 1,8	„klein“
HF	3,0 x 2,2 x 0,3	„groß“
LVDS	7,0 x 5,0 x 2,0	„groß“
PXE	8,0 x 8,0 x 1,6	„groß“
Q 5x3	5,0 x 3,4 x 1,3	„groß“
Q JXE	7,5 x 5,0 x 1,3	„groß“
QCC7V	3,2 x 1,5 x 0,9	„klein“
QFN	4,0 x 4,0 x 1,0	„groß“
R(MA)2010	5,1 x 2,5 x 0,7	„klein“
R01005	0,4 x 0,2 x 0,1	„klein“
R0201	0,6 x 0,3 x 0,2	„klein“
R0402	1,0 x 0,5 x 0,4	„klein“
R0406	1,0 x 1,6 x 0,3	„klein“
R1218	3,1 x 4,6 x 0,6	„klein“
R2010	5,0 x 2,5 x 0,6	„klein“
R2512	6,4 x 3,2 x 0,6	„klein“
SAW	3,0 x 3,0 x 1,4	„groß“
SI Nano2	6,9 x 2,7 x 2,7	„klein“
VX3	7,0 x 5,0 x 1,6	„groß“

Tabelle 1: Bauteile und Größen

Die Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen die verwendeten Padmaße der Padvarianten aller Komponenten,

Abbildung 27 zeigt die Zuordnung von Länge, Breite und Padabstand der „kleinen“ Leiterplatte, Abbildung 28 die Zuordnung der „großen“ Leiterplatte.

LP	BT	Pos	Padabstand [mm]		Länge [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]
			horizontal	vertikal	innere Pads		äußere Pads	
k	AR0804	B	0,20	0,50	0,30	0,38	0,40	0,38
k	AR0804	C	0,20	0,50	0,30	0,50	0,40	0,50
k	AR0804	D	0,20	0,50	0,30	0,63	0,40	0,63
k	C0201	A	0,43	-	0,12	0,30	-	-
k	C0201	B	0,30	-	0,19	0,30	-	-
k	C0201	C	0,30	-	0,25	0,30	-	-
k	C0101	D	0,30	-	0,31	0,30	-	-
k	C0402	A	0,53	-	0,27	0,50	-	-
k	C0402	B	0,25	-	0,41	0,50	-	-
k	C0402	C	0,25	-	0,50	0,55	-	-
k	C0402	D	0,25	-	0,69	0,50	-	-
k	C1812	A	3,30	-	0,60	3,30	-	-
k	C1812	B	2,70	-	0,90	3,30	-	-
k	C1812	C	2,70	-	1,20	3,30	-	-
k	C1812	D	2,70	-	1,50	3,30	-	-
k	C2220	A	4,70	-	0,70	3,50	-	-
k	C2220	B	3,40	-	1,00	3,50	-	-
k	C2220	C	4,00	-	1,40	3,50	-	-
k	C2220	D	4,00	-	1,75	3,50	-	-
k	QCC7V	A	2,14	-	0,36	1,50	-	-
k	QCC7V	B	1,80	-	0,50	1,50	-	-
k	QCC7V	C	1,80	-	0,70	1,50	-	-
k	QCC7V	D	1,80	-	0,90	1,50	-	-
k	R01005	A	0,12	-	0,18	0,20	-	-
k	R01005	B	0,12	-	0,18	0,20	-	-
k	R01005	C	0,12	-	0,23	0,20	-	-
k	R01005	D	0,12	-	0,23	0,20	-	-
k	R0201	A	0,48	-	0,18	0,40	-	-
k	R0201	B	0,30	-	0,26	0,40	-	-
k	R0201	C	0,30	-	0,35	0,40	-	-
k	R0201	D	0,30	-	0,44	0,40	-	-
k	R0402	A	0,55	-	0,25	0,50	-	-
k	R0402	B	0,30	-	0,38	0,50	-	-
k	R0402	C	0,30	-	0,50	0,50	-	-
k	R0402	D	0,30	-	0,63	0,50	-	-
k	R0406	A	0,63	-	0,27	1,75	-	-
k	R0406	B	0,35	-	0,41	1,75	-	-
k	R0406	C	0,35	-	0,55	1,75	-	-
k	R0406	D	0,35	-	0,69	1,75	-	-
k	R1218	A	2,70	-	0,50	4,80	-	-
k	R1218	B	2,20	-	0,75	4,80	-	-
k	R1218	C	2,20	-	1,00	4,80	-	-
k	R1218	D	2,20	-	1,25	4,80	-	-
k	R2010	A	4,40	-	0,50	2,50	-	-
k	R2010	B	3,90	-	0,75	2,50	-	-
k	R2010	C	3,90	-	1,00	2,50	-	-
k	R2010	D	3,90	-	1,25	2,50	-	-
k	R(MA)2010	A	1,80	-	1,20	2,80	-	-
k	R(MA)2010	B	0,60	-	1,80	2,80	-	-
k	R(MA)2010	C	0,60	-	2,40	2,80	-	-
k	R(MA)2010	D	0,60	-	3,00	2,80	-	-
k	R2512	A	6,00	-	0,85	3,35	-	-
k	R2512	B	5,20	-	1,28	3,35	-	-
k	R2512	C	5,20	-	1,70	3,35	-	-
k	R2512	D	5,20	-	2,13	3,35	-	-
k	SI_Nano2	A	3,90	-	0,98	3,15	-	-
k	SI_Nano2	B	2,95	-	1,47	3,15	-	-
k	SI_Nano2	C	2,95	-	1,96	3,15	-	-
k	SI_Nano2	D	2,95	-	2,45	3,15	-	-

Tabelle 2: Verwendete Padmaße der „kleinen“ Leiterplatte

LP	BT	Pos	Padabstand [mm]		Länge [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]
			horizontal	vertikal	innere Pads		äußere Pads	
08	HF	B	0,47	1,60	0,80	1,20	-	-
08	HF	C	0,47	1,60	0,80	1,60	-	-
08	HF	D	0,47	1,60	0,80	2,00	-	-
08	AR_YC248	B	0,20	0,50	0,30	0,50	-	-
08	AR_YC248	C	0,20	0,50	0,30	0,65	-	-
08	AR_YC248	D	0,20	0,50	0,30	0,80	-	-
08	Q_LVSD	B	0,75	2,18	1,80	1,42	-	-
08	Q_LVSD	C	0,75	2,20	1,80	1,90	-	-
08	Q_LVSD	D	0,76	2,20	1,80	2,37	-	-
08	Q_VX3	B	3,28	2,20	1,80	1,50	-	-
08	Q_VX3	C	3,30	2,20	1,80	2,00	-	-
08	Q_VX3	D	3,28	2,20	1,80	2,50	-	-
08	Q_5X3	B	0,94	0,80	1,60	1,05	-	-
08	Q_5X3	C	0,94	0,80	1,60	1,40	-	-
08	Q_5X3	D	0,94	0,80	1,60	1,75	-	-
08	Q_JXE	A	5,20	-	1,10	2,40	-	-
08	Q_JXE	B	4,10	-	1,65	2,40	-	-
08	Q_JXE	C	4,10	-	2,20	2,40	-	-
08	Q_JXE	D	4,10	-	2,75	2,40	-	-
08	QFN	B	5,30	-	0,28	0,56	-	-
08	QFN	C	5,30	-	0,75	0,28	-	-
08	QFN	D	5,30	-	0,94	0,28	-	-
08	SAW	C	0,40	1,00	0,70	1,20	0,70	1,85
08	SAW	D	0,40	1,00	0,70	1,50	0,70	2,15

Tabelle 3: Verwendete Padmaße der „großen“ Leiterplatte

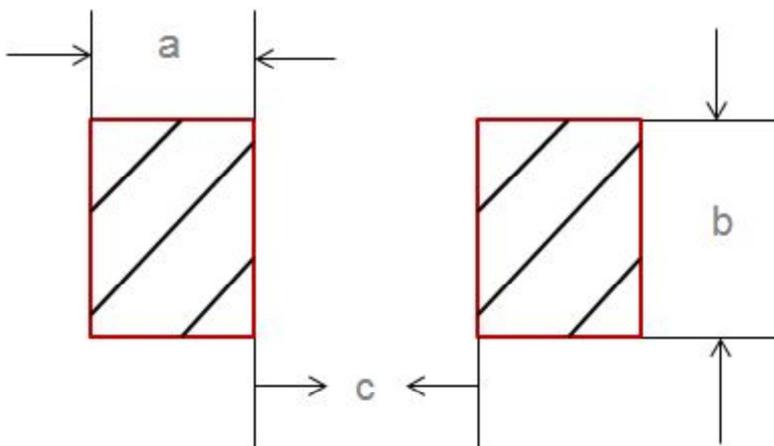


Abbildung 27: Padgeometrie der „kleinen“ Leiterplatte

a = Länge

b = Breite

c = Padabstand horizontal

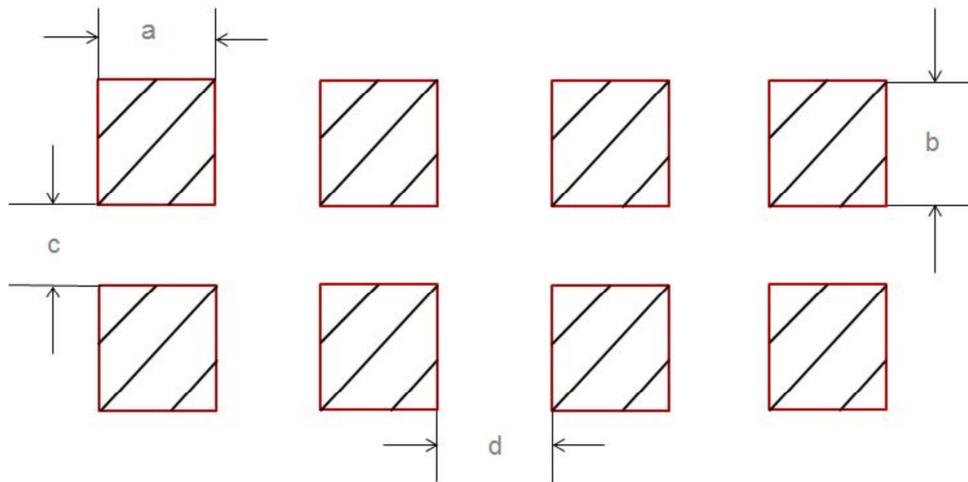


Abbildung 28: Padgeometrie der „großen“ Leiterplatte

- a = Länge
- b = Breite
- c = Padabstand vertikal
- d = Padabstand horizontal

Die Bauteile der „kleinen“ Leiterplatte sind in Abbildung 29 auf einer bestückten Leiterplatte zu sehen. Die „große“ bestückte Leiterplatte ist in Abbildung 30 dargestellt.

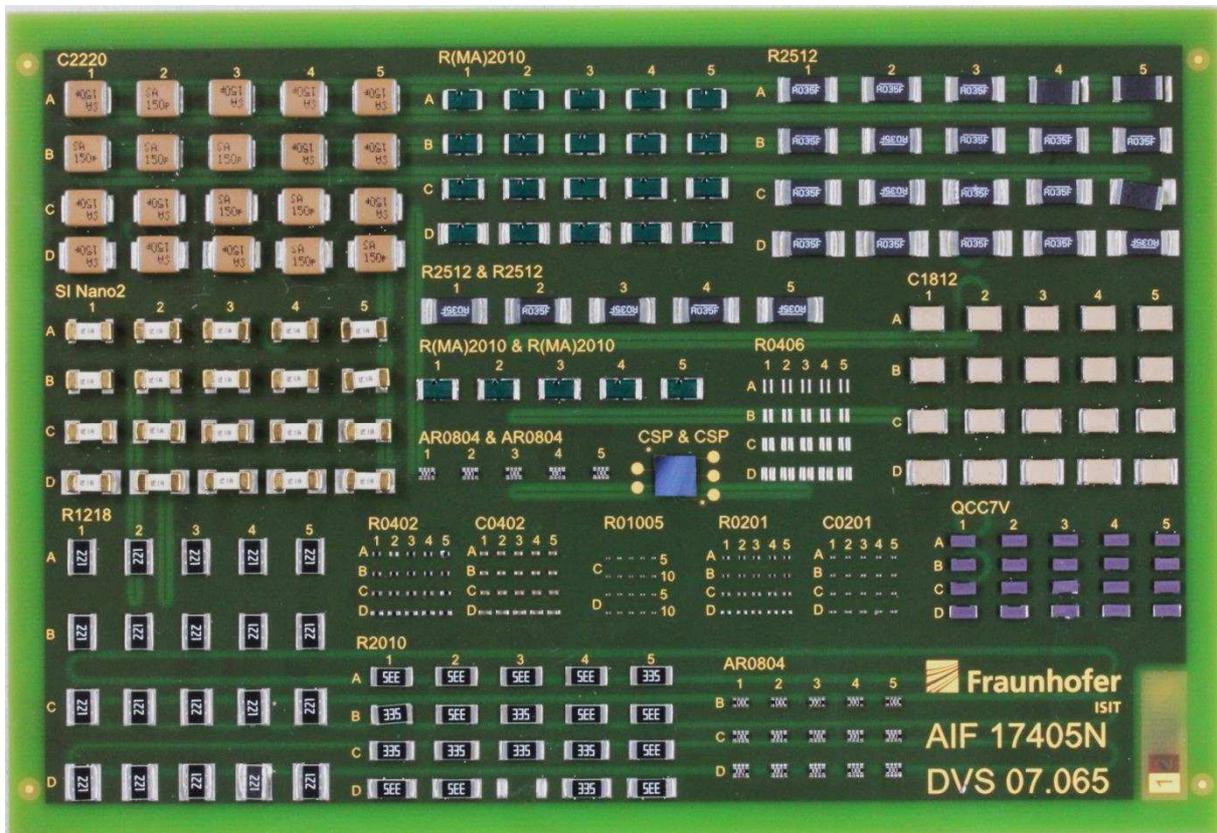


Abbildung 29: Bestückte „kleine“ Leiterplatte

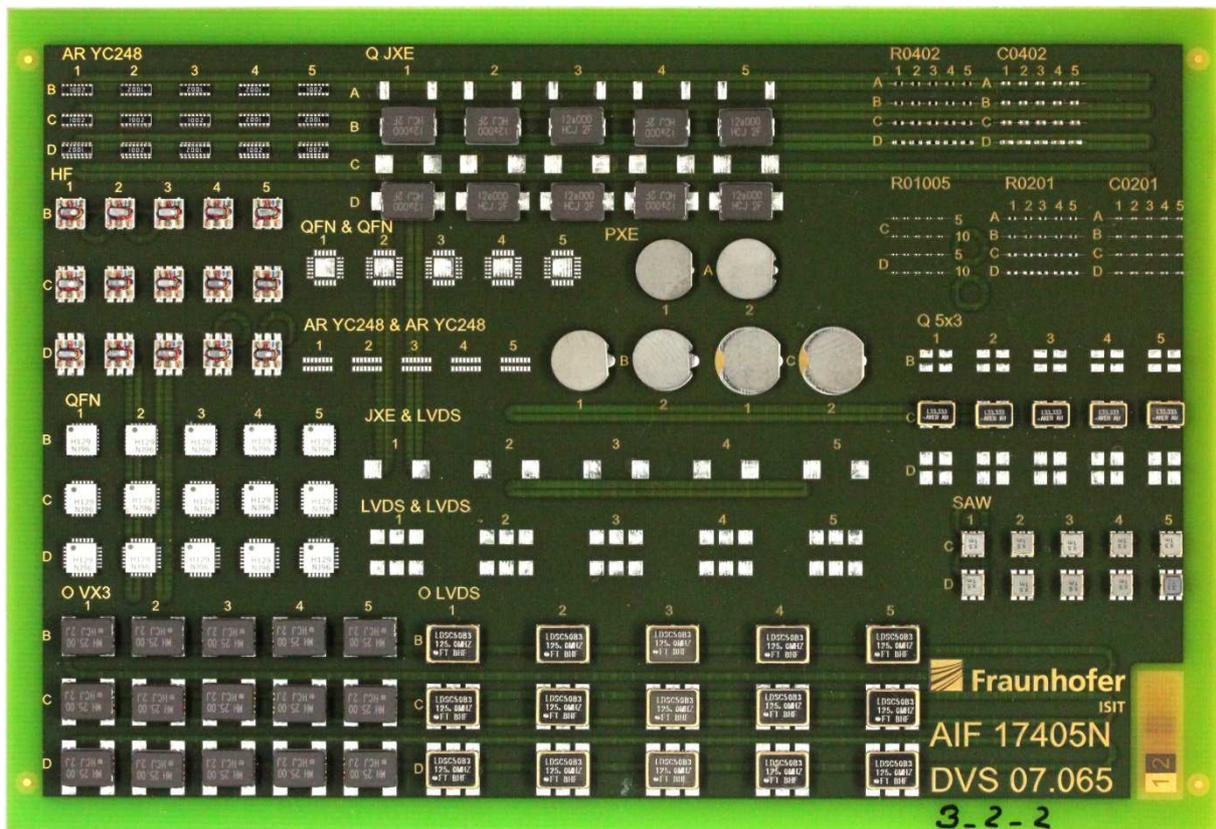


Abbildung 30: Bestückte „große“ Leiterplatte

3.2.3 Schablonen

Es hat sich in Versuchen gezeigt, dass eine Erhöhung des Lotspaltes, z.B. durch Lotmengen- und Pad-Layoutvariation ohne konstruktive Eingriffe (Leiterbahnzüge unter Bauteilen, künstliche Abstandshalter) nur bedingt möglich ist. Abhängig von der Bauteilgeometrie stellt sich zunächst ein konvexer Lotmeniskus ein, bevor der Lotspalt signifikant wächst. Solche konstruktiven Eingriffe werden in der Industrie nur ungern angewendet. Sie bergen zusätzliche Risiken wie z.B. Verkippen von Bauteilen durch Unterführung von Leiterbahnzügen oder erfordern zusätzliche Fertigungsschritte, z.B. durch das Einsetzen von Abstandhaltern. Aus diesen Gründen wurde auf solche Maßnahmen verzichtet.

Zu Testzwecken fertigte der Schablonenhersteller (Christian Koenen GmbH) eine Stufenschablone mit einer Standard-Blechdicke von 140µm. Je nach Bauteilgröße wurden passende Stufen basierend auf Erfahrungswerten des Schablonenherstellers angelegt. Die Öffnungen wurden mit der üblichen Reduzierung auf 90% angefertigt. Mit dieser Schablone wurden erste Druckversuche durchgeführt. Nach Auswertung der Ergebnisse und Berechnung der gewünschten Pastenvolumen wurden weitere Stufenschablonen in Auftrag gegeben. Alle Schablonen wurden elektropoliert und Plasma beschichtet.

Die verwendeten Schablonen wurden in einem Schnell-Spannrahmen-System beige-stellt.

Schablonenlayout

Ausgangsdaten für die Schablonengeometrie sind in Tabelle 4 angegeben. Die Schablonenöffnungen beziehen sich auf die Padfläche und bestimmen mit der Schablonendicke das gedruckte Lotvolumen.

Schablonenname	Schablonenöffnung	Schablonendicke
MIN	90%	100µm
STD	90%	140µm
MAX	150%	200µm

Tabelle 4: Schablonenvorschlag laut Projektantrag

Um zu überprüfen, ob die im Antrag angenommenen Parameter für die Schablonen noch angepasst werden müssen, wurden die folgenden Berechnungen angestellt. Die Rechnung wurde beispielhaft für das Bauteils C2220 durchgeführt. Für die anderen Bauteile ist die Vorgehensweise entsprechend. Ziel ist es, das Lotvolumen in geeigneter Weise zu variieren.

Die Fläche (A) berechnet sich aus den verwendeten Padmaßen von Länge und Breite der Pads. Diese stimmen gut mit den real gemessenen Werten auf der Leiterplatte überein.

$$A = L \cdot B$$

$$A = 3,5\text{mm} \cdot 0,7\text{mm}$$

$$A = 2,45\text{mm}^2$$

Dies ist die Fläche eines Pads und entspricht 100%.

Für die Minimum- und Standardschablonen (MIN und STD) sollen Öffnungen von 90% der Padfläche verwendet werden. 90% entsprechen 2,205mm². Mit einer Öffnung von 150% für die Maximum-Schablone (MAX) ergibt sich eine Fläche von 3,675mm².

Für die Berechnung des Volumens (V) wird die Schablonendicke (H) mit den Öffnungsflächen (A) multipliziert.

$$V = A \cdot H$$

Für die MIN-Schablone ergibt sich ein Volumen von $V = 2,205\text{mm}^2 \cdot 100\mu\text{m} = \underline{0,2205\text{mm}^3}$. Für die STD-Schablone ergibt sich ein Volumen von $V = \underline{0,3087\text{mm}^3}$. Bei der MAX-Schablone entsteht ein Volumen von $V = \underline{0,735\text{mm}^3}$.

Nach Druckversuchen und Messungen der SPI mit der STD-Schablone ergibt sich für das Pad A1 folgender Wert für das Volumen: $253983616,0\mu\text{m}^3 \cong \underline{0,254\text{mm}^3}$.

Im Vergleich des berechneten und gemessenen Wertes zeigt sich, dass der berechnete theoretisch zu erwartende Wert (0,309mm³) etwas höher ist, als der gemessene (0,254mm³).

Der gemessene Wert ist etwas kleiner, da die Öffnungen der Schablone leicht abgerundet sind. Dies wurde in den überschlägigen Berechnungen nicht berücksichtigt. Außerdem muss beachtet werden, dass beim Drucken geringe Mengen Lotpaste in

den Öffnungen der Schablone hängen bleiben und sich somit das übertragene Volumen verkleinert. Es kann daher angenommen werden, dass Messung und Berechnung (unter Annahme der vereinfachten Flächenermittlung) zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

Für die MAX-Schablone soll eine maximale Schablonendicke von 200µm nicht überschritten werden. Aus den Berechnungen und Volumenmessungen ergibt sich, dass somit das Lotpastenvolumen bei ca. 225% liegt. Überlegungen zur Lotspalterhöhung und Lotvolumenvergrößerung sehen als sinnvolle Zielvorgabe für die geplanten Untersuchungen das maximale Lotpastenvolumen jedoch bei ca. dem vierfachen des Nominalvolumens. Somit muss die Schablonenöffnung deutlich vergrößert werden. Es ergibt sich eine Öffnungsfläche von ca. 250%.

Um alle geplanten Variationen und weitere Zwischenstufen realisieren zu können, wird eine zusätzliche Schablone (MITTEL) eingeführt. Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen die ausgewählten Schablonen mit ihren Basisstärken und Abstufungen. In Tabelle 7 ist das theoretische Lotpastenvolumen berechnet.

BT	MIN	STD	MITTEL / MAX
	Dicke [µm] / Öffnung [%]	Dicke [µm] / Öffnung [%]	Dicke [µm] / Öffnung [%]
C2220	100 / 90	140 / 90	160 / 150
R(MA)2010	100 / 90	140 / 90	160 / 150
R2512	100 / 90	140 / 90	200 / 250
SI Nano2	100 / 90	140 / 90	200 / 250
R1218	100 / 90	140 / 90	200 / 250
R2010	100 / 90	140 / 90	200 / 250
C1812	100 / 90	140 / 90	160 / 150
QCC7V	100 / 90	140 / 90	160 / 150
R0406	100 / 90	140 / 90	160 / 150
AR0804	80 / 90	120 / 90	160 / 150
R0402	70 / 90	120 / 90	120 / 150
C0402	70 / 90	120 / 90	120 / 150
R0201	70 / 90	120 / 90	120 / 150
C0201	70 / 90	120 / 90	120 / 150
R01005	50 / 90	90 / 90	120 / 150
CSP	100 / 90	140 / 90	160 / 150

Tabelle 5: Schablonenauswahl „klein“

BT	MIN	MITTEL	STD	MAX
	Dicke [μm] / Öffnung [%]			
AR YC248	-	-	140 / 90	-
QJXE	-	-	140 / 90	200 / 250 (B)*
HF	-	-	140 / 90	200 / 250
QFN	-	-	140 / 90	-
O VX3	-	-	140 / 90	-
O LVDS	-	-	140 / 90	-
Q 5x3	-	-	140 / 90	200 / 250
SAW	-	-	140 / 90	200 / 250 (C)*
PXE	-	-	140 / 90	-
R0402	60 / 90	90 / 90	120 / 90	-
C0402	60 / 90	90 / 90	120 / 90	-
R0201	60 / 90	90 / 90	120 / 90	-
C0201	60 / 90	90 / 90	120 / 90	-
R01005	45 / 90	70 / 90	90 / 90	-

Tabelle 6: Schablonenauswahl „groß“

* Bei den Bauteilen QJXE wurde nur die Position B auf der Schablone verändert und bei dem SAW nur Position C.

BT	MIN [%]	MITTEL [%]	STD [%]	MITTEL/MAX [%] bzw. MAX [%]
C2220	71	-	100	190
R(MA)2010	71	-	100	190
R2512	71	-	100	397
SI Nano2	71	-	100	397
R1218	71	-	100	397
R2010	71	-	100	397
C1812	71	-	100	190
QCC7V	71	-	100	190
QJXE	-	-	100	397
HF	-	-	100	397
Q5X3	-	-	100	397
SAW	-	-	100	397
R0406	71	-	100	190
AR0804	67	-	100	222
R0402	50	75	100	167
C0402	50	75	100	167
R0201	50	75	100	167
C0201	50	75	100	167
R01005	50	78	100	222
CSP	71	-	100	190

Tabelle 7: Theoretisches Lotpastenvolumen

Abbildung 31 bis Abbildung 34 zeigen das Layout der einzelnen Schablonen mit den eingezeichneten Stufen.

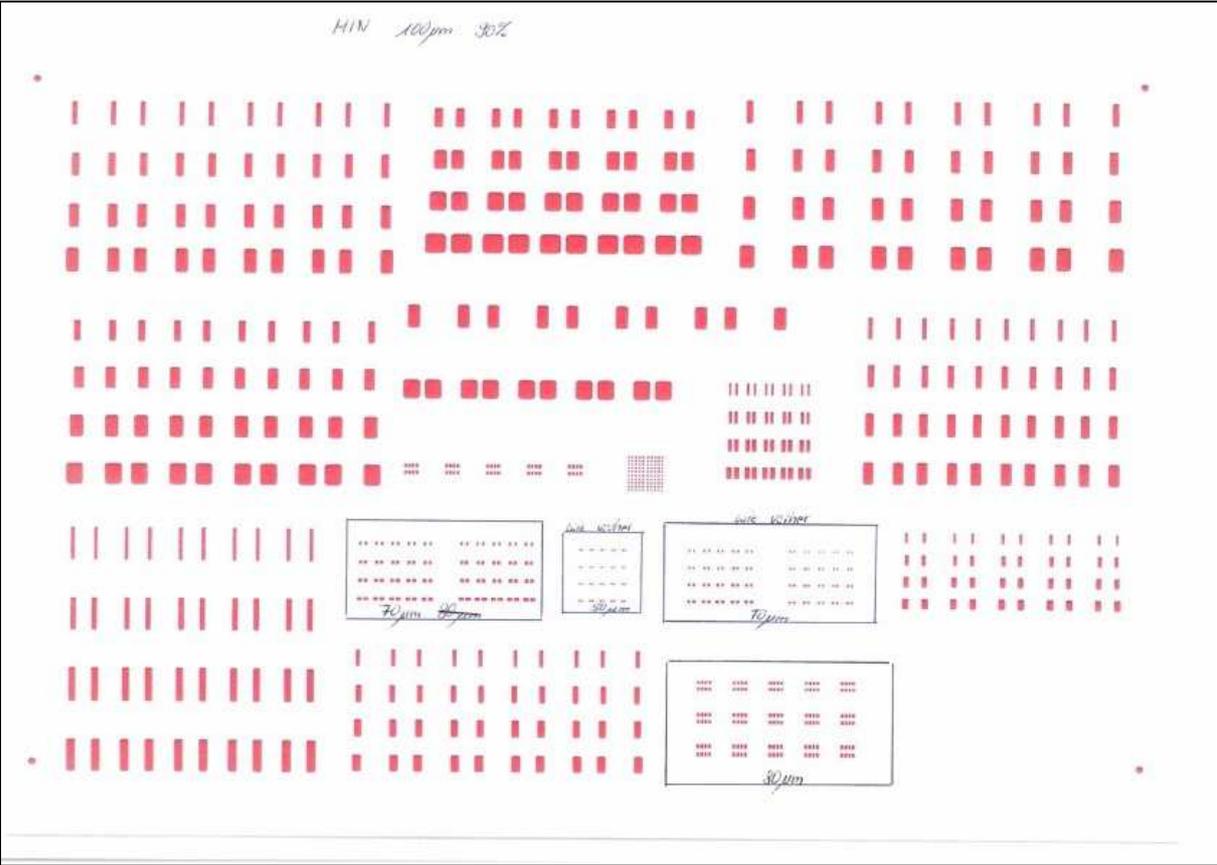


Abbildung 31: Schablonenlayout MIN

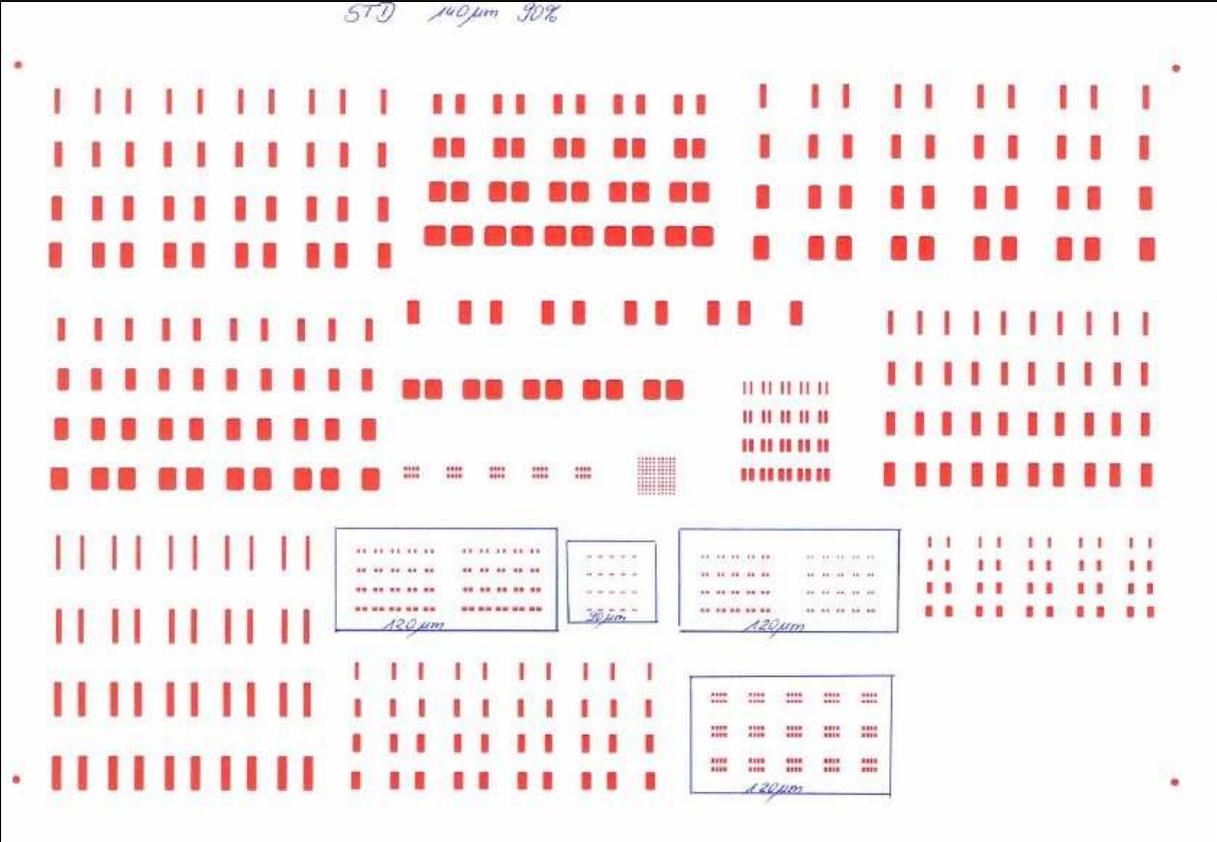


Abbildung 32: Schablonenlayout STD

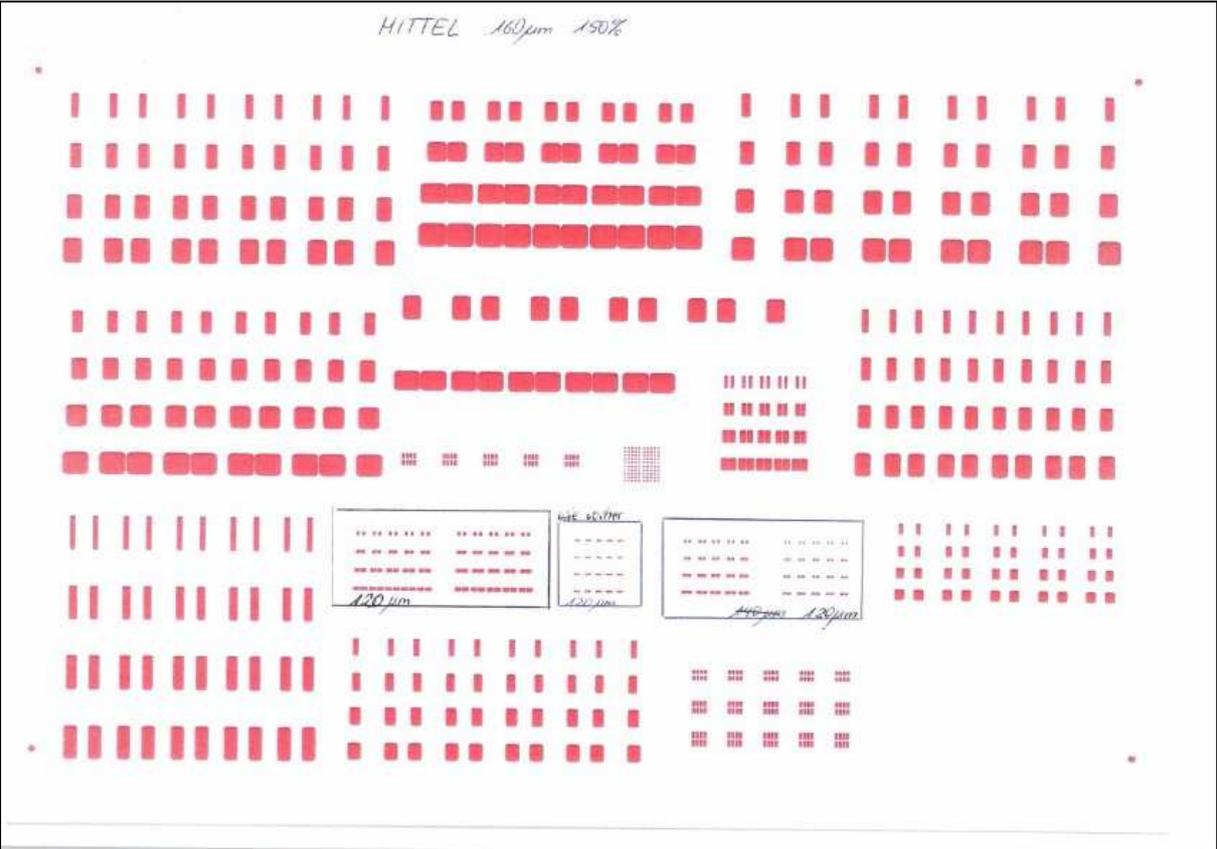


Abbildung 33: Schablonenlayout MITTEL

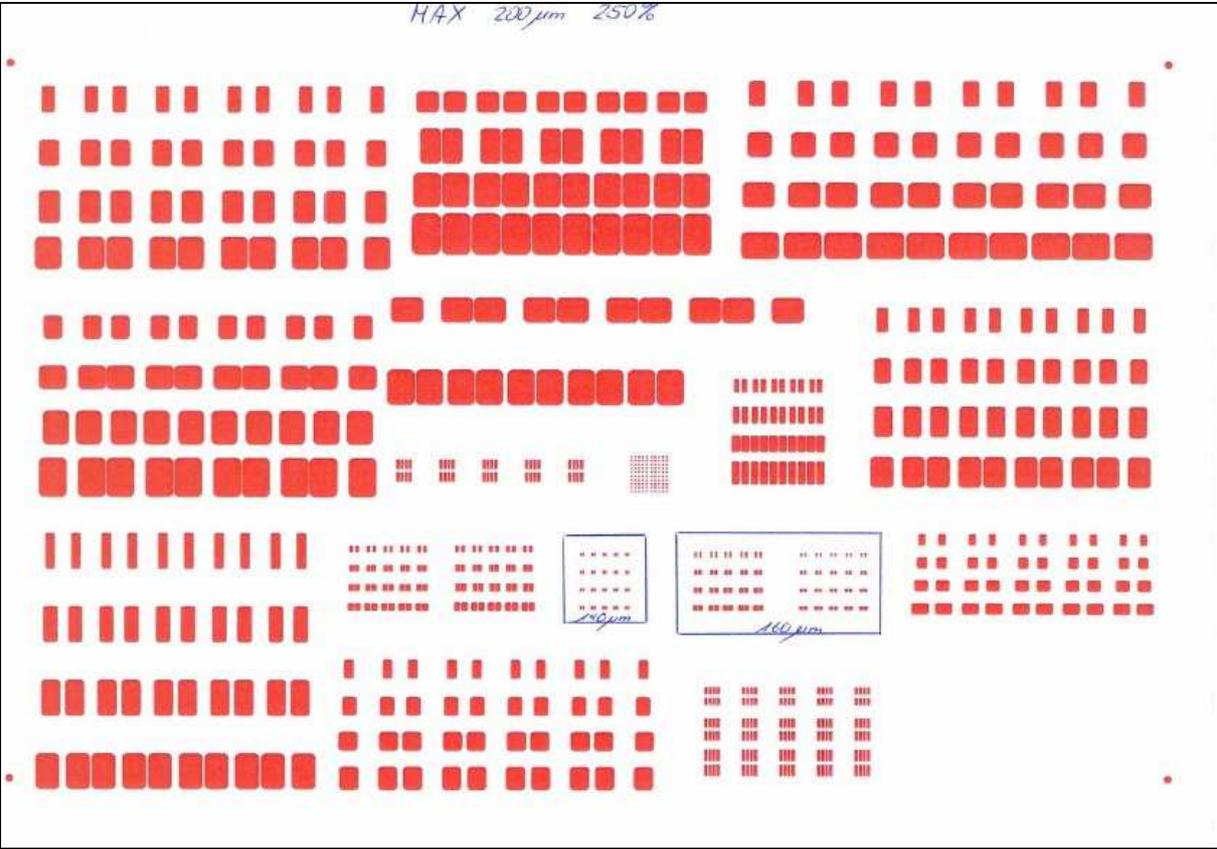


Abbildung 34: Schablonenlayout MAX

3.2.4 Lot

Eine Weichlotpaste ist eine pastöse Mischung aus Metallpulver, Flussmittel, Harz und Additiven. Zum Löten von oberflächenmontierten Bauteilen besteht eine Lotpaste je nach Zusammensetzung und Art der Aufbringung zu ca. 90 Gewichtsprozent aus Metall und zu ca. 10 Gewichtsprozent aus Flussmittel.

Lotpasten werden nach J-STD-005 über die Kugelgröße klassifiziert, siehe Tabelle 8.

Typ	Weniger als 0,5% größer als	Max 10% zwischen	Min. 80% zwischen	Max. 10% kleiner als
1	160µm	150 - 160µm	75 - 150µm	75µm
2	80µm	75 - 80µm	45 - 75µm	45µm
3	60µm	45 - 60µm	25 - 45µm	25µm
4	50µm	38 - 50µm	20 - 38µm	20µm
5	40µm	25 - 40µm	10 - 25µm	15µm
6	25µm	15 - 25µm	5 - 15µm	5µm
7	15µm	11 - 15µm	2 - 11µm	2µm

Tabelle 8: Klassifizierung der Kugelgrößen [9]

Die im Projekt verwendeten Lotpasten sind ihrer Kugelgröße entsprechend Typ 4. In Abstimmung mit dem Projektausschuss werden drei Lotpasten ausgewählt, die untersucht werden sollen. Als Lotlegierung werden die für den bleifreien Lötprozess standardmäßig eingesetzte SAC-Lotlegierung (SAC305), eine mikrolegierte Variante (SCANGe) und eine niedrigschmelzende Variante (BSA1) definiert. Tabelle 9 führt die Legierungen, ihre Zusammensetzungen und den Schmelzpunkt auf.

Lotbezeichnung	Legierungszusammensetzung	Schmelztemperatur
SAC305 (Standard)	Sn96,5Ag3Cu0,5	217 - 219°C
SCANGe (mikrolegiert)	SnCu0,7Ag1,0NiGe	217 - 224°C
BSA1 (niedrig schmelzend)	Bi57Sn42Ag1	140°C

Tabelle 9: Lotlegierungen

3.3 Aufbau der Baugruppen

3.3.1 Lotpastendruck

Folgende Parameter beeinflussen den Lotpastendruck:

- Trenngeschwindigkeit
- Druckgeschwindigkeit
- Rakeldruck
- Schablonendicke
- Auslöseverhalten der Schablone
- Viskosität der Paste
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Um die optimalen Druckparameter für die verwendeten Lotpasten zu finden, wurden unterschiedliche Einstellungen getestet und anschließend mit der SPI ausgewertet. Es wurde eine 60°-Rakel verwendet.

Damit sich die Leiterplatte unter dem Druck des Rakels nicht wölbt und es somit zu undefinierten Lotdepots kommt, wurde die Leiterplatte unterstützt. Zum Einsatz kam zuerst ein Vakuum Nest, wie in Abbildung 10 gezeigt. Die Druckversuche mit der Vakuum-Unterstützung lieferten jedoch für die hohen Ansprüche an die Reproduzierbarkeit kein optimales Druckbild. Daher wurde für die Untersuchungen die Magnet-Pin-Unterstützung eingesetzt (Abbildung 11).

In den Versuchen wird mit einem Einfach-Druck in nur eine Richtung gearbeitet, um den möglichen Einfluss der Rakelrichtung auf den Lotpastenauftrag zu eliminieren. Eine Rakelkraft von 4kg bei einer Geschwindigkeit von 40mm/s erzeugte bei allen Lotpasten gute Druckdepots.

Folgende Programmeinstellungen wurden für alle drei Lotpasten verwendet:

Name:	AiF 17405N
Anschlag:	340
LP Länge:	160mm
LP Breite:	110,2mm
LP Stärke:	1,5mm
Unterstützung:	magnetisch
LP Marken:	X1: 2,5mm, X2: 156,9mm Y1: 7,7mm, Y2: 103,4mm
Druckgeschwindigkeit :	40mm/s
Rakeldruck:	4,0kg
Trenngeschwindigkeit:	0,5mm/s
Trennabstand:	0,5mm
Reinigung:	keine

3.3.2 Raum-Temperatur- und Feuchtemessung

Da der Lotpastendruckprozess stark Temperatur- und Feuchte abhängig ist, wurde das Raumklima während des Aufbaus der Baugruppen überwacht. Dies geschah mittels mobiler Messgeräte, die die Feuchte und die Temperatur erfassen und speichern. Sensor TC10 befand sich im Bestücker, TC20 im Drucker. Mit dem im Drucker fest installierten Temperatur- und Feuchtemessgerät wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt.

Die Messergebnisse (Abbildung 35 bis Abbildung 46) zeigten eine durchschnittliche Feuchtigkeit zwischen ca. 38% - 48% r.F. und eine Raumtemperatur bzw. Temperatur innerhalb der Fertigungsgeräte zwischen ca. 23°C - 25,5°C. Zu Zeiten, in denen diese Bereiche signifikant verlassen wurden, wurden die Arbeiten unterbrochen bzw. waren bereits beendet, siehe z.B. Abbildung 37 und Abbildung 39.

Ein negativer Einfluss der Klimabedingungen auf das Druck- und Lötergebnis kann ausgeschlossen werden.

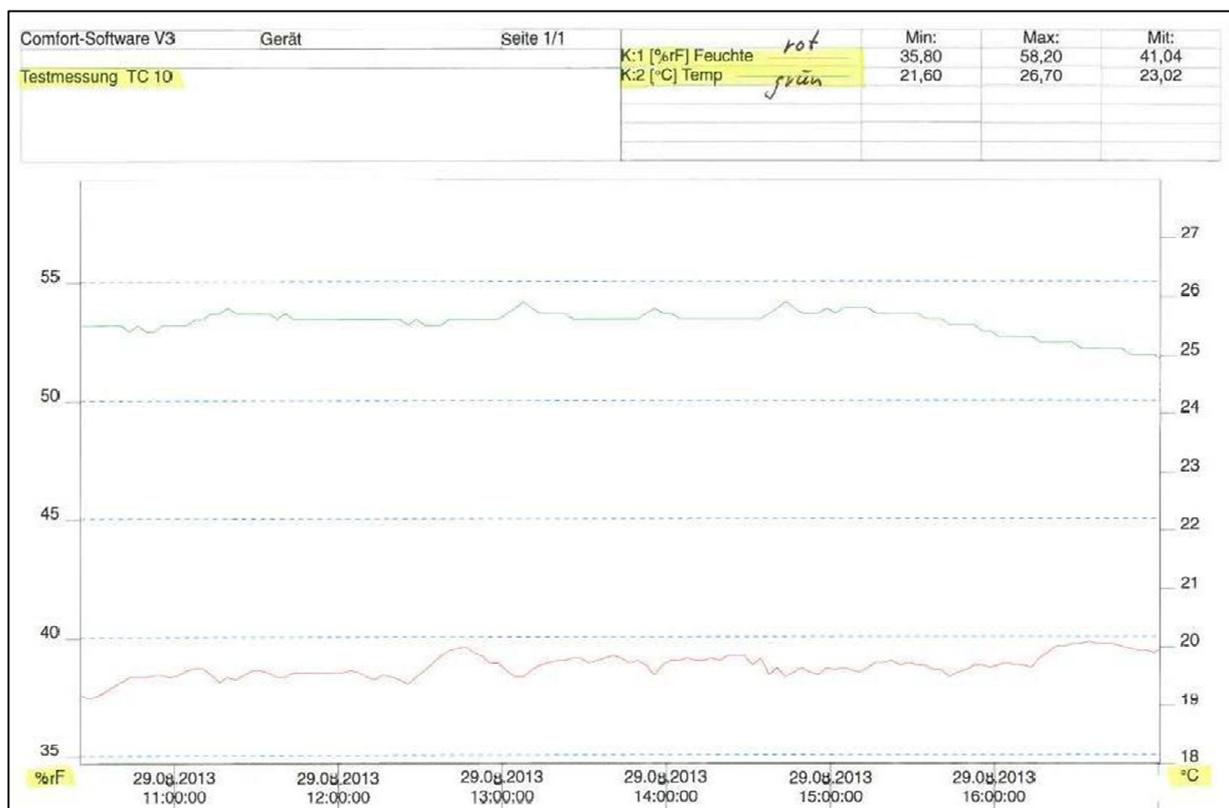


Abbildung 35: Temperatur- und Feuchtemessung TC10, SAC305-Fertigung

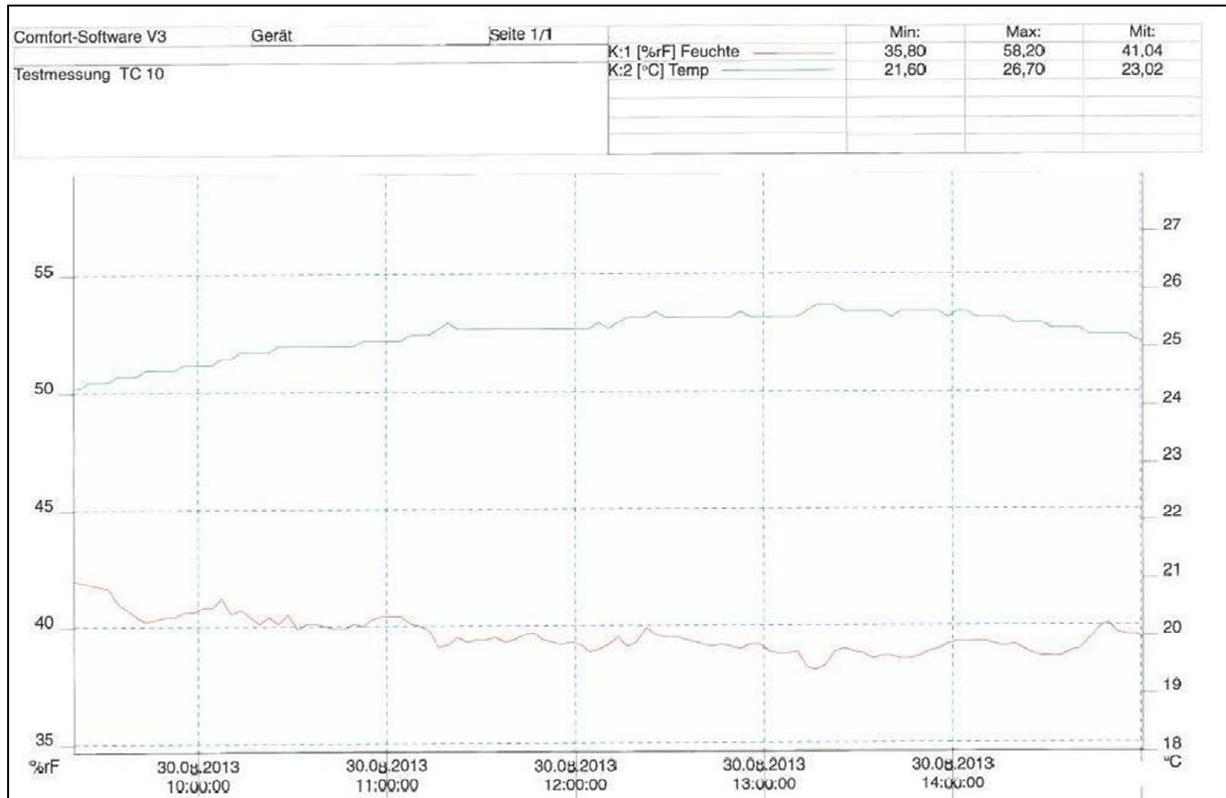


Abbildung 36: Temperatur- und Feuchtemessung TC10, SCANGe-Fertigung

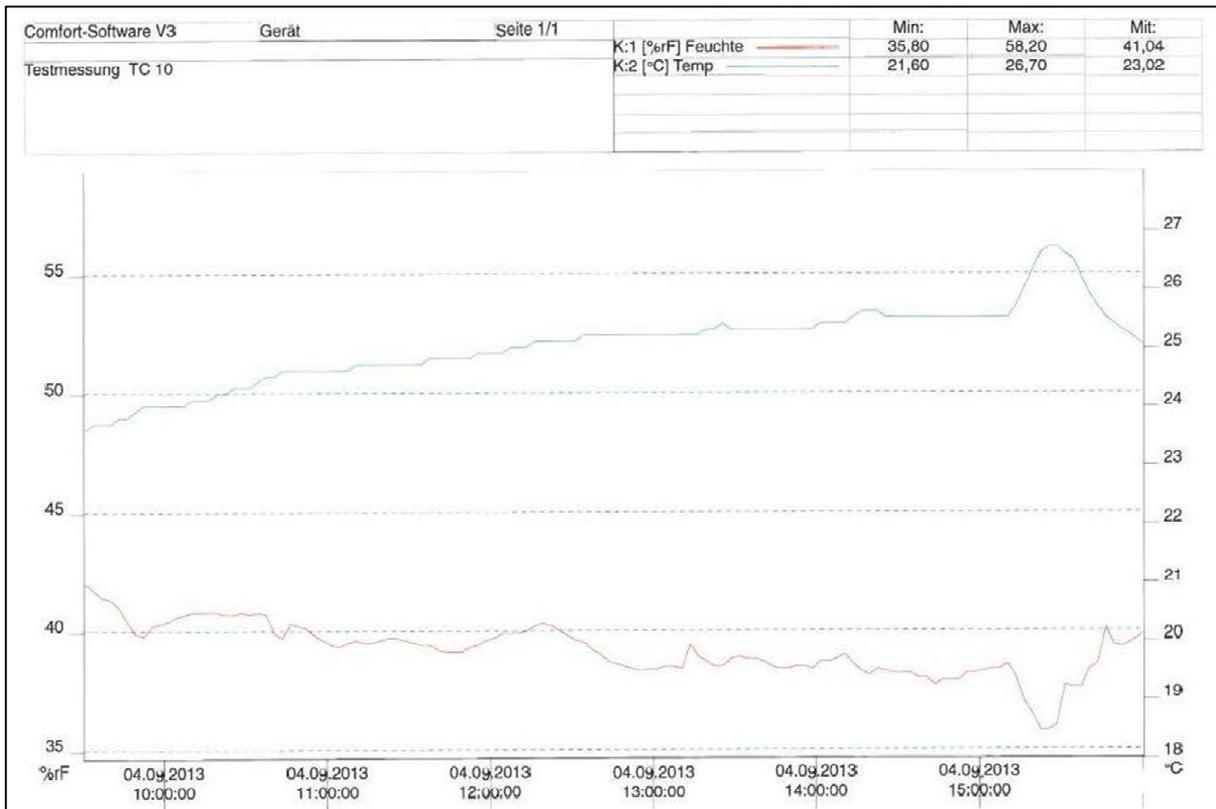


Abbildung 37: Temperatur- und Feuchtemessung TC10, BSA1-Fertigung

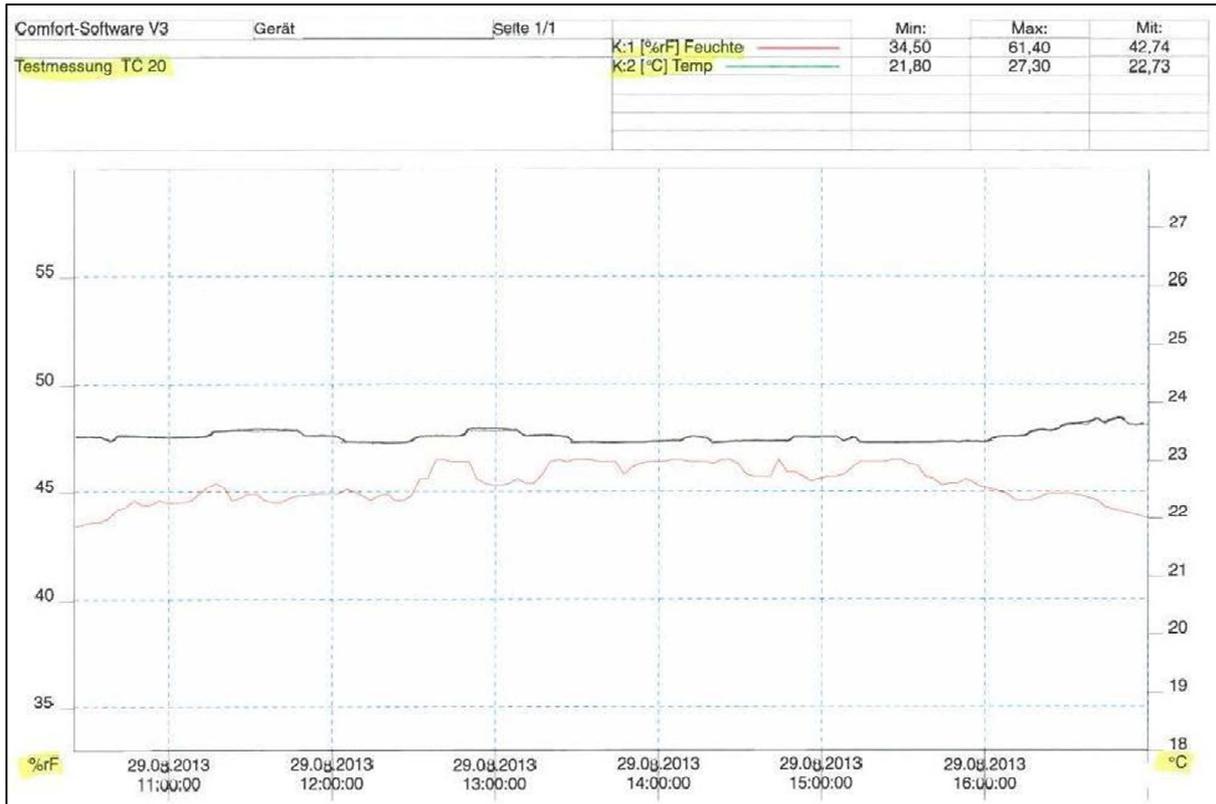


Abbildung 38: Temperatur- und Feuchtemessung TC20, SAC305-Fertigung

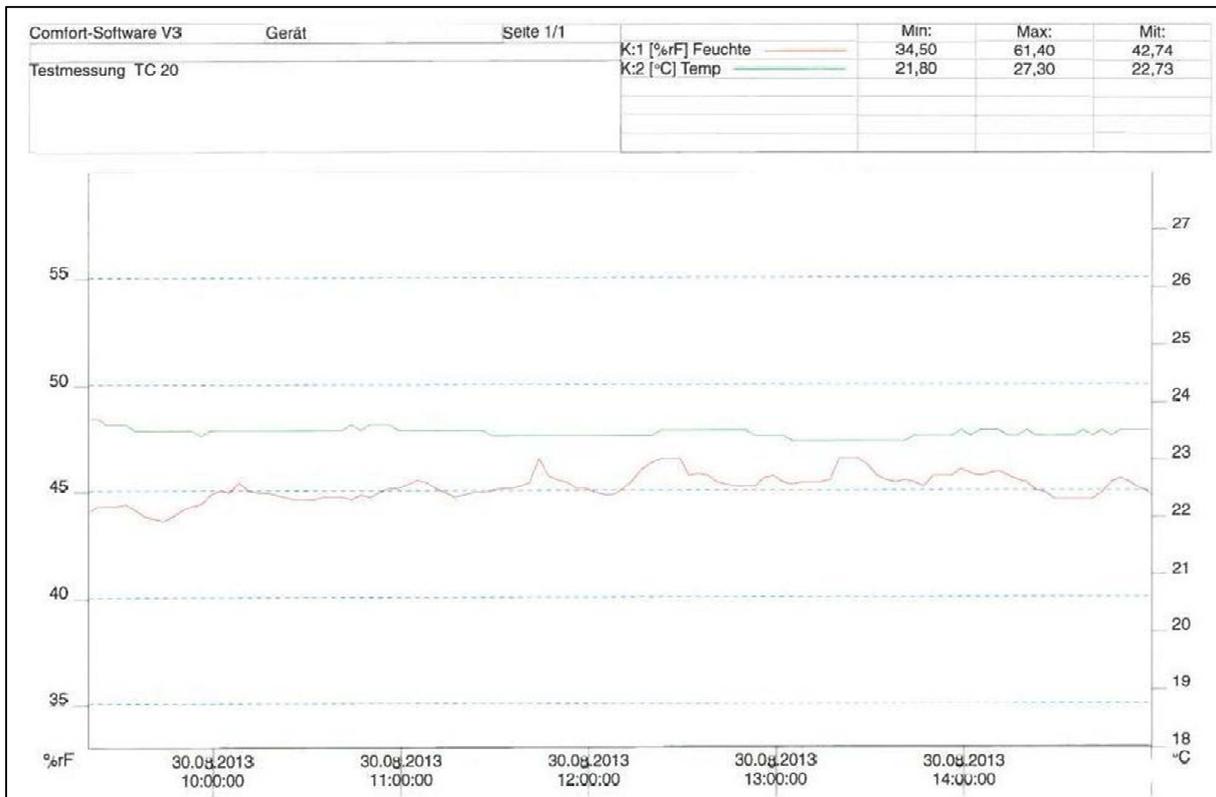


Abbildung 39: Temperatur- und Feuchtemessung TC20, SCANGe-Fertigung

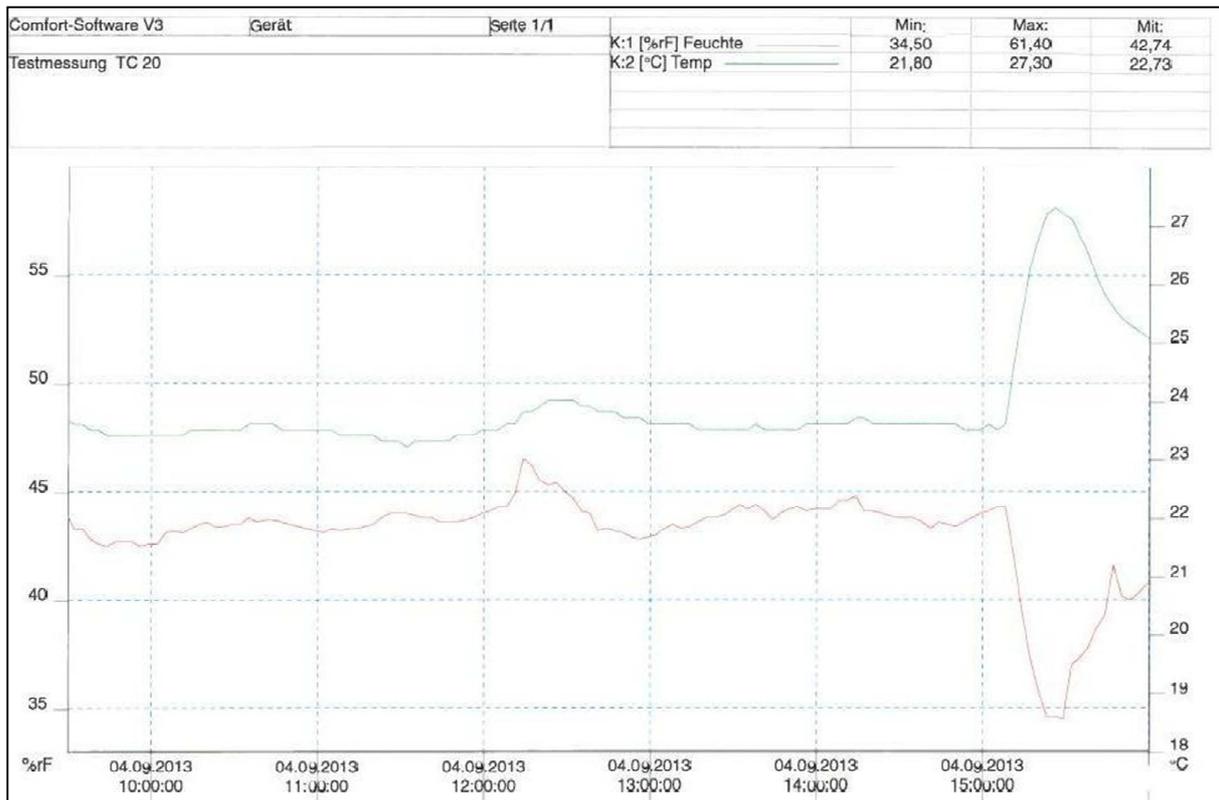


Abbildung 40: Temperatur- und Feuchtemessung TC20, BSA1-Fertigung

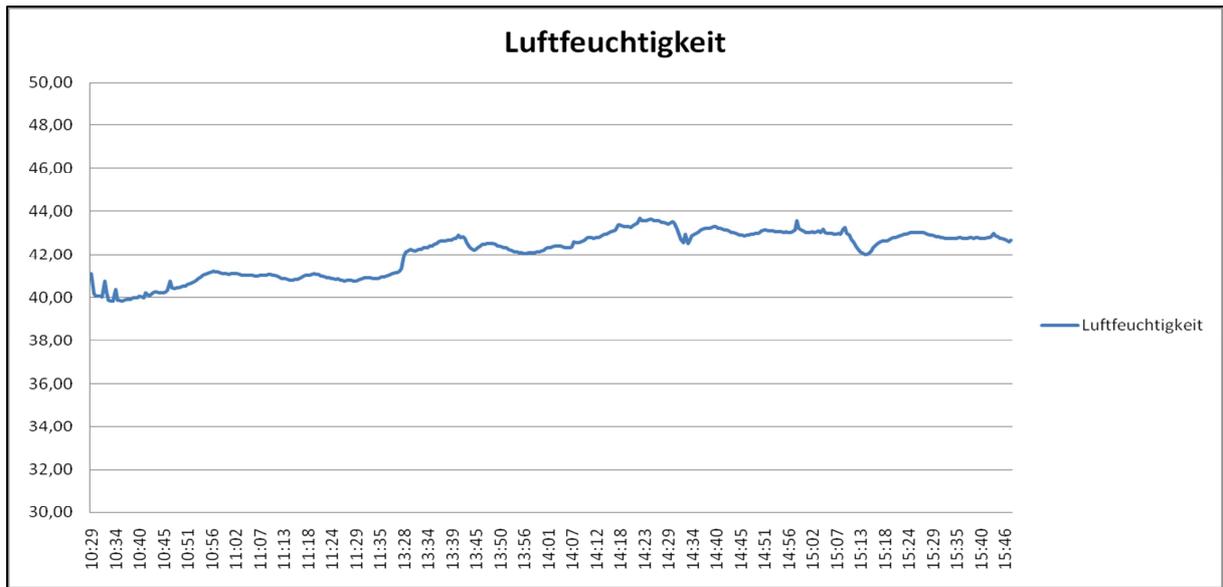


Abbildung 41: Vergleichsmessung, Luftfeuchte während der SAC305-Fertigung

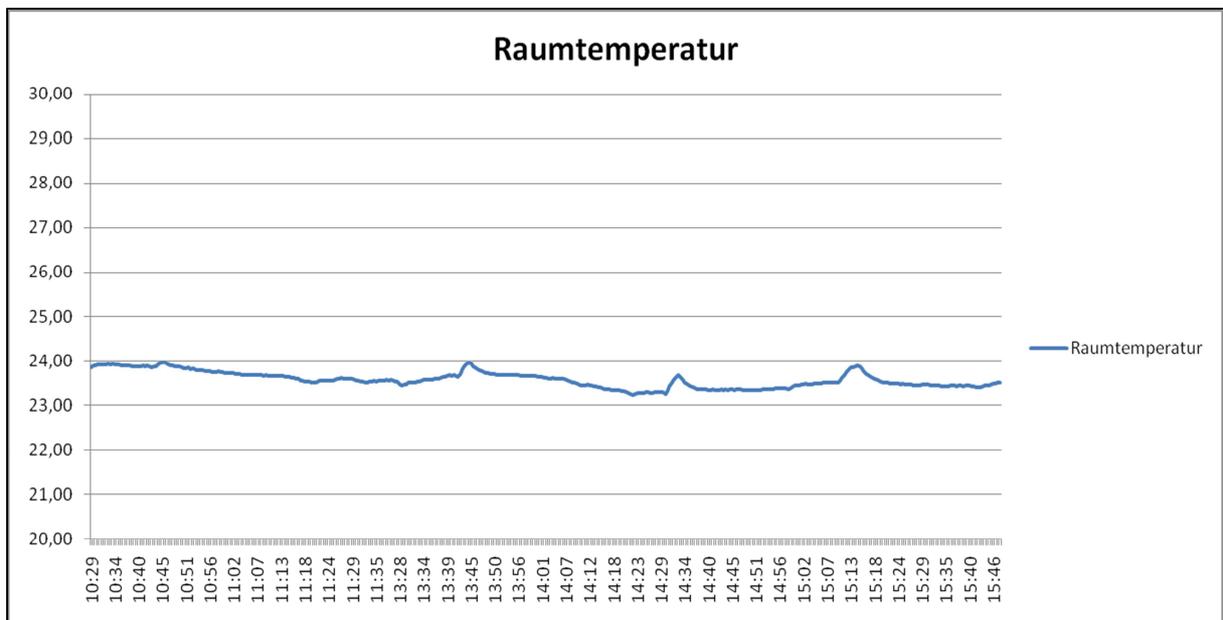


Abbildung 42: Vergleichsmessung, Temperatur während der SAC305-Fertigung

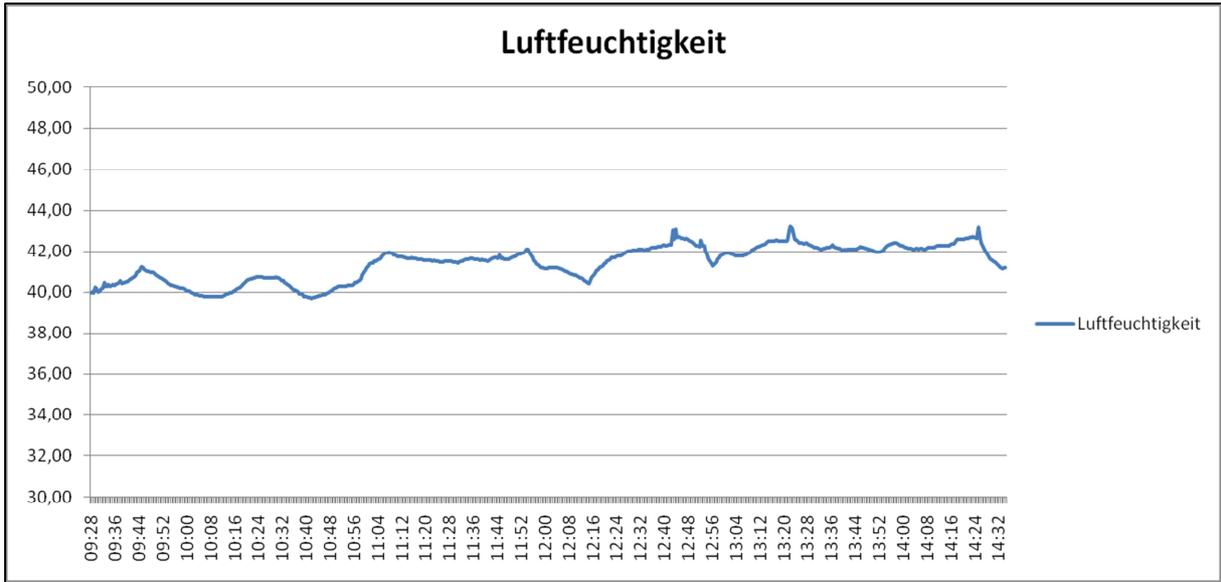


Abbildung 43: Vergleichsmessung, Luftfeuchte während der SCANGe-Fertigung

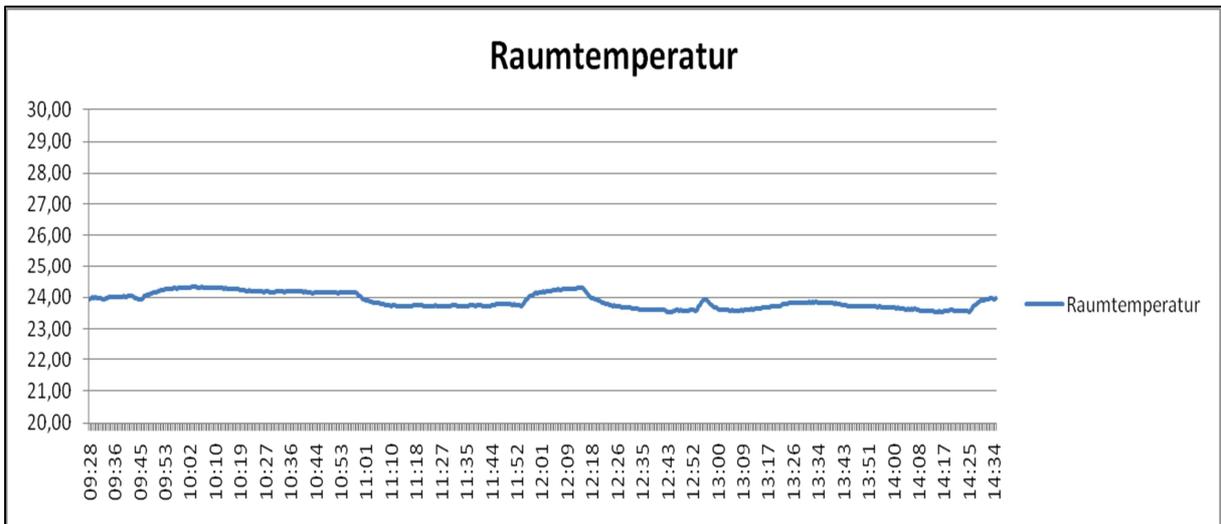


Abbildung 44: Vergleichsmessung, Temperatur während der SCANGe-Fertigung

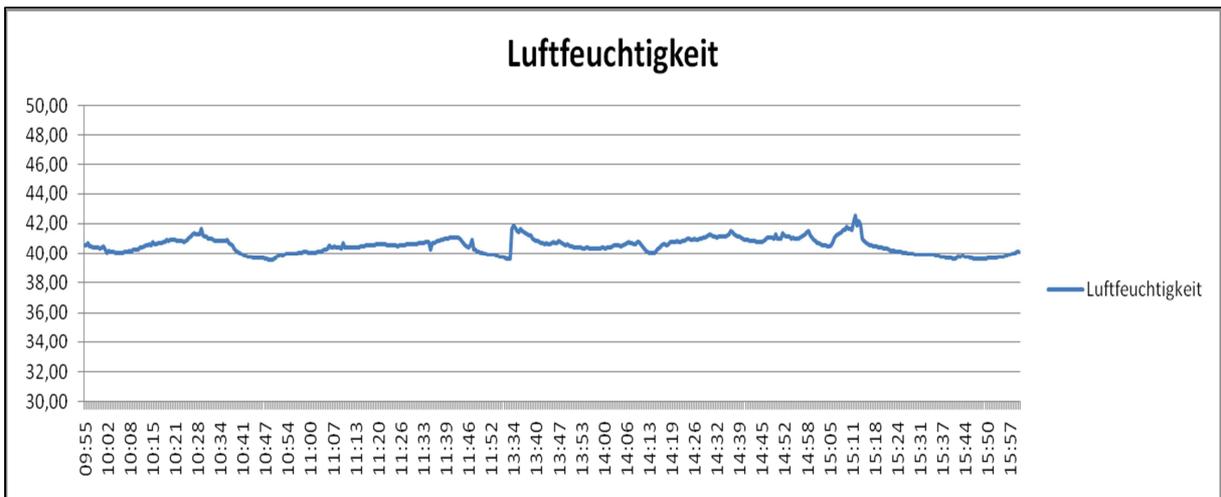


Abbildung 45: Vergleichsmessung, Luftfeuchte während der BSA1-Fertigung

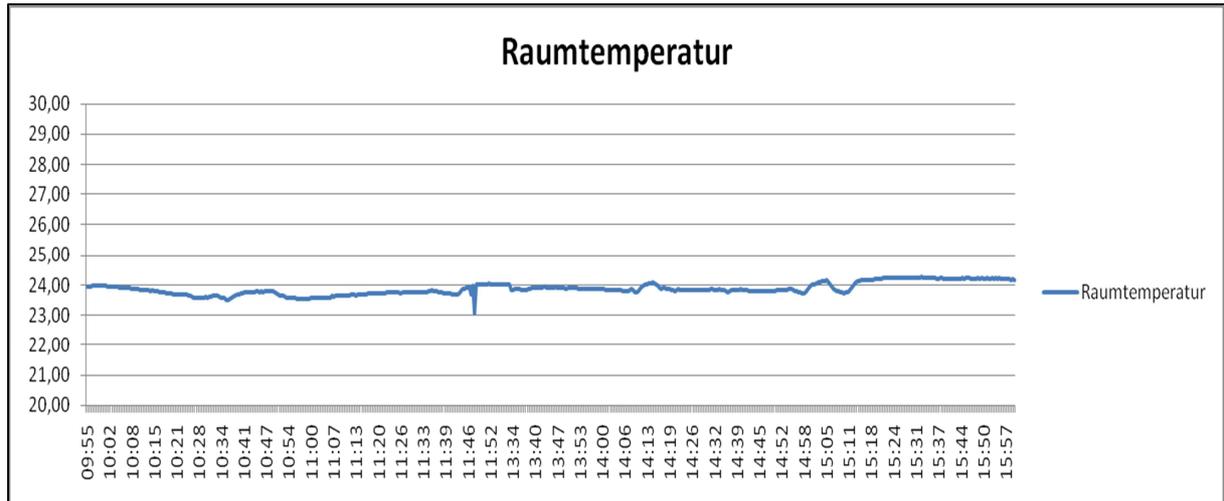


Abbildung 46: Vergleichsmessung, Temperatur während der BSA1-Fertigung

3.3.3 Lötprofilerstellung

Um die optimalen Ergebnisse zu erhalten, muss ein passendes Lötprofil ermittelt werden. Dafür gibt es ein im ISIT entwickeltes Simulationsprogramm. Dort wurden die Daten der Baugruppe und das Sollprofil gemäß Datenblatt der Lotpaste(n) eingetragen. Dann wurde das optimale Profil errechnet. Eine hohe Anzahl an aufwendigen Temperaturmessungen wird so auf maximal zwei Messungen je Profil reduziert.

Im Folgenden sind die mit Thermoelementen verdrahteten Messboards zu sehen. Es werden je Board acht Thermoelemente verwendet. Abbildung 47 zeigt die verdrahtete „kleine“ Leiterplatte. Die Thermoelemente sind wie folgt angebracht:

- 1 C2220 D3 Lötstelle
- 2 C2220 D4 Top
- 3 C2220 A4 Top
- 4 LP Mitte
- 5 R0402 A5 am BT
- 6 Si Nano2 C3 Top
- 7 R2512 C3 Top
- 8 QCC7V D3 am BT

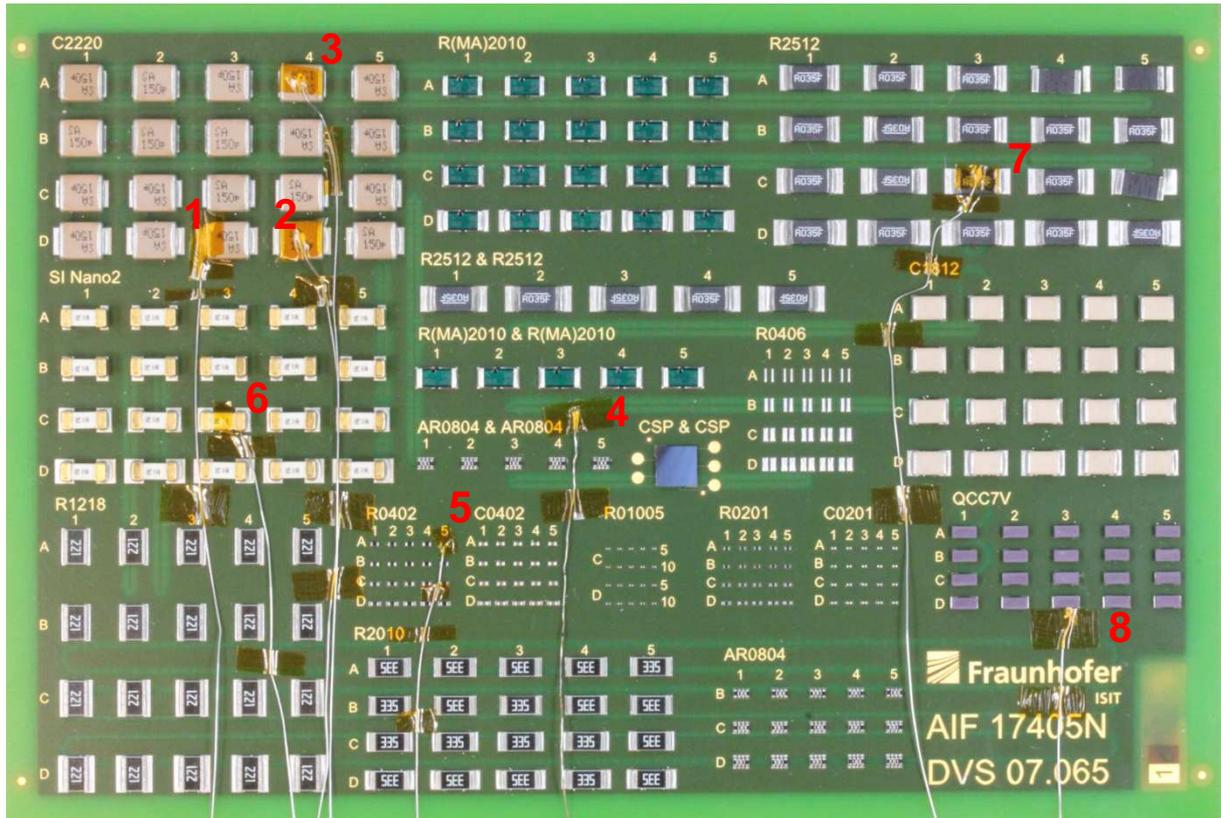


Abbildung 47: Thermoelementverdrahtung auf der „kleinen“ Leiterplatte

Abbildung 48 zeigt die Thermoelementverdrahtung auf der „großen“ Leiterplatte. Für die „große“ Leiterplatte ergeben sich folgende Messpositionen:

- 1 PXE Top
- 2 HF LP
- 3 OLVDS Top
- 4 QJXE
- 5 AR YC248
- 6 LP Mitte
- 7 QFN
- 8 SAW

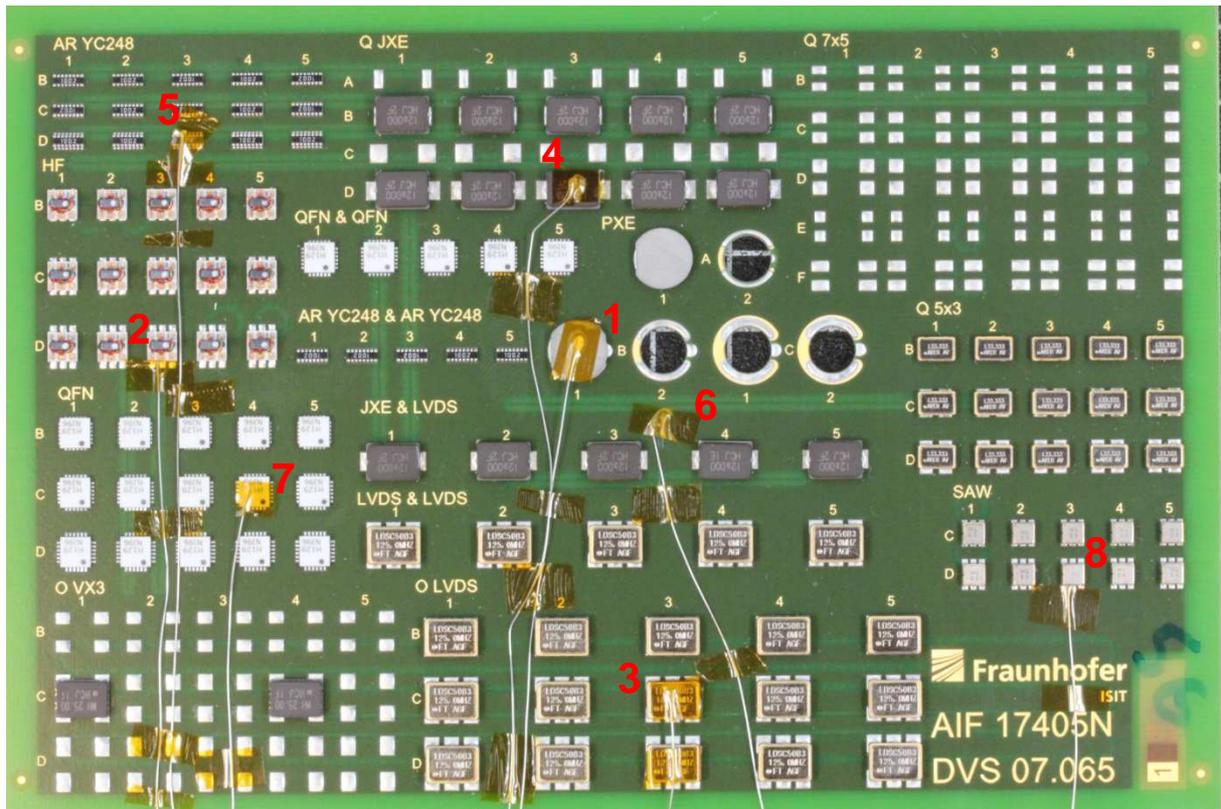


Abbildung 48: Thermoelementverdrahtung auf der „großen“ Leiterplatte

Lötprofile und Profilparameter für die drei Lotvarianten der „großen“ und der „kleinen“ Leiterplatte werden in den folgenden Abbildungen (Abbildung 49 bis Abbildung 56) dargestellt. SAC305 und SCANGe wurden mit dem gleichen Lötprofil verarbeitet.

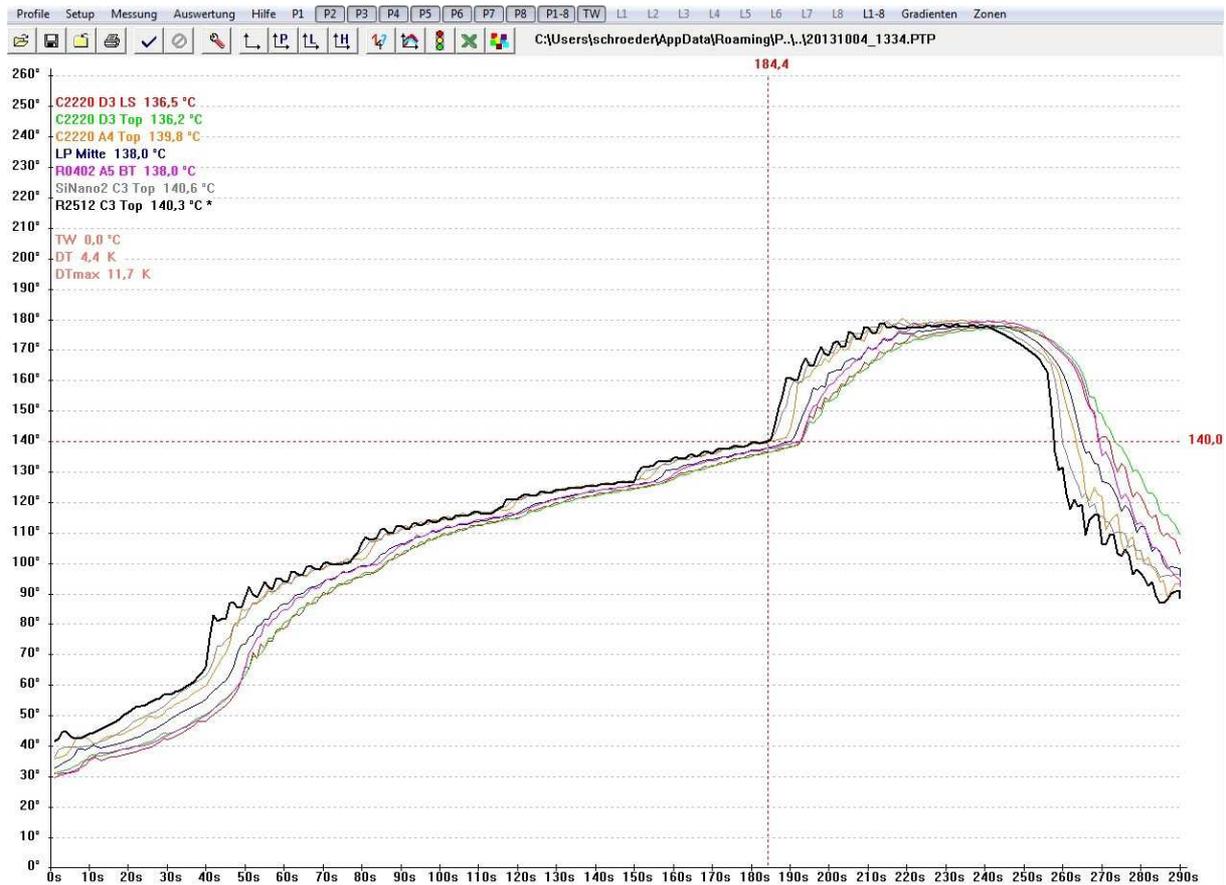


Abbildung 49: LP „klein“, BSA1 Lötprofil

Bewertung Profilparameter .. alle t in [s] - alle T in [C°]

Bewertungsparameter

Profilname	Bewertung	t gesamt	t vor	t über	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
<input checked="" type="checkbox"/> R2512 C3 Top	31.74	285	183	74	28	179.6	2.76	5.36

Aktuelles Profil Bewertung Profilliste

8.51 25.10 21.84 71.41 28.64 34.94

Profilliste

Profilname	Bewertung	t gesamt	t vor	t über	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
<input checked="" type="checkbox"/> 1 C2220 D3 LS	51.66	272	166	78	28	178.2	2.15	3.30
<input checked="" type="checkbox"/> 2 LP Mitte	50.75	282	175	75	32	178.3	2.28	3.56
<input checked="" type="checkbox"/> 3 R0402 A5 BT	50.00	274	170	76	28	179.5	2.44	4.06
<input checked="" type="checkbox"/> 4 C2220 D3 Top	44.22	275	170	80	25	177.3	1.89	2.70
<input checked="" type="checkbox"/> 5 S1	44.09	269	165	76	28	180.5	2.73	4.36
<input checked="" type="checkbox"/> 6 SiNano2 C3 Top	43.18	283	173	77	33	179.6	2.56	4.72
<input checked="" type="checkbox"/> 7 C2220 A4 Top	38.65	287	178	79	30	180.5	2.65	4.86
<input checked="" type="checkbox"/> 8 R2512 C3 Top	31.74	285	183	74	28	179.6	2.76	5.36

Bewertung: Warn- und Grenzwerte

	t vor	t ueber	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
Grenzwert oben	192	90	120	250	3.0	6.0
Warnwert oben	128	60	110	213	2.8	5.5
Warnwert unten	65	15	50	176	1.0	1.6
Grenzwert unten	33	5	8	145	0.5	0.5

Bewertung: Gewicht der Bewertungsparameter

	t vor	t ueber	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
ohne Gewicht	<input type="radio"/>					
geringes Gewicht	<input type="radio"/>					
mittleres Gewicht	<input checked="" type="radio"/>					
großes Gewicht	<input type="radio"/>					

Abbildung 50: LP „klein“, BSA1 Profilparameter

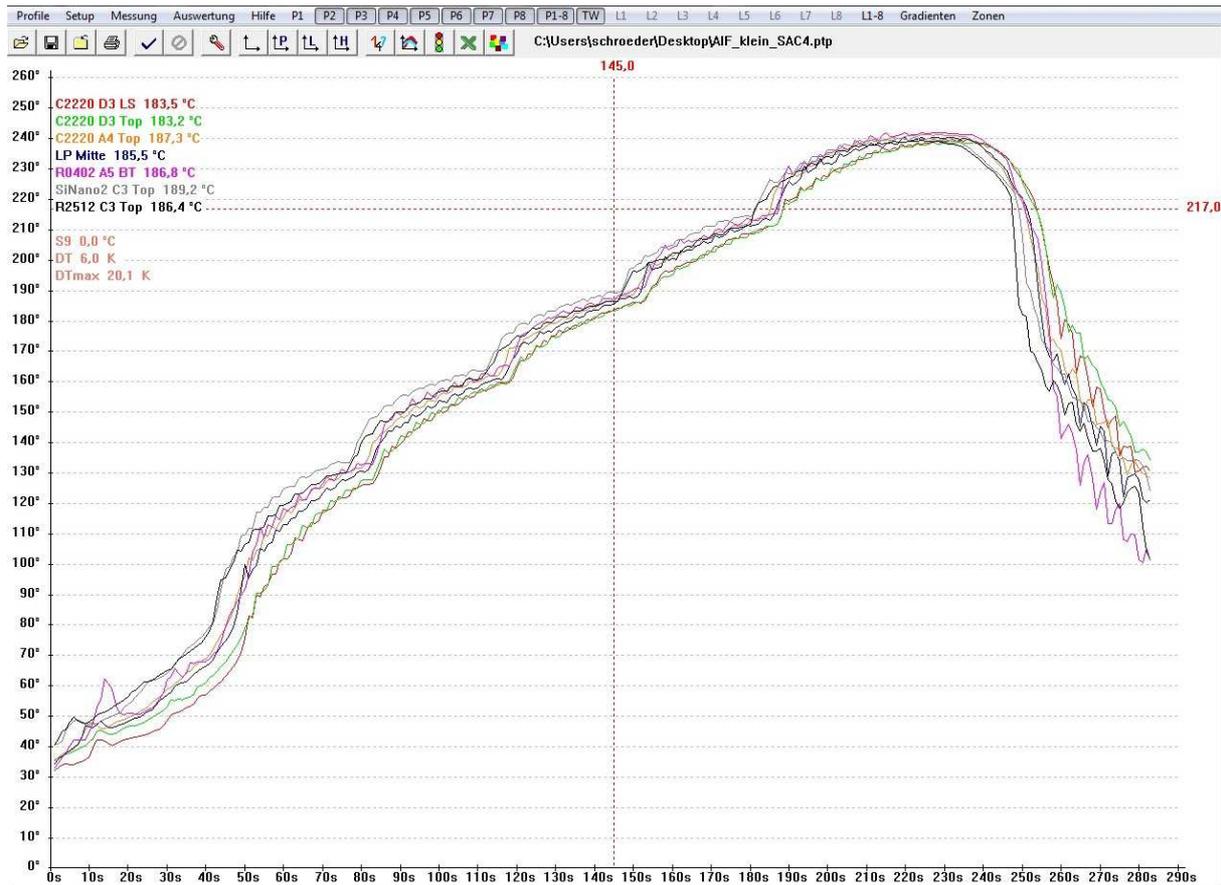


Abbildung 51: LP „klein“, SAC305 und SCANGe Lötprofil

Bewertung Profilparameter .. alle t in [s] - alle T in [C°]

Bewertungsparameter

Profilname	Bewertung	t gesamt	t vor	t über	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
<input checked="" type="checkbox"/> R2512 C3 Top	23.38	282	180	66	36	239.6	3.15	6.70
<input type="checkbox"/> Aktuelles Profil	<input checked="" type="checkbox"/> Bewertung	<input checked="" type="checkbox"/> Profilliste	13.53	37.65	20.21	68.91	0.00	0.00

Profilliste

Profilname	Bewertung	t gesamt	t vor	t über	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
<input checked="" type="checkbox"/> 1 C2220 D3 Top	40.84	274	180	64	30	239.2	2.84	4.38
<input checked="" type="checkbox"/> 2 C2220 D3 LS	29.35	272	177	65	30	239.8	3.12	5.26
<input checked="" type="checkbox"/> 3 C2220 A4 Top	27.84	276	178	65	33	241.4	3.24	5.28
<input checked="" type="checkbox"/> 4 SiNano2 C3 Top	25.22	283	181	67	35	240.3	3.32	5.63
<input checked="" type="checkbox"/> 5 R2512 C3 Top	23.38	282	180	66	36	239.6	3.15	6.70
<input checked="" type="checkbox"/> 6 LP Mitte	21.93	276	180	64	32	240.5	3.38	6.42
<input checked="" type="checkbox"/> 7 R0402 A5 BT	20.17	278	182	63	33	242.2	3.79	7.95
<input type="checkbox"/> 8	0.00	270	174	68	28	240.6	4.15	6.29

Bewertung: Warn- und Grenzwerte

	t vor	t ueber	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
Grenzwert oben	192	90	120	250	3.0	6.0
Warnwert oben	138	60	110	240	2.8	5.5
Warnwert unten	85	15	50	230	1.0	1.6
Grenzwert unten	59	5	21	222	0.5	0.5

Bewertung: Gewicht der Bewertungsparameter

	t vor	t ueber	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
ohne Gewicht	<input type="radio"/>					
geringes Gewicht	<input type="radio"/>					
mittleres Gewicht	<input checked="" type="radio"/>					
großes Gewicht	<input type="radio"/>					

Abbildung 52: LP „klein“, SAC305 und SCANGe Profilparameter

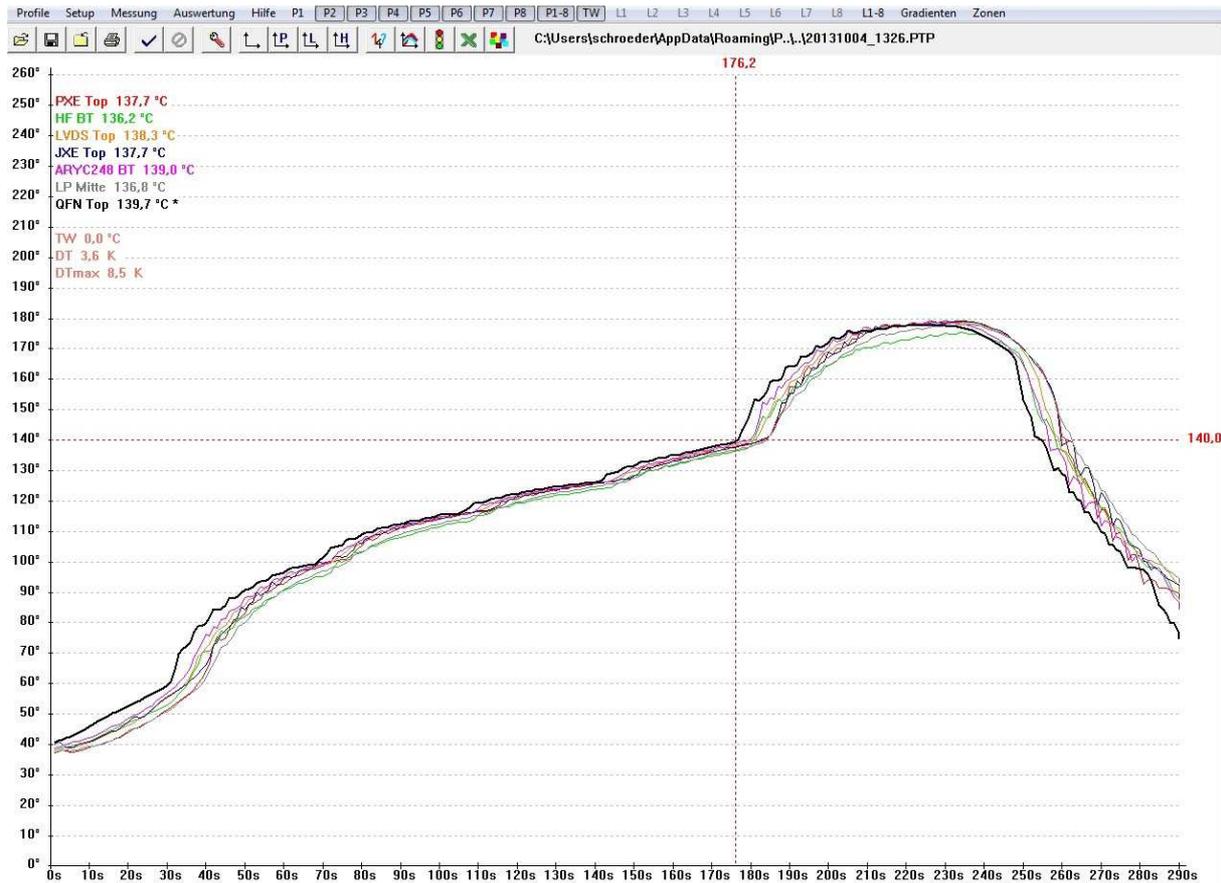


Abbildung 53: LP „groß“, BSA1 Lötprofil

Bewertung Profilparameter .. alle t in [s] - alle T in [C°]

Bewertungsparameter

Profilname	Bewertung	t gesamt	t vor	t über	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
<input checked="" type="checkbox"/> QFN Top	52.18	282	176	77	29	177,9	2.16	3.68
<input type="checkbox"/> Aktuelles Profil	<input checked="" type="checkbox"/> Bewertung	<input checked="" type="checkbox"/> Profilliste	15.13	20.39	22.95	68.04	100.00	86.59

Profilliste

Profilname	Bewertung	t gesamt	t vor	t über	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
<input checked="" type="checkbox"/> 1 JXE Top	52,87	286	177	77	32	179,2	2,12	3,74
<input checked="" type="checkbox"/> 2 QFN Top	52,18	282	176	77	29	177,9	2,16	3,68
<input checked="" type="checkbox"/> 3 ARYC248 BT	50,72	283	175	77	31	178,6	2,04	3,45
<input checked="" type="checkbox"/> 4 PXE Top	50,45	275	170	77	28	179,3	2,37	3,92
<input checked="" type="checkbox"/> 5 LVDS Top	50,11	281	172	78	31	178,8	2,01	3,34
<input checked="" type="checkbox"/> 6 S1	48,84	281	173	78	30	178,5	1,98	3,22
<input checked="" type="checkbox"/> 7 HF BT	47,94	280	173	77	30	175,4	1,95	3,26
<input checked="" type="checkbox"/> 8 LP Mitte	47,57	278	171	78	29	178,0	2,00	2,91

Bewertung: Warn- und Grenzwerte

	t vor	t ueber	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
Grenzwert oben	192	90	120	250	3,0	6,0
Warnwert oben	128	60	110	213	2,8	5,5
Warnwert unten	65	15	50	176	1,0	1,6
Grenzwert unten	33	5	8	145	0,5	0,5

Bewertung: Gewicht der Bewertungsparameter

	t vor	t ueber	t nach	T max	+dT/dt	-dT/dt
ohne Gewicht	<input type="radio"/>					
geringes Gewicht	<input type="radio"/>					
mittleres Gewicht	<input checked="" type="radio"/>					
großes Gewicht	<input type="radio"/>					

Abbildung 54: LP „groß“, BSA1 Profilparameter

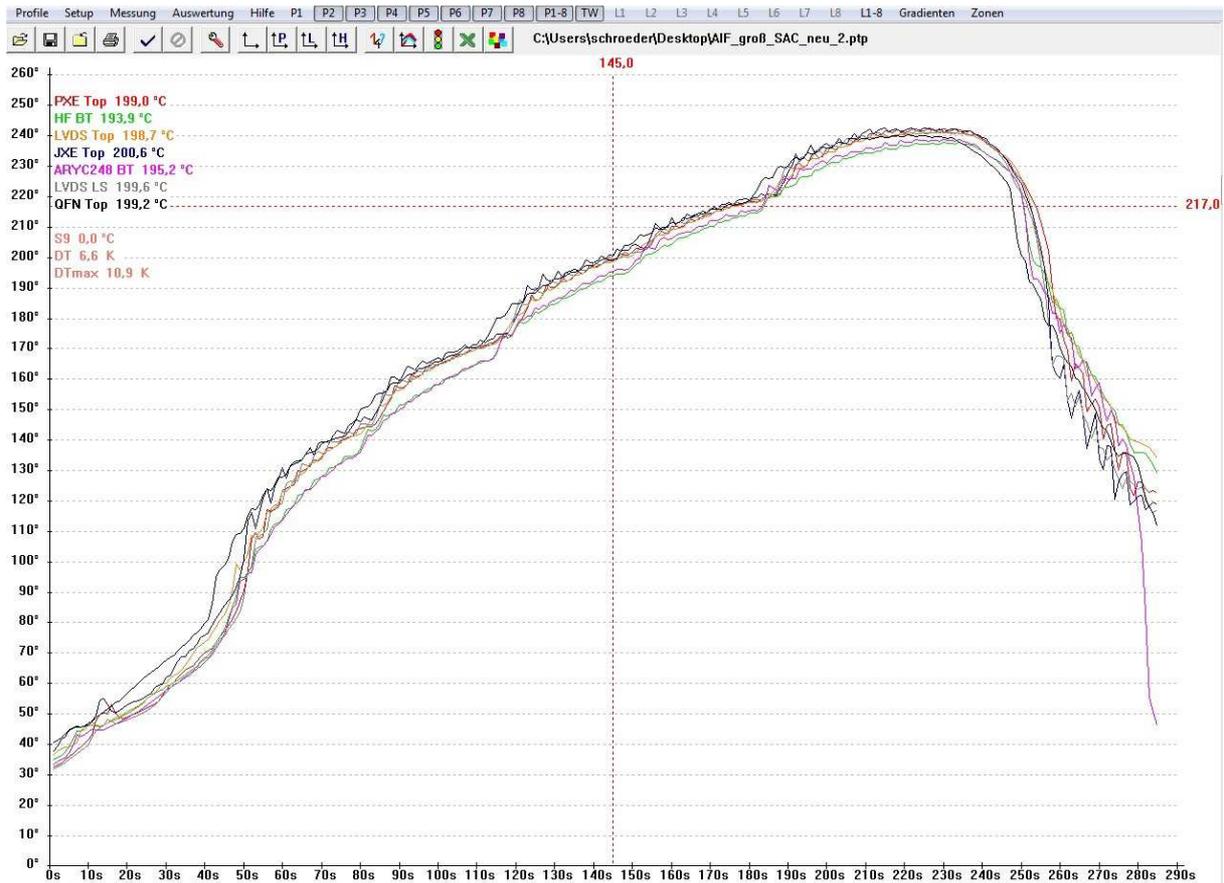


Abbildung 55: LP „groß“, SAC305 und SCANGe Lötprofil

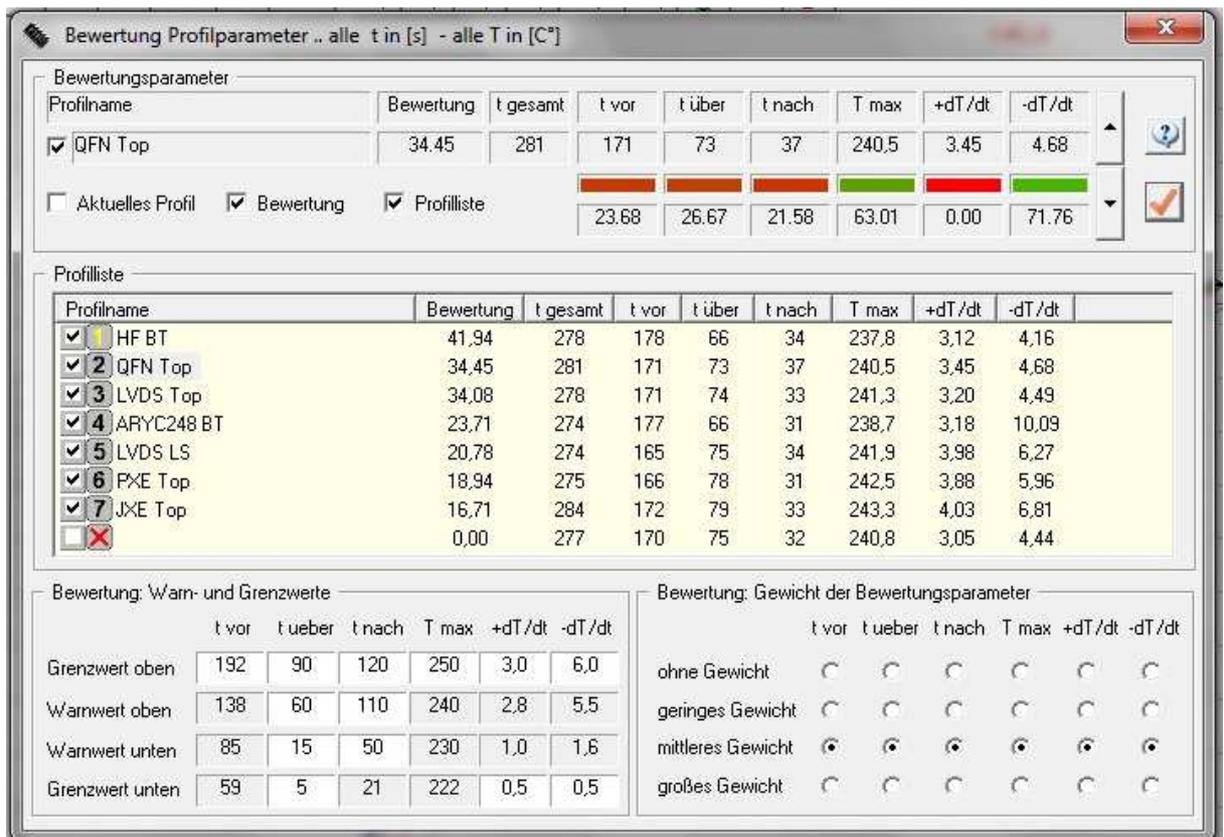


Abbildung 56: LP „groß“, SAC305 und SCANGe Profilparameter

3.4 Qualitäts- und Zuverlässigkeitsbewertung

3.4.1 Manuelle optische Inspektion

Der automatischen SPI-Inspektion folgte eine 100%ige manuelle optische Inspektion der Baugruppen nach dem Lötprozess. Auffälligkeiten wurden dokumentiert, siehe Abbildung 57 und Abbildung 58, und in einer separat angelegten Fehlertabelle erfasst. Ein kleiner Ausschnitt dieser Fehlertabelle ist in Tabelle 10 dargestellt. Exemplarische Fehlerbilder wurden erstellt.

Auf Basis der Fehlerbilder und der Fehlertabelle wurde die Lötqualität in Abhängigkeit des Lotpastendrucks beurteilt.

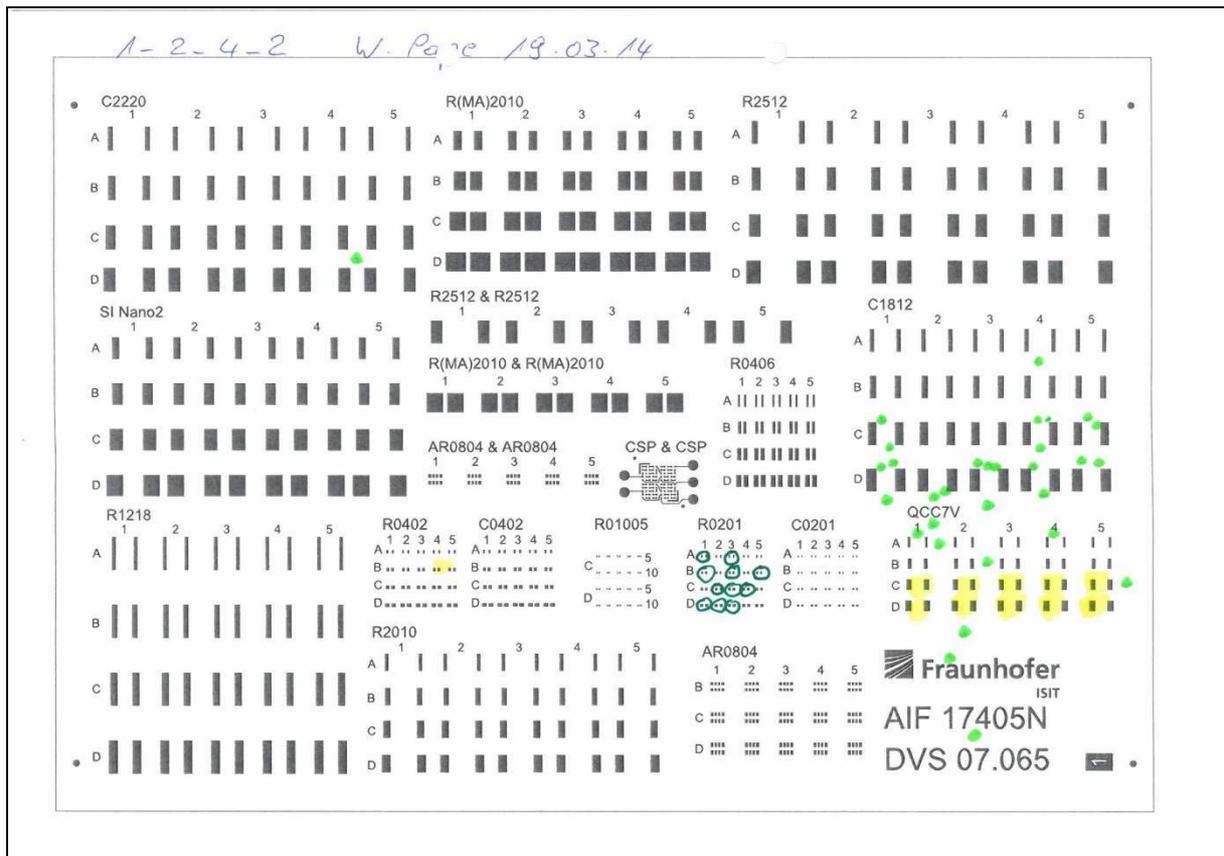


Abbildung 57: Dokumentation der optischen Inspektion



Abbildung 58: Farblegende

Lot	Schablone	LP	BT	Position	Drucken		Bestücken		Löten		Bemerkung
					Auffälligkeit	Bild	Auffälligkeit	Bild	Auffälligkeit	Bild	
SAC	MAX	R7	R1218	D3+4	Brücke	-	1307	-	-	-	-
SAC	MAX	R7	R1218	D4+5	Brücke	-	1308	-	-	-	-
SAC	MAX	R7	R01005	alle	-	1309	-	-	-	-	-
SAC	MAX	R7	R0201	alle	-	1310	-	-	-	-	-
SAC	MAX	10_3	C2220	C4	Loch im Lot	1311	-	-	-	-	-

Tabelle 10: Ausschnitt aus einer Fehlertabelle

3.4.2 Röntgenanalyse

Nach dem Aufbau der Untersuchungsmuster wurde jede Baugruppe geröntgt. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfprogramm geschrieben, mit dem alle Bauteile unter verschiedenen Winkeln aufgenommen wurden. Ein Programmdurchlauf ergab für eine Baugruppe 138 Bilder. Abbildung 59 zeigt ein Übersichtsbild einer geröntgten Leiterplatte.

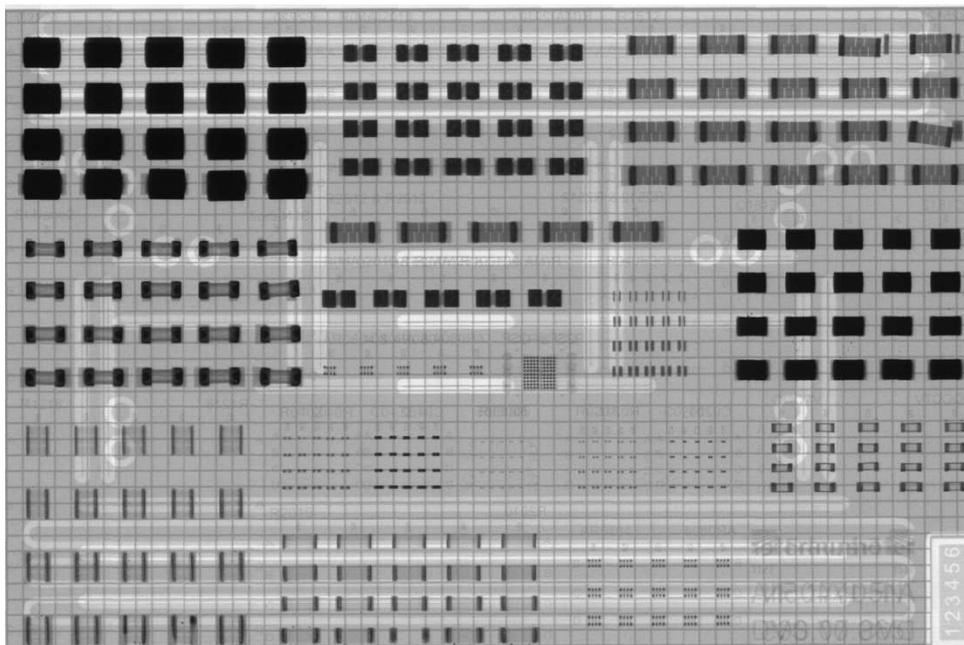


Abbildung 59: Übersichts-Röntgenbild der „kleinen“ Leiterplatte

3.5 Verifizierung für schnellere Temperatur-Wechsel

Laut Projektantrag waren ursprünglich langsame Temperatur-Wechsel (3h Zyklus) für die Belastung der Testbaugruppen geplant. Da für diese Testbaugruppen (keramische Bauelemente mit hoher Steifigkeit) ein schneller Temperatur-Wechsel (30min Zyklus) ähnlich schädigend wirkt, mit folgender Modellrechnung abgeschätzt, wurde dieser nach Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss für die Prüfung verwendet. Hiermit ist in der gleichen Testdauer die 6-fache Zyklenzahl erreichbar. Abbildung 60 zeigt den Temperaturverlauf der Testzyklen durchgeführt bei 0,5h, geplant 3h.

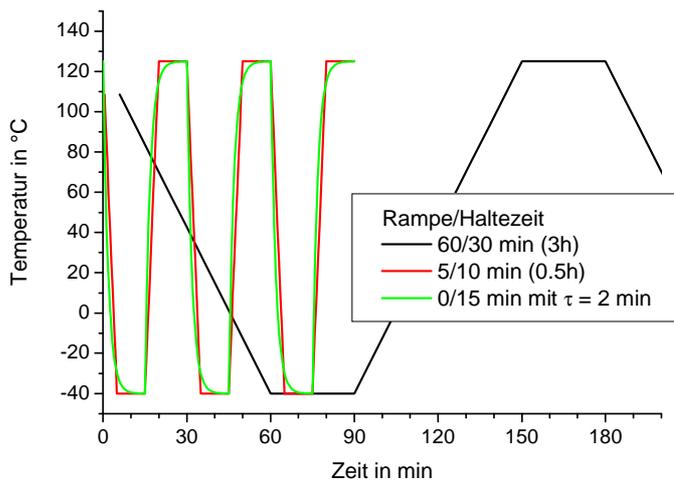


Abbildung 60: Temperaturverlauf der Testzyklen

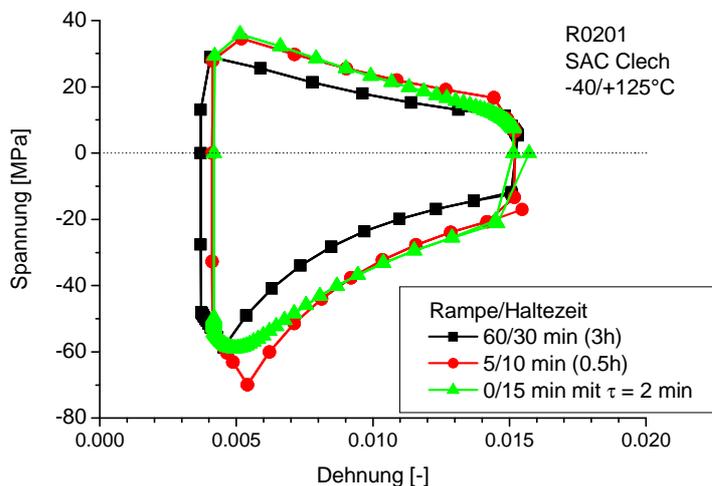


Abbildung 61: Hysterese-Kurven im Vergleich

Abbildung 61 zeigt die Hysterese-Kurven im Vergleich von langsamen Zyklus (3h) und schnellen Zyklus (30 min) und schneller Zyklus mit „Zeitkonstante“ (30min) am Beispiel vom R0201 auf 1.6mm Leiterplatte, SnAgCu-Lot (Kriechdaten nach J.P. Clech) und $T = -40 / +125^{\circ}\text{C}$.

Tabelle 11 zeigt die berechnete Lebensdauer, Streuband in Zyklen, am Beispiel des R0201 auf 1.6mm Leiterplatte, SnAgCu-Lot (Kriechdaten nach J.P. Clech).

Rampe / Haltezeit (T = -40 / +125°C)	Zyklenzahl N_f aus der Modellrechnung
60 / 30 min (3h)	1850 ... 7410
5 / 10 min (0.5h)	2030 ... 8130
0 / 15 min mit $\tau = 2$ min (0.5h)	2080 ... 8320

Tabelle 11: Berechnete Lebensdauer

3.6 Belastung der Testbaugruppen durch schnelle Temperatur-Wechsel

Durch den Umstieg auf schnelle Temperatur-Wechsel konnte die Zyklenzahl erheblich vergrößert werden. Ausschlaggebend für diese Änderung war die während der Projektlaufzeit erfolgte Erkenntnis, dass insbesondere kleine Komponenten erst bei deutlich höheren Zyklenzahlen ausfallen. Abbildung 62 zeigt die thermische Belastung der Testbaugruppen während der Auslagerung, Tabelle 12 die durchgeführte Auslagerung.

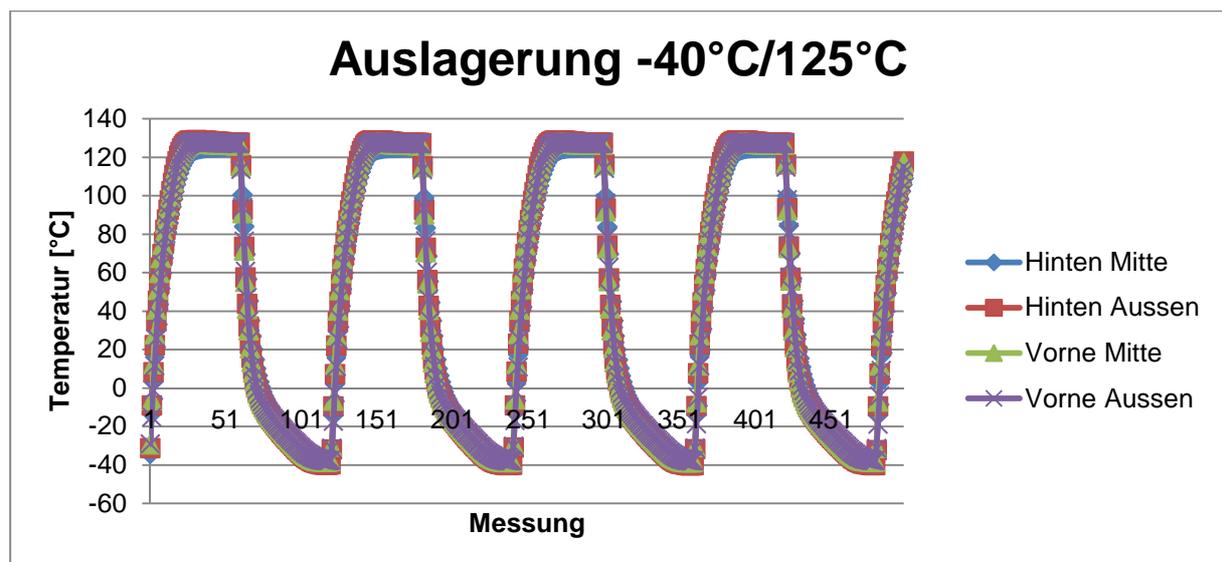


Abbildung 62: Temperaturwechsel

BT	Zyklen während des Projektes	Zyklen über das Projektende hinaus
C2220	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
SI Nano2	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	2500, 3000, 4000
R1218	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
R2010	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
AR0804	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
QCC7V	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
C1812	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	3000
R2512	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
R(MA)2010	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	3000, 4000
R0406	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
CSP	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	
R0402	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	3000, 4000, 5000, 6000
C0402	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	3000, 4000, 5000, 6000
R01005	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	3000, 4000, 5000, 6000
R0201	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	3000, 4000, 5000, 6000
C0201	0, 250, 500, 1000, 1500, 2000	3000, 4000, 5000, 6000
AR YC248	0, 250, 500, 750	
HF	0, 250, 500, 750	1000, 1500
QFN	0, 250, 500, 750	
VX3	0, 250, 500, 750	
LVDS	0, 250, 500, 750	1000
SAW	0, 250, 500, 750	1000, 1500
Q5x3	0, 250, 500, 750	1500
JXE	0, 250, 500, 750	
R0402	0, 250, 500, 750	
C0402	0, 250, 500, 750	
R01005	0, 250, 500, 750	
R0201	0, 250, 500, 750	
C0201	0, 250, 500, 750	
PXE	0, 250, 500, 750	

Tabelle 12: Auslagerung der einzelnen Bauteiltypen

3.7 Rissanalyse

Auf Basis der Röntgeninspektion wurde an ausgewählten Komponententypen eine Rissanalyse durchgeführt. Hierzu wurde anhand der Röntgenbilder in einer manuellen optischen Prüfung die Anwesenheit von Rissen in den Lötstellen beurteilt. Die Ergebnisse sind im Folgenden exemplarisch am Bauteiltyp R1218 dargestellt.

Die Abbildung 63 bis Abbildung 68 zeigen vergleichend die im Röntgen sichtbare Rissbildung an dem Widerstand R1218 bei Einsatz des SAC305-Lotes (Abbildung 63 und Abbildung 64) bzw. des BSA1-Lotes (Abbildung 66 und Abbildung 67).

In der optischen Inspektion, Abbildung 65 und Abbildung 68 ist ebenso deutlich die Rissbildung zu erkennen.

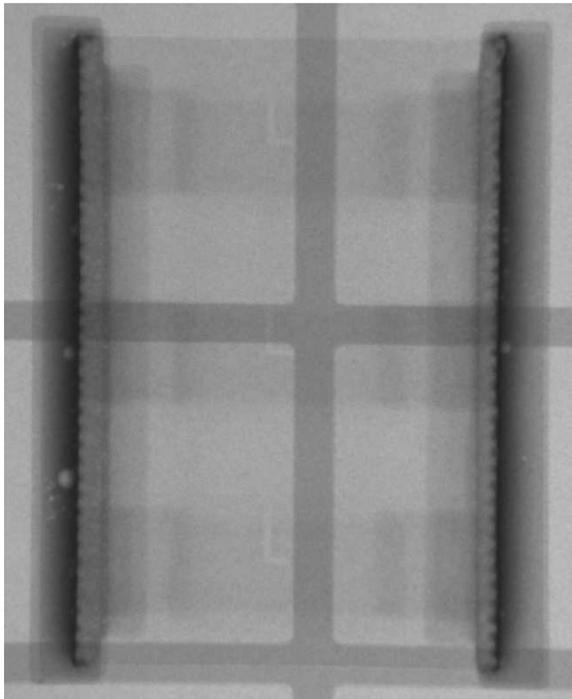


Abbildung 63: 1_2_1_1 SAC305 STD 0Z

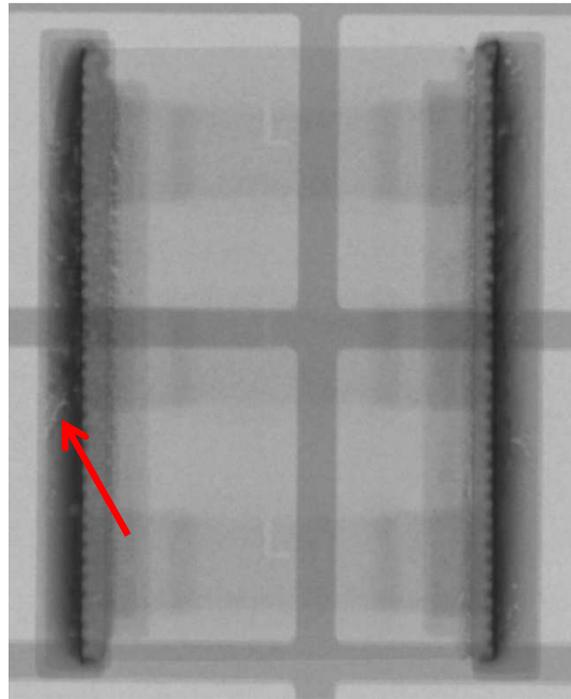


Abbildung 64: 1_2_6_1 SAC305 STD 2000Z

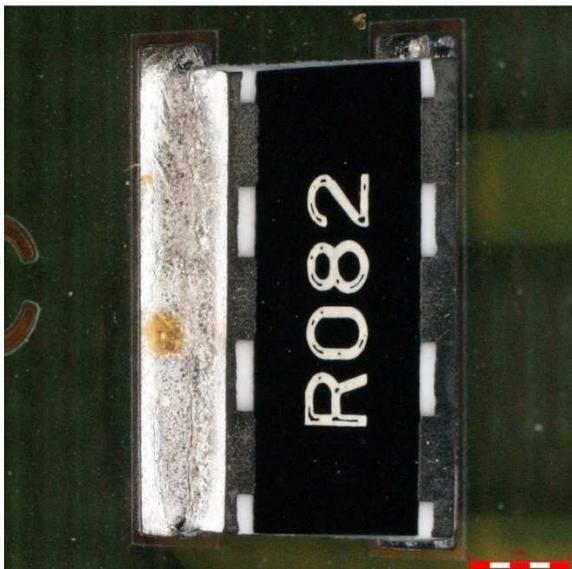


Abbildung 65: 1_2_4_3 R1218 C1I 1000 Z

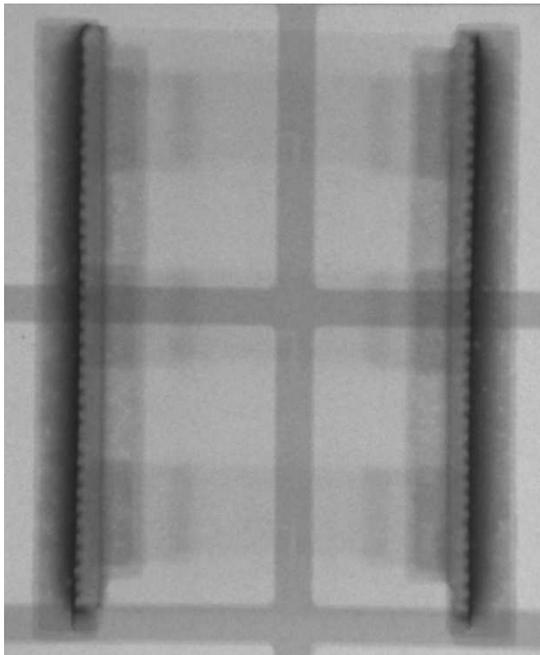


Abbildung 66: 2_2_1_1 BSA1 STD 0Z

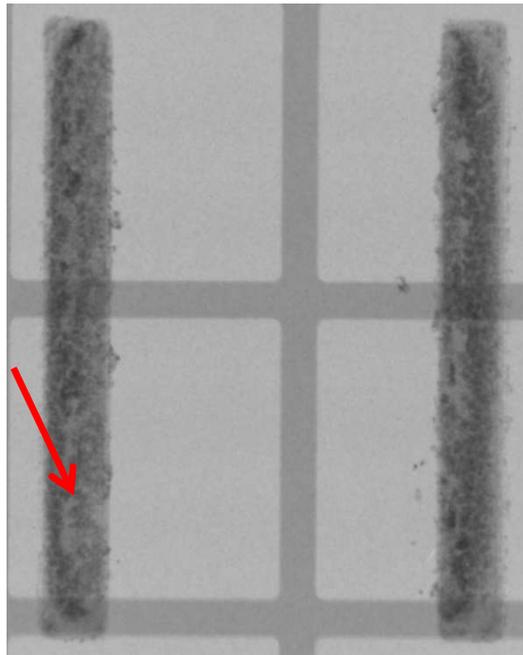


Abbildung 67: 2_2_6_1 BSA1 STD 2000Z



Abbildung 68: 2_2_6_1 BSA1 STD C1 2000Z

Die Tabelle 13 zeigt die Auswertung der Rissanalyse. Deutlich sichtbar ist, dass das BSA1-Lot bereits bei 250 Zyklen an allen Bauteilen eine Rissbildung aufweist (100%), Ausnahme bei Verwendung der MITTEL/MAX-Schablone und entsprechend „großer“ Lotmenge. Das SAC305 Lot zeigt bei Verwendung der MITTEL/MAX-Schablone erst ab 1000 Zyklen eine im Röntgen deutlich sichtbar vermehrte Rissbildung, Ausnahme Padvariante A bei Schablone MIN und STD, die bereits bei 250 Zyklen auffällig sind.

Auffällig bei dem SCANGe Lot ist, dass hier eine Rissbildung an allen Bauteilen bei Padvariante A bereits bei 250 Zyklen sichtbar ist, auch bei Einsatz der MITTEL/MAX-Schablone. Die Padvarianten C und D werden erst ab 1000 Zyklen auffällig.

Bei SAC305 und SCANGe weisen nach 1000 Zyklen alle Bauteile eine sichtbare Rissbildung auf.

Zyklen	SAC305 (Sn96.5/Ag3/Cu0.5)			BSA1 (Bi57Sn42Ag1)			SCANGe (SnCu0,7Ag1,0NiGe)			Position
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	D
250	73	67	0	100	100	0	100	100	93	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	20	0	0	100	100	0	33	0	0	C
	0	0	0	100	100	0	0	33	0	D
500	80	100	13	100	100	0	100	100	93	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	87	87	0	100	100	0	87	100	27	C
	53	80	7	100	100	0	93	100	27	D
1000	100	100	93	100	100	100	100	100	100	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	C
	100	93	67	100	100	100	100	100	100	D
1500	100	100	93	100	100	100	100	100	100	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	C
	100	100	93	100	100	100	100	100	100	D
2000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	C
	100	100	100	100	100	87	100	100	100	D
	MIN	STD	MITTEL/MAX	MIN	STD	MITTEL/MAX	MIN	STD	MITTEL/MAX	

Tabelle 13: Analyse der Rissbildung R1218 [%]

3.8 Schertestanalyse

Schertests wurden abhängig vom Bauteiltyp nach festgelegten Zyklenzahlen an repräsentativen Bauteiltypen durchgeführt. Tabelle 14 und Tabelle 15 zeigen die untersuchten Bauteile.

Um den Untersuchungsaufwand zu minimieren, wurden Komponententypen, die ein ähnliches Ausfallverhalten aufweisen zu Gruppen zusammengefasst und hier jeweils nur ein repräsentativer Bauteiltyp untersucht.

„klein“	Untersucht
AR0804	√
C0201	√
C0402	Ausfallverhalten wie C0201
C1812	√
C2220	Kappen lösen sich ab*
CSP	-
QCC7V	√
R(MA)2010	√
R01005	√
R0201	√
R0402	Ausfallverhalten wie R0201
R0406	Ausfallverhalten wie R1218
R1218	√
R2010	√
R2512	√
SI Nano2	√

Tabelle 14: Untersuchte Bauteiltypen, „kleine“ LP

*Der Bauelement-Typ C2220 wurde nicht weiter untersucht, da das typische Fehlerbild der Schertests einen Bruch in der BT-Metallisierung oder direkt im Bauteil aufweist. Somit war keine qualifizierte Aussage über die Lötstellenzuverlässigkeit möglich.

„groß“	Untersucht
AR YC248	√ Ausfallverhalten wie AR0804
C0201	√
C0402	Ausfallverhalten wie C0201
HF	√
JXE	√
LVDS	√
PXE	√
Q5x3	√
QFN	√
R01005	√
R0201	√
R0402	Ausfallverhalten wie R0201
SAW	√
VX3	Ausfallverhalten wie JXE

Tabelle 15: Untersuchte Bauteiltypen, „große“ LP

Vor Testbeginn müssen folgende Einstellungen angepasst werden:

- Schergeschwindigkeit
- Scherdistanz
- Scherhöhe
- Kraftvorgaben, wie z.B. Aufsetzkraft des Meißels

Nach jedem Schervorgang muss ein Bruchcode eingegeben werden, der das Bruchverhalten beschreibt. Ein Kommentarfeld für eventuelle Auffälligkeiten ist ebenfalls vorhanden. Eine anschließende Inspektion der Bruchfläche ergibt eine genauere Schadensanalyse. Es wird unterschieden in:

- Riss im Lot
- Riss in der Metallisierung des Bauteils
- Ablösung des Pads von der Leiterplatte

Bei den Schertests kamen die Messdosen 10kg und 200kg zum Einsatz. Die Schergeschwindigkeit betrug 300µm/s und die Scherhöhe 1/3 der Bauteilhöhe in Anlehnung an DIN EN Oberflächenmontage-Technik - Verfahren zur Prüfung auf Umgebungseinflüsse und zur Prüfung der Haltbarkeit von Oberflächen-Lötverbindungen 62137-1-2 [10], siehe Tabelle 16.

Bauteil	Scherhöhe [µm]	Scherweg [µm]	Meißel	Scherdose [kg]
R01005	42	1000	klein	10
R0201	73	1000	klein	10
R0402	100	1000	klein	10
R0406	95	1500	groß	-
R2010	190	2000	groß	200
R1218	195	3000	groß	200
C2220	580	1000	groß	200
SI Nano2	780	2000	groß	200
C0201	92	1000	klein	10
C0402	160	1000	klein	10
AR 0804	140	1500	klein	10
R(MA)2010	230	2000	groß	200
C1812	350	2500	groß	200
R2512	185	3000	groß	200
QCC7V	265	1500	groß	200
HF	345	2500	groß	200
QFN	316	2500	groß	200
LVDS	576	2500	groß	200
SAW	425	2500	groß	200
PXE	375	1500	groß	200
JXE	538	2000	groß	200
Q5x3	425	2500	groß	200
AR YC248	137	2500	groß	10

Tabelle 16: Schereinstellungen

Die Abbildung 69 bis Abbildung 72 zeigen die verwendeten Schermeißel.

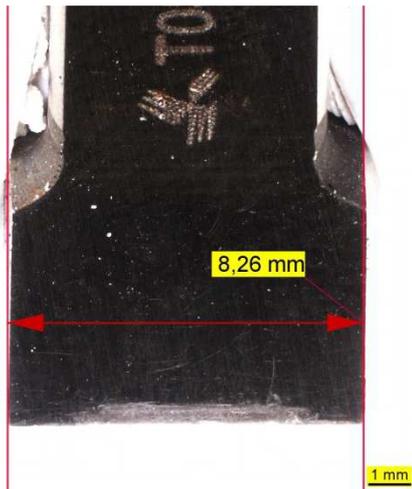


Abbildung 69: Großer Meißel (200kg)



Abbildung 70: Großer Meißel, seitlich

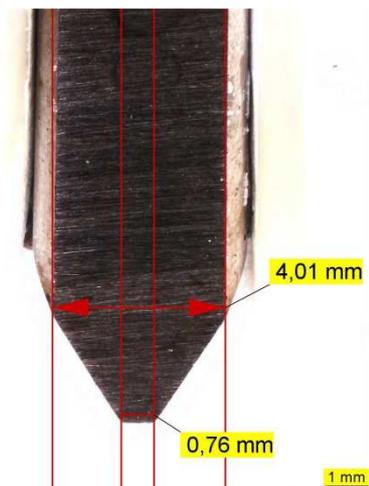


Abbildung 71: Kleiner Meißel (10kg)

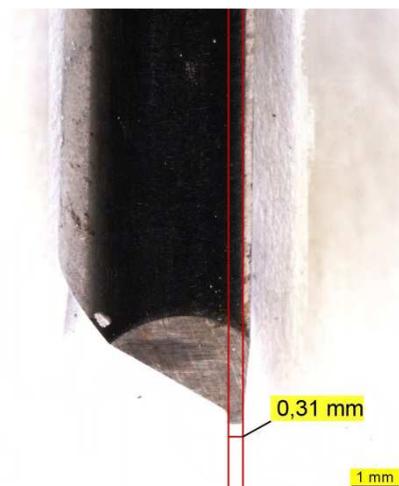


Abbildung 72: Kleiner Meißel, seitlich

Im Folgenden werden repräsentative Ergebnisse vorgestellt.

Als Grenzwert für das Versagen einer Lötstelle wird der allgemein anerkannte Abfall der Scherfestigkeit auf 50% des Ausgangswertes im unbelasteten Zustand herangezogen. Bei diesem Wert wird davon ausgegangen, dass die Lötstelle durch Rissbildung dermaßen geschwächt ist, dass es bald zum elektrischen Versagen kommt.

Die folgenden Diagramme zeigen jeweils die relative Scherfestigkeit der untersuchten Komponenten.

Um sinnvolle Ergebnisse zu erzielen und den Arbeitsaufwand zu minimieren, wurden die ersten Schertests nach 2000 Zyklen bzw. bei den großen Komponententypen nach 750 Zyklen durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde dann die weitere Vorgehensweise entschieden, entweder längere Auslagerung oder Schertests nach weniger Zyklenbelastung.

SI Nano2

Abbildung 73 zeigt das Bauteil SI Nano2, für das im Folgenden die Ergebnisse dargestellt werden.



Abbildung 73: SI Nano2

In den Grafiken Abbildung 74 und Abbildung 75 sind jeweils die relativen Scherfestigkeiten in Abhängigkeit der Zyklenzahl dargestellt, aufgebaut jeweils mit der STD-Schablone. Bei dem SAC305-Lot zeigt sich nach 2000 Zyklen noch kein Absinken der Kurven unter die 50%-Grenze, so dass eine Weiterführung der Auslagerung beschlossen wurde. Nach 3000 Zyklen gibt es kaum eine Scherwertänderung. Vergleicht man hingegen diese Ergebnisse mit dem BSA1-Lot, fällt auf, dass hier schon nach 1000 Zyklen ein Abfall unter den gesetzten Grenzwert erfolgt ist.

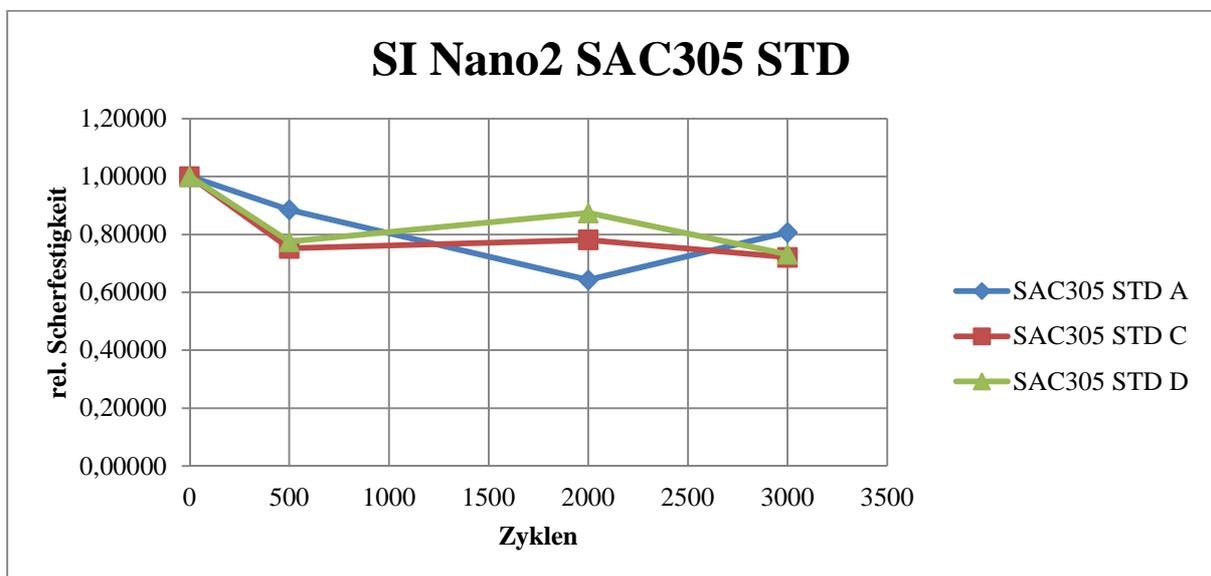


Abbildung 74: SI Nano2 SAC305 STD

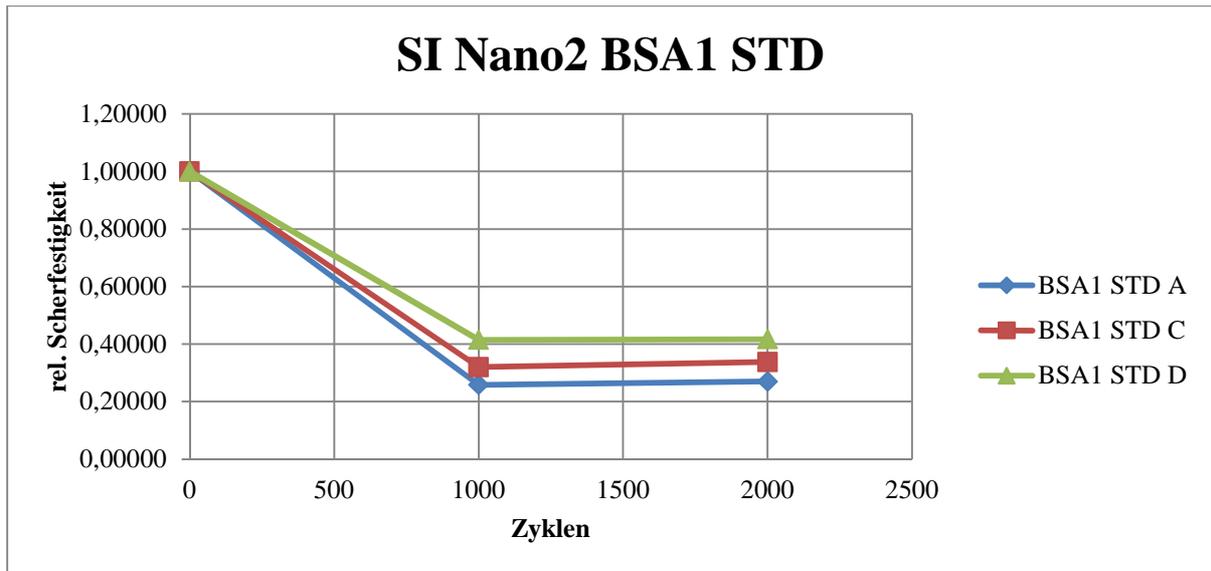


Abbildung 75: SI Nano2 BSA1 STD

QFN



Abbildung 76: QFN

Abbildung 76 zeigt das Bauteil QFN. Die Scherwerte vom QFN mit dem SAC305 sind in Abbildung 77 dargestellt. Nach 750 Zyklen liegen die Werte bei ca. 80% des ursprünglichen Wertes. Dieser gute Wert lässt auf eine hohe Zuverlässigkeit schließen.

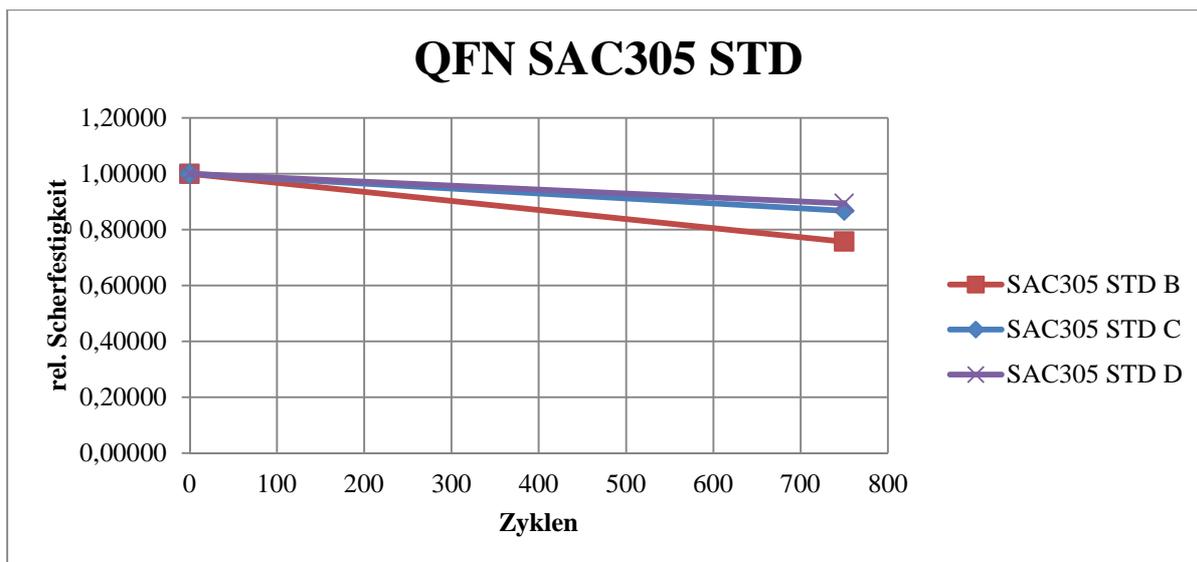


Abbildung 77: QFN SAC305 STD

Bei genauerer Betrachtung im Querschliff ist allerdings zu erkennen, dass die äußeren Signalanschlüsse gerissen sind, siehe Abbildung 78 bis Abbildung 80. Die hohe Scherfestigkeit des Bauteils entsteht durch die große Massefläche, die sich mittig unterhalb des Bauteils befindet. Durch die hohe Festigkeit der Massefläche werden die Scherergebnisse verfälscht. Dieses Ergebnis zeigt, dass nicht für jeden Bauteiltyp dieselben Prüfmethode angewendet werden können. Auf Grund dessen werden hier keine weiteren Schertests durchgeführt.

Bei allen Padvarianten ist deutlich sichtbar, dass der äußere Padbereich keinen Beitrag zur Lötstellenfestigkeit leistet. Eine Padvergrößerung bringt hier keinen Vorteil.

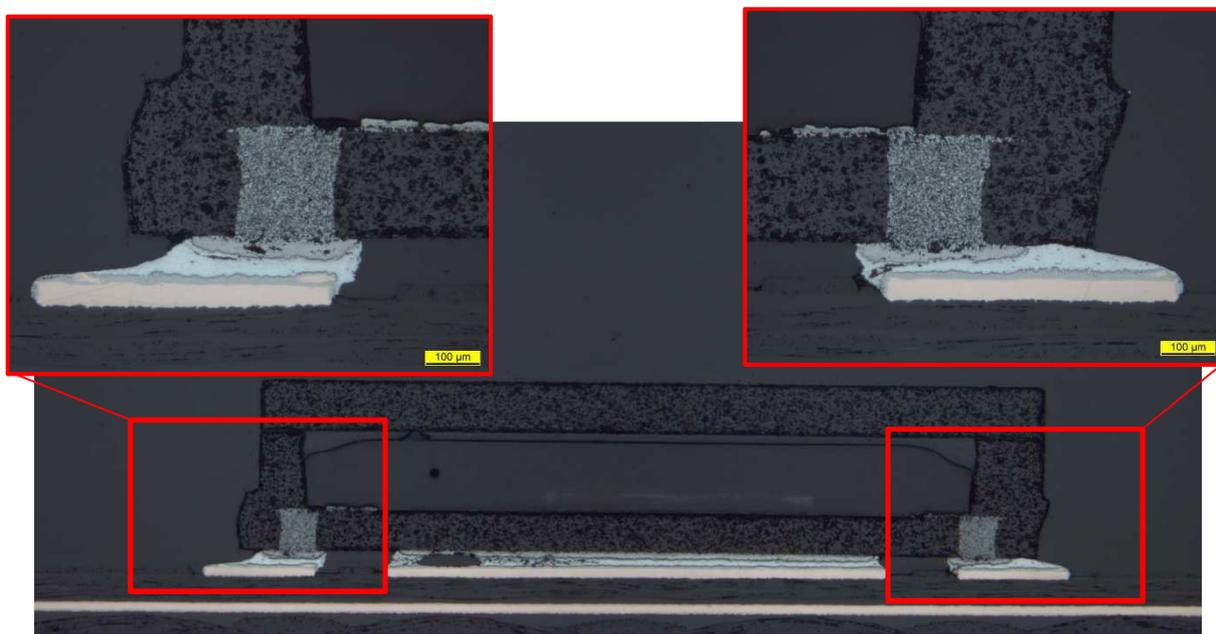


Abbildung 78: 3_4_2 QFN B

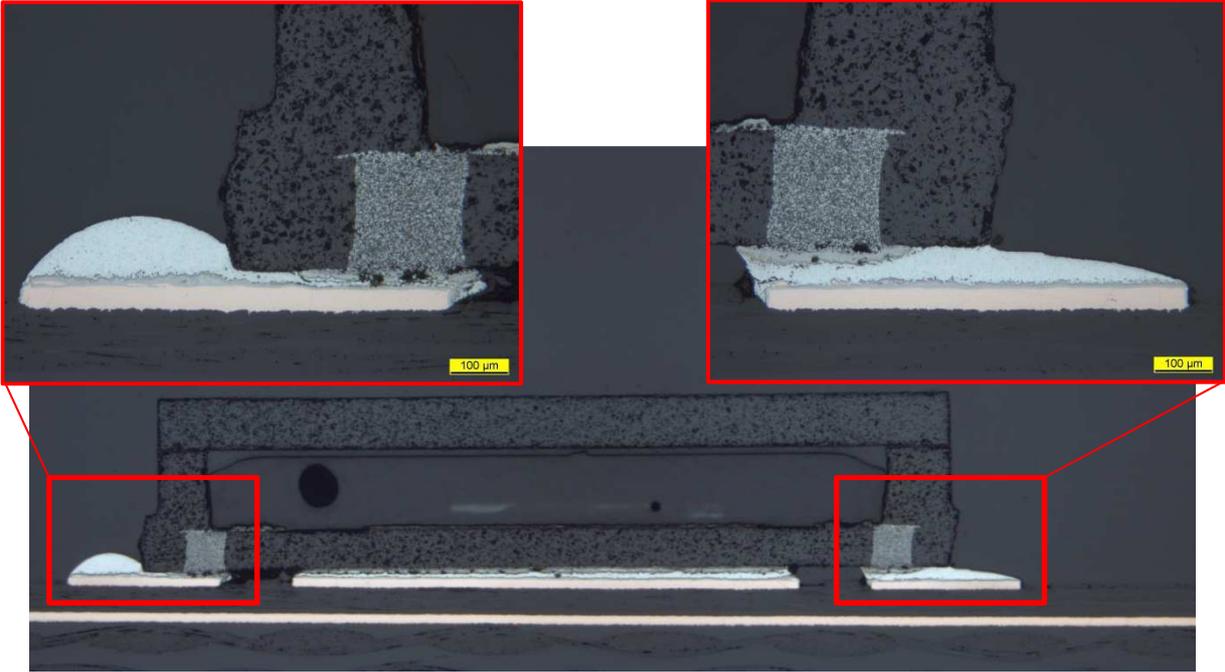


Abbildung 79: 3_4_2 QFN C

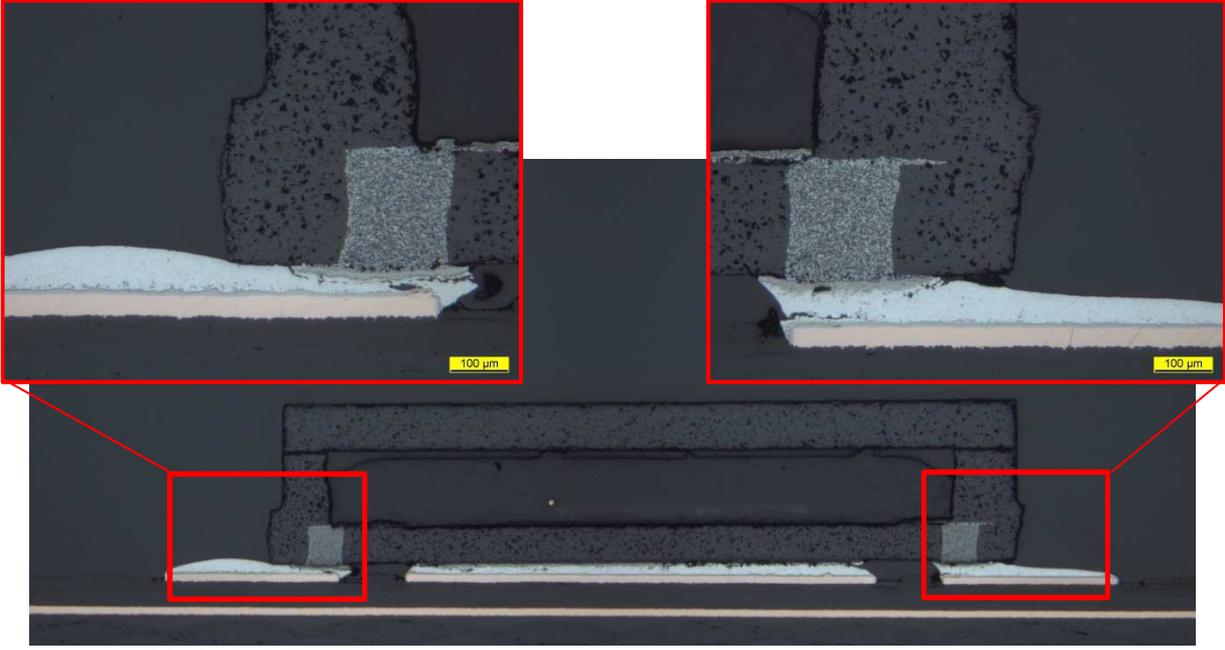


Abbildung 80: 3_4_2 QFN D

R2010

Das Bauteil R2010, Abbildung 81, zeigt nach Auslagerung von 2000 Zyklen sehr schlechte Werte der Scherfestigkeit. Diese liegt unterhalb 30% des Ausgangswertes, wie in Abbildung 82 zu erkennen ist. Die geringe Festigkeit lässt sich auf die stark unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Bauteil, bestehend aus Aluminiumoxid, und Leiterplatte zurückführen und ist nicht überraschend. Da eine Zyklenzahl von 2000 im Projekt als Ziel gesetzt wurde, war es nicht von Interesse den frühzeitigen Ausfallzeitpunkt genauer zu bestimmen.



Abbildung 81: R2010



Abbildung 82: R2010 SAC305 STD

R(MA)2010

Das Bauteil R(MA)2010 ist in Abbildung 83 zu sehen und hat dieselben Abmessungen wie der R2010. Betrachtet man die Scherfestigkeiten aus Abbildung 84, fällt auf, dass die Werte nach 2000 Zyklen noch bei über 80% der ursprünglichen Scherfestigkeit liegen. Sogar nach weiteren 1000 Zyklen ist der Abfall der Scherkraft minimal.

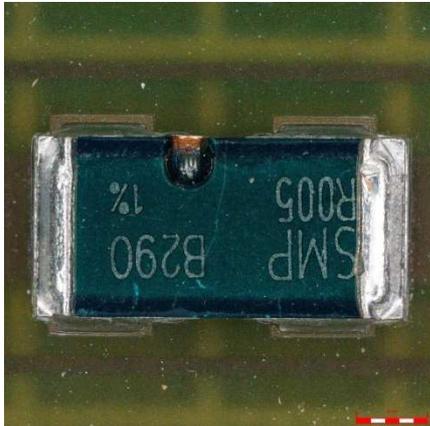


Abbildung 83: R(MA)2010

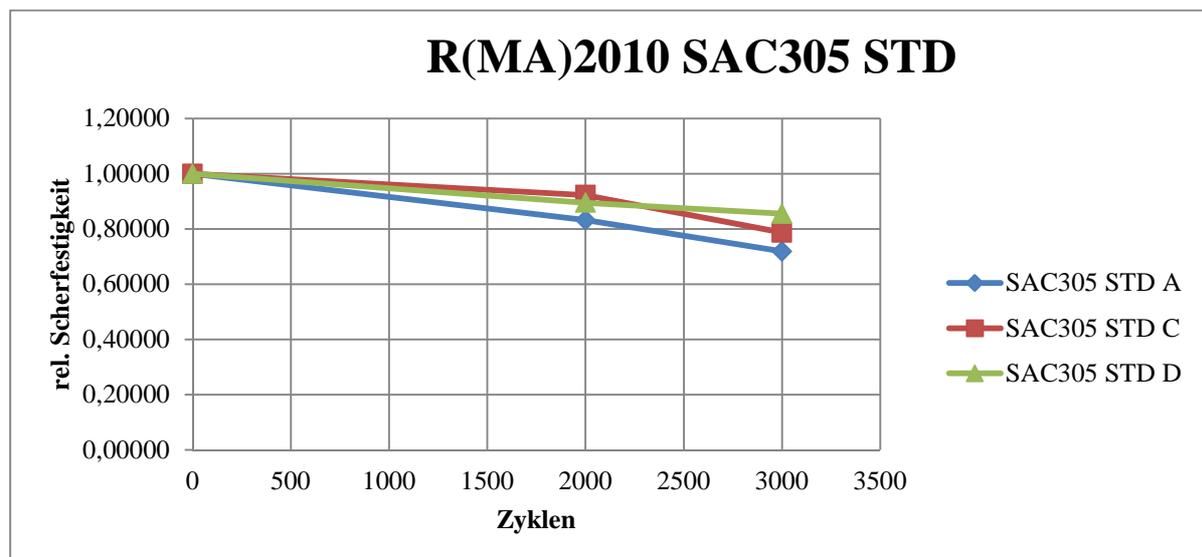


Abbildung 84: R(MA)2010 SAC305 STD

Der Grund für die im Vergleich zum geometrisch baugleichen R2010 unterschiedlichen Scherfestigkeiten liegt im Aufbau des Bauteils.

Wie in Abbildung 85 zu sehen ist, besteht der R(MA)2010 im Wesentlichen aus einer Cu-Platte auf die die Manganin®-Widerstandsschicht aufgebracht ist, deutlich sichtbar im Querschliff des ungelöteten Bauteils, siehe Abbildung 86.

Dieser Aufbau bewirkt, dass der Ausdehnungskoeffizient sehr nahe bei dem der Leiterplatte liegt.

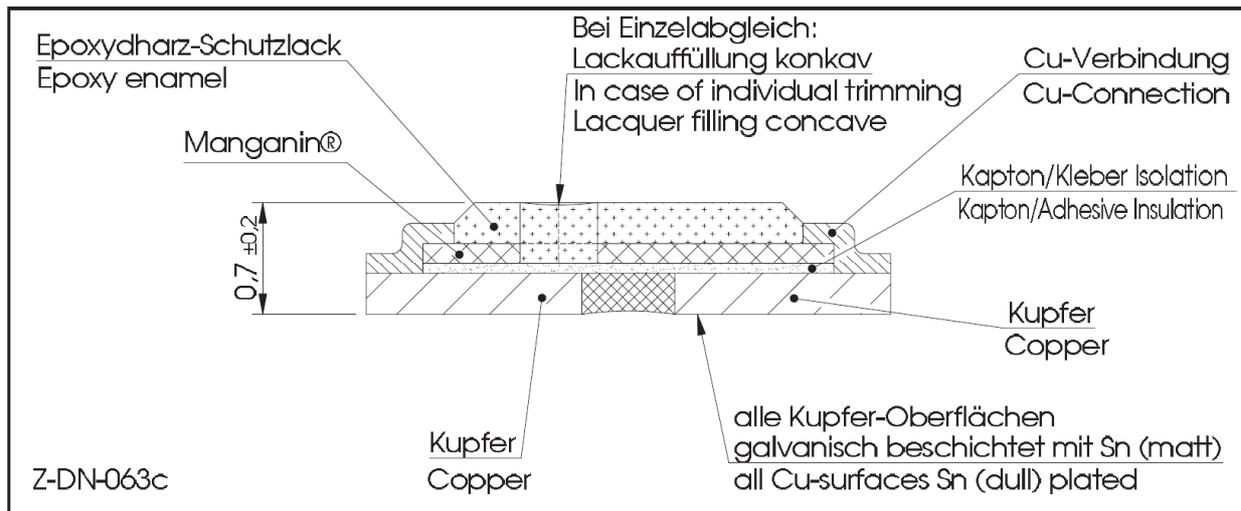


Abbildung 85: Schemabild vom R(MA)2010

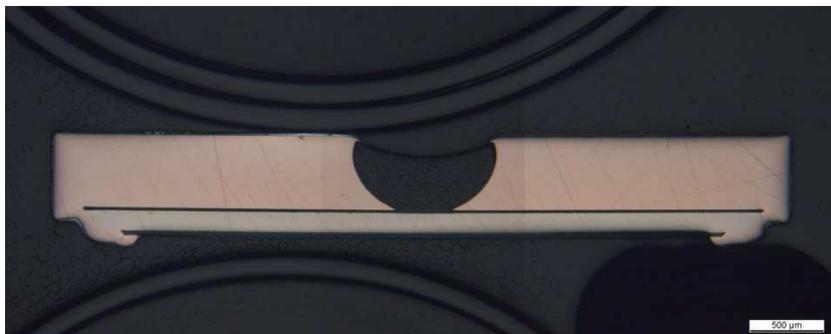


Abbildung 86: Querschliff vom R(MA)2010 SAC305 STD

Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der Scherversuche mit Angabe der relativen Scherfestigkeit (in %). Es wurden lediglich Untersuchungen mit dem SAC305 durchgeführt. Auf der linken Tabellenseite sind die Auslagerungszustände aufgeführt. Das Bauteil R(MA)2010 wurde im Ausgangszustand (0 Zyklen), nach 2000 Zyklen und nach 3000 Zyklen geschert. Auf der rechten Seite sind die Positionen auf der Leiterplatte aufgelistet. In der unteren Zeile befindet sich die Einteilung nach verwendeter Schablone.

R(MA)2010 [%]										
Zyklen	SAC305			BSA1			SCANGe			Position
0	100	100	100	-	-	-	-	-	-	A
	100	100	100	-	-	-	-	-	-	C
	100	100	100	-	-	-	-	-	-	D
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
1000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
2000	87	83	92	-	-	-	-	-	-	A
	-	92	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	89	-	-	-	-	-	-	-	D
3000	-	72	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	79	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	86	-	-	-	-	-	-	-	D
	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	

Tabelle 17: Ergebnis der Scherversuche R(MA)2010

Es wird deutlich, dass die Verwendung von größeren Pads eine höhere Zuverlässigkeit bewirkt. Padvariante A weist nach 2000 und 3000 Zyklen jeweils die kleinste Scherfestigkeit auf.

QCC7V

In Abbildung 87 ist ein gelöteter QCC7V zu sehen. Dieses Bauteil wurde mit dem BSA1-Lot näher untersucht.



Abbildung 87: QCC7V

Die Scherfestigkeiten sind in Abbildung 88 zu sehen. Zunächst wurde nach 2000 Zyklen geschert. Das Ergebnis zeigt eine relative Festigkeit auf der Leiterplatte von unter 20%. Anschließend wurden die Bauteile mit 1000 Zyklen Auslagerung untersucht. Auch hier stellt sich keine deutlich bessere Festigkeit ein. Erst die Scherwerte nach einer Auslagerung von 500 Zyklen zeigen einen leichten Anstieg der Zuverlässigkeit. Dennoch liegen diese Werte weit unter der 50%-Grenze. Weitere Untersuchungen wurden nicht durchgeführt.

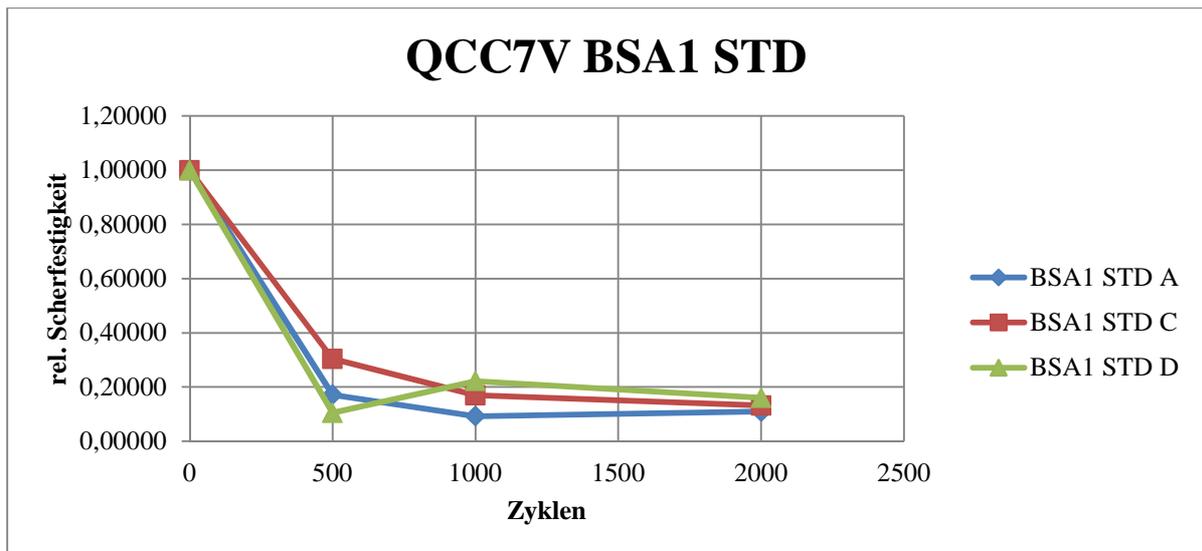


Abbildung 88: QCC7V BSA1 STD

Das an sich schon sehr spröde Lot zerrüttet bei Temperaturwechselbeanspruchung sehr schnell. Durch die unterschiedlichen CTE-Werte von Bismut und Zinn in dem BSA1-Lot kommt es zu einer inneren Zerrüttung des Lotes, wie auch in Abbildung 67 und Abbildung 68 zu sehen ist. Das wirkt sich deutlich negativ auf die Lebensdauer aus.

C1812

Der Kondensator C1812 ist in Abbildung 89 gezeigt. Das Diagramm für die Scherwerte mit der MITTEL/MAX-Schablone und den SAC305-Lot ist in Abbildung 90 dargestellt.

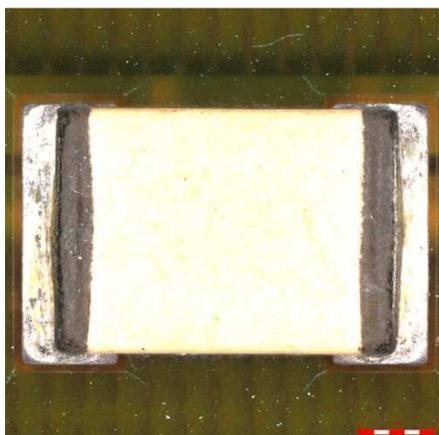


Abbildung 89: C1812

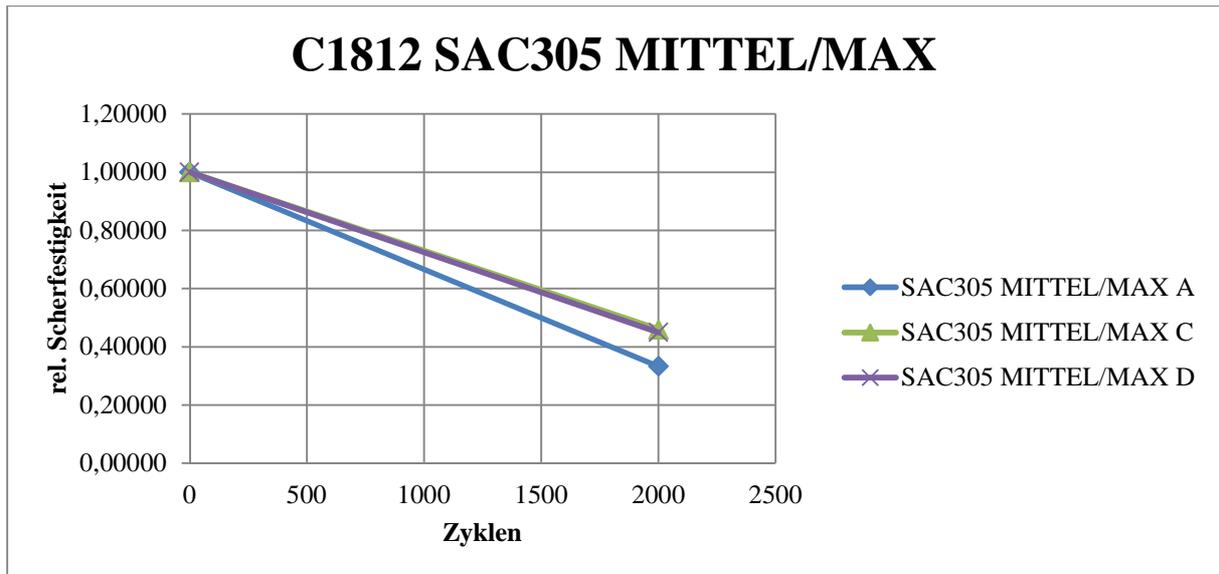


Abbildung 90: C1812 SCANGe MITTEL/MAX

Nach 2000 Zyklen liegen die Festigkeiten von Position C und D bei knapp 50%, also gerade grenzwertig. Die Padgröße A liegt mit ca. 35% deutlich darunter. Weitere ermittelte Festigkeiten sind in Tabelle 18 aufgeführt.

C1812 [%]										
Zyklen	SAC305			BSA1			SCANGe			Position
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	A
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	B
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	C
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	D
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
1000	-	63	-	-	60	-	52	54	56	A
	-	75	-	-	56	-	57	79	67	B
	-	-	-	-	-	-	65	-	76	C
	-	92	-	-	67	-	81	82	76	D
1500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
2000	36	33	33	-	46	65	31	32	29	A
	46	47	46	-	50	75	35	53	31	B
	-	-	-	-	-	73	42	-	47	C
	41	41	45	-	68	82	52	62	50	D
	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	

Tabelle 18: Ergebnis der Scherversuche C1812

Für dieses Bauteil wird der Aufbau mit der STD-Schablone für jedes Lot untersucht. Anhand der roten Einfärbung der Zellen wird schnell deutlich, dass die Festigkeiten nach 2000 Zyklen, außer bei dem BSA1-Lot und der MITTEL/MAX-Schablone, überwiegend die 50%-Grenze unterschreiten.

R0201 / C0201

Für die Bauteile R0201 und C0201 ist eine Auslagerung bis 3000 Zyklen ohne Unterschreiten des gesetzten Grenzwertes möglich. Tabelle 19 und Tabelle 20 zeigen die Übersicht der Ergebnisse der Schertests für beide Bauteiltypen. Während der R0201 auch bei dem BSA1-Lot nach 2000 Zyklen, insbesondere bei großen Pads und damit großen Lötstellen gute Werte erzielt, fällt die Scherfestigkeit bei C0201 bereits nach 1000 Zyklen deutlich ab. Dies lässt sich durch die unterschiedlichen Keramiken (und damit unterschiedlich an die Leiterplatte angepasste Dehnung) aus denen die R und C aufgebaut sind, erklären.

R0201 [%]										
Zyklen	SAC305			BSA1			SCANGe			Position
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	A
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	B
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	C
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	D
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
1000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
1500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
2000	59	64	-	-	60	-	-	66	-	A
	88	71	-	-	64	-	-	93	-	B
	98	71	-	-	73	-	-	73	-	C
	83	97	-	-	83	-	-	82	-	D
3000	-	-	-	-	-	-	-	65	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	75	-	B
	-	-	-	-	-	-	-	75	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	95	-	D
	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	

Tabelle 19: Ergebnis der Scherversuche R0201

C0201 [%]										
Zyklen	SAC305			BSA1			SCANGe			Position
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	A
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	C
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	D
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
1000	-	63	-	-	60	-	-	54	56	A
	-	75	-	-	56	-	-	79	67	C
	-	92	-	-	66	-	-	82	76	D
1500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
3000	-	-	-	-	-	-	-	75	-	A
	-	-	-	-	-	-	-	77	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	81	-	D
	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	

Tabelle 20: Ergebnis der Scherversuche C0201

R01005

Das kleinste untersuchte Bauteil ist der Widerstand R01005. Nach 3000 Zyklen liegen die Festigkeiten bei dem SCANGe- und dem SAC305-Lot noch oberhalb von 70%. Die genauen Werte sind in Tabelle 21 zusammengestellt.

Deutlich sichtbar ist jedoch, dass die Scherfestigkeit und damit die Zuverlässigkeit mit Zunahme der Bauteilgröße absinken.

R01005 [%]										
Zyklen	SAC305			BSA1			SCANGe			Position
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	C
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	D
250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
1000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D
2000	97	97	97	-	-	-	-	80	-	C
	93	87	93	-	-	-	-	73	-	D
3000	-	95	-	-	-	-	-	85	-	C
	-	77	-	-	-	-	-	87	-	D
	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	MIN	STD	MITTEL / MAX	

Tabelle 21: Ergebnis der Scherversuche R01005

3.8.1 Lotspalterhöhung

Eine reine Lotspalterhöhung ist wie bereits erwähnt ohne Hilfsmittel wie Abstandshalter bzw. unter dem Bauteil liegenden Leiterbahnen nicht realisierbar ohne gleichzeitig den Lotmeniskus in eine konvexe Form zu bringen. Das Lot zieht sich je nach Bauteiltyp und Metallisierung mehr oder weniger stark an der Bauteilm metallisierung hoch. Selbst bei extrem klein dimensionierten Padflächen, die nur unter dem Bauteil liegen, erhöht sich der Lotspalt nicht immer, wie im Beispiel in Abbildung 91 und Abbildung 92 am C1812 zu sehen ist. Ist eine seitliche Bauteilm metallisierung vorhanden, so wird diese oftmals zuerst vom Lot benetzt bevor es zu einer Lotspalterhöhung kommt.

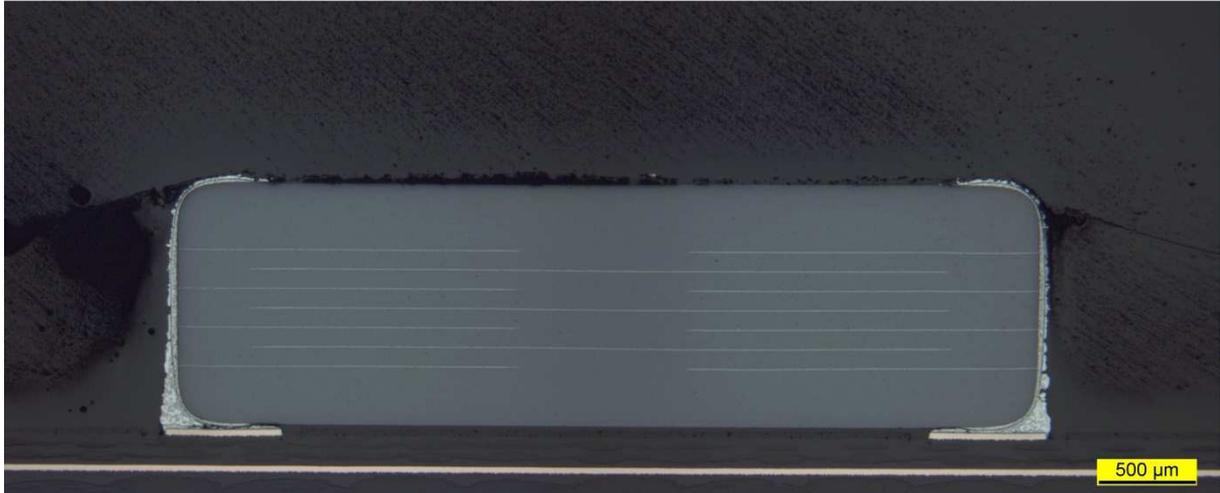


Abbildung 91: 2_2_6_2 C1812 A5 STD



Abbildung 92: 2_3_6_2 C1812 A5 MAX

Bei den eingesetzten Komponenten, die nur Padflächen auf der Unterseite besitzen, ist anhand der Scherwerte teilweise ein signifikanter Einfluss einer möglichen Lotspalterhöhung auf die Zuverlässigkeit zu messen, wie am Beispiel des Bauteiltyps QCC7V Padvariante A gezeigt wird.

Die folgenden Querschliffbilder, Abbildung 93 bis Abbildung 96, zeigen den Bauteiltyp QCC7V im Ausgangszustand und nach 500 Zyklen, jeweils mit der STD- und MIN-Schablone gefertigt. Eine Lotspalterhöhung ist sichtbar. Deutlicher ist dies jedoch in der Detailansicht der Lötstellen zu erkennen, siehe Abbildung 97 bis Abbildung 100. Diese zeigen das Bauteil nach jeweils 500Z.

In beiden Fällen sind deutliche Schädigungen in den Lötstellen zu erkennen. Gleichzeitig ist die signifikante Erhöhung des Lotspaltes im Vergleich der STD-Schablone zur MIN-Schablone deutlich zu sehen, siehe auch Tabelle 22. Jedoch ist auch zu erwähnen, dass diese Werte nur Einzelergebnisse darstellen und es hier durchaus zu Streuungen der Lotspaltdicke kommen kann.

SCANGe STD 0Z



Abbildung 93: 3_2_1_2 QCC7V A

SCANGe STD 500Z

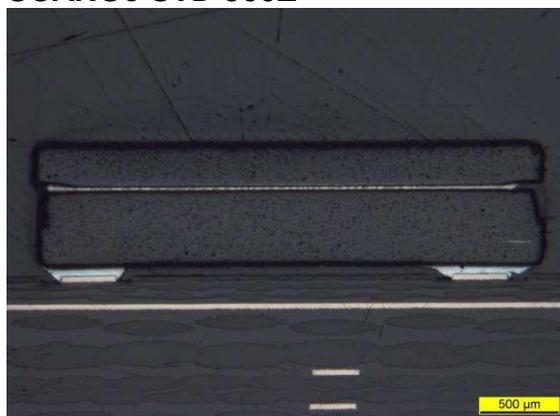


Abbildung 94: 3_2_3_1 QCC7V A

SCANGe MIN 0Z

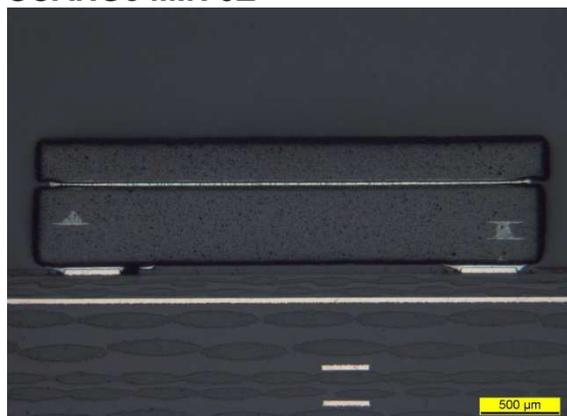


Abbildung 95: 3_1_1_1 QCC7V A

SCANGe MIN 500Z

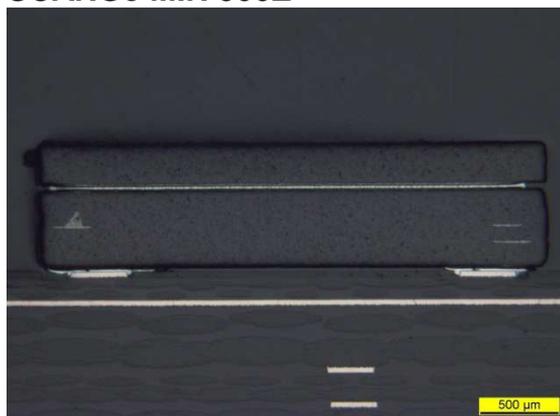


Abbildung 96: 3_1_3_1 QCC7V A

	Linke Lötstelle [μm]	Rechte Lötstelle [μm]
SCANGe STD 500Z	47,40	47,49
SCANGe MIN 500Z	17,07	17,83

Tabelle 22: Lotspalterhöhung am QCC7V, gemessen an Querschliffen

SCANGe STD 500Z

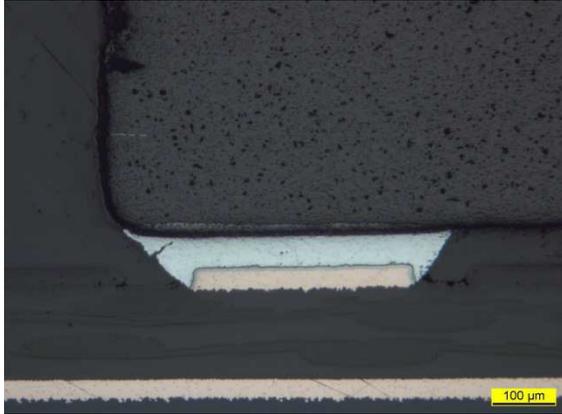


Abbildung 97: 3_2_3_1 QCC7V A links

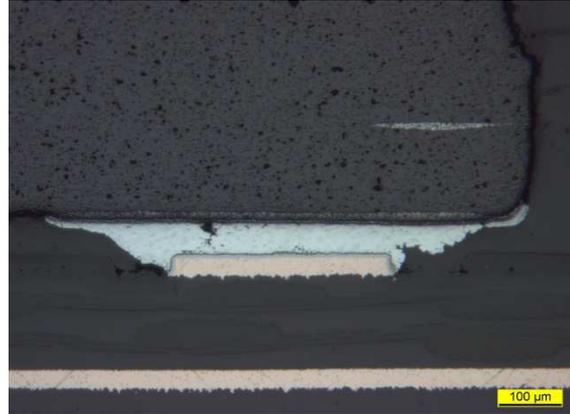


Abbildung 98: 3_2_3_1 QCC7V A rechts

SCANGe MIN 500Z

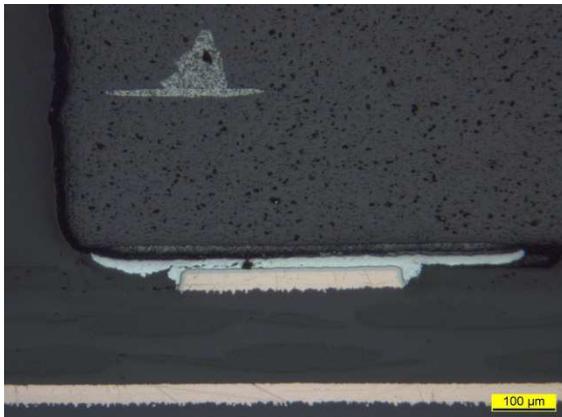


Abbildung 99: 3_1_3_1 QCC7V A links

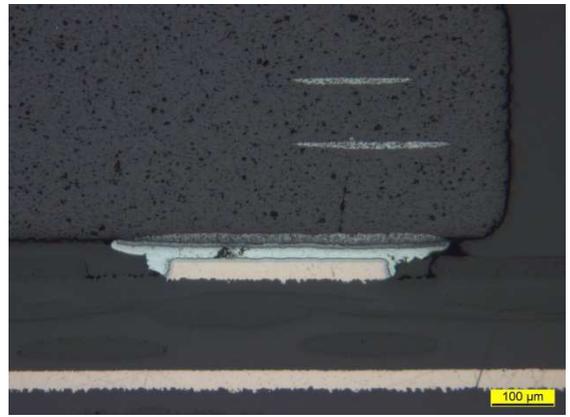


Abbildung 100: 3_1_3_1 QCC7V A rechts

Die Abbildung 101 zeigt den signifikanten Unterschied der Scherfestigkeit nach 500 und 1000 Zyklen. Die Lötstellen mit dem höheren Lotspalt weisen bis zum Ausfall nach 2000 Zyklen eine um ca. 20% höhere relative Scherfestigkeit auf.

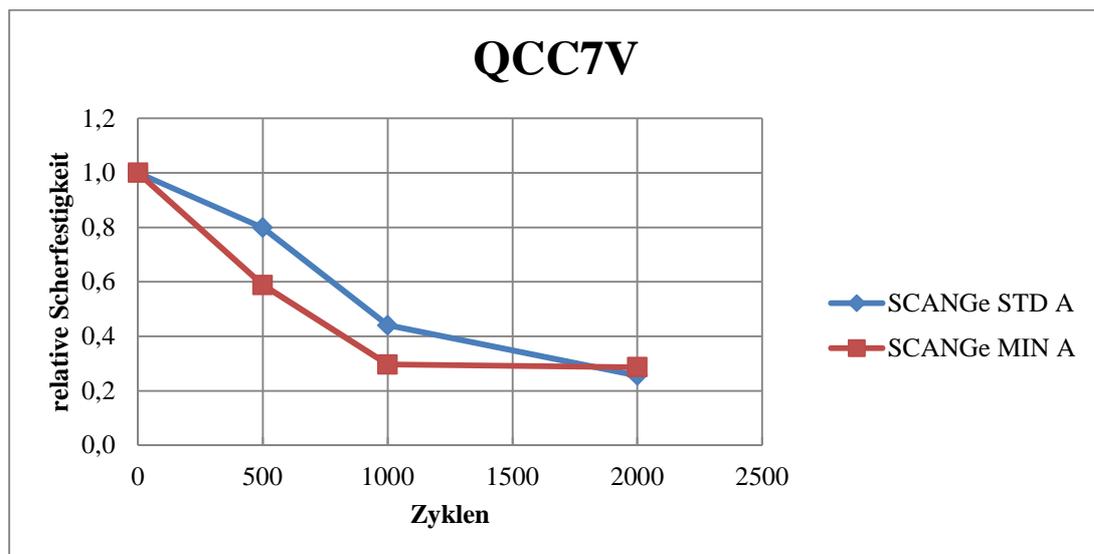


Abbildung 101: Schertests am QCC7V

3.8.2 Bruchflächenanalyse

Um die Scherkräfte richtig zu beurteilen, muss eine Inspektion der Bruchflächen erfolgen. Zu diesem Zweck wird eine Tabelle erstellt, in der für jede Bruchfläche dokumentiert wird, wo der Bruch stattgefunden hat. Zusätzlich wird in der Spalte „Flussmittel“ dokumentiert, wieviel Flussmittel auf dem Bauteil bzw. auf der Leiterplatte zurückgeblieben ist. Auch dieser Faktor kann die Scherkräfte beeinflussen. Tabelle 23 zeigt einen Ausschnitt einer Bruchflächen-Beurteilung.

Bauteil	Position	Seite	Auffälligkeit	Flussmittel
R1218	A1	links	Bruch im Lot	wenig
R1218	A2	links	Bruch im Lot	wenig
R1218	A3	links	Bruch im Lot	wenig
R1218	A4	links	Bruch im Lot	wenig
R1218	A5	links	Bruch im Lot	wenig
R1218	B1	links	Bruch in der Metallisierung	mittel
R1218	B2	links	Bruch in der Metallisierung	mittel
R1218	B3	links	Bruch in der Metallisierung	mittel
R1218	B4	links	Bruch in der Metallisierung	wenig
R1218	B5	links	Bruch mehr in der Metallisierung	wenig

Tabelle 23: Ausschnitt einer Bruchflächen-Beurteilungstabelle

Abbildung 102 bis Abbildung 104 zeigen gescherte Bauteile. Es können eindeutige Aussagen zum Bruchort getroffen werden. In den Abbildung 102 und Abbildung 103 sind größere Mengen an Flussmittelrückständen zu sehen. Vorhandene Poren in der Lötstelle können in Abbildung 104 betrachtet werden. Sie zeigen sich als dunkle Punkte in den Lötverbindungen.

Abbildung 105 zeigt eine Bruchfläche auf der Leiterplatte. Auf der linken Seite hat der Bruch in der Bauteilmetallisierung stattgefunden. An der oberen Kante des Pads ist die Struktur des Bauteils noch zu erkennen. Auf der rechten Seite ist die Lötstelle gebrochen. Auch hier sind die Poren im Lot zu erkennen. Flussmittelrückstände sind ebenfalls auf der Leiterplatte zwischen den Pads verblieben.



Abbildung 102: Bruch in der Metallisierung und im Lot



Abbildung 103: Bruch im Bauteil

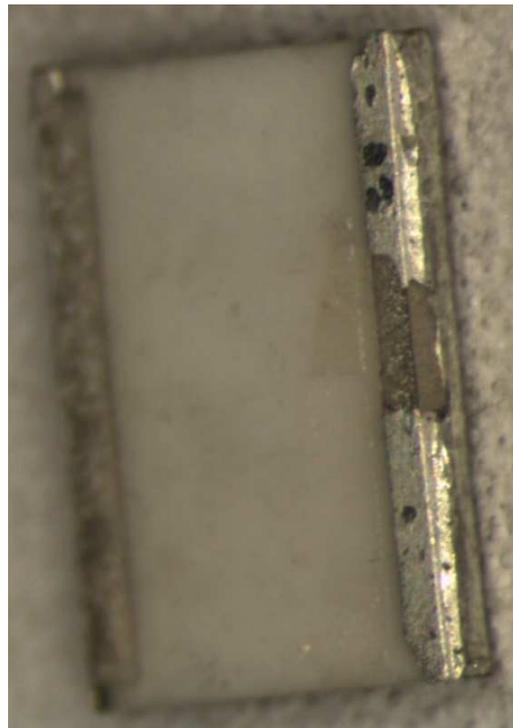


Abbildung 104: Bruch im Lot und teilweise in der Metallisierung



Abbildung 105: Bruchfläche auf der Leiterplatte

4 Simulationen

4.1 Modell Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit ergibt sich aus der Geometrie der Lötverbindung (Abbildung 106), dem Materialverhalten (Kriechen) und der äußeren Belastung (Verfahrgeschwindigkeit des Schermeißels).

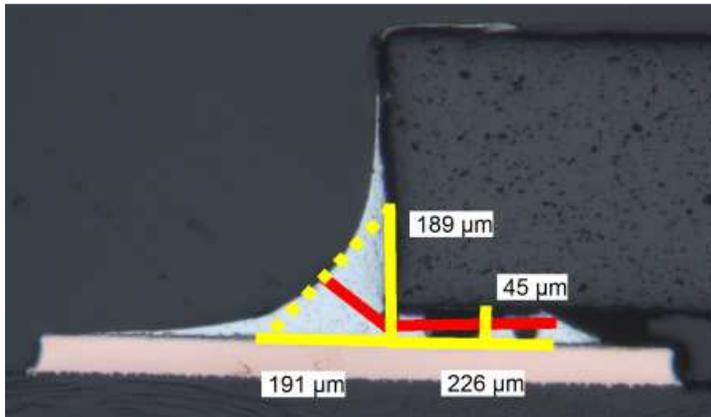


Abbildung 106: Geometrie der Lötverbindung

Definition der Geometrie: Mit den Zahlenwerten (Beispiel) für

- Meniskus (Dreieck)
- Lotspalt (Rechteck)
- Breite des Bauteils

ist das Lotvolumen idealisiert beschrieben. Der (rot eingezeichnete) kleinste, tragende Querschnitt ist als wahrscheinlicher Risspfad anzunehmen. Die Querschnitte A und senkrecht hierzu die mittleren Höhen h definieren das auf Scherung belastete Volumen. Die Schubspannung ist als Kraft F dividiert durch Querschnitt A definiert, die Scherrate als Verfahrgeschwindigkeit \dot{u} durch Höhe h .

$$\tau = \frac{F}{A} = \sigma / \sqrt{3} \quad \dots \text{ Schubspannung, Vergleichsspannung}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{u}}{h} = \dot{\varepsilon} \cdot \sqrt{3} \quad \dots \text{ Scherrate, Dehnrate}$$

Das Kriechgesetz (Materialverhalten, Dehnrate $\dot{\varepsilon}$ in Abhängigkeit von der Spannung σ und der Temperatur T) lautet wie folgt:

$$\dot{\varepsilon} = A1 \cdot [\sinh(A2 \cdot \sigma)]^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

mit den Materialparametern (Daten für SnAgCu nach J.P. Clech):

$$A1 = 7.93E+05 \text{ s}^{-1}, \quad A2 = 0.0356 \text{ MPa}^{-1}, \quad n = 6.00, \quad Q/R = 8166.5 \text{ K}$$

Ein Auszug aus dem Datenblatt von Yageo ist in Abbildung 107 gezeigt (verwendet werden L, W, H, I₁, I₂).

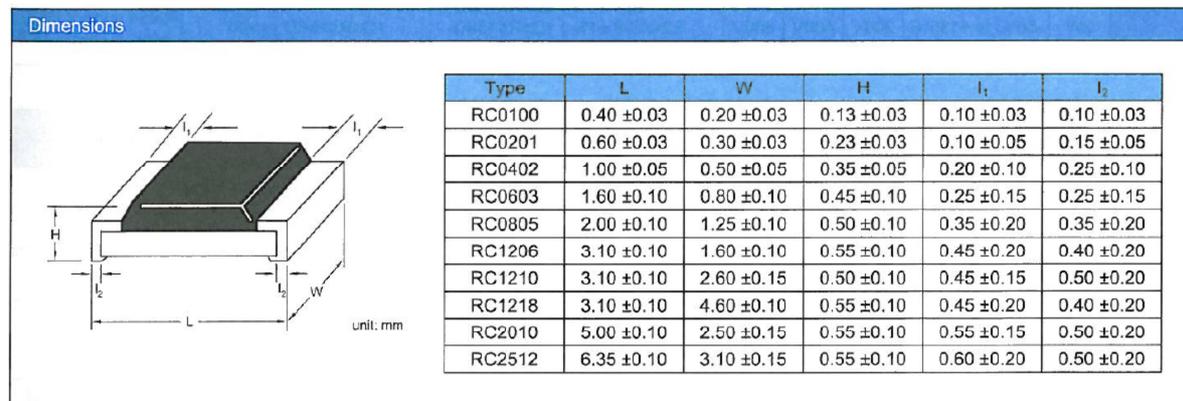


Abbildung 107: Auszug aus Yageo Datenblatt

Die sich aufgrund Verformungsgeschwindigkeit und Temperatur für Lotspalt und Meniskus ergebenden Kräfte werden addiert und für beide Lötstellen des Zweipolers dupliziert. Hiermit ist die Scherfestigkeit (maximale Kraft) definiert. Diese ist in Abbildung 108 dargestellt.

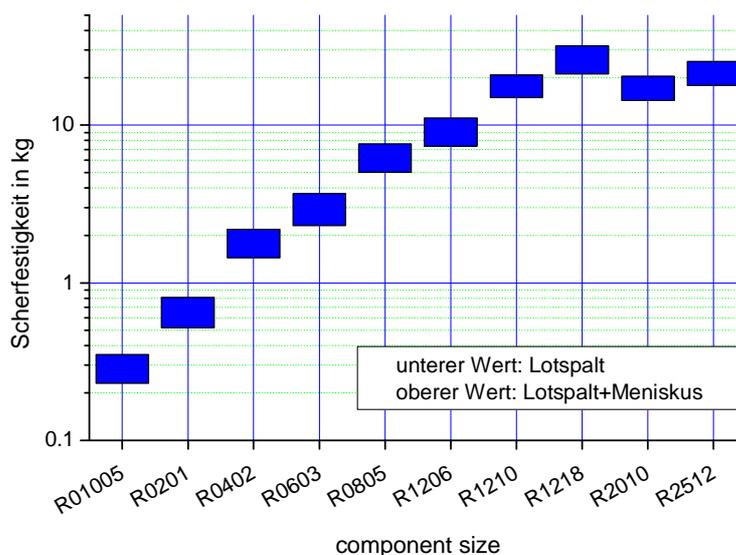


Abbildung 108: Berechnung der Scherfestigkeiten für SAC305-Lot

Abbildung 108 zeigt die Berechnung der Scherfestigkeiten für SAC305-Lot (JPC) bei 22°C und 500 µm/s Verfahrensgeschwindigkeit des Meißels. Die Geometrie der verschiedenen Bauteilgrößen wurde dem Datenblatt (Yageo) entnommen.

Definition des „Nenn-Meniskus“: Länge = Unterzuglänge, Höhe = 1/2 Bauteilhöhe

Diese Festigkeiten sind Idealwerte und können durch Porenanteile (reduzierter tragender Querschnitt) entsprechend verringert werden. Wenn im Experiment der Bruch nicht durch die Lötverbindung verläuft, z.B. Abriss des Pads der Leiterplatte oder Bruch in der Metallisierung des Bauteils, sind ebenfalls geringere Festigkeiten zu erwarten. Die erreichten Scherfestigkeiten sind in Tabelle 24 aufgelistet.

Scherfestigkeit Lotspaltdicke [μm]	Kraft [kg] R0201	Kraft [kg] R2010
10	0.829	20.966
20	0.812	20.489
30	0.802	20.210

Tabelle 24: Scherfestigkeiten

Die berechnete Scherfestigkeit sinkt nur minimal mit steigender Lotspaltdicke (wegen sinkender Scherrate) und kann daher als unabhängig von der Lotspaltdicke betrachtet werden (im Rahmen der Streuung experimenteller Werte).

4.2 Quantifizierung der Ermüdungsschädigung - Abnahme der Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit nach Temperaturzyklen sinkt im Vergleich zum Ausgangswert (0 Zyklen) ab, da der wachsende Ermüdungsriss in der Lötverbindung den tragenden Querschnitt verringert. Viele Lötverbindungen bestehen geometrisch aus Lotspalt und Meniskus. In der Regel wächst der Ermüdungsriss zunächst durch den Lotspalt und nach dessen Trennung in den Meniskus, entweder aufgrund Scherbelastung „auf kurzem Weg“ schräg durch den Meniskus oder vertikal entlang der Bauteil-Stirnseite. Letzteres ist Beobachtungen zufolge der bevorzugte Risspfad bei kleineren Bauteilen bzw. bei erhöhtem Lotvolumen.

Der Erfahrung nach ist die Risswachstumsgeschwindigkeit bei gegebener Belastung in etwa konstant, d.h. auch die Abnahme der relativen Scherfestigkeit ($F(x \text{ Zyklen})/F(0 \text{ Zyklen})$) erfolgt etwa linear mit der Zyklenzahl. Im vorliegenden Projekt wurden Lotspalt- und Meniskusgeometrie gezielt variiert, daher ist zu erwarten, dass hier die Abnahme der relativen Scherfestigkeit mit 2 Steigungen beschrieben werden kann, zu Beginn entsprechend Rissfortschritt im Lotspalt und darauf folgend Rissfortschritt im Meniskus. Eine theoretische Betrachtung dessen zeigen die Abbildung 109 und Abbildung 110 anhand der Rissanteile. Für den Rissanteil zwischen 0 und 1 wird der tragende Querschnitt des Lotspalts von 1 auf 0 reduziert, für den Rissanteil zwischen 1 und 2 derjenige des Meniskus von 1 auf 0.

Abbildung 109 zeigt die Abnahme der relativen Scherfestigkeit mit zunehmender Risslänge am Beispiel des R0201. Die Geometrie der Lötverbindung wurde am Schliff gemessen. Abbildung 110 zeigt das Verhalten des R2010.

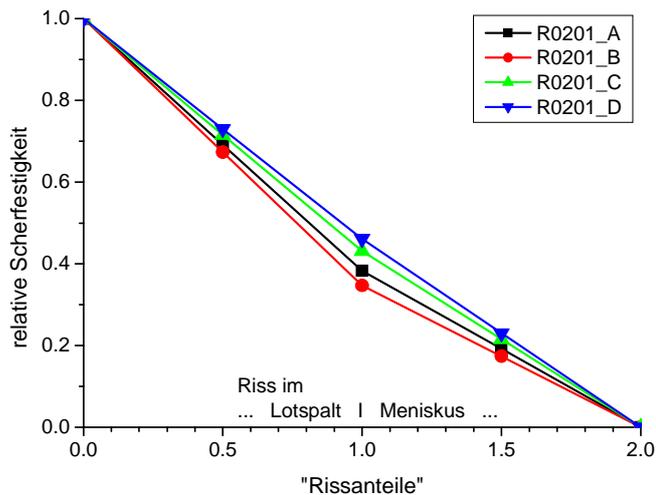


Abbildung 109: Abnahme der relativen Scherfestigkeit beim R0201

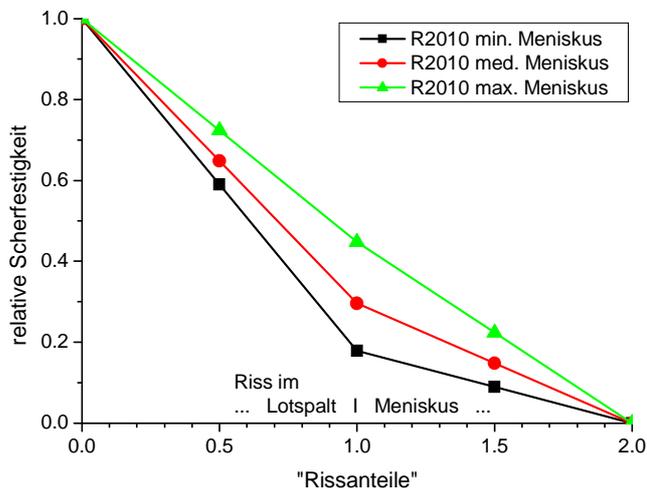


Abbildung 110: Abnahme der relativen Scherfestigkeit beim R2010

„Nenn-Geometrie“:

Meniskus „min“: Länge = 1/2 Unterzuglänge, Höhe = 1/4 Bauteilhöhe

Meniskus „med“: Länge = 1 Unterzuglänge, Höhe = 1/2 Bauteilhöhe

Meniskus „max“: Länge = 2 Unterzuglänge, Höhe = 1 Bauteilhöhe

Mit diesen Betrachtungen lässt sich erklären, dass die wachsenden Ermüdungsrisssanteile auch einen gestuften Verlauf zeigen können, je nach der Zyklenzahl, die den Riss zunächst durch den Lotspalt und dann durch den Meniskus treibt. Die Höhe des „Knickpunkts“ wird durch die tragenden Anteile von Lotspalt bzw. Meniskus bestimmt. Die Lage des „Knickpunkts“ in Zyklen ergibt sich aus den in Lotspalt und Meniskus unterschiedlichen Rissgeschwindigkeiten.

Es zeigt sich ebenfalls, dass ein jeweiliger Porenanteil den tragenden Querschnitt entsprechend reduzieren wird.

4.3 Modell für die Kriechermüdung von Lötverbindungen

Das im AiF Projekt 132ZN „Volumeneffekte“ [11] entwickelte Modell zur Abschätzung der Lebensdauer unter Kriechermüdung wurde hier zugrunde gelegt. In diesem Modellansatz wird auf Basis geometrischer Daten (Lotvolumen, Bauteil, Leiterplatte), den Ausdehnungskoeffizienten (Bauteil, Leiterplatte) und den Kriechdaten des Lots die für einen Temperaturzyklus (Rampe, Haltezeit) entstehende Hysterese-Kurve (Spannung und Dehnung im Lot) bestimmt. Die Breite der Hysterese-Kurve ist die Dehnungsamplitude $\Delta\epsilon$, die mit dem Coffin&Manson Zusammenhang die Zyklenzahl N_f bis zum Ausfall ergibt. Mit den Zahlenwerten 0.5 bis 1 im Coffin&Manson Zusammenhang ergibt sich ein Streuband, welches die Unsicherheit bei der Vorhersage der Ermüdungslebensdauer repräsentiert.

$$N_f = \left(\frac{0.5 \dots 1}{\Delta\epsilon} \right)^2 \quad \text{Coffin\&Manson Zusammenhang}$$

Das Kriechgesetz (Materialverhalten, Dehnrate $\dot{\epsilon}$ in Abhängigkeit von der Spannung σ und der Temperatur T) lautet wie folgt:

$$\dot{\epsilon} = A1 \cdot [\sinh(A2 \cdot \sigma)]^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

mit den Materialparametern (Daten für SnAgCu nach J.P. Clech):

$A1 = 7.93E+05 \text{ s}^{-1}$, $A2 = 0.0356 \text{ MPa}^{-1}$, $n = 6.00$, $Q/R = 8166.5 \text{ K}$

In den folgenden Grafiken (Abbildung 111 bis Abbildung 113) sind die Kriechraten verschiedener Lotlegierungen bei verschiedenen Temperaturen im Vergleich aufgetragen.

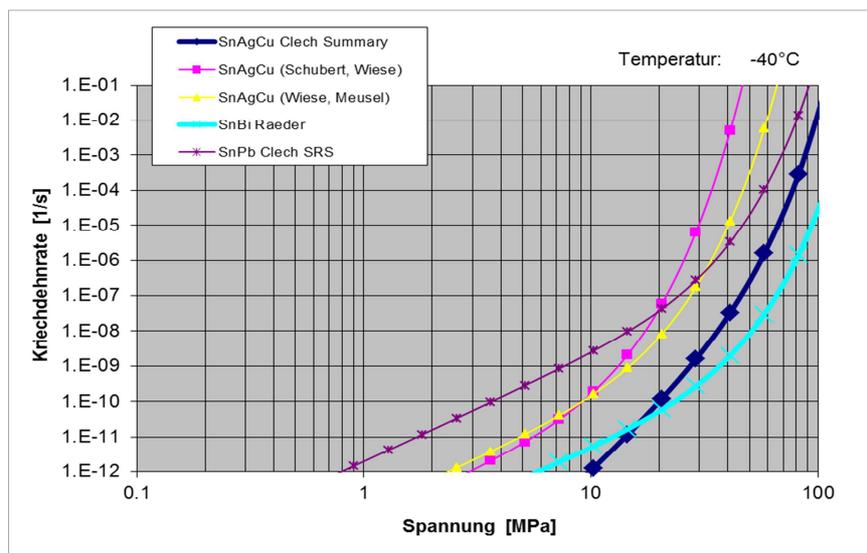


Abbildung 111: Lotkriechraten bei -40°C

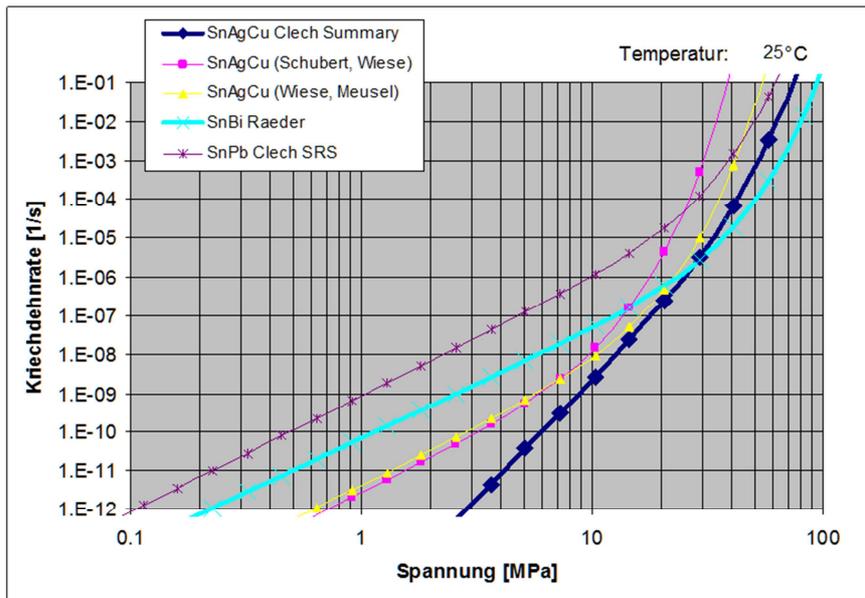


Abbildung 112: Lotkriechraten bei 25°C

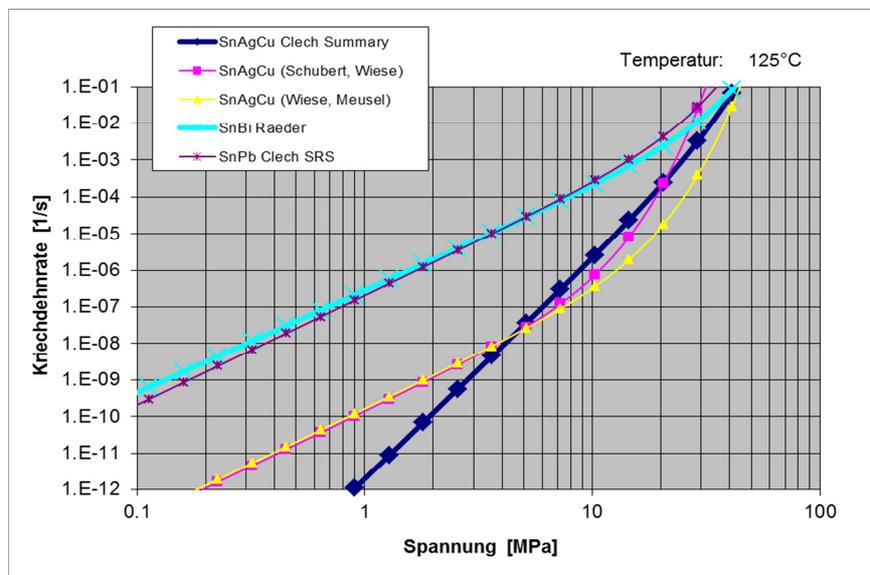


Abbildung 113: Lotkriechraten bei 125°C

4.4 Abschätzung der Lebensdauer

Ausgangspunkt ist wiederum das im AiF Projekt 132ZN „Volumeneffekte“ [11] entwickelte Modell zur Abschätzung der Lebensdauer unter Kriechermüdung. Wie im Modell Scherfestigkeit (siehe oben) werden auch hier zwei Volumenelemente betrachtet (Lotspalt und Meniskus), welche mit der gleichen Dehnrate belastet werden und deren Kräfte sich addieren. Ausgewertet wird die Hysterese-Kurve des Lotspalts, welche sich im betrachteten Temperaturzyklus ergibt. Die Breite der Hysterese-Kurve ist die Dehnungsamplitude $\Delta\epsilon$, die mit dem Coffin&Manson Zusammenhang die Zyklenzahl N_f bis zum Ausfall ergibt. In den folgenden Grafiken (Abbildung 114 bis Abbildung 116) ist jeweils das Streuband dargestellt, welches sich mit 0.5 bzw. 1 ergibt.

$$N_f = \left(\frac{0.5 \dots 1}{\Delta \epsilon} \right)^2$$

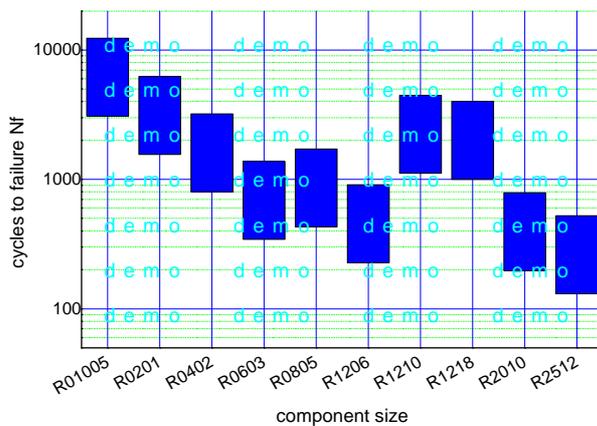


Abbildung 114: Berechnete Zyklenzahl - Bauteilgröße („Nennwerte“)

Abbildung 114 zeigt die berechnete Zyklenzahl zur Bauteilgröße („Nennwerte“). Folgende Parameter wurden verwendet: Rxy auf 1.6 mm Leiterplatte, SnAgCu Lot (Kriechdaten nach J.P. Clech), T = -40 / +125°C, Rampe/Haltezeit 5/10 min (0.5h)

Die hier für die Lotgeometrie verwendeten „Nennwerte“ sind mit der Bauteilgeometrie wie folgt verknüpft:

- „Nenn-Lotspalthöhe“ = 20µm
- „Nenn-Meniskus“ (Länge = Lotspatlänge, Höhe = Bauteilhöhe / 2)

Offensichtlich sind kleinere Bauformen im Hinblick auf die Zuverlässigkeit günstiger. Die Bauteillänge bestimmt vorrangig die Dehnungsamplitude, die breiteren Bauteile können über die größeren Lotquerschnitte eine stärkere Verbiegung der Leiterplatte erzeugen, welche die Lötstellen weniger belastet.

Abbildung 115 zeigt die berechnete Zyklenzahl zur Variation der Lotmenge. Folgende Parameter wurden verwendet: Rxy auf 1.6 mm Leiterplatte, SnAgCu Lot (Kriechdaten nach J.P. Clech), T = -40 / +125°C, Rampe/Haltezeit 5/10min (0.5h).

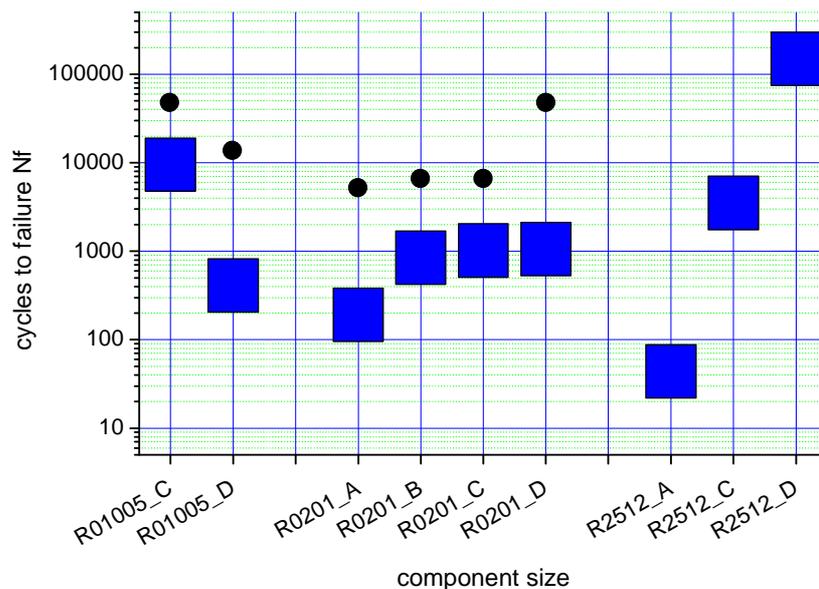


Abbildung 115: Berechnete Zyklenzahl - Variation Lotmenge

Die Symbole stehen hier für experimentelle Ergebnisse aus dem Schertest: Aus den Werten für 0 und 2000 Zyklen ergibt sich extrapoliert auf (relative) Scherkraft = 0 eine Ausfall-Zyklenzahl. Die Messwerte und die mit der exemplarisch am Schliff ermittelten Lotgeometrie berechneten Werte stimmen nicht wirklich überein, Tendenzen lassen sich jedoch erkennen. Die vergleichsweise kleine berechnete Zyklenzahl des R01005_D ist auf einen kleinen Lotspalt (5µm) zurückzuführen. Der Einfluss der Lotmenge ist offenbar für große Bauteile (R2512) stärker als für kleinere (R0201).

Abbildung 116 zeigt die berechnete Zyklenzahl zur Variation des Lotspalts sowie ein- und beidseitige Bestückung. Verwendete Parameter sind: Rxy auf 1.6 mm Leiterplatte, SnAgCu Lot (Kriechdaten nach J.P. Clech), T = -40 / +125°C, Rampe/Haltezeit 5/10 min (0.5h).

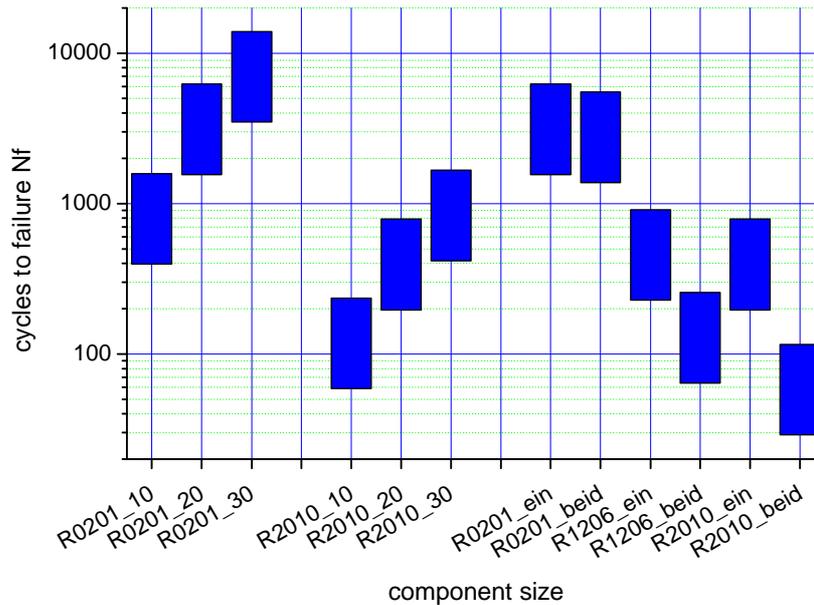


Abbildung 116: Berechnete Zyklenzahl - Variation Lotspalt

Für R0201 und R2010 wurde der Lotspalt variiert auf 10, 20, 30µm, ein wachsender Lotspalt erhöht die Zyklenzahl deutlich. Die einseitige bzw. beidseitig gegenüber angeordnete Bestückung mit Bauteilen (hier R0201, R1206 und R2010) zeigt, dass kleine Bauteile die Leiterplatte kaum verbiegen, die Behinderung der Verbiegung (Bestückung gegenüber) also kaum negative Auswirkungen hat. Je größer die Bauform desto stärker wirkt sich die beidseitige Bestückung negativ aus.

4.5 Theoretische Betrachtung einer Unsymmetrie

Insbesondere bei Zweipolern ist oft eine Unsymmetrie in linker und rechter Lötstelle zu beobachten (Abbildung 117). Zunächst ist das meist erwünschte „Einschwimmen“ des Bauteils in der Liquidusphase im Lötprozess geprägt von den Grenzflächenspannungen zwischen flüssigem Lot und den benetzten Oberflächen. Hier stellt sich somit ein Kräftegleichgewicht ein, welches jedoch die geometrischen Unterschiede zwischen den Lötstellen (z.B. Gasblasen = Poren) bei der Erstarrung einfriert.

Im Schertest ist zu erwarten, dass die Lötstellen mit dem Meißel derart belastet werden, dass sich die Verschiebungsgeschwindigkeit auf beide Lötstellen gleichermaßen einstellt. Die rückwirkende Kraft ergibt sich dann als Summe der Kräfte beider Lötstellen, deren mögliche Ungleichheit wenig Einfluss haben wird.

Bei der Ermüdungsbelastung durch Temperaturzyklen hingegen muss ein Kräftegleichgewicht der beiden Lötstellen angesetzt werden, also der Kraft, welche die Verbiegung von Bauteil und Leiterplatte erzeugt. Ein kleinerer tragender Lotquerschnitt auf einer Seite des betrachteten Zweipolers hat damit eine (linear) größere Spannung und mit dem Kriechgesetz eine (exponentiell) höhere Kriechrate zur Folge.

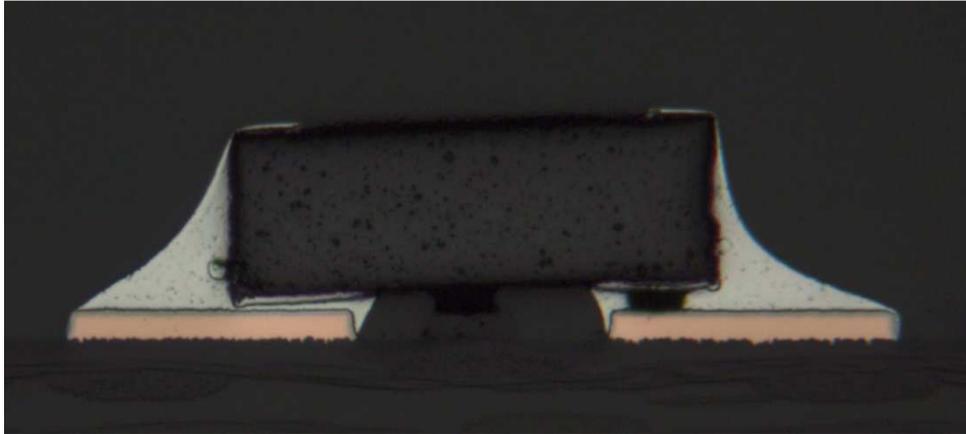


Abbildung 117: Unsymmetrie linke/rechte Lötstelle

Abbildung 117 zeigt die Unsymmetrie von linker und rechter Lötstelle, hier sichtbar: Lotspalthöhe, Pore, Länge der Metallisierung, ggf. Meniskusform.

Generell kann eine Unsymmetrie aufgrund von beeinflussbaren bzw. nicht (oder schwer) beeinflussbaren Ursachen entstehen, gemäß folgender Einteilung in Anlehnung an eine Betrachtung von H. Wohlrabe, TUD.

Unsymmetrie - beeinflussbare Ursachen:

- Padgeometrie links/rechts (Pad, Lötstopp, Anschlussleitungen, Vias)
- Lotmenge links/rechts (Genauigkeit Pastendruck)

Unsymmetrie - nicht (schwer) beeinflussbare Ursachen:

- Bauteil-Metallisierung, unterschiedliche Breite links/rechts (Toleranzen)
- Porenanteil links/rechts
- Lotspalthöhe links/rechts
- Benetzungseigenschaften links/rechts (*worst case* = Grabstein)

Das im AiF Projekt 132ZN „Volumeneffekte“ [11] entwickelte Modell zur Abschätzung der Lebensdauer unter Kriechermüdung wurde hier wie folgt modifiziert: Im ursprünglichen Modell wird Symmetrie der Lötstellen vorausgesetzt, d.h. mit einem Halbmodell werden für jeden Zeitpunkt die Kräfte und Verschiebungen entsprechend Geometrie, Materialgesetz, Rand- und Gleichgewichtsbedingungen berechnet, ausgehend von den Ergebnissen des vorhergehenden Zeitpunkts. Dabei wird der (belastende) Temperaturzyklus mit jeweils zwei Rampen und Haltezeiten definiert. Der Modellansatz wurde so erweitert, dass aufgrund der aktuellen Werte der einen Lötverbindung die Verschiebungsgeschwindigkeit der anderen derart angepasst wird, dass die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt bleiben. Diese sich selbst korrigierende Anpassung wurde in die numerische Berechnung implementiert. Ausgewertet wird dann nur die Hysterese-Kurve der „weniger festen“ Seite, die andere ist hinsichtlich Schädigung nicht relevant. Im Folgenden (Abbildung 118 bis Abbildung 120) werden einzelne Parametervariationen exemplarisch beschrieben.

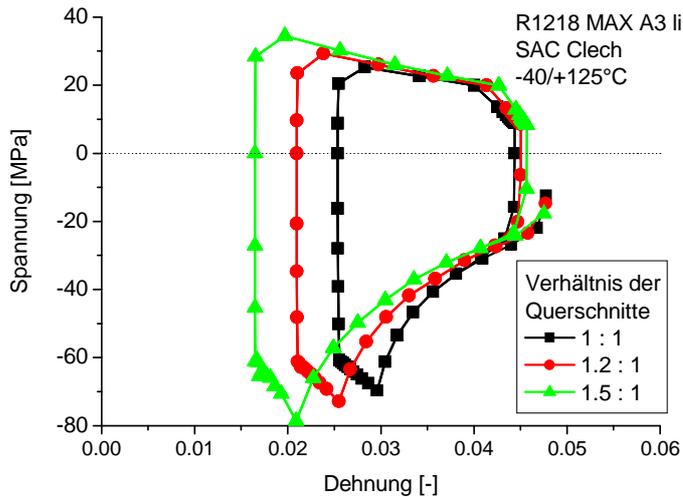


Abbildung 118: Betrachtung der Hysterese bei einer Unsymmetrie

In Abbildung 118 wird die Hysterese bei einer Unsymmetrie von linke/rechte Lötstelle betrachtet.

Der auf einer Seite kleinere tragende Querschnitt führt im Kräftegleichgewicht zu einer erhöhten Kriechnachgiebigkeit, also zu einem „weicheren“ Verhalten der Lötstelle. Damit konzentriert sich die Dehnrate auf die weichere Seite, die Dehnungsamplitude wird breiter und die andere Seite wird entsprechend weniger geschädigt. Tatsächlich ändert sich die Hysterese ähnlich wie bei Änderung der elastischen Nachgiebigkeit, denn auch letztere bestimmt die Aufteilung zwischen elastischer Verformung und Kriechverformung. Folgende Grafik (Abbildung 119) verdeutlicht den Einfluss der Geometrie von linke zu rechte Lötstelle:

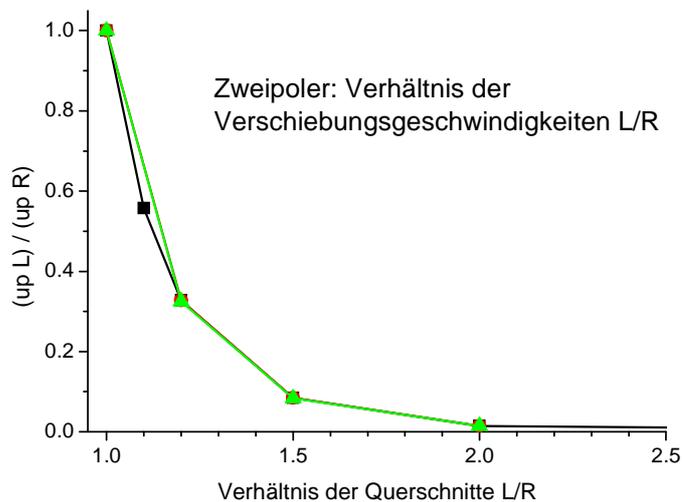


Abbildung 119: Verhältnis der Verschiebungsgeschwindigkeiten

Es handelt sich hier um eine „Momentaufnahme“ der Verschiebungsgeschwindigkeiten bzw. deren Verhältnis am Zyklus-Ende, die Verschiebungsgeschwindigkeiten ändern sich im Verlauf der Hysterese als Funktion der Kraft (Spannung). Die sich je-

weils ergebende Breite der Hysterese-Kurve ist die Dehnungsamplitude $\Delta\epsilon$, die mit dem Coffin&Manson Zusammenhang die Zyklenzahl N_f bis zum Ausfall ergibt.

$$N_f = \left(\frac{0.5 \dots 1}{\Delta\epsilon} \right)^2$$

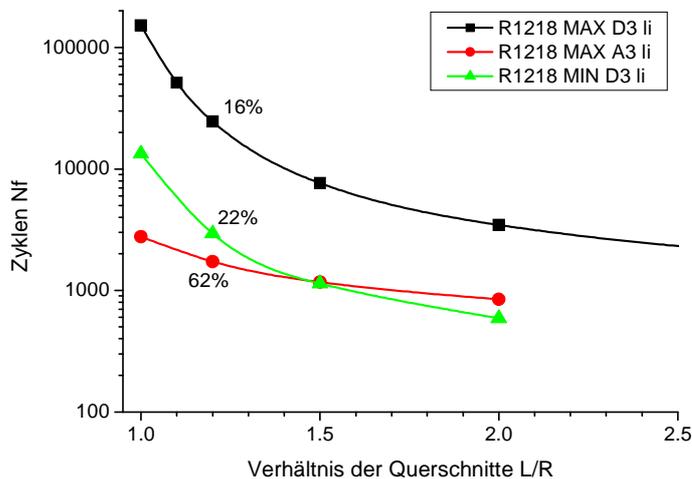


Abbildung 120: Berechnete Ausfall bei unsymmetrischen Querschnitten

Abbildung 120 zeigt den berechneten Ausfall zu Zyklenzahlen im Fall unsymmetrischer Querschnitte, hier linke zu rechte Lötstelle.

Bei ohnehin hoher Belastung (also kleinem N_f) scheint sich die Unsymmetrie weniger deutlich auszuwirken als bei geringer Belastung, denn bei einem Verhältnis der Querschnitte von 1.2 : 1 (d.h. 20% Unterschied) kann die Zyklenzahl auf unter 20% des „symmetrischen“ Wertes absinken.

In diesen Betrachtungen zeigte sich der tragende Querschnitt als maßgebende Einflussgröße. Die Lotspalthöhe selbst geht nur wenig ein, es sei denn, sie wird durch Gasblasen (Poren) erzeugt, was wiederum einem kleineren tragenden Querschnitt entspricht. Dies verdeutlichen auch die folgenden Bilder aus Abbildung 121, die Beispiele für eine Unsymmetrie linke/rechte Lötstelle und die beobachtete Ermüdungsschädigung zeigen.

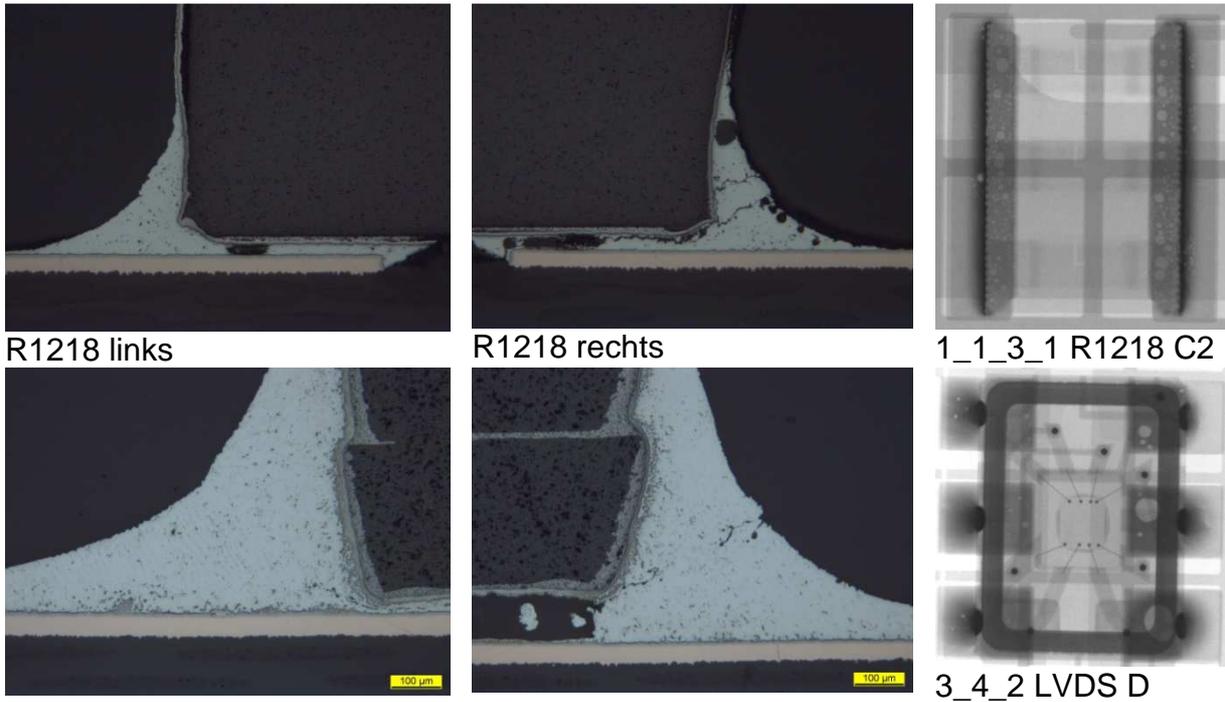


Abbildung 121: Beispiele für eine Unsymmetrie

Es ist auffällig, dass einzelne Merkmale einer generell ermüdungsfesteren Lötstelle (z.B. der größere Lotspalt) in diesem Zusammenhang die schwächere Seite bestimmen, denn hier konzentriert sich aufgrund des Kräftegleichgewichts die zyklische Kriechverformung und damit die Ermüdungsschädigung durch Risswachstum.

5 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Die Untersuchungen ergaben folgende eindeutige Zusammenhänge.

Zusammenhang: Lotpastenmenge - Lotvolumen – Lötqualität

1. Die Lötstellen der Padvariante B, C („Standard-Padgröße“) und D sind nach IPC A-610 Klasse 2 zulässig und zu empfehlen. Die untersuchte Variation der Lotpastenmenge hat (bis auf wenige Ausnahmen) keinen negativen Einfluss auf die Lötqualität.
Ausnahme: Lotkugel- und Brückenbildung bei starkem Überdruck.
2. Die Padvariante A (Pads teilweise grenzwertig klein dimensioniert) kann nicht empfohlen werden.
Ausnahme: Die Bauteilanschlussflächen liegen nur unterhalb des Bauteils (BTC = Bottom Termination Components) und die Padflächen sind den Bauteilanschlussflächen angepasst.
3. Die Lotpastenmenge „MIN“ führt bei allen Padvarianten teilweise zu grenzwertig mageren Lötstellen.

Zusammenhang: Lotpastenmenge - Lotvolumen - Zuverlässigkeit

1. Ein Zusammenhang zwischen Lotvolumen und Zuverlässigkeit kann bauteilspezifisch hergestellt werden. Je kleiner die Komponenten (01005), desto geringer ist die Abhängigkeit der Zuverlässigkeit vom Lotvolumen bei gleichem Padlayout.
2. Größere Pads (Variante D) führen durch größere Lötstellen zu erhöhter Zuverlässigkeit (Ausnahme, wenn bauteilseitig nur eine Unterseitenmetallisierung vorhanden ist). Das widerspricht allerdings dem Ansatz der Miniaturisierung.
3. Ein Mehrangebot an Lot führt bei Padvariante A in Verbindung mit Bauteilen die nur Anschlussflächen auf der Unterseite aufweisen, zu einer Lotspalt- und somit Lebensdauererhöhung.

Für kleine keramische Komponenten (0201, 01005) ergab die Untersuchung der Sensitivität der Lötstellenzuverlässigkeit hinsichtlich Lotmenge folgende Ergebnisse.

1. Für kleine Komponenten (Baugröße 0201, 01005) liegt die sichere Untergrenze des Lotpastenvolumens bezogen auf die nominale Padgröße für Padvariante C bei 75% (Eingriffsgrenze in der Prozessüberwachung).
2. Ungleiche Lotmenge an den Anschlüssen führt zu teils erheblicher Lebensdauerverkürzung (abhängig von Geometrie und Belastung).
3. Es wurde keine Bauteilbeschädigung durch ein deutliches Überangebot an Lot (innerhalb der zulässigen Grenzen nach IPC-A-610, jedoch keine signifikante Lotbenetzung auf den benetzbaren Flächen auf der Bauteiloberseite) beobachtet.

Für große keramische Komponenten wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Spezielle Bauelementaufbauten (nachgiebiges Innenleben oder an die Leiterplattenausdehnung angepasste Materialien) erhöhen die Zuverlässigkeit.
2. Zusätzliche Lotmenge/erhöhter Lotspalt führt zu erhöhter Lebensdauer.
3. Erhöhung des Lotspalts, z.B. durch Lotmengen- und Pad-Layoutvariation, ist nur bedingt möglich, abhängig von Bauteilgeometrie und Bauteilanschlussflächen sowie Benetzungsfreudigkeit. Es stellt sich meist zunächst ein konvexer

Lötmeniskus ein, bevor der Lotspalt signifikant wächst. Erst bei extremer Lotmenge entsteht ein erhöhter Lotspalt.

4. Bei Bauteiltypen, die nur Anschlussflächen auf der Unterseite haben, ist bei geeignet (klein) dimensionierten Leiterplattenanschlussflächen und erhöhtem Lotpastenvolumen eine Lotspalterhöhung realisierbar.
5. Fehlende Kompensation von Dehnungsdifferenzen durch die Leiterplatte bei gegenüberliegender Bestückung führt zu deutlich reduzierter Lebensdauer.

Die Untersuchung des Zusammenhanges von (zusätzlicher) Lotmenge und Lebensdauer zeigt Folgendes:

1. Die Erhöhung der Lotmenge bei gleicher Padgeometrie führt zu erhöhter Lebensdauer. Ausnahme ist Padvariante A in Verbindung mit Bauteilen, die seitliche Benetzungsflächen aufweisen. Dies führt oftmals zum Hochziehen des Lotes am Bauteil und nicht zur Lotspalt- und somit Lebensdauererhöhung.
2. Zusätzliche Lotmenge/erhöhter Lotspalt führt zu erhöhter Lebensdauer, wobei nicht eindeutig ersichtlich ist, welchen Anteil der erhöhte Lotspalt bzw. die erhöhte Lotmenge an einer erhöhten Lebensdauer haben.
3. Die Lotpastenmenge „MIN“ führt bei allen Padvarianten teilweise zu grenzwertig mageren Lötstellen (zulässig nach IPC-A-610) und bei größeren Komponenten zu verminderter Zuverlässigkeit.

Die Modellrechnungen zeigen folgende Ergebnisse:

1. Modellrechnungen erlauben tendenzielle Betrachtungen zur Zuverlässigkeit, eine absolute Vorhersage ist jedoch unsicher.
2. Den Modellrechnungen nach ist insbesondere eine (gleichmäßige) Erhöhung des Lotspalts günstig, dessen Realisierung mit einfachen Mitteln jedoch nicht möglich erscheint, aber auch ein größeres Meniskusvolumen sorgt für eine verbesserte Zuverlässigkeit.
3. Bei Zweipolern (und weiteren) kann sich eine Unsymmetrie in den Lötstellen deutlich auf die erreichbare Zuverlässigkeit auswirken, d.h. „symmetrische“ Lötstellen sind anzustreben.

Folgende Prozessempfehlungen wurden erarbeitet:

1. Das Überdrucken der Padfläche erscheint in einem begrenzten Rahmen (bis zu 50% Padfläche) sinnvoll (abhängig von der Lotpasten - Leiterplattenkombination). Es besteht jedoch die Gefahr Tombstoning zu provozieren.
2. Die bedruckte Fläche unter dem Bauteil sollte jedoch nicht über das Pad hinaus vergrößert werden, da dies vermehrt zu Lotkugelbildung führt.
3. Weitere Überdruckung (größer 50% Padfläche) führt vermehrt zu Lotperlen- und Kurzschlussbildung, hier ist stattdessen ein erhöhter Lotpastenauftrag (z.B. über Stufenschablone oder Zusatzdispensen) sinnvoll.

Die Bewertung der eingesetzten Lotpasten ergibt folgende Erkenntnisse:

1. SAC305 ist als Lot sinnvoll einsetzbar.
2. BSA1 hält bis zu seiner jeweiligen (geringen) Maximalzyklenzahl gut und fällt dann (bezogen auf die Scherfestigkeit) schlagartig ab, weist aber eine geringere Festigkeit als SAC305 auf.
3. SCANGe weist gute, teilweise leicht bessere, teilweise leicht schlechtere Ergebnisse als die SAC305-Lotpaste auf und stellt eine gute Alternative dar.

6 Verwendung der Zuwendung

6.1 Personaleinsatz

Im Rahmen des Vorhabens wurde wissenschaftlich-technisches Personal in einem Umfang von 22,15 Mannmonaten eingesetzt.

6.2 Gerätebeschaffung

Geräte wurden gemäß Finanzierungsplan nicht angeschafft.

6.3 Leistungen Dritter

Leistungen Dritter wurden gemäß Finanzierungsplan nicht in Anspruch genommen.

6.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Die Abstimmung mit der Industrie über die zu untersuchenden Komponenten und die dazugehörige Datensammlung hat einen erheblich größeren Zeitaufwand erfordert als ursprünglich veranschlagt. Krankheitsbedingte längere Ausfälle von zwei Mitarbeitern und ein Geräteengpass beim notwendigen 3D-Lotpasteninspektionssystem haben die Bearbeitung des Projekts zusätzlich verzögert, was zu einer kostenneutralen Verlängerung des Projekts um 9 Monate führte.

7 Umsetzung der Ergebnisse in die Industrie, Ergebnistransfer

Im Folgenden sollen die bisherigen und zukünftigen Transfermaßnahmen im Rahmen des geplanten Transferkonzepts dargestellt werden.

7.1 Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Die Zwischenergebnisse des Projektes wurden laufend den Mitgliedern des PA mitgeteilt. Hierzu fanden 4 PA-Sitzungen während der Projektlaufzeit statt, siehe Tabelle 25. Des Weiteren wurden die Ergebnisse im zuständigen Fachausschuss der Forschungsvereinigung (FA10: Mikroverbindungstechnik) regelmäßig dargestellt, siehe Tabelle 26.

Datum/ Zeitraum	Maßnahme	Rahmen	Ziel/Bemerkung
April 2012	PA Sitzung Kick-Off- Meeting	Projektbegleiten- der Industrieaus- schuss	Vorstellung des Projekts und Diskus- sion der geplanten Arbeiten. Input aus dem PA
Juli 2013	PA Sitzung	Projektbegleiten- der Industrieaus- schuss	Vorstellung der erzielten Ergebnisse, Diskussion und Festlegung des weite- ren Vorgehens
Juli 2014	PA Sitzung	Projektbegleiten- der Industrieaus- schuss	Vorstellung der erzielten Ergebnisse, Diskussion und Festlegung des weite- ren Vorgehens
Okt. 2014	PA Sitzung	Projektbegleiten- der Industrieaus- schuss	Ergebnispräsentation detaillierte Darstellung der Vorge- hensweise und der Ergebnisse, Dis- kussion aller erzielten Ergebnisse

Tabelle 25: Transfermaßnahmen für die direkt am PA beteiligte Firmen

Datum/ Zeitraum	Maßnahme	Rahmen	Ziel/Bemerkung
Dez. 2012	FA10-Sitzung	Fachausschuss der Forschungsvereini- gung (DVS)	Schriftlicher und mündlicher Zwi- schenbericht, Diskussion
April 2013	FA10-Sitzung	Fachausschuss der Forschungsvereini- gung (DVS)	Schriftlicher und mündlicher Zwi- schenbericht, Diskussion
Dez. 2013	FA10-Sitzung	Fachausschuss der Forschungsvereini- gung (DVS)	Schriftlicher und mündlicher Zwi- schenbericht, Diskussion
April 2014	FA10-Sitzung	Fachausschuss der Forschungsvereini- gung (DVS)	Schriftlicher und mündlicher Zwi- schenbericht, Diskussion
Nov. 2014	FA10-Sitzung	Fachausschuss der Forschungsvereini- gung (DVS)	Schriftlicher und mündlicher Ab- schlussbericht, Diskussion

Tabelle 26: Transfermaßnahmen für die Forschungsvereinigung

7.2 Spezifische Transfermaßnahmen nach Laufzeitende des Vorhabens

Nach Laufzeitende werden die Ergebnisse zügig einem breiten Publikum zugänglich gemacht. Hierzu werden verschiedene Transfermaßnahmen ergriffen, die sich bereits bei der Durchführung früherer Projekte bewährt haben. Die Ergebnisse werden auf Konferenzen, Tagungen, Veranstaltungen wie Technologietagen und Seminaren verbreitet, siehe Tabelle 27.

Zusätzlich sollen die Projektergebnisse der Öffentlichkeit über Publikationen zugänglich gemacht werden, siehe Tabelle 28. Allgemein sollen die Multiplikatoren von Verbänden wie FED (Fachverband Elektronik-Design), DVS (Deutscher Verband für Schweißtechnik), ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.) und VDI (Verein Deutscher Ingenieure) genutzt werden.

Datum/ Zeitraum	Maßnahme	Rahmen
Feb. 2015	Vortrag	ISIT-Seminar zur Baugruppenfertigung
März 2015	Vortrag	BFE-Jahrestagung
Juni 2015	Vortrag	Technologieseminar "Wir gehen in die Tiefe"
Sept. 2015	Vortrag	Hamburger Lötzirkel
Sept. 2015	Vortrag	FED-Konferenz
Sept. 2015	Vortrag	ISIT-Seminar zur Baugruppenfertigung
Q4 2015	Vortrag	FED-Regionalgruppentreffen
Q1 2016	Vortrag	ZVEI Arbeitskreises „Rework / Repair“
Feb. 2016	Vortrag	EBL-Tagung
Q2 2016	Vortrag	Arbeitskreistreffen des FED Arbeitskreises „Moderne BG-Fertigung“
Q3 2016-Q2 2017	Vortrag	Technologietage verschiedener Firmen

Tabelle 27: Transfermaßnahmen über Fachveranstaltungen

Q1.. Quartal1, Q2...Quartal2, Q3...Quartal3, Q4...Quartal4

Datum/ Zeitraum	Maßnahme	Rahmen
April 2015	Link zum Abschlussbericht	Homepage des ISIT
April 2015	Publikation	Schweißen und Schneiden, Fachzeitschrift des DVS
Juli 2015	Publikation	Fachzeitschrift PLUS
Q3 2015	Publikation	EPP, Productronic

Tabelle 28: Transfermaßnahmen über Publikationen

Das dargestellte Transferkonzept erscheint realistisch. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Fraunhofer ISIT seit mehr als 15 Jahren auf dem Arbeitsgebiet der Prozessoptimierung, Fertigung und Bewertung von elektronischen Baugruppen tätig ist und einen breit gefächerten industriellen Kundenkreis, zu dem viele KMU zählen, aufweist. Zu den Dienstleistungsangeboten des ISIT gehören seit dem gleichen Zeitraum Schulungsmaßnahmen in Form spezieller In-House Seminare als auch wieder-

kehrende Seminare und Technologietage zu verschiedensten Themenbereichen. In diesem Umfeld können die Ergebnisse gezielt verbreitet werden.

Die im PA beteiligten Firmen sind stark an den Ergebnissen interessiert und können diese in die Optimierung eigener Produkte und Prozesse einfließen lassen.

Eine Übertragung der Ergebnisse in die Industrie ist somit möglich und eine Umsetzung / Anwendung in der Fertigung binnen kurzer Zeit zu erwarten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde nachgewiesen, dass die Zuverlässigkeit von keramischen Komponenten stark von ihrer Größe beeinflusst wird. Durch die Unterschiede der Ausdehnungskoeffizienten von Keramik und FR4-Leiterplattenmaterial führt eine Temperaturwechselbeanspruchung bei großen keramischen Komponenten zum frühzeitigen Ermüdungsausfall der Lötstelle. Die Lötstellenzuverlässigkeit kann durch größere Pads und dementsprechend größere Lötstellen erhöht werden.

Eine Lotspalterhöhung und somit eine Erhöhung der Zuverlässigkeit ist realisierbar, wenn die Komponenten nur unten liegende Anschlussflächen aufweisen, die Leiterplattenpadgeometrien entsprechend angepasst dimensioniert sind und das angebotene Lotvolumen erhöht ist.

Kleine keramische Komponenten (Baugröße 0201, 01005) sind bei gleichem Padlayout deutlich weniger stark vom Lotvolumen abhängig als größere keramische Komponenten.

Die durchgeführten Modellrechnungen sind im Einklang mit den gemessenen Ergebnissen.

Der wissenschaftlich-technische Nutzen liegt in der Erarbeitung von Prozessempfehlungen für das Leiterplatten- und Schablonendesign sowie für den Lotpastendruck. Insbesondere für kleine Komponenten wurden Prozessgrenzen hinsichtlich des Lotpastendrucks definiert.

Innovativ ist hierbei die systematische Betrachtung der Zuverlässigkeit von gezielt durch Variation von Layout und Lotpastenmenge variierten Lötstellen kleiner und großer keramischer Komponenten unter Einsatz von mikrolegierten und niedrigschmelzenden Loten.

Insbesondere KMU können so in ihrer Fertigung einen sicheren Lotpastendruckprozess etablieren. Damit verbunden sind eine Erhöhung der Wertschöpfung und ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung im Reparatursektor, indem durch die Sicherstellung einer gleichmäßigen Qualität die Fehlerrate reduziert wird. Dies festigt die Marktposition von KMU. Erhöhte Verfahrenssicherheit und damit verbunden erhöhtes Vertrauen in das Fertigungsergebnis verstärkt die Kundenbindung und damit die Wettbewerbsfähigkeit der KMU.

In die Zukunft blickend ist durch immer kleinere Padgeometrien und die Verarbeitung immer kleinerer Komponenten mit weiteren Herausforderungen im Fertigungsprozess elektronischer Baugruppen zu rechnen. Da die realen Leiterplattendimensionen typischerweise von den Vorgaben nach unten abweichen, kommt es somit zu einer Padreduzierung. Relativ dazu sind die Druckschablonenöffnungen zu groß. Kleinere Öffnungen würden aber Probleme im Lotpastendruck provozieren und diesen instabil werden lassen. Somit kommt es zu einem Überangebot von Lotpaste, was die Lötstellenform und das Lötresultat beeinflusst. Das bedeutet, dass ein besonderes Augenmerk auf die Ausbildung der Lötstellen zu legen ist. Dies erfordert in letzter Konsequenz qualitativ hochwertige dünnere Stufenschablonen mit speziellen Beschichtungen. Durch Verwendung der Lotpastenkörnung Klasse 5 besteht die Möglichkeit die Aperturen in der Schablone weiter zu reduzieren.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

9 Literaturverzeichnis

- [1] „IPC-A-610E Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen“.
- [2] „Kontrolle ist besser als teures “Rework“, Hilpert Electronics AG, Polyscope Ausgabe 20/2010“.
- [3] EMPA, Günter Grossmann, „Zuverlässigkeit von Weichloten und Eigenschaften bleifreier Lote,“ EE-Kolleg, Colonia de Sant Jordi, März 2006.
- [4] „Reliability Issues in Leadfree Soldering for CSP and SMD Assemblies, P. Limaye, B. Vandavelde, 14. FED- Konferenz, Sept. 2006, Kassel“.
- [5] „Lead-free assembly and reliability of chip scale packages and 01005 components, Liu, Yueli, PhD, Auburn University, DAI-B 67/04, p. 2153, Oct. 2006“.
- [6] „Zuverlässigkeit von Lötverbindungen in Abhängigkeit von der Lotmenge, Mathias Nowo-ttnick, Universität Rostock, 1. ETFN, Hamburg, Jan. 2009“.
- [7] Parmi, „3D Laser SPI deutsch.pdf,“ 2013.
- [8] „XYZTEC,“ [Online]. Available: http://www.xyztec.com/condor_sigma/.
- [9] IPC, „J-STD-005A, Requirements for Soldering Pastes,“ 2012.
- [10] DKE, DIN-EN 62137-1-2 Teil 1-2: Scherfestigkeitsprüfung, Berlin: Beuth, 2008.
- [11] „Volumeneffekte und technische Zuverlässigkeit von bleifreien Lötstellen, AiF-Projekt 132ZN, Fraunhofer ISIT, IAVT der TU Dresden, ZVE des Fraunhofer IZM, April 2006“.