

# Schlussbericht vom 08.04.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20115 N

## 1. Thema

Untersuchung der Auswirkung ionischer Verunreinigungen in dünnen Spalten an realitätsnahen Aufbauten mit neuen miniaturisierten Bauelementen

## 2. Berichtszeitraum

01.07.2019 – 31.12.2021

## 3. Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

## 4. Forschungseinrichtungen

1. Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (ISIT)
2. Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **Förderhinweis und Danksagung**

Das IGF-Vorhaben Nr.: 20.115 N / DVS-Nr.: 10.101 der 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 (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Forschungsstellen Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (ISIT) und Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM) bedanken sich bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die anregenden Diskussionen und konstruktiven Ergänzungen sowie für das Bereitstellen von Versuchsmaterialien.

## **Verwendung der Zuwendung**

### Personaleinsatz

Im Rahmen des Vorhabens wurde bei der Forschungsstelle 1\_ISIT wissenschaftlich-technisches Personal (A.1) in einem Umfang von 18,66 Personenmonaten und bei der Forschungsstelle 2\_IFAM in einem Umfang 19,95 Personenmonaten eingesetzt.

### Gerätebeschaffung

Geräte wurden gemäß Finanzierungsplan nicht angeschafft. Die Anschaffungen zum HV-SIR-Test wurden aus Eigenmitteln der Forschungsstelle 1\_ISIT getätigt.

### Leistungen Dritter

Leistungen Dritter wurden gemäß Finanzierungsplan nicht in Anspruch genommen.

## **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

## **Angaben über gewerbliche Schutzrechte**

Es wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes keine gewerblichen Schutzrechte erworben. Eine Anmeldung eines gewerblichen Schutzrechtes ist nicht beabsichtigt.

## **Kurzzusammenfassung**

Die voranschreitende Miniaturisierung führt zu neuen Herausforderungen bei der Herstellung von elektronischen Baugruppen und Systemen. Vor diesem Hintergrund besteht ein besonderes Interesse daran, den Einfluss von ionischen Verunreinigungen, die durch Flussmittelreste aus dem Lötprozess hervorgerufen werden, neu zu bewerten. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf immer geringeren Isolationsabständen, höheren Betriebsspannungen und dem Einsatz der Baugruppen in kritischer feuchter Umgebung. Einen wesentlichen Punkt dieser Betrachtungen stellt der Verbleib von Kontaminationsrückständen in engen Spalten auf verdeckten Lötstellen z.B. von BTC-Komponenten dar.

Des Weiteren besteht aus Anwendersicht ein Bedarf daran, bestehende Testverfahren weiter zu optimieren. So sollen z.B. SIR-Tests übertragen werden auf reale Baugruppenapplikationen mit neuen Bauformen. Zudem soll die Testmethodik auf höhere Spannungen bis 800V ausgeweitet werden.

Ziel des Projektes ist es, ein vertieftes Verständnis der Vorgänge zur elektrochemischen Migration auf elektronischen Baugruppen bedingt durch die Auswirkungen verbleibender Rückstände bei sich einstellender Spaltsituation zu erhalten.

An ausgewählten, realitätsnahen Testbaugruppen werden die Alterungseigenschaften mittels elektrischer Tests bewertet. Untersucht werden Komponenten aus dem Signal- und Versorgungsspannungsbereich.

Parallel dazu werden mit analytischen Methoden die chemischen Zusammensetzungen im Umfeld der jeweiligen Bauelemente untersucht. Die Korrelation dieser elektrischen Tests und der analytischen Betrachtungen ist die Basis für ein Modell, welches die beobachteten Alterungsphänomene systematisch beschreiben kann. Damit sollen die Wechselwirkungen zwischen ionischen Kontaminationen, Flussmittelrückständen und Restfeuchtigkeit und deren Auswirkungen auf die Bauelemente insbesondere in Spaltsituationen und unter elektrischer Spannung bewertet werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden dann im weiteren Projektverlauf Testmethoden optimiert werden, um ein möglichst frühzeitiges Erkennen von elektrochemischer Migration zu ermöglichen.

Die Ergebnisse des Projekts sollen Anwendung finden in allen Bereichen der Elektronik fertigen- den Industrie, die vorwiegend durch kmU geprägt ist, wie z.B. in der Automobilzulieferindustrie, dem Maschinenbau oder der Industrieelektronik.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	11
1.1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	11
1.2	Zielsetzung.....	13
2	Stand der Forschung und Technik.....	14
3	Arbeitshypothese .....	16
4	AP1: Materialauswahl und Beschaffung .....	18
4.1	Festlegung und Beistellung von Materialien .....	18
4.2	Lotpasten .....	19
4.3	Komponenten.....	20
4.4	Leiterplatte .....	21
5	AP2: Elektrische SIR-Tests.....	26
5.1	Aufbau der Testvehikel .....	26
5.2	SIR-Test Parameter .....	29
5.3	SIR-Test Messungen .....	31
5.3.1	SIR-Testmessungen 20V, 85/85 .....	31
5.3.2	SIR-Testmessungen 20V, 85/85, gereinigt .....	35
5.3.3	SIR-Testmessungen 100V, 85/85 .....	37
5.3.4	SIR-Testmessungen, Zusatzflux .....	41
5.3.4.1	SIR-Testmessungen, Vorversuche mit Zusatzflux .....	41
5.3.5	SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux.....	45
5.3.6	SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux.....	47
5.3.7	SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux.....	49
5.3.8	SIR-Testmessungen, Chip Array, Zusatzflux .....	51
5.3.9	Hochvolt-SIR-Test.....	54
5.3.9.1	Testaufbau .....	54
5.3.9.2	Qualifizierungstests.....	54
5.3.10	Erkenntnisse aus den SIR-Test Untersuchungen .....	58
6	AP3: Chemische Struktur.....	59
6.1	Untersuchungsmethoden.....	59
6.1.1	Photoelektronenspektroskopie (XPS) .....	59
6.1.2	Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (TOF-SIMS) .....	60
6.1.3	Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX).....	61
6.2	Analyse des Einflusses der Lötprozesse auf die chemische Struktur der Lotpasten..	63
6.3	Untersuchung der chemischen Struktur der Flussmittel in Abhängigkeit der Lötprozesse.....	67
6.4	Analysen an Testboards nach SIR-Test .....	72
7	AP4: Modellbildung zu Schädigungsmechanismen .....	81
7.1	Methodik .....	81
7.2	Modellbildung .....	82

8	AP5: Optimierung von Prüfverfahren .....	84
8.1	Elektrochemisches Rauschen (ECR).....	84
8.2	Validierung der ECR-Methode .....	86
9	Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen des Projektes .....	88
10	Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick.....	89
11	Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	91
11.1	Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens .....	91
11.2	Spezifische Transfermaßnahmen nach Laufzeitende des Vorhabens .....	92
12	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	94
13	Literaturverzeichnis.....	95

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für elektrochemische Migration und Dendritenbildung (links Dendrit unter einem Keramikcondensator, rechts REM-Aufnahme auf der Leiterplatte). .....	11
Abbildung 2: BTC.....	12
Abbildung 3: Spaltbildung <50µm, Flussmittelreste deutlich sichtbar.....	12
Abbildung 4: Lötprozessfenster des Flussmittels, [9] [10].....	15
Abbildung 5: Methodisches Gesamtkonzept.....	17
Abbildung 6: Layout Testboard.....	21
Abbildung 7: R1206, SIR-Test Struktur unter Bauteil mit LSL (links), ohne LSL (rechts).....	22
Abbildung 8: In das Bauteillayout integrierte SIR-Teststruktur.....	22
Abbildung 9: vom Bauteillayout unabhängige SIR-Teststruktur.....	23
Abbildung 10: SIR-Test Strukturen unter BGA49.....	24
Abbildung 11: SIR-Test Strukturen unter BGA144.....	24
Abbildung 12: SIR-Test Strukturen unter QFP80.....	25
Abbildung 13: SIR-Test Strukturen unter VQFN.....	25
Abbildung 14: R1206 gedruckt (links) und bestückt (rechts).....	27
Abbildung 15: Testboard bestückt.....	27
Abbildung 16: Lötprofil kalt.....	28
Abbildung 17: Lötprofil heiß.....	28
Abbildung 18: SIR-Testmessungen, R0603, 20V, 85/85.....	31
Abbildung 19: SIR-Testmessungen, R1206, 20V, 85/85.....	32
Abbildung 20: SIR-Testmessungen, Chip-Array 1206, 20V, 85/85.....	32
Abbildung 21: SIR-Testmessungen, QFP, 20V, 85/85.....	33
Abbildung 22: SIR-Testmessungen, BGA, 20V, 85/85.....	33
Abbildung 23: SIR-Testmessungen, SOT1216a, DC, 20V, 85/85.....	34
Abbildung 24: SIR-Testmessungen, SOT1216b, 20V, 85/85.....	34
Abbildung 25: SIR-Testmessungen, BGA nach Reinigung, 20V, 85/85.....	35
Abbildung 26: SIR-Testmessungen, BGA nach Reinigung, 20V, 85/85 (hohe Flussmittelmenge). .....	35
Abbildung 27: SIR-Testmessungen, R0402, 100V, 85/85.....	37
Abbildung 28: Partikel führt zur Reduzierung des Isolationswiderstands.....	37
Abbildung 29: SIR-Testmessungen, Chip-Array 1206, 100V, 85/85.....	38
Abbildung 30: SIR-Testmessungen, R1206, 100V, 85/85.....	38
Abbildung 31: R1206 gelötet, Partikel verringert Isolationswiderstand.....	39
Abbildung 32: SIR-Testmessungen, VQFN, 100V, 85/85.....	39
Abbildung 33: SIR-Testmessungen, BGA, 100V, 85/85.....	40
Abbildung 34: SIR-Testmessungen, BGA, Fluxdruck, 20V, 85/85.....	41
Abbildung 35: Auftrag von Zusatzflux.....	42
Abbildung 36: Auftrag von Zusatzflux, nach Lötung.....	42
Abbildung 37: SIR-Testmessungen, VQFN, Zusatzflux, 100V, 85/85, gelötet, gereinigt, Auftrag von Zusatzflux.....	43
Abbildung 38: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 100V, 85/85, gelötet, gereinigt, Auftrag von Zusatzflux.....	44
Abbildung 39: Testboard IGF 20115 N, 100V, 85/85, erhöhter FM-Anteil.....	44

Abbildung 40: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 100V.....	45
Abbildung 41: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 50V.....	45
Abbildung 42: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 20V.....	46
Abbildung 43: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 100V, 40/93.....	46
Abbildung 44: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 100V.....	47
Abbildung 45: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 50V.....	47
Abbildung 46: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 20V.....	48
Abbildung 47: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 100V, 40/93.....	48
Abbildung 48: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 100V.....	49
Abbildung 49: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 50V.....	49
Abbildung 50: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 20V.....	50
Abbildung 51: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 100V, 40/93.....	50
Abbildung 52: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 100V.....	51
Abbildung 53: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 50V.....	51
Abbildung 54: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 20V.....	52
Abbildung 55: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 100V, 40/93.....	52
Abbildung 56: Hochvolt-SIR-Test Board.....	54
Abbildung 57: Hochvolt-SIR-Test Board, gedruckt und teilbestückt.....	55
Abbildung 58: Hochvolt-SIR-Test Board gelötet.....	55
Abbildung 59: Testboard bedruckt.....	56
Abbildung 60: Testboard bestückt.....	56
Abbildung 61: Testboard gelötet.....	56
Abbildung 62: SIR-Testmessungen, DPAK, Zusatzflux, 500V.....	57
Abbildung 63: Dendritenbildung.....	57
Abbildung 64: Dendritenbildung, Detailaufnahme.....	58
Abbildung 65: Photoelektronenspektroskopie (XPS).....	60
Abbildung 66: Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (TOF-SIMS).....	61
Abbildung 67: Rasterelektronenmikroskopie (REM) / Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX).....	62
Abbildung 68: XPS-Analysen: Chemische Zusammensetzungen der Lotpasten im Ausgangszustand vor dem Lötprozess.....	64
Abbildung 69: TOF-SIMS-Analysen: Relative Signalintensitäten der Elemente Fluor, Chlor und Brom der Lotpasten im Ausgangszustand vor dem Lötprozess.....	65
Abbildung 70: XPS-Analysen: Chemische Zusammensetzungen der Lotpasten nach dem „kalten“ Lötprozess.....	66
Abbildung 71: XPS-Analysen: Chemische Zusammensetzungen der Lotpasten nach dem „heißen“ Lötprozess.....	67
Abbildung 72: TOF-SIMS-Spektrum (positive Sekundärionenpolarität) von Lotpaste 3 vor dem Lötprozess in logarithmischer Darstellung.....	68
Abbildung 73: Hauptkomponentenanalyse: Auswertung der TOF-SIMS-Spektren der Lotpasten im Ausgangszustand und nach „kaltem „und „heißen“ Lötprozess (positive Sekundärionenpolarität).....	69



Abbildung 74: Hauptkomponentenanalyse: Darstellung der TOF-SIMS-Spektren (positive Sekundärionenpolarität) der Lotpasten in Abhängigkeit von der ersten und der zweiten Hauptkomponente. ....	70
Abbildung 75: Hauptkomponentenanalyse: Darstellung der TOF-SIMS-Spektren (positive Sekundärionenpolarität) der Lotpasten in Abhängigkeit von der ersten und der zweiten Hauptkomponente. ....	71
Abbildung 76: Bauelement R1206 auf Testboard 133-1-1F-k (Übersicht). ....	72
Abbildung 77: Bauelement R1206 auf Testboard 133-1-1F-k (Detailansicht). ....	73
Abbildung 78: Testboard 133-1-1F-k nach Ablösung der Bauelemente R1206 (Detailansicht). ....	73
Abbildung 79: REM-Untersuchung: Sekundärelektronenbild der Testboard-Oberfläche nach Ablösung des Bauelements R1206. ....	74
Abbildung 80: EDX-Analyse: Verteilung der Elemente Kohlenstoff (links), Zinn (Mitte) und Nickel (rechts) auf der Testboard-Oberfläche nach Ablösung des Bauelements R1206, Analyseposition entsprechend Sekundärelektronenbild in Abbildung 79. ....	75
Abbildung 81: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 134-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206; Links: Übersicht; Rechts: Detailansicht. ....	75
Abbildung 82: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 185-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206; Links: Übersicht; Rechts: Detailansicht. ....	76
Abbildung 83: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 185-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206. ....	77
Abbildung 84: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206 (Übersicht). ....	77
Abbildung 85: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206 (Detailansichten). ....	78
Abbildung 86: REM-Untersuchung der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206; links: Sekundärelektronen-Bild, rechts: Rücktreuelektronen-Bild. .	79
Abbildung 87: REM-Untersuchung: Sekundärelektronen-Bild von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206. ....	79
Abbildung 88: EDX-Analyse: Verteilung der Elemente Kohlenstoff (links), Zinn (Mitte) und Nickel (rechts) auf der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206, Analyseposition entsprechend Sekundärelektronenbild in Abbildung 87. ....	80
Abbildung 89: Vorgehensweise zur Modellbildung. ....	81
Abbildung 90: Exemplarisches Schema eines DoE-Ansatzes zur Beschreibung der Abhängigkeit einer Zielgröße (grüne Fläche) von zwei Einflussfaktoren. Die roten Punkte markieren die Versuchspunkte gemäß der statistischen Versuchsplanung, die halbtransparente blaue Fläche stellt das Ergebnis dieser Modellbildung dar. ....	82
Abbildung 91: Prinzipieller Messaufbau der ECR-Methode. ....	84
Abbildung 92: Typisches Messsignal einer ECR-Messung. ....	85
Abbildung 93: Darstellung der Rauschladungsmenge in Abhängigkeit von der Messdauer. ....	85
Abbildung 94: Zeitliche Änderung der Rauschladungsmenge für verschiedene Testboards. ...	86

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Materialanforderungen.....	18
Tabelle 2: Lotpasten.....	19
Tabelle 3: Gegenüberstellung von J-STD-004 [6] und DIN EN 61190-1-1 [7]. .....	19
Tabelle 4: Komponenten.....	20
Tabelle 5: Abstände der Leiterbahnen der SIR-Test Strukturen.....	23
Tabelle 6: DoE Ansatz mit den Steuergrößen Lötprofil, Lotpaste und Reinigung.....	26
Tabelle 7: Lötparameter.....	28
Tabelle 8: Matrix der untersuchten Parameterkombinationen.....	30
Tabelle 9: Gegenüberstellung Projektziele und Ergebnisse .....	88
Tabelle 10: Transfermaßnahmen für den PA und die Forschungsvereinigung .....	91
Tabelle 11: Weitere Transfermaßnahmen .....	93

# 1 Einleitung

## 1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Elektronische SMD-Baugruppen (SMD = Surface Mount Device, oberflächenmontierte Komponente) werden in einem komplexen Herstellungsprozess gefertigt. Die wesentlichen Prozessschritte zum Aufbau eines Produkts sind Lotauftrag, Bauteilbestückung und Löten. Das Lot wird typischerweise als Lotpaste, bestehend aus einem Gemisch von kleinsten Metallkugeln, Flussmitteln (FM), Harzen und Additiven mit einem Schablonendruckprozess auf einen Träger (Substrat, oftmals eine Leiterplatte aus Epoxidharz und Glasfasergewebe, typische Bezeichnung FR4) aufgetragen. Anschließend werden die SMD-Komponenten bestückt und in einem Durchlaufofen einem Reflow-Lötprozess unterzogen („Reflow“ = Wiederaufschmelzen der Metallkügelchen, wobei das Lot eine stoffschlüssige Verbindung mit den metallisierten Oberflächen von Substrat und Bauteil eingeht).

Das in der Lotpaste vorhandene Flussmittel ist ein notwendiger Bestandteil, um die im normalen Baugruppenfertigungsprozess vorhandenen Oxidschichten auf dem Lot und den Lötflächen zu entfernen. In der Baugruppenfertigung werden typischerweise sogenannte „NoClean“-Flussmittel eingesetzt. „NoClean“ bedeutet hierbei, dass es sich um einen Flussmitteltyp handelt, bei dem die nach dem Lötprozess vorhandenen (wenigen) Rückstände nicht mehr durch Reinigung entfernt werden müssen, da diese kaum korrosive Stoffe enthalten, bzw. in einer Harzmatrix fest eingebettet und für die Baugruppe unschädlich sein sollen. Die meisten Rückstände von Flussmitteln, welche nach dem Lötvorgang typischerweise auf der Leiterplattenoberfläche und an den Komponenten verbleiben, sind aufgrund freiliegender Carbonsäuren hygroskopisch und begünstigen so Korrosion. Eine Form der Korrosion stellt die elektrochemische Migration (ECM) dar. Hier entsteht vereinfacht dargestellt zwischen metallischen Leitern unter Feuchteinfluss auf ionisch kontaminierten Substraten (Leiterplatten) in einem bestehenden elektrischen Potentialfeld durch Ionenwanderung eine metallische Kurzschlussbrücke (Dendrit), Abbildung 1 sowie [1], [2], [3] und [4].

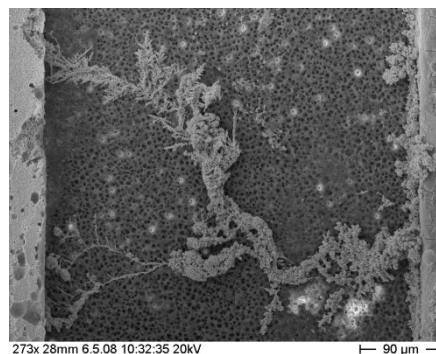
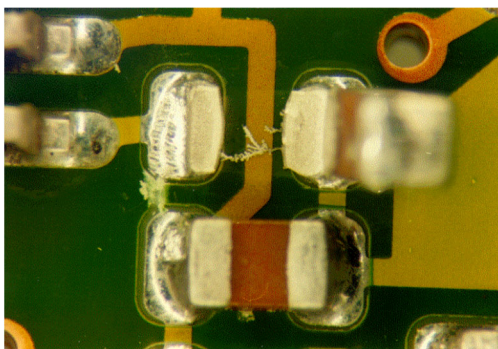


Abbildung 1: Beispiel für elektrochemische Migration und Dendritenbildung (links Dendrit unter einem Keramikcondensator, rechts REM-Aufnahme auf der Leiterplatte).

ECM beeinträchtigt die Funktion und Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppen. Klimatische Bedingungen wie hohe Temperaturen und Luftfeuchte sowie Temperaturwechsel, die zu einer Betauung führen können, bewirken häufig Schäden durch ECM, die zu einem irreversiblen

Schaden auf der Baugruppe führen. Typische Fehler sind bleibende und temporäre Kurzschlüsse. Dies führt in vielen Fällen zu Folgeschäden am Gesamtsystem und zu dessen Ausfall mit teilweise gravierenden Auswirkungen. Auftretende Fehlfunktionen oder sogar Ausfälle an Baugruppen und Systemen, die zu Rückrufaktionen der Hersteller führen, verursachen nicht nur einen hohen wirtschaftlichen Schaden, auch die Marktposition der betroffenen Firmen wird geschwächt. Ein Austausch einer elektronischen Baugruppe im Antrieb eines einfachen Handlingsystems kann je nach Aufstellungsort des Systems leicht bis zu 1.000 € kosten (Aufwand des Monteurs vor Ort, bzw. Transport des Systems zum Hersteller). Sind 1.000 Systeme betroffen, so beträgt der Schaden leicht ca. 500.000,- bis 1.000.000,- €.

Durch Absenkung der Eingangsimpedanzen und Spannungspegel von Logikbausteinen, wodurch diese anfälliger für Kriechströme und reduzierte Oberflächenisolationswiderstandswerte werden, ist eine zunehmende Klimagefährdung der Elektronik zu beobachten. Voranschreitende Miniaturisierung führt zu neuen Herausforderungen bei der Herstellung von elektronischen Baugruppen und Systemen. Chip-Scale Packages und Flip-Chips, die z. B. für die Verarbeitung optoelektronischer Komponenten eingesetzt werden (z. B. in Außenkameras), müssen unter wechselnden klimatischen Bedingungen sicher funktionieren. BGA (Ball Grid Array) -Komponenten mit einem Rastermaß von 0,3 mm und einem Pad-Zwischenraum von 0,09 mm haben erhöhte Anforderungen an die elektrische Isolation. Der zunehmende Einsatz von vielpoligen SMD-Komponenten mit verdeckt auf der Unterseite liegenden Anschlüssen, sogenannten BTC (Bottom Termination Component = Bauteil mit Unterseitenanschlüssen, siehe Abbildung 2), in der Signalverarbeitung ist mit immer kleiner werdenden Rastermaßen (aktuell 0,40 mm pitch, Leiterbahnabstand 0,2 mm), immer engeren Lotspalthöhen (ca. 40 µm) und immer größer werdenden Betriebsspannungen (bis zu 50 V) verbunden.

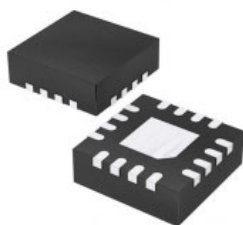


Abbildung 2: BTC.

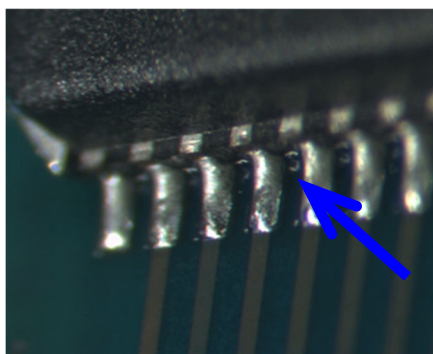


Abbildung 3: Spaltbildung  $< 50\mu\text{m}</math>, Flussmittelreste deutlich sichtbar.$

Durch den Einsatz von „NoClean“ Lotpasten verbleiben nach dem Lötprozess Rückstände in diesen engen Spalten unter den Komponenten auf und zwischen den verdeckten Lötstellen von z. B. BTC-Komponenten, siehe Abbildung 3. Die somit bestehende ionische Verunreinigung durch Flussmittelreste nach dem Lötprozess bedarf einer neuen Betrachtung hinsichtlich dieser geringen Isolationsabstände, höherer Betriebsspannungen und dem Betrieb in kritischer (feuchter) Umgebung. Es bestehen Lücken zum Verständnis der Vorgänge des Schädigungspotentials auf molekularer Ebene dieser in dünnen Spalten verbleibenden Rückstände.

Ungünstig verarbeitete Lötstoppmasken beispielsweise können während des Lötprozesses je nach Lötwärmebelastung und Lötatmosphäre massiv hygroskopische, korrosive und Kriechstrom

fördernde Stoffe und Verbindungen freisetzen [5], deren Auswirkungen in dünnen Spalten unbekannt sind.

Die besonderen Anforderungen durch miniaturisierte Geometrien (kleiner werdende Isolationsabstände) sowie erhöhte Prüfspannungen sind derzeit nicht hinreichend in bestehenden Prüfstandards berücksichtigt. Hier bedarf es einer Ergänzung zu Prüfbedingungen und Prüfgeometrien.

Eine weitere Herausforderung liegt in der Notwendigkeit für leistungselektronische Anwendungen, immer höhere Spannungen ( $\geq 800$  V) zu beherrschen. Das dadurch entstehende elektrische Feld als Triebfeder für die ECM bedarf ebenfalls einer kritischen Betrachtung. Hier stellt sich die Frage, mit welchen Isolationsabständen in welcher atmosphärischen Umgebung sicher gearbeitet werden kann und welche Grundanforderungen an den Aufbau der Baugruppe gestellt werden müssen (Reinigung, Beschichtung, Materialauswahl). Da die zu untersuchenden Strukturen der Leistungsmodule je nach Ausführung mit Silikon bzw. einer Moldmasse abgedeckt sind, ist hier ebenfalls die Untersuchung der Wechselwirkung des Abdeckmaterials mit Feuchte / Klima bei hoher Spannung von Interesse. Um dieser Anforderung zukünftig gerecht zu werden, soll ein Hochvolt-SIR-Teststand aufgebaut und qualifiziert werden.

## 1.2 Zielsetzung

Das Forschungsvorhaben verfolgt zwei Ziele. Zum einen sollen die Projektergebnisse zu einer höheren Produktsicherheit für den Einsatz miniaturisierter Elektronikkomponenten hinsichtlich einer Gefährdung durch ECM führen. Zum anderen sollen Testmethoden optimiert werden, die es ermöglichen, frühzeitig Informationen über beginnende elektrochemische Migrationen zu liefern. Diese Testmethoden ermöglichen eine Erweiterung von Prüfstandards und Leitfäden als Grundlage für eine erhöhte Prozesssicherheit mit geringeren Ausfallquoten der gefertigten Baugruppen. Auf dieser Basis lassen sich schließlich auch Empfehlungen für das Design und die Fertigung von Baugruppen ableiten.

Um den Anforderungen heutiger Logikschaltungen in der Baugruppenfertigung gerecht zu werden, soll der SIR-Test auf Teststrukturen mit Fingerabständen von  $200 \mu\text{m}$  und darunter erweitert werden. Insbesondere bei diesen Dimensionen ist die Fragestellung nach der geeigneten Prüfspannung noch nicht hinreichend beantwortet und soll in diesem Projekt mit untersucht werden. Des Weiteren soll ein Schwerpunkt auf die Analyse der Spaltsituation gelegt werden, um diese Wissenslücke zu schließen.

Damit ergeben sich folgende Projektziele:

- Erweiterung der Wissensbasis als Grundlage für eine Modellbildung zur Beschreibung der Vorgänge zur ECM durch die Auswirkungen der verbleibenden Rückstände in Abhängigkeit der Fertigungsbedingungen (bei sich einstellender Spaltsituation)
- Entwicklung und Optimierung einer Testmethode für frühzeitige Detektion von Migrationsvorgängen
- Erweiterung von Prüfstandards und Leitfäden als Grundlage für erhöhte Prozesssicherheit und geringere Ausfallquoten
- Ausarbeitung von Anwendungsempfehlungen und Designhinweisen
- Erhöhung der Produktsicherheit für den Einsatz miniaturisierter Elektronikkomponenten hinsichtlich der Gefährdung durch ECM

## 2 Stand der Forschung und Technik

### Lötprozess und Flussmittel

Der Lötprozess in der Fertigung elektronischer Baugruppen wird in einem für die jeweilige Lotpaste typischen Temperatur-Zeitfenster durchgeführt. Dies sind bei einem Reflow-Inline-Konvektionslötprozess für SnAgCu-Lote z. B. 5-7 Minuten, bei der an der Lötstelle eine Maximaltemperatur von ca. 230 bis 250°C erreicht wird, wobei die Zeit über Liquidus des Lotes bis zu 90s beträgt. Je nach Lotmaterial und Einsatzzweck kommen hierbei unterschiedliche Flussmittel zum Einsatz. Das Flussmittel dient zur Benetzung der metallischen Oberflächen und Ausbildung der stoffschlüssigen, typischerweise 1 µm bis 5 µm starken intermetallische Phase zwischen Lot und Anschlussflächen von Bauelement und Substrat. Hierzu muss das Flussmittel Störfaktoren für eine einwandfreie Benetzung, wie z. B. Oxide auf den zu lötenden Metalloberflächen und dem Lotpulver selbst, sowie Verunreinigungen wie z. B. Fette, Handschweiß und Fingerabdrücke beseitigen.

Elektronikflussmittel sind üblicherweise aus Lösungsmitteln, Additiven und Feststoffen zusammengesetzt, siehe auch [6], [7]. Die Flussmittelbestandteile können je nach Hersteller und Anwendung stark variieren. Gemäß der DIN EN 61190-1-1 werden Flussmittel nach dem Bestandteil mit der höchsten Konzentration im nichtflüchtigen Anteil des Flussmittels eingeteilt. So wird unterschieden in Rosin (RO = natürliches Harz), Resin (RE = synthetisches Harz), Organic (OR = harzfreies org. Flussmittel) und Inorganic (IN = anorganisches Flussmittel). Aktivatoren sind in erster Linie organische (z. B. Adipinsäure) und/oder anorganische Säuren oder Säureanteile wie Zinkchlorid oder Ammoniumchlorid, die die Oxide entfernen sollen, wobei zunehmend halogenidfreie Flussmittel eingesetzt werden. Üblich sind zudem halogenierte Kohlenwasserstoffe, die die Oberfläche von Fetten befreien sollen. Die Aktivität der Flussmittel wird mit L (Low = niedrig aktiviert), M (Moderate = mäßig aktiviert) und H (High = stark aktiviert) gekennzeichnet. Die in No-Clean Weichlotpasten eingesetzten Flussmitteltypen sind im Wesentlichen RO und RE. Gemäß J-STD-001 [8] müssen diese bei elektronischen Produkten der Klasse 3 (Produkte mit hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit: Militär-, Medizin-, Luft- und Raumfahrt- sowie Automobiltechnik) eine Aktivierung von L0 bzw. L1 einhalten.

Flussmittel haben je nach Zusammensetzung ein vorgegebenes Lötprozessfenster, in dem sich der Lötprozess abspielen muss (Abbildung 4, [9], [10]). Es gibt hier einen vorgegebenen Temperatur-Zeitbereich, in dem das Flussmittel aktiv ist. Erst oberhalb der unteren Wirktemperatur entfaltet das Flussmittel seine Wirkung. Wird die obere Wirktemperatur überschritten, beginnt die Zersetzung des Flussmittels. Ist der Lötprozess zu kurz, findet keine Aktivierung statt. Dauert der Lötprozess zu lange, sind die aktiven Bestandteile des Flussmittels verbraucht, bevor eine Benetzung stattgefunden hat.

Der Wunsch nach möglichst Baugruppen schonenden Lötprozessen hat als Ergebnis ein „kaltes“ Lötprofil zur Folge, mit dem möglicherweise deutlich mehr aktive Flussmittelbestandteile auf der elektronischen Baugruppe verbleiben als bisher. Dazu kommt der Umstand, dass mögliche Reinigungsprozesse den Bereich unter den Komponenten insbesondere bei sehr dünner Spaltsituation nur unvollständig erreichen. Angelöste aktive Bestandteile können durch Entstehung von elektrochemischer Migration zu einer Gefährdung des ganzen Systems werden.

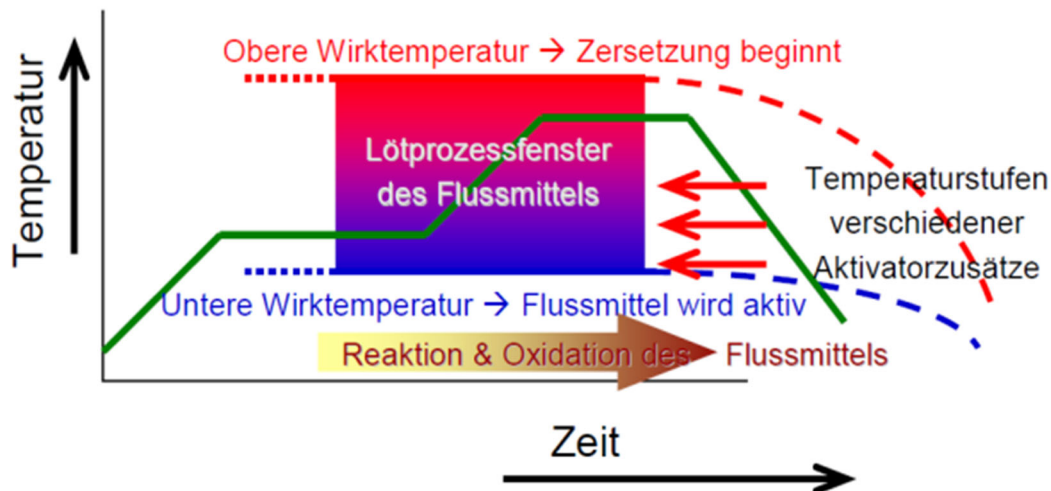


Abbildung 4: Lötprozessfenster des Flussmittels, [9] [10].

### SIR-Test

Für die Risikoanalyse hinsichtlich ECM wird der SIR-Test (Surface Insulation Resistance = Oberflächenisolationswiderstand) nach dem JEDEC-Standard (JEDEC = Solid State Technology Association, früher Joint Electron Devices Engineering Council (JEDEC)) nach J-STD-004 [6], Prüfmethode IPC-TM-650 2.6.3.3 [11], als gängige Prüfung eingesetzt. Hier wird die Veränderung des Gleichstromisolationswiderstandes von Substratmaterialien für elektronische Baugruppen durch die Einwirkung von Flussmitteln bestimmt. Das zu untersuchende Medium wird auf einem Testboard mit Fingerstrukturen aus unbehandeltem Kupfer auf einem Layout, z. B. gemäß der Teststruktur IPC-B-24 [12], aufgetragen. Die Finger weisen eine Breite von 400 µm und Abstände von 500 µm auf. Diese relativ großen Dimensionen entsprechen jedoch nicht mehr den Rastermaßen heutiger Fine Pitch Komponenten, die bei 0,5 mm, 0,4 mm oder sogar 0,3 mm liegen, was einem Abstand der Leiterzüge von 0,25 bis herunter zu 0,09 mm entspricht.

Der SIR-Test erfordert typischerweise mindestens 168h Messzeit, kann jedoch abhängig von Prüfvorschrift bzw. Kundenanforderung im Zuge zunehmender Lebensdauererwartung von elektronischen Systemen oftmals 1000h bis zu 3000h (ca. 6 - 18 Wochen) dauern.

Hierbei sind Prüfspannungen von 5, 50 oder 100 V üblich. Anwendungen aus der Leistungselektronik, die mit Betriebsspannungen von 800 - 1000 V arbeiten, müssen dementsprechend bei diesen hohen Spannungen geprüft werden. SIR-Test-Versuchsaufbauten, die diese Anforderungen erfüllen, sind in Deutschland nicht frei verfügbar. Im Rahmen des Forschungsprojektes soll ein entsprechender Aufbau erstellt werden.

Des Weiteren sind SIR-Test-Analysen nach IPC-TM-650 2.6.3.3 zurzeit nur auf Teststrukturen ohne Komponentenbestückung genormt. Somit ist kein Test in Spaltsituation vorgesehen. Zwar wird bei der Prüfung von Schutzbeschichtungen der Testkamm der IPC-B-25A [13] mit 200 µm Linienbreite und Abstand eingesetzt, aber eine Spaltsituation wird nicht untersucht.

Insgesamt liefert der gemessene Widerstandswert beim SIR-Test nur wenige Informationen über den eigentlichen Migrationsvorgang. Nach IPC-TM-650 2.6.3.3 [11] werden nur 3 Messungen durchgeführt. Zwischen den Einzelmessungen entstandene und wieder abgebrannte Dendriten werden nicht detektiert. Diese können frühestens in der abschließenden visuellen Prüfung nachgewiesen werden. Der Schädigungsprozess (Migration und Dendritenbildung) kann aber bereits deutlich früher beginnen.

### **Elektrochemisches Rauschen (ECR)**

Eine alternative Untersuchungsmethode zur Detektion von Migrationsvorgängen kann das Elektrochemische Rauschen (ECR) darstellen. Bei diesem Verfahren werden Fluktuationen der beiden Systemgrößen Strom und Potential ohne äußere Beeinflussung des Korrosionssystems erfasst und analysiert. Der Ursprung dieser Eigenfluktuationen basiert u. a. auf sich zeitlich (und meist auch örtlich) verändernden Korrosionsprozessen auf der Oberfläche. Das Rauschsignal ist also spezifisch für den ablaufenden Korrosionsprozess und gerade für lokale Korrosionsprozesse sehr sensitiv [14], [15], [16], [17], [18]. Misst man zum Beispiel den galvanischen Strom zwischen zwei gleichen Elektroden, so wird man bei hinreichender Messgenauigkeit feststellen, dass dieser Strom von Null abweicht und solche Fluktuationen aufweist. Diese liegen, abhängig von vorliegendem System (Probengröße, Aktivität der Korrosionsprozesse, Belastungsregime u. a.), üblicherweise in Bereichen von  $\mu\text{V}$  bis  $\text{mV}$  bzw.  $\text{nA}$  -  $\mu\text{A}$  und sind somit messtechnisch vergleichsweise einfach zu erfassen, d.h. entsprechende Geräte stehen zur Verfügung.

### **3 Arbeitshypothese**

Systematische Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Substratmaterial, Flussmittelrückständen, ionischen Verunreinigungen, Restfeuchtigkeit, sonstigen Oberflächenbestandteilen und Lötprozessbedingungen, insbesondere in Spaltsituationen sind in der Literatur nicht zu finden. Hier existieren allenfalls vereinzelt Untersuchungen mit kleineren Rastermaßen [19] oder Vergleiche von verschiedenen Reflowmethoden [20] aber diese thematisieren weder enge Spalten noch höhere Spannungen.

Die ESA STM-275 [21] befasst sich mit dem Reinigungserfolg von Baugruppen für Raumfahrtanwendungen. Hier wurden SIR-Test Strukturen in das Bauelemente-Layout integriert bzw. unter Bauelementen angebracht. Allerdings wurden nur bleihaltig gelötete und gereinigte Baugruppen untersucht. Zudem wurden weder BGA-Komponenten noch NoClean Lotpasten eingesetzt und die Spalthöhen unter den Bauteilen betragen mehr als  $200\ \mu\text{m}$ . Eine Übertragung der Ergebnisse ist somit nicht möglich. In [22] wird auf die Reinigungsproblematik bei zunehmend geringeren Spalthöhen hingewiesen, extrem enge Spalten wie im vorliegenden Projektantrag wurden nicht untersucht.

Die in der Literatur beschriebenen etablierten Prüfverfahren zur Untersuchung der elektrochemischen Migration erfordern in der Regel einen relativ hohen Zeitaufwand von bis zu 1000 Stunden [23], für hochzuverlässige Anwendungen teilweise bis zu 3000 Stunden. Dem gegenüber stehen immer kürzere Entwicklungszyklen mit dem Wunsch nach einem frühzeitigen Nachweis von ECM. Dies ist im Rahmen der bekannten Beschleunigungsmodelle nach Arrhenius oder Eyring nicht abzubilden. Standardisierte Testmethoden, welche diese Bedingung erfüllen, sind bisher nicht bekannt.

Um die gewünschten Ziele zu erreichen, werden zunächst an ausgewählten, realitätsnahen Leiterplatten und Baugruppen die Alterungseigenschaften mittels elektrischer SIR-Tests bewertet. Parallel dazu werden mit analytischen Methoden die chemischen Zusammensetzungen von kritischen Rückständen und deren Einfluss auf die umgebenden Bauelemente untersucht. Aus der Korrelation dieser elektrischen Tests und analytischen Betrachtungen soll dann im nächsten Schritt ein DoE-Modell erarbeitet werden, welches den Wirkzusammenhang von Fertigungspara-



parametern als Einflussfaktoren und Alterungseigenschaften der Teststruktur als Zielgröße phänomenologisch beschreiben kann. Mit einem solchen Modell wäre es zum einen möglich, die Wechselwirkungen zwischen ionischen Kontaminationen, Flussmittelrückständen und Restfeuchtigkeit und deren Auswirkungen auf die Bauelemente insbesondere in Spaltsituationen und unter elektrischer Spannung zu bewerten. Zum anderen kann dieses Modell, das auf den Ergebnissen einer statistischen Versuchsplanung basiert, dazu beitragen, solche Fertigungsparameter und Materialeigenschaften zu identifizieren, die sich im Hinblick auf die elektrochemische Migration als besonders kritisch darstellen. Auf Basis dieser Erkenntnisse lassen sich dann im weiteren Projektverlauf Testmethoden (z. B. ECR) dahingehend optimieren, diese kritischen Parameter gezielt zu überwachen und damit ein möglichst frühzeitiges Erkennen von elektrochemischer Migration zu ermöglichen. Dieser Lösungsansatz ist in Abbildung 5 noch einmal schematisch dargestellt.

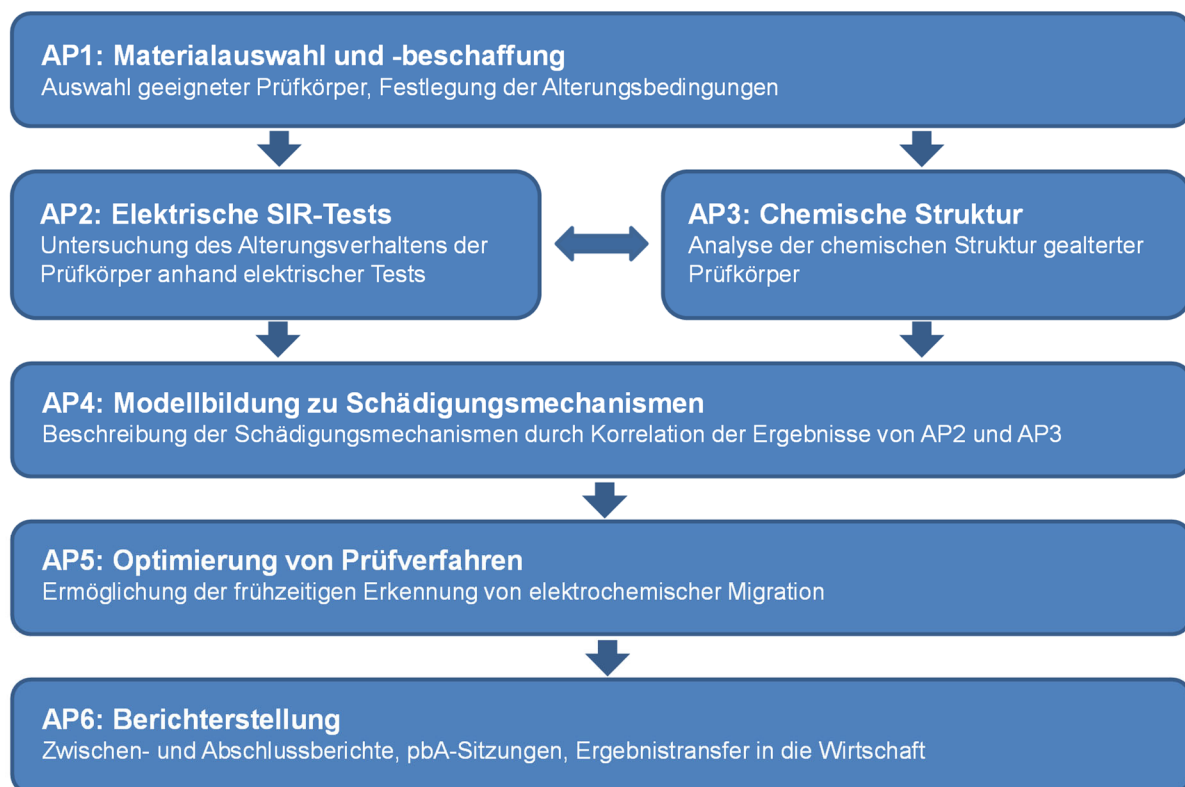


Abbildung 5: Methodisches Gesamtkonzept.

Damit ergibt sich zusammengefasst folgende Vorgehensweise:

- Untersuchung des Alterungsverhaltens verunreinigter Baugruppen mittels elektrischer Tests und chemischer Analytik unter Berücksichtigung kritischer Parameter sowie Material- und Prozesskombinationen
- Entwicklung eines DoE-Modells zur Beschreibung der Alterungsmechanismen anhand der Korrelation der Ergebnisse von elektrischen Tests und chemischer Analytik
- Erarbeitung einer geeigneten Prüfmethode (z. B. ECR) zur frühzeitigen Erkennung von elektrochemischer Migration auf Basis des Alterungsmodells

## 4 AP1: Materialauswahl und Beschaffung

### 4.1 Festlegung und Beistellung von Materialien

Zunächst wurde gemeinsam mit den Industrievertretern auf dem Kickoff Meeting das Testvehikel definiert. Folgende Festlegungen für die Materialien wurden getroffen, siehe Tabelle 1. Dem Wunsch der Industrievertreter folgend wurden sowohl passive als auch aktive Komponenten in die Versuchsmatrix aufgenommen. Dazu kommen SAC-Lotpasten mit unterschiedlichen Aktivierungen und ein für SAC-Lötprozesse angepasstes Leiterplattenmaterial. Fast alle Materialien wurden vom PA im Rahmen der vAW beigestellt.

Tabelle 1: Materialanforderungen.

Material	Anforderung	Beigestellt
Lotpasten	<ul style="list-style-type: none"><li>• Unterschiedliche Flussmittelaktivierung</li><li>• Variation des Pulvertyps</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 10 verschiedene Lotpasten Legierung: SAC305</li><li>• Aktivierung L0 und L1, Zero halogen (&lt;50ppm)</li><li>• Pulvertyp: T4, T5</li></ul>
Komponenten	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mit/ohne DaisyChain</li><li>• Feinpitch-Komponenten</li><li>• Masseflächen</li><li>• Geringe Spaltmaße nach dem Lötprozess</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aktive IC: BGA, VQFN, TQFP, WLCSP, diskrete IC, Leistungstransistoren</li><li>• Passive: R und R-Array</li></ul>
Leiterplatten	<ul style="list-style-type: none"><li>• Layoutvariante mit/ohne Lötstopplack</li><li>• Variation des Lötstopplacks</li></ul>	Leiterplattenvarianten: <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: FR4, TG150</li><li>• Größe: ca. 160 mm x 100 mm</li><li>• mit und ohne Lötstopplack</li><li>• 2 Lötstopplackvarianten</li></ul>

## 4.2 Lotpasten

Die im Projekt untersuchten 10 Lotpasten decken die in Tabelle 1 geforderten Parameter ab (Tabelle 2). Insbesondere die Anforderung nach unterschiedlicher Klassifizierung des Flussmittels gemäß J-STD-004 [6] und DIN EN 61190-1-1 [7] wurde berücksichtigt. Zwei Lotpasten unterscheiden sich bei identischem Flussmittel nur im Flussmittelgehalt und der Lotpulverkörnung (T4, T5).

Tabelle 2: Lotpasten.

Lotpastentyp	Korngröße	Aktivierung J-STD-004	Aktivierung DIN EN 61190-1-1
SAC305	T4	ROL0	ROL0
SAC305	T4	REL1	REL1
SAC305	T4	ROL0	ROL1
SAC305	T5	ROL0	ROL1

J-STD-004 [6] und DIN EN 61190-1-1 [7] weisen unterschiedliche Grenzwerte beim erlaubten Halogenidanteil der Flussmittel auf, wobei die DIN EN 61190-1-1 die schärferen Grenzwerte hat, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Gegenüberstellung von J-STD-004 [6] und DIN EN 61190-1-1 [7].

Flussmittel-zusammensetzung	Wirksamkeits-niveau des Flussmittels	Erlaubter Halogenidanteil nach IPC J-STD-004B [17] in [Gewichts-%]*	Erlaubter Halogenidanteil nach DIN EN 61190-1-1 [18] [Gewichts-%]**
RO (Kolophonium) RE (modifizierte Harze) OR (organische Säuren) IN (anorganische Säuren)	L0	<0,05	<0,01
	L1	<0,5	<0,15
	M0	<0,05	<0,01
	M1	0,5–2,0	0,15–2,0
	H0	<0,05	<0,01
	H1	>2,0	>2,0

\* bezieht sich auf Cl, Br, F, I.

\*\* bezieht sich auf Cl, Br, F.

Halogenidanteil im (NoClean-)Flussmittel, Grenzwert nach Norm unterschiedlich

L 0 or 1 = Geringe oder keine Flux/Fluxrückstands-Aktivität

M 0 or 1 = Moderate Flux/Fluxrückstands-Aktivität

H 0 or 1 = Hohe Flux/FluxrückstandsAktivität

### 4.3 Komponenten

15 Komponententypen wurden definiert und aus dem PA beigestellt, siehe Tabelle 4. Dabei wurde sowohl passive Komponenten (R und R-Netzwerke), diskrete IC (reale Komponenten und in DC-Ausführung) als auch IC-Komponenten untersucht, die als reale Komponenten, mechanische Versuchsmuster und in DC-Ausführung zur Verfügung standen.

Tabelle 4: Komponenten.

<b>Bauteiltyp</b>	<b>Anschlusszahl</b>	<b>Int. Verdrahtung</b>
WLCSP	49	DC
WLCSP	24	DC
TQFP	80	Reales BE
BGA	144	Mech. Muster
VQFN	48	Reales BE
SOT1216	6	Versuchsmuster + DC
SOT8013	3	Reales BE
DSN0402	2	Reales BE
R0201, 0402, 0603, 1206	2	Reales BE
R-Array 0612	8	Reales BE
DPAK, D2PAK	3	Versuchsmuster

## 4.4 Leiterplatte

Abbildung 6 zeigt das Testboardlayout mit der strukturierten Anordnung der Testkomponenten und den darunter verlaufenden SIR-Test Strukturen.

Für die passiven Komponenten wurden jeweils vier und für die diskreten ICs jeweils zwei in Reihe geschaltete Stränge mit je 20 Komponenten ausgelegt. Bei den unter den passiven Komponenten befindlichen SIR-Test-Strukturen wurden jeweils zwei Stränge mit Lötstopplack (LSL) abgedeckt und zwei Stränge von Lötstopplack freigestellt, siehe Abbildung 7.

Die unter den Komponenten R0402, R0201 und SOT1216 verlaufenden Leiterbahnen bilden mit diesen eine gemeinsame SIR-Struktur (Abbildung 8) während die SIR-Strukturen unterhalb von RN58, R1206 und R0603 eine von dem Bauteillayout unabhängige Teststruktur bilden (Abbildung 9).

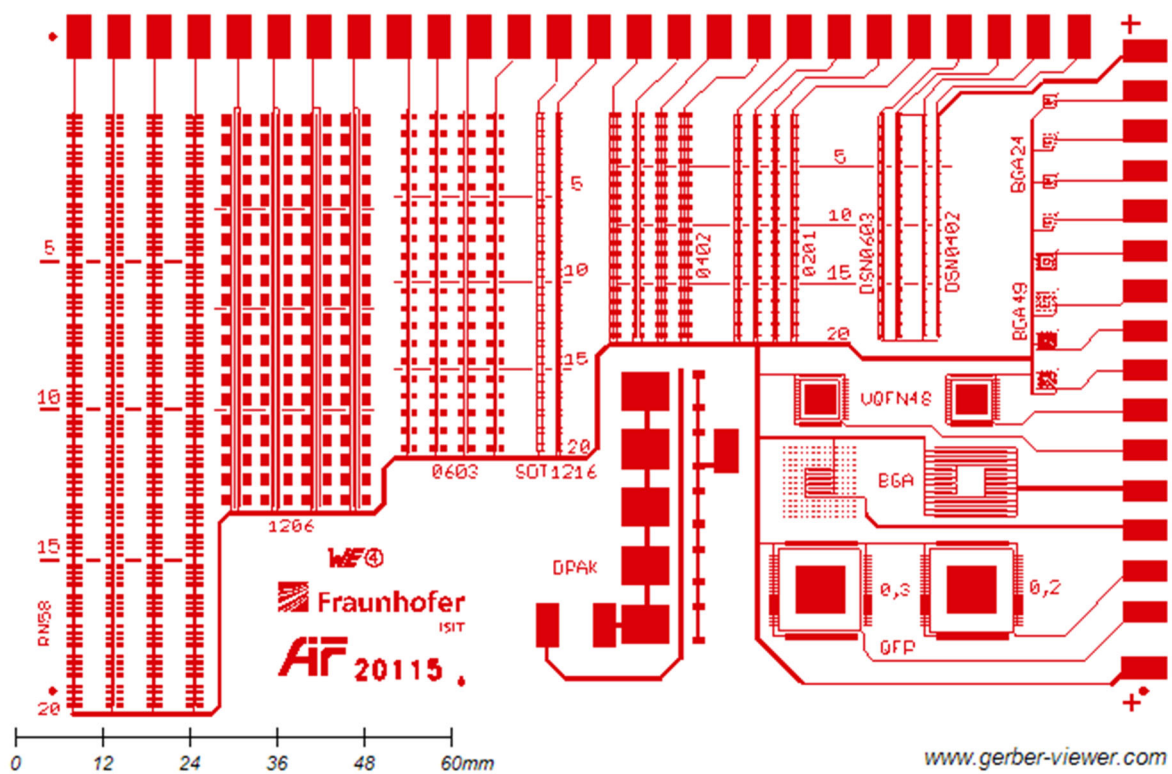


Abbildung 6: Layout Testboard.

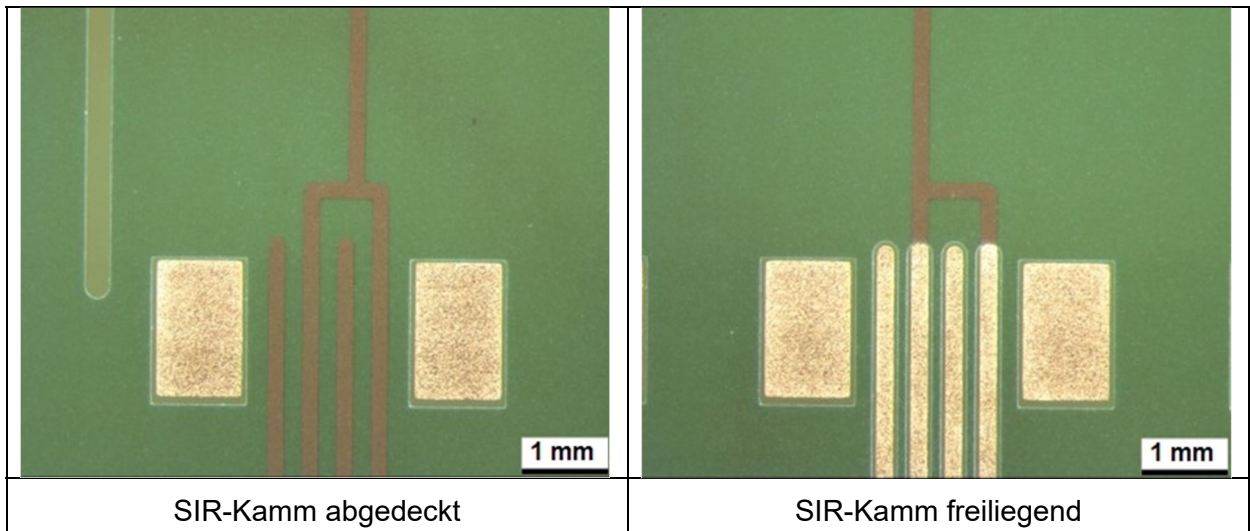


Abbildung 7: R1206, SIR-Test Struktur unter Bauteil mit LSL (links), ohne LSL (rechts).

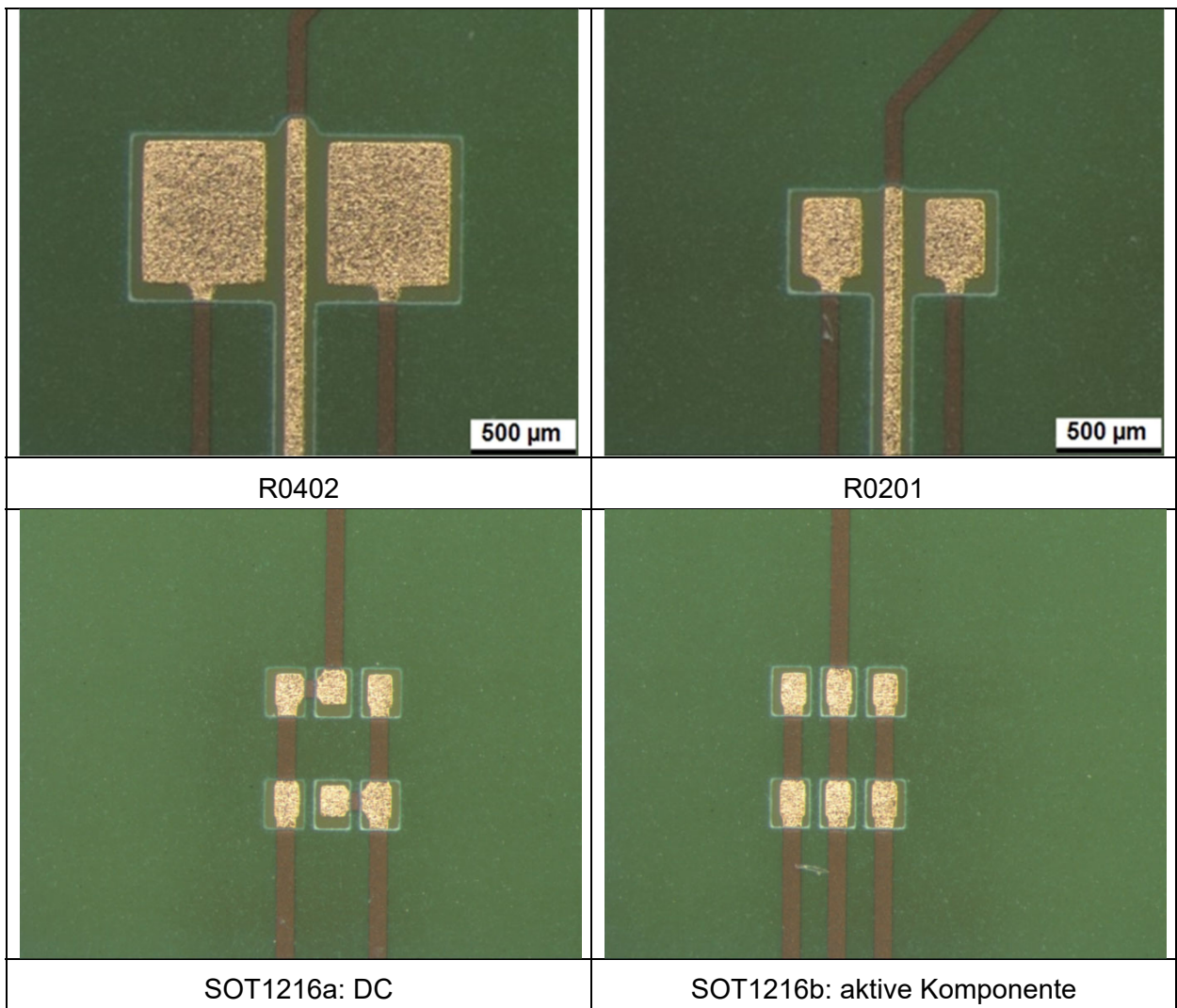


Abbildung 8: In das Bauteillayout integrierte SIR-Teststruktur.

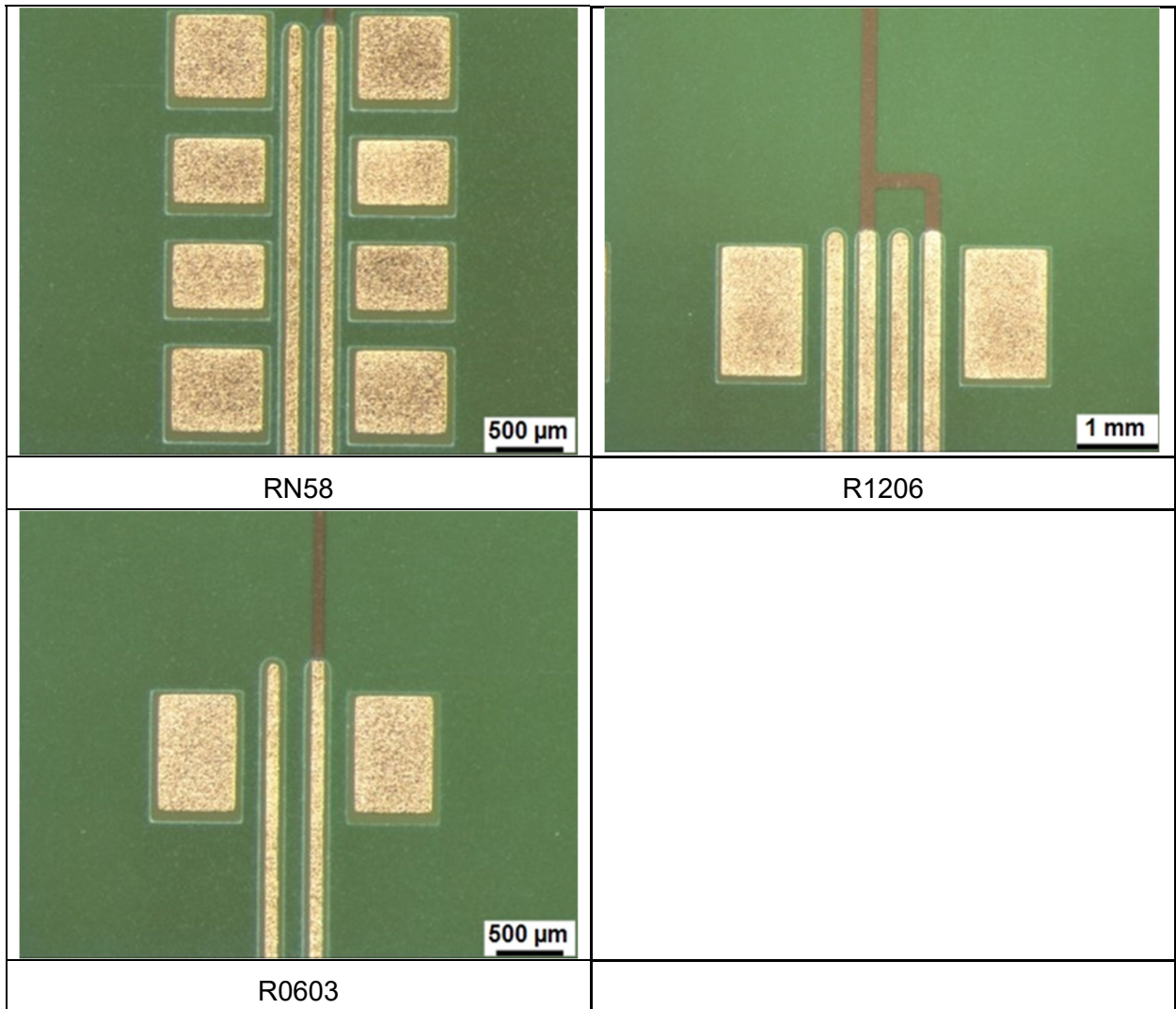


Abbildung 9: vom Bauteillayout unabhängige SIR-Teststruktur.

Die Abstände der Leiterbahnen der SIR-Test Strukturen liegen zwischen 100 µm und 230 µm, je nach BauteilAusführung, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Abstände der Leiterbahnen der SIR-Test Strukturen.

Bauteil	Abstand Kammstrukturen [µm]
RN58	160
R1206	190
R0603	230
R0402	100
R0201	100

Die IC-Komponenten weisen ebenfalls unter den Bauteilen befindliche SIR-Kämme auf, die teilweise in das Bauteillayout integriert und teilweise davon unabhängig angeordnet sind, siehe Abbildung 10 - Abbildung 13.

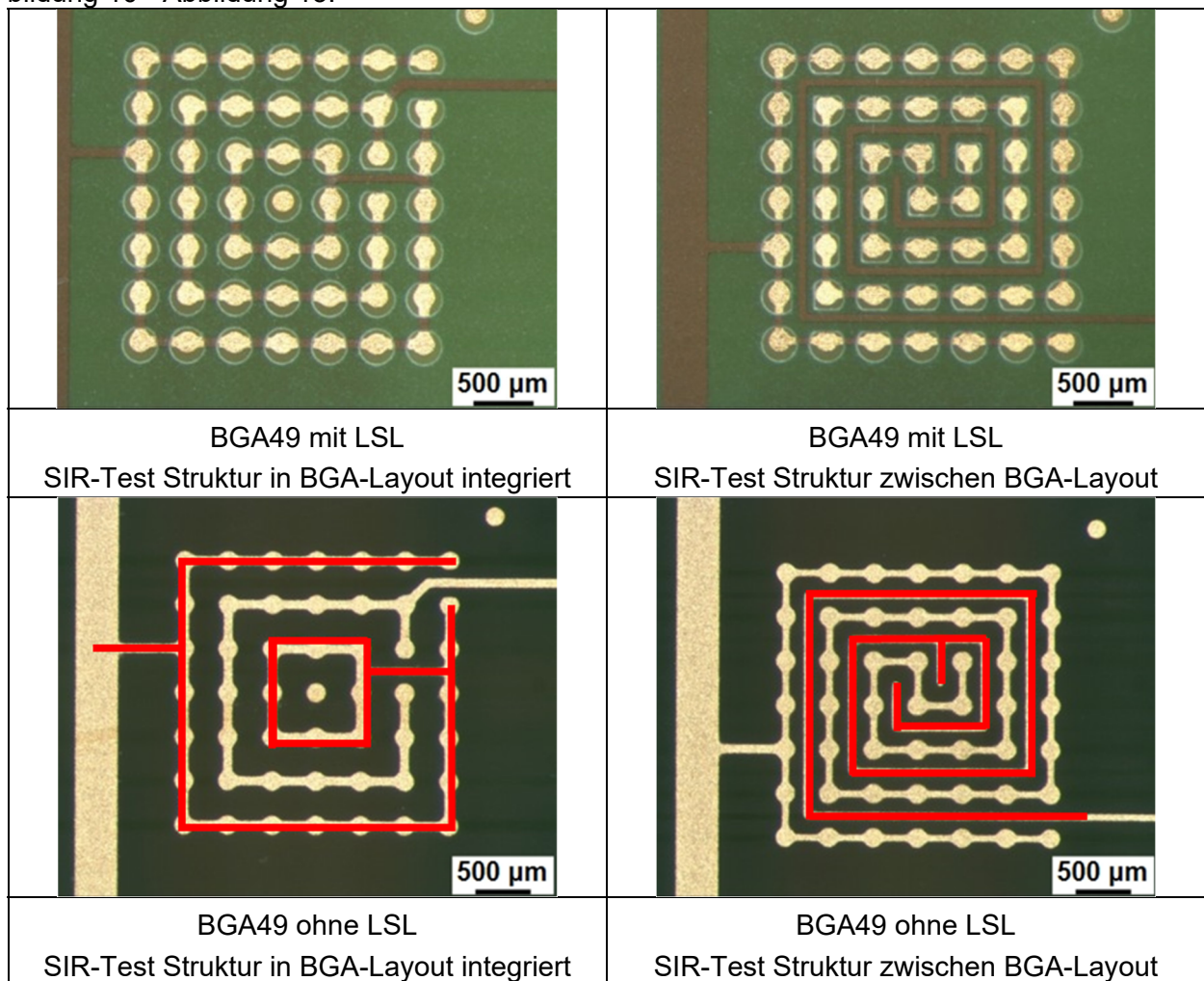


Abbildung 10: SIR-Test Strukturen unter BGA49.

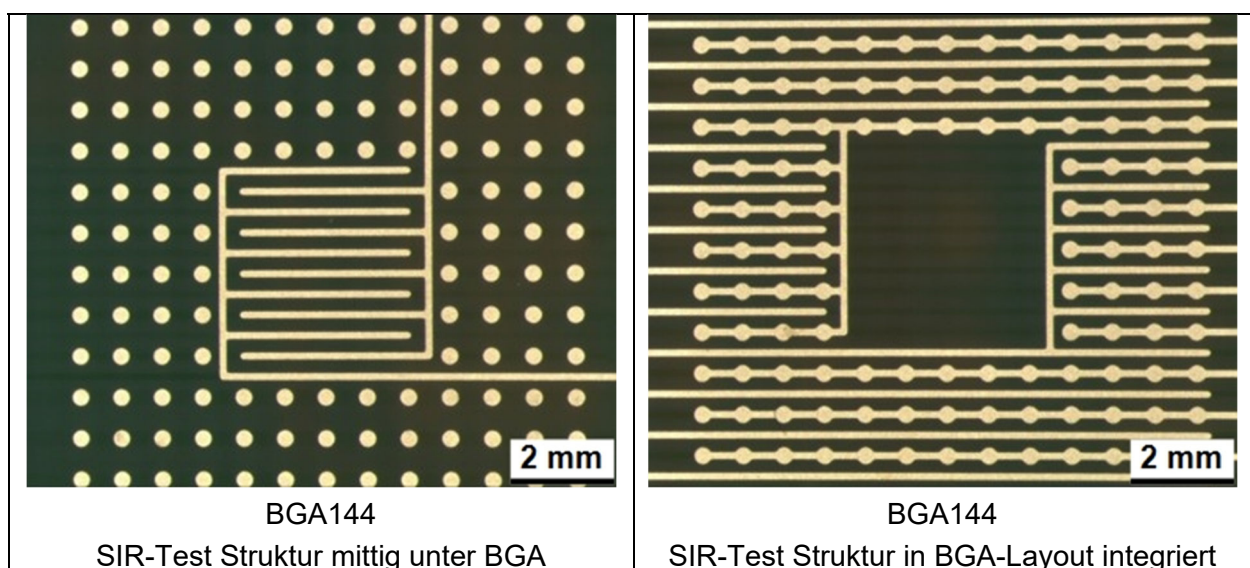


Abbildung 11: SIR-Test Strukturen unter BGA144.



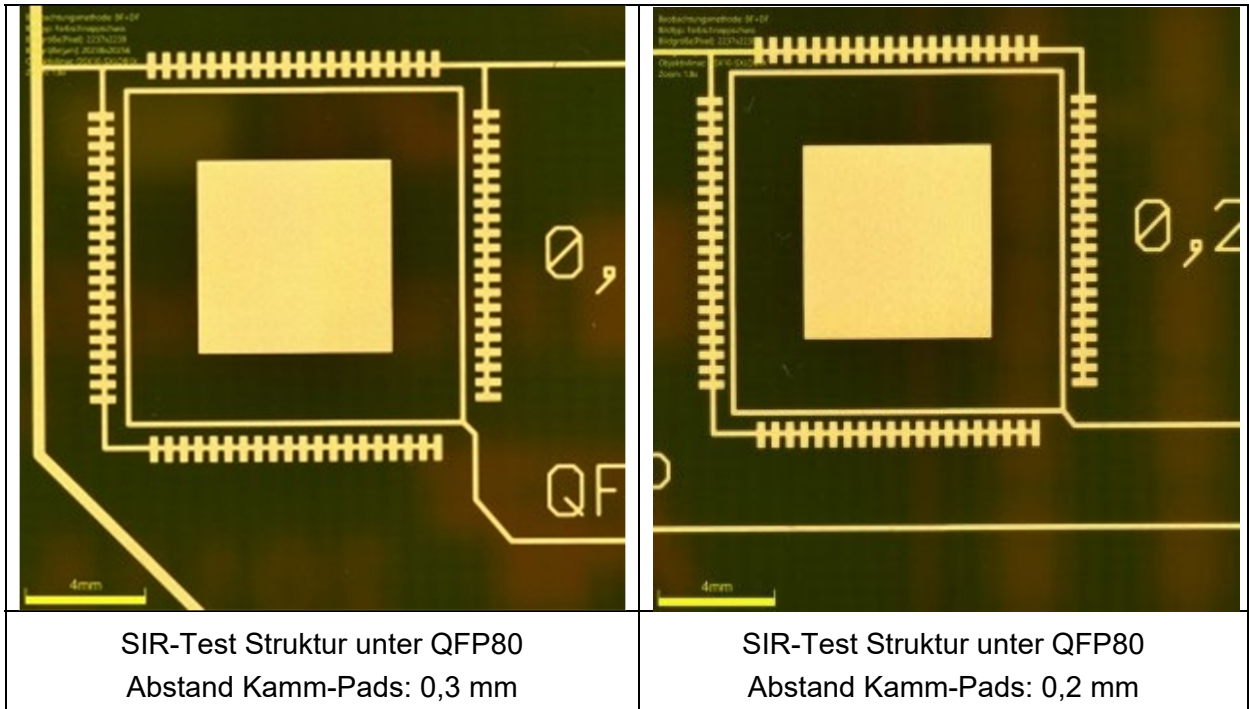


Abbildung 12: SIR-Test Strukturen unter QFP80.

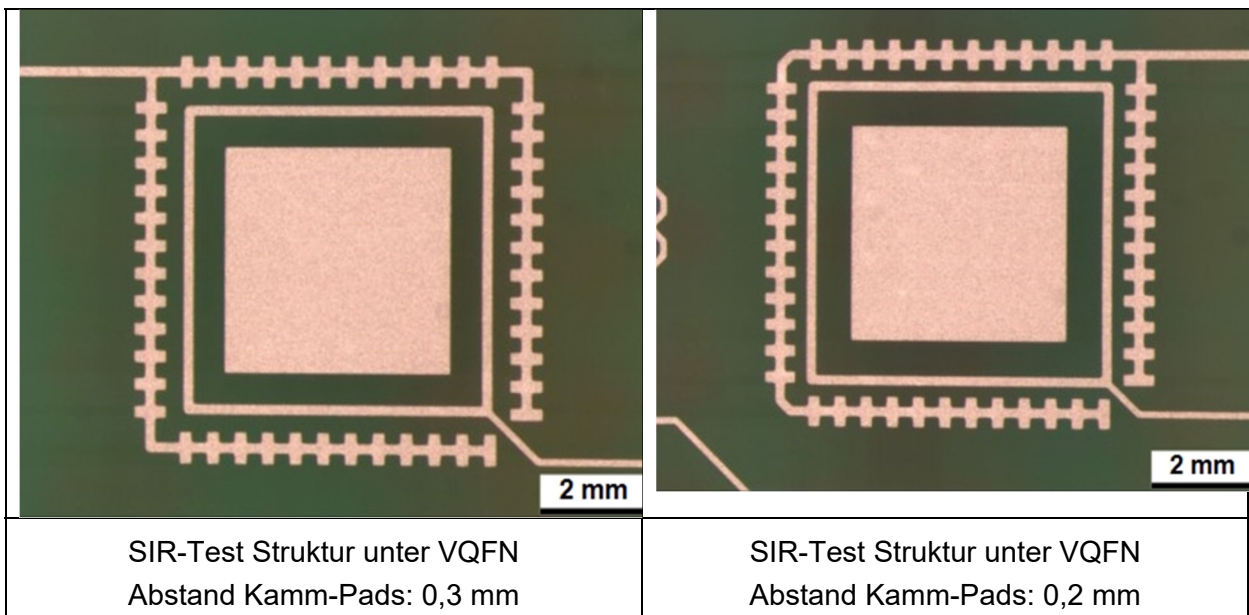


Abbildung 13: SIR-Test Strukturen unter VQFN.

## 5 AP2: Elektrische SIR-Tests

### 5.1 Aufbau der Testvehikel

Gemäß einem DoE Ansatz wurden die Steuergrößen Lötprofil, Lotpaste und Reinigung festgelegt. Für das Lötprofil sollten zunächst drei Eckwerte verwendet werden, das vom Lotlieferanten empfohlene Referenzprofil, ein grenzwertig kaltes und ein grenzwertig heißes Lötprofil. Um den Grad der Verunreinigung durch FM-Reste zu ändern, war sollte die Auftragsmenge der Lotpaste variiert werden (wenig/empfohlen/viel). Des Weiteren wurde die Reinigungsparameter festgelegt.

Da aufgrund der Vielzahl der möglichen Parameterkombinationen nicht alle Versuche mit allen Varianten vollfaktoriell durchgeführt werden konnten, war geplant, die Untersuchung gemäß einem DoE Ansatz mit ausgewählten Lotpasten durchzuführen, wobei in einem ersten Schritt die Einflussfaktoren einzeln in Richtung möglicher Extremwerte variiert werden sollten, siehe Tabelle 6. Aus der Betrachtung dieser ersten Ergebnisse lässt sich die Relevanz der einzelnen Einflussfaktoren auf die Zielgröße bewerten, als Ergebnis dieser ersten Bewertung erhält man dann ein einfaches lineares Modell zur Beschreibung der Abhängigkeit der Zielgröße von diesen Einflussgrößen. In einem zweiten Schritt sollten dann abhängig von den ersten Ergebnissen weitere Versuchspunkte ausgewählt, welche eine Wechselwirkung verschiedener Einflussfaktoren mit in die Betrachtung einbeziehen. Auf diese Weise wird das Modell um Terme höherer Ordnung erweitert, so dass man durch mehrere Iterationsschritte schließlich ein verbessertes Modell erhält, welches näher an den realen Abhängigkeiten liegt.

Tabelle 6: DoE Ansatz mit den Steuergrößen Lötprofil, Lotpaste und Reinigung.

<b>Steuergröße</b>	<b>Variable</b>	<b>Fertigungsparameter</b>
Lötprofil	Temperatur/Zeit	kalt/empfohlen/heiß
Lotpaste	Auftragsmenge	wenig/empfohlen/viel
Reinigung	Prozessdurchführung	manuell/keine/automatisch

Zur Herstellung der Prüflinge wurden die Lotpasten mit einem automatischen DEK-Drucker aufgetragen, die Komponenten mit einem automatischen Bestücker der Firma Juki bestückt und in einem Ersa Reflow-Konvektionsofen unter Schutzgasatmosphäre (Stickstoff) umgeschmolzen.

Zunächst wurde eine Lotpastendruckschablone entworfen, mit der erste Lötversuche durchgeführt werden. Im ersten Ansatz wurden hierbei die Druckschablonenöffnungen zu groß gewählt, siehe Abbildung 14, oben. Dies führte bei nicht mit Lötstopplack abgedeckten SIR-Test Strukturen unterhalb von Komponenten zu Kurzschlüssen. Daraufhin wurde eine angepasste Schablone entworfen und von einem PA-Mitglied im Rahmen der vAW-Industriebeteiligung beige stellt. Hiermit wurde ein zufriedenstellendes Druckbild erzeugt, siehe Abbildung 14 unten.

Die Abbildung 15 zeigt ein komplett bestücktes Testboard.

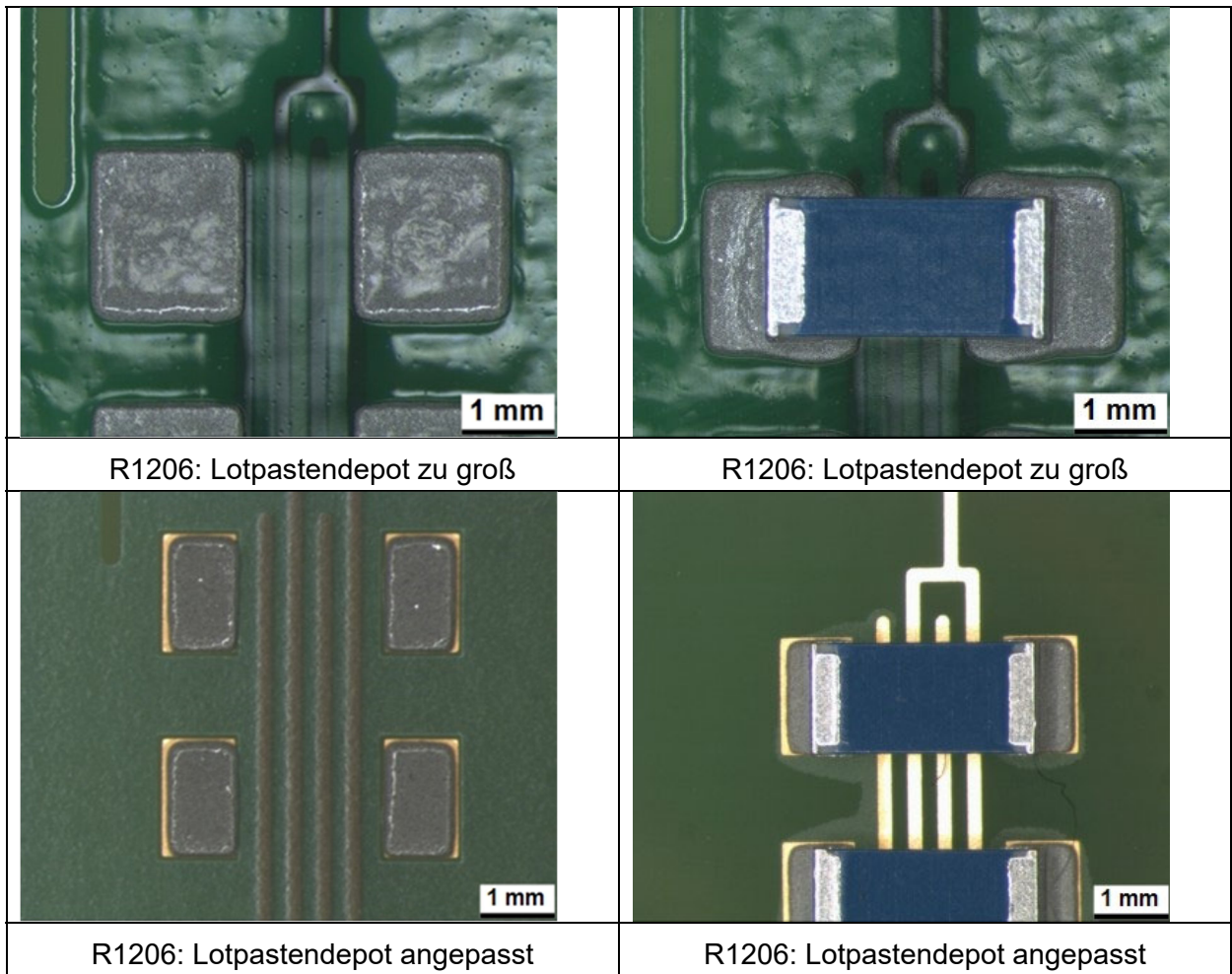


Abbildung 14: R1206 gedruckt (links) und bestückt (rechts).

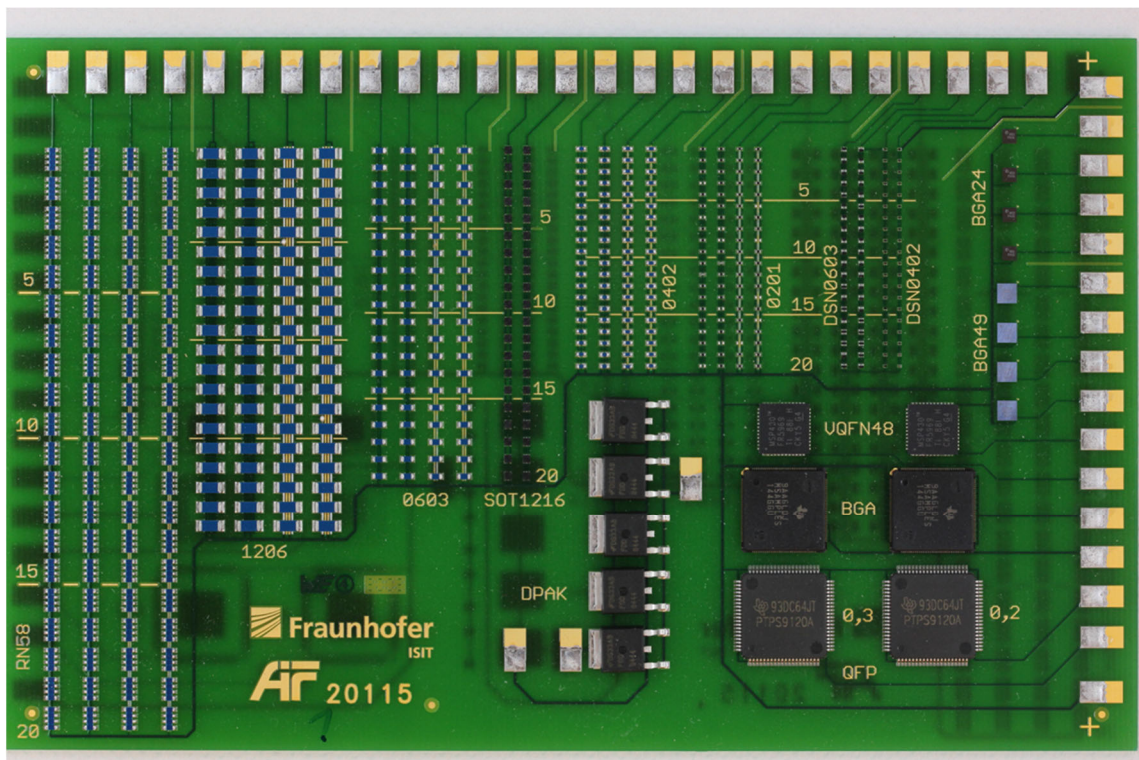


Abbildung 15: Testboard bestückt.

Auf Basis der Materialdatenblätter wurden die Lötprofile eingemessen. Die Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die erarbeiteten Lötprofile. Sowohl das kalte als auch das heiße Profil stellen im Rahmen der von den Materiallieferanten vorgegebenen Prozessfenster grenzwertige, aber zulässige Lötprofile dar. Die relevanten Parameter sind in Tabelle 7 dargestellt.

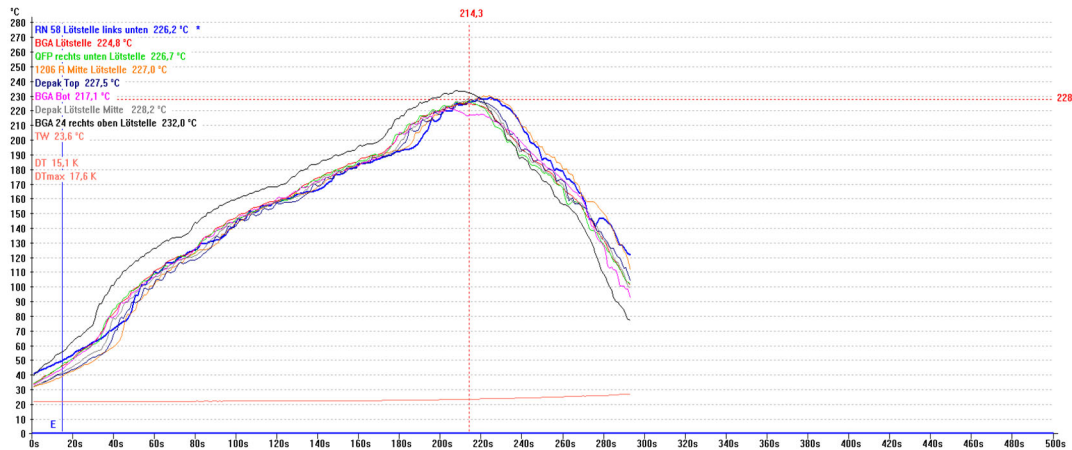


Abbildung 16: Lötprofil kalt.

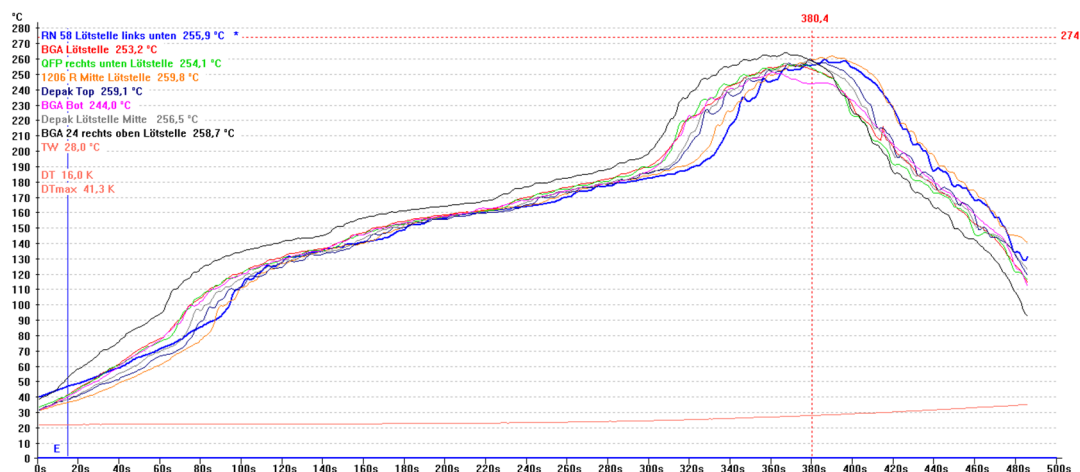


Abbildung 17: Lötprofil heiß.

Tabelle 7: Lötparameter.

Lötprofil	Zeit 150-200 [sec]	Zeit bis Peak [sec]	Zeit über 217 [sec]	Peaktemp. [°C]
kalt	71-85	181-186	30-44	225-234
heiss	140-155	302-309	84-98	256-264

## 5.2 SIR-Test Parameter

In gemeinsamer Abstimmung mit den Industrievertretern wurden die SIR-Test Bedingungen festgelegt. Die Prüflinge wurden in Anlehnung an J-STD-004 bzw. gemäß DIN EN 61190-1-1 mit folgenden Parametern in der Klimaauslagerung geprüft.

### **Gewählte Messmethode**

IPC-TM-650, 2.6.3.7 (nach J-STD-004B)

Prüfspannung: Belastung und Messung identisch

Spannung: 20 V, 50 V, 100 V

Messintervall: 20 Minuten

Klima: 85°C / 85% rF, 40°C / 93%rF (Stichproben)

Prüfdauer: 168 h

### **Prüfung bestanden, wenn:**

$R > 1E8$  Ohm und Dendritenwachstum  $\leq 20\%$  des Leiterzugabstands

Damit ergibt sich basierend auf den Erkenntnissen aus den jeweiligen Ergebnissen die folgende Versuchsreihenfolge.

Versuchsreihenfolge SIR-Testmessungen:

85/85, 20V, Lotpaste, unbestückt

85/85, 20V, Lotpaste, bestückt

85/85, 20V Lotpaste, bestückt, gereinigt

85/85, 100V, Lotpaste, bestückt

85/85, Lotpaste + Zusatzflussmittel, 20V/50V/100V, bestückt

40/93, Lotpaste + Zusatzflussmittel, 100V, bestückt

85/85, Zusatzflussmittel, 20V/50V/100V, bestückt

85/85, Lotpaste + Zusatzflussmittel, 500V, bestückt

Die Tabelle 8 zeigt die ergebnisorientierte Prüfmatrix der durchgeführten SIR-Test Untersuchungen.

Tabelle 8: Matrix der untersuchten Parameterkombinationen.

Lotpaste	Flussmittelmenge		Lötprofil		Reinigung		SIR-Test [V]		
	mittel	viel	kalt	heiß	ja	nein	20	50	100
1	x		x			x	x		
1		x	x			x		x	x
1		x	x		x				
2	x		x		x				
3	x		x			x	x		
3	x			x		x			
3		x	x			x	x	x	x
3		x	x		x		x		
4	x		x	x		x	x		
4	x		x		x		x		
4		x	x		x				
5	x			x		x			
5	x		x			x	x		
5		x	x			x	x	x	x
5		x	x		x		x		
6	x		x			x	x		
6	x		x	x		x	x		x
6	x		x		x		x		
6		x	x		x		x		
6		x	x			x	x	x	x
7	x		x			x	x		x
7	x		x		x		x		
7	x			x		x			
7		x	x			x	x	x	x
8	x			x		x			
8	x		x			x	x		
8		x	x		x				
9	x		x			x	x		
9		x	x		x				
10	x		x			x	x		
10	x			x		x			

### 5.3 SIR-Test Messungen

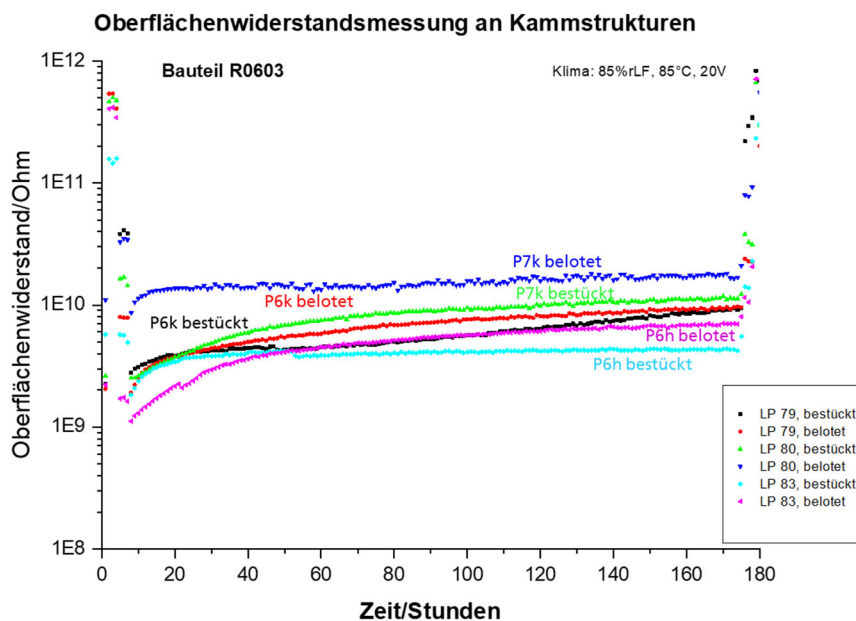
Im Folgenden werden die Ergebnisse der SIR-Test Messungen dargestellt, siehe Abbildung 18 - Abbildung 27, Abbildung 29- Abbildung 30, Abbildung 32 - Abbildung 34, Abbildung 37 - Abbildung 38 und Abbildung 40 - Abbildung 55.

#### 5.3.1 SIR-Testmessungen 20V, 85/85

Alle SIR-Tests bei 20V und 85/85 zeigen R-Werte oberhalb 1E8 Ohm und in der optischen Inspektion keine Dendriten. Somit sind alle Versuche als bestanden zu werten.

Die Untersuchungen zeigen, dass belotete Strukturen ohne Bauteilbestückung höhere Oberflächenisolationswiderstände aufweisen als mit Komponenten bestückte Strukturen.

Heiß gelötete Testboards weisen höhere R-Werte auf. Die ersten Verifikationsuntersuchungen zeigten, dass sowohl das heiße als auch das empfohlene Lötprofil keine kritischen Fertigungsparameter darstellen. Da sich bei niedriger Löttemperatur bei allen untersuchten Lotpasten ein geringerer R-Wert einstellte, wurde dies bei der folgenden Versuchsplanung berücksichtigt.



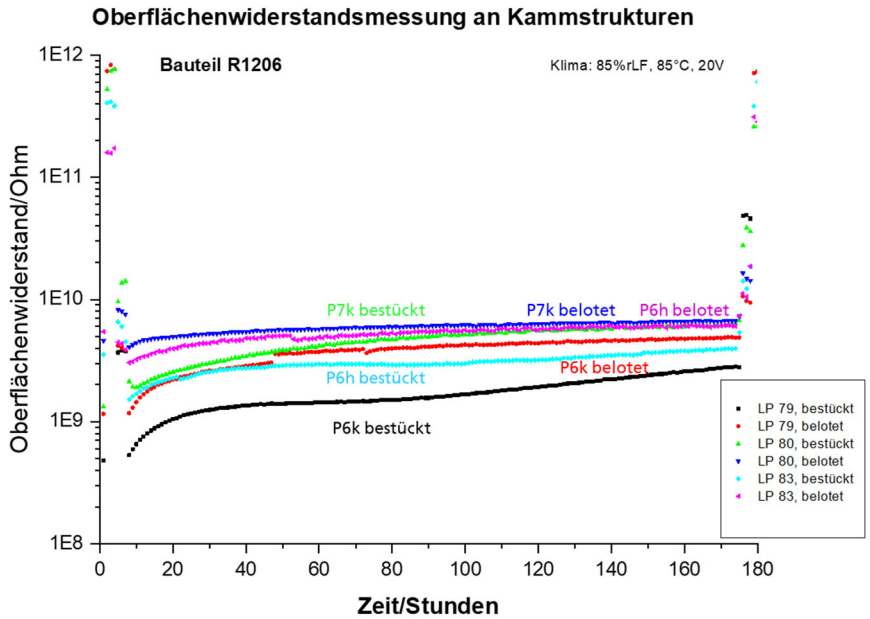
P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)

P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)

bestückt... mit R0603 bestückt,

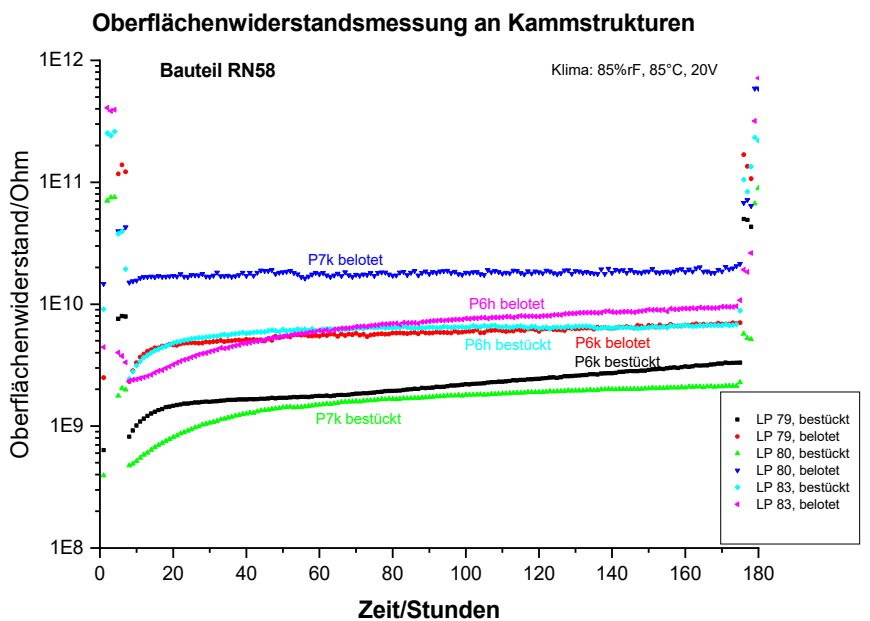
belotet... Testboard nur mit Lotpaste bedruckt und umgeschmolzen, ohne Bestückung

Abbildung 18: SIR-Testmessungen, R0603, 20V, 85/85.



P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)  
 P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)  
 bestückt... mit R1206 bestückt,  
 belotet... Testboard nur mit Lotpaste bedruckt und umgeschmolzen, ohne Bestückung

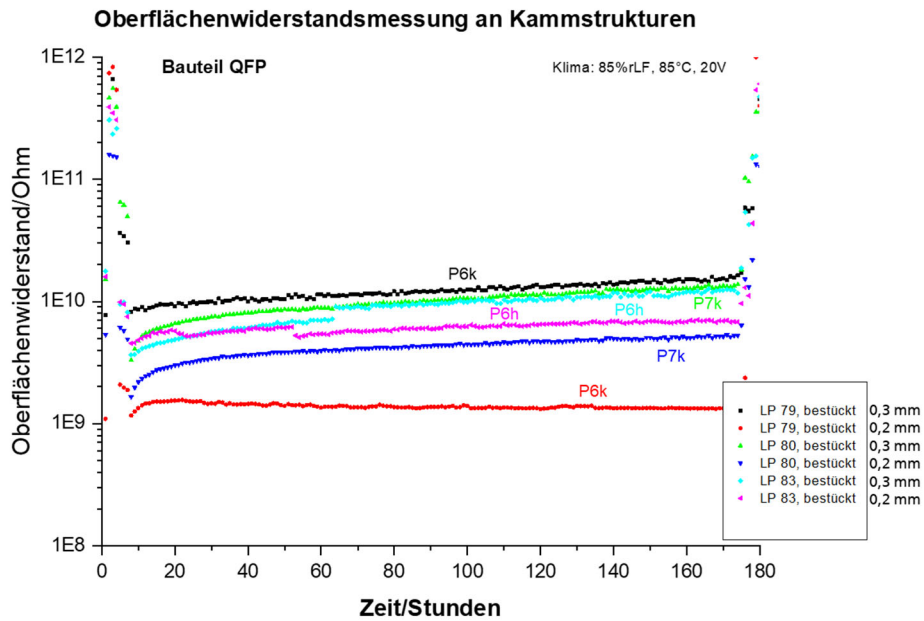
Abbildung 19: SIR-Testmessungen, R1206, 20V, 85/85.



P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)  
 P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)  
 bestückt... mit RN58 bestückt,  
 belotet... Testboard nur mit Lotpaste bedruckt und umgeschmolzen, ohne Bestückung

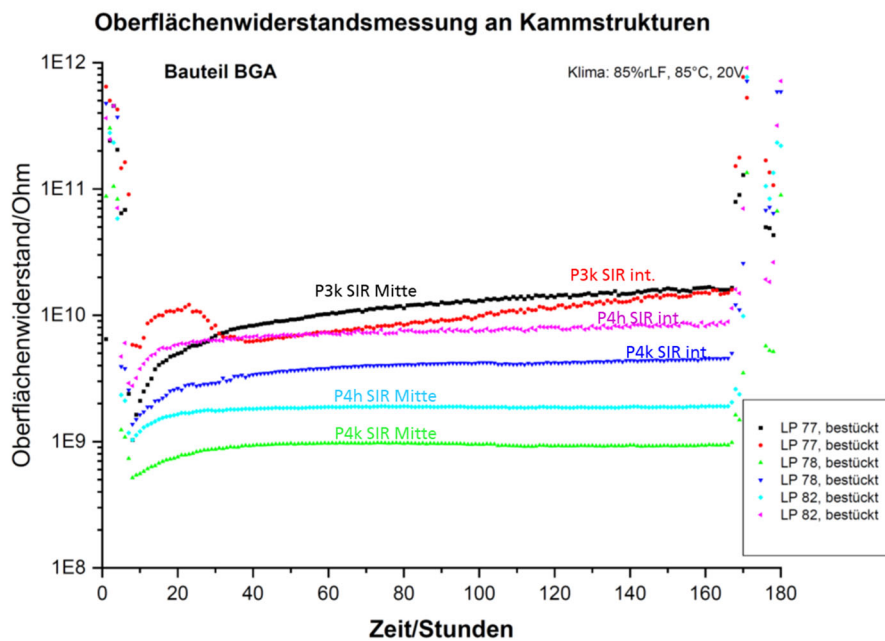
Abbildung 20: SIR-Testmessungen, Chip-Array 1206, 20V, 85/85.





P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)  
P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)

Abbildung 21: SIR-Testmessungen, QFP, 20V, 85/85.



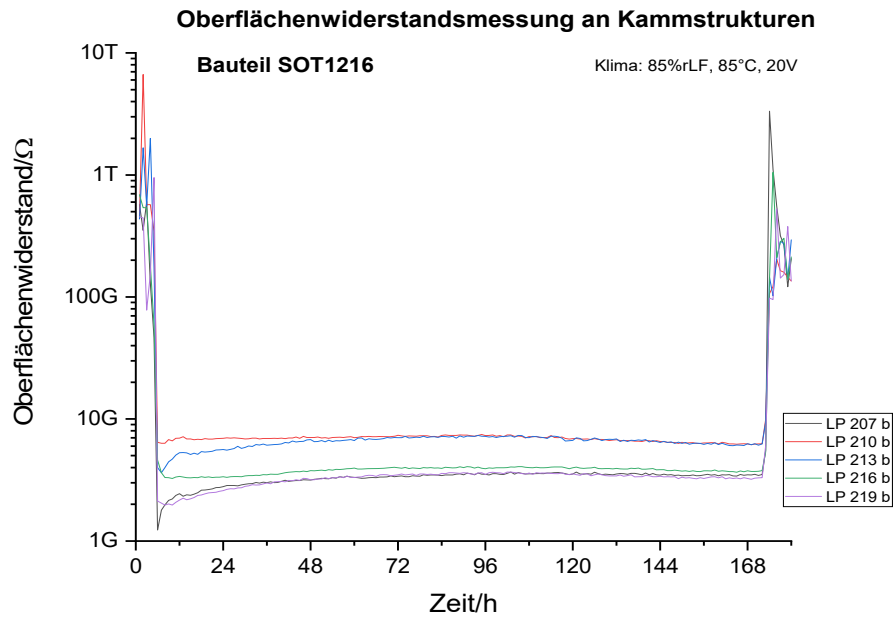
P3k... Paste 3, kaltes Lötprofil

P4k... Paste 4, kaltes Lötprofil

P4h... Paste 4, heißes Lötprofil

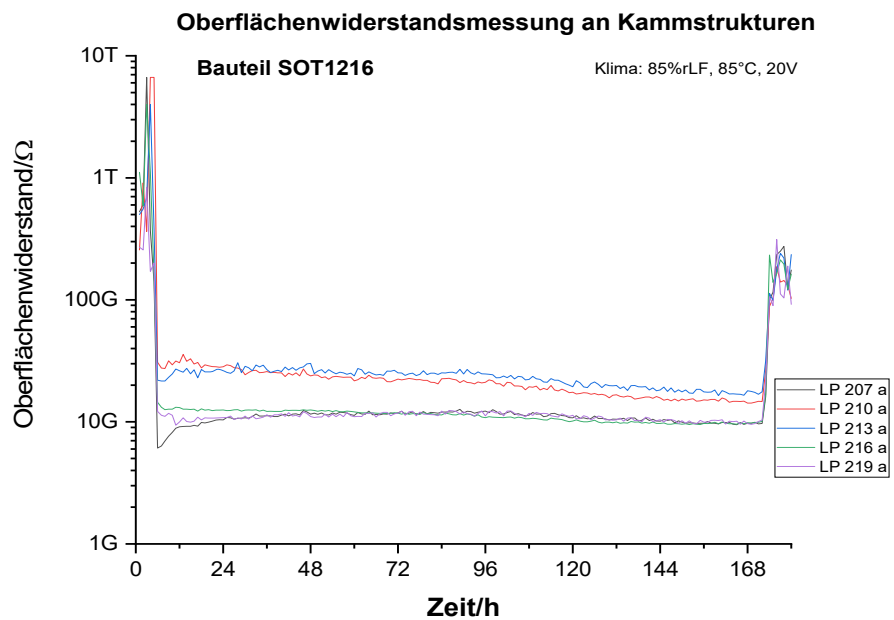
SIR-Mitte: mittig unter BGA liegende Kammstruktur, SIR int.: in DC-BGA-Layout integrierte SIR-Struktur

Abbildung 22: SIR-Testmessungen, BGA, 20V, 85/85.



207... Paste 1, kaltes Lötprofil, 210... Paste 2, kaltes Lötprofil  
 213... Paste 5, kaltes Lötprofil, 216... Paste 7, kaltes Lötprofil  
 219... Paste 8, kaltes Lötprofil

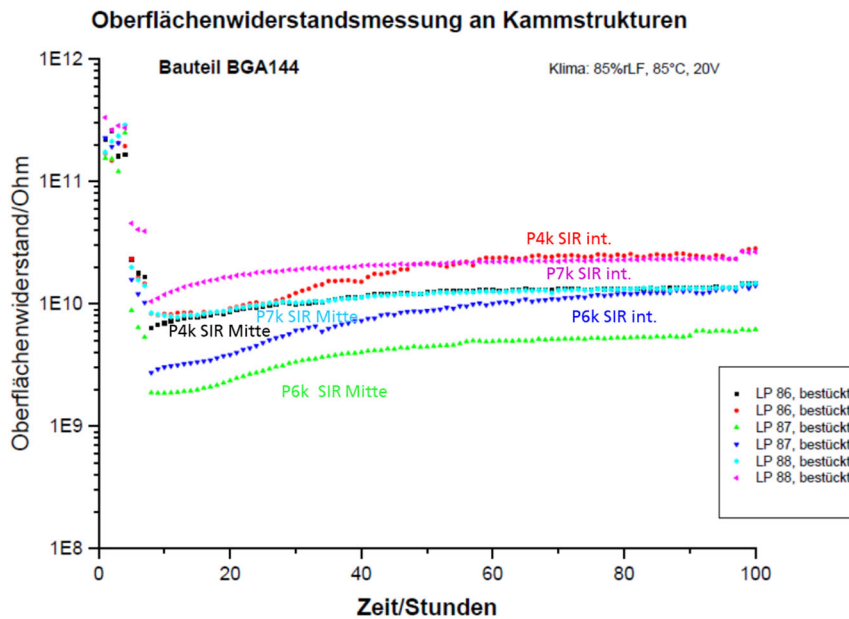
Abbildung 23: SIR-Testmessungen, SOT1216a, DC, 20V, 85/85.



207... Paste 1, kaltes Lötprofil, 210... Paste 2, kaltes Lötprofil  
 213... Paste 5, kaltes Lötprofil, 216... Paste 7, kaltes Lötprofil  
 219... Paste 8, kaltes Lötprofil

Abbildung 24: SIR-Testmessungen, SOT1216b, 20V, 85/85.

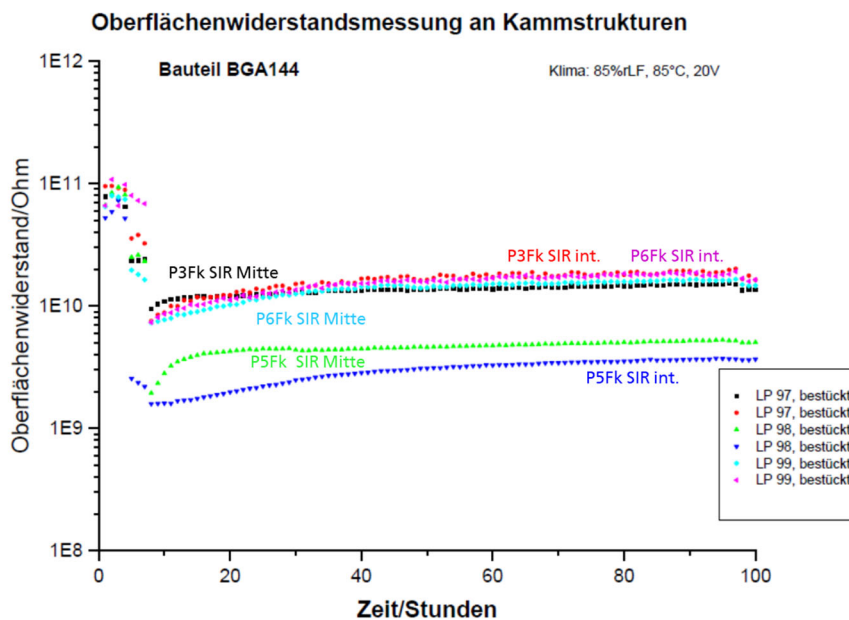
### 5.3.2 SIR-Testmessungen 20V, 85/85, gereinigt



P4k... Paste 4, kaltes Lötprofil, P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil

P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil, SIR-Mitte: mittig unter BGA liegende Kammstruktur, SIR int.: in DC-BGA-Layout integrierte SIR-Struktur

Abbildung 25: SIR-Testmessungen, BGA nach Reinigung, 20V, 85/85.



P3Fk... Flux 3, kaltes Lötprofil, P5Fk... Flux 5, kaltes Lötprofil

P6Fk... Flux 6, kaltes Lötprofil, SIR-Mitte: mittig unter BGA liegende Kammstruktur, SIR int.: in DC-BGA-Layout integrierte SIR-Struktur

Abbildung 26: SIR-Testmessungen, BGA nach Reinigung, 20V, 85/85 (hohe Flussmittelmenge).

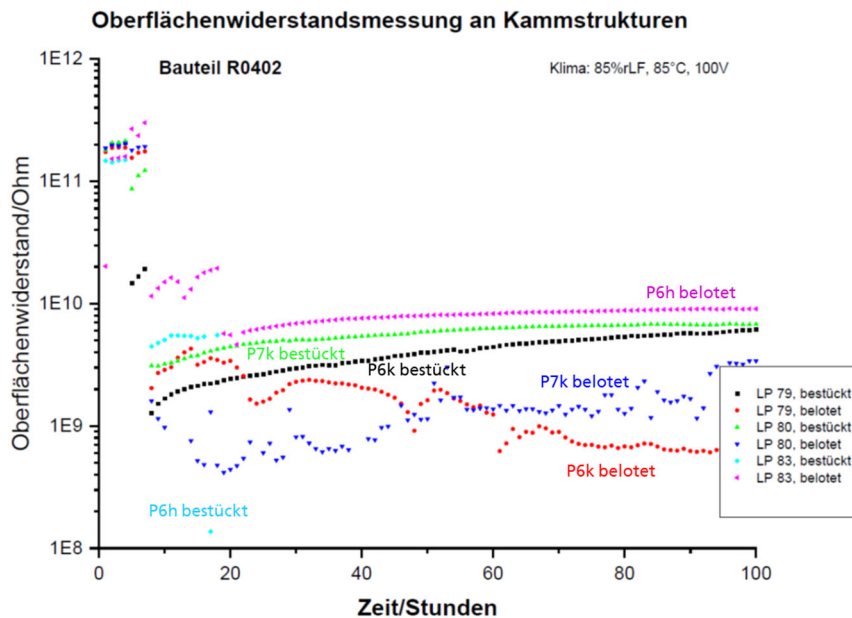
Nach Vorgabe aus dem PA wurde beim Reinigungsprozess auf eine manuelle Reinigung verzichtet. Da es sich hierbei üblicherweise um einem schlecht kontrollierbaren bis unkontrollierten Prozess handelt, ist es nur schwer möglich reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Untersucht wurde die Gegenüberstellung ungereinigt – automatisch gereinigt. Bei einem PA-Mitglied wurde hierzu ein Reinigungsprozess eingefahren und eine qualifizierte automatische Reinigung durchgeführt. Die Baugruppen ohne Reinigung (gemäß der NoClean Deklaration der Lotpasten) weisen im Vergleich zu qualifizierter automatischer Reinigung niedrigere R-Werte auf, bestehen aber dennoch den SIR-Test deutlich. Aus diesem Grunde wurde im weiteren Projektverlauf auf den Reinigungsprozess verzichtet.

Bisher waren keine Ausfälle zu verzeichnen. Abweichend von der DOE-Vorgabe wurden daher zur Provokation von Ausfällen folgende Prozessänderungen durchgeführt:

- drastische Erhöhung der SIR-Test-Spannung (auf bis zu 100V)
- Bereitstellen eines deutlichen Überangebots an Flussmittel durch
  1. Fluxdruck anstatt Lotpastendruck (erhöht den FM-Anteil um 100%)
  2. Zusatzauftrag von Flussmittel unter Komponenten (erhöht den FM-Anteil auf 300% und mehr)

### 5.3.3 SIR-Testmessungen 100V, 85/85

Die Erhöhung der SIR-Test Spannung auf 100V zeigte zwar einzelne Ausfälle, die aber bei der optischen Inspektion auf Partikelkontamination zurückzuführen waren, siehe Abbildung 28 und Abbildung 31. Dendritenbildung war nicht zu beobachten.



P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)  
P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)  
bestückt... Testboard mit R0402 bestückt,  
belotet... Testboard nur mit Lotpaste bedruckt und umgeschmolzen, ohne Bestückung

Abbildung 27: SIR-Testmessungen, R0402, 100V, 85/85.

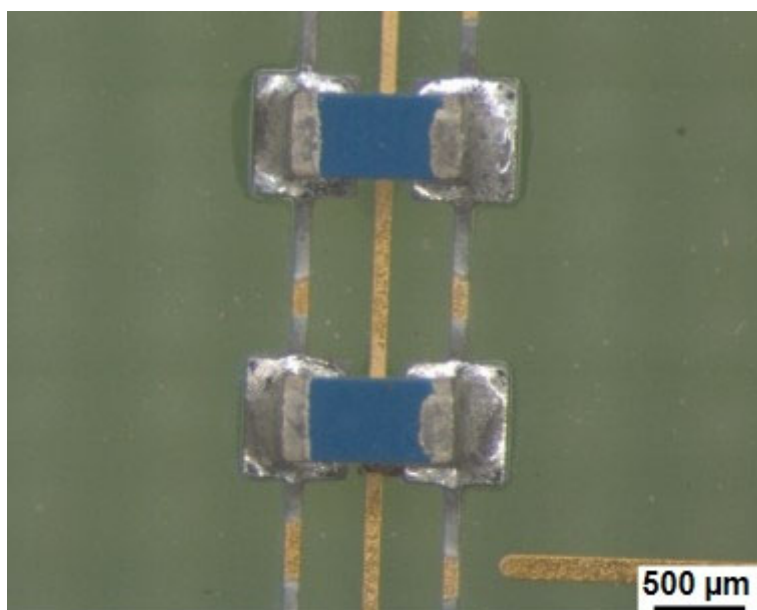
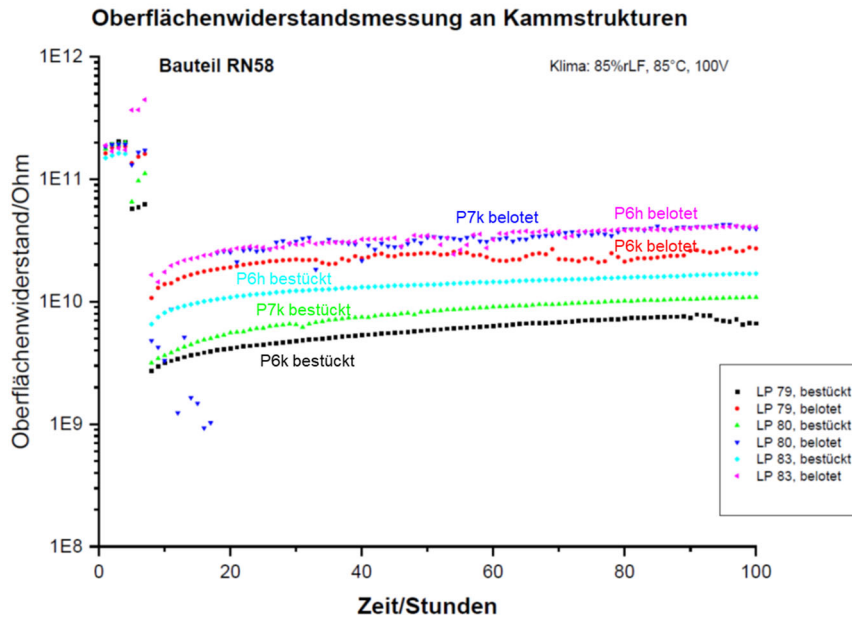
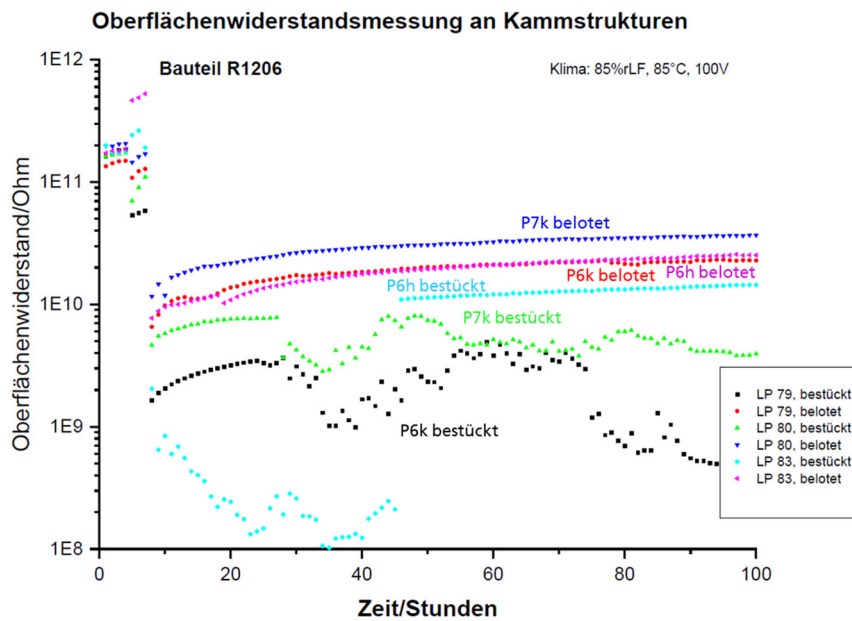


Abbildung 28: Partikel führt zur Reduzierung des Isolationswiderstands.



P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)  
 P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)  
 bestückt... Testboard mit RN58 bestückt,  
 belotet... Testboard nur mit Lotpaste bedruckt und umgeschmolzen, ohne Bestückung

Abbildung 29: SIR-Testmessungen, Chip-Array 1206, 100V, 85/85.



P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)  
 P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)  
 bestückt... Testboard mit R1206 bestückt,  
 belotet... Testboard nur mit Lotpaste bedruckt und umgeschmolzen, ohne Bestückung

Abbildung 30: SIR-Testmessungen, R1206, 100V, 85/85.

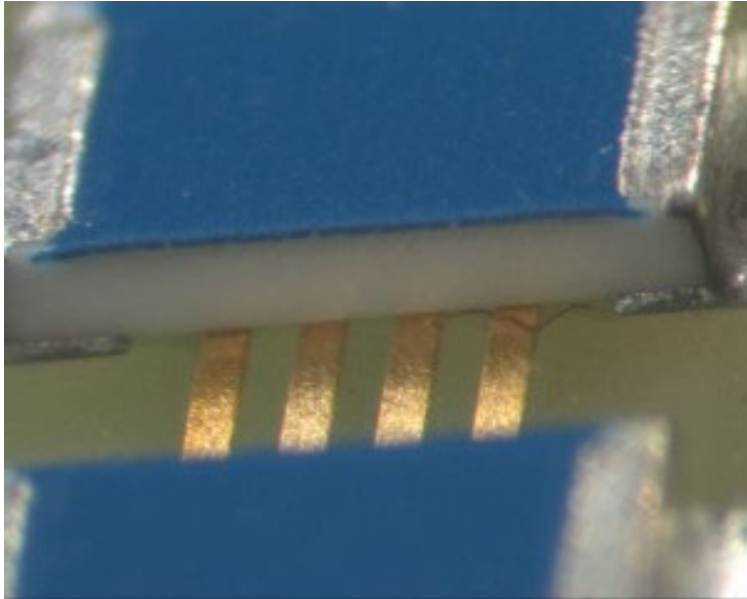
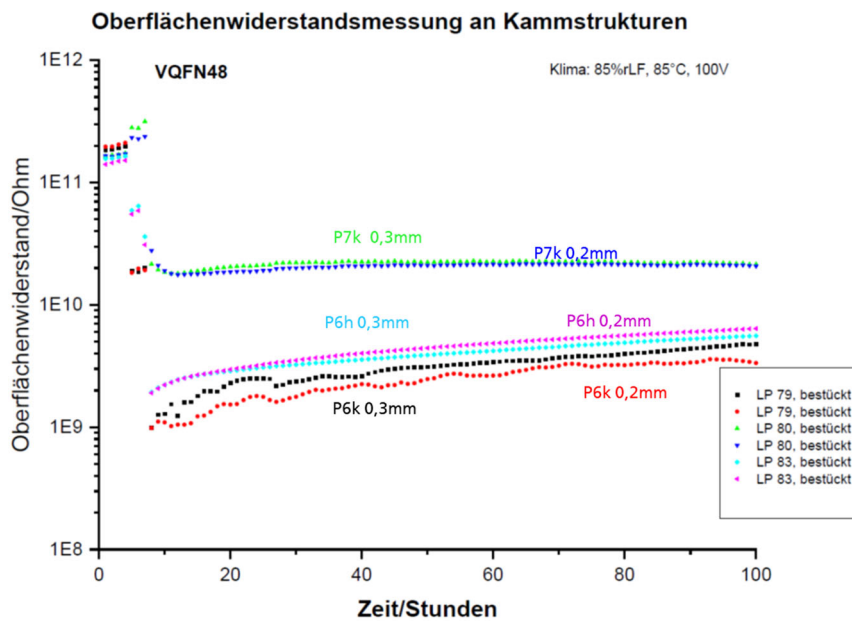


Abbildung 31: R1206 gelötet, Partikel verringert Isolationswiderstand.

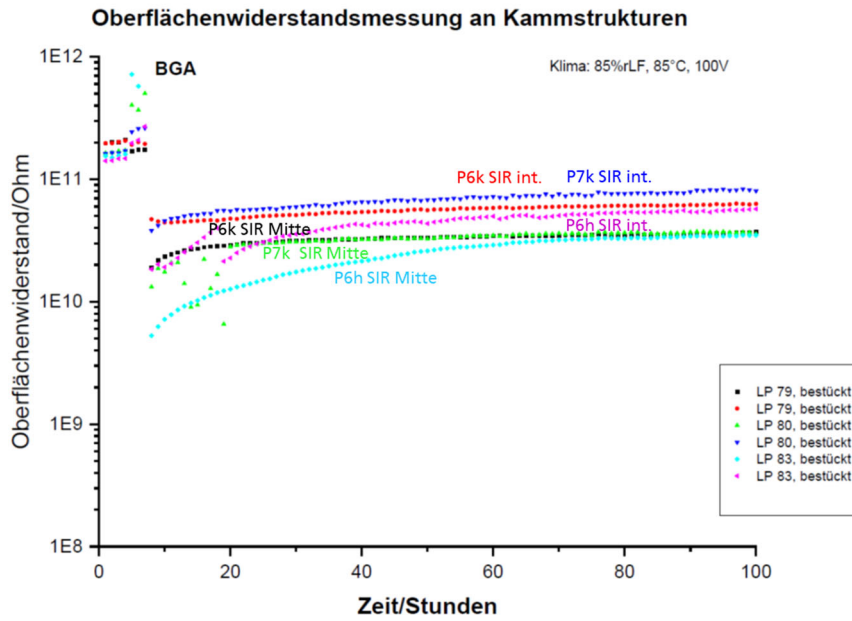


P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)

P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)

0,2mm/0,3mm...Abstand SIR-Kamm zu Padstrukturen

Abbildung 32: SIR-Testmessungen, VQFN, 100V, 85/85.



P6k... Paste 6, kaltes Lötprofil (LP79), P6h... Paste 6, heißes Lötprofil (LP83)

P7k... Paste 7, kaltes Lötprofil (LP80)

SIR-Mitte: mittig unter BGA liegende Kammstruktur, SIR int.: in DC-BGA-Layout integrierte SIR-Struktur

Abbildung 33: SIR-Testmessungen, BGA, 100V, 85/85.

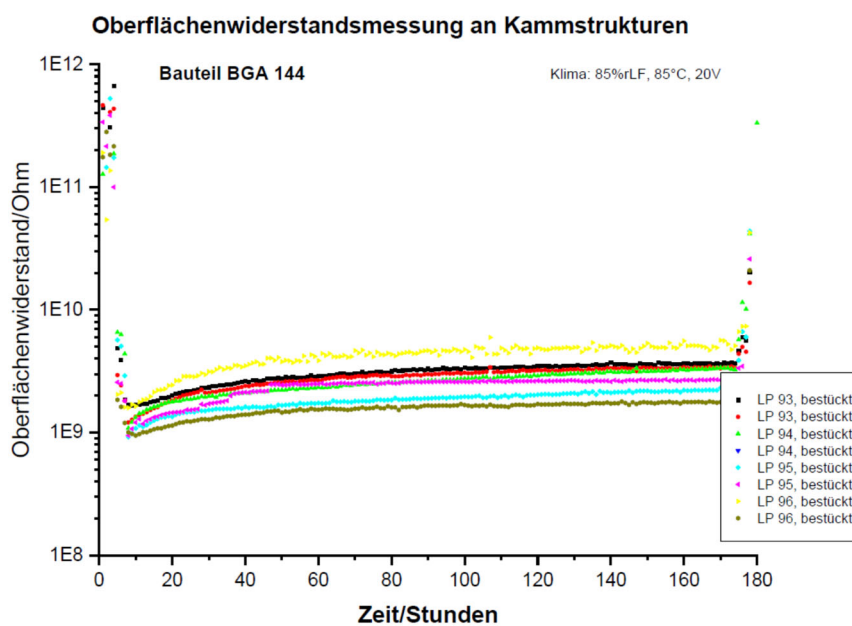


## 5.3.4 SIR-Testmessungen, Zusatzflux

### 5.3.4.1 SIR-Testmessungen, Vorversuche mit Zusatzflux

Nun wurde die Flussmittelmenge um 100% erhöht, indem Flussmittelgel anstatt der Lotpaste gedruckt wurde. Dadurch konnten jedoch ebenfalls keine Ausfälle provoziert werden, siehe Abbildung 34.

Bei dem „Zusatzflux/Zusatzflussmittel“ handelt es sich um das jeweils in der Lotpaste vorhandene Flussmittel, das aus dem PA durch die Materiallieferanten in Form eines dispensfähigen Flussmittelgels beigestellt wurde.



P3F-k....Flux 3, kaltes Lötprofil (LP 93)

P5F-k....Flux 5, kaltes Lötprofil (LP 94)

P6F-k....Flux 6, kaltes Lötprofil (LP 95)

P7F-k....Flux 7, kaltes Lötprofil (LP 96)

Abbildung 34: SIR-Testmessungen, BGA, Fluxdruck, 20V, 85/85.

Die nächste Steigerung war der Auftrag von Zusatzflussmittel, das nach dem Lotpastendruck dispensiert wurde, siehe Abbildung 35 - Abbildung 36. So wurde ein Flussmittelanteil von 300% FM-Volumen und mehr gegenüber dem Ausgangszustand beim „einfachen Lotpastendruck“ (100% FM-Volumen) erreicht.

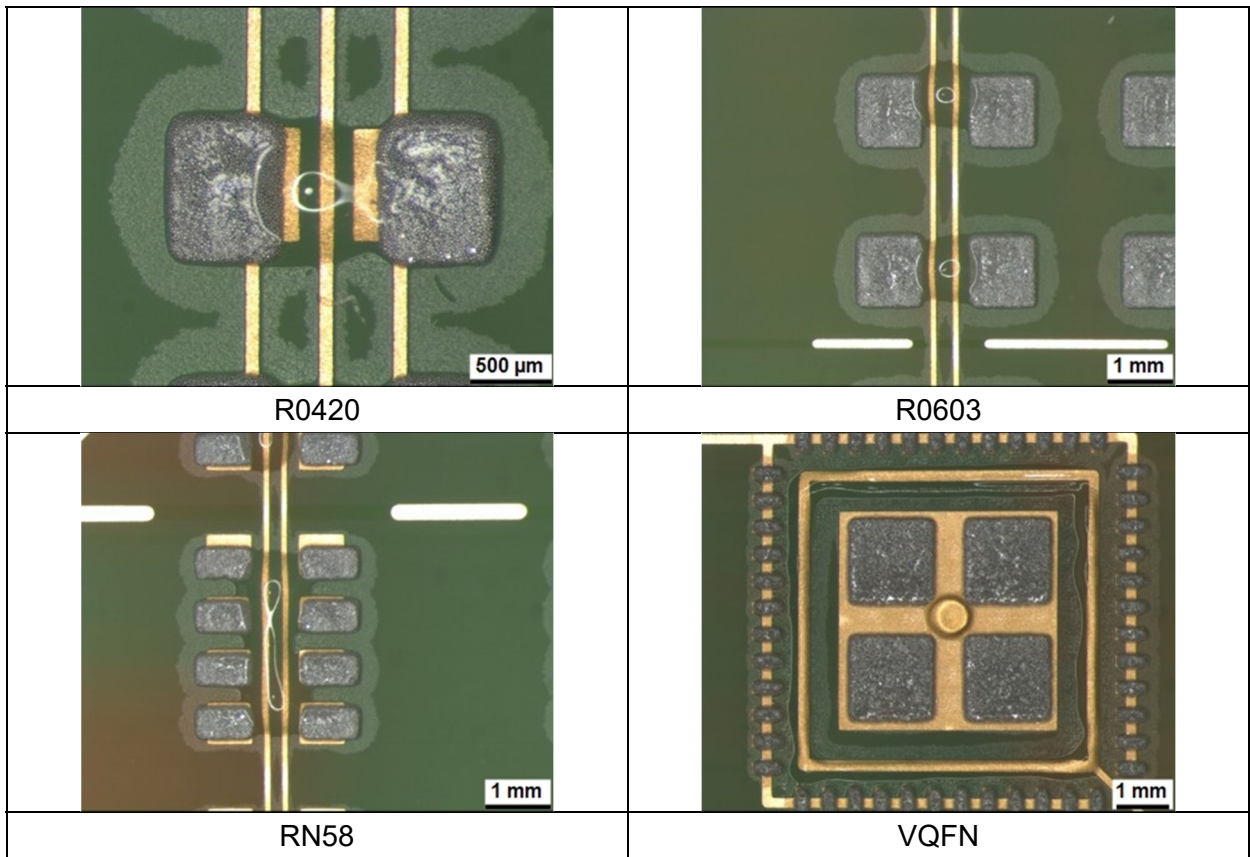


Abbildung 35: Auftrag von Zusatzflux.

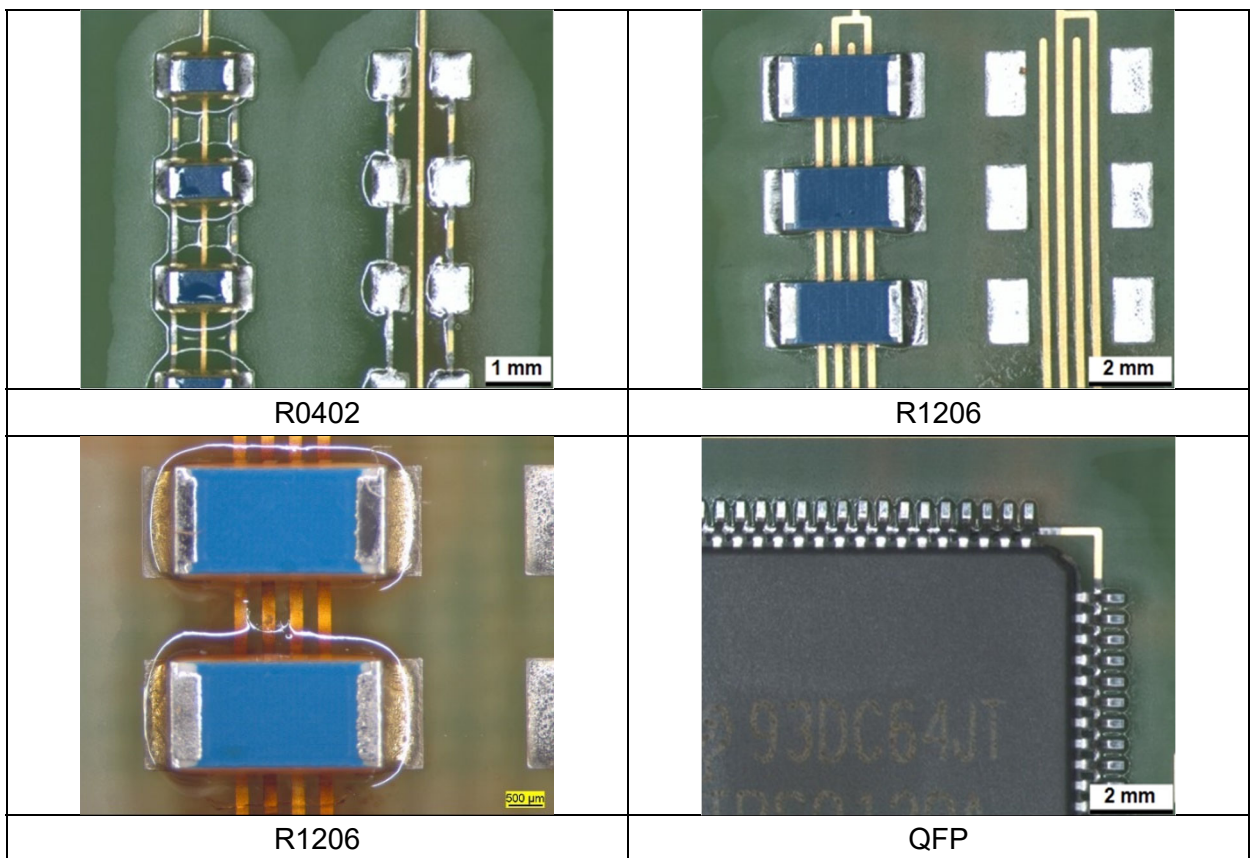
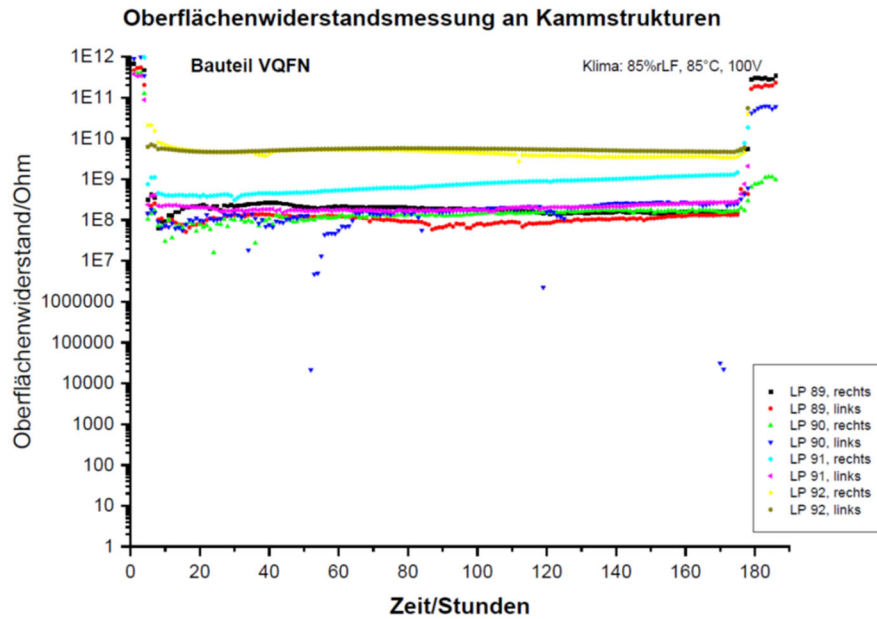


Abbildung 36: Auftrag von Zusatzflux, nach Lötung.



P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 89)

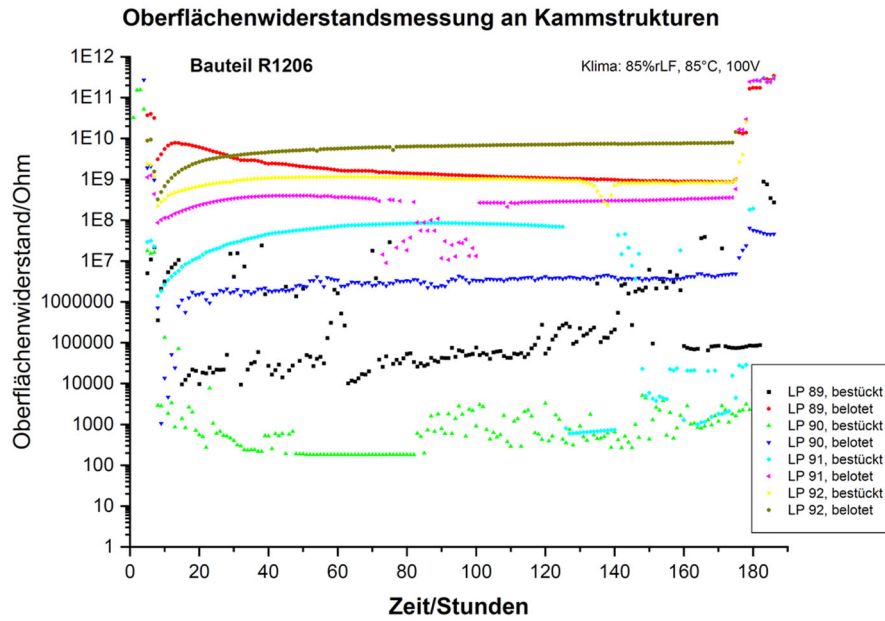
P4+4F-k... Paste 4, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 90)

P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 91)

P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 92)

Abbildung 37: SIR-Testmessungen, VQFN, Zusatzflux, 100V, 85/85, gelötet, gereinigt, Auftrag von Zusatzflux.

Auch eine Erhöhung des Flussmittelanteils auf 300% FM-Volumen führte nicht bei allen Komponenten zu Ausfällen, siehe Abbildung 37, Abbildung 40 - Abbildung 43, Abbildung 45 - Abbildung 47. Dennoch führte dieser Auftrag von zusätzlichem Flussmittel zu vereinzelt Ausfällen, die sich möglicherweise auf Dendritenbildung zurückführen lassen, siehe Abbildung 38 - Abbildung 39. Die Ausfälle könnten allerdings auch durch das deutliche Überangebot an Flussmittel und damit aktiven Bestandteilen bedingt sein, die zu einer Reduzierung des Oberflächenisolationswiderstandes führten. Dendriten konnten auch so nicht reproduzierbar erzeugt werden.



- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 89)
- P4+4F-k... Paste 4, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 90)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 91)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 92)

Abbildung 38: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 100V, 85/85, gelötet, gereinigt, Auftrag von Zusatzflux.

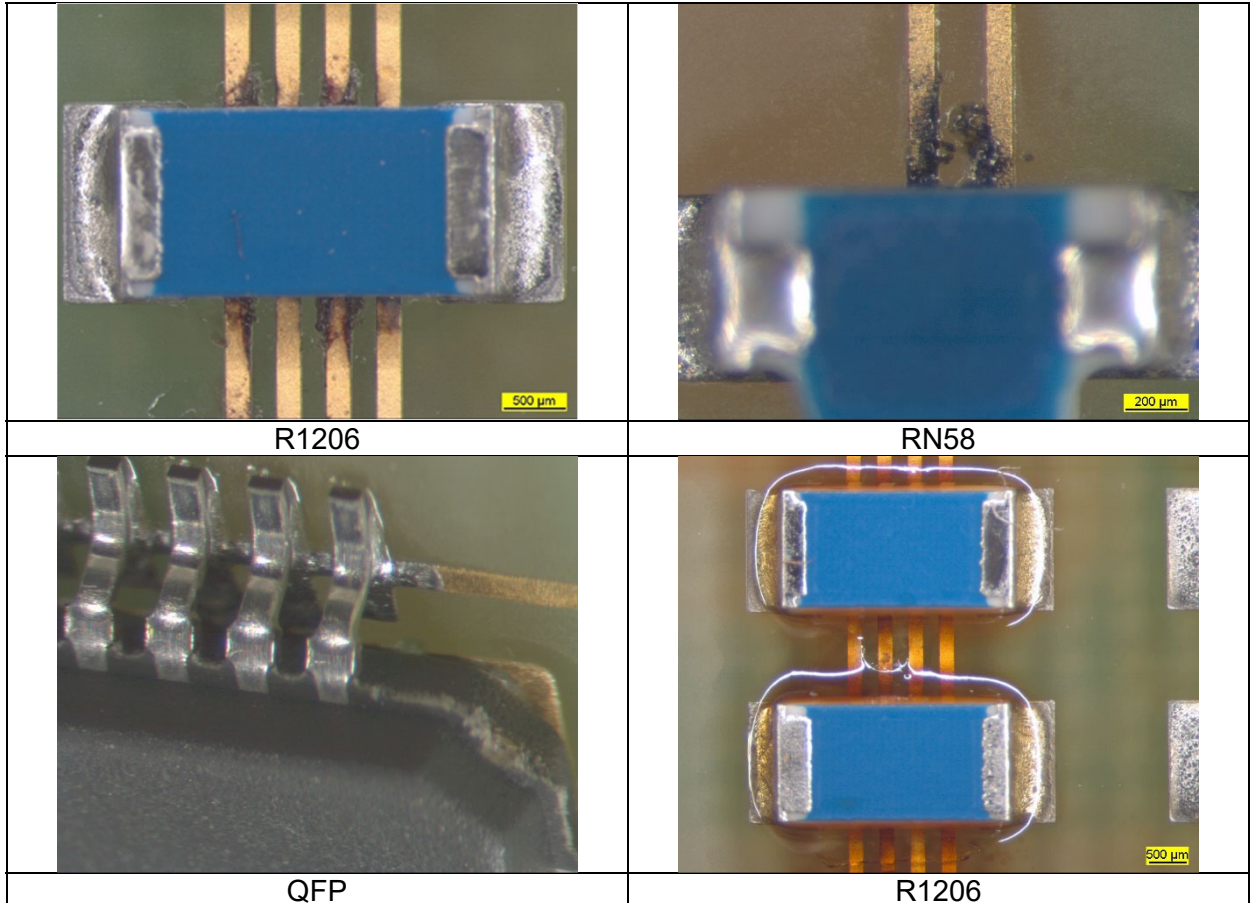
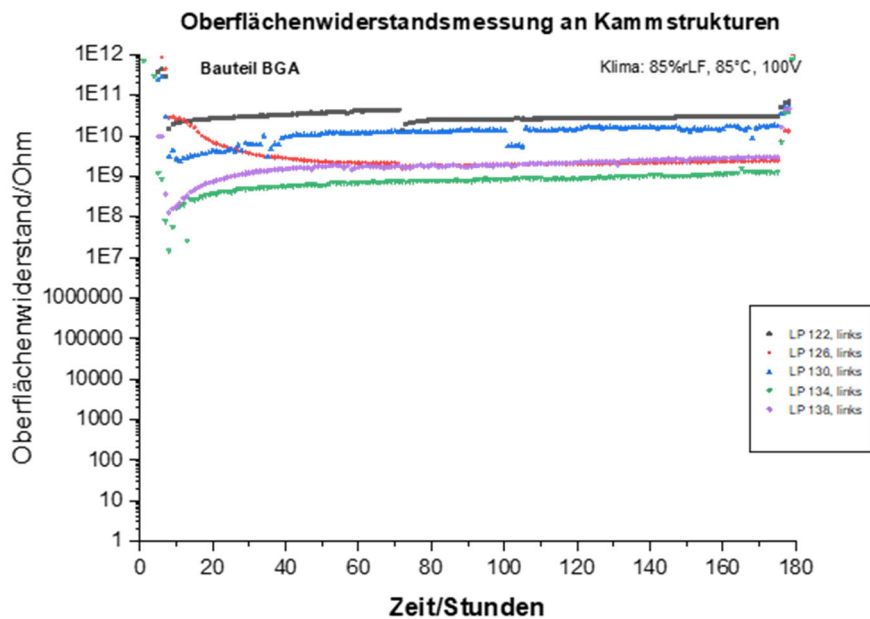


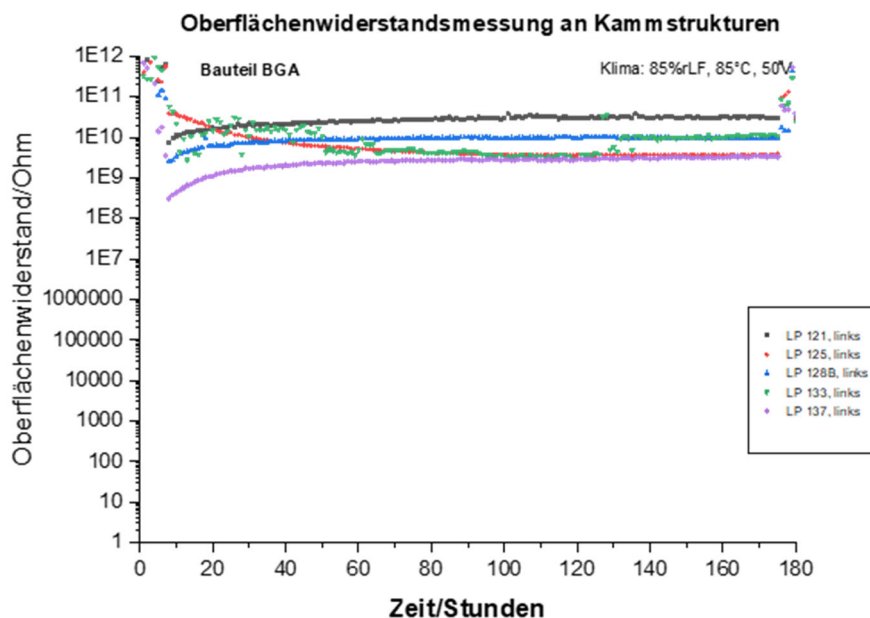
Abbildung 39: Testboard IGF 20115 N, 100V, 85/85, erhöhter FM-Anteil.

### 5.3.5 SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux



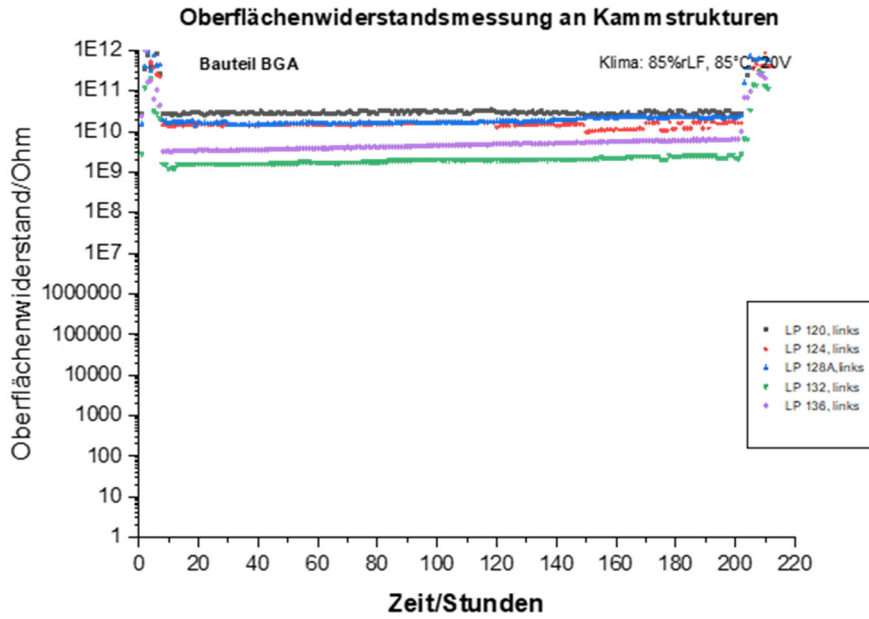
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 40: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 100V.



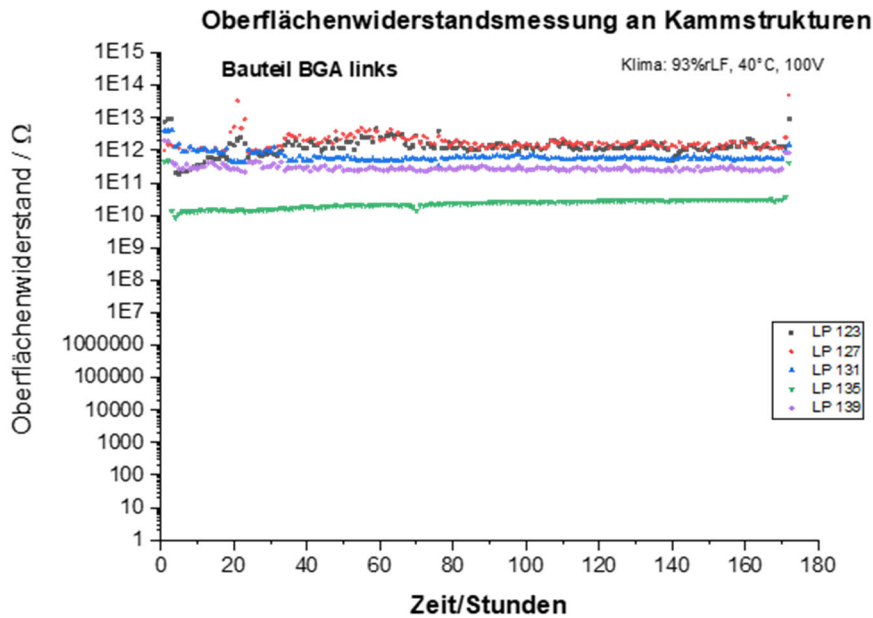
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 41: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 50V.



- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

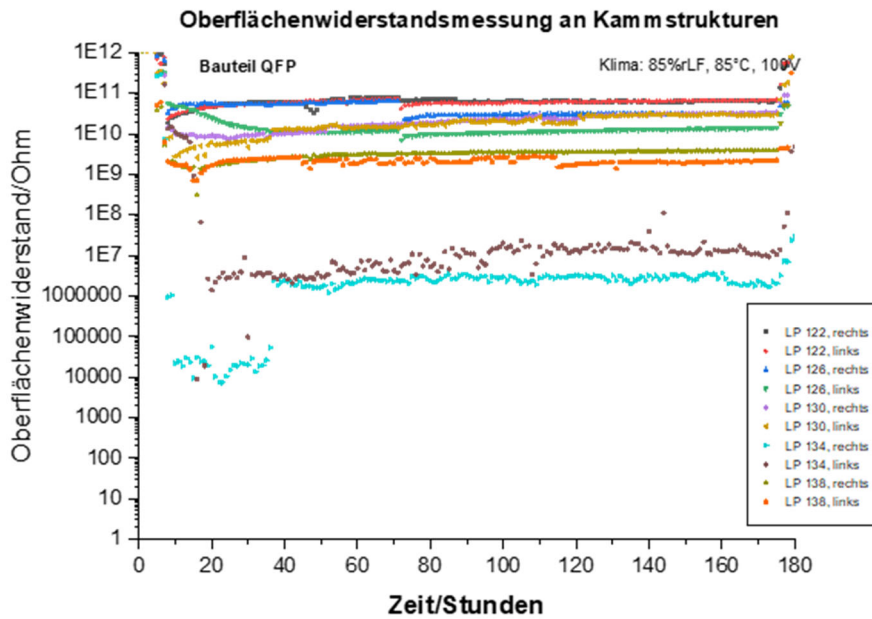
Abbildung 42: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 20V.



- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

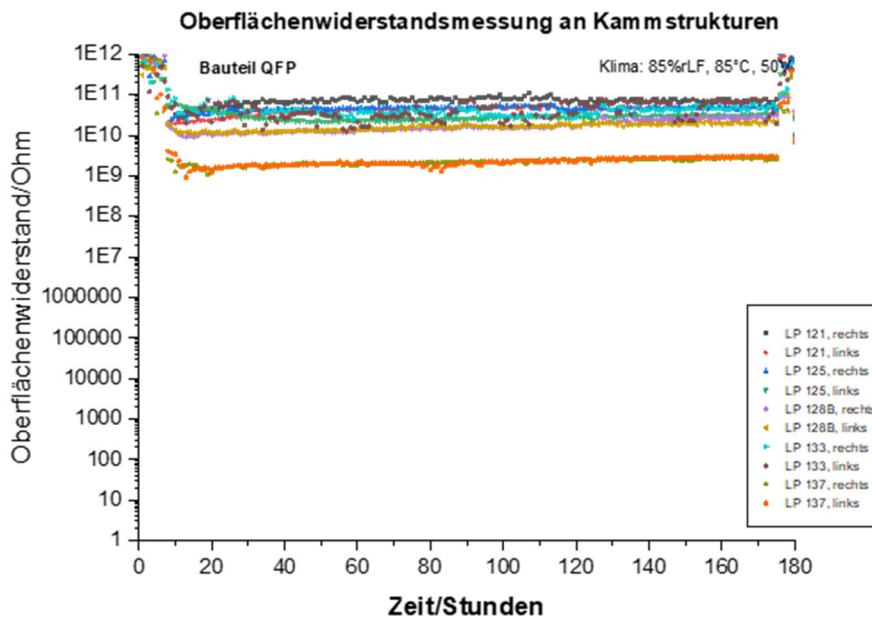
Abbildung 43: SIR-Testmessungen, BGA, Zusatzflux, 100V, 40/93.

### 5.3.6 SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux



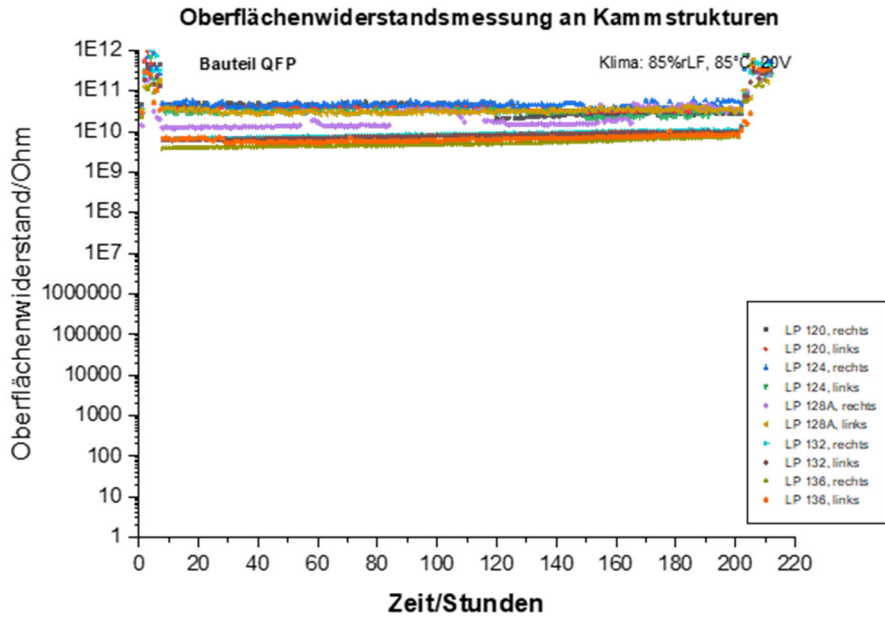
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 44: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 100V.



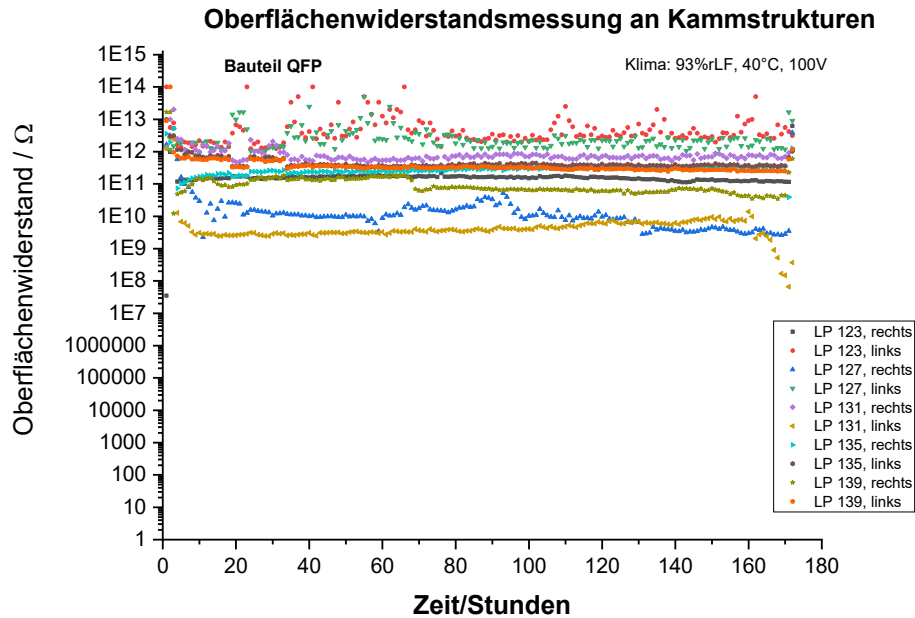
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 45: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 50V.



- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 46: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 20V.

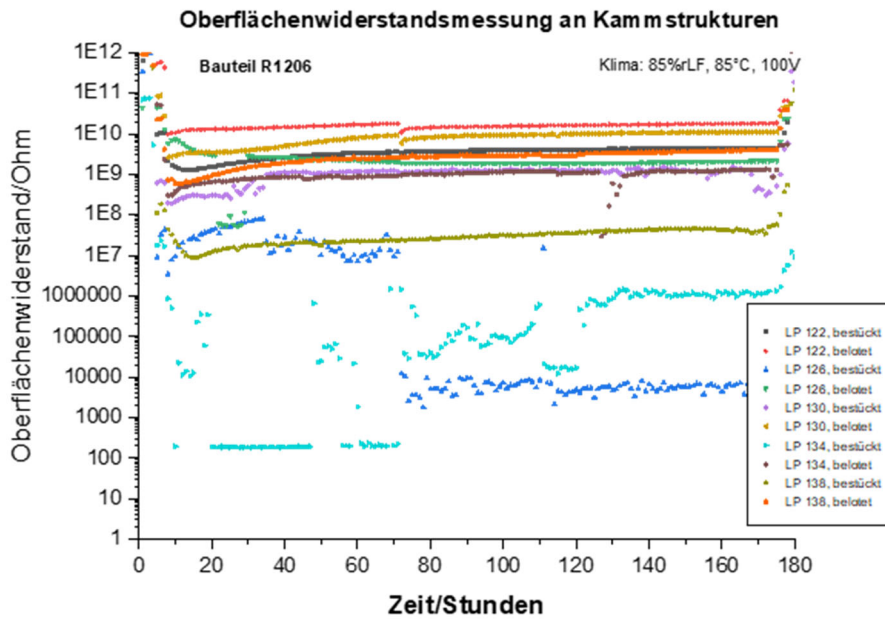


- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 47: SIR-Testmessungen, QFP, Zusatzflux, 100V, 40/93.

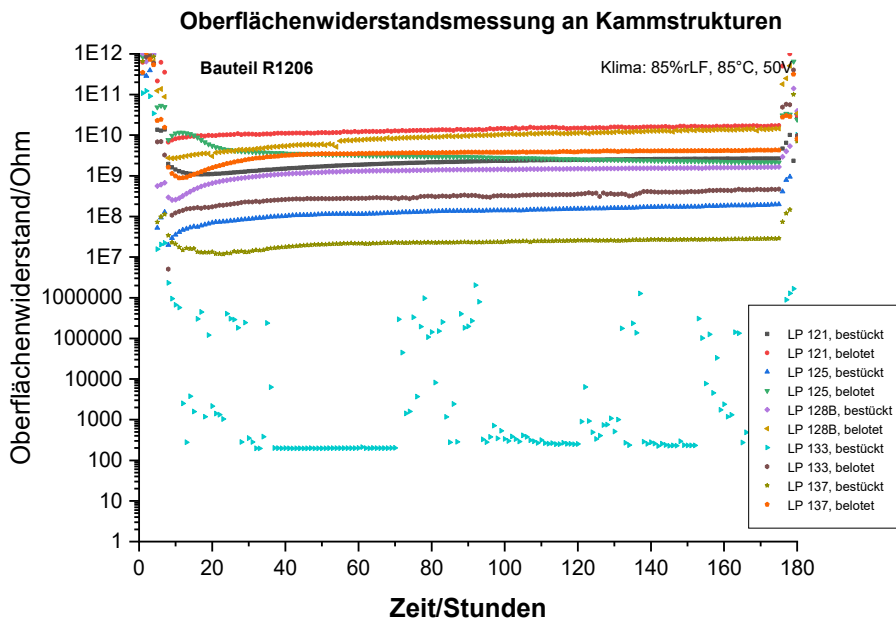


### 5.3.7 SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux



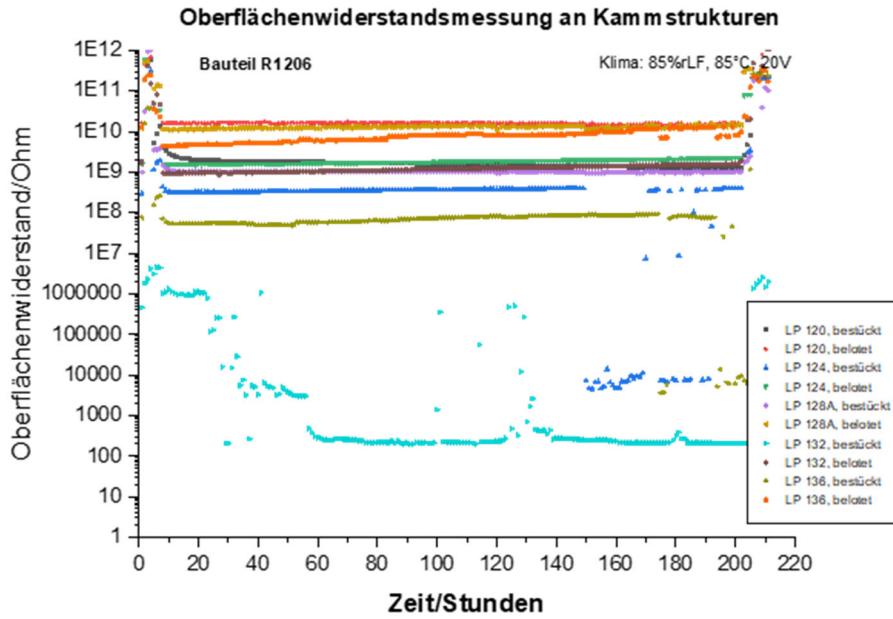
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 48: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 100V.



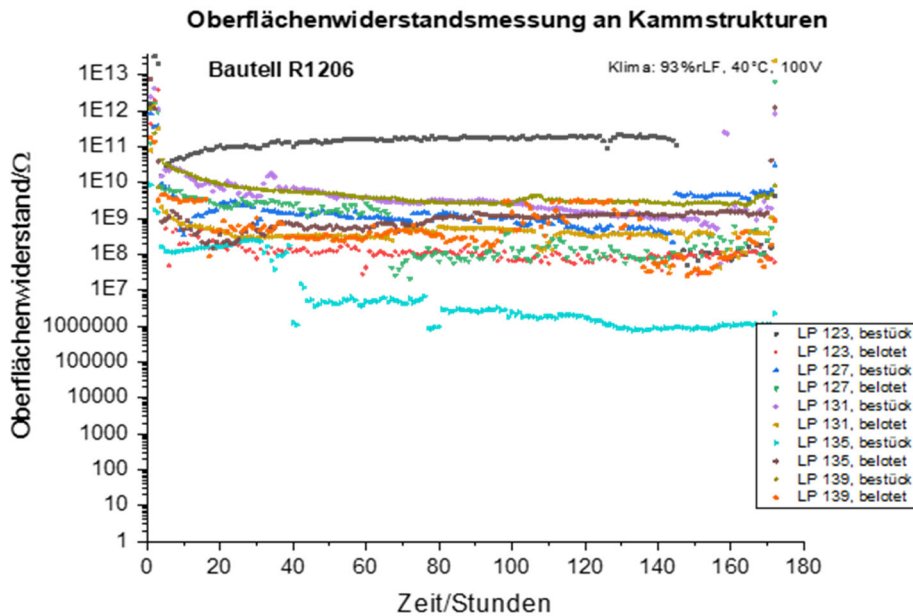
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 49: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 50V.



- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

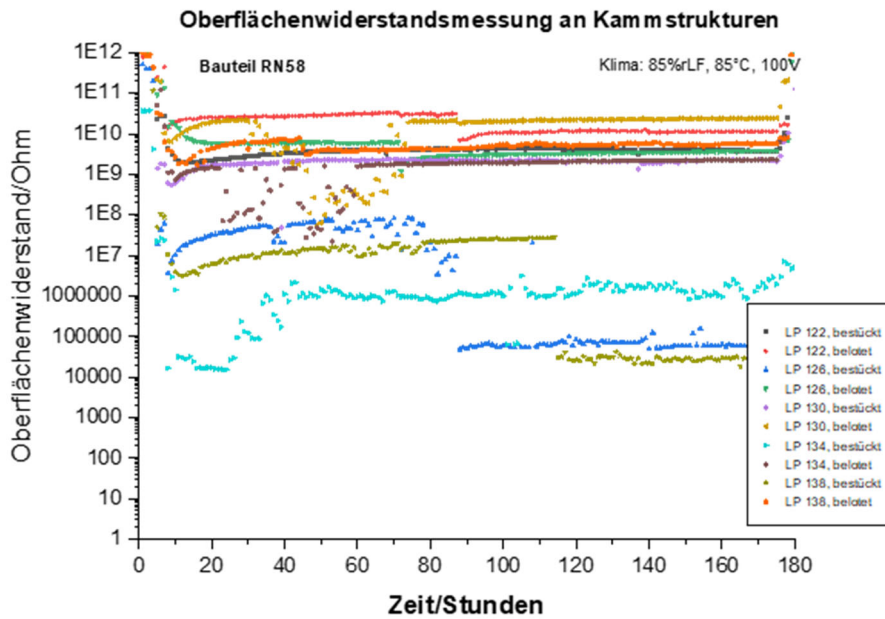
Abbildung 50: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 20V.



- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

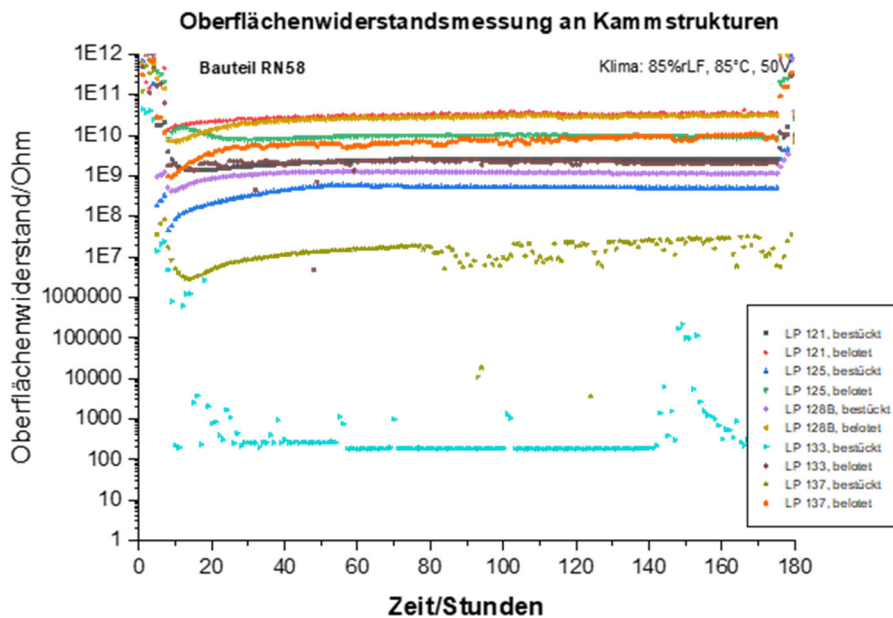
Abbildung 51: SIR-Testmessungen, R1206, Zusatzflux, 100V, 40/93.

### 5.3.8 SIR-Testmessungen, Chip Array, Zusatzflux



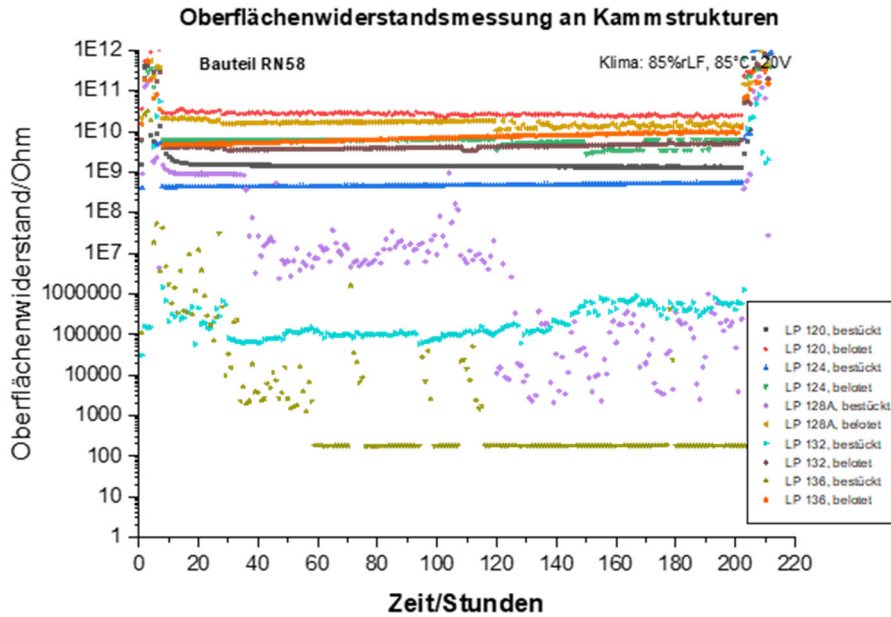
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 52: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 100V.



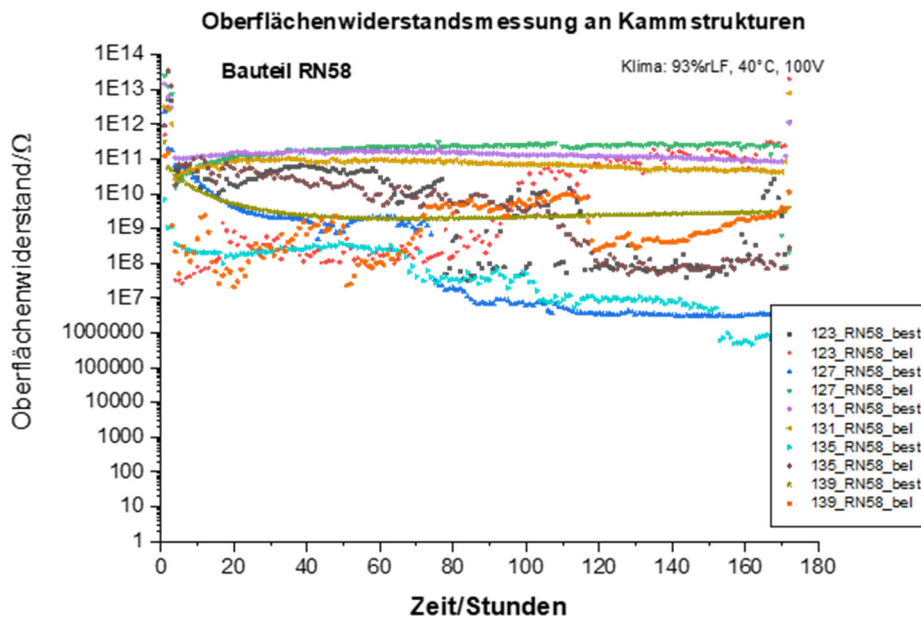
- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 53: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 50V.



- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 54: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 20V.



- P5+5F-k... Paste 5, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 120-123)
- P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP124-127)
- P7+7F-k... Paste 7, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 128a-131)
- P1+1F-k... Paste 1, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 132-135)
- P6+6F-k... Paste 6, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP 136-139)

Abbildung 55: SIR-Testmessungen, RN58, Zusatzflux, 100V, 40/93.

Die Kapitel 5.3.5 - 5.3.8 zeigen exemplarisch an ausgewählten Komponenten die Ergebnisse der SIR-Test Untersuchungen bei Applikation von Zusatzflussmittel. Versuche, bei denen nur Flussmittel (ohne Metallanteil) gedruckt wurde, zeigen ein nahezu identisches Verhalten.

Stichprobenartig wurden Versuche mit einem alternativen Lötstopplack durchgeführt. Auch hier zeigt sich ein vergleichbares Verhalten.

Zusammenfassend ergeben sich aus den SIR-Test Untersuchungen mit Spannungen bis 100V:

- SIR-Tests wurden bei 85/85 und 20/50/100V sowie 40/93 und 100V durchgeführt  
→ Ergebnisse 40/93 und 85/85 sind gleichwertig
- Alle Lotpasten (RE/RO, L0/L1) zeigen  $R > 1E9 \Omega$   
(Normvorgabe:  $R > 1E8 \Omega$ , Dendritenwachstum  $\leq 20\%$ )
- ROL0 und ROL1 zeigen keine Unterschiede im SIR Test
- Eine Flussmittelmenge im üblichen Rahmen ist ohne signifikanten Einfluss auf den R-Wert im SIR-Test
- $R_{\text{Lotpaste „heiß“ gelötet}} > R_{\text{Lotpaste „kalt“ gelötet}}$
- $R_{\text{Körnung T4}}$  unwesentlich größer als  $R_{\text{Körnung T5}}$  bei gleichem Flux
- $R_{\text{bestückt}}$  meistens  $\leq R_{\text{unbestückt}}$
- $R_{\text{nach Reinigung}}$  geringfügig höher
- Erst eine drastische Erhöhung der aufgetragenen Flussmittelmenge führt bei einigen aber nicht allen FM zu Ausfällen.

## 5.3.9 Hochvolt-SIR-Test

### 5.3.9.1 Testaufbau

Die im ISIT vorhandenen Testaufbauten sind nur bis zu einer Prüfspannung von 100V ausgelegt. Daher wurde im Rahmen des Projekts mit ISIT-eigenen Mitteln am ISIT eine Prüfapparatur für die Hochvoltanwendung aufgebaut und qualifiziert. Vergrößerte Isolationsabstände, eine hochspannungsfeste Schutzschaltung und die Arbeitssicherheit beim Betrieb stellten hierbei die Herausforderungen. Durch Corona bedingte Verzögerungen bei der Lieferung der Messapparatur und Leiterplatten war es im Rahmen der Projektlaufzeit nur möglich, den Messaufbau zu erstellen und zu qualifizieren. Weitergehende Untersuchungen werden im Anschluss an das Projekt erfolgen.

Der HV-SIR-Test hat folgende Eigenschaften:

- Maximale Spannung: 1500V
- Messkanäle: bis zu 80
- Messdatenerfassung: Online

### 5.3.9.2 Qualifizierungstests

Die Testboards für die Hochvolt-SIR-Test Untersuchungen wurden im ISIT entworfen und mussten aus eigenen Mitteln beschafft werden, da Corona bedingt keine Beistellung aus dem PA erfolgen konnte. Abbildung 56 zeigt das unbestückte HV SIR-Test Board, Abbildung 57 das Testboard nach Bestückung und Abbildung 58 im gelöteten Zustand.

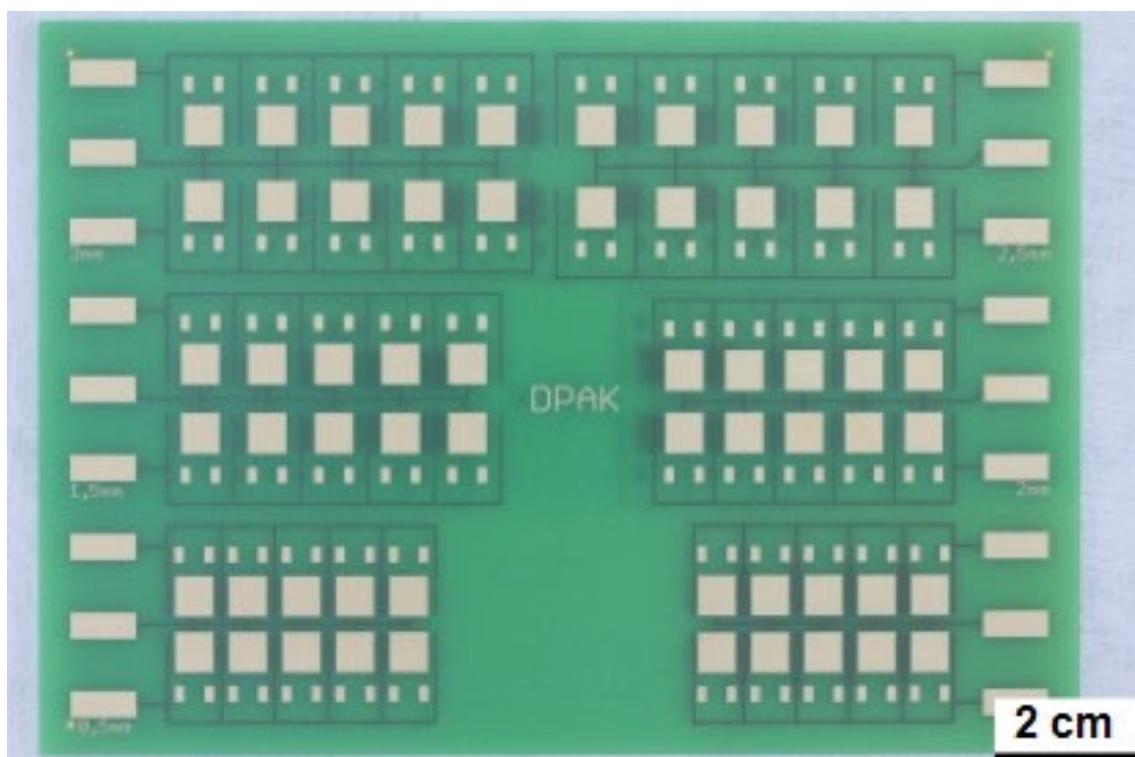


Abbildung 56: Hochvolt-SIR-Test Board.

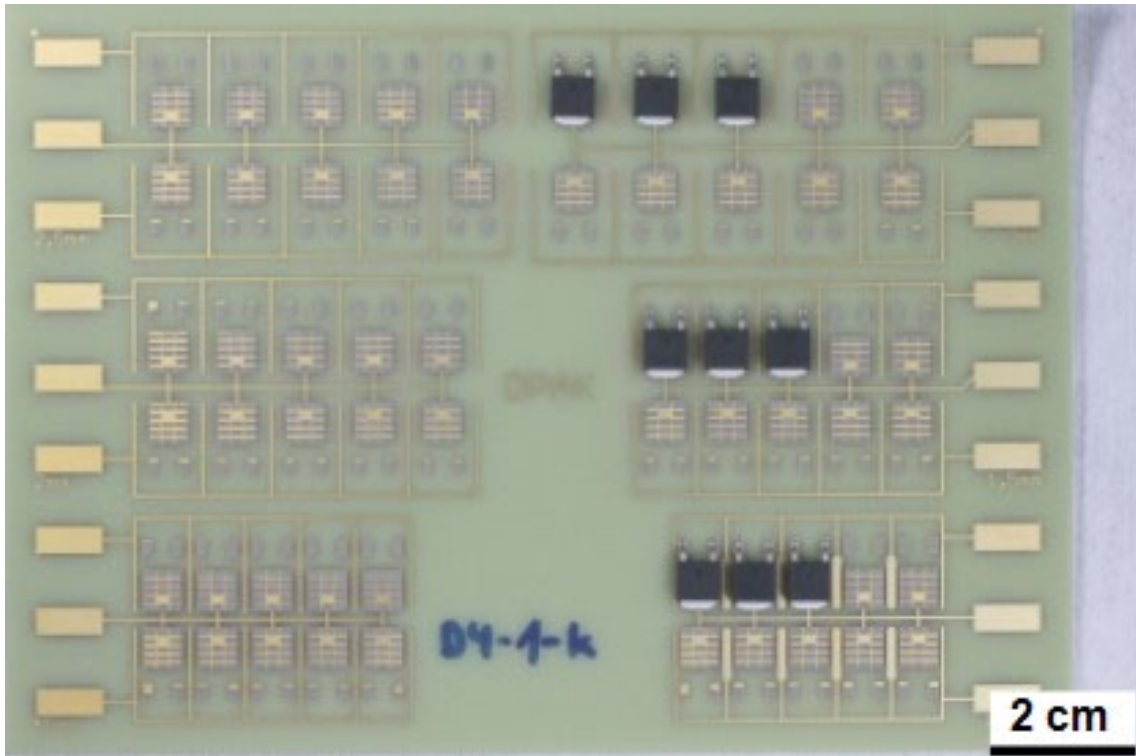


Abbildung 57: Hochvolt-SIR-Test Board, gedruckt und teilbestückt.

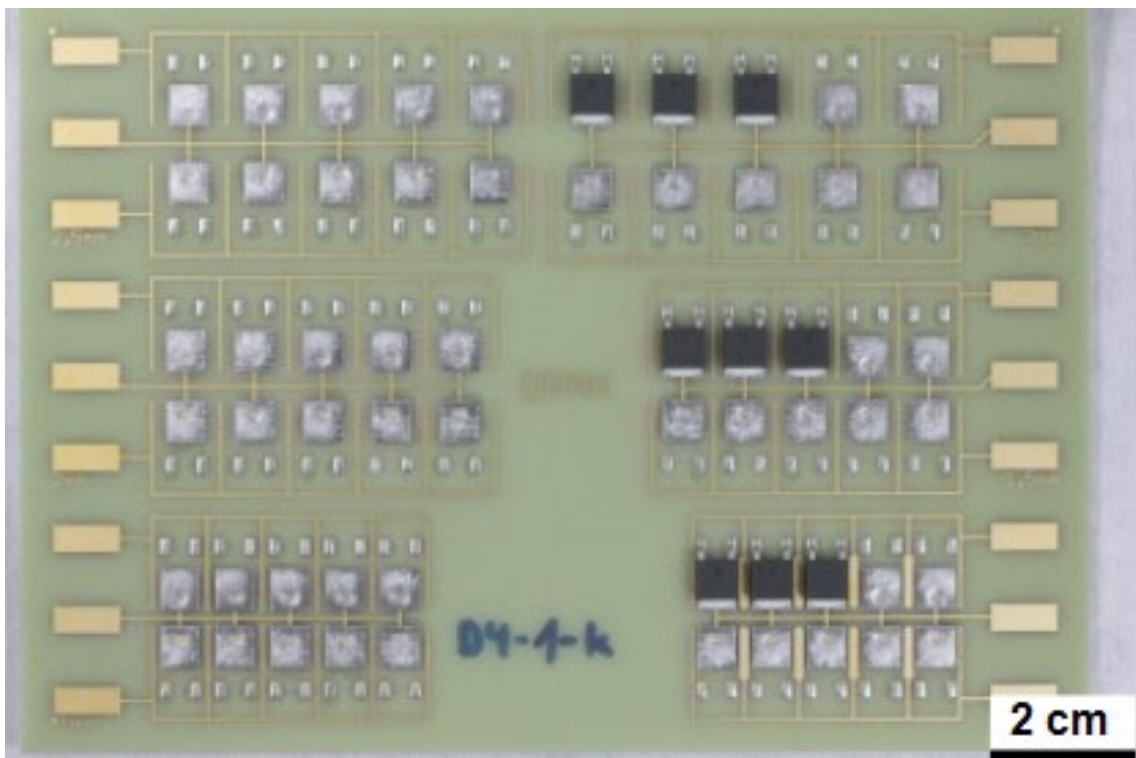


Abbildung 58: Hochvolt-SIR-Test Board gelötet.

Die Boards wurden bedruckt, bestückt und gelötet, siehe Abbildung 59 - Abbildung 61.

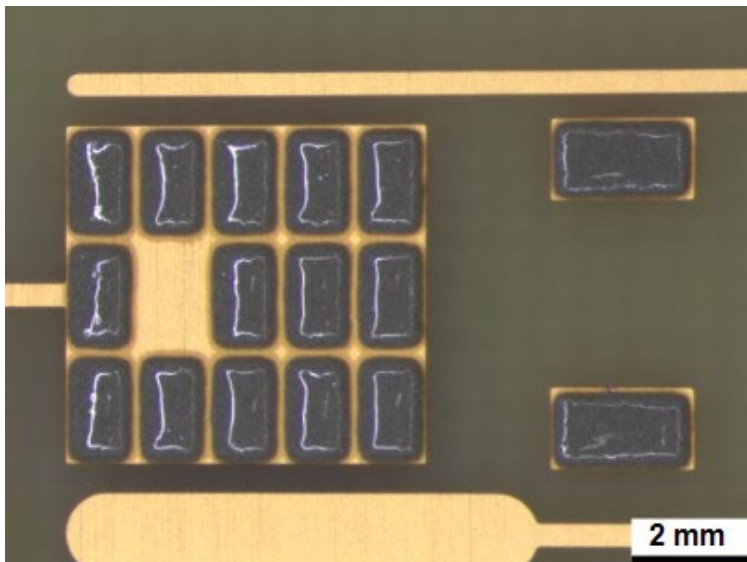


Abbildung 59: Testboard bedruckt.

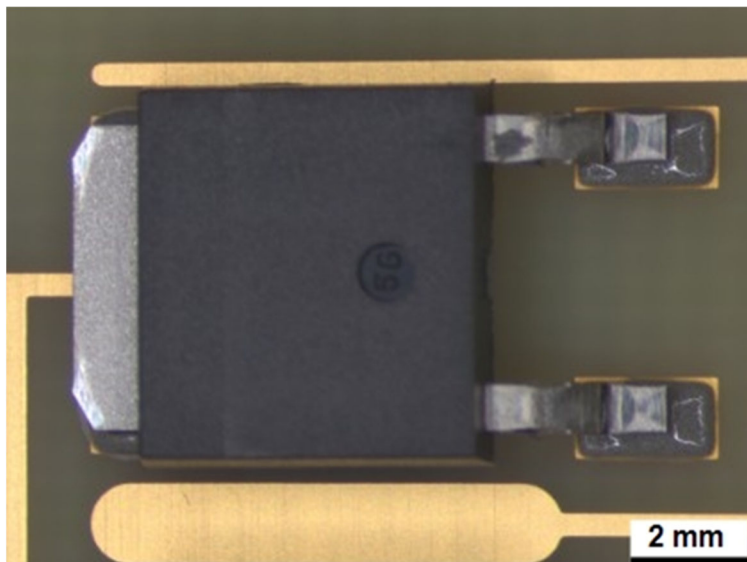


Abbildung 60: Testboard bestückt.

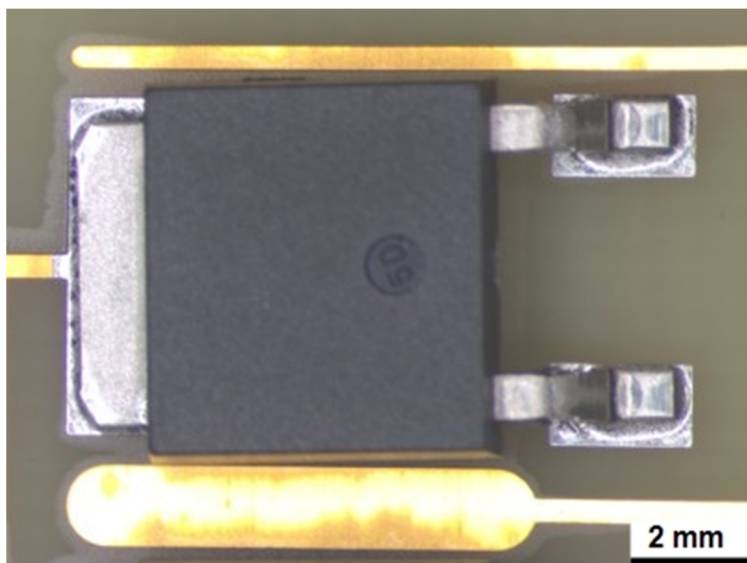
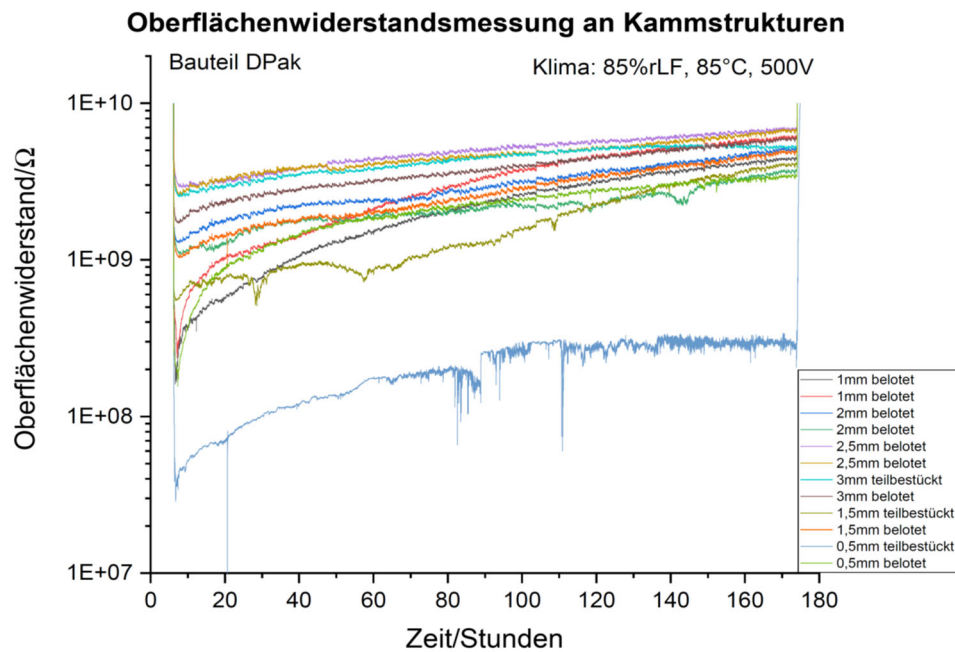


Abbildung 61: Testboard gelötet.



Die Abbildung 62 zeigt die Ergebnisse einer SIR-Test Messung bei 500V. Bei einem Abstand der Kammstrukturen von 0,5 mm sind Auffälligkeiten in der Messkurve zu erkennen (untere blaue Kurve).

Die optische Inspektion nach dem SIR-Test zeigt eindeutige Dendritenbildung, siehe Abbildung 63 - Abbildung 64. Bei den Strukturen mit größeren Abständen (1 mm und größer) sind keine Ausfälle zu sehen.



P3+3F-k... Paste 3, Zusatzflussmittel kaltes Lötprofil (LP D6-3-k)

Abbildung 62: SIR-Testmessungen, DPak, Zusatzflux, 500V.

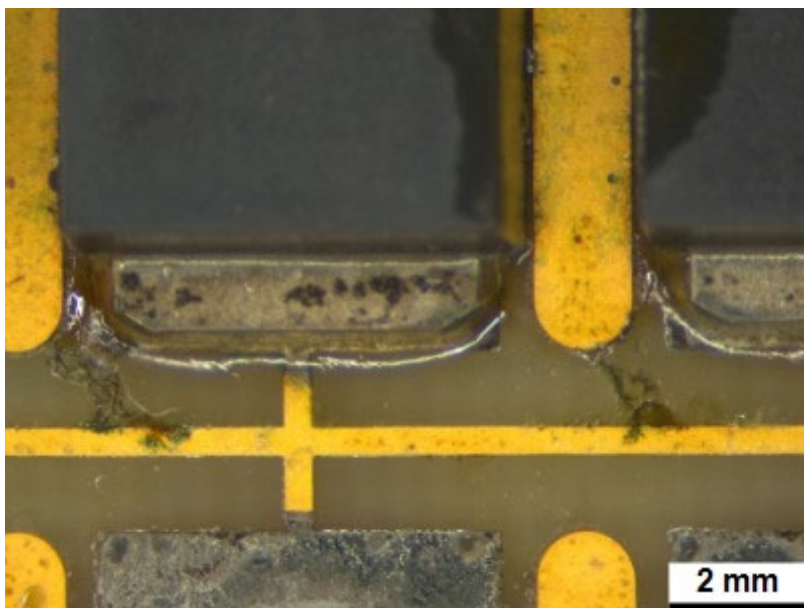


Abbildung 63: Dendritenbildung.

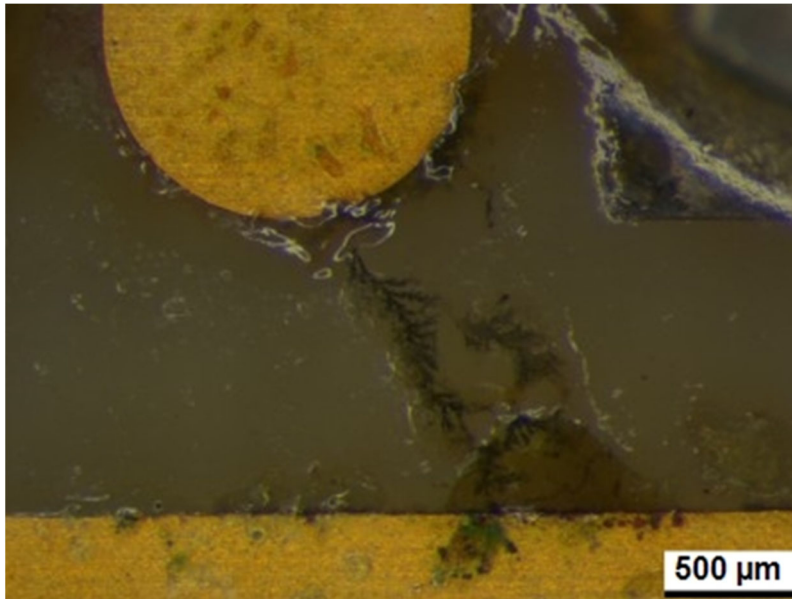


Abbildung 64: Dendritenbildung, Detailaufnahme.

### 5.3.10 Erkenntnisse aus den SIR-Test Untersuchungen

- Niedrige Löttemperaturen im zulässigen Lötprozessfenster der Flussmittel führten bei keiner der untersuchten Kombinationen von Lotpasten („übliche“ Flussmittelmenge), Bauteilen und SIR-Testbedingungen zu Ausfällen.
- Mit Lötstopplack abgedeckte Leiterstrukturen sind unauffällig.
- Bei den untersuchten Lotpasten-Bauteil-Kombinationen führte die applizierte „beim Lotpastendruck übliche“ Flussmittelmenge auf den untersuchten Teststrukturen bei Prüfspannungen bis 100V zu keinen Ausfällen durch ECM.
- Erhöhung der Flussmittelmenge bis zum doppelten Volumen führte bei den untersuchten Lotpasten-Bauteilkombinationen zu keinen Ausfällen.
- Erhöhung der Flussmittelmenge ab ca. dem dreifachen Volumen führte bei den untersuchten Lotpasten-Bauteilkombinationen vereinzelt zu ersten Ausfällen.
- Ein deutliches Überangebot an Flussmittel (Zusatzauftrag neben/unter Komponenten) kann bei freiliegenden Leiterzügen zu Ausfällen führen.
- Lotpartikel können beim Lötprozess mitgerissen werden, bleiben unter dem Bauelement liegen und können zu Reduzierungen von Isolationsabständen führen.
- Die erhöhten FM- Rückstände können:
  - zu Reduzierungen von Oberflächen-Isolationswiderständen führen,
  - bereits bei Spannungen von 20V zu möglicher Dendritenbildung führen.
- Sichtbare Dendritenbildung im HV-SIR-Test bei 500V bei 0,5mm Abstand und Zugabe von Extra Flux.

Bei 0,1 mm Abstand beträgt der Isolationsabstand laut IPC-2221 [24] für unbeschichtete Baugruppen mindestens 0,5 mm. Da im SIR-Test bei Spannungen bis 100V auch bei Isolationsabständen von 100 µm keine eindeutige Dendritenbildung nachweisbar ist, insbesondere bei sachgemäßer Verwendung der Lotpasten, muss davon ausgegangen werden, dass die Vorgabe des minimalen Isolationsabstands nach IPC-2221 sehr auf Sicherheit bedacht und vermutlich deutlich überdimensioniert ist.

## 6 AP3: Chemische Struktur

Parallel zu den elektrischen Tests in AP2 wurden in Arbeitspaket 3 die chemischen Wechselwirkungen zwischen Substratmaterial, Flussmittelrückständen, ionischen Verunreinigungen, Restfeuchtigkeit und sonstigen Oberflächenbestandteilen analysiert. Hierzu sind Analysetechniken erforderlich, die zum einen Informationen über die elementare und die molekulare Zusammensetzung der beteiligten Komponenten liefern können. Zum anderen müssen diese Analysemethoden in der Lage sein, eine ausreichend hohe Ortsauflösung zu erreichen, um beginnende elektrochemische Migrationseffekte überhaupt erfassen zu können. Zur Untersuchung der quantitativen Elementzusammensetzungen und der Oxidationszustände der metallischen Komponenten steht dazu im IFAM die Photoelektronenspektroskopie (XPS) zur Verfügung. Mit Hilfe der Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (TOF-SIMS) lassen sich darüber hinaus die molekularen Strukturen der Oberflächenbestandteile detailliert analysieren. Diese beiden Analyseverfahren erreichen eine laterale Auflösung bis in den Bereich weniger  $\mu\text{m}$ . Höhere Ortsauflösungen lassen sich mit der Rasterelektronenmikroskopie (REM) als abbildende Technik erreichen. Die REM lässt sich erweitern um die Methode der Energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX), die mit einer relativ hohen Ortsauflösung eine semiquantitative Detektion der chemischen Elementzusammensetzung des oberflächennahen Bereichs der analysierten Materialien ermöglicht. Diese Analysetechniken werden im folgenden Abschnitt 6.1 etwas detaillierter dargestellt.

Inhaltlich gliedert sich das Arbeitspaket 3 in drei Schwerpunkte. Zunächst wurde die chemische Struktur der Lotpasten betrachtet, wobei neben dem Ausgangszustand auch die Lotpasten nach den beiden Lötprozessen „kalt“ und „heiß“ vergleichend untersucht wurden (Abschnitt 6.2). Im Anschluss daran wurde der Fokus insbesondere auf die molekulare Zusammensetzung der jeweils verwendeten Flussmittel gelegt, ebenfalls wieder sowohl für die Ausgangszustände als auch für die Proben nach den Lötprozessen (Abschnitt 6.3). Der letzte Schwerpunkt schließlich betrifft die Analysen der Testboards nach den SIR-Test aus AP2. Hier sollten die Strukturen auf den Testboards speziell im Bereich um bzw. unterhalb der getesteten Bauelemente untersucht werden, um aus den Ergebnissen Rückschlüsse über das Schädigungsverhalten z.B. durch elektrochemische Migration ziehen zu können (Abschnitt 6.4).

### 6.1 Untersuchungsmethoden

#### 6.1.1 Photoelektronenspektroskopie (XPS)

Messprinzip: Die Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS, X-ray Photoelectron Spectroscopy) beruht auf dem äußeren Photoeffekt, bei dem durch Röntgenstrahlung Photoelektronen aus einer Festkörperoberfläche ausgelöst werden. Die Bestimmung der kinetischen Energie dieser Elektronen erlaubt Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung und die elektronische Beschaffenheit der untersuchten Probenoberfläche. Die Analyse ist oberflächenempfindlich. Die zugehörige Informationstiefe, die durch die begrenzte Austrittstiefe der emittierten Elektronen bestimmt wird, beträgt ca. 10 nm. Die Methode erlaubt eine quantitative Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des oberflächennahen Bereiches. Dabei werden alle Elemente mit Ausnahme von Wasserstoff und Helium erfasst. Die Quantifizierung erfolgt auf Basis dokumentierter relativer Sensitivitätsfaktoren der Elemente unter Berücksichtigung der spezi-

fischen Analysatortransmissionsfunktion basierend auf der Annahme einer homogenen Verteilung der Elemente innerhalb der XPS-Informationstiefe (ca. 10 nm). Die Nachweisempfindlichkeit der Methode ist elementspezifisch und liegt bei ca. 0.1 at%, d.h. ca. 1000 ppm. Zur Kompensation von Aufladungseffekten wird die C-C/C-H-Spezies zuzuordnende C1s-Hauptphotoemmissionslinie bei der Auswertung auf 285 eV festgelegt, dadurch verschieben sich die Lagen der weiteren Photolinien entsprechend.

Messparameter: Die XPS-Untersuchungen erfolgten mit einem Thermo-K-Alpha-System mit vorgeschalteter Argon-Glovebox für die Handhabung luftempfindlicher Proben. Parameter: Abnahmewinkel der Photoelektronen  $0^\circ$ , monochromatisierte  $Al_{K\alpha}$ -Anregung, Constant Analyser Energy-Mode (CAE) mit 150 eV Passenergie in Übersichtsspektren sowie 40 eV in energetisch hochaufgelösten Linienspektren, Analysenfläche: 0,40 mm  $\varnothing$ . Die Neutralisation von elektrisch nichtleitenden Proben erfolgt durch eine Kombination von niederenergetischen Elektronen und niederenergetischen Argon-Ionen.

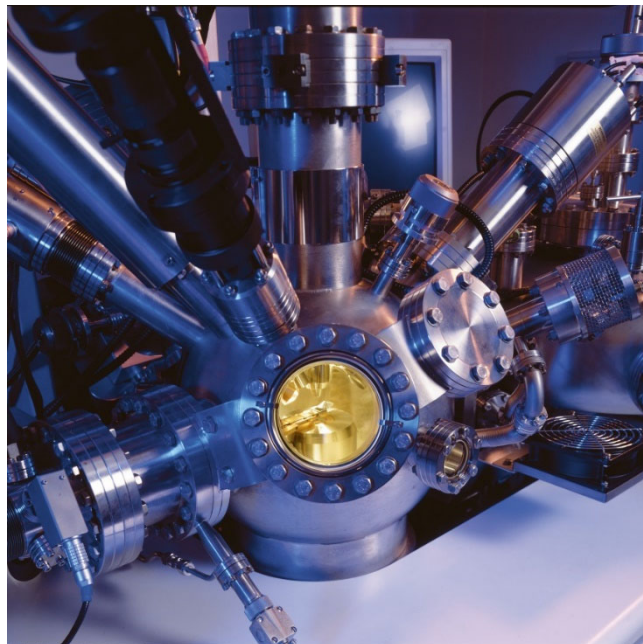


Abbildung 65: Photoelektronenspektroskopie (XPS).

### 6.1.2 Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (TOF-SIMS)

Messprinzip: Beim Beschuss eines Festkörpers mit Ionen hinreichender Energie werden von der Oberfläche u.a. positiv und negativ geladene Sekundärionen emittiert. Die Massenanalyse dieser Sekundärionen in einem Flugzeit-Massenspektrometer bildet die Grundlage des TOF-SIMS-Verfahrens. Mit der Sekundärionenmassenspektrometrie lassen sich prinzipiell alle Elemente nachweisen. Die hohe Nachweisempfindlichkeit des TOF-SIMS-Verfahrens ermöglicht selbst die Erfassung von Spurenelementen mit Konzentrationen bis in den ppm-Bereich. Aufgrund der ausgeprägten Abhängigkeit der Sekundärionenemission von der jeweiligen Umgebung des Emissionsortes (Matrixeffekt) erlauben die Intensitäten der Sekundärionensignale jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die quantitative Zusammensetzung der einzelnen Bestandteile. Im statischen

Betriebsmodus werden während einer Messung weniger als 10% der Atome der obersten Monolage abgetragen. Die Informationstiefe umfasst in diesem Modus die obersten ein bis drei Monolagen.

Messparameter: Die TOF-SIMS-Untersuchungen wurden mit einem TOF-SIMS IV-Gerät (Fa. ION TOF) durchgeführt. Parameter: Anregung mit einer 25 keV Bi-Flüssigmetallionenquelle, Bunched mode, Analysefläche 500 x 500 µm<sup>2</sup>, Ladungskompensation mit gepulster Elektronenquelle.

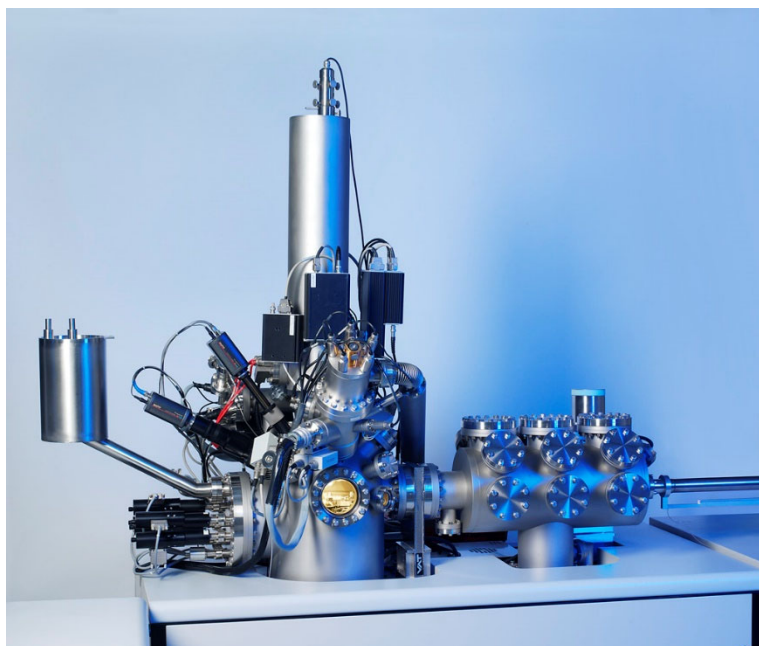


Abbildung 66: Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (TOF-SIMS).

### 6.1.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

Messprinzip (REM): Während des Mikroskopiervorgangs wird ein mit Hilfe von elektromagnetischen Spulen abgelenkter und gebündelter Elektronenstrahl zeilenweise über die Probenoberfläche gerastert. Dabei werden die Primärelektronen beim Auftreffen auf die Probenfläche abgebremst. Die freigesetzten Sekundärelektronen liefern durch ihren Intensitätskontrast in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur eine Darstellung der Probenoberfläche mit hoher Tiefenschärfe, während die rückgestreuten Elektronen ein Abbild des Materialkontrasts der Probe liefern. Zusätzlich kann mit Hilfe der EDX-Analyse (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) die lokale Elementzusammensetzung der Probe untersucht werden. Besonders strahlsensitive Materialien (Polymere, biologische Proben) können des Weiteren unter Kryo-Bedingungen untersucht werden. Dies beinhaltet das Schockgefrieren von Proben in unterkühltem flüssigem Stickstoff bei -210°C, Vakuumtransfer in eine Präparationskammer, ggf. Brechen der Probe, Besputtern mit Platin und Transfer auf einen speziellen Kryo-Tisch in der REM-Kammer. Während der Bearbeitung der Probe in der Präparations- sowie der Untersuchung in der REM-Kammer wird die Probe bei einer Temperatur von etwa -130°C (variabel) gehalten. Zusätzlich ist es möglich,

die Probe definiert in der Präparations- und REM-Kammer aufzuheizen, um z.B. Wasser von den Bruchflächen zu sublimieren.

Messparameter (REM): Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen werden mit einem Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (FESEM) der Marke FEI Helios 600 (DualBeam) durchgeführt. Die spezifizierte Auflösung beträgt 0.9nm bei 15kV bei optimalem Arbeitsabstand bzw. 1nm bei 15kV im Koinzidenzpunkt. Die Aufnahmen der Probenoberflächen können bei einer Beschleunigungsspannung von 0.35-30kV in einem Arbeitsabstand von 1-10 mm erzeugt werden. Als Detektoren für die Sekundär- oder die Rückstreuielektronen stehen ein Everhardt-Thornley- oder ein InLense- und für STEM-Untersuchungen (Scanning Transmission Electron Microscopy) ein Hellfeld-, Dunkelfeld- und 12-Segment HAADF-Detektor (high-angle annular dark field) zur Auswahl. Für Kryo-REM-Untersuchungen steht ein Quorum PP2000T als Präparationssystem zur Verfügung.



Abbildung 67: Rasterelektronenmikroskopie (REM) / Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX).

Messprinzip (EDX): Bei der Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit der Probe kann ein Teil der Energie des Elektronenstrahls an die Elektronen des Materials abgegeben werden. Dadurch können diese Elektronen ausreichend Energie erhalten, um die bindende Wirkung des Atomkerns zu überwinden und ihre Schale als Sekundärelektronen zu verlassen (Photoelektrischer Effekt). Die dabei entstehenden hochenergetischen Ionen relaxieren, indem die Leerstelle durch Übergang eines Elektrons aus einer äußeren Schale unter Aussendung eines Röntgenquants gefüllt wird. Dabei ist die Energie des Röntgenquants charakteristisch für das Element. Durch eine Analyse der Energieverteilung der Röntgenstrahlung kann so die lokale Elementzusammensetzung der Probe für alle Elemente ab Bor halbquantitativ bestimmt werden, wobei die Methode

besonders für schwerere Elemente geeignet ist (Sauerstoff aufwärts). Die Nachweisempfindlichkeit bei der Elektronenstrahlmikroanalyse ist von verschiedenen Parametern abhängig, z.B. Beschleunigungsspannung des REMs, Oberflächentopologie der Probe und Ordnungszahl und Verteilung des nachzuweisenden Elements in dem Anregungsvolumen. Für glatte Probenoberflächen und typische Werte ( $10\text{kV} \leq U_B \leq 20\text{kV}$  und  $Z > 8$ ) liegt die Nachweisempfindlichkeit aber im Bereich von 0.1-0.3wt%. Für einen sicheren Nachweis eines Elementes sollte zusätzlich das gemessene wt% mindestens dreimal so groß sein wie das wt% Sigma.

Messparameter (EDX): Oxford X-Max80 Siliziumdriftdetektor (SDD) mit ATW2-Fenster und einer Energieauflösung von bis zu 129eV; Detektionswinkel des EDX Detektors  $35^\circ$ . Die räumliche Auflösung für die Analyse ist stark abhängig von der gewählten Beschleunigungsspannung im Rasterelektronenmikroskop und der jeweiligen Materialzusammensetzung der Probe. In der Regel liegt sie aber im Bereich einiger Mikrometer.

## **6.2 Analyse des Einflusses der Lötprozesse auf die chemische Struktur der Lotpasten**

Um den Einfluss des Lötvorgangs auf die chemische Zusammensetzung der Lotpasten bewerten zu können, wurden in einem ersten Schritt die Pasten im Ausgangszustand vor dem Löten betrachtet. Dazu wurde zunächst die quantitative chemische Elementzusammensetzung der Lotpasten mittels XPS analysiert. Die einzelnen Lotpasten wurden in der Weise für die XPS-Analysen präpariert, dass sie jeweils mit einer sauberen Skalpell-Klinge auf einem Probenträger verstrichen wurden. Von jeder Lotpaste wurden dann zwei Proben analysiert, um ein Mindestmaß an statistischer Aussagekraft gewährleisten zu können und somit zumindest ansatzweise die Homogenität der jeweiligen Materialien beurteilen zu können.

Die Ergebnisse der XPS-Analysen an den zehn untersuchten Lotpasten sind in Form eines Balkendiagramms in Abbildung 68 dargestellt. Den XPS-Resultaten zufolge bestehen die Oberflächen der Lotpasten zu über 80 Atomprozent aus Kohlenstoff, der Rest wird im Wesentlichen von Sauerstoff und zum Teil von Stickstoff bestimmt. Die metallischen Anteile der Lotpaste, insbesondere das Zinn als Hauptbestandteil der Lotlegierungen, werden dagegen nur in relativ geringen Konzentrationen nahe der Nachweisgrenze des XPS-Verfahrens detektiert. Dieser hohe Anteil an Kohlenstoff und an Sauerstoff in den XPS-Spektren ist der hohen Oberflächenempfindlichkeit und der damit einhergehenden geringen Informationstiefe der XPS geschuldet. Diese Anteile an Kohlenwasserstoffen sind in erster Linie auf die Flussmittelbestandteile der Lotpasten zurückzuführen. Im Hinblick auf diese Flussmittel ist bei den XPS-Ergebnissen festzuhalten, dass im Rahmen der Nachweisempfindlichkeit von ca. 0,1 at% bei keiner Probe Halogene detektiert worden sind.

Bei der Betrachtung der Elementkonzentrationen in Abbildung 68 zeigt sich, dass die beiden unterschiedlichen Analysepositionen jeweils einer Lotpaste für alle untersuchten Proben nahezu identische Zusammensetzungen aufweisen. Daraus lässt sich auf eine relativ homogene chemische Zusammensetzung der analysierten Pasten schließen. Zwischen den verschiedenen Lotpasten sind dagegen sehr wohl Unterschiede zwischen den chemischen Strukturen festzustellen.

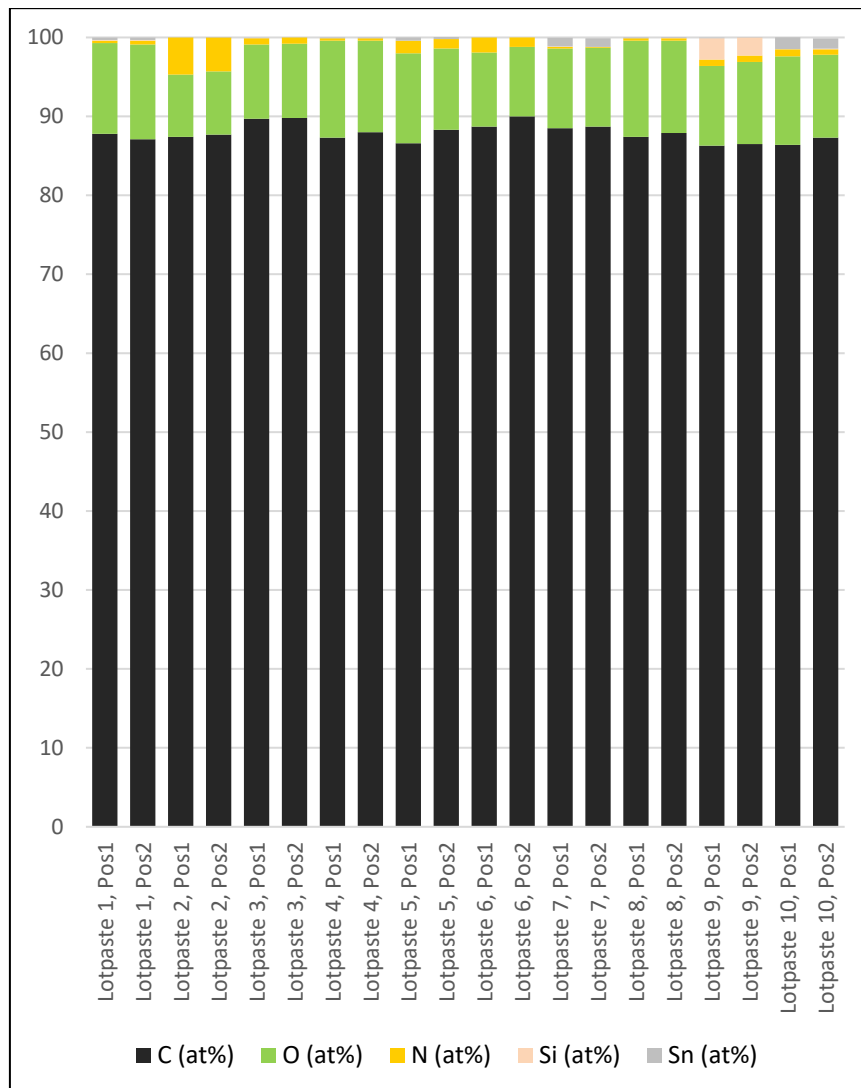


Abbildung 68: XPS-Analysen: Chemische Zusammensetzungen der Lotpasten im Ausgangszustand vor dem Lötprozess.

Gemäß den Resultaten der XPS-Analysen liegt die Konzentration an Halogenen für alle Lotpasten im Ausgangszustand bei unter 0,1 at%, eine weitere Differenzierung der Proben hinsichtlich der Halogenbestandteile ist aufgrund der Nachweisgrenze mittels XPS daher nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die Lotpasten zusätzlich auch mit der Methode TOF-SIMS untersucht. Bei der TOF-SIMS handelt es sich zwar um ein qualitatives Verfahren, allerdings ist sie wegen der höheren Nachweisempfindlichkeit speziell zur Detektion von Spurensignalen gut geeignet. Speziell für Halogene liegt die Nachweisgrenze der TOF-SIMS in niedrigen ppm-Bereich. Auch wenn die TOF-SIMS keine quantitativen Elementkonzentrationen liefern kann, ist es dennoch möglich, aus den Spektren zumindest semiquantitative Informationen zu erhalten, anhand derer sich die verschiedenen Lotpasten vergleichen lassen. Dazu werden die Sekundärionensignale auf eine geeignete Weise normiert, häufig einfach auf die Gesamtzählrate des jeweiligen Spektrums. Aus einer solchen Signalnormierung ergibt sich für die Lotpasten im Ausgangszustand die in Abbildung 69 aufgelistete Intensitätsverteilung von Halogenen.



Paste	Fluor	Chlor	Brom	J-STD-004b	Din EN 61190-1-1	Pulvertyp
1	niedrig	<i>mittel</i>	-	RELO	RELO	T5
2	niedrig	<b>erhöht</b>	niedrig	<b>REL1</b>	<b>REL1</b>	T4
3	niedrig	-	-	RELO	RELO	T4
4	niedrig	-	-	RELO	RELO	T4
5	niedrig	<i>mittel</i>	<b>hoch</b>	ROLO	<b>ROL1</b>	T5
6	<b>sehr hoch</b>	niedrig*	sehr niedrig	ROLO	ROLO	T4
7	<i>mittel</i>	<b>hoch</b>	<i>mittel</i>	<b>REL1</b>	<b>REL1</b>	T4
8	niedrig	sehr niedrig	niedrig	RELO	<b>REL1</b>	T4
9	niedrig	-	-	RELO	RELO	T4
10	Niedrig	<i>mittel</i>	<b>mittel</b>	ROLO	<b>ROL1</b>	T4

Abbildung 69: TOF-SIMS-Analysen: Relative Signalintensitäten der Elemente Fluor, Chlor und Brom der Lotpasten im Ausgangszustand vor dem Lötprozess.

In allen Lotpasten wird mit TOF-SIMS das Element Fluor detektiert, in den meisten Fällen allerdings nur in relativ geringen Intensitäten. Höhere Fluor-Gehalte finden sich nur in den Pasten 7 und 6. Chlor und Brom wurden zumindest in einigen Lotpasten nachgewiesen, mit zum Teil deutlichen Unterschieden in den relativen Signalintensitäten. Bei der Bewertung dieser Halogen-Signale in den TOF-SIMS-Spektren ist allerdings zu berücksichtigen, dass selbst sehr hohe Intensitäten quantitativ unterhalb der Nachweisgrenze der XPS von etwa 0,1 at% liegen.

Nach den Lotpasten im Ausgangszustand wurden in einem nächsten Schritt die entsprechenden chemischen Zusammensetzungen nach den beiden ausgewählten Lötprozessen betrachtet. Abbildung 70 zeigt zunächst die mittels XPS bestimmten Elementkonzentrationen nach dem „kalten“ Lötprozess. Hier sind sowohl qualitativ als auch quantitativ deutliche Unterschiede im Vergleich zum Ausgangszustand zu beobachten. So fällt zunächst einmal auf, dass die Zusammensetzungen der beiden Analysepositionen jeweils einer Lotpaste sich in einigen Fällen signifikant unterscheiden. Dies lässt prinzipiell auf eine inhomogenere Oberflächensammensetzung nach dem „kalten“ Lötprozess schließen. Zudem lässt sich anhand von Abbildung 70 feststellen, dass die Lotoberflächen nach diesem Lötprozess einen geringeren Kohlenstoff-Gehalt aufweisen als im Ausgangszustand, dementsprechend werden hier deutlich höhere Konzentrationen der Lotlegierung nachgewiesen.

Im Gegensatz zu der Situation im Ausgangszustand werden, wie in Abbildung 70 ersichtlich, zumindest bei einigen Lotpasten nach dem kalten Lötprozess auch die Halogene Fluor und Brom detektiert. Die höhere Inhomogenität der Oberflächensammensetzungen nach diesem kalten Lötprozess führt offenbar auch in einigen Fällen zu Anreicherungen von halogenhaltigen Bestandteilen an der Oberfläche.

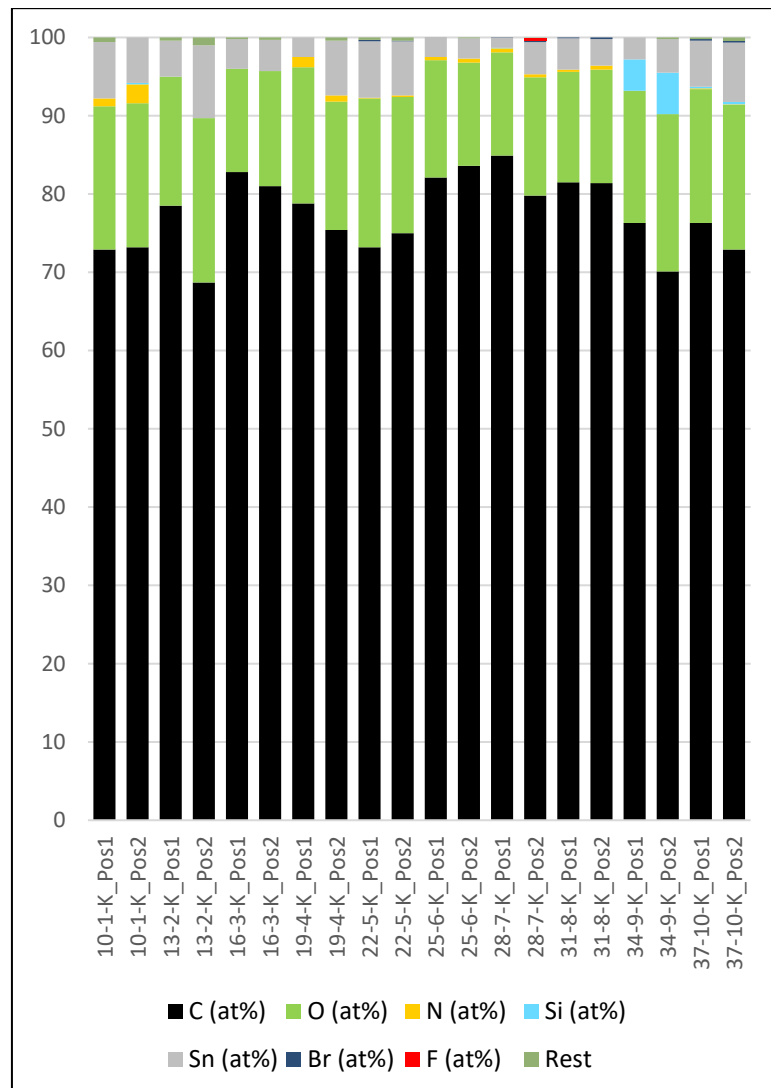


Abbildung 70: XPS-Analysen: Chemische Zusammensetzungen der Lotpasten nach dem „kalten“ Lötprozess.

Im Vergleich dazu spiegelt Abbildung 71 die Situation nach dem „heißen“ Lötprozess wieder. Hier zeigen sich signifikante Unterschiede zum beschriebenen „kalten“ Prozess. Zum einen weisen die beiden unterschiedlichen Analysepositionen der einzelnen Proben in den meisten der analysierten Fälle jeweils sehr ähnliche Elementzusammensetzungen auf. Zum anderen ist festzustellen, dass in keiner der untersuchten Lotpasten nach dem „heißen“ Lötprozess Halogene detektiert werden. Die Konzentration der in den Materialien enthaltenen Halogene liegt damit, genau wie im Ausgangszustand, wieder unterhalb der XPS-Nachweisgrenze von etwa 0,1 at%.

Im Mittel weisen die Lotpasten nach dem „heißen“ Lötprozess auch wieder höhere Kohlenstoffkonzentrationen als nach dem „kalten“ Löten auf, wenn auch nicht ganz auf dem Niveau des Ausgangszustands. Insgesamt betrachtet lassen sich die Ergebnisse der XPS-Analysen dahingehend interpretieren, dass der „heiße“ Lötprozess zu einer deutlich homogeneren Verteilung der Flussmittelbelegung auf den Oberflächen der Lotlegierungen führt, sowohl hinsichtlich der lateralen Verteilung der Flussmittel als auch in Bezug auf mögliche Anreicherungseffekte von halogenhaltigen Bestandteilen in der Tiefe.

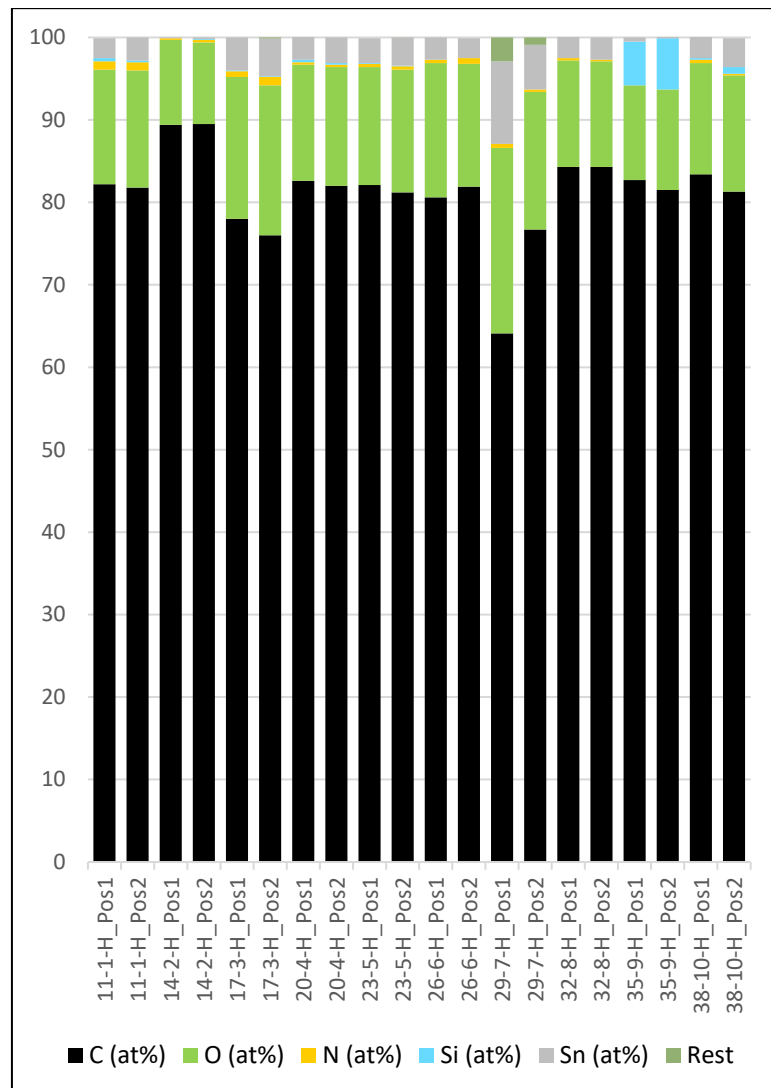


Abbildung 71: XPS-Analysen: Chemische Zusammensetzungen der Lotpasten nach dem „heißen“ Lötprozess.

### 6.3 Untersuchung der chemischen Struktur der Flussmittel in Abhängigkeit der Lötprozesse

Die XPS-Analysen im vorangegangenen Abschnitt liefern umfassende Erkenntnisse insbesondere über die räumliche Verteilung der Flussmittelanteile auf den Lotlegierungen nach den beiden betrachteten Lötprozessen im Vergleich zum Ausgangszustand vor dem Löten. Diese Analysen können allerdings keine detaillierten Informationen über mögliche Änderungen der chemischen Struktur der jeweiligen Flussmittel durch den Lötprozess liefern. Aus diesem Grund wurden die XPS-Untersuchungen ergänzt um TOF-SIMS-Analysen, die schwerpunktmäßig Aussagen über die molekulare Struktur der jeweiligen Proben erlauben.

TOF-SIMS-Spektren liefern Informationen, die in mancher Hinsicht deutlich über die Ergebnisse von XPS-Analysen hinausgehen. Abbildung 72 zeigt beispielhaft ein TOF-SIMS-Spektrum von Lotpaste 3 in der positiven Sekundärionenpolarität. Das Spektrum erstreckt sich über einen Massenbereich bis etwa zu Masse 800. Aufgrund der hohen Massenauflösung lassen sich viele Nominalmassen, die im Übersichtsspektrum in Abbildung 72 als jeweils eine Linie erscheinen, in

mehrere Signale trennen. Wie man an diesem Beispielspektrum erkennen kann, bedeutet dies, dass die TOF-SIMS-Spektren der Lotpasten jeweils mehrere hundert relevante Sekundärionen-signale aufweisen, die es auszuwerten gilt. Eine manuelle Auswertung dieser TOF-SIMS-Spektren von 30 Proben (10 Lotpasten jeweils einmal im Ausgangszustand und einmal nach „kaltem“ sowie nach „heißem“ Lötprozess) stößt daher schnell an Grenzen. Eine systematische Auswertung dieser Messdaten erfordert daher statistische Verfahren, die in der Lage sind, mit solchen umfangreichen Datenmengen umzugehen.

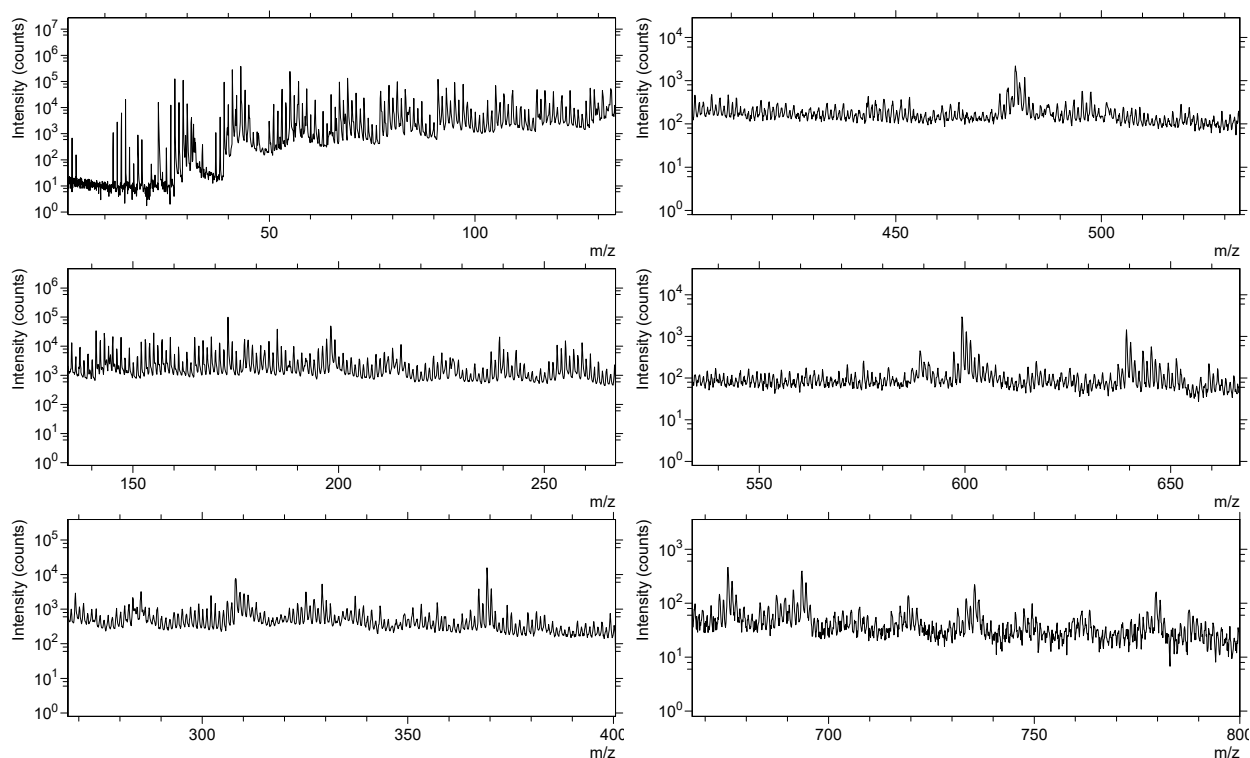


Abbildung 72: TOF-SIMS-Spektrum (positive Sekundärionenpolarität) von Lotpaste 3 vor dem Lötprozess in logarithmischer Darstellung.

Als ein solches Verfahren der multivariaten Statistik hat sich bei der Auswertung von TOF-SIMS-Daten die Hauptkomponentenanalyse etabliert. Ziel dieser Hauptkomponentenanalyse ist es allgemein, höherdimensionale Datensysteme in solche Systeme zu überführen, in denen ein Großteil der in den Daten enthaltenen Informationen durch einige wenige Hauptkomponenten dargestellt werden kann. Auf diese Weise lassen sich redundante Informationen eliminieren und die relevanten Unterschiede deutlicher herausstellen.

Ein Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse für die Spektren der positiven Sekundärionenpolarität der 30 verschiedenen Lotpasten-Proben ist in Abbildung 73 dargestellt. Diese Graphik zeigt gewissermaßen die Information, welche die einzelnen Hauptkomponenten repräsentieren. In diesem Fall zeigt sich, dass die ersten drei Hauptkomponenten bereits mehr als 50% der in den TOF-SIMS-Spektren erhaltenen Informationen darstellen können, was für eine Hauptkomponentenanalyse bereits ein sehr gutes Ergebnis darstellt. Alle weiteren Hauptkomponenten tragen im Vergleich dazu deutlich geringer zur gesamten Information bei.

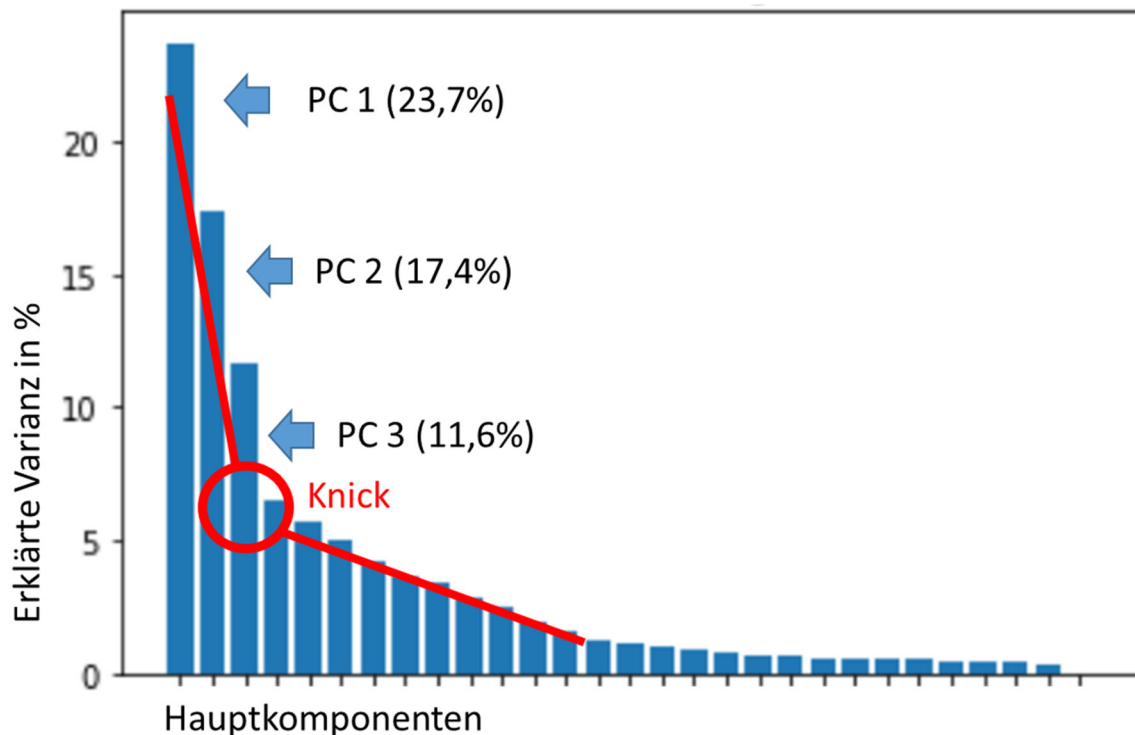


Abbildung 73: Hauptkomponentenanalyse: Auswertung der TOF-SIMS-Spektren der Lotpasten im Ausgangszustand und nach „kaltem „und „heißen“ Lötprozess (positive Sekundärionenpolarität).

Die Hauptkomponentenanalyse hat in diesem Fall das hochdimensionale Datensystem der 30 TOF-SIMS-Spektren auf drei Dimensionen reduziert, mit denen sich ein Großteil der Varianz der TOF-SIMS-Daten darstellen lässt. Im nächsten Schritt ist es dann wichtig, zu sehen, in welcher Weise sich die TOF-SIMS-Spektren als Funktion dieser drei Hauptkomponenten abbilden lassen. Abbildung 74 zeigt daher die positiven TOF-SIMS-Spektren in einem Koordinatenraum, der von den ersten beiden Hauptkomponenten aufgespannt wird. Diese Darstellung zeigt, dass sich die Proben auf zwei Bereiche aufteilen lassen. Auf der rechten Seite finden sich die ersten zehn Proben wieder. Diese repräsentieren die Lotpasten im Ausgangszustand vor dem Löten. Auf der im Bild linken Seite dagegen liegen die Proben 11 bis 30. Diese entsprechen den Lotpasten nach dem „kalten“ und nach dem „heißen“ Lötprozess. Damit lässt sich dieser Darstellung entnehmen, dass bereits die erste Hauptkomponente ausreicht, um die Lotpasten im Ausgangszustand von den gelöteten Proben zu separieren. Abbildung 74 zeigt jedoch auch, dass eine weitere Unterscheidung zwischen den Proben aus dem „kalten“ Lötprozess (Spektren 11-20) und denen aus dem „heißen“ Prozess (Spektren 21-30) sich weder durch die erste noch durch die zweite Hauptkomponente voneinander trennen lassen. Die zugehörigen Punkte in der Graphik liegen weitgehend unstrukturiert im linken Bereich.

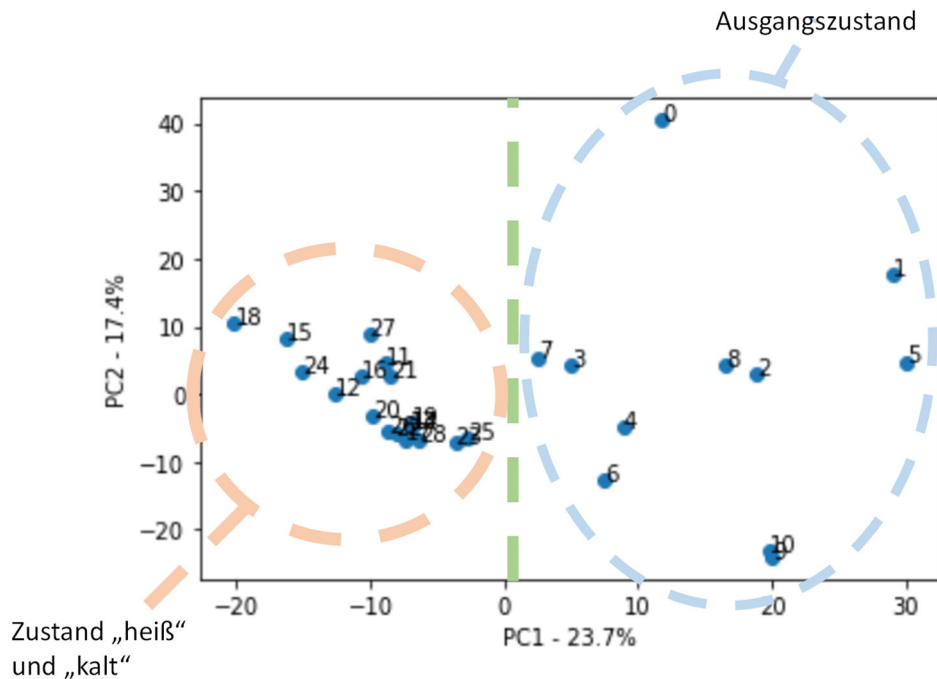


Abbildung 74: Hauptkomponentenanalyse: Darstellung der TOF-SIMS-Spektren (positive Sekundärionenpolarität) der Lotpasten in Abhängigkeit von der ersten und der zweiten Hauptkomponente.

Um zusätzlich zu den ersten beiden Hauptkomponenten auch den Einfluss der dritten Hauptkomponente bewerten zu können, sind in Abbildung 75 die positiven TOF-SIMS-Spektren im Koordinatensystem aus der zweiten und der dritten Hauptkomponente dargestellt. In diesem Bild liegen die meisten Punkte in dem markierten inneren Bereich, nur wenige finden sich außerhalb dessen in den Randbereichen. Bei genauerer Betrachtung fällt hier auf, dass sich die Spektren der gelöteten Proben (Proben 11-30) ausschließlich innerhalb des inneren Bereiches befinden. In den Randbereichen lassen sich nur die Spektren der Lotpasten vor dem Lötprozess (Proben 1-10) beobachten, allerdings liegen einige dieser ungelöteten Zustände ebenfalls im inneren Bereich. Aus dieser Darstellung lassen sich daher zwei Folgerungen ableiten. Zum einen ist es auch mit Hilfe der dritten Hauptkomponente nicht möglich, die Proben der beiden unterschiedlichen Lötprozesse zu separieren. Zum anderen führen die beiden Lötprozesse, unabhängig von dem jeweiligen Lötprofil „kalt“ oder „heiß“ zu einer deutlichen Homogenität der Lotpasten und damit insbesondere auch der zugehörigen Flussmittel, die sich in dem relativ eng begrenzten Bereich in Abbildung 75 manifestiert. Die Verteilung der Lotpasten im Ausgangszustand auf den größeren Bereich dagegen lässt eher auf eine ausgeprägte Heterogenität der Materialien schließen.

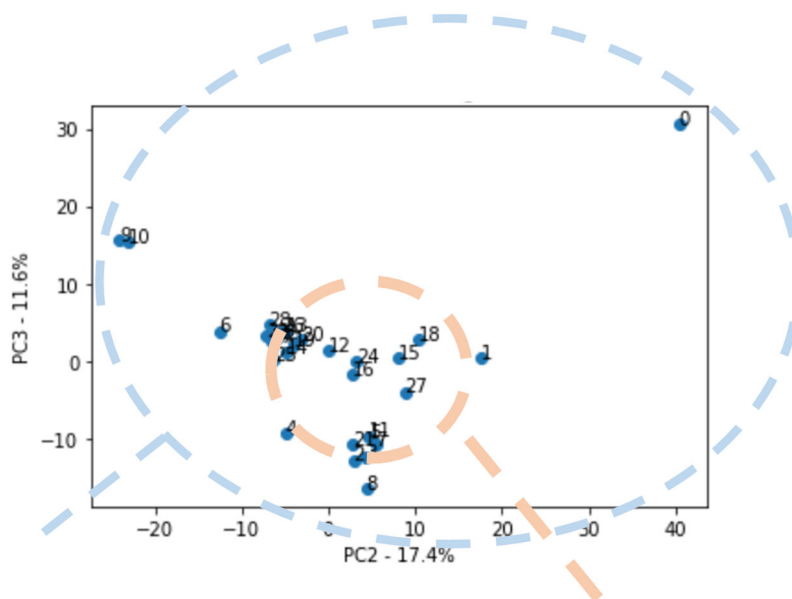


Abbildung 75: Hauptkomponentenanalyse: Darstellung der TOF-SIMS-Spektren (positive Sekundärionenpolarität) der Lotpasten in Abhängigkeit von der ersten und der zweiten Hauptkomponente.

Insgesamt betrachtet lassen sich die Resultate der Hauptkomponentenanalyse wie folgt zusammenfassen. Die ausgewerteten TOF-SIMS-Spektren erlauben eine eindeutige Trennung zwischen Lotpasten im Ausgangszustand einerseits und gelöteten Proben andererseits. Eine weitere Separation der Lotpasten hinsichtlich der beiden durchgeführten Lötprozesse „kalt“ und „heiß“ ist jedoch nicht möglich. Generell betrachtet weisen die TOF-SIMS-Spektren der Proben im Ausgangszustand eine signifikant höhere Intensitätsvarianz auf als die Lotpasten nach dem Lötprozess.

Diese Ergebnisse spiegeln zunächst einmal nur die rein formalen Resultate der statistischen Betrachtung durch die Hauptkomponentenanalyse wider. Im nächsten Schritt ist es daher essenziell, diese Ergebnisse im Hinblick auf deren chemische Aussage zu interpretieren. So lässt sich anhand der systematischen Auswertung der TOF-SIMS-Daten zum einen festhalten, dass der Lötprozess zu einer deutlichen chemischen Veränderung der Flussmittel auf der Oberfläche der Lotlegierungen führt. Diese chemische Veränderung ist zum anderen allerdings weitestgehend unabhängig von dem Temperaturprofil des Lötprozesses. Vielmehr bewirken die beiden Lötvorgänge eine Homogenisierung der chemischen Struktur der jeweiligen Flussmittel, d.h. die ursprünglichen chemischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Flussmitteln werden durch beide Lötprozesse in gleichem Maße in Richtung einer einheitlicheren chemischen Zusammensetzung verändert.

In der Kombination mit den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Abschnitt 6.2 bleibt jedoch auch festzuhalten, dass die beiden unterschiedlichen Lötprozesse sehr wohl Auswirkungen auf die laterale Verteilung der Flussmittel-Belegungen mit sich bringen, wobei der „heiße“ Prozess zu deutlich homogeneren räumlichen Verteilungen führt. Diese Verteilung aber zeigt sich in den TOF-SIMS-Spektren weitgehend unabhängig von den jeweiligen chemischen Strukturen.

## 6.4 Analysen an Testboards nach SIR-Test

Nachdem nun in den beiden vorangegangenen Abschnitten die Lotpasten im Ausgangszustand und nach den Lötprozessen hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzungen analysiert worden sind, soll im Folgenden untersucht werden, wie sich diese Materialien unter den Bedingungen des SIR-Tests auf die Struktur insbesondere im Spaltbereich unterhalb der Bauelemente auswirken. Dazu wurden an ausgewählten Testboards nach den SIR-Tests Bauelemente abgelöst und die darunterliegende Oberfläche der Testboards näher analysiert. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei auf mögliche Anzeichen von elektrochemischer Migration, die über Dendritbildung zum Ausfall der Baugruppen während des SIR-Tests führen können.

Die meisten Untersuchungen dieser Art wurden an Bauelementen des Typs R1206 durchgeführt. Abbildung 76 zeigt die Position dieser Bauelemente auf den Testboards, das Bauteil selbst in der Detailansicht in Abbildung 77 zu sehen. In Abbildung 78 schließlich ist die Oberfläche des Testboards unterhalb der Bauelemente R1206 zu sehen, nachdem diese von dem Board herunterpräpariert worden sind. Diese Situation unterhalb der Bauelemente soll im Folgenden näher beschrieben werden.

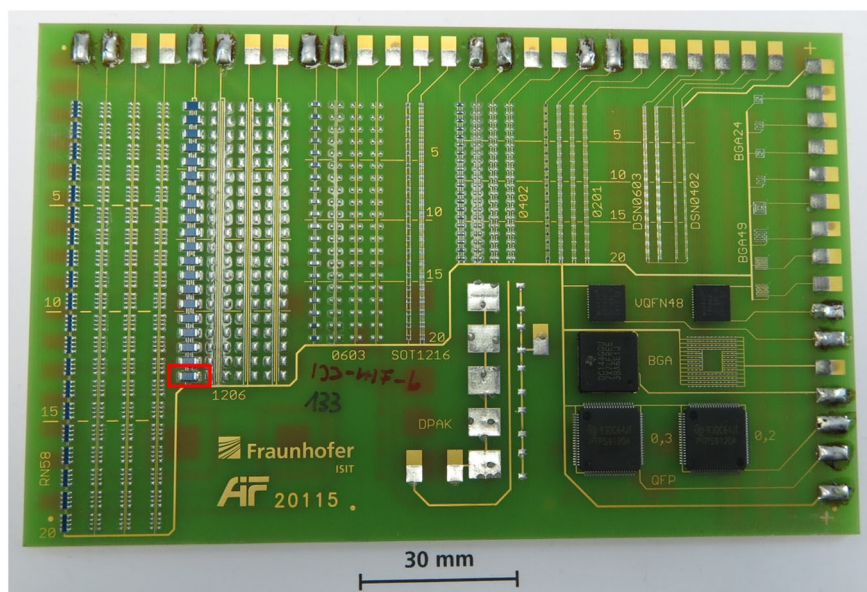


Abbildung 76: Bauelement R1206 auf Testboard 133-1F-k (Übersicht).



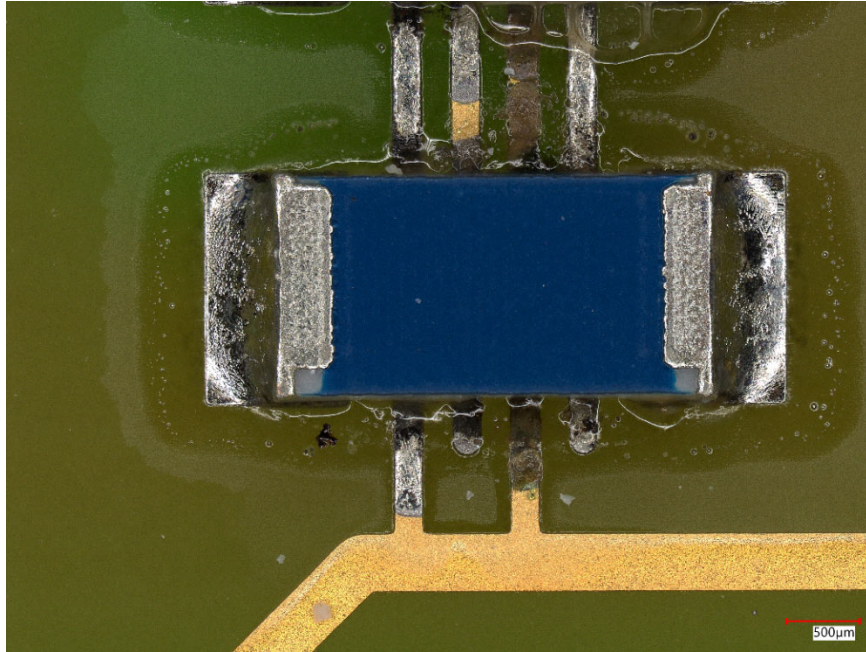


Abbildung 77: Bauelement R1206 auf Testboard 133-1-1F-k (Detailansicht).

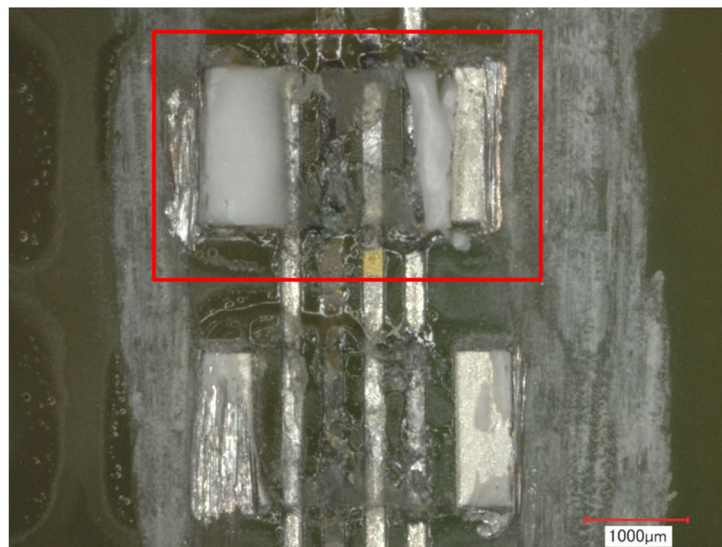


Abbildung 78: Testboard 133-1-1F-k nach Ablösung der Bauelemente R1206 (Detailansicht).

Diese freigelegte Fläche unterhalb der Bauelemente wurde zunächst mit dem REM abgebildet. Eine typische Struktur einer solchen Fläche ist in Abbildung 79 gezeigt. Diese Abbildung stellt ein Sekundärelektronenbild dar, das in erster Linie Informationen über die topographische Struktur der Board-Oberfläche liefert. In diesem Bild sind drei parallele, vertikal verlaufende, breite Linien zu erkennen. Bei diesen Strukturen handelt es sich um die Leiterbahnen, die unter den Bauelementen verlaufen. In dem Sekundärelektronenbild sind aber auch deutliche Beläge zu erkennen, die sich sowohl auf den Leiterbahnen als auch in den Zwischenräumen befinden. Bei diesen Belägen gilt es nun zum einen zu klären, aus welchem Material sie bestehen. Zum anderen stellt sich die Frage, ob sie auf den Lötprozess zurückzuführen sind oder auf elektrochemische Migrationseffekte, die durch die Bedingungen des SIR-Tests hervorgerufen sein könnten.

SE (ETD)

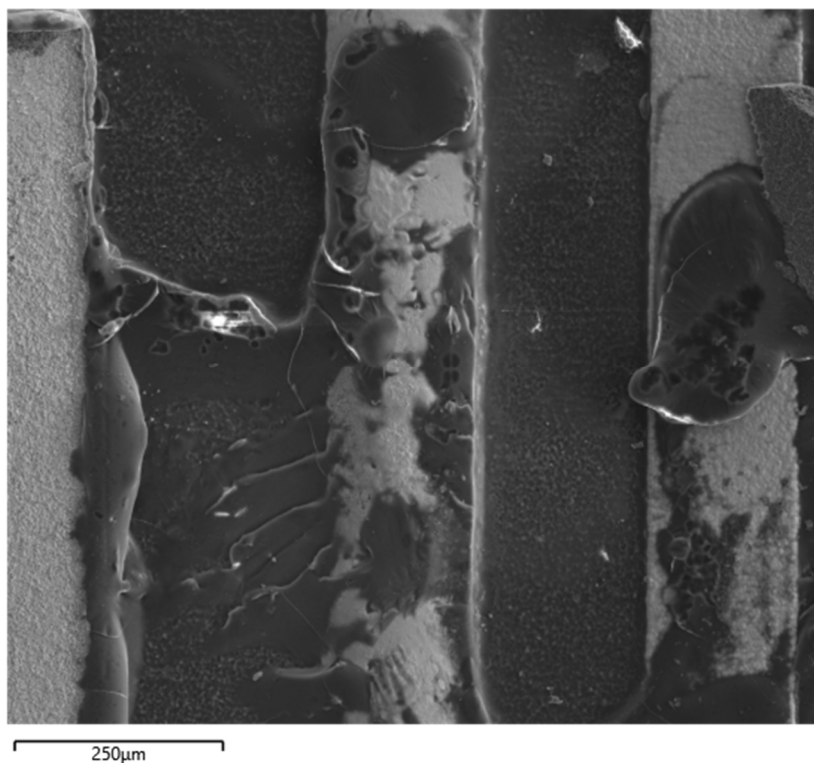


Abbildung 79: REM-Untersuchung: Sekundärelektronenbild der Testboard-Oberfläche nach Ablösung des Bauelements R1206.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde der in Abbildung 79 dargestellte Bereich im nächsten Schritt mittels ortsaufgelöster EDX analysiert. Die Verteilung der Elemente mit den höchsten Intensitäten im EDX-Spektrum sind in Abbildung 80 in Falschfarbenbildern gezeigt. Hierbei handelt es um die Elemente Kohlenstoff (links), Zinn (Mitte) und Nickel (rechts). Das Kohlenstoff-Signal zeigt eine relativ gleichmäßige Intensitätsverteilung sowohl auf als auch neben den Leiterbahnen, was für eine homogene Belegung der Oberfläche unterhalb des Bauelements spricht. Gemäß den Ergebnissen der parallel durchgeführten TOF-SIMS-Analysen lässt sich diese Kohlenstoff-Belegung größtenteils den Flussmittel-Rückständen zuordnen. Das Zinn-Signal weist insbesondere auf der mittleren Leiterbahn hohe Intensitätswerte auf, ist jedoch ebenfalls sowohl auf den anderen Leiterbahnen als auch in den Zwischenräumen zu finden, wenn auch zum Teil in deutlich geringerer Intensität. Diese Zinn-Anteile lassen sich auf die Lotlegierung zurückführen, von daher lässt sich die Verteilung des Zinn-Signals als Marker für die Migration des Lotes sehen. Das Nickel-Signal schließlich entstammt den Leiterbahnen. Wie in Abbildung 80 zu sehen ist, begrenzt sich die Verteilung des Nickels auch auf die Leiterbahnen. Auf dem Leiterplattenmaterial zwischen den Leiterbahnen wird praktisch kein Nickel detektiert. Auch zeigen die Randbereiche der Nickelverteilung relativ scharfe Konturen, es sind keine Anzeichen von Migrationseffekten in dem Nickel-Verteilungsbild zu erkennen. Auffällig ist jedoch die relativ geringe Intensität des Nickel-Signals auf der mittleren Leiterbahn. In Verbindung mit dem Bild der Zinn-Verteilung lässt sich folgern, dass diese Leiterbahn nahezu vollständig mit Anteilen der Lotlegierung bedeckt ist, die selbst wiederum von Flussmittelrückständen überdeckt werden.

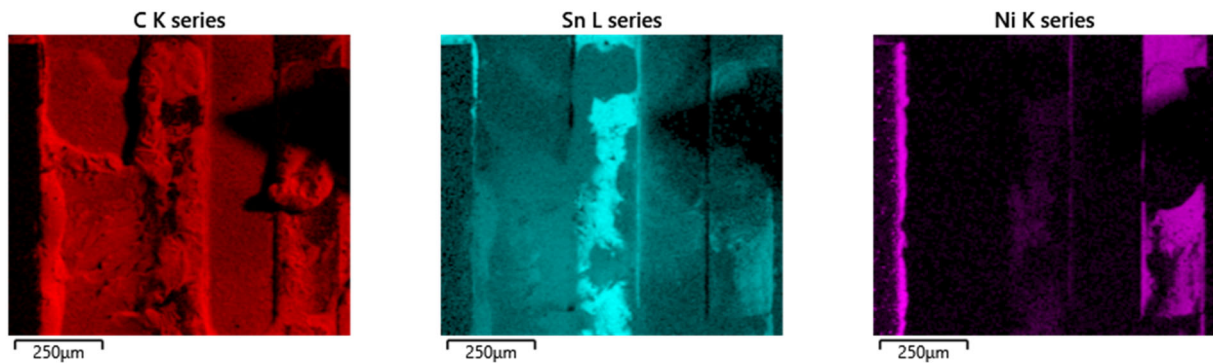


Abbildung 80: EDX-Analyse: Verteilung der Elemente Kohlenstoff (links), Zinn (Mitte) und Nickel (rechts) auf der Testboard-Oberfläche nach Ablösung des Bauelements R1206, Analyseposition entsprechend Sekundärelektronenbild in Abbildung 79.

Die EDX-Analysen liefern in diesem Beispiel keinerlei Hinweise auf eine nennenswerte elektrochemische Migration, die sich z.B. in einer Dendritenbildung zwischen den Leiterbahnen äußern würde. Analoge Untersuchungen wie hier beschrieben, wurden an einer Reihe weiterer Testboards durchgeführt, die Analysen lieferten dabei qualitativ ähnliche Ergebnisse.

Auch wenn bei den Untersuchungen der Boards nach den SIR-Tests praktisch keine Anzeichen für Dendritenbildung gefunden wurden, sind dennoch einige Proben während der Tests auffällig geworden. So zeigte z.B. das Testboard 134-1F-k frühzeitig verringerte Widerstandswerte. Um diesem Effekt auf den Grund zu gehen, wurden auch hier wieder Bauteile aus den entsprechenden Bereichen abgelöst und die darunterliegende Oberfläche des Testboards näher betrachtet. Abbildung 81 zeigt auf der linken Seite die lichtmikroskopische Übersicht der Board-Oberfläche unterhalb eines Bauelements R1206. Im markierten Bereich sind dabei auffällige Strukturen zu erkennen, die das elektrische Verhalten des Boards während des SIR-Tests erklären könnten. Die Detailvergrößerung im Bild rechts jedoch liefert auch hier wieder keine Hinweise auf mögliche Dendritenbildung. Vielmehr sieht es auch hier so aus, dass die Verteilung der Lotlegierung zu einem verringerten Widerstand zwischen den Leiterbahnen geführt hat. Abgesehen von der massiven Überdeckung mit dem Lot zeigen die Leiterbahnen selbst keinerlei Anzeichen von elektrochemischer Migration.

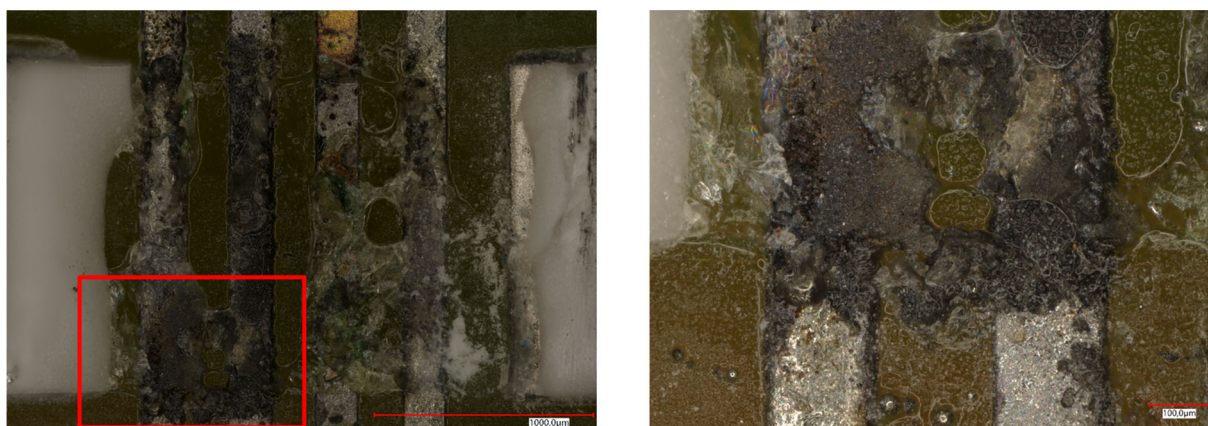


Abbildung 81: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 134-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206; Links: Übersicht; Rechts: Detailansicht.

Ähnliche Verhältnisse liegen auch bei dem Testboard 185-1F-k vor, bei dem sich ebenfalls Auffälligkeiten im SIR-Test zeigten. Die lichtmikroskopische Betrachtung in Abbildung 82 in der Übersichtsdarstellung links lassen auf den ersten Blick eine Schädigung der Leiterbahnen vermuten. Die Detailvergrößerung im Bild rechts zeigt jedoch, dass sich die vermeintlichen Auflösungserscheinungen an den Rändern der Leiterbahnen auch hier wieder auf eine partielle Belegung mit der Lotlegierung zurückführen lassen. Dendritenbildungen zwischen den Leiterbahnen können auch hier wieder ausgeschlossen werden.

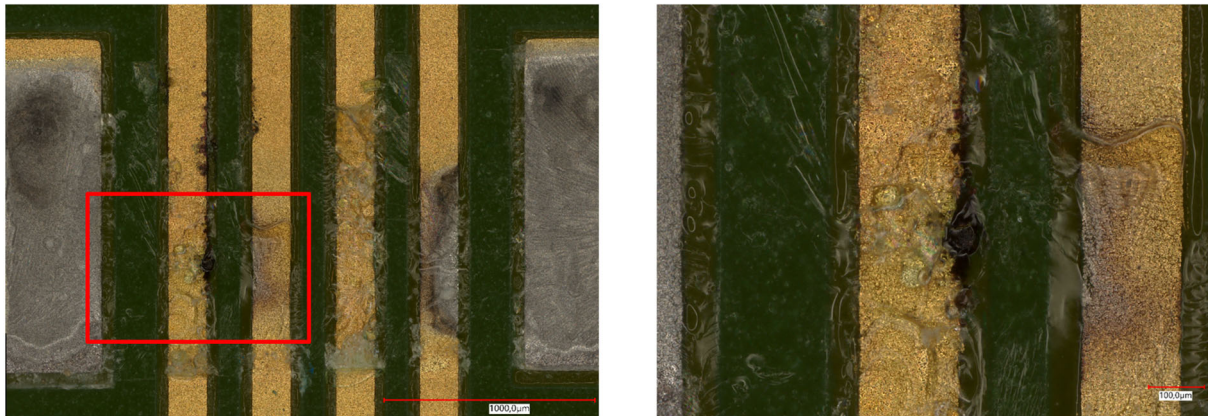


Abbildung 82: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 185-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206; Links: Übersicht; Rechts: Detailansicht.

Im SIR-Test zeigten die Testboards 185-1F-k und 187-1F-k deutliche Unterschiede, was insbesondere vor dem Hintergrund interessant ist, dass beide Boards mit gleichen Parametern gefertigt wurden. Zur Aufklärung der unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften wurden auch hier wieder jeweils eine Reihe Bauelemente R1206 von den Boards abgelöst und die darunterliegenden Flächen untersucht. Das Board 185-1F-k, das im SIR-Test keine Besonderheiten gezeigt hat, ist in einer lichtmikroskopischen Übersichtsaufnahme in Abbildung 83 dargestellt. In diesem Bild sind im Bereich der freigelegten Leiterbahnen keine größeren Auffälligkeiten festzustellen, es werden nur vereinzelte kleinere Auffälligkeiten beobachtet. Ganz anders sieht im Vergleich dazu die Situation beim Board 187-1F-k aus, das in gleicher Vergrößerung in Abbildung 84 zu sehen ist. Hier lassen sich auffallende Veränderungen insbesondere in den Flächen unterhalb der Bauelemente beobachten. Diese machen sich in Form von kleineren und größeren, dunkel erscheinenden, zum Teil kreisförmigen Strukturen bemerkbar.

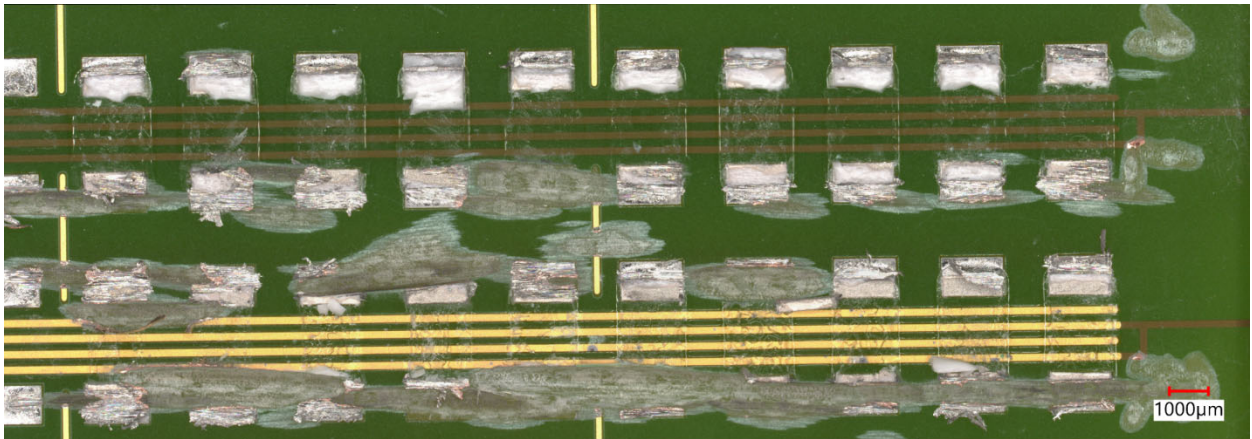


Abbildung 83: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 185-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206.

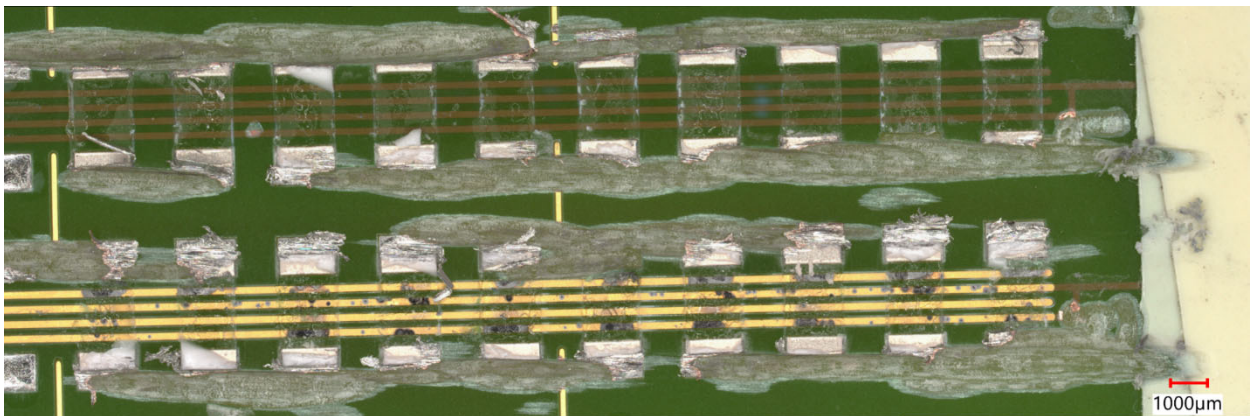


Abbildung 84: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206 (Übersicht).

Diese Auffälligkeiten sind in Abbildung 85 noch einmal für zwei verschiedene Positionen in höherer Vergrößerung dargestellt. Diese Detailansichten vermitteln zwar einen guten Eindruck von der Form und genauen Position der Auffälligkeiten auf den Leiterbahnen, allerdings lassen die mikroskopischen Bilder keine direkten Rückschlüsse auf deren Materialstruktur und Herkunft zu. Aus diesem Grund wurden an einigen dieser Proben in Ergänzung zu den lichtmikroskopischen Betrachtungen auch wieder Untersuchungen mittels REM und EDX durchgeführt.

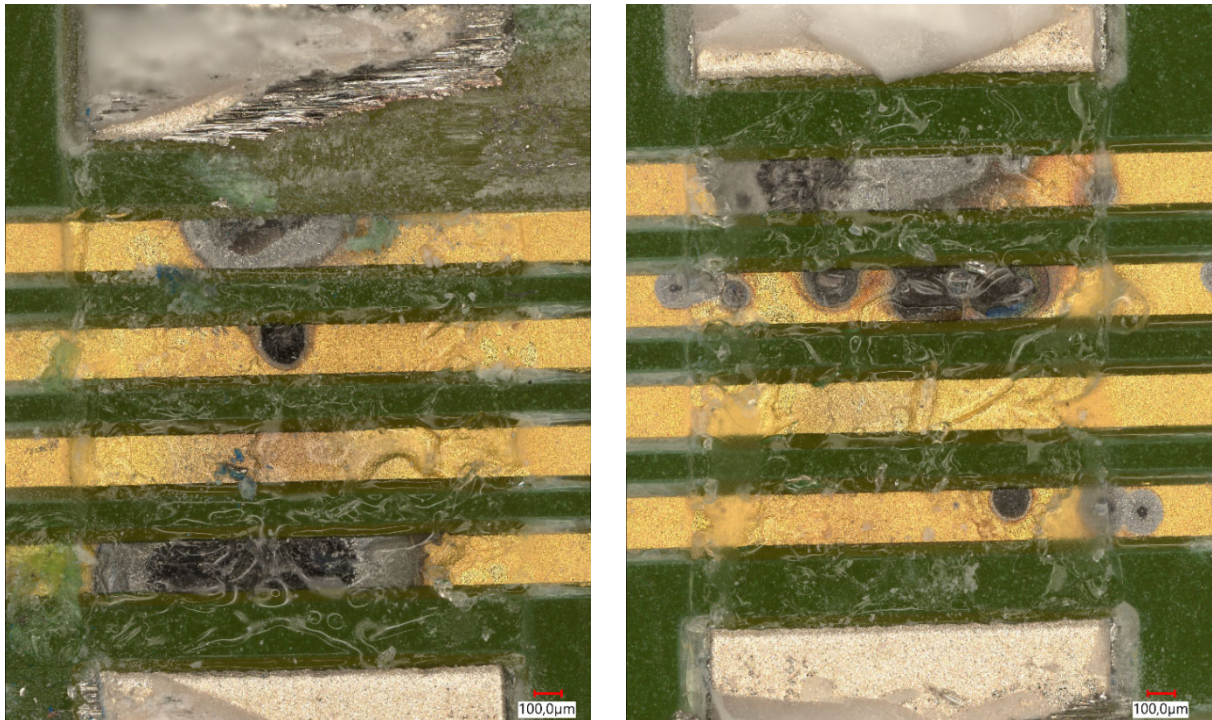


Abbildung 85: Lichtmikroskopische Untersuchung der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206 (Detailansichten).

In Abbildung 86 sind für einen auffälligen Bereich einmal zwei verschiedene REM-Bilder der gleichen Fläche einander gegenübergestellt. In der Abbildung links ist ein Sekundärelektronenbild des betrachteten Bereiches zu sehen. Dieser REM-Abbildungs-Modus liefert in erster Linie Informationen über die topographische Struktur der untersuchten Oberfläche. In diesem Fall ist von der kreisrunden Struktur, die sich unter dem Lichtmikroskop mitten auf der Leiterbahn gezeigt hat, nichts zu erkennen. Demnach handelt es sich bei diesen Auffälligkeiten weder um massive Beläge noch um nennenswerte Vertiefungen im Bereich der Leiterbahn. Zu erkennen sind hier allenfalls partikelförmige Spezies auf der Oberfläche, die allerdings nicht mit der lichtmikroskopisch sichtbaren Struktur korrelieren.

Ein gänzlich anderes Bild dieser Probenoberfläche ergibt sich bei Betrachtung des Rückstreu-elektronenbilds auf der rechten Seite von Abbildung 86. Anders als das Sekundärelektronenbild liefert dieser Abbildungs-Modus im Wesentlichen Informationen über den Materialkontrast und weniger über die Topographie. In diesem Rückstreu-elektronenbild hebt sich zum einen die Leiterbahn deutlich vom umgebenden Substratmaterial ab. Zum anderen ist in diesem Bild die Auffälligkeit als nahezu kreisförmige Struktur gut kontrastierbar. Auch wenn diese Auffälligkeit offenbar kaum einen Einfluss auf die topographische Struktur hat, zeigt sie doch einen relativ deutlichen Materialkontrast.

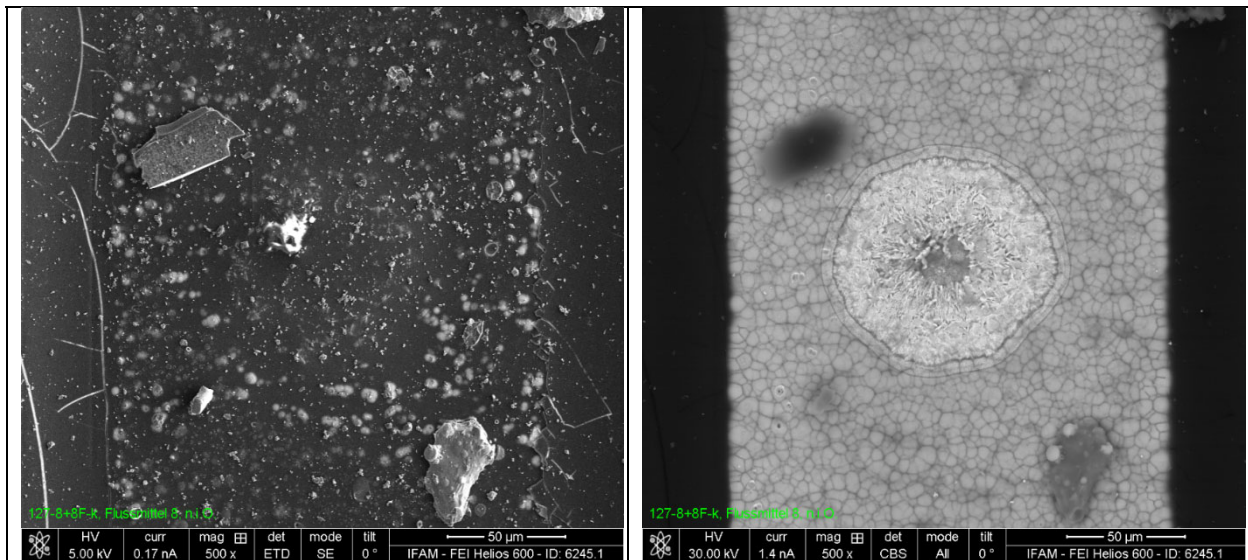


Abbildung 86: REM-Untersuchung der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206; links: Sekundärelektronen-Bild, rechts: Rücktreuelektronen-Bild.

Um den Materialkontrast näher zu charakterisieren, wurden an einer weiteren Auffälligkeit auch wieder kombinierte REM/EDX-Untersuchungen durchgeführt. Abbildung 87 zeigt das mit dem REM aufgenommene Sekundärelektronenbild, dass wieder die topographische Struktur abbildet. In dieser Aufnahme verläuft die Leiterbahn vertikal mittig durch das Bild. Ähnlich wie in Abbildung 86 lassen sich auch hier die auffälligen Bereiche auf der Leiterbahn, die lichtmikroskopisch, aber auch zum Teil mit dem bloßen Auge gut zu erkennen sind, im Sekundärelektronenbild nicht kontrastieren. Stattdessen lassen sich auf dem Basismaterial neben der Leiterbahn deutliche Rissstrukturen beobachten.

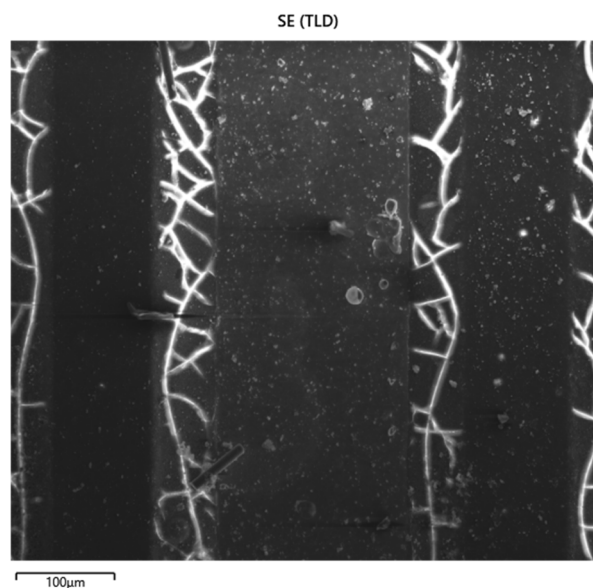


Abbildung 87: REM-Untersuchung: Sekundärelektronen-Bild von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206.

Der in Abbildung 87 gezeigte Probenausschnitt wurde dann analog wie oben beschrieben auch wieder mittels orts aufgelöster EDX analysiert. Auch hier liefern die Elemente Kohlenstoff, Zinn und Nickel wieder die höchsten Konzentrationswerte. Die zugehörigen Elementverteilungsbilder sind in Abbildung 88 wieder in Form von Falschfarbenbildern dargestellt.

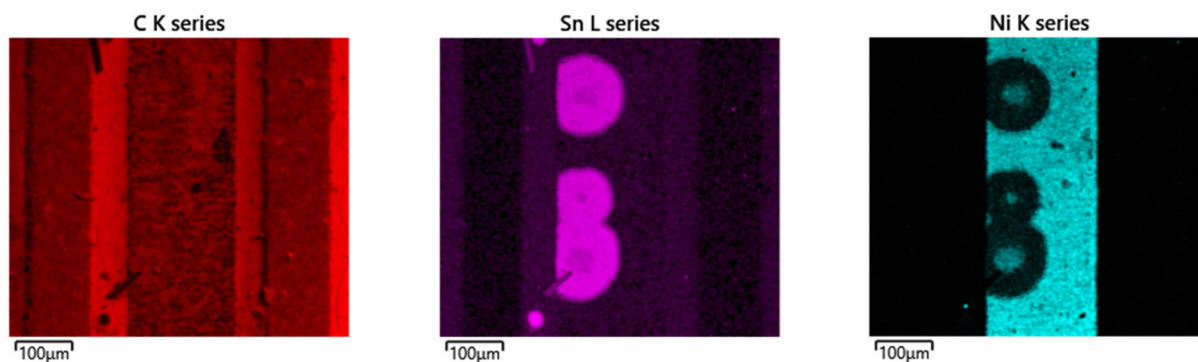


Abbildung 88: EDX-Analyse: Verteilung der Elemente Kohlenstoff (links), Zinn (Mitte) und Nickel (rechts) auf der Oberfläche von Testboard 187-1F-k nach Ablösung des Bauelements R1206, Analyseposition entsprechend Sekundärelektronenbild in Abbildung 87.

Das Kohlenstoff-Signal ist gemäß den EDX-Resultaten näherungsweise homogen über die Oberfläche verteilt. Eine kontrastreichere Struktur ist dagegen bei der Verteilung der metallischen Komponenten Zinn und Nickel zu beobachten. Im Bereich der Leiterbahn bilden diese beiden Elemente inverse Strukturen. Im Bereich der Auffälligkeiten finden sich intensive, nahezu kreisförmig verteilte Zinn-Signale. Umgekehrt geht in diesen Bereichen die Intensität des Nickel-Signals im Vergleich zur direkten Umgebung auf der Leiterbahn massiv zurück. In den Zentren dieser runden Auffälligkeiten zeigt sich wiederum ein gegensätzliches Bild, hier steigt die Nickel-Konzentration zu Lasten des Zinn-Gehalts leicht an. Den REM- und EDX-Untersuchungen zufolge lassen sich die lichtmikroskopisch beobachteten Auffälligkeiten als dünne Zinn-Beläge beschreiben, die sich im Wesentlichen auf den Leiterbahnen, zum Teil aber auch, wie in Abbildung 88 zu sehen, in den Zwischenräumen finden.

Grundsätzlich lässt sich aber auch hier festhalten, dass es keinerlei Anzeichen für eine elektrochemische Migration der Leiterbahn-Bestandteile gibt, die sich in einer beginnenden Dendritenbildung in den Leiterbahn-Zwischenräumen äußert.



## 7 AP4: Modellbildung zu Schädigungsmechanismen

### 7.1 Methodik

Aus der Korrelation der Ergebnisse der elektrischen Tests in AP2 und der chemischen Analysen in AP3 soll nun in Arbeitspaket 4 ein Modell entwickelt werden, welches in der Lage ist, die Einflüsse der untersuchten Fertigungsvariablen auf die Alterungseigenschaften der Teststrukturen zu beschreiben. Die prinzipielle Vorgehensweise dazu ist schematisch in Abbildung 89 dargestellt. In einer ersten Testreihe wird jeweils nur einer der zu betrachtenden Fertigungsparameter variiert. Mit Hilfe der SIR-Tests wird dann bewertet, wie sich diese Variation auf die elektrischen Eigenschaften der Teststrukturen auswirkt. Parallel dazu wird mit analytischen Verfahren untersucht, wie die Änderung des jeweiligen Fertigungsparameters die chemische Zusammensetzung insbesondere der Lotlegierung beeinflusst. Auf dieser Basis wird dann anhand einer Korrelation dieser beiden Untersuchungsbereiche eine erste, grobe Modellvorstellung zum Alterungsverhalten entwickelt. In Abhängigkeit von den Ergebnissen der ersten Testreihe werden dann im zweiten Schritt weitere Fertigungsparameter variiert und die elektrischen Eigenschaften sowie die chemischen Strukturen der Test-Baugruppen erneut untersucht. Aus der Korrelation dieser zusätzlichen Resultate kann dann das ursprüngliche Modell weiter detailliert werden. Nach mehrerer solcher Iterationsschritte kommt man dann schließlich zu einer optimierten Modellvorstellung, welche die Einflüsse der Variation der Fertigungsparameter quantitativ beschreiben kann.

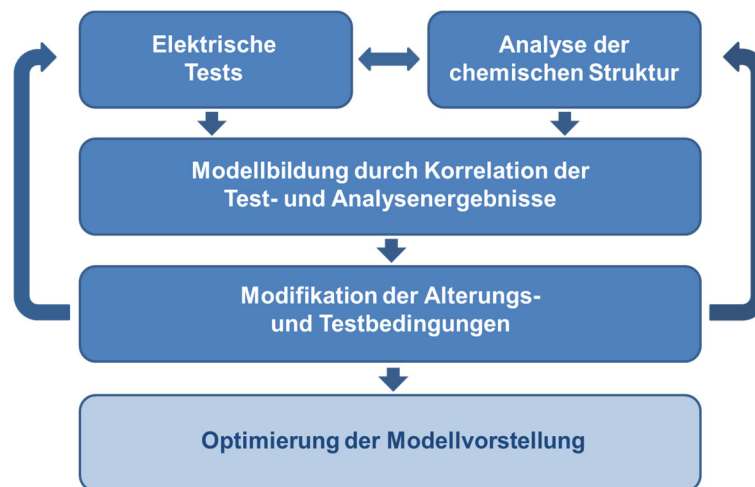


Abbildung 89: Vorgehensweise zur Modellbildung.

Im Rahmen des Projekts sollen als variable Fertigungsparameter die Lotpastenauftragsmenge, das Lötprofil und der Reinigungszustand betrachtet und deren Einfluss auf das Alterungsverhalten der Teststrukturen untersucht werden. Diese Parametervariation soll auf zehn verschiedene Lotpasten und auf verschiedene Bauelemente angewandt werden. Eine vollfaktorielle Variation der Fertigungsparameter im Sinne der beschriebenen Vorgehensweise ist dabei aufgrund der sich daraus ergebenden Vielzahl an Prüfkörpern im Rahmen eines solchen Forschungsprojekts vom Umfang her nicht realisierbar. Aus diesem Grund erfolgen die Untersuchungen nach einem DoE-Ansatz, um die Zahl der Parametervariationen und damit der Prüfkörper auf ein handhabbares Maß zu reduzieren. Die prinzipielle Vorgehensweise ist in Abbildung 90 am Beispiel einer

Zielgröße dargestellt, die von zwei Einflussfaktoren abhängig ist. In einem ersten Schritt werden die Einflussfaktoren einzeln in Richtung möglicher Extremwerte variiert. Aus der Betrachtung dieser ersten Ergebnisse lässt sich die Relevanz der einzelnen Einflussfaktoren auf die Zielgröße bewerten, als Ergebnis dieser ersten Bewertung erhält man dann ein einfaches lineares Modell zur Beschreibung der Abhängigkeit der Zielgröße von diesen Einflussgrößen. In einem zweiten Schritt werden dann abhängig von den ersten Ergebnissen weitere Versuchspunkte ausgewählt, welche eine Wechselwirkung verschiedener Einflussfaktoren mit in die Betrachtung einbeziehen. Auf diese Weise wird das Modell um Terme höherer Ordnung erweitert, so dass man durch mehrere Iterationsschritte schließlich ein verbessertes Modell erhält, welches näher an den realen Abhängigkeiten liegt.

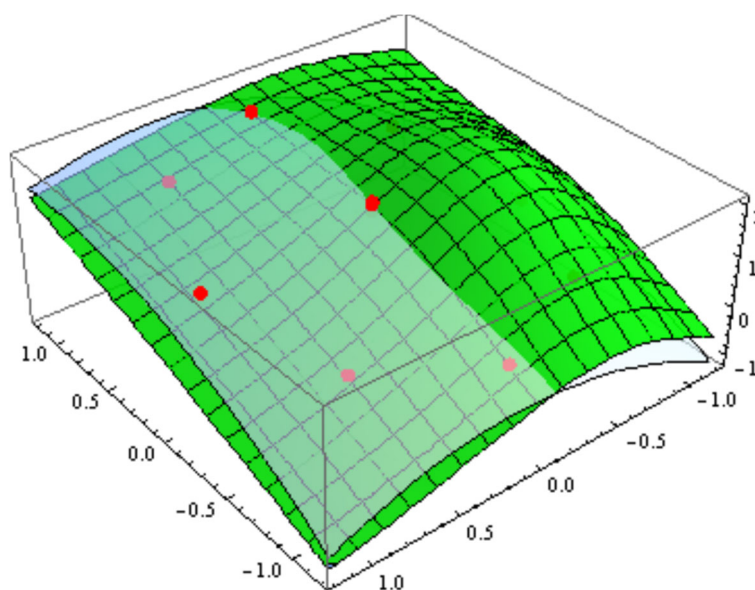


Abbildung 90: Exemplarisches Schema eines DoE-Ansatzes zur Beschreibung der Abhängigkeit einer Zielgröße (grüne Fläche) von zwei Einflussfaktoren. Die roten Punkte markieren die Versuchspunkte gemäß der statistischen Versuchsplanung, die halbtransparente blaue Fläche stellt das Ergebnis dieser Modellbildung dar.

## 7.2 Modellbildung

Als maßgeblicher Fertigungsparameter wurde der Lötprozess in den Arbeitspaketen 2 und 3 intensiv untersucht. Dabei wurden, wie oben beschrieben, zwei Lötprofile „kalt“ und „heiß“ betrachtet, die praktisch die Extrembedingungen dessen abbilden, was im praxisrelevanten Lötprozess noch realistisch erscheint. Bei den SIR-Tests zu diesen beiden Lötprofilen waren, unabhängig von den jeweiligen Lotpasten, keine Auffälligkeiten festzustellen. Auch eine stufenweise Erhöhung des Test-Potentials von 5 auf bis zu 100 V führte zu keinen Ausfällen der Testboards. Ebenso konnten bei den analytischen Betrachtungen der Prüfkörper nach dem SIR-Test keinerlei Hinweise auf elektrochemische Migration und dadurch bedingte Dendritenbildung gefunden werden. Parallel dazu haben die chemischen Analysen gezeigt, dass die beiden unterschiedlichen Lötprofile keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die chemische Struktur der Flussmittel bewirken. Selbstverständlich werden die Flussmittel durch den Lötprozess in ihrer chemischen Zusammensetzung verändert, aber diese Modifizierung hängt, im Rahmen der hier betrachteten

Parametervariation, praktisch nicht von dem Temperaturprofil ab. Vielmehr haben die Analysen gezeigt, dass der Lötprozess generell eher zu einer Homogenisierung der unterschiedlichen chemischen Ausgangsstrukturen führt. Damit lässt sich also festhalten, dass die Variation des Lötprofils im hier betrachteten Rahmen für sich genommen keinerlei negative Auswirkungen auf die Alterungsstabilität der Teststrukturen bewirkt.

Ebenso wenig wie die Löttemperatur wirkt sich auch der Reinigungszustand auf die Langzeitstabilität der Testboards aus. Entsprechende Versuche haben auch hier keine Auffälligkeiten in den elektrischen Tests bzw. in den analytischen Untersuchungen der Prüfkörper ergeben. Gleiches gilt für die Variation der Lotpastenauftragsmenge. Innerhalb Prozess-typischer Variation des Lotpastenauftrags waren auch für unterschiedliche SIR-Test-Potentiale keine signifikanten Anstiege der Widerstandswerte zu verzeichnen. Da die Menge an Lotpaste nur in einem begrenzten Umfang gesteigert werden kann, wurden die Prüfbedingungen in weiteren Versuchen dadurch verschärft, dass zusätzlich zu den Lotpasten das jeweilige Flussmittel separat im Überschuss auf die Teststrukturen aufgebracht wurde. Aber auch diese zusätzlich gesteigerte Flussmittelmenge allein führte zu keinen Ausfällen.

Insgesamt betrachtet ergaben die elektrischen Tests, dass die Variation eines Parameters alleine für die Alterungsstabilität der Testboards völlig unkritisch ist. Von daher wurden in folgenden Testreihen jeweils mehrere Fertigungsparameter gleichzeitig variiert. Allerdings führte auch dies zu keinem grundsätzlich anderen Ergebnis. Erst durch die extreme Variation mehrerer Einflussgrößen bei gleichzeitig erhöhter Testspannung konnten vereinzelte Ausfälle im SIR-Test provoziert werden. Allerdings ließen sich diese Ausfälle nicht gezielt reproduzieren. Es muss also davon ausgegangen werden, dass diese vereinzelten Auffälligkeiten noch von weiteren Faktoren abhängen. Zudem waren auch bei diesen wenigen Ausfällen keine eindeutigen Hinweise auf elektrochemische Migration zu beobachten.

Aus den durchgeführten Untersuchungen lässt sich letztlich folgern, dass der Lötprozess im Rahmen der im Projekt betrachteten Parametervariationen bis zu einer Testspannung von 100 V kein Schädigungspotential für die verwendeten Teststrukturen darstellt. Unter den gegebenen Bedingungen lässt sich elektrochemische Migration als potentielle Schadensursache ausschließen.

## 8 AP5: Optimierung von Prüfverfahren

In einem früheren IGF-Vorhaben konnte gezeigt werden, dass die Methode des Elektrochemischen Rauschens (ECR) prinzipiell dazu in der Lage ist, lokale Korrosionsvorgänge frühzeitig detektieren zu können [25]. Es ist daher davon auszugehen, dass diese Methode ein Potential besitzt für das Prüfverfahren, welches im Rahmen dieses Projekts zur schnellen Erkennung von elektrochemischen Migrationsvorgängen optimiert werden soll.

### 8.1 Elektrochemisches Rauschen (ECR)

Bei dem ECR-Verfahren werden Fluktuationen der beiden Systemgrößen Strom und Potential ohne äußere Beeinflussung des Korrosionssystems erfasst und analysiert. Misst man zum Beispiel den galvanischen Strom zwischen zwei gleichen Elektroden, so wird man bei hinreichender Messgenauigkeit feststellen, dass dieser Strom von Null abweicht und solche Fluktuationen aufweist (Abbildung 91).

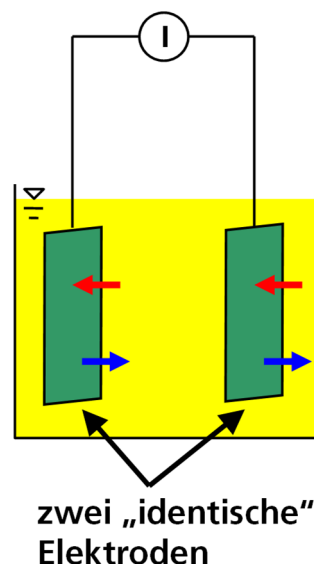


Abbildung 91: Prinzipieller Messaufbau der ECR-Methode.

In der praktischen Umsetzung wird das zu messende Signal über einen AD-Wandler mit einer konstanten Abtastrate (üblicherweise zwischen 1 Messwert/Sekunde und 40 Messwerten/Sekunde) digitalisiert und auf einem PC ausgewertet und gespeichert. Das gespeicherte Signal kann im Nachhinein aufbereitet (z. B. numerische Trennung des Gleichanteils vom Rauschanteil, Abbildung 92) und mit unterschiedlichen numerischen Methoden ausgewertet werden. Die Auswertung bezieht sich auf die Berechnung von statistischen Parametern (z. B. Varianz, Standardabweichung) oder wird zur Frequenzanalyse in die Frequenzdomäne übertragen (z. B. via Fouriertransformation oder auch fraktale Analysen (Hurst-Faktor, Lyapunov-Exponent)). Die Aussagekraft der einzelnen Auswertemethoden ist spezifisch für das zu untersuchende Korrosionssystem bzw. die auftretenden Korrosionserscheinungen.

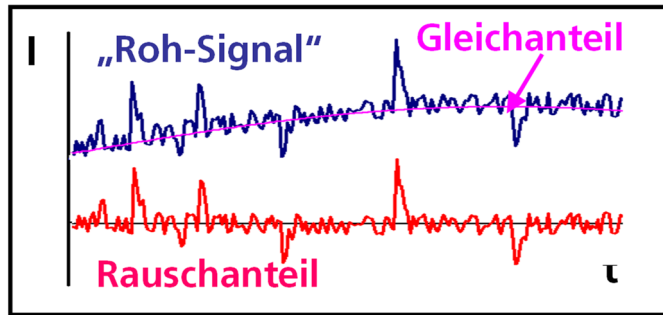


Abbildung 92: Typisches Messsignal einer ECR-Messung.

Als besonders allgemeine und damit geeignete Auswertemethode hat sich die Berechnung der sogenannten "Rauschladungsmenge" herausgestellt, mit der vergleichsweise einfach Korrosionsintensitäten (also differenziell), aber auch der Gesamtkorrosionsumfang (also integral) bewertet werden können, sowie Informationen über den Mechanismus der ablaufenden Prozesse ermittelt werden können [ [14], [16], [18]]. Da das Rauschen in Echtzeit erfasst wird, gelingt der Informationsgewinn je nach angewandeter Auswertemethode nahezu online. Ein typischer Kurvenverlauf bei dieser Auswertung der Rauschladungsmenge ist in Abbildung 93 gezeigt.

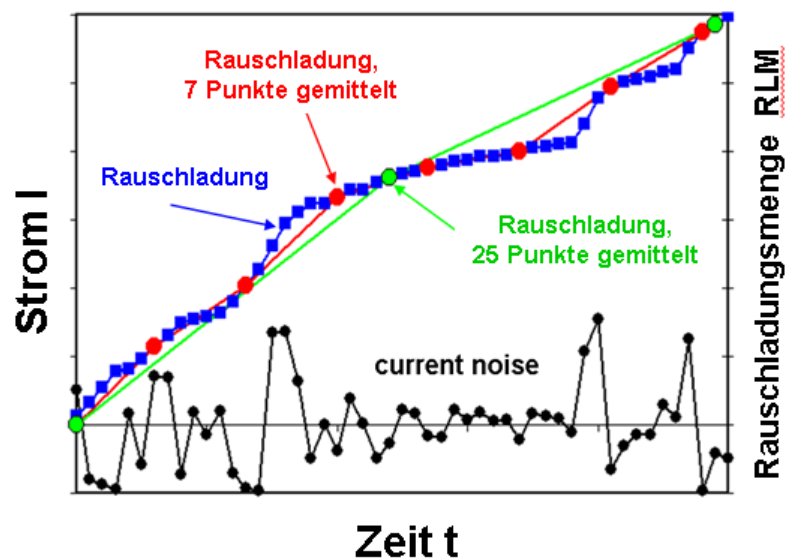


Abbildung 93: Darstellung der Rauschladungsmenge in Abhängigkeit von der Messdauer.

## 8.2 Validierung der ECR-Methode

Um die prinzipielle Eignung der Methode des elektrochemischen Rauschens als Prüfverfahren zum frühzeitigen Erkennen von lokalen Korrosionsvorgängen zu überprüfen, wurden Teststrukturen untersucht, die hinsichtlich der Auswahl der Lotpasten und der Fertigungsprozesse solchen Prüfkörpern entsprechen, die im SIR-Test deutliche Unterschiede gezeigt haben. An diesen Teststrukturen wurden in erster Linie wieder, genau wie bei den analytischen Betrachtungen in AP3, die Bauelemente R1206 untersucht. Dabei wurden bei jedem Prüfkörper Reihen von 20 solcher Widerstände für die ECR-Messungen kontaktiert. Diese ECR-Untersuchungen wurden bei einer angelegten Spannung von 10 V durchgeführt, als klimatische Bedingungen wurde eine Temperatur von 40°C und eine relative Feuchtigkeit von 95-97% gewählt. Ausgewertet wurden die ECR-Daten nach der beschriebenen Methode der Rauschladungsmenge. Aus dieser Auswertung haben sich für die untersuchten Teststrukturen die in Abbildung 94 dargestellten Kurvenverläufe der jeweiligen Rauschladungsmengen ergeben.

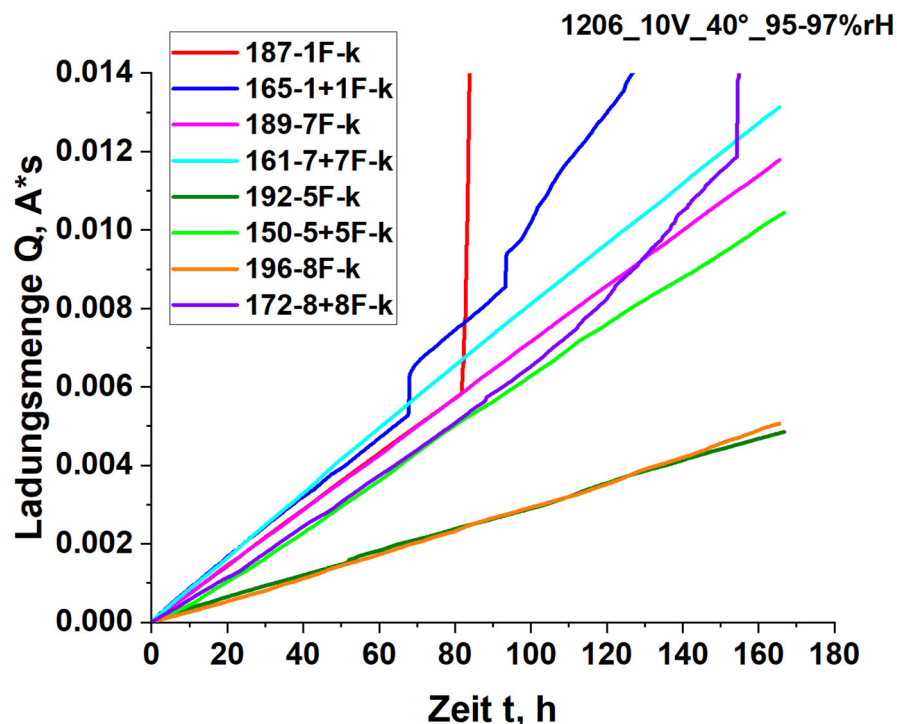


Abbildung 94: Zeitliche Änderung der Rauschladungsmenge für verschiedene Testboards.

Die untersuchten Prüfkörper zeigen zu Beginn der Messungen alle einen näherungsweise linearen Anstieg der Rauschladungsmenge. Bei einigen der Teststrukturen bleibt diese Linearität bis zum Ende der Prüfdauer von etwa 170 Stunden erhalten. Bei anderen Testboards dagegen zeigen die Rauschladungsmengen nach deutlich kürzeren Zeiten Unstetigkeiten durch sprunghafte Anstiege, wie z. B. bei dem Board 187-1F-k, bei dem die Rauschladungsmenge nach ca. 80 h rapide ansteigt. Unterhalb einer Prüfdauer von 60 Stunden werden solche Effekte jedoch bei keiner der untersuchten Prüfkörper beobachtet.

Hinsichtlich der Bewertung dieser Kurvenverläufe ist sind nun die Ergebnisse der vergleichbaren Boards im SIR-Test von Interesse. Die Teststrukturen, die in Materialauswahl und Fertigungsparametern den Boards 192-5F-k und 196-8F-k entsprechen, haben bei den SIR-Tests unauffällige Widerstandswerte im G-Ohm-Bereich gezeigt. Im Vergleich dazu weisen auch die entsprechenden Prüfkörper im ECR-Test die geringsten Steigungen der Rauschladungsmenge auf. Umgekehrt war z.B. das analoge Board zu 187-1F-k im SIR-Test besonders auffällig, und letztere ist bei der ECR-Messung durch den im Vergleich der untersuchten Proben deutlichsten Anstieg nach ca. 80 h gekennzeichnet. Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der ECR-Messungen eine gute Korrelation zu den entsprechenden Resultaten der SIR-Tests.

Aus der Korrelation der Ergebnisse der Sir-Tests und der ECR-Untersuchungen lässt sich folgern, dass die Methode des elektrochemischen Rauschens grundsätzlich geeignet ist, frühzeitig qualitativ Informationen über lokale Korrosionsvorgänge zu liefern. Im Prinzip lassen sich die Prüfkörper bereits nach wenigen Stunden hinsichtlich ihrer linearen Steigerungen der Rauschladungsmenge separieren. Noch deutlicher werden die Effekte, sobald die sprunghaften Änderungen in den ECR-Messdaten auftreten. Aber auch in diesem Fall liegt die Prüfdauer immer noch deutlich unter den für die SIR-Tests benötigten Zeiten.

Hinsichtlich einer detaillierten Validierung des ECR-Verfahrens als beschleunigte Prüfmethode wäre jedoch eine größere Anzahl an Teststrukturen erforderlich, die auch im SIR-Test eine deutlich höhere Varianz zeigen. Insbesondere wäre es ideal, solche Prüfkörper für die Validierung heranziehen zu können, die im SIR-Test nach unterschiedlichen Zeiten reproduzierbar zu Ausfällen durch elektrochemische Migration und dadurch bedingte Dendritenbildung führen. Da solche Zustände jedoch, wie in Kapitel 7 beschrieben, unter den gegebenen Fertigungsbedingungen nicht definiert erzeugt werden konnten, stehen dementsprechend auch keine solchen Prüfkörper für die ECR-Messungen zur Verfügung. An der im Rahmen dieses Arbeitspakets nachgewiesenen grundsätzlichen Eignung der Methode des elektrochemischen Rauschens als beschleunigtes Verfahren zur Erkennung von Korrosionsvorgängen ändert dies jedoch nichts.

## 9 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen des Projektes

Es erfolgt eine Gegenüberstellung der Projektziele laut Projektantrag mit den durchgeführten Arbeitsschritten sowie der entsprechenden erhaltenen Ergebnisse.

Tabelle 9: Gegenüberstellung Projektziele und Ergebnisse

Projektziele	Ergebnisse
Erweiterung der Wissensbasis als Grundlage für eine Modellbildung zur Beschreibung der Vorgänge zur ECM durch die Auswirkungen der verbleibenden Rückstände in Abhängigkeit der Fertigungsbedingungen (bei sich einstellender Spaltsituation).	Die verwendeten Prozessparameter liegen deutlich oberhalb der erwarteten zulässigen Grenzwerte, trotzdem traten nur sporadisch Fehler auf. Im Rahmen der hier betrachteten Parametervariationen kann elektrochemische Migration daher als potentielle Schadensursache ausgeschlossen werden.
Entwicklung und Optimierung einer Testmethode für frühzeitige Detektion von Migrationsvorgängen.	Die Methode des elektrochemischen Rauschens (ECR) hat gezeigt, dass sie Potential für eine frühzeitige Detektion von Migrationsvorgängen aufweist.
Erweiterung von Prüfstandards und Leitfäden als Grundlage für erhöhte Prozesssicherheit und geringere Ausfallquoten.	Die Ergebnisse der SIR-Test-Untersuchungen lassen darauf schließen, dass die Vorgaben zum Isolationsabstand einen überdimensionierten Sicherheitsfaktor enthalten, der zu überprüfen ist.
Ausarbeitung von Anwendungsempfehlungen und Designhinweisen.	Es wurde ein Prozessfenster für die maximal zulässige Menge an Flussmittel herausgearbeitet und Designempfehlungen getroffen.
Erhöhung der Produktsicherheit für den Einsatz miniaturisierter Elektronikkomponenten hinsichtlich der Gefährdung durch ECM.	Bei Einhaltung der im Projekt herausgearbeiteten Prozessgrenzen und Layoutempfehlungen ist mit einer erhöhten Produktsicherheit gegenüber ECM zu rechnen.



## 10 Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick

Im bearbeiteten Projekt wurde die ionische Verunreinigung in sich unter Komponenten einstellender Spaltsituation durch elektrische Tests und chemische Analyse untersucht und Verfahren zur schnellen Analytik weiterentwickelt, wobei folgende Ergebnisse erzielt wurden.

Niedrige Löttemperaturen im zulässigen Lötprozessfenster der Flussmittel führte bei keiner der untersuchten Kombinationen von Lotpasten (mit „üblicher“ Flussmittelmenge), Bauteilen und SIR-Testbedingungen zu Ausfällen, und mit Lötstopplack abgedeckte Leiterstrukturen sind unauffällig.

Bei den untersuchten Lotpasten-Bauteilkombinationen führte die applizierte „beim Lotpastendruck übliche“ Flussmittelmenge auf den untersuchten Teststrukturen bei Prüfspannungen bis 100V zu keinen Ausfällen durch ECM.

Eine Erhöhung der Flussmittelmenge bis zum doppelten Volumen führte bei den untersuchten Lotpasten-Bauteilkombinationen zu keinen Ausfällen. Flussmittelmengen ab ca. dem dreifachen Volumen führte bei den untersuchten Lotpasten-Bauteilkombinationen bei freiliegenden Leiterzügen vereinzelt zu Ausfällen. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass nur einzelne Lotpasten ein auffälliges Verhalten zeigen, das sich nicht verallgemeinern lässt und Dendritenwachstum im untersuchten Spannungsbereich bis 100V nicht eindeutig nachzuweisen war.

Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen.

- Bei 51-100V beträgt der minimale Isolationsabstand laut IPC-2221 [25] für unbeschichtete Baugruppen (A6) mindestens 0,5 mm. Da im SIR-Test bei Spannungen bis 100V auch bei Isolationsabständen von 100  $\mu\text{m}$  keine eindeutige Dendritenbildung nachweisbar war, sondern diese erst bei höheren Spannungen nachgewiesen wurde, muss davon ausgegangen werden, dass die Vorgabe des minimalen Isolationsabstands nach IPC-2221 einen Sicherheitsfaktor beinhaltet und insbesondere bei sachgemäßer Verwendung der Lotpasten deutlich überdimensioniert ist. Eine Überprüfung erscheint sinnvoll.
- Die Prüfspannung für elektronische Anwendungen mit miniaturisierten Komponenten und demzufolge geringeren Leiterzugabständen (bis 100 $\mu\text{m}$ ) sollte auf mindestens 50V festgelegt werden.
- Es sind keine besonderen Vorkehrungen beim Layout zu berücksichtigen.
- Bei der Verarbeitung von Lotpasten sollte auf die Zugabe von Zusatzflussmittel verzichtet werden. Ein Überdrucken der Leiterplattenpads ist, soweit dies nicht zu Kurzschlüssen oder Unterschreiten von Mindestisolationsabständen führt, hinsichtlich ECM unkritisch.
- Wechselwirkungen zwischen Komponenten, Lotpasten und Leiterplatte wurden bei den untersuchten Kombinationen nicht beobachtet. Diese können jedoch bei anderen Materialkombinationen nicht ausgeschlossen werden.

Die folgenden Aspekte stellen eine sinnvolle Ergänzung des Forschungsprojekts dar und bedürfen weiterer Untersuchungen.

- Untersuchung der erforderlichen Mindestisolationsabstände, um eine Gefährdung durch ECM auszuschließen.
- Untersuchung des Gefährdungspotentials hinsichtlich ECM durch die gezielte Verunreinigung von Lötstellen, die durch z.B. das Handling der Baugruppen eingetragen wird.
- Im Bereich der Leistungselektronik entsteht durch die gewünschte Miniaturisierung weiterer Bedarf zur Untersuchung von ECM unter hohen Spannungen. Dieser kann durch den im ISIT entwickelten HV-SIR-Test bedient und für weitere Forschungen eingesetzt werden.
- Die Methode des elektrochemischen Rauschens ist prinzipiell dazu geeignet, frühzeitig Informationen über Korrosionsvorgänge auf den elektronischen Baugruppen zu liefern. Für eine detaillierte Validierung des ECR-Verfahrens als beschleunigte Prüfmethode wäre jedoch eine größere Anzahl an Teststrukturen erforderlich, die auch im SIR-Test eine deutlich höhere Varianz zeigen.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

## 11 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### 11.1 Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Die Zwischenergebnisse des Projektes wurden laufend den Mitgliedern des PA mitgeteilt. Hierzu fanden fünf PA-Sitzungen während der Projektlaufzeit statt. Des Weiteren wurde in den zuständigen Arbeitskreisen des DVS - Deutscher Verband für Schweißtechnik „FA10 Mikroverbindungstechnik“ und der GfKORR - Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. „Korrosionsschutz in der Elektronik und Mikrosystemtechnik“ regelmäßig über den aktuellen Projektstand berichtet, siehe Tabelle 10.

Tabelle 10: Transfermaßnahmen für den PA und die Forschungsvereinigung

	Ziel / Bemerkung	Rahmen	Zeitraum
<b>Maßnahme A:</b> Projektantrag an Mitglieder des PA verteilen	Übermittlung der vollständigen Projektinformationen	A1: Projektbegleitender Industrieausschuss	Juli 2019
<b>Maßnahme B:</b> PA-Treffen	Information des PA  Vorstellung der Ergebnisse, Diskussion und Festlegung des weiteren Vorgehens  Abschlusspräsentation der Ergebnisse und Diskussion	Projektbegleitender Industrieausschuss  B1: Kick-Off-Meeting IFAM, Bremen B2: PA-Webmeeting B3: PA-Webmeeting B4: PA-Webmeeting  B5: PA-Webmeeting	  27.08.2019  07.07.2020 03.12.2020 08.07.2021  09.12.2021
<b>Maßnahme C:</b> AK-Sitzung	Information des DVS und der GfKORR  Schriftlicher und mündl. Zwischenbericht, Diskussion	C1: Fachausschuss FA10 „Mikroverbindungstechnik“ des DVS  C2: AK-Sitzung „Korrosionsschutz in der Elektronik und Mikrosystemtechnik“ der GfKORR	Dezember 2019 Mai 2020 Nov. 2020 Mai 2021* Dez. 2021*  Oktober 2019 April 2020* Sept. 2020* April 2021* Sept. 2021* Oktober 2021*
<b>Maßnahme D:</b> Online-Training	Online-Training der GfKORR	D1: Neues aus der Elektronik-Korrosionsforschung	Juni 2020* Juni 2021*

\* online

## 11.2 Spezifische Transfermaßnahmen nach Laufzeitende des Vorhabens

Nach Laufzeitende werden die Ergebnisse zügig einem breiten Publikum zugänglich gemacht, siehe Tabelle 11. Hierzu werden verschiedene Transfermaßnahmen ergriffen, die sich bereits bei der Durchführung früherer Projekte bewährt haben. Die Ergebnisse werden auf Tagungen, Veranstaltungen wie Technologietagen und Seminaren sowie im Rahmen von Schulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen verbreitet. Zusätzlich sollen die Projektergebnisse der Öffentlichkeit über Publikationen zugänglich gemacht werden bzw. über die Internetpräsenz der Institute zum Download bereitgestellt werden. Allgemein sollen die Multiplikatoren von Verbänden wie GfKORR, FED (Fachverband Elektronik-Design), ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.) und VDI (Verein Deutscher Ingenieure) genutzt werden.

Des Weiteren werden die sozialen Medien wie LinkedIn, Facebook, YouTube, Twitter, Xing und TechBlogs der Institute für die weite Verbreitung der Informationen genutzt.

Das dargestellte Transferkonzept erscheint realistisch. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Fraunhofer ISIT seit mehr als 25 Jahren auf dem Arbeitsgebiet der Prozessoptimierung, Fertigung sowie Qualitäts- und Zuverlässigkeitsbewertung 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 wiederkehrende Seminare und Technologietage zu verschiedensten Themenbereichen. In diesem Umfeld können die Ergebnisse gezielt verbreitet werden.

Das Fraunhofer IFAM hat jahrzehntelange Erfahrung auf dem Gebiet der Korrosionsuntersuchung und im speziellen der Methoden ECR und EIS aus Forschungsprojekten, bilateralen industriellen Projekten und Dienstleistungen. Die starke Nähe zu Industriekunden und Geräteherstellern lässt auch hier eine weite Verbreitung der Ergebnisse erwarten.

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

Die aufgeführten bereits erfolgten und noch ausstehenden Transfermaßnahmen werden somit insgesamt hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit als voll realisierbar eingestuft.

Tabelle 11: Weitere Transfermaßnahmen

	Ziel / Bemerkung	Rahmen	Zeitraum
<b>Maßnahme E:</b> Link zum Abschlussbericht	Veröffentlichung des Abschlussberichts im Internet	E1: Homepage des ISIT und des IFAM	Q2 2022
		E2: Technische Informationsbibliothek (TIB)	Q2 2022
<b>Maßnahme F:</b> Social Media	Veröffentlichung von Links zum Bericht in den Social Media Accounts der Institute	F1: Social Media	Q2 2022
<b>Maßnahme G:</b> Online-Training	Online-Training der GfKORR	G1: Neues aus der Elektronik-Korrosionsforschung	Juni 2022*
<b>Maßnahme H:</b> Publikationen	Veröffentlichung in Fachzeitschriften	H1: Veröffentlichung in der DVS-Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“	Q1 2023
	Veröffentlichung in der Fachzeitschrift PLUS Platzierung von Beiträgen in Kennzifferzeitschriften (z. B. EPP, Productronic)	H2: DVS Jahrbuch 2022 H3: Fachzeitschrift für Elektronikfertigung H4: Platzierung von Beiträgen in Kennzifferzeitschriften	Q3 2022 Q3 2022 Q4 2022 - Q2 2023
<b>Maßnahme I:</b> Vorträge (erwartete Teilnehmerzahl TN)	TN ca. 250	I1: Fachtagung der DVS/GMM „EBL 2022“	Juni 2022
	TN ca. 300	I2: EuroCorr 2022	August 2022
	TN ca. 250	I3: DVS CONGRESS 2022	Sept. 2022
	TN ca. 100	I4: Technologieseminar "Wir gehen in die Tiefe"	Q3 2022
	Fachforum mit ca. 40 EMS-Firmen	I5: Hamburger Lötzirkel	Q4 2022
	TN ca. 3x50	I6: Technologietage verschiedener Firmen (u.a. Rehm, Koenen, ASYS, DEK)	ab Q4 2022
	TN ca. 300	I7: FED-Konferenz	Q3 2023
TN ca. 35	I8: FED-Regionalgruppentreffen	ab Q1 2023	
TN ca. 20	I9: FED AK „Baugruppe“	Q1 2022	

Q1... Quartal 1, Q2... Quartal 2, Q3... Quartal 3, Q4... Quartal 4

## **12 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten**

Der wissenschaftlich technische Nutzen der erzielten Ergebnisse liegt zum einen in der Erweiterung der Wissensbasis zum Verständnis der Vorgänge zur ECM durch die Auswirkungen der verbleibenden Rückstände in Kombination mit den eingesetzten Materialien in Abhängigkeit der sich einstellenden Spaltsituation. Das Risikopotential solcher Kontaminationen im Hinblick auf die Alterungsstabilität von elektronischen Baugruppen kann auf Basis der durchgeführten Untersuchungen besser bewertet werden.

Des Weiteren haben die Untersuchungen Zweifel an den IPC-Vorgaben zum Isolationsabstand ergeben. Dies bedarf einer weiteren Analyse.

Die prinzipielle Eignung der Methode des elektrochemischen Rauschens als beschleunigtes Verfahren zur Detektion von lokalen Korrosionsvorgängen auf elektrischen Baugruppen konnte demonstriert werden.

Mit dem im ISIT entwickelten und aufgebauten HV-SIR-Test kann die Test-Lücke verringert und Fragestellungen der Leistungselektronik und Automobilelektronik/Batterietechnik können untersucht werden.

Die Elektronik fertigende Industrie in Deutschland ist vorwiegend durch KMU geprägt. Diese sind in der Automobilzulieferbranche, im Maschinenbau, in der Industrieelektronik, der Medizintechnik aber auch in Zulieferbranchen wie z. B. Hersteller von Lotwerkstoffen tätig. Wie in den Beispielen dargelegt, sind die Kosten, die von Ausfällen durch ECM an Baugruppen und Systemen verursacht werden können, erheblich. Dies kann im Falle von KMU existenzbedrohend sein.

Angepasste Prüfverfahren und Prüfstrukturen und auf die Anforderungen der voranschreitenden Miniaturisierung angepasste Designempfehlungen für elektronische Baugruppen können zu einer erhöhten Verfahrens- und Prozesssicherheit sowie durch geringere Ausfallquoten zu einer höherwertigen Produktqualität führen.

Der wesentliche technische Nutzen, insbesondere für KMU, liegt in Prozesssicherheit, die der Anwender bei Einhalten der erarbeiteten Prozessempfehlungen erlangt. Das damit verbundene erhöhte Vertrauen in das Fertigungsergebnis festigt die Marktposition, verstärkt die Kundenbindung und damit die Wettbewerbsfähigkeit der KMU. Dadurch öffnen sich den KMU neue Märkte. Insbesondere diese kleinen und mittleren Unternehmen haben einen großen wirtschaftlichen Nutzen von den Untersuchungen, die sie nicht aus eigenen Mitteln finanzieren können.

Eine verminderte Ausfallquote leistet letztendlich auch einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz in der Produktionskette und erhöht dadurch die Wertschöpfung.

Zusätzlich birgt dies weiterhin ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung, indem durch die Sicherstellung einer gleichmäßig hohen Qualität die Zuverlässigkeit der Produkte erhöht wird.

Durch die enge Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des PA ist eine schnelle industrielle Umsetzung möglich.

## 13 Literaturverzeichnis

- [1] „Elektrochemische Migration – eine typische Korrosionserscheinung in der Mikroelektronik. Kh.G. Schmitt-Thomas, S. Wege und H. Schweigart, Materials and Corrosion 46, 366-369 (1995)“.
- [2] „DIN EN ISO 8044, Korrosion von Metallen und Legierungen- Grundbegriffe und Definitionen 11-1999)“.
- [3] „Die Korrosion der Metalle. H. Kaesche, Springer Verlag, 1990“.
- [4] „Elektrochemische Migration als Ursache von Felddausfällen (Teil I), Dr. Helmut Schweigart, Zestron, all electronics.de, <http://www.all-electronics.de/entstehung-und-vermeidung-von-felddausfaellen/>, Hühthig GmbH, 2016“.
- [5] „Testverfahren zur Risikobewertung von Verunreinigungen, H. Schweigart, DVS-Tagung Weichlötten 2017 - Ist Korrosion vermeidbar, Hanau 2017“.
- [6] „J-STD-004B, Requirements for Soldering Fluxes, Dez. 2008“.
- [7] „DIN EN 61190-1-1 Verbindungsmaterialien für Baugruppen der Elektronik, Teil 1-1: Anforderungen an Weichlöt-Flussmittel für hochwertige Verbindungen in der Elektronikmontage, (IEC 61190-1-1:2002) Deutsche Fassung EN 61190-1-1:2002“.
- [8] „IPC J-STD-001F DE, Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen, Juli 2014“.
- [9] „DIN ISO 857-2:2007-03, Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 2: Weichlötten, Hartlötten und verwandte Begriffe, ersetzt DIN 8505-2:1979-05“.
- [10] „Das Reflow-Lötprofil im Zeichen bleifreier Fertigung, Dr. Thomas Ahrens, Dr. Max Poech, Fraunhofer ISIT, Seminar "Der bleifreie Lötprozess", 26.-29. Feb. 2008, Itzehoe“.
- [11] „IPC-TM-650, Test Methods Manual, Test Method 2.6.3.3, Surface Insulation Resistance, Fluxes“.
- [12] „IPC-B-24, Surface Insulation Resistance Test Board“.
- [13] „IPC-B-25A, IPC Multi-Purpose Test Board“.
- [14] „Untersuchungen zur Einsetzbarkeit elektrochemischer Rauschmessungen zum Studium des Korrosionsverhaltens von Kupferrohren in Trinkwasserinstallationen. G. Schmitt, P. Plagemann. Materials and Corrosion, 49,“ (1998) (8).
- [15] „Application of a Multi-Channel Zero Resistance Current Amplifier for Screening Processes. P. Plagemann, A. Anton, O. Yezerska, M. Schneider, P. Schrems. Materials and Corrosion 58,“ (2007) 12.
- [16] „Online monitoring of crevice corrosion with electrochemical noise. G. Schmitt, K. Meller, P. Plagemann. Materials and Corrosion, 55,“ (2004) (10).
- [17] „ECN Measurements at Copper under Tap Water Conditions: Anion Effects. G. Schmitt, E. Slavcheva, P. Plagemann. Materials and Corrosion, 52 (2001)“.
- [18] „Elektrochemisches Rauschen (ECR) als Hochdurchsatzmethode zur Untersuchung von Korrosionsschutzbeschichtungen. P. Plagemann, O.Yezerska, A. Brinkmann. Farbe und Lack,“ April 2009.

- [19] „Electrochemical Migration on Lead-Free Soldering of PCBs, Luiz Tadeu Freire Mendes et al, LSI - Polytechnic School- University of Sao Paulo, Cidade Universitária, Sao Paulo, Brazil, Journal of Integrated Circuits and Systems 2011; v.6 / n.1:127-130“.
- [20] „Vapor phase and Convection Reflow: Comparison of Solder Paste Residue Chemical Reliability, Emmanuelle Guéné, Anne-Marie Laügt, Céline Puechagut, Aurélie Ducoulombier, Inventec Performance Chemicals, Bry sur Marne, France, 2011“.
- [21] „ESA STM-275, Evaluation of Cleanliness Test Methods for Spacecraft PCB Assemblies, R-E. Tegehall, IVF, Sweden, B.D. Dunn, ESA Directorate of Technical and Operational Support, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 10/2006“.
- [22] „The Impact of Crevices beneath Surface Mounted Devices on the Cleaning Efficiency, Per-Erik Tegehall, Soldering and Surface Mount Technology 3(2):46-52, December 1991“.
- [23] „Solder Paste Residue Corrosivity Assessment: Bono Test, Céline Puechagut, Anne-Marie Laügt, Emmanuelle Guéné, Richard Anisko, Inventec Performance Chemicals, Bry sur Marne, France“.
- [24] „IPC-2221, Generic Standard on Printed Board Design, 11/2012“.
- [25] „Untersuchung des Einflusses der elektrochemischen Korrosion auf die Zuverlässigkeit von reparierten elektronischen Baugruppen unter Verwendung bleifreier Lote und No-Clean- Flussmittelmischungen, Fraunhofer ISIT, Fraunhofer IFAM, IGF-Vorhaben Nr.: 17960N“.