

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Untersuchung des Einflusses der elektrochemischen Korrosion auf die Zuverlässigkeit von reparierten elektronischen Baugruppen unter Verwendung bleifreier Lote und No-Clean-Flussmittelmischungen***

der Forschungsstelle(n)

Fraunhofer ISIT

Das IGF-Vorhaben N17960 N/1 der Forschungsvereinigung DECHEMA e.V. wurde über die



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



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Itzehoe, 29.02.2016

Ort, Datum

  
Helge Schimanski

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

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Untersuchung des Einflusses der elektrochemischen Korrosion auf die Zuverlässigkeit von reparierten elektronischen Baugruppen unter Verwendung bleifreier Lote und No-Clean-Flussmittelmischungen***

der Forschungsstelle(n)

Fraunhofer IFAM

Das IGF-Vorhaben N17960 N/1 der Forschungsvereinigung DECHEMA e.V. wurde über die



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



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bremen, 22. 2. 2016

Ort, Datum

Dr.-Ing. Peter Plagemann

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

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde in enger Abstimmung mit den Firmen des beteiligten PA die systematische Untersuchung des Risikopotentials auf elektrochemische Migration im Reparaturfall elektronischer Baugruppen unter Berücksichtigung des Einsatzes von Lötwerkstoffen mit unterschiedlichen chemischen Flussmittelzusammensetzungen durchgeführt.

Mittels SIR-Testanalyse wurde nachgewiesen, dass im Reparaturfall elektronischer Baugruppen ein Risikopotential auf elektrochemische Migration besteht. Durch fertigungsrelevante Prozessvariationen wurden potentiell kritische Materialkombinationen und Lötprozessparameter ermittelt.

Effektiv ist der Einsatz von deutlich reduzierten Flussmittelmengen und Einschränkung des Auftrags auf die Bereiche, die der Prozesstemperatur ausgesetzt werden. Eine qualifizierte Lötprofiloptimierung, die richtige Material- und Prozesswahl sowie das Einhalten der vom Materiallieferanten vorgegebenen Prozesstemperaturen und –zeiten ermöglicht ein akzeptables Lötresultat bei gleichzeitigem Verbrauch (bzw. Deaktivierung) aktiver Flussmittelbestandteile. Dadurch kann bei Folge- und/oder Nacharbeitslötprozessen die Grundlage für die Herstellung zuverlässiger Elektronik mit minimiertem Risikopotential auf elektrochemische Migration geschaffen werden.

Die SIR-Test Ergebnisse zeigen einen sinnvollen Ansatz zur praxisrelevanten Ergänzung vorhandener Prüfmethoden, indem für die Qualifizierung von NoClean-Flussmitteln die Vorbehandlungsprozesse mit neuen Parametersätzen (Durchfahren von unvollständigen Lötprozessen) erweitert werden.

Als neuen und besonders innovativen Ansatz wurde im Projekt die Implementierung elektrochemischer Messmethoden im SIR-Test untersucht, um hier zusätzliche Informationen, möglicherweise auch schneller, zum Korrosionsstatus der Boards zu erhalten.

Hierzu wurden zwei Methoden ausgewählt. Das war zum einen die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS), die sich in dieser Anwendung als nicht zielführend herausstellte. Zum anderen wurde mit der Methode des elektrochemischen Rauschens (ECR) eine potentiell geeignete Methode gefunden, um die SIR-Tests hinsichtlich der Identifikation von Korrosionsvorgängen zu ergänzen und diese frühzeitig nachzuweisen.

Des Weiteren wurden mittels TOF-SIMS qualifizierte Oberflächenanalysen durchgeführt.

KMU können so in ihrer Fertigung sichere Folge- und Nacharbeitslötprozesse etablieren. Erhöhte Verfahrenssicherheit und damit verbunden erhöhtes Vertrauen in das Fertigungsergebnis verstärkt die Kundenbindung und damit die Wettbewerbsfähigkeit der KMU. Damit verbunden sind eine Erhöhung der Wertschöpfung und ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung im Reparaturssektor. Dies festigt die Marktposition von KMU.

### **Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

Das IGF-Vorhaben Nr.: 17960N der Forschungsvereinigung DECHEMA e.V., Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt/ Main, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
1.1	Anlass für den Forschungsantrag, Ausgangssituation.....	5
1.2	Stand der Forschung.....	8
1.3	Aufgabenstellung.....	15
2	Forschungsziel und Lösungsweg.....	16
2.1	Angestrebte wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	16
2.2	Angestrebte wirtschaftliche Ergebnisse (Nutzen für KMU).....	16
2.3	Innovativer Beitrag.....	16
2.4	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels.....	17
3	Durchführung und Ergebnisse.....	18
3.1	Auswahl von Lötwerkstoffen und Flussmittelsystemen.....	18
3.2	Definition von Testboard, Layout und Lötprozessen.....	19
3.3	Einmessen der Lötprofile.....	20
3.3.1	Inline-Konvektions-Lötprozess.....	21
3.3.2	Wellenlötprozess.....	21
3.3.3	Selektivlötprozess.....	22
3.3.4	Manuelles Kolbenlöten, Prozessnachbildung mit Reworkstation.....	23
3.3.5	Maschinengestütztes Rework.....	23
3.4	Untersuchung der elektrochemischen Migration mit SIR-Tests.....	26
3.4.1	Maschinelles Konvektions-Reflowlöten von bleifreien Lotpasten.....	30
3.4.2	Kombinierter Lötprozess: Reflow- mit anschließendem Wellenlöten....	31
3.4.3	Kombinierter Lötprozess: Reflow- mit anschließendem Selektivem (Vorheiz)Prozess.....	34
3.4.4	Manueller Kolbenlötprozess.....	39
3.4.5	Maschinengestütztes Rework, nur Rework-Flussmittel.....	43
3.4.6	Kombinierter Lötprozess: Reflow mit maschinengestütztem Rework....	45
3.4.7	Kombinierter Lötprozess: Reflow mit maschinengestütztem Rework und Leiterplattenreinigung nach Rework.....	48
3.5	Übertragung auf ein Funktionsmuster.....	52
3.6	Untersuchung der elektrochemischen Migration mit ECR und EIS.....	55
3.6.1	Anwendung der elektrochemischen Impedanzspektroskopie EIS.....	56
3.6.2	Anwendung des elektrochemischen Rauschens ECR.....	65
3.7	Oberflächen- und Rückstandsanalysen.....	72
3.7.1	Alterungseinflüsse auf das NiAu-Leiterbahnenmaterial.....	73
3.7.2	Alterungseinflüsse auf das Cu-Leiterbahnenmaterial.....	75

4	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse .....	77
4.1	Untersuchung der elektrochemischen Migration mit SIR-Tests .....	78
4.2	Anwendung elektrochemischer Messmethoden .....	79
4.3	Oberflächen- und Rückstandsanalysen .....	80
5	Verwendung der Zuwendung .....	81
5.1	Personaleinsatz .....	81
5.2	Gerätebeschaffung .....	81
5.3	Leistungen Dritter .....	81
5.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	81
6	Umsetzung der Ergebnisse in die Industrie, Ergebnistransfer.....	82
6.1	Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens ....	82
6.2	Spezifische Transfermaßnahmen nach Laufzeitende des Vorhabens.....	83
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	86
8	Literaturverzeichnis .....	88

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Beispiele für elektrochemische Migration und Dendritenbildung .....	6
Abb. 2: SIR-Testboard nach IPC-B-24 .....	8
Abb. 3: Prinzip der elektrochemischen Impedanzspektroskopie EIS .....	9
Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Messzelle .....	10
Abb. 5: Simulation von Ersatzschaltbildern .....	10
Abb. 6: Schematische Darstellung des Messprinzips .....	11
Abb. 7: Anodische Metallauflösung [3] .....	13
Abb. 8: Wanderung der Metallionen [3] .....	13
Abb. 9: Metallionenabscheidung [3].....	13
Abb. 10: Lötprozessfenster des Flussmittels [19] .....	15
Abb. 11: Flussdiagramm zum Projektablauf .....	17
Abb. 12: Testboardlayout .....	19
Abb. 13: Lötprofil Reflowlöten: „pb-frei“ .....	21
Abb. 14: Lötprofil Wellenlöten: „Welle an“ .....	21
Abb. 15: Lötprofil Wellenlöten: „Welle aus“.....	21
Abb. 16: Lötprofil Selektivlöten mit niedriger Vorheiztemperatur .....	22
Abb. 17: Lötprofil Selektivlöten mit mittlerer Vorheiztemperatur .....	22
Abb. 18: Lötprofil Selektivlöten mit hoher Vorheiztemperatur .....	22
Abb. 19: Manueller Lötprozess, Prozessnachbildung mit Reworkstation .....	23
Abb. 20: Lötprofil Prozessnachbildung manuelles Löten .....	23
Abb. 21: Messaufbau Temperaturmessung (links) .....	23
Abb. 22: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 150°C .....	24
Abb. 23: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 215°C .....	24
Abb. 24: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 230°C .....	24
Abb. 25: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 245°C .....	25
Abb. 26: Fremdkörper reduziert Widerstand.....	27
Abb. 27: unsaubere Präparation.....	27
Abb. 28: typische Beispiele für optische Inspektion nach SIR-Test Auslagerung .....	28
Abb. 29: bedruckte und gelötete Kammstruktur.....	29
Abb. 30: SIR-Test Lotpaste .....	30
Abb. 31: Fluxkombination aus Reflow-Lotpaste A und Wellen-Flussmittel B.....	31
Abb. 32: Fluxkombination aus Reflow-Lotpaste D und Wellen-Flussmittel G .....	31
Abb. 33: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpaste D und Selektivlöt-Flussmittel C .....	34
Abb. 34: Prozessnachbildung mit Reworkstation.....	39
Abb. 35: Flussmittel L, RELO .....	40
Abb. 36: Flussmittel I, REM1 .....	41
Abb. 37: Rework-Flussmittel K, REM0 .....	43
Abb. 38: Rework-Flussmittel H, RELO .....	44
Abb. 39: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpaste A mit Rework-Flussmittel J, K, H.....	46
Abb. 40: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpaste C mit Rework-Flussmittel J, K, H.....	49
Abb. 41: Funktionsmusterboard.....	52
Abb. 42: Funktionsmusterboard Ausschnitt R0603.....	52
Abb. 43: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten, Bauteilfelder ohne Bestückung....	53
Abb. 44: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten, Bauteilfelder mit Bestückung .....	53
Abb. 45: Kalkulierte Impedanzspektren .....	56
Abb. 46: EIS-Messungen an SIR Boards .....	58
Abb. 47: EIS-Messungen an SIR Boards .....	59
Abb. 48: EIS-Messungen an SIR Boards .....	60
Abb. 49: Mikroskopische Aufnahmen der Cu-Boardoberflächen .....	61

Abb. 50: Mikroskopische Aufnahmen der NiAu-Boardoberflächen .....	62
Abb. 51: EIS-Messungen an gelöteten SIR Boards .....	63
Abb. 52: EIS-Messungen an gelöteten SIR Boards .....	64
Abb. 53: Mikroskopische Aufnahmen der Boardoberflächen .....	65
Abb. 54: Prinzip des elektrochemischen Rauschens (ECR) .....	65
Abb. 55: Prinzip der Berechnung der Rauschladungsmenge .....	66
Abb. 56: Abschnitte aus ungefilterten Rauschsignalen .....	67
Abb. 57: Rauschladungsmenge des Systems NiAu-24 mit Flussmittel FM E .....	68
Abb. 58: NiAu IPC-B-24 Boards mit Flussmittel FM E .....	68
Abb. 59: Rauschladungsmenge des Systems NiAu-24 mit Flussmittel FM E .....	69
Abb. 60: NiAu-IPC B-24-Boards mit Flussmittel FM E und FM I .....	70
Abb. 61: Rauschladungsmenge des Systems Cu IPC-B-24 .....	70
Abb. 62: Cu IPC B-24-Boards mit Flussmittel FM E und FM I .....	71
Abb. 63: Schematische Darstellung TOF-SIMS .....	72
Abb. 64: Mikroskopische Darstellung nach Alterung .....	73
Abb. 65: Mikroskopische Vergrößerung eines Dendriten nach Alterung .....	73
Abb. 66: Bilder der TOF-SIMS-Positionierkamera .....	74
Abb. 67: TOF-SIMS-Tiefenprofile der Au <sup>+</sup> -, Ni <sup>+</sup> - und K <sup>+</sup> -Ionen .....	75
Abb. 68: Mikroskopische Darstellung nach Alterung .....	75
Abb. 69: Bilder der TOF-SIMS-Positionierkamera .....	76

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Lotmaterialien und Klassifizierung .....	18
Tabelle 2: Ergebnis SIR-Test, nur Reflow-Flux .....	30
Tabelle 3: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten A, B, C und Wellen-Flussmittel A, B... 32	32
Tabelle 4: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten A, B, C und Selektiv-Flussmittel C .....	32
Tabelle 5: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten A, B, C, D und Wellen-Flussmittel D,G 33	33
Tabelle 6: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Selektivlöt-Flussmittel A .. 35	35
Tabelle 7: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Selektivlöt-Flussmittel C .. 36	36
Tabelle 8: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Selektivlöt-Flussmittel F... 37	37
Tabelle 9: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Wellenlötflussmittel G .....	38
Tabelle 10: manuelle Lötwärmebelastung .....	39
Tabelle 11: manueller Lötprozess: Prozessnachbildung mit Reworkstation .....	42
Tabelle 12: Maschinengestütztes Rework, nur Rework-Flussmittel .....	45
Tabelle 13: Fluxkomb. aus Rework-Flussmittel und Lotpaste .....	47
Tabelle 14: Parameter automatischer Reinigungsprozess .....	48
Tabelle 15: Rework-Flussmittel kombiniert mit Lotpaste nach erfolgter Reinigung... 50	50
Tabelle 16: Gegenüberstellung der elektrochemischen Messmethoden .....	55
Tabelle 17: Transfermaßnahmen für die direkt am PA beteiligten Firmen .....	82
Tabelle 18: Weitere Transfermaßnahmen .....	84

## 1 Einleitung

### 1.1 Anlass für den Forschungsantrag, Ausgangssituation

Das Ziel bei der Fertigung elektronischer Baugruppen ist es ein Produkt herzustellen, das die verabredeten Anforderungen von Qualität und Zuverlässigkeit erfüllt. Da eine fehlerfreie Produktion trotz aller Bemühungen noch immer nicht vollständig realisierbar ist (abhängig vom Fertigungsprozess liegen typische Fehlerraten bei 50...500ppm), werden Nacharbeits- und Reparaturlötprozesse durchgeführt. Im Nacharbeitsfall werden oftmals andere Flussmittel als in den Erstlötprozessen eingesetzt. Diese können sich vermischen und miteinander reagieren. Hier ist insbesondere unter Feuchteinfluss eine große Gefahr der Korrosion gegeben und somit eine Fehlfunktion oder sogar der Funktionsausfall der Baugruppe sehr wahrscheinlich.

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 auf einen Träger (Substrat, oftmals eine FR4-Leiterplatte) aufgetragen. Anschließend werden die SMD-Komponenten bestückt und in einem Durchlaufofen einem Reflow-Lötprozess unterzogen. Oftmals werden im Anschluss noch nötige THT-Komponenten (THT = Through Hole Technology, Durchsteckmontagetechnik) bestückt und in einem anschließenden Wellenlöt-, Selektivlöt- oder manuellen Lötprozess verarbeitet.

Häufig führen industrieübliche Toleranzen der Materialeigenschaften im Ausgangszustand und nach Lagerung, Positionierung im Lotpastendruck und in der Bestückung von Bauelementen, sowie Umgebungseinflüsse dazu, dass das Prozessfenster für sichere Baugruppenfertigung verlassen wird. Somit entstehen Fehler (z.B. Lötfehler wie Brückenbildungen, Versatz von Bauteilen, unvollständig gelötete Lötstellen, usw.), die die Funktion des Produkts beeinträchtigen oder sogar zum Funktionsverlust führen können. Um die Funktion wieder herzustellen, sind Korrekturmaßnahmen (Nacharbeit = Rework) erforderlich [1], [2].

In Deutschland werden überwiegend hochwertige Elektronikprodukte gefertigt, bei denen die Kosten für die Ersatzfertigung einer defekten Baugruppe jene der Nacharbeit meist um ein Vielfaches übertreffen. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass die Nacharbeit wesentlich schneller durchgeführt werden kann als eine Neufertigung. Dadurch kann das Produkt schneller dem Kunden zugeführt werden. Fehlerhafte Baugruppen werden daher wegen der hohen Wertschöpfung repariert, anstatt durch eine neue Baugruppe ersetzt zu werden. Die Nacharbeit ist somit nach wie vor notwendiger und fester Bestandteil des Fertigungsprozesses elektronischer Baugruppen.

Um die im normalen Fertigungsprozess vorhandenen Oxidschichten auf dem Lot und den Lötflächen zu entfernen, wird ein Flussmittel benötigt. Im Nacharbeitsfall wird das für diesen Prozess im jeweiligen Fertigungsbetrieb zugelassene sogenannte „NoClean“-Selektivflussmittel eingesetzt. Dieses ist von seiner chemischen Zusammensetzung optimal an die Aufgabenstellung und die jeweiligen eingesetzten selektiven Lötprozesse angepasst, wie z.B. manuelles Löten von niedrigpoligen SMD- oder einfachen THT-Komponenten, selektives Wellenlöten von THT-Komponenten,



maschinengestütztes Nacharbeitslöten von vielpoligen SMD-Komponenten mit ggf. verdeckt auf der Unterseite liegenden Anschlüssen. „NoClean“ bedeutet hierbei, dass es sich um ein Flussmittel handelt, bei dem die nach dem Lötprozess vorhandenen (wenigen) Rückstände nicht mehr durch Reinigung entfernt werden müssen, da sie keine korrosiven Stoffe mehr enthalten, bzw. diese in einer Harzmatrix fest eingebettet und für die Baugruppe unschädlich sind. Voraussetzung ist, dass alle Flussmittelbestandteile auf Löttemperatur erwärmt werden. Als Korrosion wird hier die elektrochemische Migration verstanden, bei der unter Feuchteinfluss auf kontaminierten Leiterplatten in einem bestehenden Potentialfeld durch Ionenwanderung eine Kurzschlussbrücke zwischen metallischen Leitern entsteht (Abb. 1 sowie Abb. 7 - Abb. 9) [3].

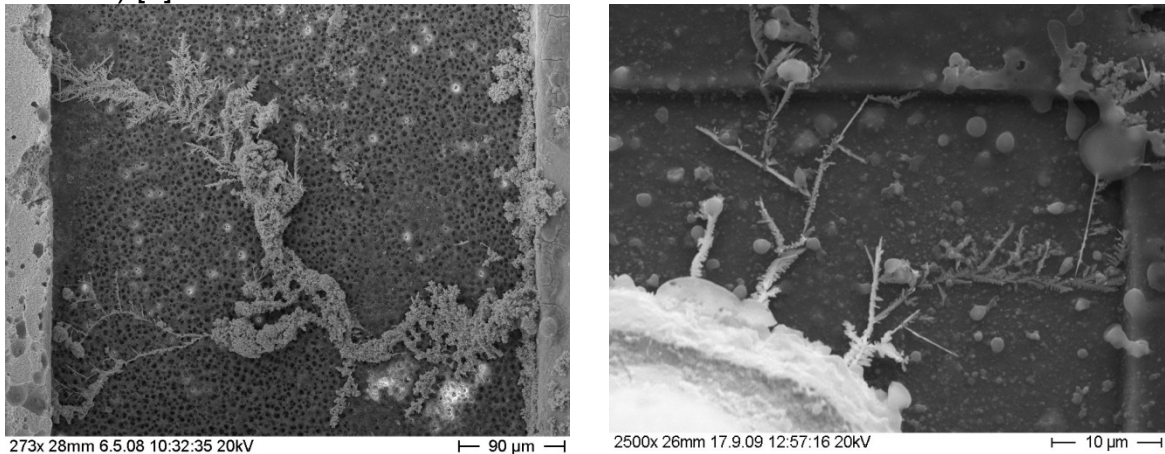


Abb. 1: Beispiele für elektrochemische Migration und Dendritenbildung (REM-Aufnahmen, FhG ISIT)

Während des bleifreien selektiven Nacharbeitslötprozesses stellt sich eine unterschiedliche zeitliche aber vor allem auch räumliche Temperaturverteilung auf der Baugruppe ein. An der Lötstelle werden bei Einsatz eines SnAgCu-Lotes mit einer Schmelztemperatur von ca. 220 °C typischerweise 230...250 °C erreicht, in der näheren Umgebung reichen die Temperaturen bis zu 120...160 °C und weiter entfernt bleibt je nach Lötprozess sogar nur Raumtemperatur bestehen. Somit erreichen nicht alle mit Flussmittel benetzten Bereiche die für die Umwandlung des Flussmittels in unkritische Bestandteile notwendige Löttemperatur. Teilbereiche der Baugruppe erreichen eine Maximaltemperatur unterhalb des Wirkungsbereichs der Flussmittelaktivatoren. Daher verbleiben undefinierte und möglicherweise migrationsfördernde Rückstände auf der Baugruppe. Es ist nicht bekannt, welche Rückstände (Menge und Zusammensetzung) nach dem Nacharbeitslöten auf der Baugruppe verbleiben.

Die meisten Rückstände von Flussmitteln, welche nach dem Lötvorgang typischerweise auf der Leiterplattenoberfläche und an Komponenten verbleiben, sind aufgrund freiliegender Carbonsäuren hygroskopisch und begünstigen so elektrochemische Migration bzw. Korrosion. Klimatische Bedingungen wie hohe Temperaturen und Luftfeuchte sowie Temperaturwechsel, die zu einer Betauung führen können, bewirken häufig Schäden durch elektrochemische Migration, die zu einem irreversiblen Schaden auf der Baugruppe führen. Dies führt in vielen Fällen zu Folgeschäden am Gesamtsystem und zu dessen Ausfall mit teilweise gravierenden Auswirkungen.

Für den Nacharbeitsfall liegen keine allgemein gültigen und zugänglichen Informationen über das Langzeitverhalten unterschiedlicher Flussmittelmischungen unter Feuchteeinwirkung vor. Dadurch entsteht eine Wissenslücke für das Migrationsrisiko, die von dem vorliegenden Forschungsprojekt geschlossen werden soll. Kann ein Nacharbeitsprozess jedoch sicher und qualifiziert durchgeführt werden und entstehen dadurch zuverlässige Systeme, so besteht die Möglichkeit diesen Nacharbeitsprozess auch in Branchen als zugelassenen Arbeitsschritt einzuführen, in denen er zurzeit verboten ist. Dies betrifft insbesondere die Automobilindustrie, in der Nacharbeitsprozesse größtenteils aufgrund fehlenden Nachweises der Unbedenklichkeit nicht durchgeführt werden. Somit entsteht neben der höheren Wertschöpfung für den Hersteller durch weniger produzierten Schrott eine ressourceneffiziente Fertigung, die schonend mit begrenzten Rohstoffen umgeht.

Für die Risikoanalyse auf elektrochemische Migration 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-004A, Prüfmethode IPC-TM-650 2.6.3.3, [4] bzw. nach J-STD-004B, Prüfmethode IPC-TM-650 2.6.3.7 [5] als gängige Prüfung eingesetzt. Der SIR-Test erfordert relativ lange Mess- und Wartezeiten. Für eine übliche Prüfung über 168h = 7d wird in Summe typischerweise ein Bearbeitungszeitraum incl. Vorbereiten der Prüflinge, Lötprozesssimulation, Auslagerung und Messung, optische Inspektion und Auswertung der Ergebnisse von mindestens 10 Tage benötigt. Dies steht somit im Gegensatz zu häufig vom Kunden schnell (innerhalb von 48h) erwarteten Ergebnissen zu Ursachen und Ausmaß der Migration auf elektronischen Baugruppen. Zudem liefert der SIR-Test nur ein Endergebnis und keine Aussagen zu Ursachen und zeitlichem Verlauf der Migration.

Es gibt derzeit keine Messmethode, die Korrosion (elektrochemische Migration) auf elektronischen Baugruppen schnell und zuverlässig innerhalb weniger Tage oder sogar Stunden nachweisen kann.

Messtechnische Verfahren wie die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und das elektrochemische Rauschen (ECR) haben bereits auf dem Gebiet der Korrosionsuntersuchung von Schutzbeschichtungen auf Metallen gute Ergebnisse erzielt. Es ist auch denkbar, mit diesen Methoden sehr früh eine elektrochemische Migration nachzuweisen. Diese Verfahren werden aber (noch) nicht zur Untersuchung der elektrochemischen Migration auf elektronischen Baugruppen eingesetzt.

Die wissenschaftlich technische und besonders für KMU wirtschaftliche Herausforderung und somit Anlass für den Forschungsantrag ergeben zusammengefasst folgende Aspekte:

- Im Nacharbeitsfall elektronischer Baugruppen verbleiben Flussmittelreste unbekannter chemischer Zusammensetzung, die ein nicht kalkulierbares Risiko für elektrochemische Migration darstellen.
- Zur Risikoanalyse auf elektrochemische Migration wird zurzeit standardmäßig der SIR-Test eingesetzt, der keine schnelle Aussage und zudem keine Information über den Verlauf der Migration liefert.
- Bekannte Messverfahren aus der Korrosionsuntersuchung von Schutzbeschichtungen (EIS und ECR) können möglicherweise bei entsprechender Anpassung zur Analyse elektrochemischer Migration auf elektronischen Baugruppen eingesetzt werden und dann schnellere und detaillierte Ergebnisse liefern.

## 1.2 Stand der Forschung

Im Folgenden werden die Untersuchungsmethoden vorgestellt, der Mechanismus der elektrochemischen Migration (Korrosion in der Mikroelektronik) sowie Aufgabe und Problemstellung beim Einsatz von Flussmittel im Weichlötprozess erläutert.

### *SIR-Test*

Zur Feststellung von Migrationseffekten auf elektronischen Baugruppen wird üblicherweise der SIR-Test nach dem JEDEC-Standard J-STD-004 benutzt. Hier wird die Veränderung des Gleichstromisolationswiderstandes von Substratmaterialien für elektronische Baugruppen durch die Einwirkung von Flussmitteln, die in flüssiger, pastöser oder fester Form appliziert werden, bestimmt.

Das zu untersuchende Medium wird auf einem Testboard mit metallischen Fingerstrukturen, bestehend aus unbehandeltem Kupfer, auf einem Layout z.B. gemäß der Norm IPC-B-24 [6] (Abb. 2) aufgetragen.

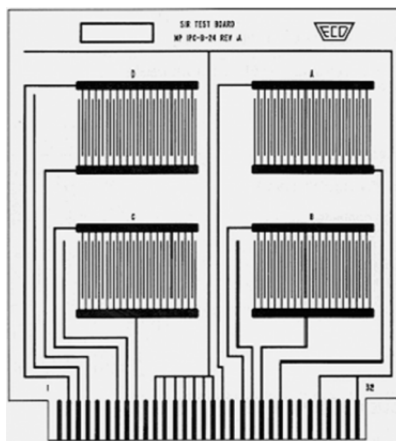


Abb. 2: SIR-Testboard nach IPC-B-24

Nach dem vorgesehenen Lötprozess wird der Prüfling in einem Belastungsklima mit definierter Temperatur und Feuchtigkeit (z.B. 85 °C, 85% relative Luftfeuchte) und anliegender "Betriebsspannung" für mindestens 168 h ausgelagert. Hierbei wird der elektrische Widerstand bei einer festgelegten Messspannung von z.B. 100 V DC (die nicht notwendigerweise mit der Betriebsspannung bei Auslagerung übereinstimmt) zwischen diesen Strukturen nach 24 h, 96 h und 168 h, im Regelfall jedoch häufiger, automatisiert gemessen. Der Oberflächenisolationswiderstand liegt im unbelasteten Zustand bei einigen GΩ. Er darf am Ende der Prüfung nicht unter 100 MΩ fallen. Typische Widerstände im Fall von elektrochemischer Migration liegen etwa im 100 Ω - MΩ-Bereich.

Die gesamten Messzeiten liegen in den Größenordnungen mehrere Tage bis Monate, je nach zu Grunde gelegter Prüfanforderung. Der SIR-Test ist durch seine Mess- und Bearbeitungszeit eine langwierige Untersuchungsmethode, was eine direkte Anwendung in industriellen Fertigungs- oder Bewertungsprozessen, insbesondere bei der Fragestellung zur Bewertung einer aktuellen Nacharbeitsaufgabe erschwert. Man erhält zudem kaum Aussagen über Ursachen und Verlauf der Migration.

Die Fingerstrukturen nach IPC-24-B weisen eine Fingerbreite von 400 µm und Fingerabstände von 500 µm auf. Mit diesen relativ großen Dimensionen können jedoch nicht mehr die Prüfanforderungen heutiger Fine Pitch Komponenten mit Rastermaßen von 0,5 oder 0,4mm (was einem Abstand der Leiterzüge von 0,2...0,3mm entspricht) erfüllt werden. Um hier den aktuellen Anforderungen heutiger Baugruppenfertigung gerecht zu werden, sollen auch SIR-Teststrukturen mit Fingerabständen von 200 µm erstellt und geprüft werden. Des Weiteren werden SIR-Test-Analysen zurzeit nur auf Teststrukturen durchgeführt und nicht auf bereits gefertigten Baugruppen. Somit ist kein Test auf reparierten Baugruppen vorgesehen. Im vorliegenden Projekt sollen Prüfstrukturen auch auf funktionellen Baugruppen integriert werden, um hier weitere Erkenntnisse zu erlangen.

Insgesamt liefert der gemessene Widerstandwert beim SIR-Test jedoch nur wenige Informationen über den Migrationsvorgang. Der Schädigungsprozess (Migration und Dendritenbildung) fängt aber viel früher an, als er nachgewiesen wird.

#### *elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)*

Alternative Untersuchungsmethoden, die für Untersuchungen an elektronischen Baugruppen geeignet sein könnten, sind die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und das elektrochemische Rauschen (ECR). Sie sind viel empfindlicher als der SIR-Test und ermöglichen eine frühzeitige Erkennung von Migrationsvorgängen.

Typischerweise wird mit der elektrochemischen Impedanzspektroskopie die Schutzwirkung von Schutzbeschichtungen untersucht. Einem elektrochemischen System bestehend aus metallischem Werkstoff (entspricht der Lötmetallisierung bzw. dem Kupfer der Kammstruktur) und Elektrolyt (entspricht dem Flüssigkeitsfilm, der sich aufgrund des feuchten Klimas im Klimaschrank auf dem metallischen Werkstoff bildet) wird ein frequenzmoduliertes sinusoidales Potentialsignal aufgeprägt und die Stromantwort gemessen (Abb. 3). Aus Potentialanregung und Stromantwort lässt sich frequenzabhängig der komplexe Widerstand, also die Impedanz bestimmen und in Form von Spektren des Betrages der Impedanz  $|Z|$  und der Phasenverschiebung abbilden.

Da die Amplitude der Potentialanregung klein gehalten wird (üblicherweise 10 mV), ist EIS als beeinflussungsfreie Messmethode anzusehen. Die Messung kann somit vermutlich nicht nur an typischen SIR-Teststrukturen sondern auch auf der Baugruppe / dem Bauelement angewendet werden und z. B. dem SIR-Test einfach überlagert werden. EIS liefert somit weit mehr und, da es sich um eine sehr empfindliche Messmethode handelt, ggfs. auch viel früher Informationen über den Schädigungszustand und einer möglichen Entwicklung von elektrochemischer Migration.

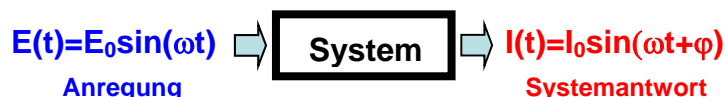


Abb. 3: Prinzip der elektrochemischen Impedanzspektroskopie EIS

EIS-Messungen werden meist nach der 3-Elektrodenmethode durchgeführt, welche die gängigste Zellanordnung für Untersuchungen in der Elektrochemie ist (Abb. 4). Es ist aber auch eine Durchführung nach der 2-Elektrodenmethode möglich, indem

das Bezugspotential mit der Gegenelektrode kurzgeschlossen wird. Maßgeblicher Unterschied ist, dass bei der 3-Elektrodenmethode das Messsignal allein auf den elektrochemischen Vorgängen an der Arbeitselektrode beruht, während bei der 2-Elektrodenmethode die elektrochemischen Vorgänge beider Elektroden zum Messsignal beitragen. Diese Anordnung ist also grundsätzlich auf den Messaufbau beim SIR-Test übertragbar, wobei die 2 Kämme die beiden Elektroden darstellen (vgl. Abb. 4, rechte Seite).

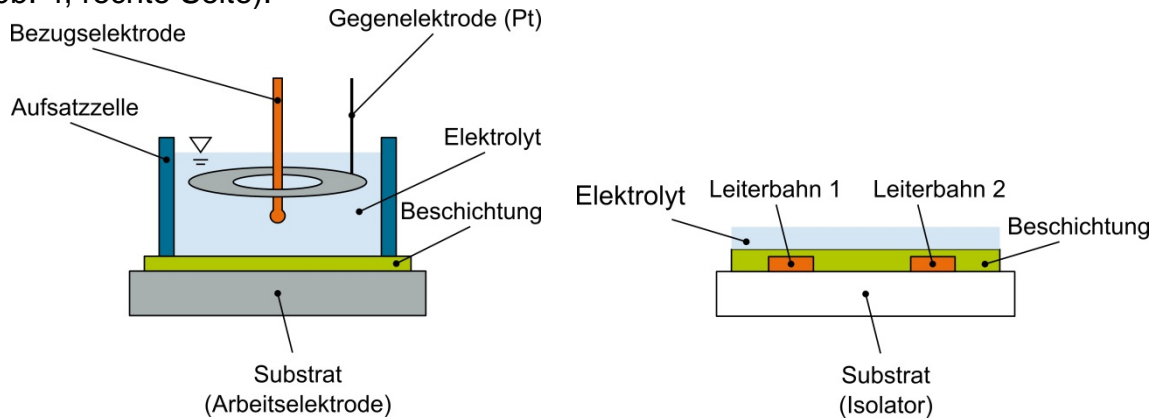


Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Messzelle zur Messung der elektrochemischen Impedanz. Links: 3-Elektrodenmethode (Beispiel Beschichtungen). Rechts: 2-Elektrodenmethode mit eingebetteten Elektroden/Leiterbahnen. Es können Proben mit und ohne Beschichtung untersucht werden.

Bei Verwendung von Aufsatzmesszellen (Abb. 4 links), können aus den Spektren durch die Anpassung sogenannter Ersatzschaltbilder die für Korrosion verantwortlichen kapazitiven und resistiven Anteile ermittelt werden, aus denen wiederum wichtige Parameter zur Beschreibung des Korrosionsvorganges abgeleitet werden können (Abb. 5). An Hand der Veränderungen der dielektrischen und ohmschen Eigenschaften können die Ausprägungen z. B. von Barrierewiderständen, Polarisationswiderständen, Schichtbildungs- und Adsorptionsvorgängen, sowie Stofftransportprozesse wie Diffusion und Migration bestimmt werden [7], [8], [9].

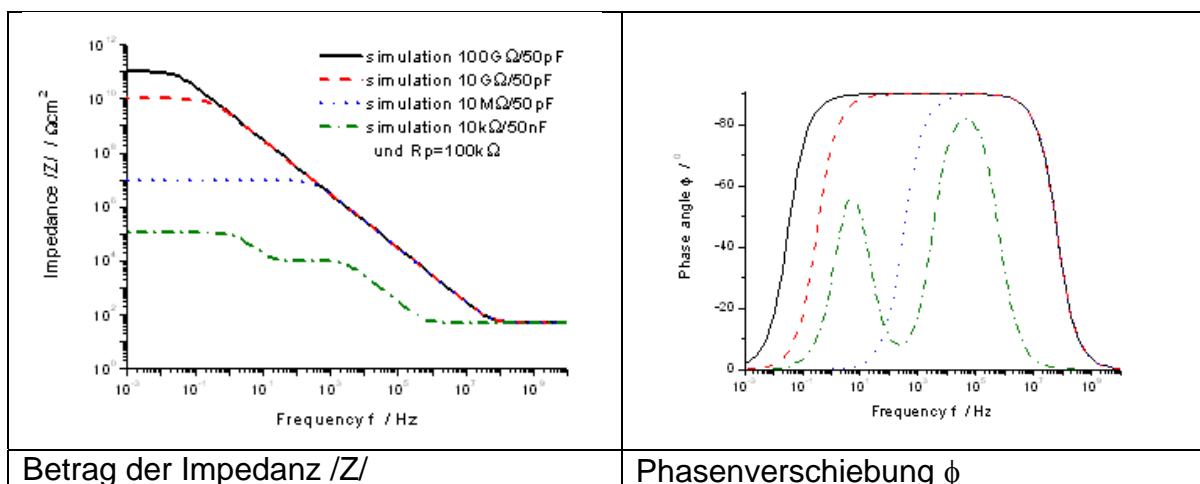


Abb. 5: Simulation von Ersatzschaltbildern für defektfreie und defektbehaftete Beschichtungen

Aber auch wenn die Voraussetzungen für die Anwendung von Ersatzschaltbildern zur Auswertung nicht gegeben sind, können aus den zu unterschiedlichen Zeiten gemessenen Spektren wertvolle Informationen entnommen werden. So geht der Betrag der Impedanz  $|Z|$  für niedrige Frequenzen in ein Ohm'sches Verhalten über und daher kann der bei der niedrigsten Frequenz gemessene  $|Z|$ -Wert als qualitatives Maß für den Gesamtwiderstand des Systems herangezogen werden. Gegebenenfalls lassen sich Werte zur Berechnung von Kapazitäten ermitteln, wenn z. B. der Phasenwinkel  $90^\circ$  entspricht [10].

Auch lässt sich grundsätzlich aus der zeitlichen Veränderung der gemessenen Spektren ein allgemeines Korrosions- und Degradationsverhalten ableiten.

Das Ziel des Projektes ist es, durch richtige Interpretation der gemessenen Ergebnisse, speziell der zeitlichen Veränderung der gemessenen Spektren und des Gesamtwiderstandes bzw. seiner Veränderung, frühzeitig eine Aussage zur beginnenden Migration machen zu können. Außerdem soll geprüft, inwieweit Strukturen definiert werden können, die eine Anwendung von Ersatzschaltbildern möglich machen.

#### *Elektrochemisches Rauschen (ECR)*

Beim Elektrochemischen Rauschen (ECR) werden Fluktuationen der beiden Systemgrößen Strom und Potential ohne äußere Beeinflussung des Korrosionssystems (das System wird nur "belauscht") 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 [11], [12], [13], [14], [15]. In einem vorhergehenden IGF-Projekt wurde gezeigt, dass ECR besonders gut zur Kurzzeitbewertung des Korrosionsschutzverhaltens von Beschichtungen geeignet ist und damit die Entwicklungszeit von Lacken sehr effektiv verkürzen kann [16]. 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 diese Fluktuationen aufweist (Abb. 6).

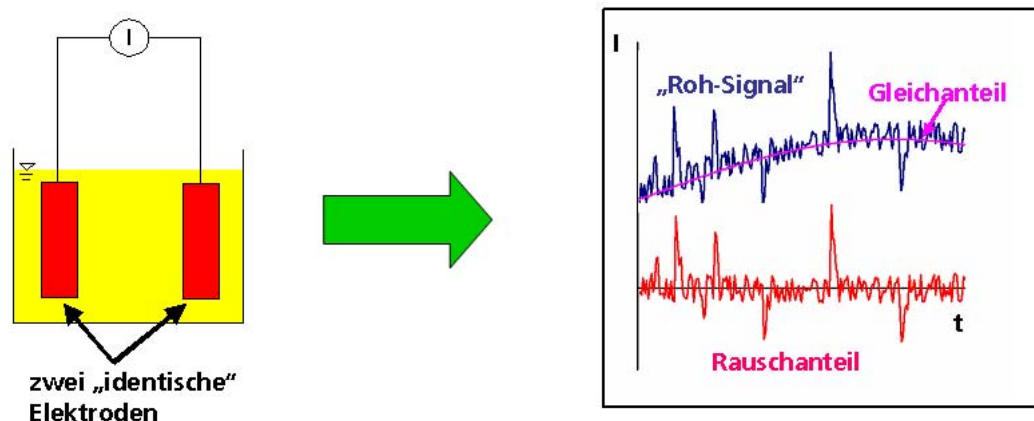


Abb. 6: Schematische Darstellung des Messprinzips des elektrochemischen Stromrauschens

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. 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) 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. 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 [11], [13], [15]. Da das Rauschen in Echtzeit erfasst wird, gelingt der Informationsgewinn je nach angewandeter Auswertemethode nahezu online.

EIS und ECR haben in Ergänzung zum SIR-Test entscheidende Vorteile. Gegenüber dem phänomenologischen Charakter des SIR-Tests liefern EIS und ECR Informationen über die grundlegenden, mechanistischen Prozessparameter des Korrosionsvorganges. Der für den in diesem Projekt ausschlaggebende Anlass, Alternativen zum SIR-Test zu suchen, ist allerdings der ganz besondere Vorteil, dass diese Methoden die Prüfzeit erheblich verkürzen können, indem Korrosionsvorgänge frühzeitig detektiert werden. Zudem wird der Korrosionsprozess als solches kaum bis gar nicht beeinflusst.

### *Korrosion*

Die DIN EN ISO 8044 [17] definiert Korrosion wie folgt: „Korrosion ist die Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffs bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines mechanischen Bauteiles oder eines ganzen Systems führen kann. In den meisten Fällen ist diese Reaktion elektrochemischer Natur, in einigen Fällen kann sie jedoch auch chemischer oder metallphysikalischer Natur sein.“

### *elektrochemische Migration*

Die typische Korrosionserscheinung in der Mikroelektronik, die elektrochemische Migration, soll im Folgenden erläutert werden. Sie wird in drei Schritte aufgeteilt (siehe z.B. [3], [18]), deren Ablauf im Folgenden dargestellt ist (Abb. 7 - Abb. 9). Voraussetzung für das Brückenwachstum bei der elektrochemischen Migration ist die Anwesenheit von Feuchte, eine Potentialdifferenz zwischen benachbarten stromführenden Leitern und ein zur Migration neigender Metallisierungswerkstoff.

1) Anodische Metallauflösung

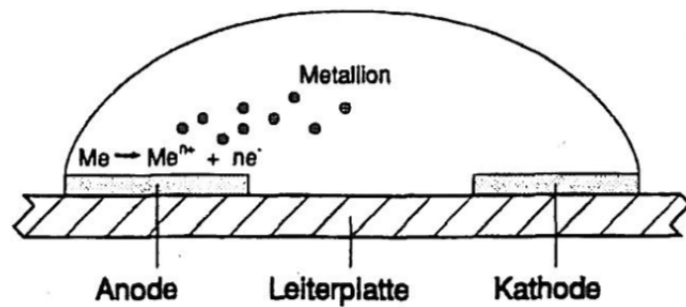


Abb. 7: Anodische Metallauflösung [3]

Auf Grund der angelegten äußeren Potentiale (nicht der Eigenpotentiale der Elemente gemäß der Spannungsreihe) werden alle beteiligten metallischen Werkstoffe derart stark polarisiert, dass sie sich in Form von Ionen aus dem Metallverbund herauslösen können. Verunreinigungen auf der Leiterplatte, insbesondere Chlorid, erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Brückenbildung.

2) Wanderung der Metallionen

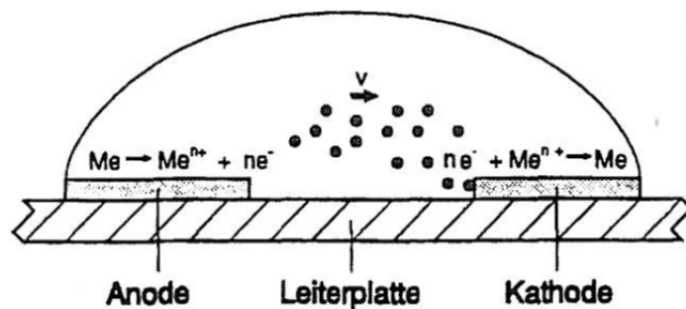


Abb. 8: Wanderung der Metallionen [3]

Es findet eine Wanderung der gelösten Metallionen statt. Dabei ist die Leitfähigkeit des Elektrolyten die entscheidende Triebkraft. Die Driftrichtung der Ionen hängt entweder vom Konzentrationsgradienten oder vom Potentialgradienten des Elektrolyts ab, je nachdem welcher von diesen dominierend ist. Bei großer Verunreinigung kann somit auch eine Diffusion der Ionen entgegen des elektrischen Feldes erfolgen.

3) Metallionenabscheidung

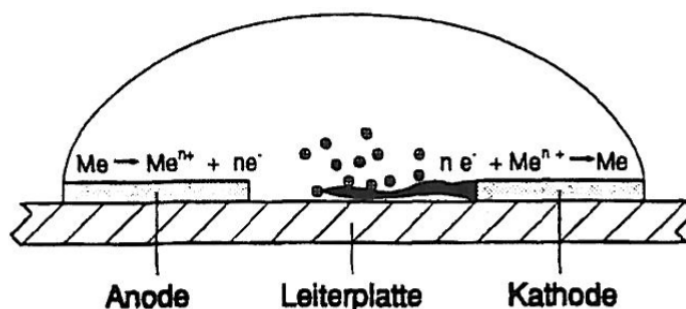


Abb. 9: Metallionenabscheidung [3]



Die Abscheidung findet bevorzugt an Orten großer Feldstärken, also z.B. an Spitzen oder Kanten, statt. Dies führt zum Ausbau von oberflächlichen Gitterstörungen, zu Mikrorauheiten und über Pyramidenwachstum zur Ausbildung dendritischer Strukturen (siehe Abb. 1). Sobald eine leitfähige Verbindung zwischen Anode und Kathode hergestellt ist, kommt es zum Kurzschluss und damit zum Funktionsausfall des Systems.

#### *Lötprozess und Flussmittel*

Der Lötprozess in der Fertigung elektronischer Baugruppen wird in einem für den jeweiligen Prozess typischen Temperatur-Zeitfenster durchgeführt. Dies können wenige Sekunden (1...3 Sekunden) beim manuellen Löten mit dem HandlötKolben sein, oder bis zu mehrere Minuten (typischerweise 5-7 Minuten) beim Konvektionslöten in einem Durchlaufofen. Hierbei wird an der Lötstelle eine Maximaltemperatur von ca. 230...250°C erreicht, die beim Konvektionslöten bis zu 90s lang gehalten wird. So ist bei stark unterschiedlichem Wärmebedarf der einzelnen Komponenten und damit ungleichmäßiger Temperaturverteilung auf der Baugruppe die Benetzung der Lötflächen möglich. Zu beachten ist auch die Lötwärmebeständigkeit der Materialien die das Lötprofil in Dauer und Höhe begrenzt.

Die Verwendung von Flussmitteln während des Lötvorgangs dient dazu, die Benetzung des Lotes auf den metallischen Lötflächen zu gewährleisten und damit die stoffschlüssige typischerweise 1 µm bis 10 µm starke intermetallische Phase zwischen Lot und Anschlussflächen von Bauelement und Substrat zu erzeugen. Hierzu muss das Flussmittel Störfaktoren für eine einwandfreie Benetzung, wie z.B. Verunreinigungen auf den zu lötenen Metalloberflächen, Oxide, Fette, Handschweiß und Fingerabdrücke beseitigen. Die bei der Lagerung und auch während des Lötvorgangs bei erhöhten Temperaturen entstehenden Metalloxide kann das Lot nur schwer bis gar nicht benetzen. Das Flussmittel entfernt diese Oxide und verhindert durch Bedeckung der Lötstelle deren erneute Oxidation bzw. Kontamination während des Lötvorgangs.

Elektronikflussmittel sind üblicherweise aus Lösungsmittel, Additiven und Feststoffen zusammengesetzt. Die Flussmittelbestandteile können je nach Hersteller und Anwendung stark variieren. Als Lösungsmittel (Träger der aktiven Substanzen) wird Alkohol (z.B. Isopropanol) oder Wasser verwendet. Additive machen aus dem Gemisch z.B. eine schablonendruckfähige Lotpaste oder ein flüssiges Selektivflussmittel, bei dem auch nach längeren Standzeiten keine Entmischung der Flüssigkeitsbestandteile erfolgt. Feste Bestandteile sind z.B. synthetische Harze, die als Bindemittel dienen und Aktivatoren, organische (z.B. Adipinsäure) und/oder anorganische Säuren oder Säureanteile wie Zinkchlorid oder Ammoniumchlorid, die die Oxide entfernen sollen. Üblich sind zudem halogenierte Kohlenwasserstoffe, die die Oberfläche von Fetten befreien sollen.

Die Flussmittel haben je nach Zusammensetzung ein vorgegebenes Lötprozessfenster, in dem sich der Lötprozess abspielen muss (Abb. 10), [19]. 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.

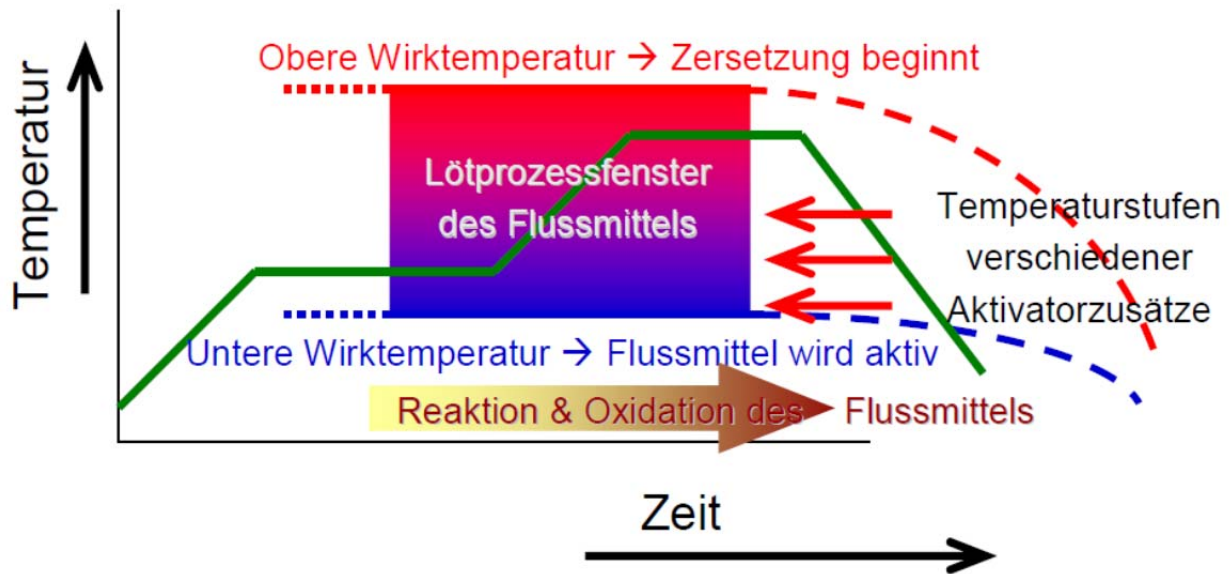


Abb. 10: Lötprozessfenster des Flussmittels [19]

Ein Nacharbeitslötprozess bedeutet im Allgemeinen eine selektive Erwärmung der Baugruppe. Nur an der Lötstelle muss die Baugruppe die notwendige Lötstellentemperatur zur Verbindungsbildung erreichen. Weiter entfernt gelegene Bereiche auf der Baugruppe bleiben kalt oder erreichen nur eine deutlich unter der Löttemperatur liegende Maximaltemperatur. Die hier eingebrachte Lötwärme reicht möglicherweise nicht aus, um das in einem Nacharbeitslötprozess eingesetzte Flussmittel zu verbrauchen, so dass undefinierte, schädliche Bestandteile auf der Baugruppe verbleiben können.

Des Weiteren können Flussmittelmischungen entstehen, wenn verschiedene Lötwerkstoffe unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen bei aufeinander folgenden Lötprozessen verwendet werden. Die unterschiedlichen, zudem meist unbekannt, Bestandteile einer auf den Bauteilen bzw. auf einer Baugruppe verbliebenen No-Clean-Flussmittelmischung können sich verschieden ausgeprägt und besonders bei Mischungen mit unbekannt, Anteilen bisher nicht vorhersagbar an der elektrochemischen Migration beteiligen.

Insbesondere wenn ungeeignete Reinigungsprozesse vor oder nach dem Nacharbeitsprozess durchgeführt werden, bei denen Harze nur angelöst und Aktivator freigelegt werden, kann dies im späteren Betrieb auf einer Baugruppe zum Ausfall durch elektrochemische Migration führt.

### 1.3 Aufgabenstellung

Aufgabe ist die systematische Untersuchung des Einflusses von sogenannten „no-clean“-Flussmitteln auf das Korrosionsverhalten (insbesondere elektrochemische Migration) von reparierten elektronischen Baugruppen.

## **2 Forschungsziel und Lösungsweg**

### **2.1 Angestrebte wissenschaftlich-technische Ergebnisse**

Ziel des Projektes ist eine systematische Untersuchung des Risikopotentials auf elektrochemische Migration im Nacharbeitsfall elektronischer Baugruppen unter Berücksichtigung des Einsatzes von Lötwerkstoffen mit unterschiedlichen chemischen Flussmittelzusammensetzungen. Die Untersuchungen sollen grundlegende Erkenntnisse über die Beeinflussung des Migrationsverhaltens von Baugruppen durch Flussmittelmischungen in Abhängigkeit von Nacharbeitslötprozessen erbringen.

Die für Schutzbeschichtungen bekannten und üblichen Untersuchungsmethoden ECR und EIS sollen für den Nachweis der elektrochemischen Migration bei elektronischen Baugruppen übertragen werden. Hiermit soll die Grundlage geschaffen werden, eine deutliche schnellere und umfassendere Untersuchungsmethode zu etablieren. Das Ziel des Projektes ist es, durch richtige Wahl der Prüfstrukturen und Interpretation der gemessenen Ergebnisse, speziell der zeitlichen Veränderung der gemessenen Spektren und des Gesamtwiderstandes bzw. seiner Veränderung frühzeitig eine Aussage zur beginnenden elektrochemischen Migration machen zu können.

### **2.2 Angestrebte wirtschaftliche Ergebnisse (Nutzen für KMU)**

Wird bei der Nacharbeit mit einem Lötwerkstoff gearbeitet, der hinsichtlich seiner Zusammensetzung mit dem vorher verwendeten harmoniert, so könnte das die Gefahr der elektrochemischen Migration auf elektronischen Baugruppen deutlich herabsetzen. Die Folge ist eine verminderte Ausfallquote elektronischer Baugruppen und Systeme durch migrationsbedingte Schäden. Kann dieser Nachweis erbracht werden, so kann auf Reinigungsprozesse verzichtet werden und es besteht hier ein direktes Einsparungspotenzial im Herstellungsprozess. Die Wertschöpfung erhöht sich bzw. das Produkt kann preisgünstiger angeboten werden, wodurch sich die Marktposition des Anbieters verbessert.

Werden in Fertigungsbereichen, in denen bisher keine Nacharbeit zugelassen ist, Nacharbeitsprozesse qualifiziert und in den Fertigungsprozess integriert, so kann insbesondere hier eine große Wertschöpfung realisiert werden.

Eine verminderte Ausfallquote bzw. überhaupt zugelassene Nacharbeitsschritte leisten letztendlich auch einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz der Produktionskette.

Insbesondere KMU haben einen großen wirtschaftlichen Nutzen von diesen Untersuchungen, da es im Wesentlichen diese Unternehmen sind, die in Deutschland die Fertigung und Nacharbeit elektronischer Baugruppen durchführen.

### **2.3 Innovativer Beitrag**

Die Innovation liegt in der systematischen Untersuchung des Risikopotentials unbekannter Flussmittelmischungen bleifreier Lote auf die elektrochemische Migration in Abhängigkeit von Nacharbeitslötprozessen.

Des Weiteren ist die Übertragung etablierter Prüfmethodik (SIR-Test) auf die Prüfmethoden ECR und EIS zum Nachweis der elektrochemischen Migration bei elektronischen Baugruppen innovativ und wird bisher nicht eingesetzt.

Somit liegt hier der innovative Beitrag zum einen in der Weiterentwicklung eines Verfahrens um den geänderten technologischen Anforderungen moderner Baugruppen zu entsprechen und zum anderen in der grundsätzlichen Betrachtung der Übertragung von bestehenden Untersuchungsmethoden auf neue Anwendungsgebiete.

## 2.4 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Das Vorhaben wird in Arbeitspakete unterteilt, die im folgenden Flussdiagramm dargestellt sind (Abb. 11). In Klammern steht jeweils der Projektpartner an erster Stelle, der diesen Punkt im Wesentlichen bearbeitet, da die jeweilige Aufgabe zu seinen Kernkompetenzen zählt. Einzelne Teilaufgaben werden von beiden Projektpartnern bearbeitet. Zu Beginn der Projektlaufzeit wird mit dem PA ein Kick-Off Meeting durchgeführt, bei dem auf Basis der Vorschläge des Projektantrages Materialien, Versuche und Testvehikel abschließend definiert werden.

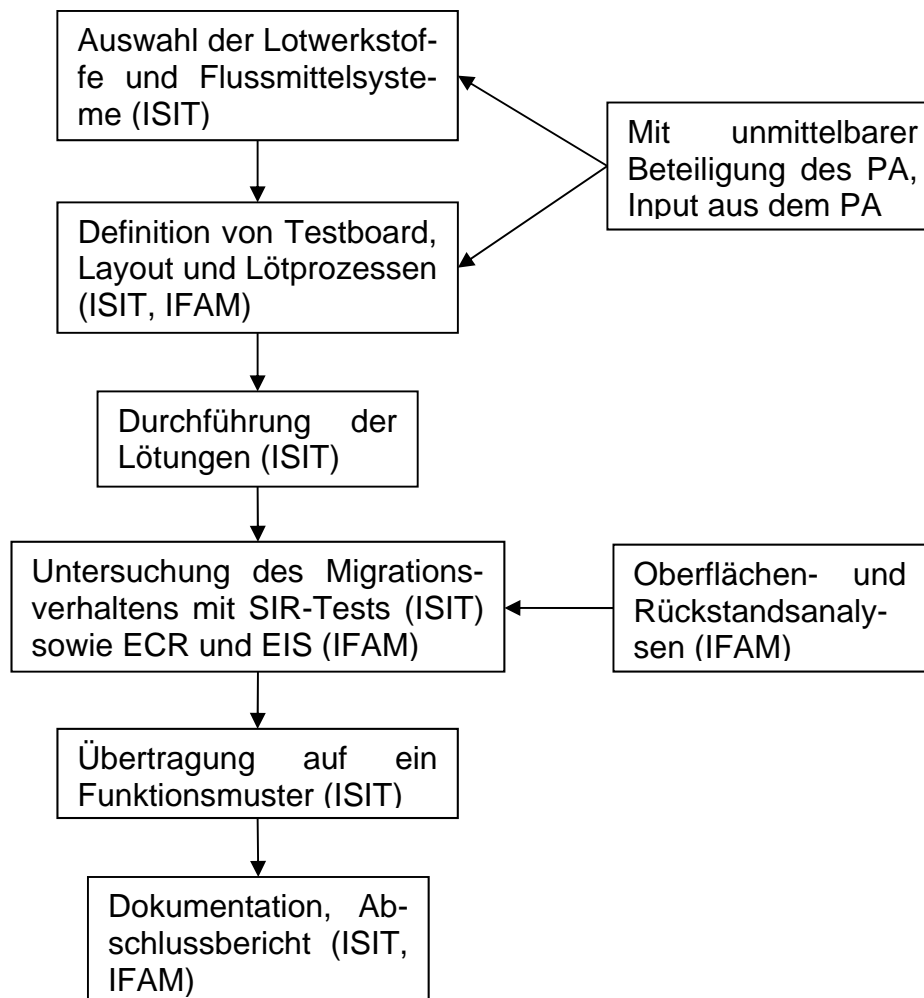


Abb. 11: Flussdiagramm zum Projektablauf

### 3 Durchführung und Ergebnisse

#### 3.1 Auswahl von Lötwerkstoffen und Flussmittelsystemen

In Absprache mit dem PA werden Lotmaterialien definiert und aus dem PA bereitgestellt, siehe Tabelle 1. Hierbei liegt der Fokus auf den zurzeit gängigsten Materialien. Um die Ergebnisse zu anonymisieren, werden die Materialien im Folgenden nicht mit ihren Handelsbezeichnungen benannt.

Es werden vier Lotpasten mit zwei Legierungsvarianten, SAC305 sowie SnCu0.7 mit Mikrolegierungsanteilen, mit den Flussmittelformulierungen ROL0 bzw. REL0 untersucht.

Flussmittel für Wellen- und Selektivlöten sowie das Röhrenlot zum Handlöten werden als RO- bzw. RE-Variante mit einer Aktivierung L0 bzw. M0 und M1 eingesetzt, siehe Tabelle 1.

Da es teilweise Materialähnlichkeiten gibt, werden nicht alle Materialien und Materialkombinationen permutiert.

Synonym der Lotpaste	Klassifizierung	Synonym des Flussmittels	Klassifizierung	Synonym des Röhrenlots	Klassifizierung
LP-A	ROL0	FM-A	ROL0	RL-A	REL0
LP-B	ROL0	FM-B	ROL0	RL-B	ROM1
LP-C	REL0	FM-C	REL0	RL-C	REM1
LP-D	REL0	FM-D	REL0	RL-D	ROL0
		FM-E	REM1	RL-E	ROM1
		FM-F	REL0	RL-F	REM1
		FM-G	REL0		
		FM-H	REL0		
		FM-I	REM1		
		FM-J	ROL1		
		FM-K	REM0		
		FM-L	REL0		
		FM-M	ROL0		

Tabelle 1: Lotmaterialien und Klassifizierung

### 3.2 Definition von Testboard, Layout und Lötprozessen

Für das Testboard werden Strukturen nach IPC-B-24 mit 400µm Linienbreite und 500µm Spacing sowie Strukturen nach IPC-B-52 mit 200µm Linienbreite Spacing verwendet, siehe Abb. 12. Die Leiterplatten werden aus FR4 mit einem  $T_g$  von 130°C in den Endmetallisierungen Cu und NiAu aufgebaut.

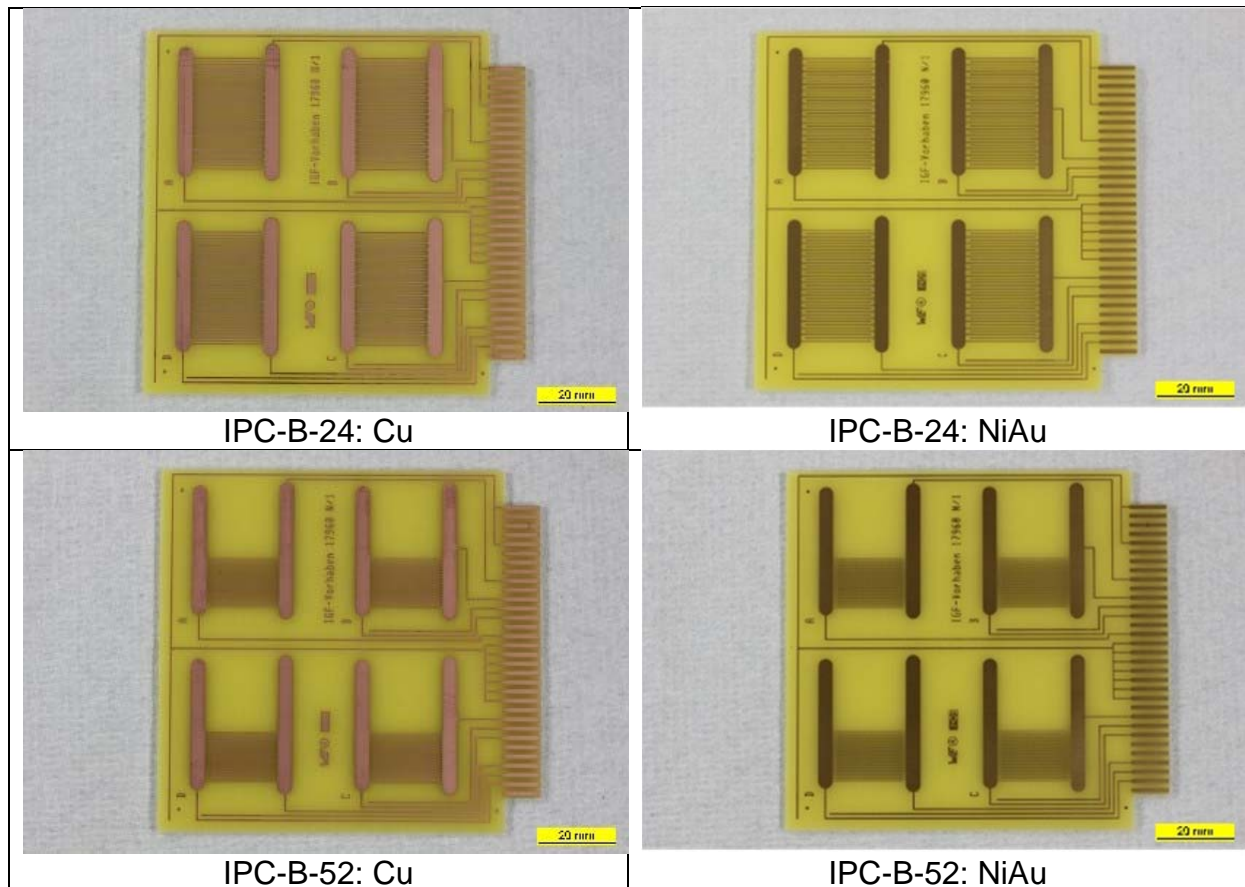


Abb. 12: Testboardlayout

Das Inline-Konvektions-Reflowlöten erfolgt in der Baugruppenfertigung typischerweise als erster Lötprozess. Im Anschluss daran folgen das Wellenlöten, das Selektivwellenlöten, maschinengestütztes Nacharbeitslöten und manuelles Kolbenlöten als Zweit- bzw. Nachlötprozesse.

Bei den Lötprozessen werden die jeweils auf den Prozess angepassten Flussmittel eingesetzt, siehe Tabelle 1. Es wird eine Kombination der verschiedenen Lötprozesse und Flussmittel untersucht, siehe auch Kapitel 0. Um die Versuchsmatrix einzugrenzen, werden nur zielführende Ansätze weiter verfolgt.

Die Lötprozesse werden mit handelsüblichen Konvektions-Reflow- und Wellenlötanlagen durchgeführt, wie sie am ISIT verfügbar sind. Als weitere Maschinen werden eine Reworkstation (wie sie zur Nacharbeit von komplexen Komponenten eingesetzt wird), eine Selektivwellenlötanlage sowie eine manuelle Lötstation eingesetzt.

### 3.3 Einmessen der Lötprofile

Im Folgenden werden die Temperatur-Zeit-Profile, Abb. 13 bis Abb. 25, für die einzelnen Lötprozesse dargestellt.

Für den **Inline-Konvektions-Lötprozess** wurde für die SAC-Legierung eine Einstellung gewählt (Abb. 13), die nach Datenblatt mittig im Lötprozessfenster der Lotpasten liegt. Dies entspricht dem typischen Anwendungsfall beim Baugruppenfertiger.

Mit dem **Wellenlötprozess** wurden zwei Zustände abgebildet. Zum einen der Normalzustand: Durchlaufen der Lötwellen mit einem Temperatur-Zeitverlauf, wie er einer typischen SAC-Lötung entspricht, Abb. 14. Der zweite Wellenlötzustand entspricht dem Prozessverlauf, wie er entsteht, wenn Flussmittel auf die Oberseite der Leiterplatte gelangt, Abb. 15. Dies kann z.B. beim Flussmittelauftrag durch nicht abgedeckte Bohrungen geschehen. Das oben liegende Flussmittel sieht während des Wellenlötens eine Temperatur, die deutlich unter der Lötwellentemperatur liegt. Auch fehlt der direkte Kontakt zur Lötwellen. Möglicherweise vorhandenes überschüssiges Flussmittel wird somit nicht abgewaschen.

Für den **Selektivlötprozess** wurden zwei Zustände des Vorheizprozesses durchfahren, die typische Vorheizprofile darstellen, Abb. 16 und Abb. 17, aber auch eine Einstellung, die einen hohen Wärmeeintrag darstellt, Abb. 18. Dies kann beim Löten von großen thermischen Massen der Fall sein.

Der Wärmeeintrag beim **manuellen Kolbenlöten** erfolgt über die mit Lot benetzte LötKolbenspitze. Dieser Prozess kann nur sehr eingeschränkt reproduzierbar nachgestellt werden. Auch sind hiermit die geplanten Variationen im Temperaturverlauf nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurde der manuelle Kolbenlötprozess mit einer Reworkstation nachgebildet. Hierzu wurde ein beheizbarer Bondkopf als „FlächenlötKolben“ eingesetzt, Abb. 19. Mit diesem wurden Prozesstemperaturen von 100 °C bis 250 °C in 50-Grad Schritten nachempfunden. Manuelle Lötprozesse mit Temperaturgradienten und Einwirkzeiten, wie sie beim manuellen Löten von thermisch anspruchsvollen Baugruppen typisch sind (Abb. 20), wurden mit verschiedenen Flussmitteln abgebildet. Ein Flussmittelauftrag mit Röhrenlot ist auf diese Weise nicht realisierbar. Das würde zu Kurzschlüssen auf den Kammstrukturen führen. Um dieses Problem zu umgehen, wurde von den Materiallieferanten separates Flussmittel zur Verfügung gestellt.

Beim **maschinengestützten Nacharbeitslöten (Rework)** erfolgt der Wärmeeintrag mit einer 40 x 40 mm<sup>2</sup> großen Heißgasdüse, Abb. 21. Um auch hier den Einfluss von Flussmittelrückständen, die nicht der Arbeitstemperatur ausgesetzt werden, zu untersuchen werden Lötprofile mit Maximaltemperaturen von 150 °C, 215 °C und 230 °C eingefahren, Abb. 22 - Abb. 24. Dazu wird ein Lötprofil mit einer Zieltemperatur von 245 °C eingemessen, Abb. 25.

### 3.3.1 Inline-Konvektions-Lötprozess

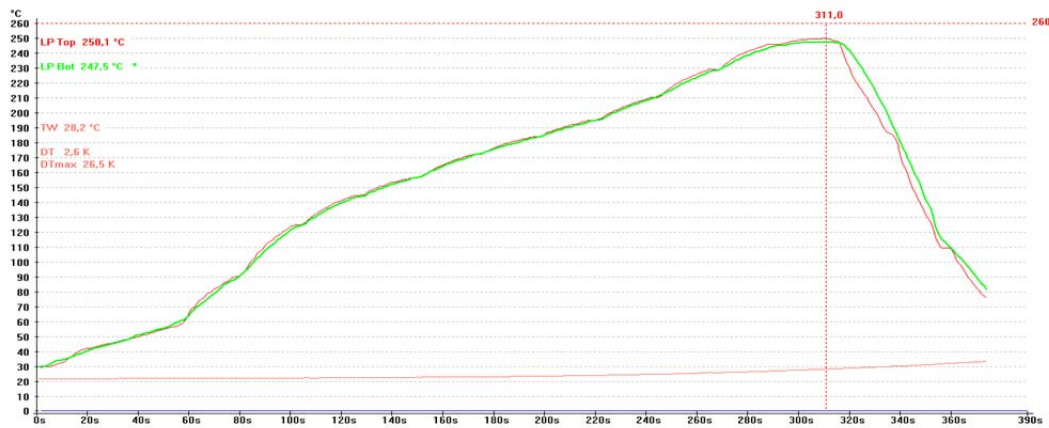


Abb. 13: Lötprofil Reflowlötten: „pb-frei“  
 Max. Temperatur: LP Bot 248°C, LP Top 250°C

### 3.3.2 Wellenlötprozess

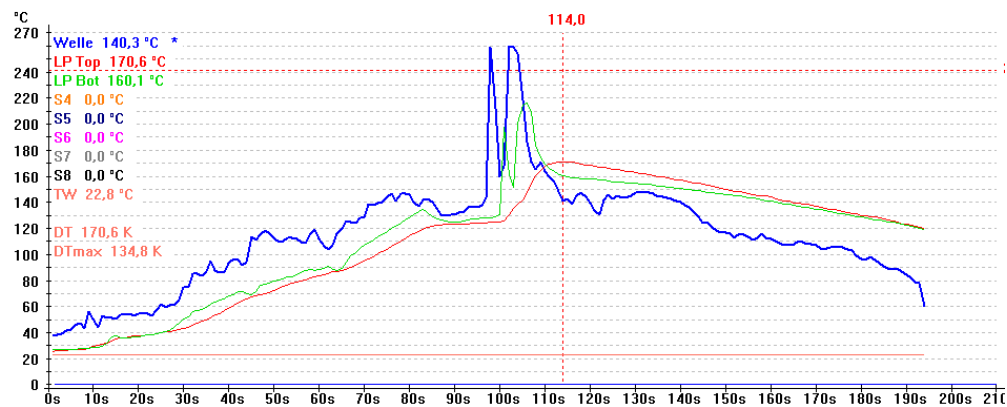


Abb. 14: Lötprofil Wellenlötten: „Welle an“  
 Max. Temperatur: Lötwellen 260°C, LP Bot 216°C, LP Top 171°C



Abb. 15: Lötprofil Wellenlötten: „Welle aus“  
 Max. Temperatur: LP Bot 153°C, LP Top 142°C



### 3.3.3 Selektivlötprozess

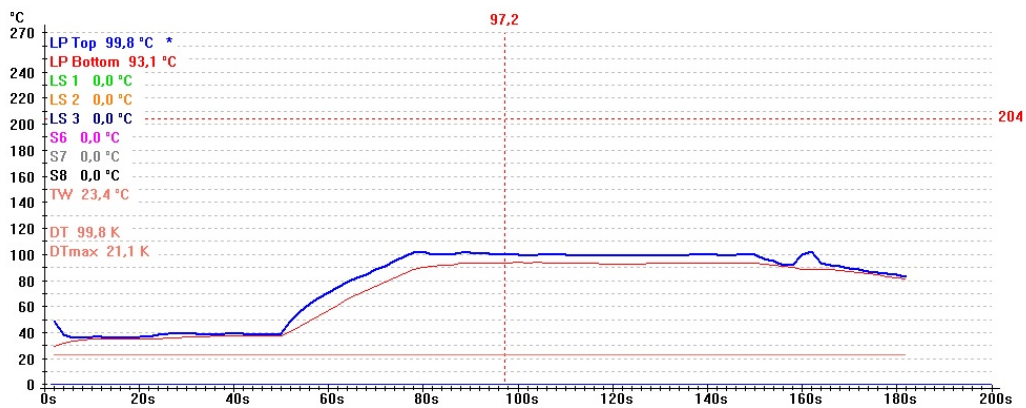


Abb. 16: Lötprofil Selektivlöten mit niedriger Vorheiztemperatur  
Max. Temperatur: LP Top 100°C für 70s, Gesamtvorheizzeit 160s

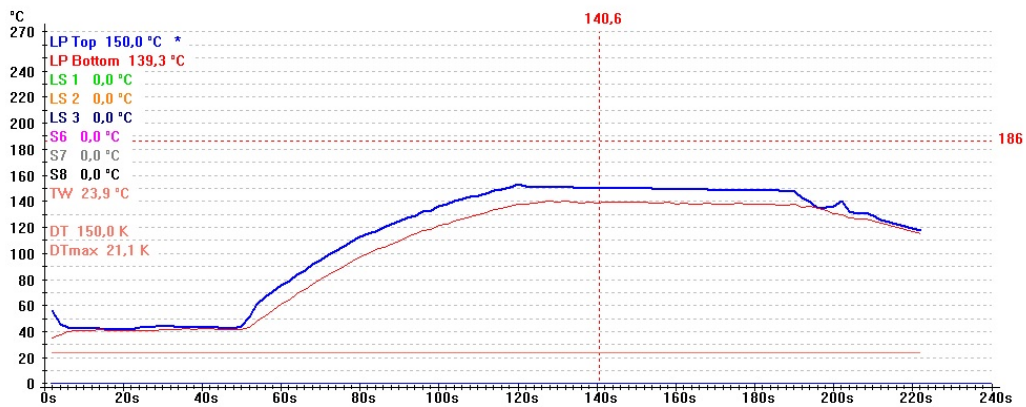


Abb. 17: Lötprofil Selektivlöten mit mittlerer Vorheiztemperatur  
Temperatur LP Top 150°C für 70s, Gesamtvorheizzeit 190s

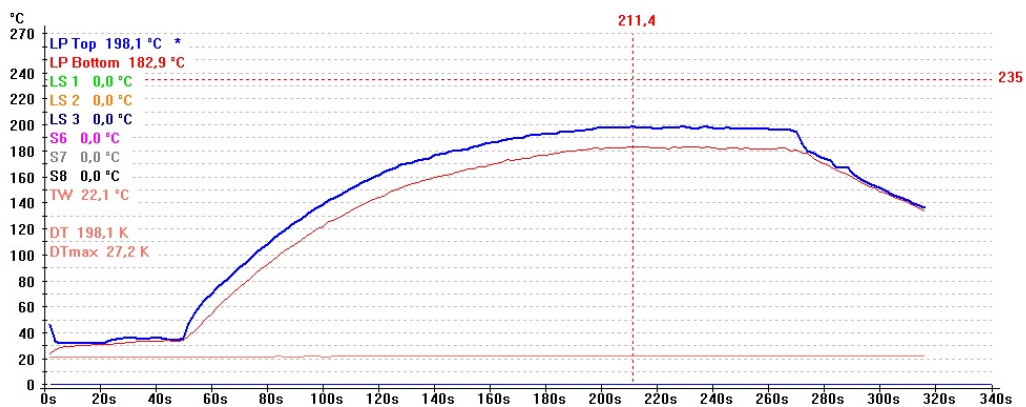
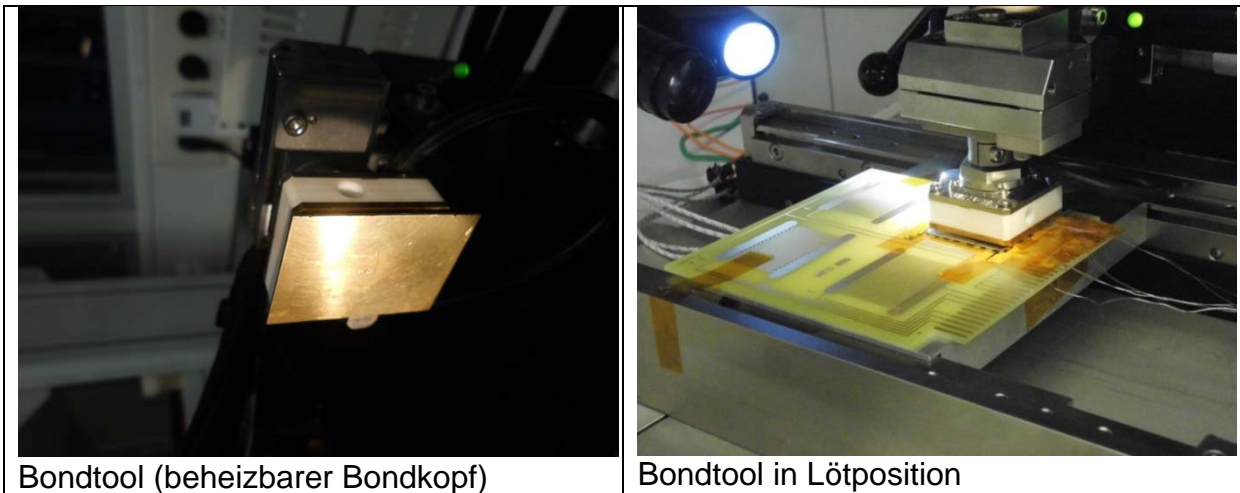


Abb. 18: Lötprofil Selektivlöten mit hoher Vorheiztemperatur  
Temperatur LP Top 200°C für 70s, Gesamtvorheizzeit 270s

### 3.3.4 Manuelles Kolbenlöten, Prozessnachbildung mit Reworkstation



Bondtool (beheizbarer Bondkopf)

Bondtool in Lötposition

Abb. 19: Manueller Lötprozess, Prozessnachbildung mit Reworkstation

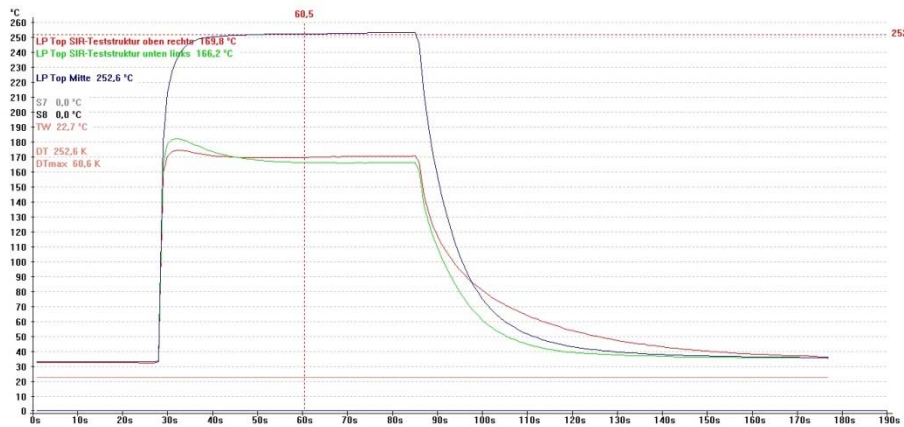
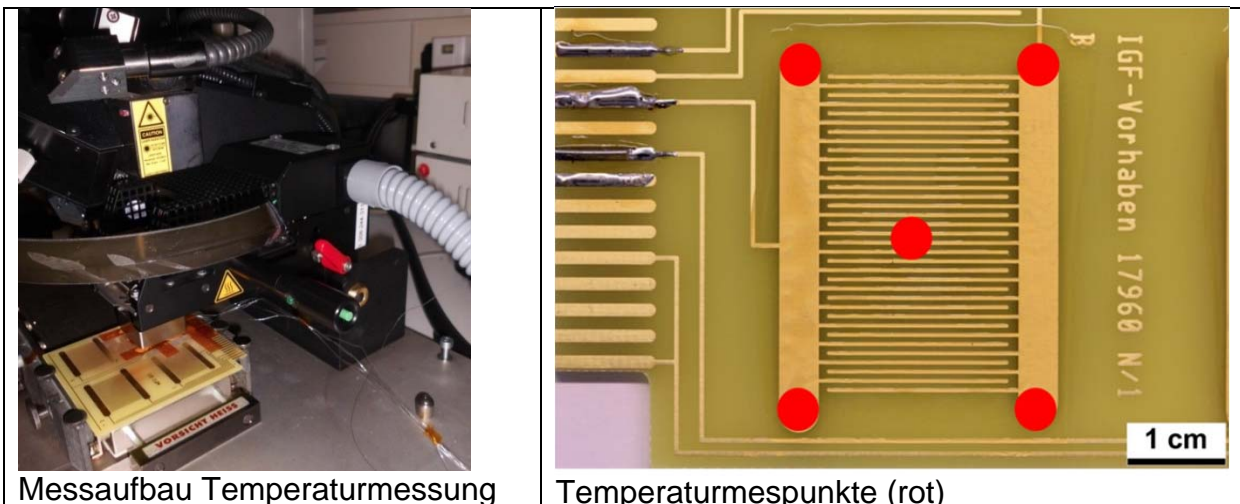


Abb. 20: Lötprofil Prozessnachbildung manuelles Löten

Max. Temperatur: Top Mitte 253,3°C, SIR-Test oben rechts 174,8°C, SIR-Test unten links 182,4°C, siehe auch Abb. 21

### 3.3.5 Maschinengestütztes Rework



Messaufbau Temperaturmessung

Temperaturmesspunkte (rot)

Abb. 21: Messaufbau Temperaturmessung (links)  
Temperaturmesspositionen (rechts)

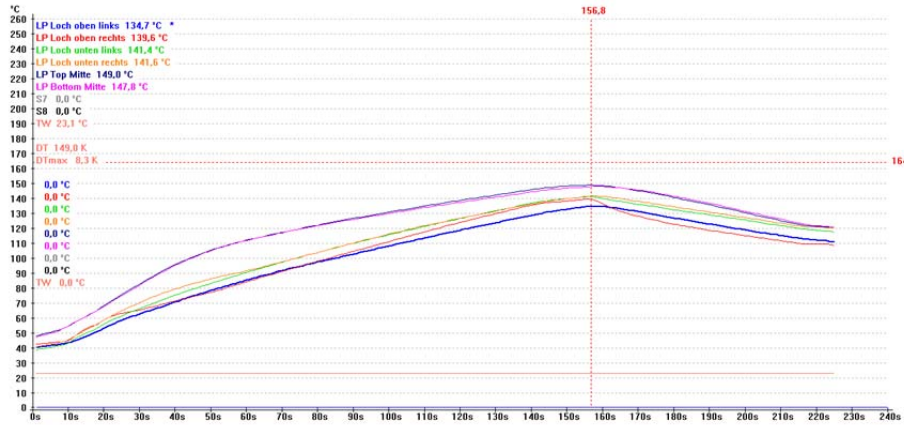


Abb. 22: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 150°C

Max. Temperatur: Top Mitte 149,0°C, Top oben links 134,8°C, Top oben rechts 139,6°C, Top unten links 141,4°C, Top unten rechts 141,8°C

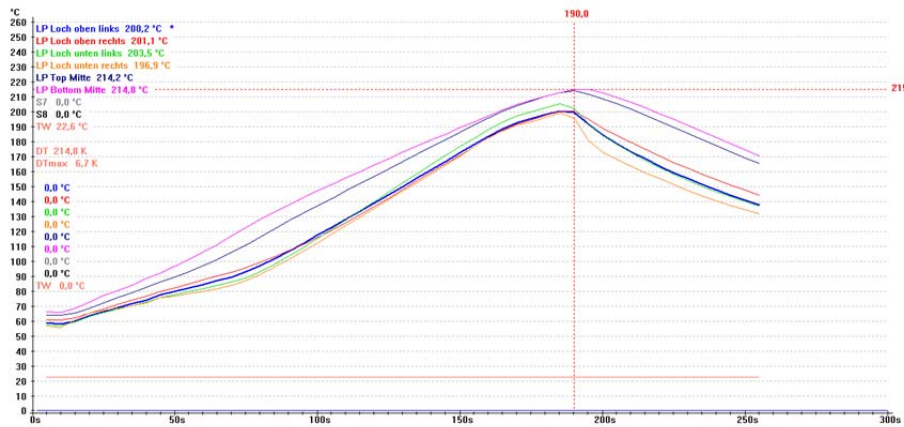


Abb. 23: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 215°C

Max. Temperatur: Top Mitte 214,2°C, Top oben links 201,4°C, Top oben rechts 202,0°C, Top unten links 206,3°C, Top unten rechts 199,9°C



Abb. 24: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 230°C

Max. Temperatur: Top Mitte 231,2°C, Top oben links 219,3°C, Top oben rechts 218,3°C, Top unten links 223,5°C, Top unten rechts 217,5°C

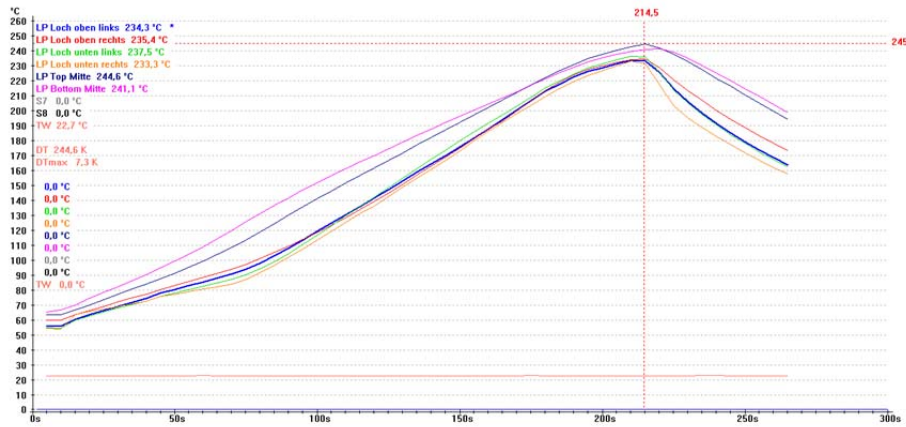


Abb. 25: Lötprofil Rework, Zieltemperatur 245°C

Max. Temperatur: Top Mitte 244,6°C, Top oben links 234,8°C, Top oben rechts 235,4°C, Top unten links 238,1°C, Top unten rechts 234,5°C

### 3.4 Untersuchung der elektrochemischen Migration mit SIR-Tests

Durchgeführt wurden die SIT-Tests in Anlehnung an IPC-J-STD-004 mit folgenden Versuchsbedingungen:

- Lötwärmebelastung der Testboards mit den unter Kapitel 3.3 eingefahrenen Lötprofilen, Flussmittelkombination wie nachfolgend beschrieben,
- Testspannung 100V, Messspannung 100V, Messung alle 20 Minuten,
- Feuchte: 85% r. F., Temperatur: 85 °C, Testdauer: 168h,
- Stabilisierungsperiode vor Feuchtebeaufschlagung: 2h,
- Prüfstruktur: IPC-B-24: 400 µm Linienbreite, 500 µm Spacing,  
IPC-B-52: 200 µm Linienbreite, 200 µm Spacing,
- Oberfläche: Cu und chem. NiAu.
- Pro Einzeltest werden 4 Einzelstrukturen geprüft

Ausfallkriterium:

- $R < 100 \text{ MOhm}$
- Elektrochemische Migration reduziert den Leiterabstand um mehr als 20%
- Leiter weisen Korrosion auf (geringe Verfärbung eines Poles der Kammstruktur ist erlaubt)

Die Auftragsmenge beeinflusst das Ergebnis stark. Eine zu hohe Auftragsmenge führt zu unerwünschten Effekten wie Kurzschlussbildung über nicht umgesetzte aktive Bestandteile oder eine nicht durchführbare optische Inspektion auf Dendriten aufgrund starker Flussmittelreste nach dem Lötprozess. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde der Flussmittelauftrag besonders sorgfältig durchgeführt. Restmengen, die nach dem Wärmeschritt auf den Leiterplatten verbleiben sind auf die Prozessführung zurückzuführen und gewollt. So kann das Korrosionspotential unterschiedlicher Materialien auf Grundlage der unvollständigen Erwärmung (nicht auf Löttemperatur) erfasst werden.

Zunächst soll auf die optische Inspektion der SIR-Testleiterplatten nach der Auslagerung und eine mögliche Fehlinterpretation von Messergebnissen eingegangen werden. Zum SIR-Test gehört neben dem Ergebnis der Widerstandsmessung auch die optische Beurteilung der Leiterplatten nach der Auslagerung. Vermeintliche Kurzschlüsse oder signifikante Einbrüche der gemessenen Widerstände können ohne Berücksichtigung der optischen Inspektionsergebnisse zu einer Fehlinterpretation führen.

Diese Effekte lassen sich z.B. durch leitfähige Partikel, siehe auch Abb. 26, oder Präparationsartefakte (Abb. 27) erklären.

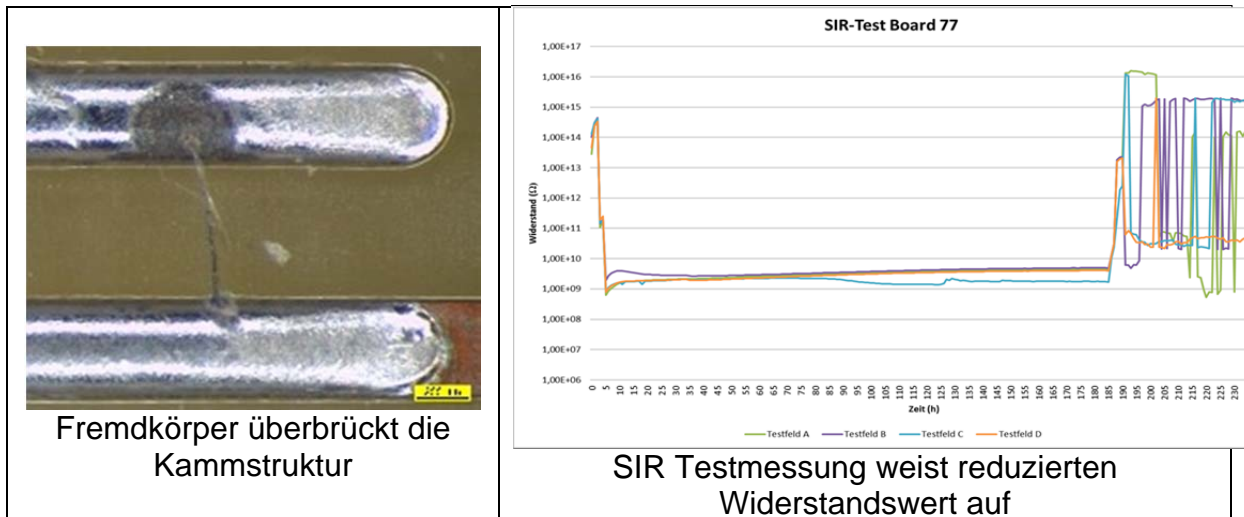


Abb. 26: Fremdkörper reduziert Widerstand

Die Verbindung zwischen zwei Leiterbahnen durch einen Fremdkörper führt zum Absinken des Widerstandswerts, hier dargestellt im Testfeld C (blaue Linie).

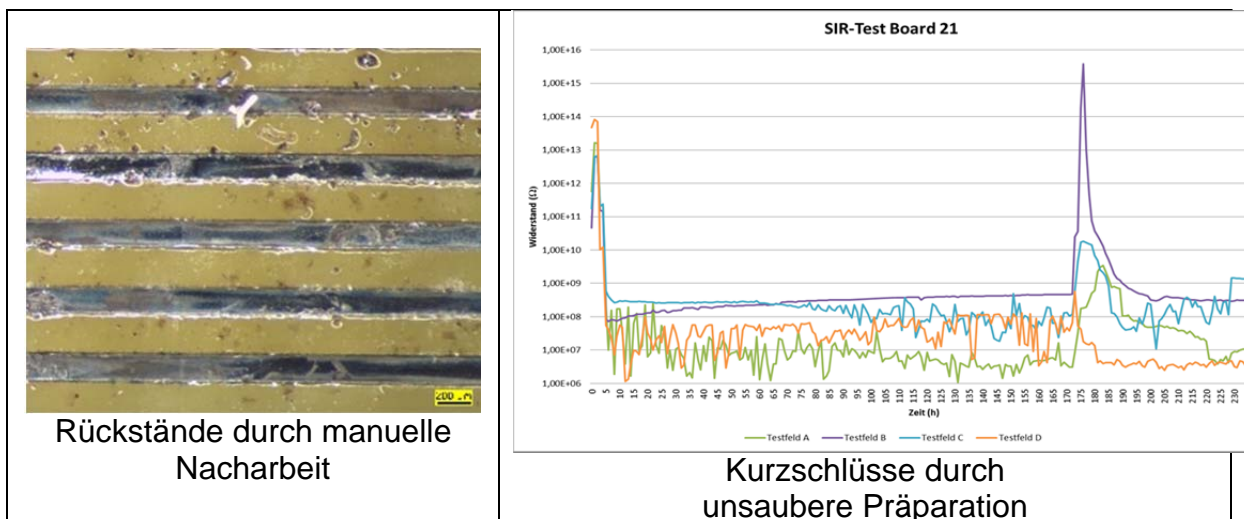


Abb. 27: unsaubere Präparation

Im vorliegenden Beispiel sind Kurzschlüsse nach dem Reflowprozess manuell mit einem LötKolben beseitigt worden. Durch die vielen Rückstände und durch die veränderte Zusammensetzung der Rückstände ist die Messung nicht aussagefähig.

Abb. 28 zeigt exemplarische Beispiele optischer Inspektionsergebnisse von SIR-Testleiterplatten nach der Auslagerung. Keine sichtbaren Rückstände, Flussmittelrückstände ohne Dendritenbildung sowie geringe Korrosion sind zulässige Zustände, Dendritenbildung, die den Leiterabstand um mehr als 20% reduziert, stellt einen unzulässigen Zustand dar.

Erst wenn die elektrische Messung durch die optische Inspektion verifiziert wird, ist das Ergebnis aussagefähig.

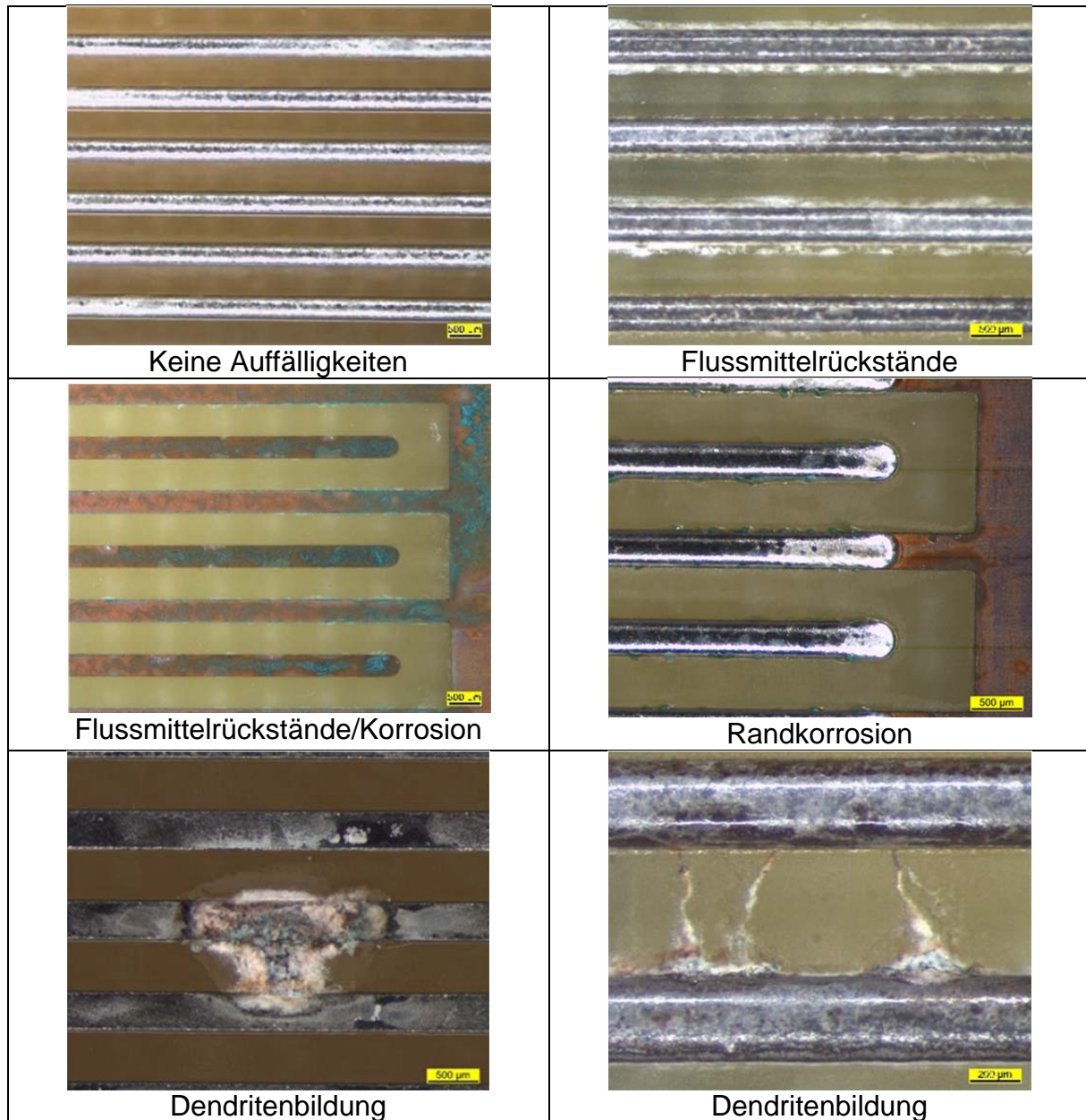


Abb. 28: typische Beispiele für optische Inspektion nach SIR-Test Auslagerung

Die Lotpaste wird mit einem handelsüblichen Lotpastendrucker (DEK Horizon 2) auf die Kammstruktur aufgetragen und in einem Konvektions-Lötofen (Rehm VXP) unter Schutzgas (Stickstoff mit einem Restsauerstoffgehalt von 200 ppm) umgeschmolzen, exemplarische Bilder sind in Abb. 29 dargestellt.

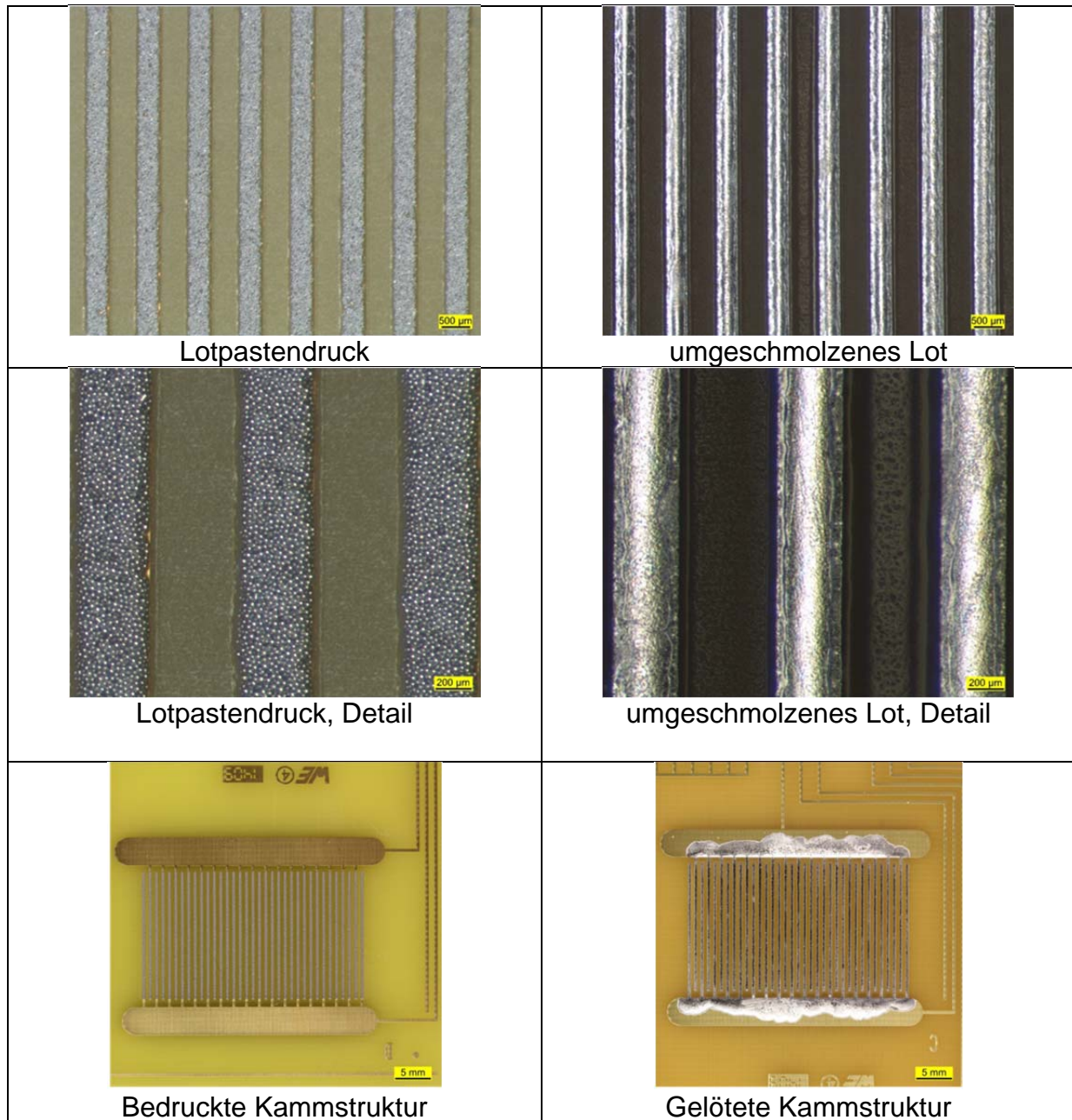


Abb. 29: bedruckte und gelötete Kammstruktur

Im nachfolgenden werden die SIR-Test Ergebnisse dargestellt. Die Bilder stellen jeweils repräsentative Ergebnisse dar.



### 3.4.1 Maschinelles Konvektions-Reflowlöten von bleifreien Lotpasten

Die Abb. 30 zeigt exemplarisch das visuelle Ergebnis und die Messkurven des SIR-Tests einer bleifreien Lotpaste und die Tabelle 2 die Ergebnisse der SIR-Test Auswertung der untersuchten Lotpasten.

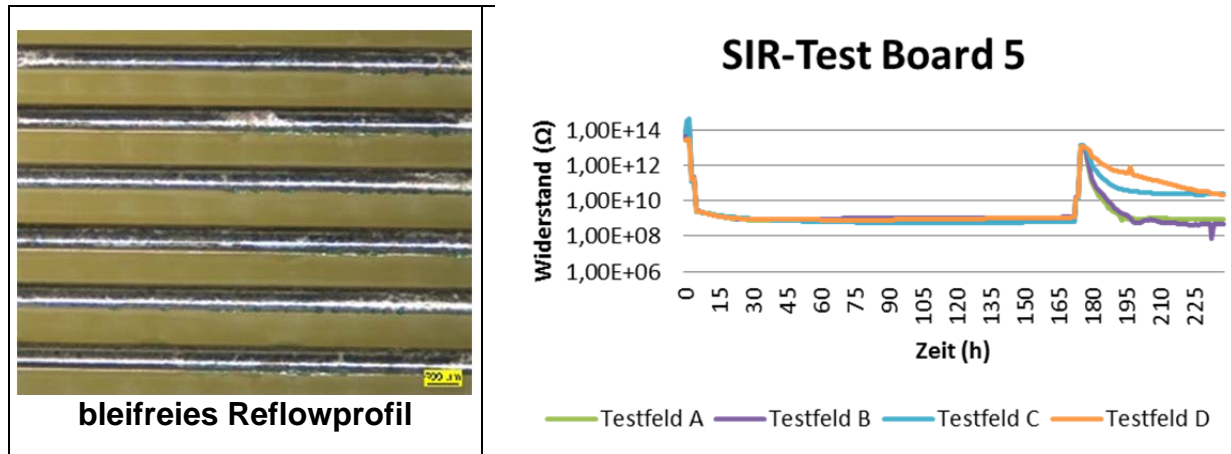


Abb. 30: SIR-Test Lotpaste

Lotpaste	Klassifizierung	Board		Reflow	SIR-Test
A	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	250°C	✓
A	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	250°C	✓
A	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	250°C	✓
A	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	250°C	✓
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	250°C	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	250°C	✓
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	250°C	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	250°C	✓
C	RELO	IPC-B-24	Cu breit	250°C	✓
C	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	250°C	✓
D	RELO	IPC-B-24	Cu breit	250°C	✓
D	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	250°C	✓

Tabelle 2: Ergebnis SIR-Test, nur Reflow-Flux

#### Ergebnis: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten

- Alle untersuchten Lotpasten bestehen nach vollständig durchlaufenem bleifreiem Reflowlötprozess den SIR-Test.

### 3.4.2 Kombinerter Lötprozess: Reflow- mit anschließendem Wellenlöten

Die Abb. 31 - Abb. 32 und Tabelle 3 - Tabelle 5 zeigen die Ergebnisse der Untersuchungsmatrix. Auffällig ist die Neigung zur Dendritenbildung, wenn das Wellenlöt-Flussmittel nicht der Wellentemperatur ausgesetzt wird, siehe Abb. 31 und Abb. 32.

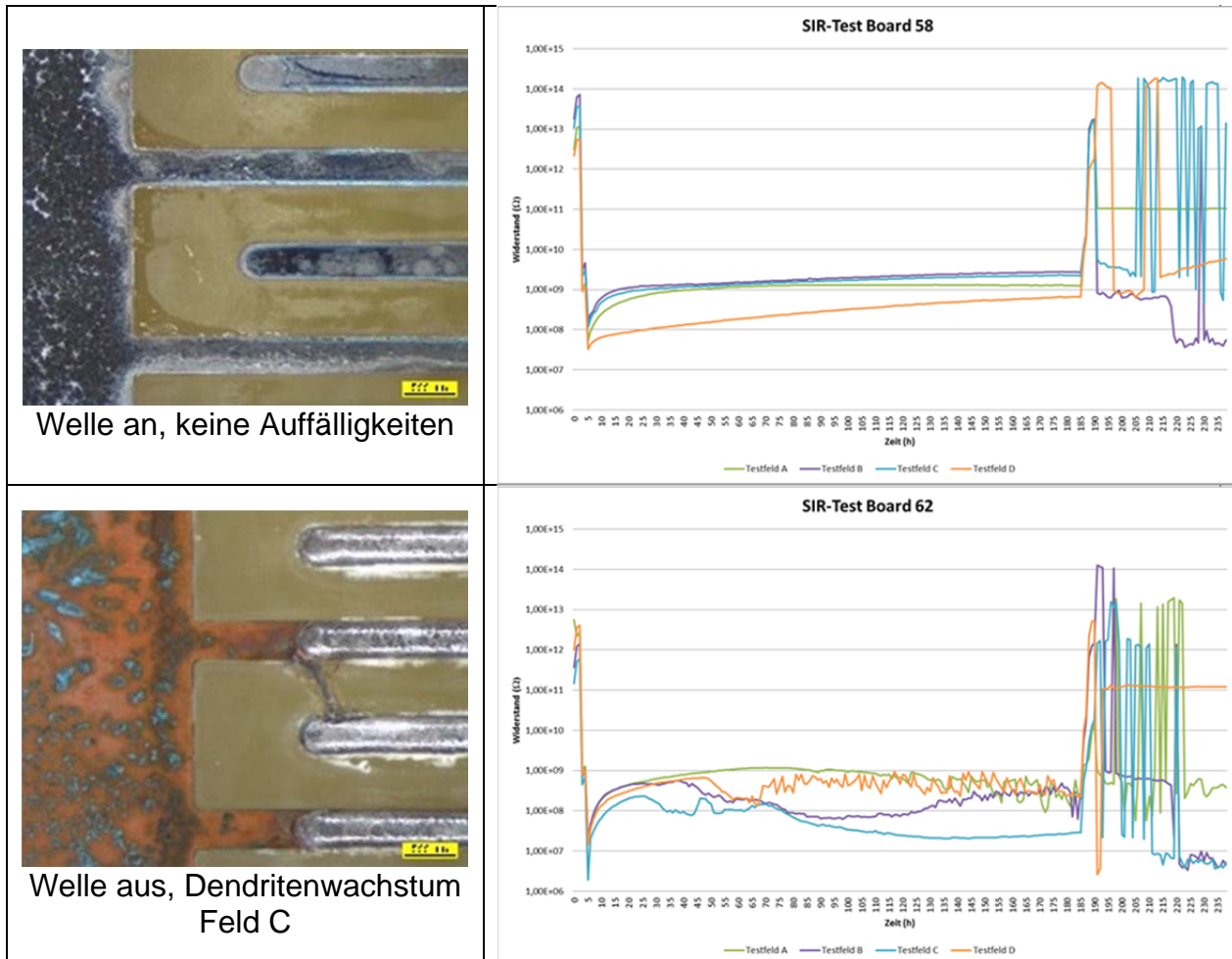


Abb. 31: Fluxkombination aus Reflow-Lotpaste A und Wellen-Flussmittel B

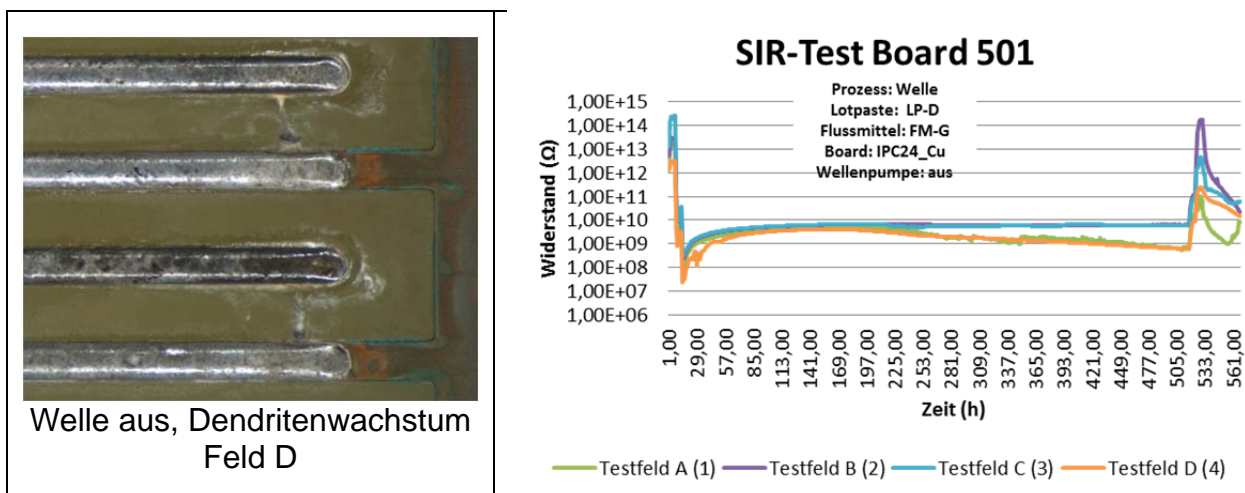


Abb. 32: Fluxkombination aus Reflow-Lotpaste D und Wellen-Flussmittel G

Lotpaste	Klass.	Flussmittel	Klass.	Welle an/aus	Board		Bemerkung	SIR- Test
-	-	A	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
-	-	A	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	Zu Beginn unter E08	✓
A	ROLO	A	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
A	ROLO	A	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	A	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	A	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	Zu Beginn unter E08	✓
C	RELO	A	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	A	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
-	-	B	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
-	-	B	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	Zu Beginn unter E08	✓
A	ROLO	B	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
A	ROLO	B	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	Ausfall
B	ROLO	B	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	B	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	Ausfall
C	RELO	B	ROLO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	B	ROLO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	Ausfall

Tabelle 3: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten A, B, C und Wellen-Flussmittel A, B

Lotpaste	Klass.	Flussmittel	Klass.	Welle an/aus	Board		Bemerkung	SIR- Test
A	ROLO	C	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
A	ROLO	C	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	C	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	C	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	C	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	C	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓

Tabelle 4: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten A, B, C und Selektiv-Flussmittel C

Lotpaste	Klass.	Flussmittel	Klass.	Welle an/aus	Board		Bemerkung	SIR- Test
-	-	D	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
-	-	D	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
A	ROLO	D	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
A	ROLO	D	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	D	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	D	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	D	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	D	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
D	RELO	D	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
-	-	G	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
-	-	G	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
A	ROLO	G	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
A	ROLO	G	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	G	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
B	ROLO	G	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	G	RELO	an	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
C	RELO	G	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
D	RELO	G	RELO	aus	IPC-B-24	Cu breit	-	Ausfall

Tabelle 5: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten A, B, C, D und Wellen-Flussmittel D,G

#### Ergebnis: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten in Kombination mit maschinellem Stickstoff-Wellenlöten

- Alle untersuchten Wellenlötflussmittel (A, B, D) sowie das Selektivlötflussmittel C bestehen nach vollständig durchlaufenem bleifreiem Wellenlötprozess bei allen untersuchten FM-Lotpasten-Kombinationen den SIR-Test.
- FM D besteht nach unvollständigem (Erwärmung auf nur 150 °C und ohne Wellenkontakt) bleifreien Wellenlötprozess in Kombination mit allen untersuchten Lotpasten (A, B, C, D) den SIR-Test.
- FM A besteht nach unvollständigem (Erwärmung auf nur 150 °C und ohne Wellenkontakt) bleifreien Wellenlötprozess in Kombination mit allen untersuchten Lotpasten (A, B, C) den SIR-Test, weist aber in Kombination mit Lotpaste B zu Beginn der SIR-Test-Auslagerung einen Widerstandswert  $<1,0E08$  Ohm auf.
- FM G fällt nach unvollständigem (Erwärmung auf nur 150 °C und ohne Wellenkontakt) bleifreien Wellenlötprozess in Kombination mit Lotpaste D beim SIR-Test durch.
- FM B fällt nach unvollständigem (Erwärmung auf nur 150 °C und ohne Wellenkontakt) bleifreien Wellenlötprozess in Kombination mit allen untersuchten Lotpasten (A, B, C) beim SIR-Test durch.

### 3.4.3 Kombiniertes Lötprozess: Reflow- mit anschließendem Selektivem (Vorheiz)Prozess

Die Abb. 33 und Tabelle 7 - Tabelle 9 zeigen die Ergebnisse der Untersuchungsmatrix zum Selektivlöten.

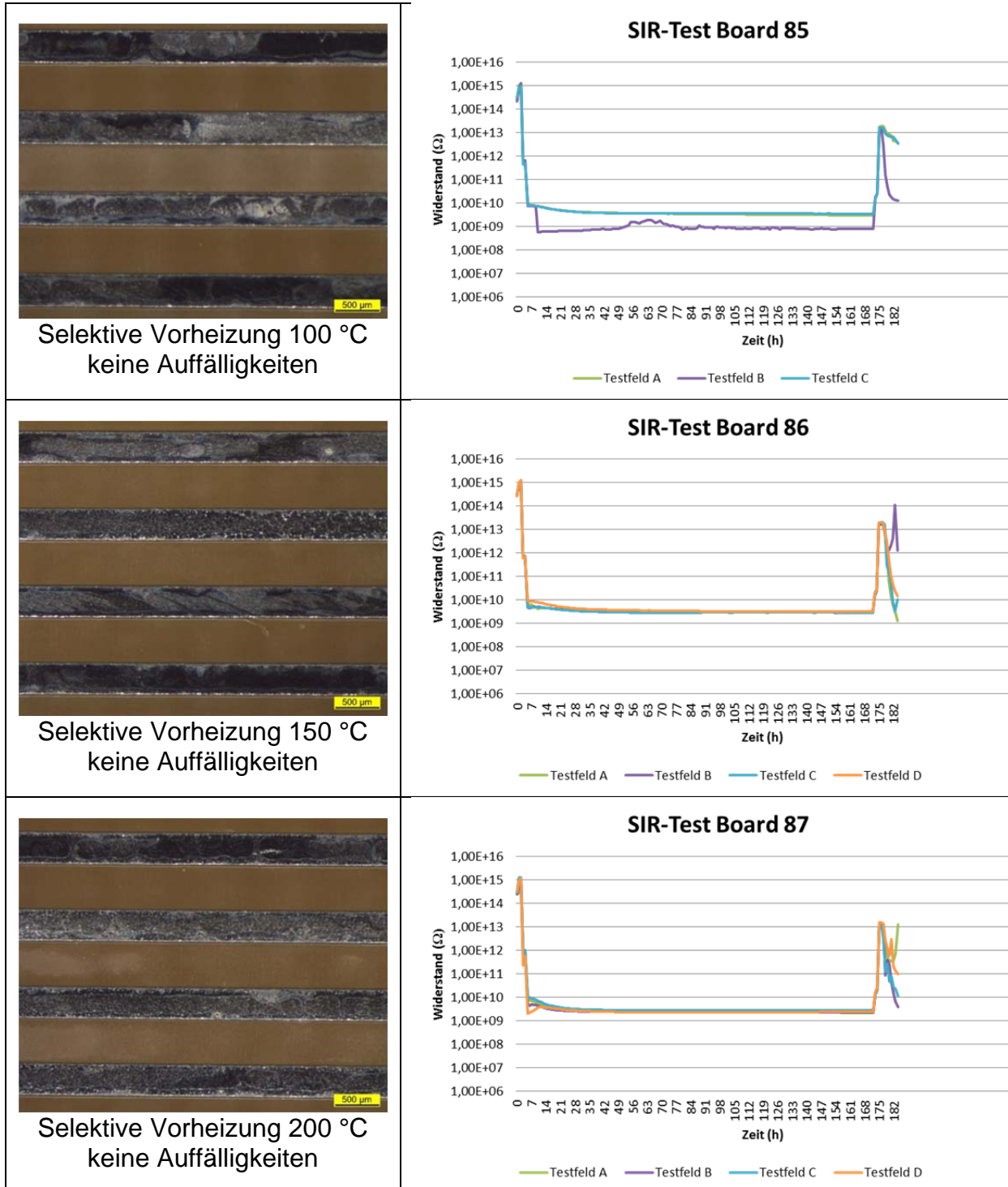


Abb. 33: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpaste D und Selektivlöt-Flussmittel C

Lotpaste	Klass.	Board		Sel-Flux	Klass.	Vorheiztemp. [°C]	SIR-Test
B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	100	✓
B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	150	✓
B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	200	✓
B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	100	✓
B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	150	✓
B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	200	✓
D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	100	✓
D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	150	✓
D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	200	✓
D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	100	✓
D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	150	✓
D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	200	✓
C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	100	✓
C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	150	✓
C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	A	ROL0	200	✓
C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	100	✓
C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	150	✓
C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	A	ROL0	200	✓

Tabelle 6: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Selektivlöt-Flussmittel A

Lotpaste	Klass.	Board		Sel-Flux	Klass.	Vorheiztemp. [°C]	SIR-Test
B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	100	✓
B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	150	✓
B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	200	✓
B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	100	✓
B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	150	✓
B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	200	✓
C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	100	✓
C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	150	✓
C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	200	✓
C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	100	✓
C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	150	✓
C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	200	✓
D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	100	✓
D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	150	✓
D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	C	REL0	200	✓
D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	100	✓
D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	150	✓
D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	C	REL0	200	✓

Tabelle 7: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Selektivlöt-Flussmittel C

Lotpaste	Klass.	Board		Sel-Flux	Klass.	Vorheiztemp. [°C]	SIR-Test
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	100	✓
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	150	✓
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	200	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	100	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	150	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	200	✓
D	RELO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	100	✓
D	RELO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	150	✓
D	RELO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	200	✓
D	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	100	✓
D	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	150	✓
D	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	200	✓
C	RELO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	100	✓
C	RELO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	150	✓
C	RELO	IPC-B-24	Cu breit	F	RELO	200	✓
C	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	100	✓
C	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	150	✓
C	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	F	RELO	200	✓

Tabelle 8: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Selektivlöt-Flussmittel F



Lotpaste	Klass.	Board		Sel-Flux	Klass.	Vorheiztemp. [°C]	SIR-Test
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	100	✓
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	150	✓
B	ROLO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	200	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	100	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	150	✓
B	ROLO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	200	✓
D	RELO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	100	✓
D	RELO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	150	✓
D	RELO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	200	✓
D	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	100	✓
D	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	150	✓
D	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	200	✓
C	RELO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	100	✓
C	RELO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	150	✓
C	RELO	IPC-B-24	Cu breit	G	RELO	200	✓
C	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	100	✓
C	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	150	✓
C	RELO	IPC-B-24	NiAu breit	G	RELO	200	✓

Tabelle 9: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpasten B, C, D und Wellenlötflussmittel G im Selektivlötprozess

#### Ergebnis: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten in Kombination mit Vorheizprozess für maschinelles selektives Wellenlöten

- Alle untersuchten Selektivlötflussmittel (A, C, F) bestehen nach erhöhtem bleifreiem Vorheizprozess für das Selektivlöten (Erwärmung LP Top auf 200 °C für ca. 70s) bei allen untersuchten FM-Lotpasten-Kombinationen (B, C, D) den SIR-Test.
- Alle untersuchten Selektivlötflussmittel (A, C, F) bestehen nach teilweise unvollständig durchlaufenem bleifreiem Vorheizprozess (Erwärmung LP Top auf 100 °C für ca. 70s) für das Selektivlöten bei allen untersuchten FM-Lotpasten-Kombinationen (B, C, D) den SIR-Test.
- Ein Wellenlötflussmittel (G) besteht nach vollständig durchlaufenem und nach unvollständig durchlaufenem bleifreiem Vorheizprozess (Erwärmung LP Top auf 100 °C für ca. 70s) für das Selektivlöten bei allen untersuchten FM-Lotpasten-Kombinationen (B, C, D) den SIR-Test.

### 3.4.4 Manueller Kolbenlötprozess

Um den manuellen Lötprozess nachzubilden wurde auf die SIR-Test-Strukturen Flussmittel aufgetragen und dieses mit einem beheizbaren Bondkopf mit Temperaturen von 100 °C bis 250 °C in 50-Grad Schritten einer Temperaturbelastung analog dem zeitlichen Verlauf im manuellen Lötprozess unterzogen. Bewusst wurde hier die Haltezeit bei maximaler Temperatur auf 5s gesetzt, Tabelle 10.

Endtemperatur [°C]	Haltezeit bei maximaler Temperatur [s]	Gesamtprozesszeit [s]
100	5	12
150	5	13
200	5	15
250	5	16

Tabelle 10: manuelle Lötwärmebelastung

Wie aus der Abb. 34 ersichtlich ist, sind bei Temperaturen von 100 °C bzw. 150 °C noch deutliche Rückstände zu erkennen. Bei 250 °C sind nahezu keine Rückstände mehr zu sehen. Die SIR-Test-Kurven in Abb. 35 und Abb. 36 sowie die Ergebnisdarstellung in Tabelle 11 zeigen, dass der Widerstand bei niedrigen Prozesstemperaturen zu Beginn der Messung den geforderten Grenzwert von 100 MOhm nicht einhält.

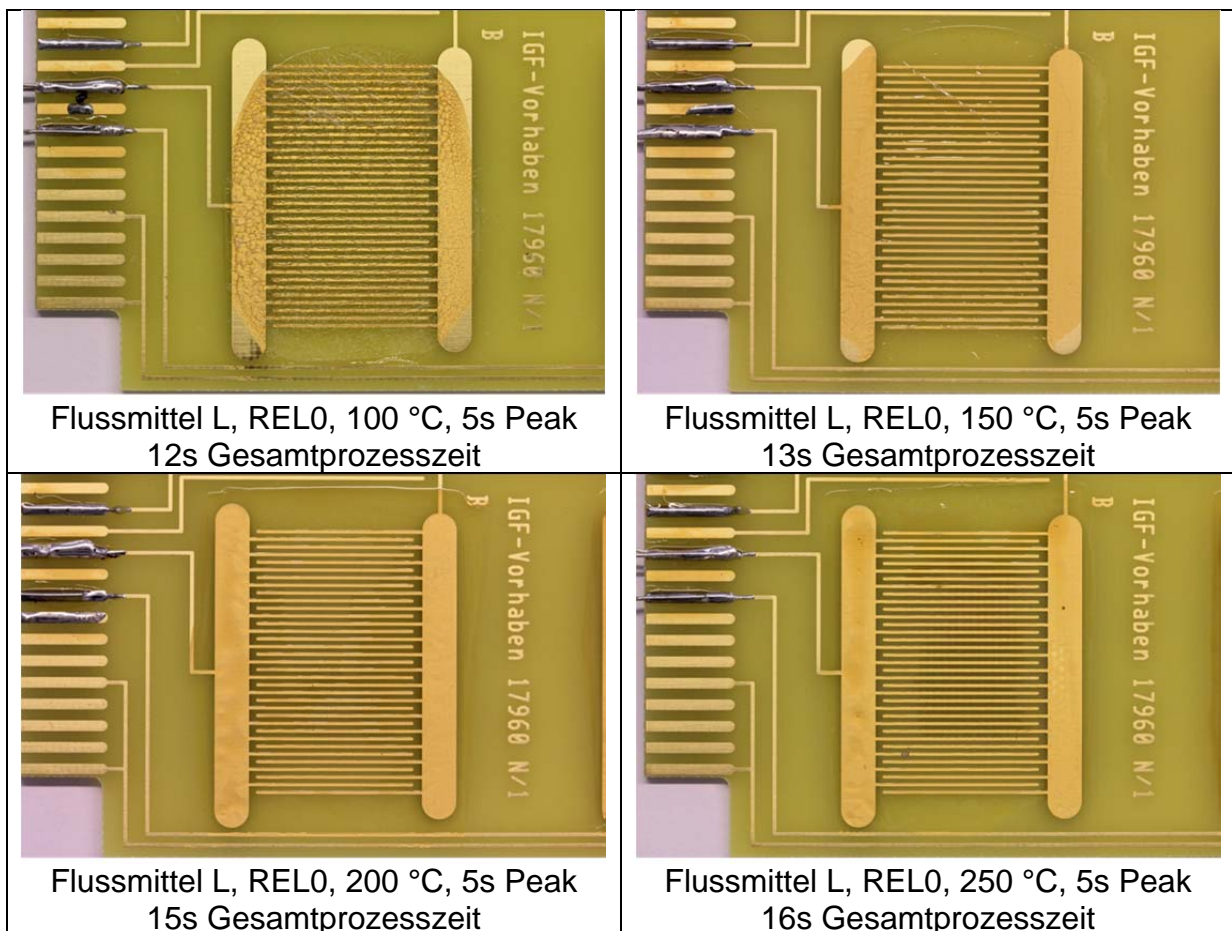


Abb. 34: Prozessnachbildung mit Reworkstation

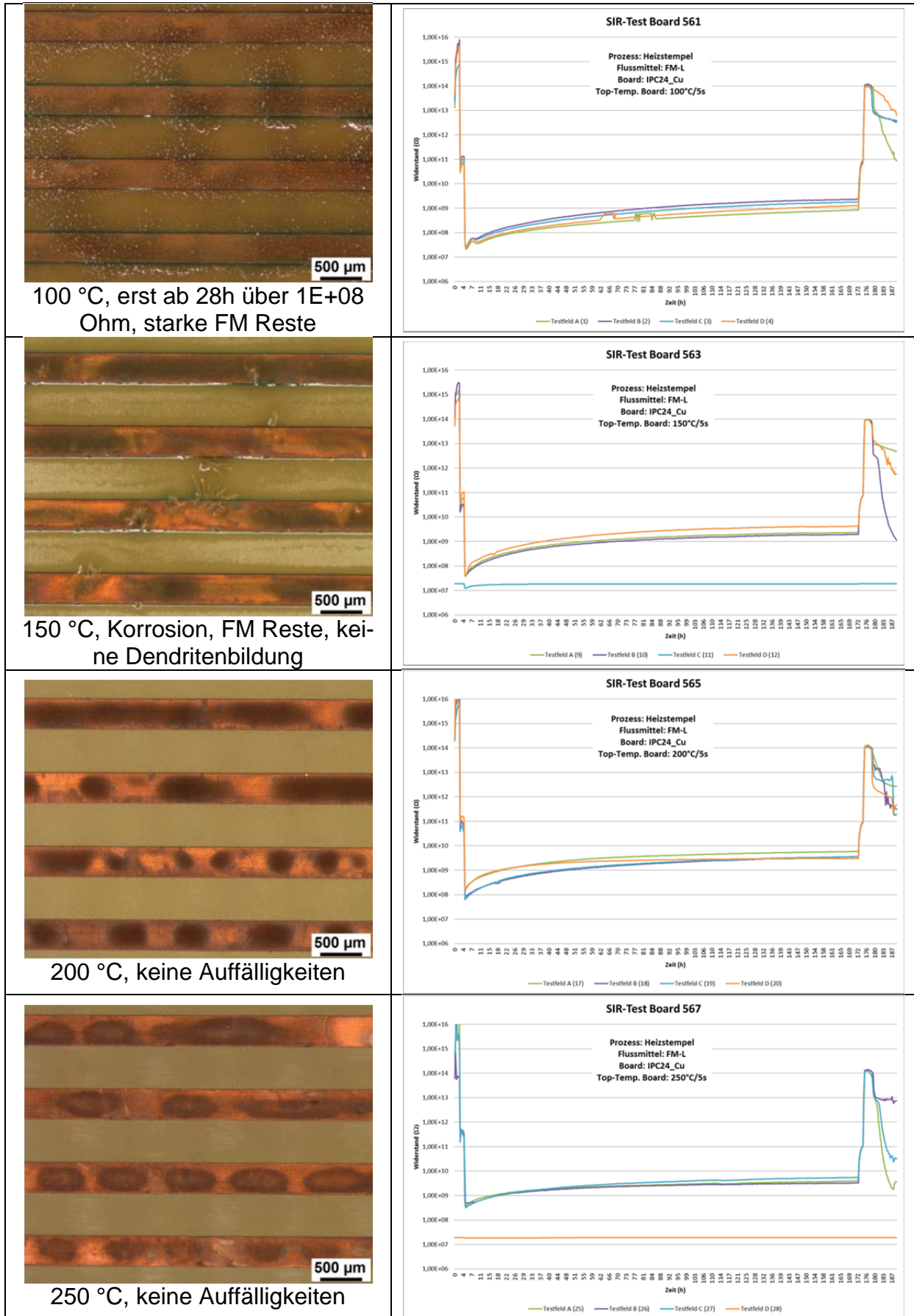


Abb. 35: Flussmittel L, RELO

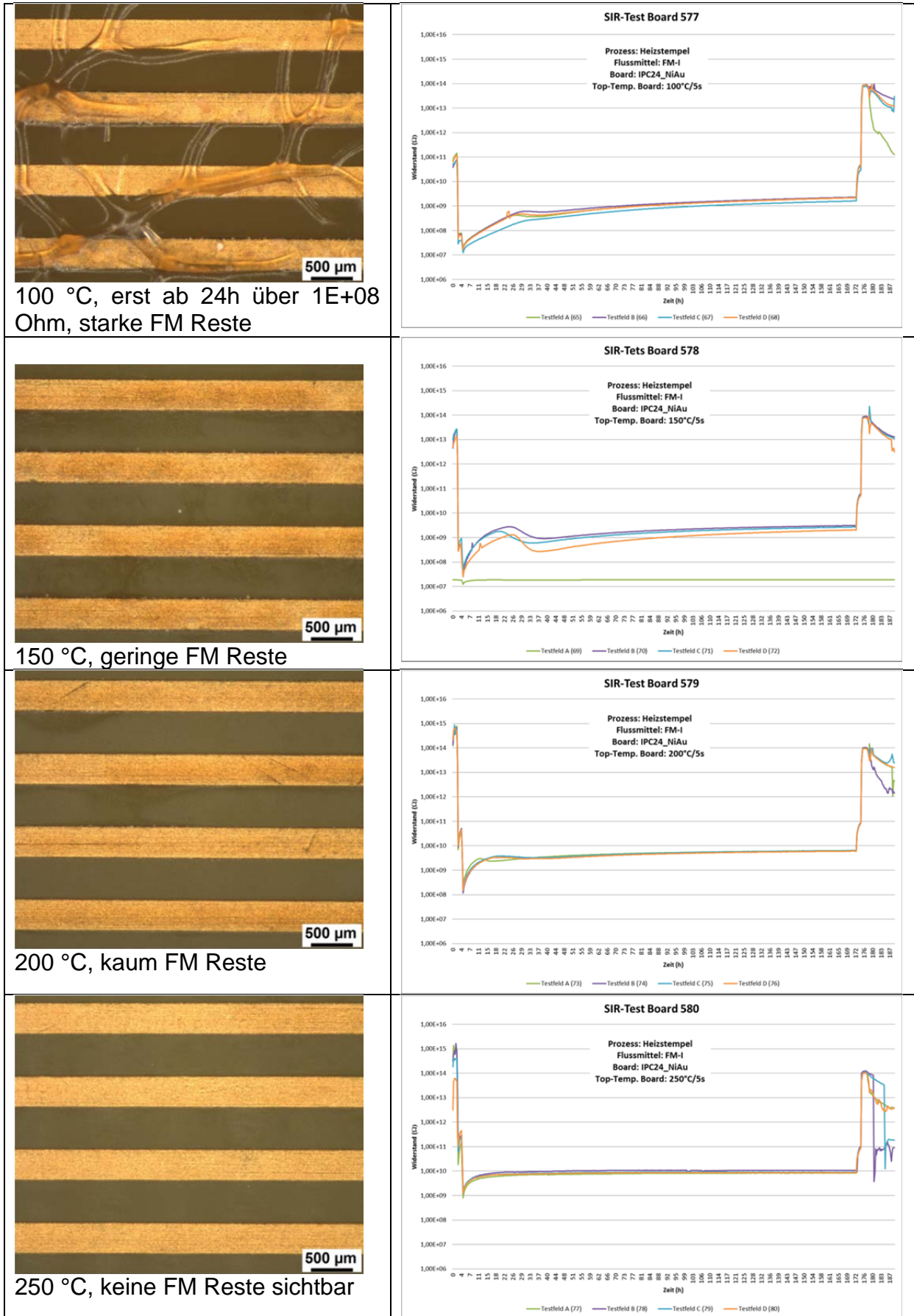


Abb. 36: Flussmittel I, REM1

Man. Flux	Klass.	Max. Temp. [°C]	Board		Bemerkung	SIR-Test
E	REM1	100	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	Nicht bestanden
E	REM1	150	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	R zu Beginn unter E08 Ohm	✓
E	REM1	200	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
E	REM1	250	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
I	REM1	100	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	Nicht bestanden
I	REM1	150	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	R zu Beginn unter E08 Ohm	✓
I	REM1	200	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
I	REM1	250	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
M	ROLO	100	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	Nicht bestanden
M	ROLO	150	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	R zu Beginn unter E08 Ohm	✓
M	ROLO	200	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	R zu Beginn unter E08 Ohm	✓
M	ROLO	250	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	R zu Beginn unter E08 Ohm	✓
L	RELO	100	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	Nicht bestanden
L	RELO	150	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	R zu Beginn unter E08 Ohm	✓
L	RELO	200	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	R zu Beginn unter E08 Ohm	✓
L	RELO	250	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓

Tabelle 11: manueller Lötprozess: Prozessnachbildung mit Reworkstation

Ergebnisse: Manueller Kolbenlötprozess

- Der Prozess wurde zur Vergleichbarkeit durch einen Stempellötprozess nachgebildet.
- Alle untersuchten Handlötflussmittel (E, I, M, L) fallen durch den SIR-Test, wenn die FM einer Temperatur von maximal 100°C ausgesetzt werden.
- Alle untersuchten Handlötflussmittel (E, I, M, L) bestehen den SIR-Test, wenn die FM einer Temperatur von 250°C ausgesetzt werden.
- Bei Temperaturen zwischen diesen Grenzwerten weisen viele FM zu Beginn der SIR-Test-Auslagerung einen Widerstandswert  $<1,0E08$  Ohm auf, bestehen aber den SIR-Test.
- Eine Kombinationsprüfung mit Lotpasten wurde aufgrund dieser Ergebnisse nicht durchgeführt.

### 3.4.5 Maschinengestütztes Rework, nur Rework-Flussmittel

Untersucht wird der Reworkfall bei dem z.B. für das Einlöten von BGA nur mit Selektivflussmittel gearbeitet wird. Die SIR-Test-Kurven in Abb. 37 und Abb. 38 sowie die Ergebnisdarstellung in Tabelle 12 zeigen, dass der Widerstand bei niedrigen Prozesstemperaturen zu Beginn der Messung den geforderten Grenzwert von 100 MOhm nicht einhält. Des Weiteren besteht das Flussmittel H nur bei der Temperatur von 245°C den SIR-Test.

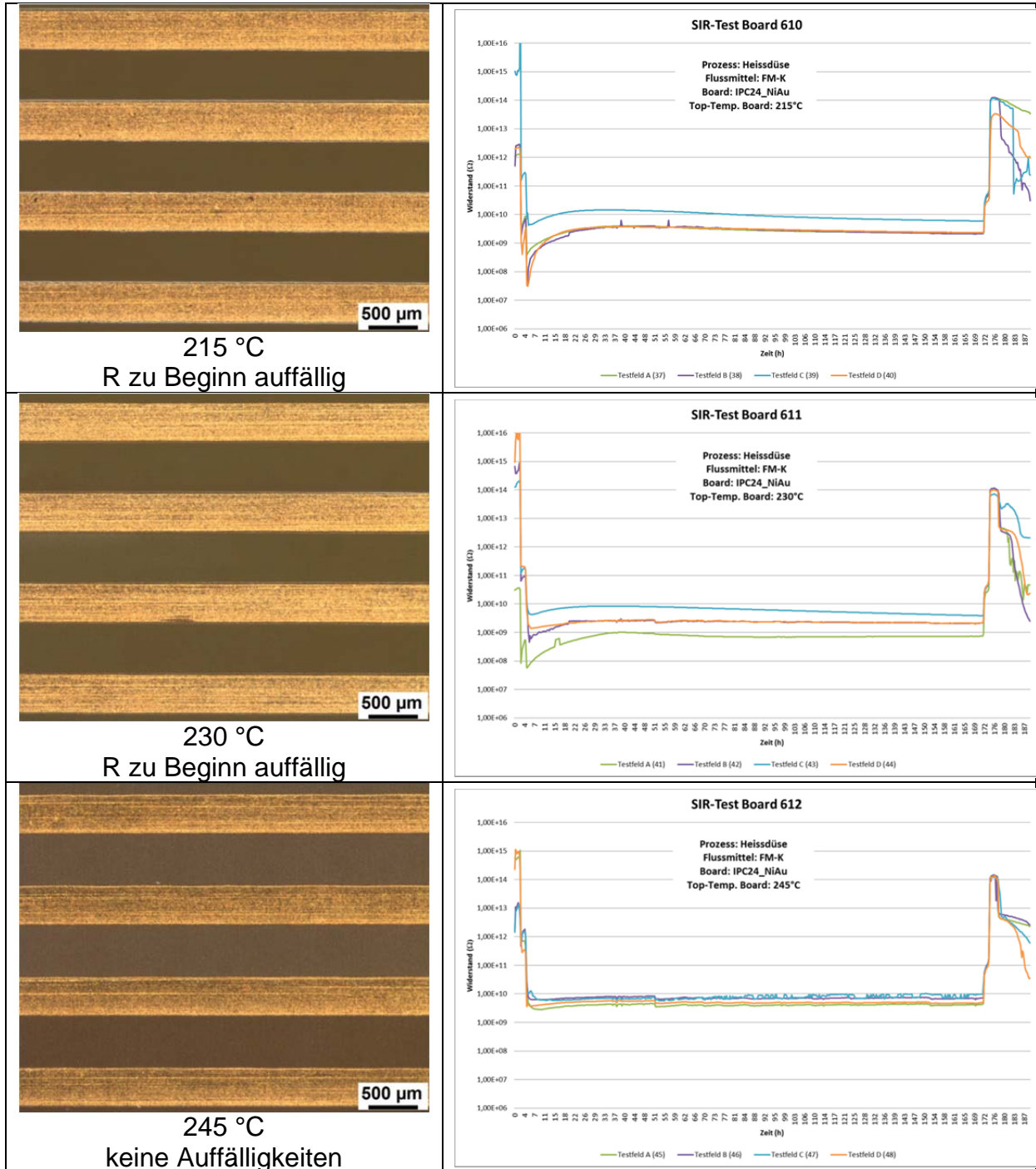


Abb. 37: Rework-Flussmittel K, REMO

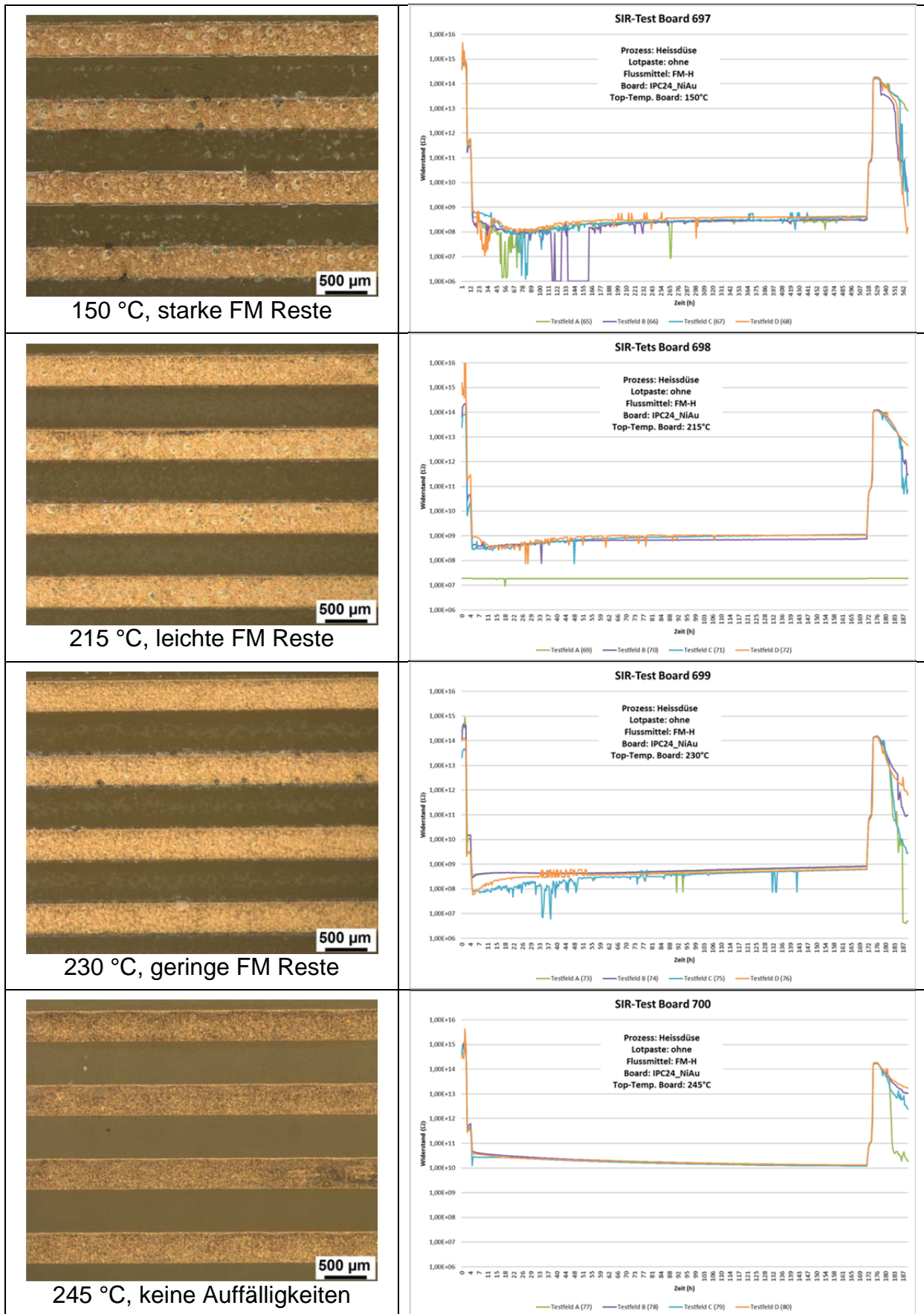


Abb. 38: Rework-Flussmittel H, RELO

Rew-Flux	Klass.	Max. Temp. [°C]	Board		Bemerkung	SIR-Test
J	ROL1	215	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
J	ROL1	230	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
J	ROL1	245	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
K	REM0	215	IPC-B-24	NiAu breit	zu Beginn <1E08 Ohm	✓
K	REM0	230	IPC-B-24	NiAu breit	zu Beginn <1E08 Ohm	✓
K	REM0	245	IPC-B-24	NiAu breit	-	✓
H	REL0	150	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	Nicht bestanden
H	REL0	215	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	Nicht bestanden
H	REL0	230	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	Nicht bestanden
H	REL0	245	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	✓

Tabelle 12: Maschinengestütztes Rework, nur Rework-Flussmittel

#### Ergebnis: Maschineller Reworkprozess

- Alle untersuchten Reworkflussmittel (J, K, H) bestehen nach vollständig durchlaufenem bleifreiem Reworklötprozess (245 °C) den SIR-Test.
- FM J besteht in allen untersuchten Parameter-Variationen den SIR-Test.
- FM K besteht in allen untersuchten Parameter-Variationen den SIR-Test, weist zu Beginn der SIR-Test-Auslagerung aber teilweise einen Widerstandswert <1,0E08 Ohm auf.
- FM H fällt bei Maximaltemperaturen <230 °C durch.

#### **3.4.6 Kombiniertes Lötprozess: Reflow mit maschinengestütztem Rework**

Untersucht wird der Reworkfall bei dem das eingesetzte Reworkflussmittel mit vorhandenen Resten aus dem Inline-Reflow Lötprozess reagieren kann.

Die SIR-Test-Kurven in Abb. 39 sowie die Ergebnisdarstellung in Tabelle 13 zeigen, dass der Widerstand bei niedrigen Prozesstemperaturen zu Beginn der Messung den geforderten Grenzwert von 100 MOhm teilweise nicht einhält. Die untersuchten Flussmittel (mit Ausnahme von Flussmittel H) bestehen den SIR-Test jedoch. Flussmittel H fällt in Kombination mit allen untersuchten Lotpasten bei Prozesstemperaturen unterhalb von 245°C durch den SIR-Test.



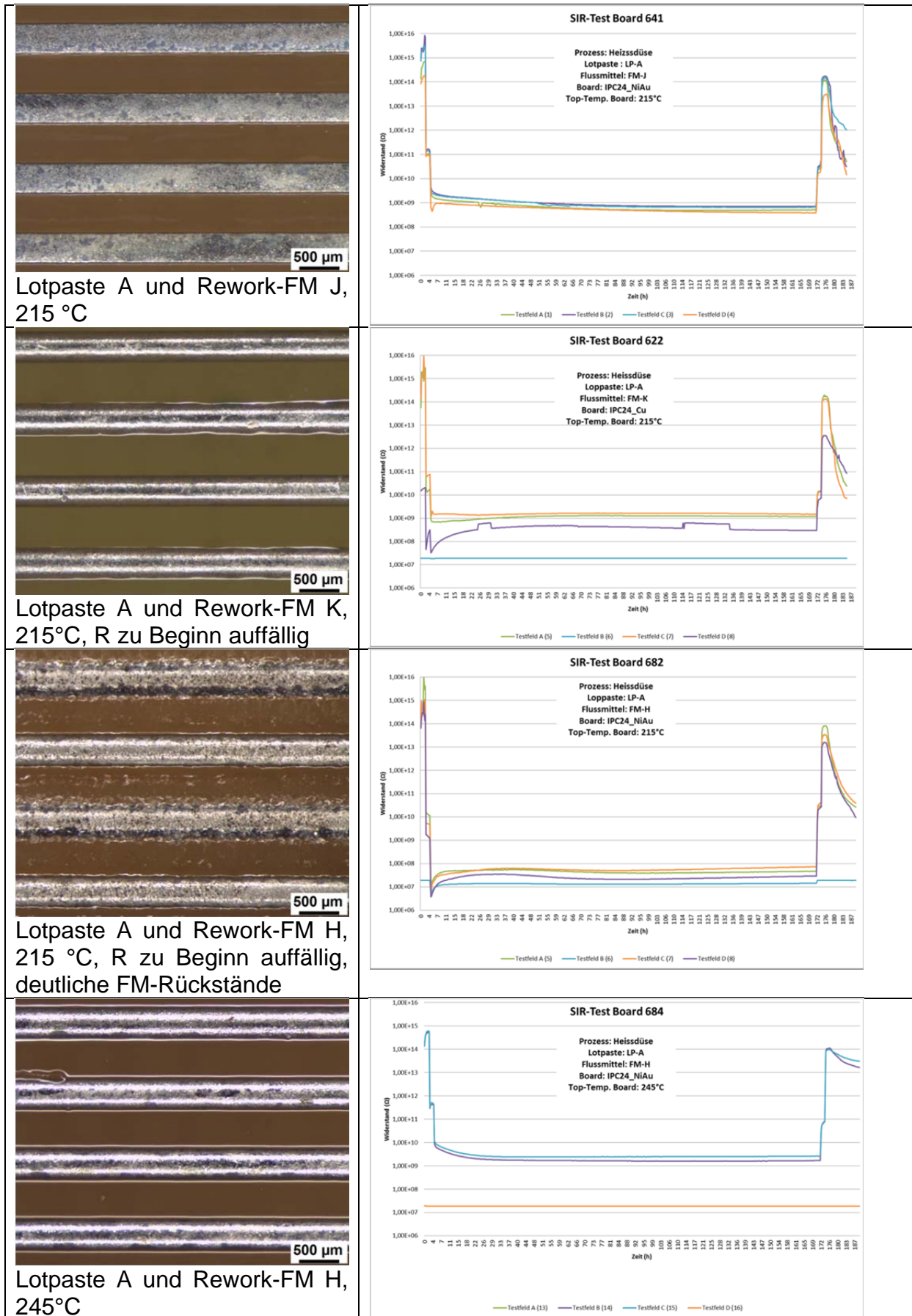


Abb. 39: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpaste A mit Rework-Flussmittel J, K, H

Rew-Flux	Klass.	Max. Temp. [°C]	Lotpaste	Klass.	Board		Bemerkung	SIR-Test
J	ROL1	215	A	ROL0	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
J	ROL1	215	B	ROL0	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
J	ROL1	215	C	REL0	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
J	ROL1	215	D	REL0	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
K	REM0	215	A	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn <1E08 Ohm	✓
K	REM0	215	A	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	-	✓
K	REM0	215	B	ROL0	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
K	REM0	215	C	REL0	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
K	REM0	215	D	REL0	IPC-B-24	Cu/NiAu breit	-	✓
H	REL0	<=230	A	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	Nicht bestanden
H	REL0	<=230	B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	Nicht bestanden
H	REL0	<=230	C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	Nicht bestanden
H	REL0	<=230	D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	Nicht bestanden
H	REL0	245	A	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	✓
H	REL0	245	B	ROL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	✓
H	REL0	245	C	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	✓
H	REL0	245	D	REL0	IPC-B-24	NiAu breit	Wenig FM	✓

Tabelle 13: Fluxkomb. aus Rework-Flussmittel und Lotpaste

#### Ergebnis: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten in Kombination mit maschinellem Reworkprozess

- FM J besteht in allen untersuchten Parameter- und Material-Variationen den SIR-Test.
- FM K besteht in allen untersuchten Parameter- und Material-Variationen den SIR-Test, weist zu Beginn der SIR-Test-Auslagerung aber teilweise einen Widerstandswert <1,0E08 Ohm auf.
- FM H fällt sowohl allein als auch in Kombination mit jeder Lotpaste bei Maximaltemperaturen <230°C durch.

### 3.4.7 Kombiniertes Lötprozess: Reflow mit maschinengestütztem Rework und Leiterplattenreinigung nach Rework

Da die Rework-Lötprozesse, bei den gewählten Parametersätze im SIR-Test zu Auffälligkeiten führen, insbesondere für das Flussmittel H, wird der Reworkprozess durch einen qualifizierten Reinigungsprozess ergänzt. Reste von den eingesetzten Flussmitteln sollen so vor der Auslagerung entfernt werden.

Die Reinigung wird mit folgenden Parametern durchgeführt, siehe Tabelle 14.

Prozessparameter				
Anlage	Einkammer-Sprühsystem			
Prozess	Medium	Temp.	Zeit	Agitation
Reinigung	VIGON® PE 180 (20%)	50°C	10 min	Spritzen
Spülung 1	Enthärtetes Wasser + VIGON® plus DF 30	RT*	3 min	Spritzen
Spülung 2	Enthärtetes Wasser	RT*	3 min	Spritzen
Spülung 3	VE-Wasser**	40°C	3 min	Spritzen
Spülung 4	VE-Wasser**	50°C	3 min	Spritzen
Trocknung	Umluft	80°C	30 min	-

Tabelle 14: Parameter automatischer Reinigungsprozess

\* RT = Raumtemperatur

\*\* VE-Wasser = vollentsalztes Wasser

Im Folgenden werden die Ergebnisse für den Anwendungsfall des maschinengestützten Rework mit anschließendem automatischem Reinigungsprozess dargestellt. Die SIR-Test-Kurven in Abb. 39 sowie die Ergebnisdarstellung in Tabelle 15 zeigen, dass sich bei dem Flussmittel H der Widerstand bei niedrigen Prozesstemperaturen zu Beginn der Messung dem geforderten Grenzwert von 100 MOhm kurzzeitig nähert bzw. diesen geringfügig unterschreitet. Alle untersuchten Flussmittel bestehen den SIR-Test (Flussmittel H mit dieser Einschränkung). Rückstände sind auf den Leiterplatten nicht mehr sichtbar.

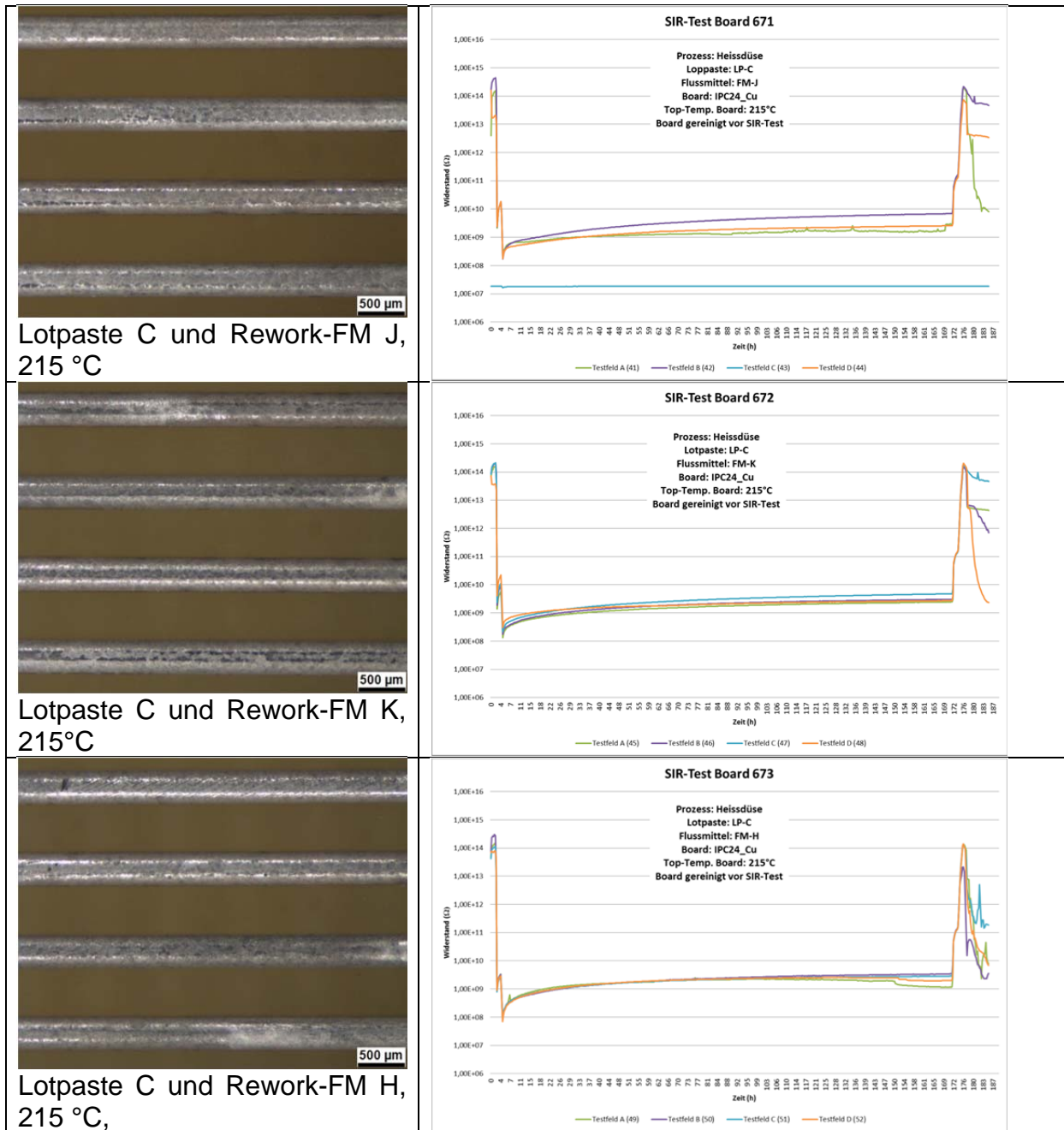


Abb. 40: Fluxkomb. aus Reflow-Lotpaste C mit Rework-Flussmittel J, K, H nach Reinigung

Rew-Flux	Klass.	Max. Temp. [°C]	Lotpaste	Klass.	Board		Bemerkung	SIR-Test
J	ROL1	215	A	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
K	REM0	215	A	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
H	REL0	215	A	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	230	A	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	245	A	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
J	ROL1	215	B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
K	REM0	215	B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
H	REL0	215	B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	230	B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	245	B	ROL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
J	ROL1	215	C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
K	REM0	215	C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
H	REL0	215	C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	230	C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	245	C	REL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
J	ROL1	215	D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
K	REM0	215	D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	-	✓
H	REL0	215	D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	230	D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓
H	REL0	245	D	REL0	IPC-B-24	Cu breit	zu Beginn kurzzeitig <1E08 Ohm	✓

Tabelle 15: Rework-Flussmittel kombiniert mit Lotpaste nach erfolgter Reinigung

Ergebnis: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten in Kombination mit maschinellm Reworkprozess nach Reinigung

- FM J und K bestehen in allen untersuchten Parameter- und Material-Variationen den SIR-Test.
- FM H besteht in allen untersuchten Parameter- und Material-Variationen den SIR-Test, weist kurzzeitig zu Beginn der SIR-Test-Auslagerung aber teilweise einen Widerstandswert  $<1,0E08$  Ohm auf.
- Es sind nach der Reinigung keine Rückstände mehr auf den Leiterplatten sichtbar.

### 3.5 Übertragung auf ein Funktionsmuster

SIR-Test-Analysen von Selektivflussmitteln werden zurzeit nur auf Teststrukturen durchgeführt. Eine Übertragung der Anwendung im Nacharbeitsfall auf bereits gefertigten Baugruppen ist bisher nicht realisiert worden. Daher soll hier versucht werden die gewonnenen Erkenntnisse für den Nacharbeitsanwendungsfall auf ein Funktionsmuster zu übertragen. Hierzu wird ein Komponenten-Testboard aufgebaut, siehe Abb. 41. Dies beinhaltet ICs mit dünnem Spaltmaß und engen Rastermaßen (0,5mm) sowie SMD-Widerstände der Baugröße 0603 und 0402.

SIR-Teststrukturen werden in das Padlayout der Komponenten integriert und ebenfalls unter den Komponenten angeordnet, siehe Bauteile PLCC68 und TQFP in Abb. 41 sowie die Ausschnittdarstellung der Widerstände Baugröße 0603, Abb. 42. So soll das Verlaufen von Flussmittel unter Bauteile erfasst werden.

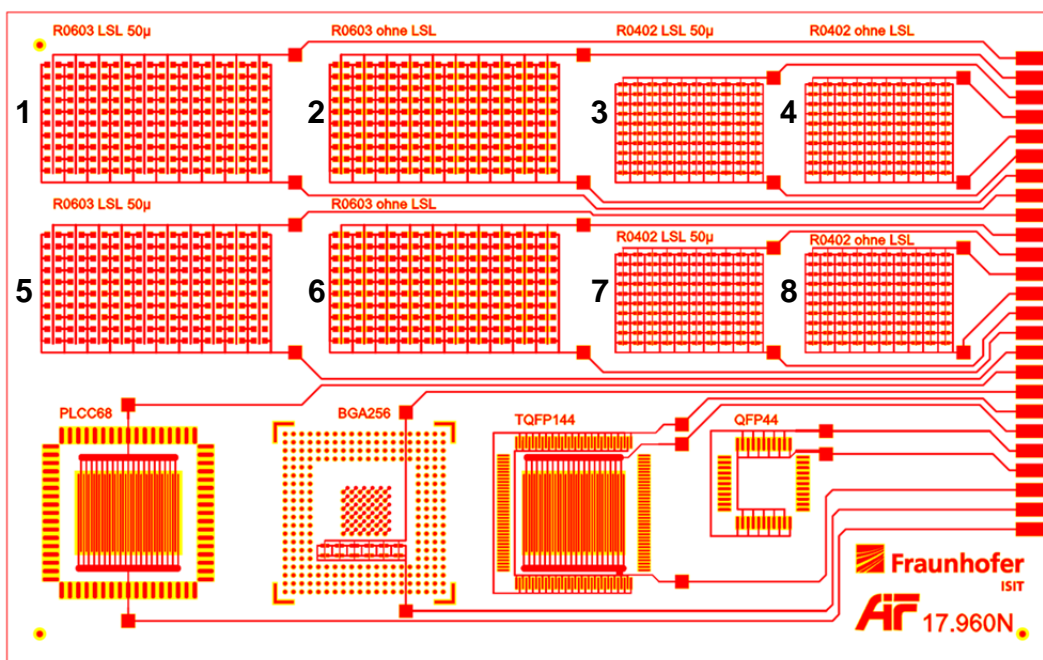


Abb. 41: Funktionsmusterboard

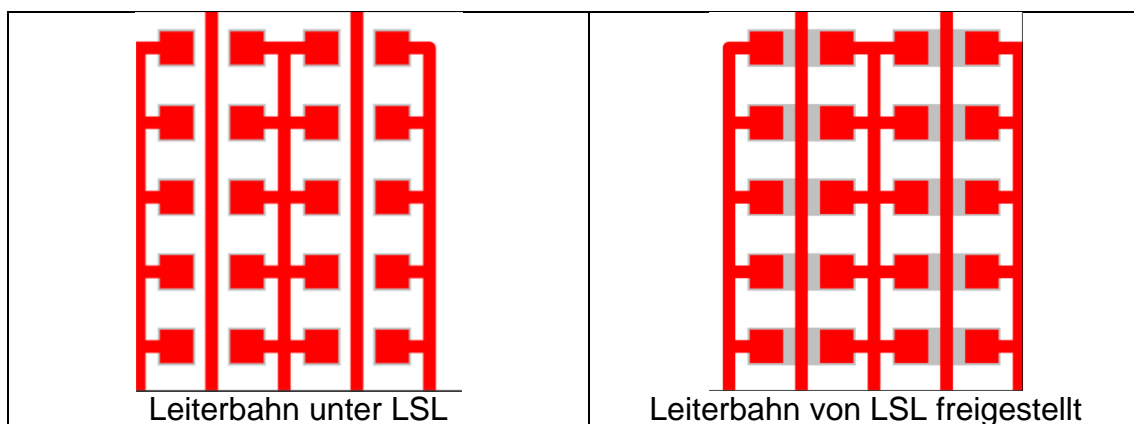


Abb. 42: Funktionsmusterboard Ausschnitt R0603

Die Boards werden mit einem Inline-Reflow Lötprozess aufgebaut. Hierbei werden die Felder 1 – 4 nicht bestückt sondern nur mit einem Lotpastendruck versehen und umgeschmolzen. Die Felder 5 – 8 werden mit den entsprechenden Komponenten bestückt.

Die SIR-Testauswertung des Inline-Reflow Lötprozesses ergibt an den Prüfstrukturen unter den IC-Komponenten vergleichbare Werte zu den Ergebnissen aus 3.4.1. Weitere Ergebnisse der SIR-Tests zeigen, dass bei der Bauteilgröße 0402 im Fall von freiliegenden Leiterbahnabschnitten eine Reduzierung des Widerstands sichtbar wird, siehe Abb. 43 und Abb. 44, lila Kurve. Die hier vorhandenen geringen Abstände der freiliegenden Leiterbahnabschnitte zu den Bauteilpads in Verbindung mit den darüber liegenden Komponenten ergeben eine hochohmige leitfähige Verbindung. Der Widerstandwert liegt in der Größenordnung von  $1E08$  Ohm bzw. unterschreitet knapp den erlaubten Grenzwert.

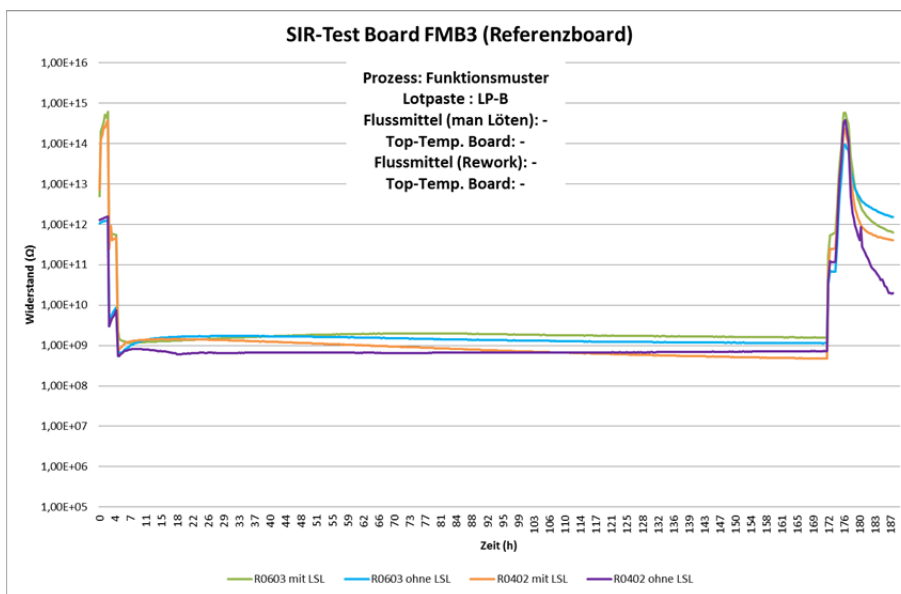


Abb. 43: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten, Bauteilfelder ohne Bestückung

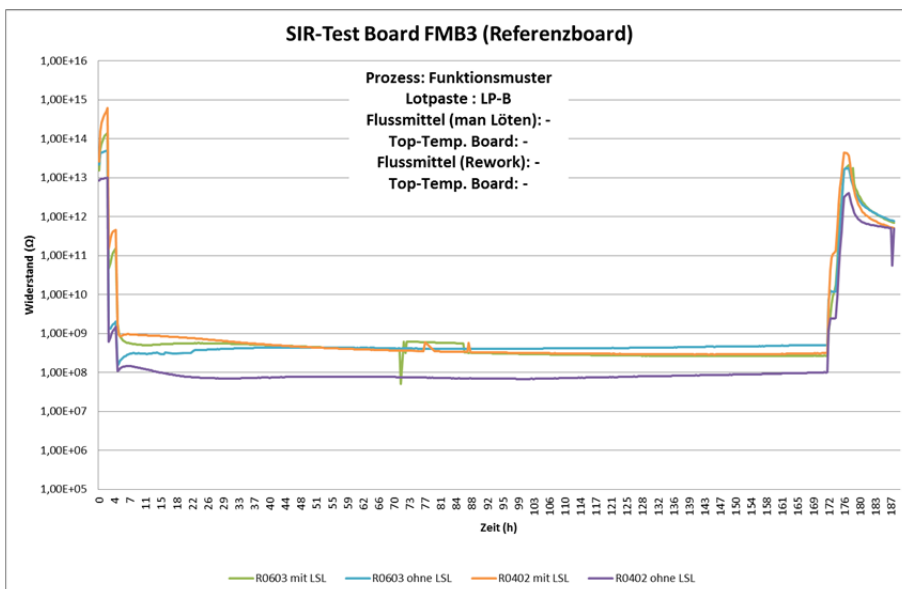


Abb. 44: Maschinelles Konvektions-Reflowlöten, Bauteilfelder mit Bestückung



Auf dem Funktionsmusterboard konnte keine Lötsimulation des manuellen Lötprozesses mit dem FlächenlötKolben realisiert werden. Die vorhandenen Lotdepots aus dem Inline-Reflowprozess verhinderten eine vollflächige Auflage des LötKolbens und damit eine gleichmäßige Wärmeverteilung. So war es hier nicht möglich, einen auswertbaren reproduzierbaren manuellen Lötprozess zu simulieren und aussagefähige Ergebnisse für manuelle Lötprozesse zu erzielen.

Die Versuche mit maschinengestütztem Rework, wobei Rework-Flussmittel mit der Inline Lotpaste kombiniert wurde, haben an den ICs ebenfalls zu keinen reproduzierbaren Ergebnissen geführt. Da nicht zu sehen war, wie viel Flussmittel aufgetragen wurde (überschüssiges Flussmittel lief sofort in den Spalt zwischen Bauteil und Leiterplatte) und ebenfalls nicht sichtbar war, wie weit das Flussmittel unter das Bauteil gelaufen ist, war der Auftrag mittels Pinsel zu ungenau dosiert. Versuche mit einer Glasplatte als Bauteilersatz haben ebenfalls keinen Erfolg gebracht. Hier war der Wärmeeintrag unterhalb der Glasplatte auf die dort liegende SIR-Teststruktur nicht äquivalent mit dem Wärmeeintrag unterhalb des entsprechenden Bauteils.

Diese Prozesse müssten optimiert werden, um verlässliche Analyseergebnisse zu erhalten. Das war allerdings im Bearbeitungszeitraum des Projekts nicht mehr möglich.

#### Ergebnis: Funktionsmuster

- Die SIR-Testergebnisse des Inline-Reflow Lötprozesses sind vergleichbar mit denen an den SIR-Test-Leiterplatten.
- Ein im SIR-Test auswertefähiger und reproduzierbarer manueller Nacharbeitslötprozess konnte nicht nachgestellt werden.
- Ein im SIR-Test auswertefähiger und reproduzierbarer maschinengestützter Reworkprozess konnte nicht nachgestellt werden.

### 3.6 Untersuchung der elektrochemischen Migration mit ECR und EIS

Eine Kernfrage des Projektes war es, ob der SIR-Test nicht dahingehend mit elektrochemischen Untersuchungsmethoden ergänzt werden kann, dass während des Testverlaufes zusätzliche Informationen gewonnen werden können, ggfs. auch schon frühzeitig das Testergebnis vorhergesagt bzw. abgeschätzt werden kann. Hintergrund ist, dass viele elektrochemische Methoden im Prinzip wie der SIR-Test darauf beruhen, ein System mit einer Spannung (bzw. einem Potential) anzuregen und die Stromantwort zu interpretieren.

Hierzu wurden zwei elektrochemische Methoden ausgewählt (Tabelle 16):

- Die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS), bei der das System mit einem frequenzmodulierten Potential angeregt wird und mit der Stromantwort die Impedanz, also ein komplexer Widerstand, bestimmt wird. Die Anregung ist sehr klein ( $< 100$  mV), so dass das betrachtete elektrochemische System nicht beeinflusst wird.
- Das elektrochemische Rauschen (ECR). Hierbei wird das Signal besonders fein und mit hoher Abtastrate (z. B. im Sekundenbereich) abgetastet und hinsichtlich auftretender Fluktuationen analysiert.

Beide Methoden sind komplementär und weisen unterschiedliche Anwendungsvoraussetzungen und Aussagefähigkeiten auf. Sie lassen sich jedoch grundsätzlich in den SIR-Test implementieren, ohne diesen nachteilig zu beeinflussen.

	<b>Elektrochemische Impedanzspektroskopie, EIS</b>	<b>Elektrochemisches Rauschen, ECR</b>
Anregung	potentialkontrolliert, $< 100$ mV	anregungsfrei
Ergebnis	Impedanzspektren	Stromrauschen od. Potentialrauschen
Auswertung	für homogenes Messfeld quantitative Auswertung mittels Vergleichsmodellen möglich	vergleichende Auswertung der Rauschniveaus
Zeitliche Auflösung	entsprechend der Messzeit für Spektren (20 min – 2 h)	hohe zeitliche Auflösung
Anwendung	besonders für hochohmige Systeme (bis $10^{12} \Omega$ ) geeignet	besonders für niedrigohmige Systeme geeignet
Techn. Anforderungen	erfordert besondere Potentiostaten	erfordert geeigneten Verstärker, gut parallelisierbar

Tabelle 16: Gegenüberstellung der elektrochemischen Messmethoden

### 3.6.1 Anwendung der elektrochemischen Impedanzspektroskopie EIS

Bei der elektrochemischen Impedanzspektroskopie wird dem System (die elektrochemische Zelle) ein kleines sinusförmiges frequenzmoduliertes Potentialsignal ( $< 100$  mV Amplitude) aufgeprägt und die sinusförmige Stromantwort hinsichtlich Amplitude und Phasenverschiebung gemessen. Im vorliegenden Fall handelt es sich beim SIR-Testboard um ein 2-Elektrodensystem, das mit einer konstanten Spannung von 10 V bzw. 100 V beaufschlagt wird. Zur Implementierung der EIS wurde diesem Grundsignal das frequenzmodulierte Spannungssignal überlagert (Da in einem zwei-Elektrodensystemen wie dem SIR-Testboard kein Bezugspotential vorhanden ist, handelt es sich hier nicht um ein überlagertes Potential- sondern Spannungssignal).

Die EIS-Messungen wurden mit einem Potentiostaten Reference 600 der Fa. Gamry durchgeführt. Dieses Gerät weist eine hohe Eingangsimpedanz ( $> 1$  T $\Omega$  bei 100 mHz) auf und ist deshalb für die Anwendung an hochohmigen Systemen geeignet. Der Offset der Stromantwort wurde durch die Systemsoftware eliminiert, als Ergebnis der Messungen wurden klassische Impedanzspektren erhalten.

Die Interpretation der Spektren mittels sogenannter Ersatzschaltbilder ist im vorliegenden Fall nicht legitim, da das Modell des idealen Kondensators für die Kammstruktur des SIR-Board nicht gilt. Gleichwohl soll die Parallelschaltung eines Ohmschen Widerstandes mit einem Kondensator als Modell dienen, die gemessenen Spektren zumindest qualitativ zu erläutern.

Hierzu sind in Abb. 45 einige berechnete Spektren mit variierendem Ohmschen Widerstand und veränderter Kapazität dargestellt.

Eine Abnahme des Ohmschen Widerstandes führt zu einer Reduzierung des Betrages der Impedanz bei niedrigen Frequenzen, währenddessen die Veränderung der Kapazität zu einer Verschiebung der Flanke in den mittleren Frequenzen führt.

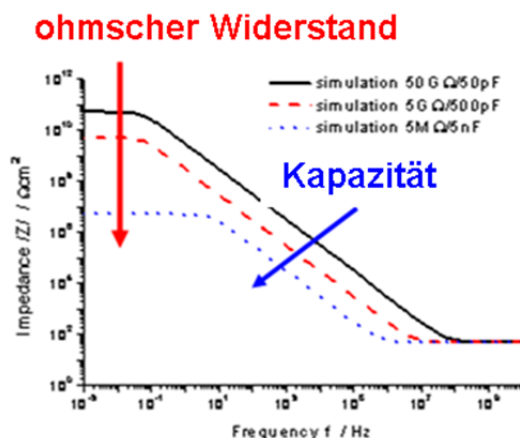


Abb. 45: Kalkulierte Impedanzspektren einer Parallelschaltung eines Ohmschen Widerstandes und eines Kondensators, Betrag der Impedanz gegen Frequenz (Bode-Plot).

Die genaue Kalkulation dieser Werte ist, wie schon angemerkt, nicht möglich, da es für die SIR-Boards kein entsprechendes Berechnungsmodell gibt.

Der Ohmsche Widerstand und die Kapazität der Boards im Test lassen sich also nur qualitativ beschreiben. Zur Beschreibung des zeitlichen Verhaltens werden dann jeweils repräsentative Werte aus den Spektren herangezogen.

Die Untersuchungen sollten entsprechend dem SIR-Test bei 10 V Spannungslast am SIR-Board durchgeführt werden. Entgegen den Angaben des Herstellers war der Potentiostat Reference 600 nicht in der Lage, bei dieser Offset-Spannung noch ein frequenzmoduliertes Spannungssignal für die Impedanzmessungen zu überlagern. Daher wurde kurzzeitig, also nur für die Durchführung der einzelnen Messungen, das Spannungssignal für ca. 20 min. auf 8 V reduziert, nach Ende der Messung wieder auf den Ursprungswert von 10V zurückgestellt. In Bezug auf die Gesamtbelastung ist diese Änderung als klein anzusehen und, da im Wesentlichen vergleichende Untersuchungen durchgeführt wurden, akzeptabel.

Die Untersuchungen wurden an folgenden Boards durchgeführt:

- Cu-IPC-B-24
- Cu-IPC-B-52
- NiAu-IPC-B-24
- NiAu-IPC-B-52

Messungen an „sauberen“ Boards, also Boards, die nicht verlötet oder mit Löt Hilfsmitteln o. ä. beaufschlagt wurden, wurden gemäß IPC-TM-650 2.6.3.7 bei 90% r. H. und 40°C für 168 h durchgeführt. Die Messungen der Impedanzspektren wurden mindestens einmal täglich durchgeführt, zu Beginn der Spannungsbelastung teilweise auch öfter. Die Impedanzspektren zeigten ein rein kapazitives Verhalten, welches sich zeitlich nicht wesentlich änderte (Abb. 46). Es ist hierbei nicht auszuschließen, dass sich aufgrund der niedrigen Oberflächenenergie des Kunststoffträgers auch bei den 90% r. H. kein Wasserfilm auf der Oberfläche bildet und so auch kein Einfluss auf die Leitfähigkeit hat.

Demgegenüber weisen die Boards, die mit Flussmittel D beaufschlagt wurden, mit der Zeit starke Veränderungen in den Spektren auf (Abb. 47). Hier nimmt der Betrag der Impedanz bei niedrigen Frequenzen beginnend ab, was auf eine Verringerung des ohmschen Widerstandes (entsprechend einer Erhöhung der Leitfähigkeit) schließen lässt. Der Effekt ist bei den Boards mit 52 Kämmen sowie den NiAu-Boards stärker ausgeprägt. Eine leichte, aber nicht ausgeprägte Erhöhung der Kapazität der Boards kann beobachtet werden.

Zum Vergleich wurden Messungen durchgeführt, bei denen die Boards mit einer Salzlösung beaufschlagt wurden, um hier den Korrosionsvorgang zu forcieren. Die Boards wurden in der Versuchsvorbereitung mit einer 3% NaCl-Lösung benetzt und dann mit einem Fön eingetrocknet, um zu ermöglichen, dass in der Feuchteauslagerung ein wässriger Film von hoher Salzkonzentration entsteht, der nicht durch Oberflächenspannungen abreißt. Schon nach kurzer Zeit zeigen sich hier signifikante Veränderungen in den Impedanzspektren, Abb. 48. Da sich hier vornehmlich der Ohmsche Widerstand ändert, ist nicht auszuschließen, dass es sich hierbei im Wesentlichen um einen Kurzschluss durch den Elektrolyten handelt.

Nach den Versuchen wurden die Boards unter dem Mikroskop (Beispielbilder siehe Abb. 49 und Abb. 50) betrachtet und die Interdigitalstrukturen nach Erscheinungen wie Dendriten o.ä. abgesucht. An den Boards, die keine Beaufschlagung erfahren haben, erkennt man so gut wie keinen Korrosionsangriff. Der Korrosionsangriff ist bei den Boards, die mit dem NaCl-Film beaufschlagt wurden, vergleichsweise stark. Hier

finden sich eine lokale Fleckenbildung und Ausblühungen von Korrosionsprodukten (insb. grünliche auf den Cu-boards) wieder. Im Gesamteindruck reiht sich die Erscheinung der mit Flussmittel D beaufschlagten Boards dazwischen ein, der Korrosionsangriff ist hier weniger stark ausgeprägt als beim Beispiel mit NaCl-Film. Dendriten, die auf elektrochemische Migration hinweisen, wurden in diesen Versuchen nur an dem NiAu-IPC-52 mit Flussmittel D festgestellt. Diese zeigt auch von den Impedanzspektren (Abb. 47) die ausgeprägteste und schnellste Abnahme des Betrages der Impedanz bei niedrigen Frequenzen.

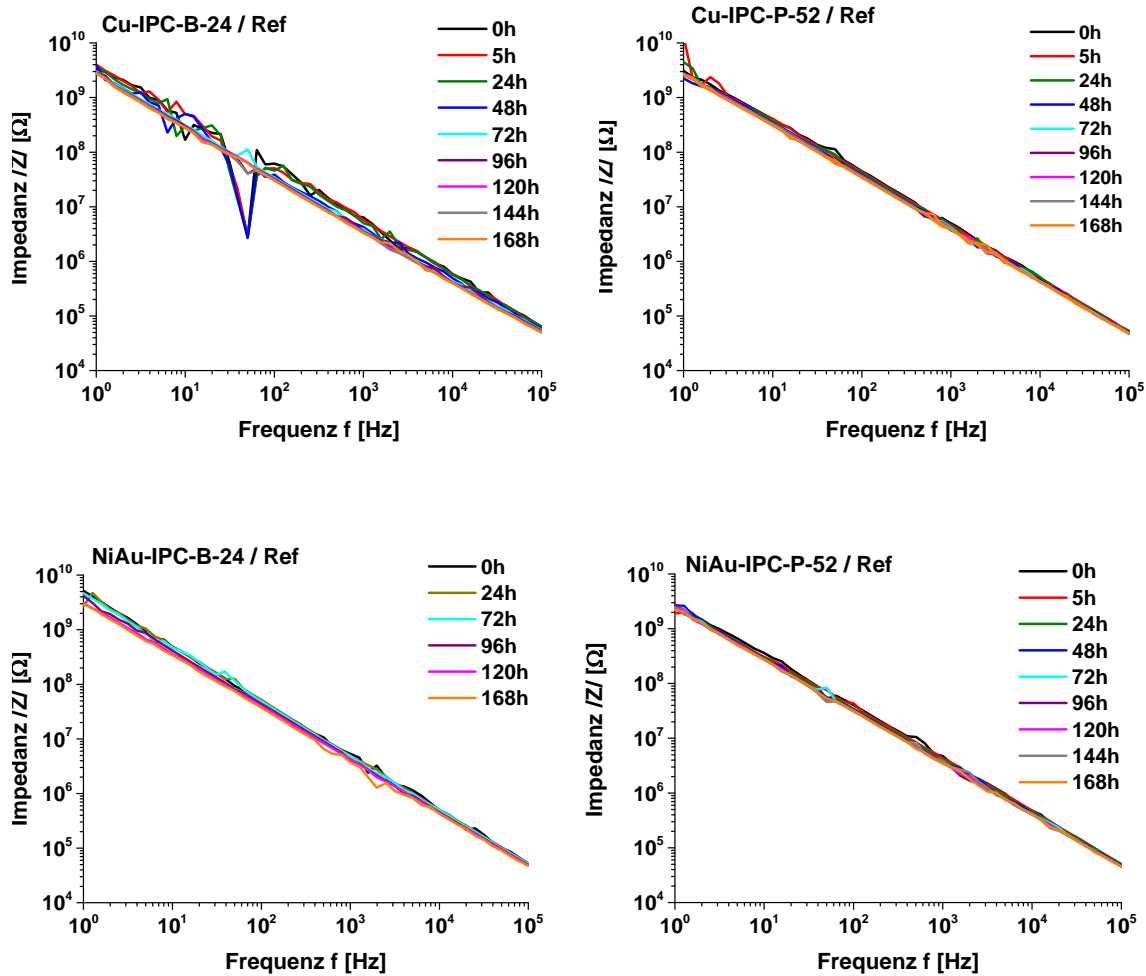


Abb. 46: EIS-Messungen an SIR Boards bei 90% r. H., 40°C und 10V Spannungsbelastung (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.7), Oberflächen frei, mit Ethanol gereinigt.

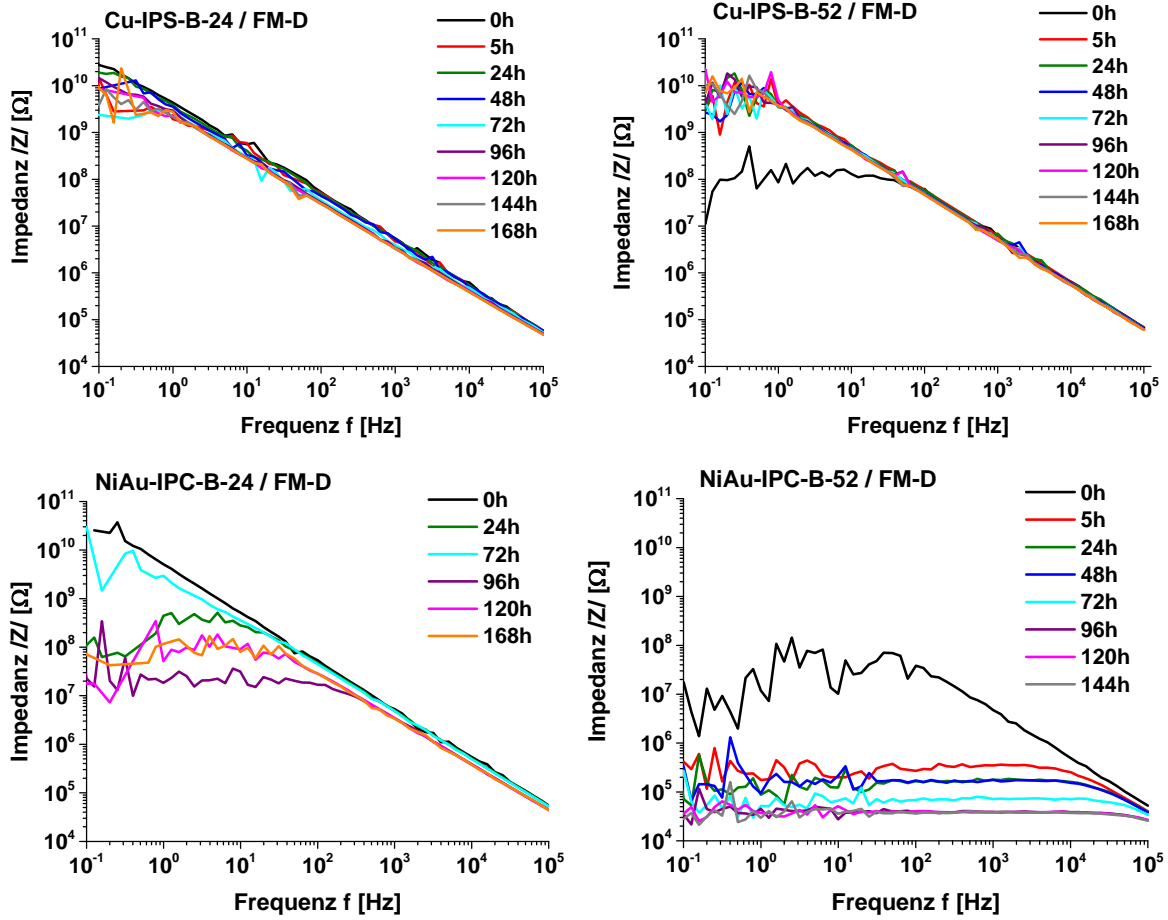


Abb. 47: EIS-Messungen an SIR Boards bei 90% r. H., 40°C und 10V Spannungsbelastung (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.7), Oberfläche mit Flussmittel D beaufschlagt.

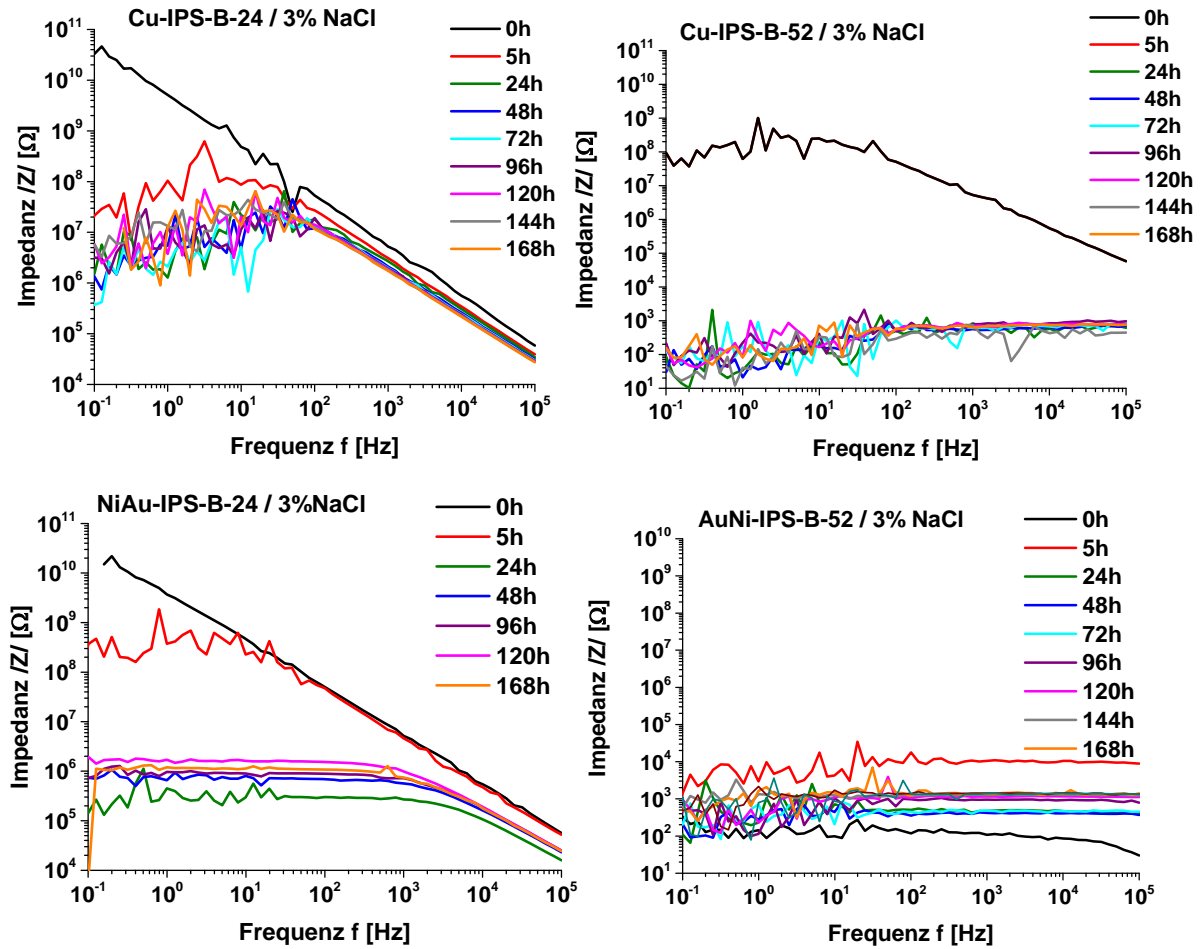


Abb. 48: EIS-Messungen an SIR Boards bei 90% r. H., 40°C und 10V Spannungsbelastung (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.7), Oberfläche mit Salzfilm beaufschlagt.

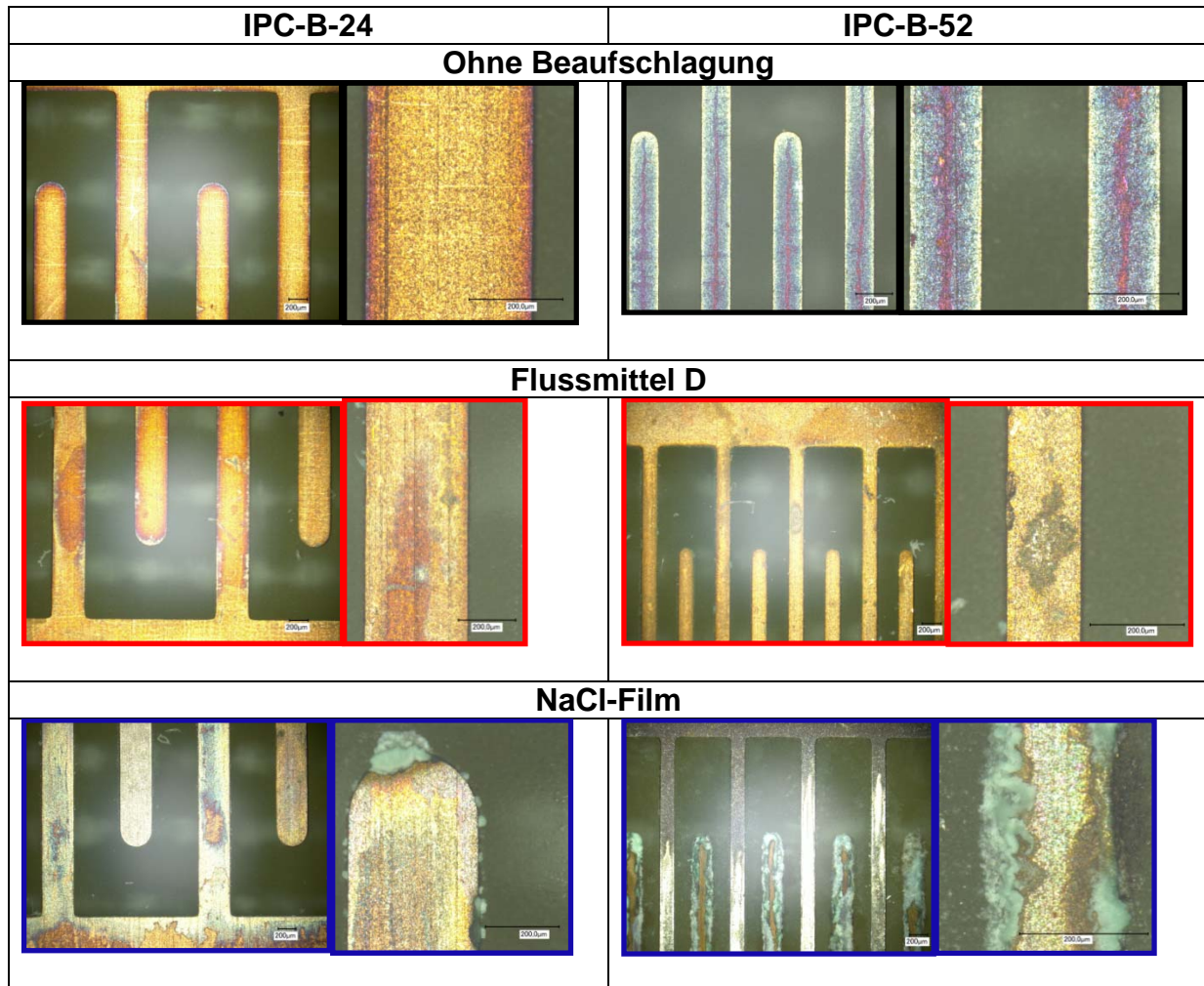


Abb. 49: Mikroskopische Aufnahmen der Cu-Boardoberflächen aus den Versuchen in Abb. 46- Abb. 48, nach 168 Auslagerung bei 90% r. H., 40°C und 10V Spannungsbelastung (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.7).



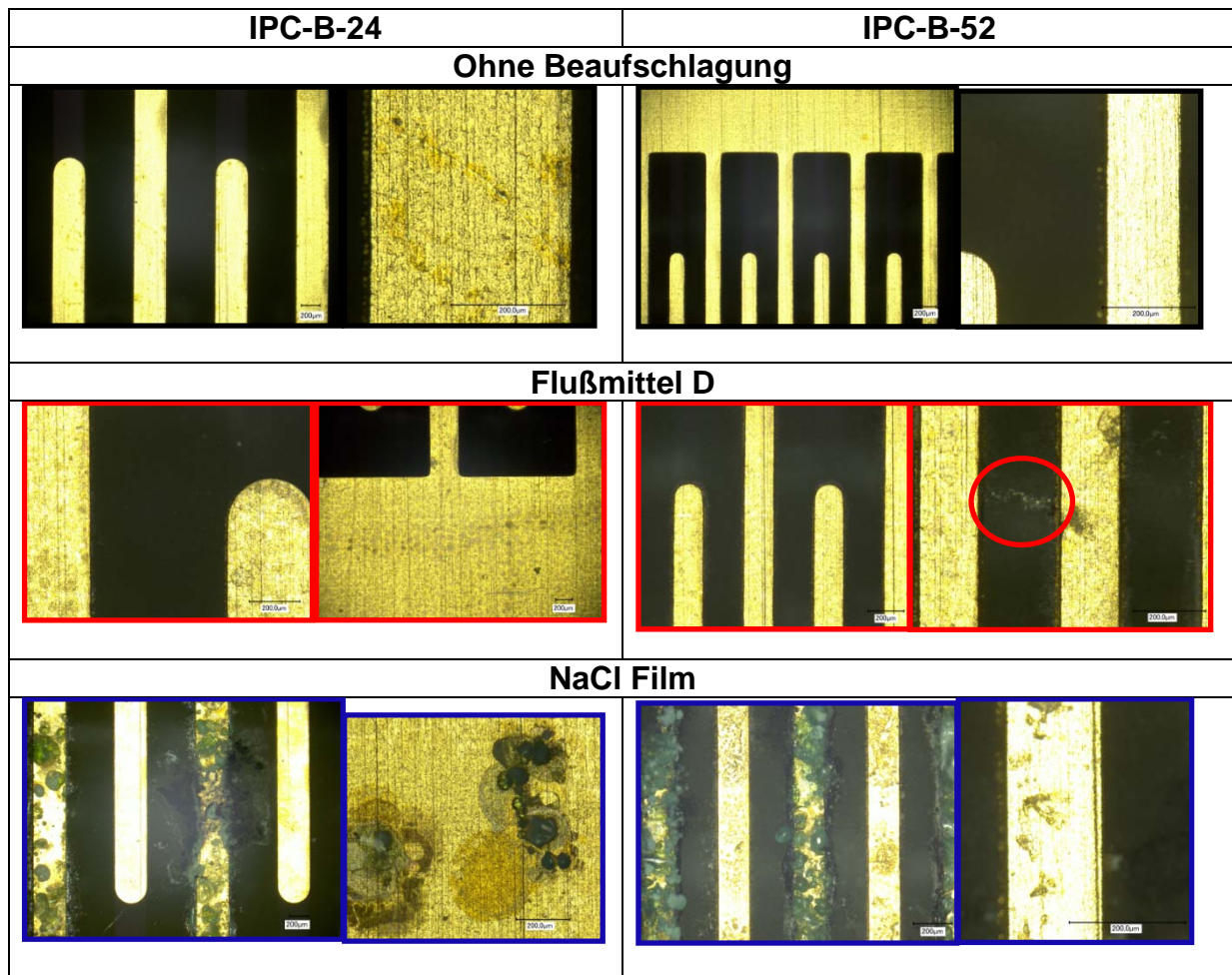


Abb. 50: Mikroskopische Aufnahmen der NiAu-Boardoberflächen aus den Versuchen in Abb. 46 - Abb. 48, nach 168 Auslagerung bei 90% r. H., 40°C und 10V Spannungsbelastung (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.7), roter Kreis: elektrochemische Migration in Form eines Dendriten.

Ähnliche Versuche wurden auch an gelöteten Boards (Lotpaste B), jedoch bei leicht abgeänderten Bedingungen, und zwar gemäß IPC-TM-650 2.6.3.3 durchgeführt, also bei 85°C und 85 % r. H., Abb. 51 und Abb. 52.

Hier zeigen die gemessenen Impedanzspektren insgesamt ein sehr indifferentes Bild. So weisen die gereinigten Proben kein rein kapazitives Verhalten auf, Ohmsche Anteile machen sich hier im niederen Frequenzbereich bemerkbar. Jedoch ist nicht schlüssig, warum der Betrag der Impedanz am CU-Board B-52 um ca. eine Größenordnung höher liegt als beim NiAu-Board mit entsprechender Geometrie. Die Unterschiede in den Impedanzspektren schon im Anfangszustand lassen hier einen direkten Vergleich kaum zu. Dies ist vermutlich auf Unterschiede in der Benetzung des Lotes und der Verteilung des Flussmittels zurückzuführen.

Es wurden auch hier die Interdigitalstrukturen aller untersuchten Boards mikroskopisch untersucht. Auf den Oberflächen, die mit einem Salzfilm nach dem Löten beaufschlagt wurden, waren intensive Korrosionserscheinungen feststellbar und vermutlich darunter verborgen auch eine Dentritenbildung (Abb. 53).

Grundsätzlich verändern sich die Spektren mit der Zeit recht wenig, ein Trend, der eine Korrelation mit den aufgefundenen Korrosionserscheinungen zulässt, war grundsätzlich nicht zu erkennen, daher wird hier auf eine umfangreichere Darstellung der Korrosionserscheinungen verzichtet.

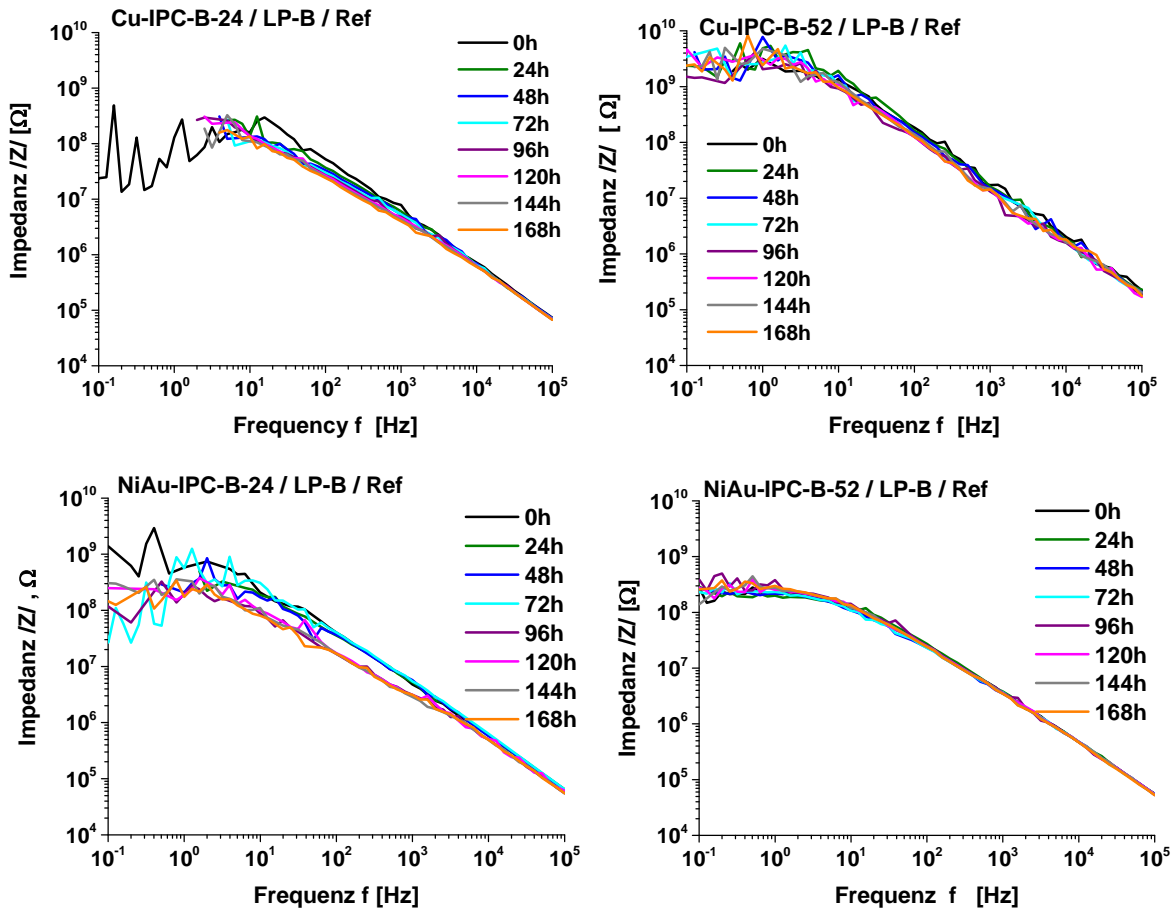


Abb. 51: EIS-Messungen an gelöteten SIR Boards bei 85% r. H., 85 °C und 10V Spannungsbelastung (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.3), Oberflächen im Anlieferungszustand.

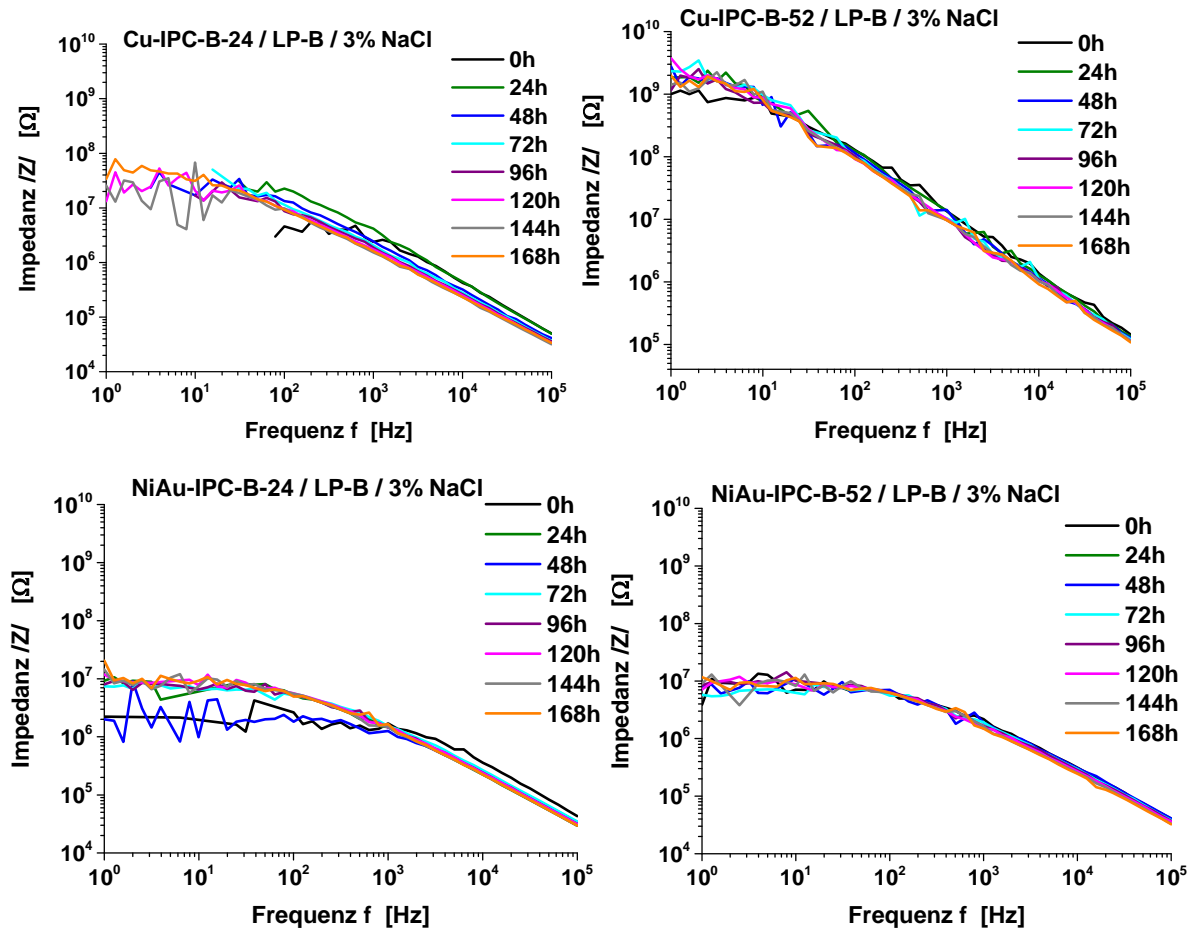


Abb. 52: EIS-Messungen an gelöteten SIR Boards bei 85% r. H., 85 °C und 10V Spannungsbelastung (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.3), Oberflächen mit Salzfilm beaufschlagt.

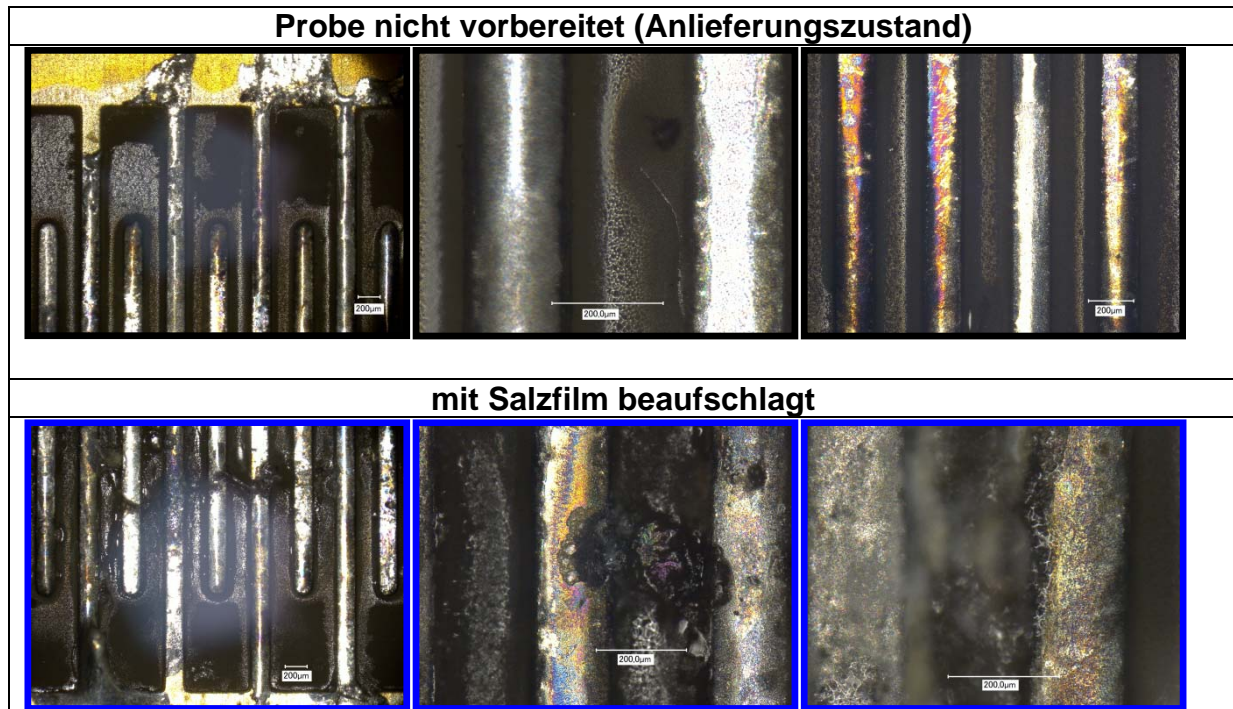


Abb. 53: Mikroskopische Aufnahmen der Boardoberflächen NiAu / IPC-B-52 /gelötet (Lotpaste B) nach 168h bei 85% r.H., 85 °C und 10 V (gemäß IPC-TM-650 2.6.3.3).

### 3.6.2 Anwendung des elektrochemischen Rauschens ECR

Beim elektrochemischen Rauschen (ECR) wird ein elektrochemisches Signal (z. B. freies Korrosionspotential oder Elementstrom) mit definierten Raten abgetastet, der sog. „Gleichanteil“ eliminiert und nur die Fluktuationen betrachtet (Abb. 54). Die Methode erfordert eine gewisse Aufbereitung des Signals und Auflösung des Messbereiches.

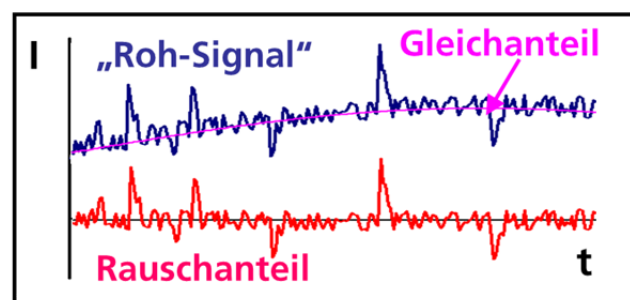


Abb. 54: Prinzip des elektrochemischen Rauschens (ECR).

Das elektrochemische Rauschen ist eine Methode, die sehr sensitiv auf lokale Korrosionsvorgänge wie Lochkorrosion usw., insbesondere bei passivierenden Systemen, reagiert [11] - [13].

Übertragen auf den Anwendungsfall handelt es sich vereinfacht gesagt um eine zeitlich und von der Messamplitude her sehr fein aufgelöste Strommessung mit dem Ziel, so zusätzliche Informationen über den Korrosionsprozess zu gewinnen.

Die Untersuchungen wurden wieder mit einem Gamry Reference 600 durchgeführt, im Gegensatz zur Impedanzspektroskopie konnten die Stromdaten auch bei der Aufprägung von 10 V konstant hinreichend fein gemessen werden. Die Abtastrate der Rauschmessungen betrug 20 1/s. Die Daten wurden gespeichert und der Gleichanteil mittels eines numerischen Algorithmus zur Simulation eines Hochpass-Besselfilters bei einer Grenzfrequenz von 0,1 Hz herausgerechnet.

Basierend auf den experimentellen Erfahrungen der Impedanzmessungen war auch für die ECR-Messungen davon auszugehen, dass es bei der Verwendung eines Klimaschranks zu elektromagnetischen Störungen kommt, die das gemessene Signal verfälschen. Diesbezüglich ist das elektrochemische Rauschen als Methode besonders empfindlich, insbesondere auch deshalb, weil das artefaktische Rauschsignal kaum vom elektrochemischen Rauschsignal zu unterscheiden ist. Die Messungen wurden daher nicht in einem Klimaschrank durchgeführt. Stattdessen wurde hier ein Exsikkator verwendet, bei dem die relative Feuchte auf 95% eingestellt wurde und der in einem Faradayschen Käfig platziert wurde. Gemessen wurde bei Labor-temperatur (23 °C).

Zur Quantifizierung der Raussignale wurde die so genannte Rauschladungsmenge RLM berechnet. Im Prinzip handelt es sich hier um die Aufsummierung der Beträge der Messpunkte des Rauschsignals, Abb. 55. Eine hohe Rauschintensität führt zu einer höheren Steigung der RLM, eine geringe Rauschintensität zu einem Abflachen der Kurve. Da nur positive Werte (Beträge) addiert werden, kann die Kurve nicht abfallen. Die Kurve gibt also den zeitlichen Verlauf des Korrosionsprozesses wieder. Des Weiteren ist in jedem neu berechneten Punkt die Information des vorhergehenden Prozesses enthalten, somit wird der integrale Aspekt der Korrosion hier besonders berücksichtigt. Auch lässt sich vergleichsweise einfach mittels Mittelung vor der Aufsummierung die Datenmenge reduzieren, ohne dass wesentliche Informationen verlorengehen, die grundsätzliche Entwicklung der Kurve bleibt erhalten. Weitere Details zu der Auswertemethode sind in [13] beschrieben.

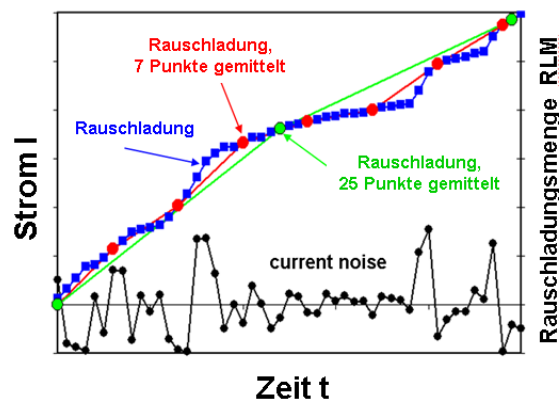


Abb. 55: Prinzip der Berechnung der Rauschladungsmenge

Zur Verdeutlichung werden die Ergebnisse an einem System detailliert dargestellt. In Abb. 56 sind einige Abschnitte von Rauschsignalen für ein System (NiAu-24 Board mit Flussmittel FM-E bei 95 °C und Raumtemperatur) aufgetragen. Ohne Flussmittel ergibt sich eine sehr geringe Rauschintensität, die im Wesentlichen auf das Mess-

system zurückzuführen ist. Im direkten Vergleich dazu tritt bei einer Flussmittelapplikation bei 100 °C für 12s ein erhöhtes Rauschniveau auf. Bei 200 °C und 15s ist das Rauschniveau zunächst hoch, nimmt aber mit der Zeit ab, wobei dies bei einer Skalierung von 800 nA auf niedrigem Niveau stattfindet. Demgegenüber tritt bei dem System, bei dem das Flussmittel bei Raumtemperatur aufgetragen wurde, eine mit der Zeit drastische Erhöhung des Rauschniveaus auf. Die Darstellung in Abb. 56 ist gegenüber den anderen Systemen mit 400µm 500-mal höher skaliert.

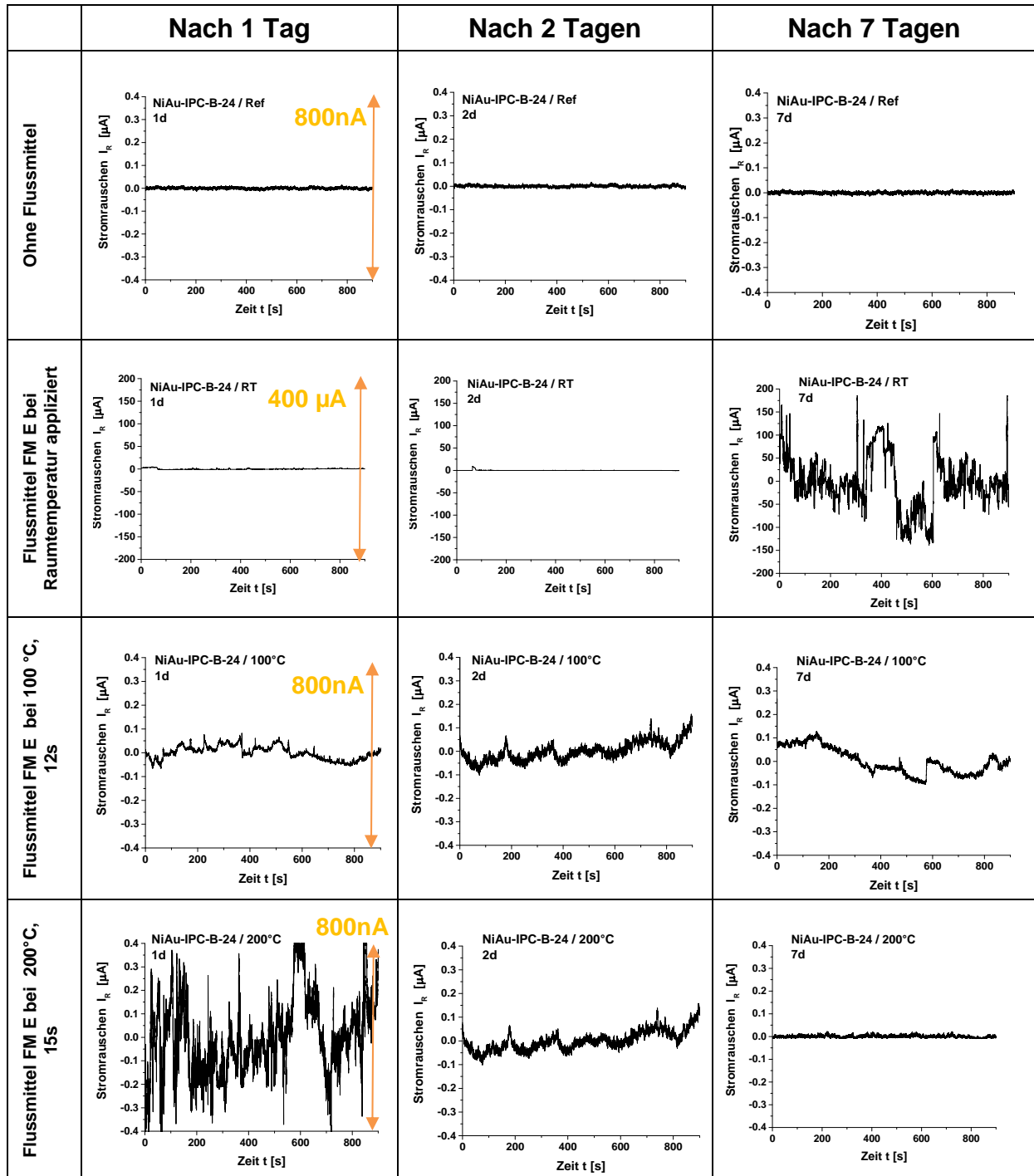


Abb. 56: Abschnitte aus ungefilterten Rauschsignalen NiAu-24 Flussmittel FM E, in 95° r.H. bei Raumtemperatur und 10 V.

Die entsprechenden Rauschladungsmengen (Abb. 57) zeigen den Trend über den gesamten Zeitraum. Die Messung ohne Flussmittel (Ref) entspricht im Prinzip dem Niveau des Umgebungsauscheshen. Für die anderen Systeme gilt: Je höher die Rauschladungsmengen steigen, umso intensiver sind auch die Korrosionserscheinungen auf den SIR-Boards (Abb. 58). Somit ist die Rauschladungsmenge ein guter Indikator für den Verlauf des Korrosionsvorganges während des SIR-Testes.

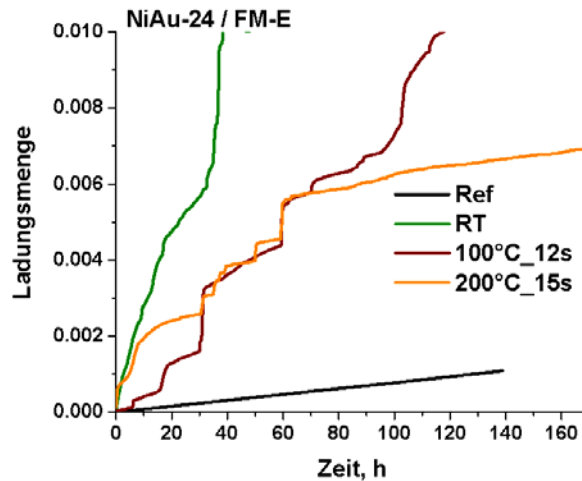


Abb. 57: Rauschladungsmenge des Systems NiAu-24 mit Flussmittel FM E (Ref: ohne Flussmittel, RT: Flussmittel bei Raumtemperatur appliziert), bei Raumtemperatur und 95% r.H. und 10 V ausgelagert.

Flussmittel FM E, bei Raumtemperatur appliziert (RT)	Flussmittel FM E, 100°C, 15 sek	Flussmittel FM E, 200°C, 12 sek

Abb. 58: NiAu IPC-B-24 Boards mit Flussmittel FM E nach 168h bei Raumtemperatur, 95 °C und 10 V.

Der Vergleich der Rauschladungsmengen mit den Korrosionserscheinungen zeigt beim System NiAu insgesamt einen deutlichen Zusammenhang, wie auch das Beispiel an den IPC- NiAu-24 Boards in (Abb. 59 - Abb. 62) zeigt. Messungen an den IPC-B-52 Boards liefern entsprechende Ergebnisse. Während Flussmittel FM I eine Rauschladungsmenge auf Niveau der Referenzmessung ohne Flussmittel aufweist

und auf den Oberflächen keine Korrosionserscheinungen anzutreffen sind, tritt bei Flussmittel FM E ein plötzlicher Anstieg der Rauschladungsmenge auf, entsprechend weisen die Boards Korrosionsstellen auf. Der plötzliche Anstieg der Rauschladungsmenge ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass es hier NiAu als passivierendes System zu einem Passivschichtdurchbruch kommt und der lokale Korrosionsvorgang dann aktiv vonstatten geht. Für passivierende Systeme ist das elektrochemische Rauschen zum Korrosionsnachweis besonders geeignet [12]. Für Cu-Boards konnten für die betrachteten Flussmittel leider keine Korrosionsvorgänge generiert werden, so dass hier keine Aussage zu erhöhten Rauschniveaus getroffen werden kann. Es ist aber zu vermuten, dass auch für Cu-Boards die Anwendung von ECR möglich und sinnvoll ist, da aus der Literatur bekannt ist, dass lokale Korrosionsvorgänge an Kupfer mittels ECR frühzeitig gemessen werden können [11], [13].

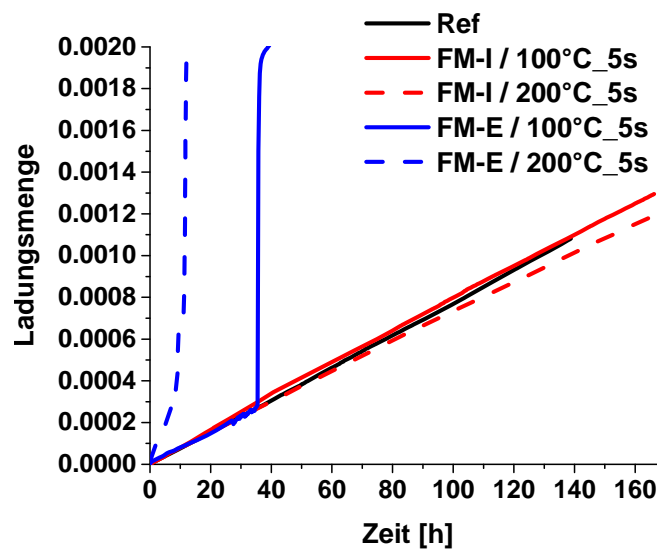


Abb. 59: Rauschladungsmenge des Systems NiAu-24 mit Flussmittel FM E und FM I, 5 s Wärmebehandlung (Ref: ohne Flussmittel), bei Raumtemperatur und 95% r.H. und 10 V ausgelagert.



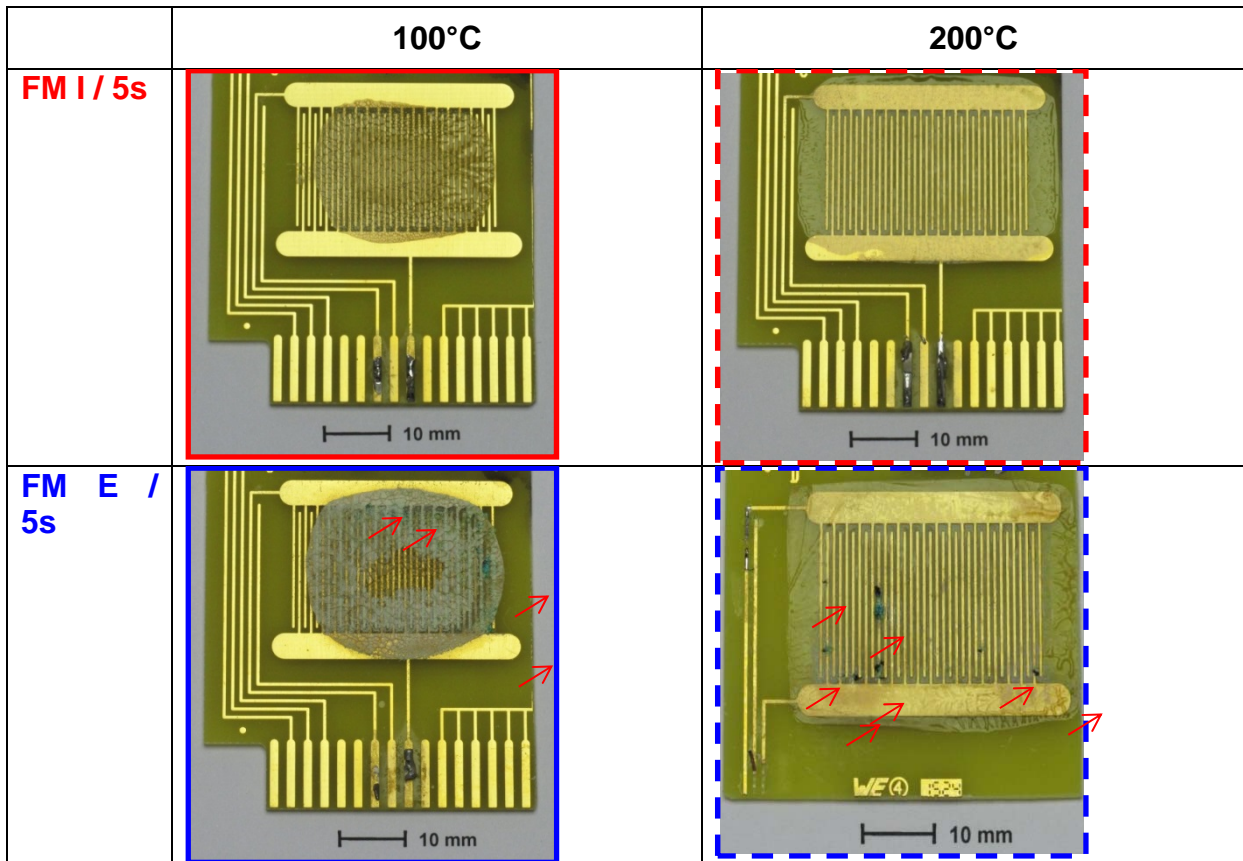


Abb. 60: NiAu-IPC B-24-Boards mit Flussmittel FM E und FM I  
5 s Wärmebehandlung (Ref: ohne Flussmittel), nach 168 h bei Raumtemperatur, 95% r.H. und 10 V (siehe Abb. 59).

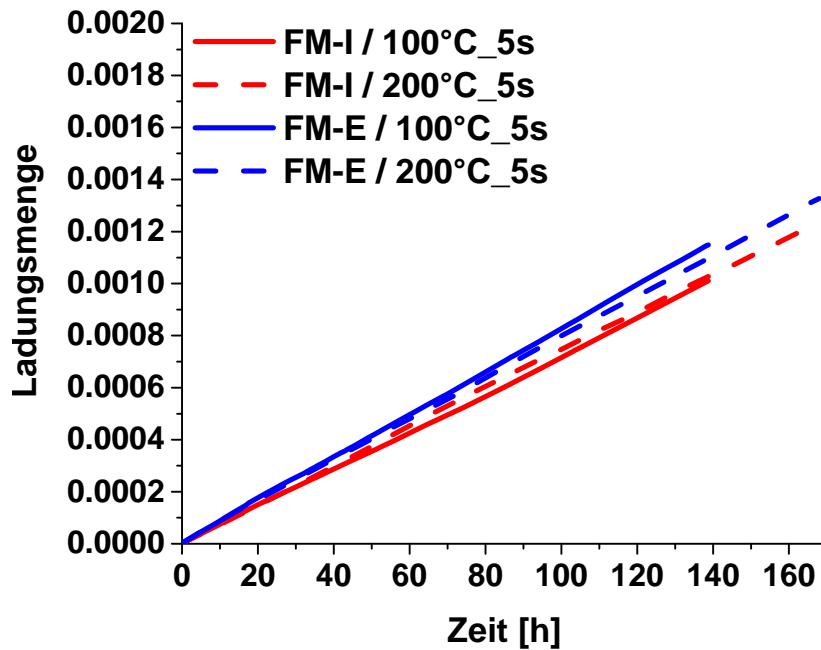


Abb. 61: Rauschladungsmenge des Systems Cu IPC-B-24 mit Flussmittel FM E und FM I, 5 s Wärmebehandlung, bei Raumtemperatur und 95% r.H. und 10 V ausgelagert.

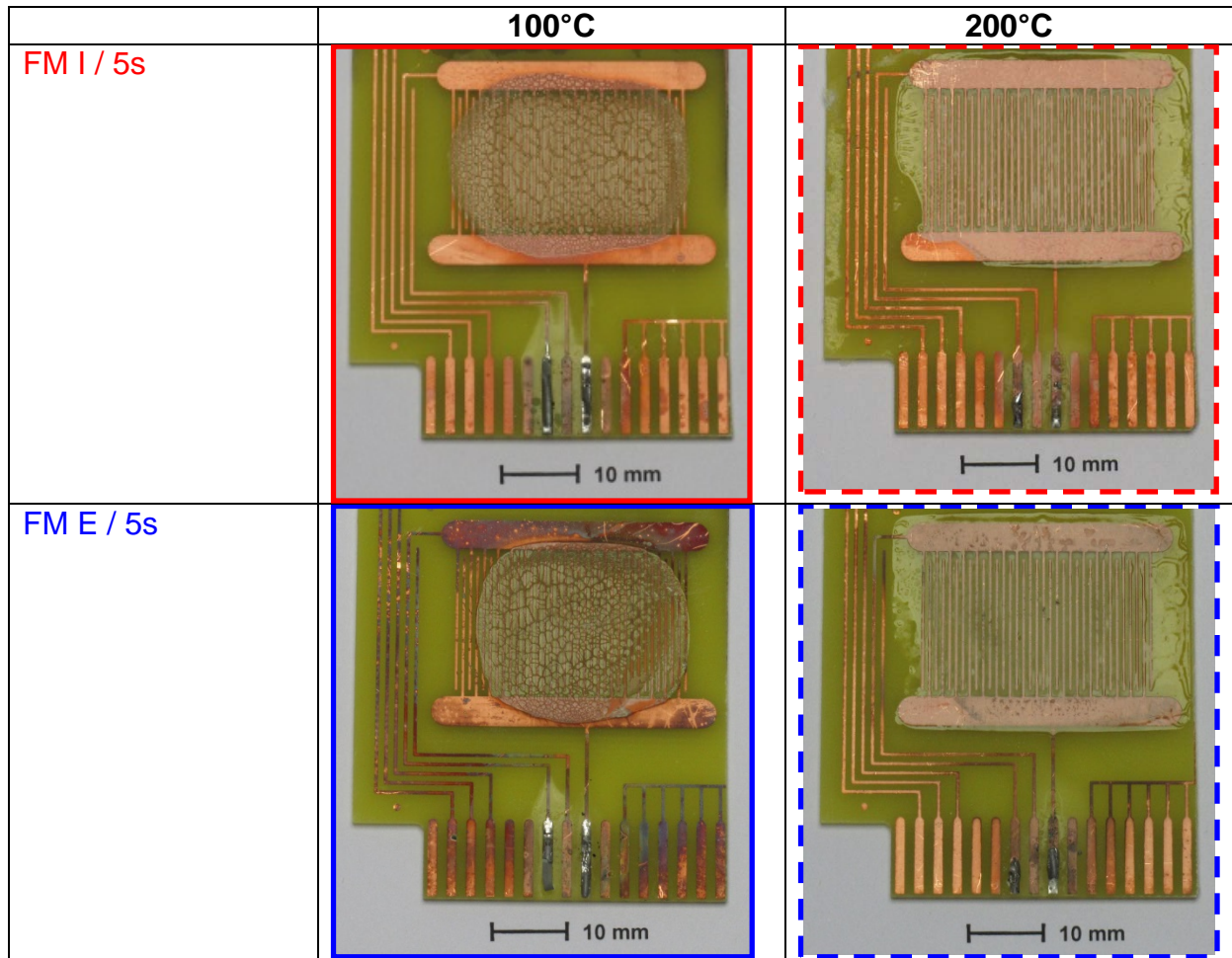


Abb. 62: Cu IPC B-24-Boards mit Flussmittel FM E und FM I  
5 s Wärmebehandlung, nach 168 h bei Raumtemperatur, 95% r.H. und 10 V  
(siehe Abb. 61 ).

### 3.7 Oberflächen- und Rückstandsanalysen

Zur Aufklärung der ablaufenden Migrationsprozesse wurden Oberflächenanalysen an Testboards mit Flussmittelkontamination vor und nach Alterung durchgeführt. Als Analysetechnik wurde hierbei die Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (TOF-SIMS) eingesetzt. Diese Methode erlaubt die Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung der Oberflächen bis in den Spurenbereich mit hoher Oberflächenempfindlichkeit und hoher lateraler Auflösung bis in den sub-Mikrometer-Bereich. Die Abb. 63 stellt das Analyseverfahren schematisch dar.

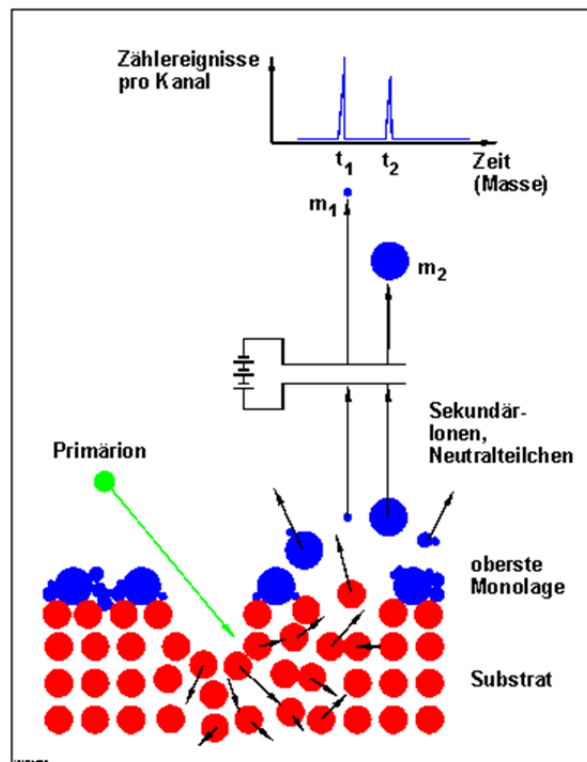


Abb. 63: Schematische Darstellung TOF-SIMS

Das Messprinzip beruht darauf, dass beim Beschuss eines Festkörpers mit Ionen hinreichender Energie (Primärion, hier 25 keV Bi-Ionen) von der Oberfläche u.a. positiv und negativ geladene Sekundärionen emittiert werden. 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. 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. 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. Durch positionsabhängige Darstellung der Intensität der Ionensignale lassen sich Verteilungsbilder der Ionenintensität erzeugen. Diese können Hinweise auf die chemische Oberflächenverteilung einzelner Bestandteile geben. Bei der Bewertung dieser Verteilungsbilder ist zu berücksichtigen, dass

die Ionenintensität sowohl von der chemischen Verteilung und von Matrixeffekten als auch von topographischen Eigenschaften beeinflusst wird. Durch den Einsatz einer weiteren Ionenquelle zum Oberflächenabtrag können auch Tiefenprofilanalysen durchgeführt werden. Die TOF-SIMS-Untersuchungen wurden mit einem TOF-SIMS IV-Gerät (Fa. ION TOF) durchgeführt. Die Anregung erfolgte mit einer 25 keV Bi-Flüssigmetallionenquelle (Bunched mode), die übliche Analysefläche betrug 500 x 500 µm<sup>2</sup>, die Ladungskompensation erfolgte mit einer gepulsten Elektronenquelle. Bei den Tiefenprofilanalysen wurde eine Argon-Ionenquelle eingesetzt.

### 3.7.1 Alterungseinflüsse auf das NiAu-Leiterbahnenmaterial

Im Rahmen der Analysen wurden gealterte Testboards betrachtet. Die folgenden Abbildungen zeigen lichtmikroskopische Aufnahmen der gealterten IPC B52 NiAu-Testboards sowohl ohne als auch mit Flußmitteleinfluss (FM D). Alterungsbedingungen: Auslagerung für 168h bei 85-90% rel. Feuchte, 40°C und unter 10V Spannung (8V EIS).

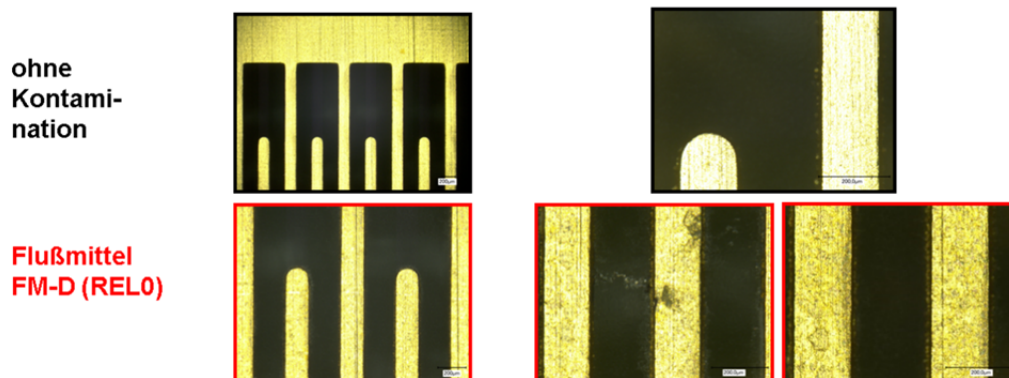


Abb. 64: Mikroskopische Darstellung nach Alterung (168h, 85-90% rel. Feuchte, 40°C, Spannung 10V (8V EIS)) des SIR-Testboards IPC B52 NiAu (Leiterbahnen 200µm breit, Abstand 200µm) ohne Kontamination bzw. mit Flußmittel FM D.

Die Ergebnisse in Abb. 64 zeigen keine visuell erkennbare Dendritenbildung beim gealterten Referenzmuster ohne Kontamination. Hingegen zeigt die mit dem Flußmittel FM D kontaminierte Probe in diesem „Worst-Case“-Szenario (keine Erwärmung der Flussmittel) Dendriten-Wachstum. Die folgende Abb. 65 zeigt eine vergrößerte Darstellung eines beobachteten Dendriten.

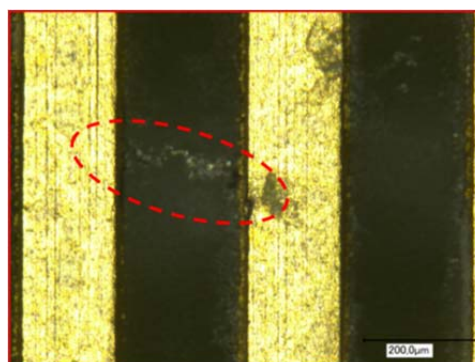


Abb. 65: Mikroskopische Vergrößerung eines Dendriten nach Alterung (168h, 85-90% rel. Feuchte, 40°C, Spannung 10V / 8V EIS) des SIR-Testboards IPC B52 NiAu (Leiterbahnen 200µm breit, Abstand 200µm) mit Flußmittel FM D.

Die folgende Abb. 66 zeigt Sekundärionen-Verteilungsbilder der  $\text{Ni}^+$ - und  $\text{Au}^+$ -Ionen der ungealterten Referenz ohne Flussmittel (links), einer ohne Flussmittel gealterten Probe sowie von 3 Messpositionen der mit Flussmittel FM D (Klassifizierung RELO) gealterten Probe. Zudem sind die Bilder der Positionierkamera des Analysesystems mit dargestellt (Micro View).

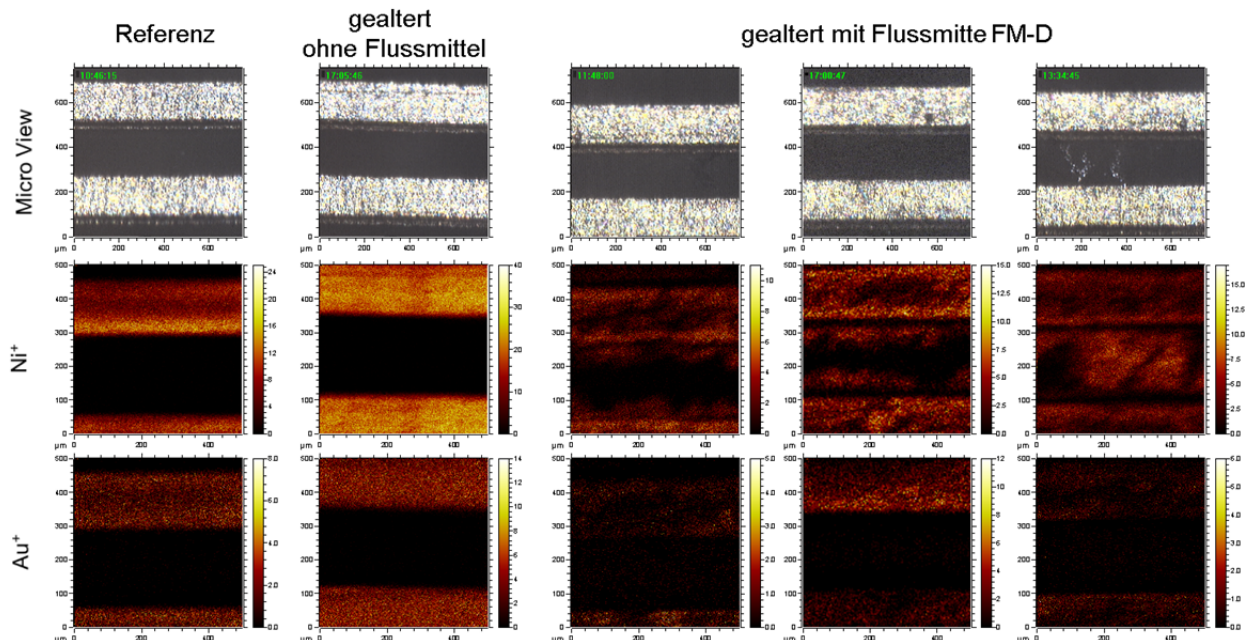


Abb. 66: Bilder der TOF-SIMS-Positionierkamera (Micro-View) und TOF-SIMS-Sekundärionen-Verteilungsbilder der  $\text{Ni}^+$ - und  $\text{Au}^+$ -Ionen der ungealterten Referenz ohne Flussmittel, einer ohne Flussmittel gealterten Probe und dreier Messpositionen der mit Flussmittel FM D gealterten Probe.

Die TOF-SIMS-Analysen der Muster ohne Flussmittel zeigen sowohl ohne als auch nach der Alterung keine signifikante Intensität an Nickel- oder Gold-Ionen im Bereich zwischen den Leiterbahnen (Abb. 66, Verteilungsbilder links). Hingegen zeigt die gealterte Probe mit Flussmittel FM-D an einer Stelle mit visuell erkennbaren Dendriten (Abb. 66, Verteilungsbilder rechts außen) eine deutliche Erhöhung an Nickel-Ionen im Bereich zwischen den Leiterbahnen. Zudem wird relativ zu den Referenzen auch im Bereich der Leiterbahnen nur eine geringere Gold-Intensität beobachtet. Im Bereich zwischen den Leiterbahnen wird keine signifikante Gold-Intensität nachgewiesen. Somit lässt sich ableiten, dass die zugrunde liegende Komponente der Leiterbahn für das Dendritenwachstum unter Einwirkung des Flussmittels FM D offenbar Nickel ist. Zudem ist ableitbar, dass sich die Gold-Beschichtung auf dem Nickel infolge der Alterung offenbar ablöst. Betrachtet man die Analysespositionen der mit Flussmittel FM D gealterten Probe ohne visuell erkennbare Dendriten (Abb. 66, Spalten 2-3 von rechts), so kann man auch hier signifikante Nickel-Anteile zwischen den Leiterbahnen beobachten. Offenbar deutet sich auch hier ein beginnendes Dendritenwachstum an.

Bei den Analysen der Messergebnisse wurde zudem ein relativ auffälliger Anteil an Kalium beobachtet. Die folgende Abb. 67 zeigt eine Tiefenprofilanalyse der Au/Ni-Leiterbahnmaterials.

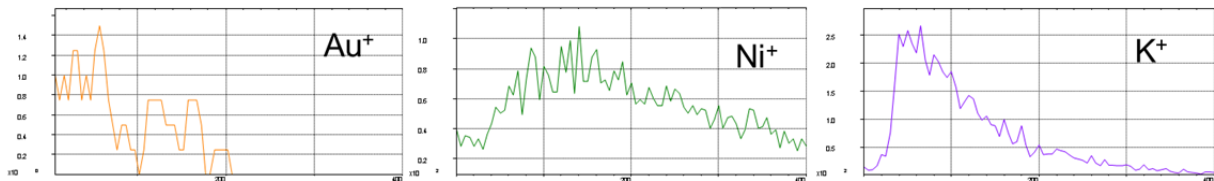


Abb. 67: TOF-SIMS-Tiefenprofile der  $\text{Au}^+$ -,  $\text{Ni}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Ionen des Leiterbahnenmaterials des mit FM D gealterten Au/Ni-Platinenmaterials ( $\text{Ar}^+$ -Sputterstrom:  $\sim 70\text{nA}$ , Rasterfläche  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ , Analysefläche im Sputterkrater  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ).

Anhand der Tiefenprofilanalyse deutet sich an, dass sich eine Kalium-angereicherte Schicht zwischen der oben aufliegenden Gold-Schicht und der unterliegenden Nickel-Schicht befindet. An dieser Stelle ist anzumerken, dass Fremdatome/Kontaminationen die Korrosionsprozesse beeinflussen können und z.B. erhöhte Korrosionsraten und Dendritenwachstum begünstigen können.

### 3.7.2 Alterungseinflüsse auf das Cu-Leiterbahnenmaterial

Die folgenden Abb. 68 zeigt lichtmikroskopische Aufnahmen gealterter IPC B52 Cu-Testboards sowohl ohne als auch mit Flußmitteleinfluss (FM D). Alterungsbedingungen: Auslagerung für 168h bei 85-90% rel. Feuchte,  $40^\circ\text{C}$  und unter 10V Spannung (8V EIS).

Die visuellen Betrachtungen zeigen keine erkennbare Dendritenbildung bei dem gealterten Referenzmuster ohne Kontamination. Allerdings ist eine deutliche Oxidation der Kupferoberflächen sichtbar. Hingegen zeigt die mit dem Flußmittel FM D (Klassifizierung REL0) kontaminierte Probe in diesem „Worst-Case“-Szenario (keine Erwärmung der Flussmittel) Strukturen, welche auf Dendriten-Wachstum hinweisen können. Zudem tritt möglicherweise an einigen Stellen auf den Kupferoberflächen Lochkorrosion auf.

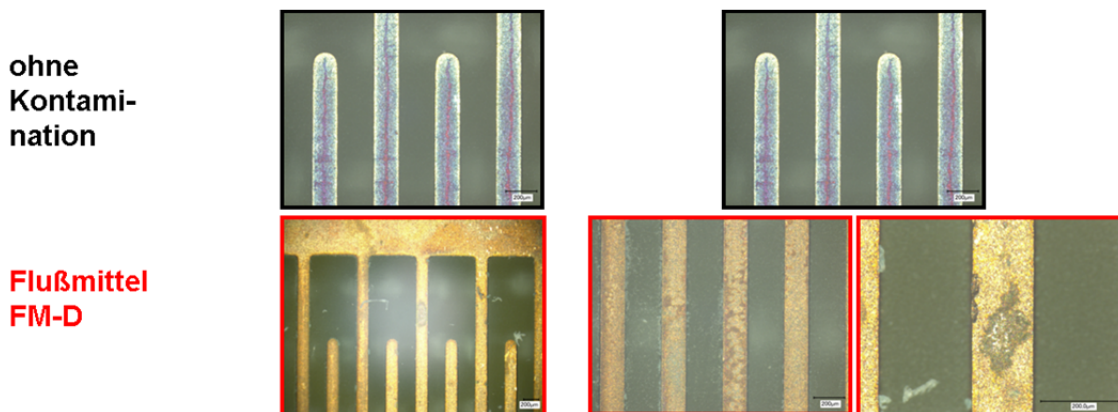


Abb. 68: Mikroskopische Darstellung nach Alterung (168h, 85-90% rel. Feucht,  $40^\circ\text{C}$ , Spannung 10V / 8V EIS) des SIR-Testboards IPC B52 Cu (Leiterbahnen  $200 \mu\text{m}$  breit, Abstand  $200 \mu\text{m}$ , Leiterbahndicke  $30 \mu\text{m}$ ) ohne Kontamination bzw. mit Flussmittel FM D.

Die folgende Abb. 69 zeigt Sekundärionen-Verteilungsbilder der  $\text{Cu}^+$ -Ionen der ungealterten Referenz ohne Flussmittel (links), einer ohne Flussmittel gealterten Probe (zweite Spalte von links) sowie von drei Messpositionen der mit Flussmittel FM D gealterten Probe (3 Spalten rechts). Zudem sind die Bilder der Positionierkamera des Analysesystems mit dargestellt (Micro View).

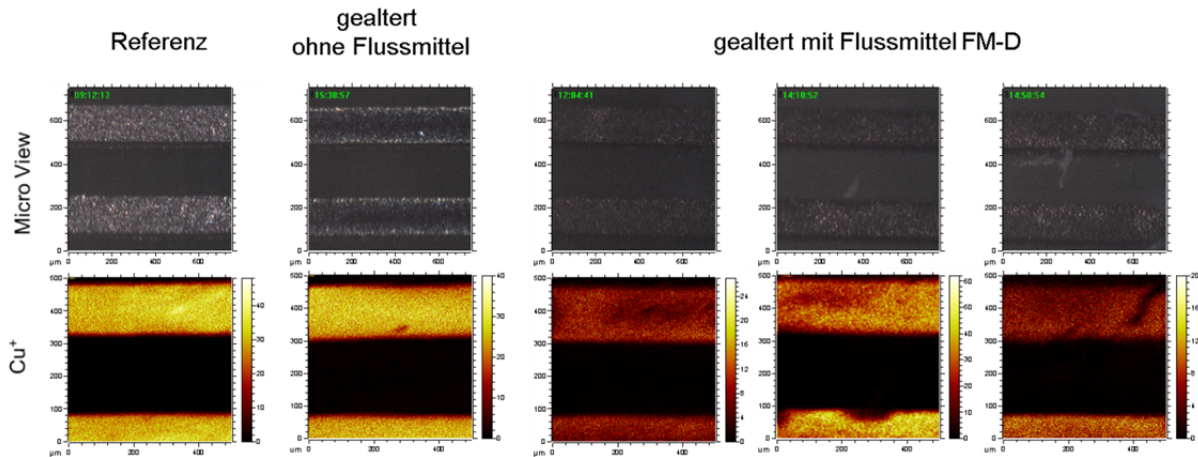


Abb. 69: Bilder der TOF-SIMS-Positionierkamera (Micro-View) und TOF-SIMS-Sekundärionen-Verteilungsbilder der  $\text{Cu}^+$ -Ionen der ungealterten Referenz ohne Flussmittel, einer ohne Flussmittel gealterten Probe und dreier Messpositionen der mit Flussmittel FM D gealterten Probe.

Die TOF-SIMS-Analysen der Muster ohne Flussmittel zeigen sowohl ohne als auch mit Alterung keine signifikante Intensität an Kupfer-Ionen im Bereich zwischen den Leiterbahnen. Ebenfalls zeigt die mit Flussmittel FM D gealterte Probe keine Migration von Kupfer in den Zwischenbereich zwischen den Leiterbahnen. Bei den lichtmikroskopisch erkennbaren Strukturen zwischen den Leiterbahnen handelt es sich somit offenbar nicht um Dendriten des Leiterbahnenmaterials. Insgesamt ist somit im Unterschied zu den NiAu-Leiterbahnen hier keine Migration des Leiterbahnenmaterials unter Einfluss des Flussmittels FM D zu beobachten.

## 4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Die systematische Untersuchung des Risikopotentials auf elektrochemische Migration im Nacharbeitsfall elektronischer Baugruppen unter Berücksichtigung des Einsatzes von Lötwerkstoffen mit unterschiedlichen chemischen Flussmittelzusammensetzungen wurde im vorliegenden Projekt durchgeführt.

Hierzu wurden fertigungsrelevante Prozessvariationen untersucht. Insbesondere die Tatsache, dass überschüssige Flussmittelmengen zum Einsatz kommen können und im Lötprozess Teilmengen des Flussmittels nicht der notwendigen Prozesstemperatur ausgesetzt werden, führt dazu dass unter Feuchteeinwirkung elektrochemische Korrosion eintreten kann.

Es wurde nachgewiesen, dass es Flussmittelkombinationen gibt, die bei unzureichender Lötwärmezufuhr während des Lötprozesses ein Gefahrenpotential bergen. Da der Anwender keine Informationen über die Zusammensetzung der Flussmittel hat (und diese Information auch nicht frei verfügbar ist) kann er die Gefahr nicht einschätzen. Insbesondere der oftmals manuell durchgeführte Flussmittelauftrag in den Folge- oder Nacharbeitslötprozessen nach dem Inline-Reflowlöten erfolgt oft großzügig und unkontrolliert (groß)flächig. Dies birgt Gefahren für eine Schädigung durch elektrochemische Korrosion.

Abhilfe kann hier ein Reinigungsprozess schaffen. Allerdings ist hierfür unbedingt auf eine qualifizierte automatische Reinigung zu achten. Manuelle oder nur partielle Reinigung (mit ungeeigneten Reinigungsprozessen) bewirkt das Gegenteil. Die aktiven Flussmittelbestandteile werden verteilt und freigelegt, wodurch eine große Gefahr für eine Baugruppenschädigung durch elektrochemische Migration besteht.

Effektiv ist der Einsatz von deutlich reduzierten Flussmittelmengen und Einschränkung des Auftrags auf die Bereiche, die der Prozesstemperatur ausgesetzt werden. Eine qualifizierte Lötprofiloptimierung, die richtige Material- und Prozesswahl sowie das Einhalten der vom Materiallieferanten vorgegebenen Prozesstemperaturen und –zeiten ermöglicht ein akzeptables Lötergebnis bei gleichzeitigem Verbrauch (bzw. Deaktivierung) aktiver Flussmittelbestandteile. Dies liefert für Folge- oder Nacharbeitslötprozesse die Grundlage für die Herstellung zuverlässiger Elektronik mit minimiertem Risikopotential auf elektrochemische Migration.

Neben dem SIR-Test wurde mit der Methode des elektrochemischen Rauschens (ECR) eine geeignete Methode gefunden, um die SIR-Tests hinsichtlich der Identifikation von Korrosionsvorgängen zu ergänzen und diese frühzeitig nachzuweisen sowie mittels TOF-SIMS qualifizierte Oberflächenanalysen durchzuführen.



#### 4.1 Untersuchung der elektrochemischen Migration mit SIR-Tests

Das maschinelle Konvektions-Reflowlöten erscheint (bei den untersuchten Lotpasten) hinsichtlich elektrochemischer Korrosion unkritisch.

Die Kombination von maschinell Konvektions-Reflowlöten mit maschinell Stickstoff-Wellenlöten erscheint (bei den untersuchten Wellenlötflussmitteln) nach vollständig durchlaufenem bleifreiem Wellenlötprozess (Voraussetzung ist Wellenkontakt, Abwaschen von Überschussmaterial, Umsetzung von Aktivatoren durch Wärmeeintrag) hinsichtlich elektrochemischer Korrosion unkritisch. Bei nicht vollständiger Umsetzung im Lötprozess (zu niedrige Temperatur, fehlender Wellenkontakt, z.B. Flussmittel auf der Leiterplattenoberseite) sowohl alleine als auch in Kombination mit Lotpasten bieten Wellenlöt-Flussmittel ein Korrosionspotential.

Wird maschinelles Konvektions-Reflowlöten mit maschinell selektivem Wellenlöten kombiniert so erscheinen die untersuchten Flussmittel für selektives Wellenlöten bei ausreichender Vorwärmung unkritisch hinsichtlich elektrochemischer Korrosion. Eine Prüfung der Rückstände mittels SIR-Test bei Einsatz in kritischer (feuchter) Umgebung erscheint dennoch sinnvoll, da im Einzelfall die verwendeten Prozessparameter (und Flussmittel) von den hier angewendeten abweichen können.

Im manuellen Kolbenlötprozess erscheinen Handlötflussmittel kritisch hinsichtlich elektrochemischer Korrosion, wenn diese einer Temperatur von nur 100°C ausgesetzt werden. Bei Temperaturen oberhalb von ca. 100°C aber unter 250°C erscheinen Handlötflussmittel als potenziell unsicher hinsichtlich elektrochemischer Korrosion. Handlötflussmittel benötigen eine Temperatur von mindestens ca. 250°C, um den SIR-Test zu bestehen.

Bei der Kombination von maschinell Konvektions-Reflowlöten mit einem maschinellen Reworkprozess erscheinen einzelne Reworkflussmittel kritisch oder zumindest auffällig (zu Beginn der SIR-Test-Auslagerung ergibt sich ein Widerstandswert  $<1,0E08$  Ohm) hinsichtlich elektrochemischer Korrosion, wenn diese einer maximalen Temperatur von unter 230°C ausgesetzt werden. Nach qualifizierter automatischer Reinigung bestehen alle Flussmittel in allen untersuchten Parameter- und Material-Variationen den SIR-Test. Ein Flussmittel weist jedoch kurzzeitig zu Beginn der SIR-Test-Auslagerung einen Widerstandswert  $<1,0E08$  Ohm auf.

Die SIR-Testergebnisse der Funktionsmusterplatine nach dem Inline-Reflow Lötprozess sind vergleichbar mit denen der SIR-Test-Leiterplatten. Ein im SIR-Test auswertefähiger und reproduzierbarer manueller Nacharbeitslötprozess sowie maschinengestützter Reworkprozess konnte auf der Funktionsmusterplatine nicht nachgestellt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Flussmittel mit einer Aktivierung höher als L0 sind kritisch zu betrachten hinsichtlich elektrochemischer Migration.
- Flussmittelmischungen können zu elektrochemischer Korrosion führen, insbesondere wenn die Flussmittel den Lötprozess (Temperatur, Zeit) nicht vollständig durchlaufen.

- Manuelle Lötprozesse sind als potentiell kritisch zu betrachten hinsichtlich elektrochemischer Migration, insbesondere wenn die Flussmittel nicht auf Löttemperatur gebracht werden (z.B. Flussmittelspritzer oder zu üppig dosiertes und verlaufenes Flussmittel).
- Die Menge der angewendeten Flussmittel sollte auf das notwendige Mindestmaß reduziert und eine Ausbreitung über den Lötbereich hinaus verhindert werden.
- Die vorgeschriebenen Löttemperaturen für den jeweiligen Prozess sind einzuhalten und sollten erreicht werden.
- Eine Einzelfallbetrachtung durch Qualifizierung mittels SIR-Test unter definierten Bedingungen ist bei Einsatz in kritischer Umgebung unbedingt zu empfehlen. Um hier aussagefähige Ergebnisse zu erzielen, sollte die Verarbeitung der Materialkombination mit den späteren Prozessparametern wie Flussmittelmenge, Flussmittelmischung, Auftragsverfahren sowie Temperatur/Lötprofil erfolgen.
- Qualifizierte Reinigungsprozesse können das Risikopotential für elektrochemische Korrosion auf elektronischen Baugruppen minimieren.

## 4.2 Anwendung elektrochemischer Messmethoden

Der technische Ansatz, den SIR-Test mit der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) zu kombinieren, um einen höheren und ggfs. auch schnelleren Informationsgewinn zu erreichen, hat sich als nicht zielführend herausgestellt. Zunächst einmal hat sich herausgestellt, dass die EIS-Messungen an den SIR-Boards messtechnisch schwer umzusetzen waren. Die Auslagerung in der Klimakammer beinhaltet eine starke elektromagnetische Beeinflussung und macht sich in den Spektren durch signifikante Streuungen bemerkbar.

Der Vergleich der Ergebnisse aus EIS-Messungen und den Korrosionserscheinungen auf der Oberfläche lassen keine eindeutige Korrelation zu. Dies mag zwar daran liegen, dass nur in wenigen beobachteten Fällen elektrochemische Migration nachgewiesen werden wurde. Es scheint aber auch, dass andere, überlagernde Prozesse, wie z. B. die Leitfähigkeit eines Flüssigkeitsfilmes auf der Oberfläche, einen maßgeblichen Einfluss auf das Messergebnis haben, die eine eindeutige Zuordnung der Spektren zu Korrosionsprozessen verhindern.

Es ist also nicht davon auszugehen, dass EIS-Messungen an SIR-Boards eine vergleichbare Aussagefähigkeit finden wie z. B. an Korrosionsschutzbeschichtungen.

Hinzu kommt der experimentelle Aufwand, der sowohl in den notwendigen Gerätschaften (ein geeigneter Potentiostat kostet ca. 20 000 €), der Durchführung der Experimente (die elektromagnetische Beeinflussung erfordert besondere Abschirmungsmaßnahmen) und der Interpretation der Spektren widerspiegelt.

Demgegenüber hat sich das elektrochemische Rauschen (ECR) als geeignete Methode herausgestellt, um die SIR-Tests hinsichtlich der Identifikation von Korrosionsvorgängen zu ergänzen und diese frühzeitig nachzuweisen. Auch hier stellt sich die Frage der Abschirmung des Umgebungsräusens, die nach Aussage von Geräteherstellern aus dem projektbegleitenden Ausschuss mit angemessenem Aufwand beherrschbar ist. Daher war es auch vertretbar, die vergleichenden Untersuchungen nicht im beheizten Klimaschrank, sondern bei Raumtemperatur und 95% r.H. durchzuführen. Dies führte jedoch dazu, dass für die Cu-Boards keine Korrosionsvorgänge

generiert wurden, die anhand der erhöhten Rauschladungsmenge hätten nachgewiesen werden können. Es ist jedoch aus der Literatur bekannt, das ECR zur Detektion von Lokalkorrosion von Cu geeignet ist [11]. Für das NiAu-System wurde der Nachweis erbracht, dass Rauschintensität und Korrosionsintensität korrelieren.

Der besondere Vorteil beim elektrochemischen Rauschen besteht darin, dass die Strommessung bei den SIR-Tests ja schon vorhanden ist und „nur“ an die Anforderungen des ECR angepasst bzw. erweitert (in Hinsicht auf Abtastrate, Auflösung und automatisierter Auswertung) werden muss.

Daher werden im Anschluss des Projektes weitere Gespräche mit Geräteherstellern durchgeführt, um dieses Konzept in ein Produkt zu überführen.

### **4.3 Oberflächen- und Rückstandsanalysen**

Die Oberflächenanalysen mittels TOF-SIMS an den gealterten Probenmaterialien zeigen deutliche qualitative Unterschiede zwischen NiAu-Leiterbahnen einerseits und Cu-Leiterbahnen andererseits. So ist im Fall der NiAu-Testboards unter dem Einfluss des Trennmittels analytisch eine ausgeprägte Dendritenbildung zu beobachten. Diese Dendritenbildung ist in diesem Fall auf die Migration des Nickels aus den Leiterbahnen zurückzuführen. Ein solches Dendritenwachstum wird hingegen bei den Cu-Leiterbahnen nicht festgestellt.

## **5 Verwendung der Zuwendung**

### **5.1 Personaleinsatz**

Im Rahmen des Vorhabens wurde bei der Forschungsstelle 1\_ISIT wissenschaftlich-technisches Personal (A.1) in einem Umfang von 30,90 Mannmonaten und bei der Forschungsstelle 2\_IFAM wissenschaftlich-technisches Personal (A.1) in einem Umfang von 10,57 Mannmonaten eingesetzt.

### **5.2 Gerätebeschaffung**

Geräte wurden gemäß Finanzierungsplan nicht angeschafft.

### **5.3 Leistungen Dritter**

Leistungen Dritter wurden gemäß Finanzierungsplan nicht in Anspruch genommen.

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

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

Insbesondere bei den Arbeiten der Forschungsstelle 1\_ISIT zeigte sich dass die Untersuchungen und durchzuführenden Arbeiten im Verlauf des Projekts als zunehmend schwierig und komplex gestalteten. Für die Prozessqualifizierung war es nötig, anders als ursprünglich vorgesehen, hochqualifiziertes Personal einzusetzen. Der ursprüngliche Plan zur Durchführung von Versuchsreihen hat aufgrund der zwischenzeitlich erzielten Ergebnisse eine Anpassung erfordert, die so nicht abzusehen war. Das technische Laborpersonal war nicht ausreichend qualifiziert, um diese Anpassung ohne wissenschaftliche Unterstützung durchführen zu können. Ausgehend von erzielten Untersuchungsergebnissen wurde die Untersuchungsmatrix fortlaufend überarbeitet. Dies erforderte einen hohen Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal.

## 6 Umsetzung der Ergebnisse in die Industrie, Ergebnistransfer

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

### 6.1 Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Die Zwischenergebnisse des Projektes wurden laufend den Mitgliedern des PA mitgeteilt. Hierzu fanden 4 PA-Sitzungen während der Projektlaufzeit statt. Des Weiteren wurde im zuständigen Arbeitskreis der GfKORR - Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. „Korrosionsschutz in der Elektronik und Mikrosystemtechnik“ regelmäßig über den aktuellen Projektstand berichtet, siehe Tabelle 17.

<b>Maßnahme A:</b>	<b>Ziel / Bemerkung</b>	<b>Rahmen</b>	<b>Datum / Zeitraum</b>
Projektantrag an Mitglieder des PA verteilen	Übermittlung der vollständigen Projektinformationen	Projektbegleitender Industrieausschuss	Januar 2014
<b>Maßnahme B:</b> PA-Treffen	Information des PA  Projektvorstellung und Diskussion  Vorstellung der Ergebnisse, Diskussion und Festlegung weiteres Vorgehen  Ergebnispräsentation und Diskussion	Projektbegleitender Industrieausschuss B1: Kick-Off-Meeting  B2: PA-Sitzung B3: PA-Sitzung  B4: PA-Sitzung, Abschlussmeeting	Februar 2014  Januar 2015 Juli 2015  November 2015
<b>Maßnahme C:</b> AK-Sitzung	Information der GfKORR Schriftlicher und mündl. Zwischenbericht, Diskussion  Schriftlicher und mündl. Abschlussbericht, Diskussion	C1-C4: AK-Sitzungen „Korrosionsschutz in der Elektronik und Mikrosystemtechnik“, der GfKORR  C5: AK-Sitzung	Q1+Q3 2014 Q1+Q4 2015  Q2 2016 (nach Laufzeitende)

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

Tabelle 17: Transfermaßnahmen für die direkt am PA beteiligten Firmen und die Forschungsvereinigung

## 6.2 Spezifische Transfermaßnahmen nach Laufzeitende des Vorhabens

Nach Laufzeitende werden die Ergebnisse zügig einem breiten Publikum zugänglich gemacht, siehe Tabelle 18. 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 besteht die Absicht, die Ergebnisse und Anwendungsempfehlungen für den SIR-Test in die Normung einfließen zu lassen.

Hinsichtlich der Implementierung des elektrochemischen Rauschens werden im Anschluss des Projektes weitere Gespräche mit Geräteherstellern durchgeführt, um dieses Konzept in ein Produkt zu überführen.

<b>Maßnahme D:</b>	<b>Ziel / Bemerkung</b>	<b>Rahmen</b>	<b>Datum / Zeitraum</b>
Link zum Abschlussbericht	Veröffentlichung des Abschlussberichts im Internet	D1: Homepage des ISIT und des IFAM	April 2016
		D2: Technische Informationsbibliothek (TIB)	Juni 2016
<b>Maßnahme E:</b> Publikationen	Veröffentlichung auf den Webseiten der Institute	E1: Fachartikel zum Download	Q3 2016
	Beiträge zu GfKORR-Leitfäden „Schutzlacke für elektronische Baugruppen“ und „Anwendung und Verarbeitung von Vergussmassen für elektronische Baugruppen“	E2: GfKORR-Leitfäden Schriftliche Beschreibung des Vergleichs der Prüfverfahren SIR, ECR und EIS	Q3 2016
	Veröffentlichung in der Fachzeitschrift PLUS	E3: Fachzeitschrift für Elektronikfertigung	Q4 2016
	Veröffentlichung in EPP, Productronic	E4: Platzierung von Beiträgen in Kennzifferzeitschriften	Q4 2016
<b>Maßnahme F:</b> Normung	Transfer der Ergebnisse in Anwendungsempfehlungen für den SIR-Test	DIN, IPC	Q2 2018
	Anwendung des ECR zum Nachweis von elektrochemischer Migration		Q2 2018

<b>Maßnahme G:</b>	<b>Ziel / Bemerkung</b>	<b>Rahmen</b>	<b>Datum / Zeitraum</b>
Weiterentwicklung von Messgeräten	Ergänzung der SIR-Tests durch ECR hinsichtlich der Identifikation von Korrosionsvorgängen und frühzeitigem Nachweis	Gerätehersteller	Ab Q3 2016

<b>Maßnahme H:</b>	<b>Ziel / Bemerkung</b>	<b>Rahmen</b>	<b>Datum / Zeitraum</b>
Vorträge	Ergebnistransfer in die Wirtschaft		
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 60	H1: EuroCorr 2016	Sept. 2016
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 30	H2: ISIT-Seminar zur Baugruppenfertigung	März 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 35	H3: Fachforum auf der SMT	April 2017
	Fachforum mit ca. 60 EMS-Firmen	H4: Hamburger Löt-zirkel	Mai 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 150	H5: Technologiese-minar "Wir gehen in die Tiefe"	Juni 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 3x50	H6: Technologietage verschiedener Firmen (u.a. Rehm, Koenen, ASYS, DEK)	Ab Q2 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 35	H7: FED-Regional-gruppentreffen	Q2 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 300	H8: FED-Konferenz	Sept. 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 200	H9: GfKORR-Tagung 2017	Q3 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 20	H10: VDI/VDE AK „Prüftechniken“	Q4 2017
	erwartete Teilnehmerzahl ca. 20	H11: FED AK „Baugruppe“	Q4 2017
erwartete Teilnehmerzahl ca. 200	H12: Fachtagung der DVS/GMM „ EBL 2018“	Q1 2018	

Q1... Quartal 1, Q2... Quartal 2, Q3... Quartal 3, Q4... Quartal 4  
 Tabelle 18: Weitere Transfermaßnahmen

Das dargestellte Transferkonzept erscheint realistisch. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Fraunhofer ISIT seit mehr als 18 Jahren auf dem Arbeitsgebiet der Prozessoptimierung, Fertigung und Bewertung von elektronischen Baugruppen tätig ist und einen breit gefächerten industriellen Kundenkreis, zu dem viele KMU zählen, aufweist. Zu den Dienstleistungsangeboten des ISIT gehören seit dem gleichen Zeitraum Schulungsmaßnahmen in Form spezieller In-House Seminare als auch wiederkehrende Seminare und Technologietage zu verschiedensten Themenbereichen. In diesem Umfeld können die Ergebnisse gezielt verbreitet werden.

Das Fraunhofer IFAM hat langjährige 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.

**Eine Übertragung der Ergebnisse in die Industrie ist somit möglich und eine Umsetzung / Anwendung mittelfristig zu erwarten.**



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im bearbeiteten Projekt wurde mittels SIR-Testanalyse nachgewiesen, dass im Nacharbeitsfall elektronischer Baugruppen ein Risikopotential auf elektrochemische Migration besteht. Durch fertigungsrelevante Prozessvariationen wurden potentiell kritische Materialkombinationen und Lötprozessparameter ermittelt.

Effektiv ist der Einsatz von deutlich reduzierten Flussmittelmengen und Einschränkung des Auftrags auf die Bereiche, die der Prozesstemperatur ausgesetzt werden. Eine qualifizierte Lötprofiloptimierung, die richtige Material- und Prozesswahl sowie das Einhalten der vom Materiallieferanten vorgegebenen Prozesstemperaturen und –zeiten ermöglicht ein akzeptables Lötergebnis bei gleichzeitigem Verbrauch (bzw. Deaktivierung) aktiver Flussmittelbestandteile. Dadurch kann bei Folge- und/oder Nacharbeitslötprozessen die Grundlage für die Herstellung zuverlässiger Elektronik mit minimiertem Risikopotential auf elektrochemische Migration geschaffen werden.

Die SIR-Test Ergebnisse zeigen einen sinnvollen Ansatz zur praxisrelevanten Ergänzung vorhandener Prüfmethode, indem für die Qualifizierung von NoClean-Flussmitteln die Vorbehandlungsprozesse mit neuen Parametersätzen (Durchfahren von unvollständigen Lötprozessen) erweitert werden.

Als neuen und besonders innovativen Ansatz wurde im Projekt die Implementierung elektrochemischer Messmethoden im SIR-Test untersucht, um hier zusätzliche Informationen, möglicherweise auch schneller, zum Korrosionsstatus der Boards zu erhalten.

Hierzu wurden zwei Methoden ausgewählt. Das war zum einen die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS), bei der durch Anregung eines kleinen sinusförmigen Potentialsignals Informationen über den komplexen Widerstand des Systems erhalten wurden. Als etablierte Methode in der Beschichtungsforschung hat sich die „Anwendung auf SIR-Tests als nicht zielführend herausgestellt. Es werden überlagernde Prozesse erfasst (z. B. Leitfähigkeit), die den Korrosionsvorgang „verdecken“ und daher in der Interpretation eine belastbare Aussage schwierig ist. In Kombination mit dem vergleichsweise hohen apparativen Aufwand (Verwendung hochohmiger Potentiostaten) ist nicht zu erwarten, dass sich dieses Konzept etablieren wird.

Demgegenüber scheint das elektrochemische Rauschen ECR aber eine vielversprechende Methode. Der apparative Aufwand ist hier geringer, da der SIR-Test schon mit einer Strommessung ausgestattet ist, die an die Rauschmessungen anzupassen bzw. zu ergänzen wäre. Das Auftreten von Korrosionsvorgängen korreliert bei NiAu-Boards mit der gemessenen Rauschintensität, die Rauchladungsmenge ist hier eine geeignete Größe zur Quantifizierung dieses Korrosionsprozesses. Entsprechendes ist auch für Cu-Boards zu erwarten.

Mit Hilfe der Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie (TOF-SIMS) als Analyseverfahren lassen sich mögliche chemische Veränderungen zwischen den Leiterbahnen von Testboards frühzeitig detektieren, bevor sie optisch bzw. lichtmikroskopisch erfasst werden können. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, zeigen unterschiedliche Leiterbahnmaterialien deutlich unterschiedliche Neigungen zur Dendritenbildung. So wurden unter beschleunigter Alterung bei NiAu-Leiterbahnen deutliche Anzeichen für eine beginnende Bildung von Dendriten festgestellt, die bei Cu-Leiterbahnen unter vergleichbaren Alterungsbedingungen nicht beobachtet wurden.

Der wissenschaftlich-technische Nutzen liegt in der Erarbeitung von Prozessempfehlungen für Folge- und Nacharbeitslötprozesse bei der Herstellung elektronischer Baugruppen sowie in der Möglichkeit vorhandene Prüfmethode sinnvoll und praxisrelevant ergänzen zu können. Des Weiteren wurde die Möglichkeit eröffnet mit dem elektrochemischen Rauschen zukünftig ein neues Verfahren zum frühzeitigen Nachweis von Korrosionsvorgängen einzusetzen.

Innovativ sind hierbei die systematische Betrachtung der Kombination von Erst- und Nacharbeitslötprozessen unter dem Gesichtspunkt von Flussmittelkombinationen sowie der besonders innovative Ansatz der Implementierung des elektrochemischen Rauschens zur Identifikation von Korrosionsvorgängen.

Insbesondere KMU können so in ihrer Fertigung sichere Folge- und Nacharbeitslötprozesse etablieren. Erhöhte Verfahrenssicherheit und damit verbunden erhöhtes Vertrauen in das Fertigungsergebnis verstärkt die Kundenbindung und damit die Wettbewerbsfähigkeit der KMU. Damit verbunden sind eine Erhöhung der Wertschöpfung und ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung im Nacharbeitssektor. Dies festigt die Marktposition von KMU.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] „DIN-EN 61191-1 Elektronikaufbauten auf Leiterplatten, Teil 1: Fachgrundspezifikation – Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen unter Verwendung der Oberflächenmontage und verwandter Montagetechniken,“ (IEC 61191-1:1998).
- [2] „IPC-T-50M, Terms and Definitions for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits,“ Mai 2015.
- [3] „Elektrochemische Migration – eine typische Korrosionserscheinung in der Mikroelektronik. Kh.G. Schmitt-Thomas, S. Wege und H. Schweigart, Materials and Corrosion 46, 366-369 (1995)“.
- [4] „J-STD-004A, Requirements for Soldering Fluxes,“ Jan. 2004.
- [5] „J-STD-004B, Requirements for Soldering Fluxes,“ Dez. 2008.
- [6] „IPC-B-24, Surface Insulation Resistance Test Board“.
- [7] „Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to marine coatings. A.W. Momber, P. Plagemann, M. Schneider. International Marine Coatings Summit Shanghai, China,“ October 2007.
- [8] „Untersuchung zum Alterungsverhalten von hochohmigen Korrosionsschutzschichten mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS). M. Schneider, O. Yezerska, P. Plagemann. 1. Symposium Impedanzspektroskopie, Essen,“ veröffentlicht in: Technische Mitteilungen 99 (2006) 46, 16.05.-17.05.2006.
- [9] „Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Metall-Polymer-Verbunden mittels Elektrochemischer Impedanzspektroskopie. M.Schneider, O. Yezerska, P.Plagemann, R.Wilken, T.Fladung, S.Dieckhoff,“ Tagung Kleben im Automobilbau Automotive Circle International, Bad Nauheim 24.04.-26.04.2006, veröffentlicht in: Proc. Automotive Circle International, tuk-Verlag Berlin, 2006.
- [10] „Long-Term Electrochemical Impedance Spectroscopy and Electrochemical Evaluation of Five Distinct Types of Navy Coatings. J. N. Murray. ACS Symposium Series 689 (G. P. Bierwagen, ed.), Chapter 2, 10 – 22,“ (1998).
- [11] „Untersuchungen zur Einsetzbarkeit elektrochemischer Rauschmessungen zum Studium des Korrosionsverhaltens von Kupferrohren in Trinkwasserinstallationen. G. Schmitt, P. Plagemann. Materials and Corrosion, 49,“ (1998) (8).
- [12] „Application of a Multi-Channel Zero Resistance Current Amplifier for Screening Pro-cesses. P. Plagemann, A. Anton, O. Yezerska, M. Schneider, P. Schrems. Materials and Corrosion 58,“ (2007) 12.
- [13] „Online monitoring of crevice corrosion with electrochemical noise. G. Schmitt, K. Meller, P. Plagemann. Materials and Corrosion, 55,“ (2004) (10).
- [14] „ECN Measurements at Copper under Tap Water Conditions: Anion Effects. G. Schmitt, E. Slavcheva, P. Plagemann. Materials and Corrosion, 52 (2001)“.
- [15] „Elektrochemisches Rauschen (ECR) als Hochdurchsatzmethode zur Untersuchung von Korrosionsschutzbeschichtungen. P. Plagemann, O.Yezerska, A. Brinkmann. Farbe und Lack,“ April 2009.
- [16] „Forschungs-Projekt "Nutzung des Elektrochemischen Rauschens (ECR) zur Beschleunigung der Lackentwicklung", Gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft

industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke" e.V. (AiF),“ Projekt-Nr. 14639N, Laufzeit 1.2. 2006 - 31.1. 2009, Tschaikowskistraße 49, 13156 Berlin.

[17] „DIN EN ISO 8044, Korrosion von Metallen und Legierungen- Grundbegriffe und Definitionen 11-1999“.

[18] „Die Korrosion der Metalle. H. Kaesche, Springer Verlag,“ 1990.

[19] „IN ISO 857-2:2007-03, Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe, ersetzt DIN 8505-2:1979-05“.