

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls im Department Maschinenbau, danke ich sehr herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit, die konstruktiven und wertvollen Anregungen und ganz besonders für den großen wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, Zentrum für mikrotechnische Produktion der Technischen Universität Dresden, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates.

Diese Dissertation beruht auf den Ergebnissen verschiedener Forschungsprojekte im Umfeld der Elektronikproduktion, die durch die Bayerische Forschungsförderung, der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wurden. Allen beteiligten Projektpartnern danke ich für die anregenden Gespräche und konstruktiven Zusammenarbeit.

Weiterhin danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik für die hervorragende Zusammenarbeit während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl. Besonders danken möchte ich meinen Kollegen des Forschungsbereichs Elektronikproduktion für die Unterstützung bei der Bearbeitung der vielfältigen wissenschaftlichen Fragestellungen. Hervorheben möchte ich dabei Herrn Dr.-Ing. Thomas Bigl, Herrn Dipl.-Ing. Daniel Craiovan, Herrn Dr.-Ing. Werner Enser, Herrn Dipl.-Ing. Gerald Gion, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Goth, Herrn Dr.-Ing. Rüdiger Holzmann, Herrn Dipl.-Ing. Johannes Hörber, Herrn Dipl.-Ing. Denis Kozic, Herrn Siegfried Maly, Herrn Dipl.-Ing. Christian Matzner, Herrn Leonhard Maußner, Herrn Dipl.-Ing. Michael Pfeffer, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Reinhardt, Herrn Dipl.-Ing. Michael Rösch, Herrn Dipl.-Ing. Florian Schüßler, Herrn Horst Schuster, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Wilhelm Weller.

Besonders danke ich meinen Eltern, die mich von Anfang an stets gefördert und beim Erreichen meiner Ziele unterstützt haben. Mein größter Dank gilt meiner Frau, die mich immer ermutigt hat, meinen beruflichen Weg mit Engagement fortzusetzen und mich dabei stets mit Rat und Tat begleitete.

Erlangen, im Januar 2009

Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Aktuelle Entwicklungen bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Nacharbeitsprozessen.....	3
2.1	Auswirkungen dezentraler Einbauorte auf Zuverlässigkeitsuntersuchungen	3
2.2	Prüfstrategien für die Aufbau- und Verbindungstechnik	6
2.3	Trends bei der Nacharbeit von elektronischen Baugruppen.....	11
3	Gestaltung, Durchführung und Auswertung von Untersuchungen mit beschleunigten Prüfverfahren	15
3.1	Einfluss von Schablonen- und Padvarianten auf den Herstellungsprozess und die Zuverlässigkeit von BGA-Bauelementen	16
3.1.1	Testvarianten und -layout	17
3.1.2	Analyse des Herstellungsprozesses.....	19
3.1.3	Beschleunigte Alterung mittels Temperaturschockbelastung.....	23
3.1.4	Bewertung der Ergebnisse	26
3.2	Online-Überwachung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen.....	27
3.2.1	Ausfallanalyse mit permanenter Messdatenaufzeichnung	28
3.2.2	Aufbau zur Erhöhung der Prüflingsanzahl.....	34
3.3	Erweiterte Auswertungen von Zuverlässigkeitsuntersuchungen	40
3.3.1	Weibull-Analyse für elektronische Komponenten.....	41
3.3.2	Einfluss des Stichprobenumfangs	46
3.3.3	Prognose bei Langzeituntersuchungen	49
3.4	Zusammenfassung.....	52
4	Angepasste Prüfschritte und Messaufbauten zur Ermittlung der Zuverlässigkeit.....	55
4.1	Bedarfsgerechte Qualifizierung eines innovativen Kontaktierungsverfahrens für MID-Baugruppen mit Folienflachleitern	55
4.1.1	Konzeption von optimierten Prüfabläufen und Messaufbauten.....	57
4.1.2	Ergebnisse der angepassten Untersuchungen	61
4.1.3	Gesamtbewertung des Qualifizierungsprogramms	68

4.2 Analyse des Einflusses einer Eigenerwärmung auf die Verbindungstechnik bei hohen Umgebungstemperaturen.....	69
4.2.1 Aufgabenstellung und Prüfkonzzept.....	70
4.2.2 Realisierung eines Prüfaufbaus für die zyklische Leistungseinbringung..	72
4.2.3 Bestimmung der Zuverlässigkeit bei unterschiedlichen Belastungsprofilen	76
4.3 Zusammenfassung	83
5 Konzeption und Qualifizierung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Einflusses von Kondensation.....	85
5.1 Auftreten und quantitative Erfassung von Betauung.....	86
5.1.1 Grundlagen der Betauung.....	87
5.1.2 Quantitative Messung von Wassermassen	88
5.2 Analyse des Ausfallmechanismus.....	90
5.2.1 Mechanismus der elektrochemischen Migration.....	92
5.2.2 Einflussfaktoren für das Wachstum von Dendriten.....	94
5.3 Konzeption eines geeigneten Prüfverfahrens	95
5.3.1 Festlegung eines Klimakammerprofils.....	96
5.3.2 Bestimmung von Bewertungskriterien	98
5.3.3 Testplatine und Einflussfaktoren für die Grundqualifikation	99
5.4 Grundqualifizierung des Prüfverfahrens.....	101
5.4.1 Messaufbau und Versuchsplan.....	101
5.4.2 Exemplarische Ergebnisse	102
5.4.3 Auswertung der Versuchsreihen.....	105
5.5 Zusammenfassung	108
6 Innovatives Messverfahren zur Bestimmung der Phasenübergänge von Lot in der Nacharbeit	111
6.1 Temperaturprofilierung in Produktion und Nacharbeit	112
6.1.1 Optimierung der Wärmeeinbringung im Reflowlötprozess	112
6.1.2 Temperaturermittlung für die BGA-Nacharbeit	114
6.2 Messverfahren zur Schmelzpunktdetektion mit elektrischen Widerstandsmessungen.....	116
6.2.1 Alternatives Messprinzip auf der Basis elektrischer Messungen.....	116
6.2.2 Exemplarische Messwertverläufe	118
6.3 Analyse von Nacharbeitsprozessen	121
6.3.1 Auswirkungen von Temperaturprofilen auf die Dauer der schmelzflüssigen Phase.....	121

6.3.2 Vergleich der Wärmeeinbringung unterschiedlicher Nacharbeits- systeme	124
6.4 Einsatzpotentiale des Messverfahrens	127
6.4.1 Nacharbeit von BGA-Bauelementen	128
6.4.2 Anwendung im Referenzprozess.....	130
6.5 Zusammenfassung.....	132
7 Nacharbeit von Bauelementen auf Folienschaltungen.....	133
7.1 Analyse und Konzeptentwicklung für die Nacharbeit auf biegeschlaffen Substraten.....	134
7.1.1 Analyse bestehender Nacharbeitskonzepte für starre Baugruppen.....	134
7.1.2 Konzeptentwicklung einer integrierten Handhabungsvorrichtung	135
7.2 Aufbaualternativen für die Nacharbeit von BGA-Bauelementen.....	137
7.2.1 Einsatz von Rapid-Technologien.....	138
7.2.2 Realisierung einer integrierten Handhabungsvorrichtung	140
7.2.3 Erweiterung eines vorhandenen Systemkonzepts	141
7.3 Inbetriebnahme und exemplarische Messungen	142
7.3.1 Korrelation der Temperaturverläufe.....	142
7.3.2 Anwendung des Messfahrens zur Bestimmung der Phasenübergänge .	143
7.4 Zusammenfassung.....	145
8 Zusammenfassung	147
Literaturverzeichnis	149
Summary	161

1 Einleitung

Der Einsatz von elektronischen Baugruppen in technischen Produkten und Anlagen steigt weltweit weiterhin an [140]. Dies gilt für alle Produkte aus den Bereichen der Unterhaltungs-, Kommunikations-, Industrie- und Automobilelektronik, sowie für Anwendungen in der Militär- und Medizintechnik. Demgegenüber stehen verkürzte Produktlebenszyklen aufgrund der fortlaufenden Einführung immer neuer Produkte, mit denen sich die Hersteller von ihren Wettbewerbern ständig abgrenzen wollen oder müssen, um wirtschaftlich erfolgreich am Markt zu bestehen. Weitere Herausforderungen für die Herstellung zuverlässiger Baugruppen, Produkte und Systeme liegen in der Erschließung neuer Einbauorte mit verstärkt einwirkenden Umwelteinflüssen, beispielsweise im Motorraum von Kraftfahrzeugen. Die daraus resultierenden erhöhten Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik können unter anderem mit der Einführung von neuen Materialien und Technologien erfüllt werden. Dazu ist eine kontinuierliche Verbesserung der einzelnen Herstellungsschritte notwendig, die auf der Basis einer tiefgehenden Prozesskenntnis erfolgen kann (Bild 1 oben).



Bild 1: Herausforderungen und ausgewählter Handlungsbedarf für die Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronikproduktion

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, hinsichtlich der Themenfelder Zuverlässigkeit, Prüfabläufe und Prozessanalyse einen Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik zu leisten. Die Betrachtung des letztgenannten Bereichs erfolgt an Beispielen in der Nacharbeit von komplexen Bauelementformen, da die Bedeutung des Nacharbeitsprozesses trotz aller qualitätssichernden Maßnahmen zunimmt und die dortigen ortsfesten Lötprozesse optimal beobachtet und analysiert werden können. Für die fünf genannten Herausforderungen (Bild 1 oben) wurde jeweils ein ausgewählter Handlungsbedarf ermittelt, die in dieser Arbeit eingehend untersucht werden (Bild 1 unten).

Neben den erzielten Einzelergebnissen stand immer das methodische Vorgehen im Vordergrund, welches auch auf ähnliche Fragestellungen angewendet werden kann. So wie die genannten Herausforderungen nicht unabhängig waren, wurden auch bei der Bearbeitung der einzelnen Kapitel gewonnene Ergebnisse und Erkenntnisse miteinander verknüpft.

Nach einem Überblick von ausgewählten aktuellen Entwicklungen in den Feldern Zuverlässigkeit, Prüfverfahren und Nacharbeit wird im Kapitel 3 der Aufbau, die Durchführung und die Auswertung von Untersuchungen mit beschleunigten Alterungsverfahren für eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Varianten behandelt. Dabei wird auch auf einen Vergleich von dem zugehörigen Herstellungsprozess und den Ergebnissen der Zuverlässigkeitsuntersuchungen eingegangen. Eine weitere bedeutende Fragestellung, die behandelt wird, ist, wie sich die Aussagekraft von Zuverlässigkeitsuntersuchungen mit der Erhöhung des Aufwands hinsichtlich der Prüflingsvorbereitung und des Messaufbaus entwickelte.

In dem Mittelpunkt von Kapitel 4 stehen zunächst spezifischen Anpassungen an einzelne Prüfschritte, mit dem Ziel einen maximalen Erkenntnisgewinn zu erhalten. Anhand von vorliegenden Versuchsergebnissen für ein Kontaktierungssystem von Folienflächleitern mit spritzgegossenen Schaltungsträgern werden dabei gezielt Prüf- und Messaufbauten so verbessert, dass Vergleichsvarianten nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ bewertet werden konnten. In einer weiteren Untersuchung wurde ein Prüf- und Messablauf, am Beispiel eines dezentralen Einbauorts mit extremen internen und externen Temperaturbelastungen, entworfen und identische Prüflinge unterschiedlichen Belastungsstufen unterzogen. Darüber hinausgehend wurde für den Umwelteinfluss der Kondensation ein ganz neues Prüfverfahren konzipiert und qualifiziert (Kapitel 5). Dabei wurde insbesondere dem Umstand, dass das Auftreten und das Maß von Betauung nicht alleine von der Variation der Klimaparameter abhängen, Rechnung getragen. Hierfür wurde ein systematisches Vorgehen gewählt, das nach der Analyse des wesentlichen Ausfallmechanismus in der Konzeptphase die ganzheitliche Einbeziehung der Aspekte des einwirkenden Klimaprofils, der Festlegung von Bewertungskriterien und des Entwurfs eines Testschaltungsträgers beinhaltet.

Die Festlegung und Optimierung von Temperaturprofilen für den Lötprozess bestimmt ganz wesentlich die Qualität einer Kontaktierung. Die bisherigen Verfahren beruhen auf dem Einsatz von Temperatursensoren. In dem Kapitel 6 wird ein innovatives Messverfahren für die Bestimmung der Phasenübergänge von fest nach flüssig und umgekehrt in der Nacharbeit vorgestellt, das auf der signifikanten Änderung des elektrischen Widerstands des Verbindungsmediums Lot basiert. Hiermit konnte eine exakte zeitliche Bestimmung des Aufschmelzens und des Erstarrens erfolgen. Vor dem Hintergrund des verstärkten Einsatzes von Folienschaltungen mit komplexen Bauelementen werden im Kapitel 7 verschiedene Handhabungsvorrichtungen für die Nacharbeit konzipiert und eine Vorzugsvariante aufgebaut, die die spezifischen Belange der biegeschlaffen Schaltungsträger berücksichtigt und verbesserte Prozessergebnisse ermöglicht. Somit wurden bestehende Systemkonzepte optimal erweitert und mit Nacharbeiten von starren Baugruppen anhand des Messverfahrens aus Kapitel 6 verglichen.

2 Aktuelle Entwicklungen bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen und Nacharbeitsprozessen

Die Herstellung von elektronischen Baugruppen erfolgt in einem hochdynamischen Umfeld, das von fortlaufenden Entwicklungen und Innovationen geprägt ist. Dies gilt insbesondere für den Einsatz von Elektronik in Automobilen, bei denen die Anzahl der verbauten Steuergeräte stetig anwächst und in wenigen Produktzyklen die Zahl 100 in der Oberklasse erreichen wird. Dabei steigen gleichzeitig die Anforderungen an deren Zuverlässigkeit, die unter anderem durch die Platzierung an dezentralen Wirkorten zwangsläufig bedingt ist. Im Gegensatz zu geschützten Einbauorten im Fahrzeuginneren, können bei Motor- und Getriebeanbauten bis zu 150 °C dauerhaft auf die elektronischen Komponenten einwirken. Die thermische Belastung ist allerdings nicht nur durch die Spitzentemperatur gekennzeichnet, sondern auch durch den maximalen Temperaturhub, dem die Systeme ausgesetzt sind. Weiterhin treten an dezentralen Einbauorten Umwelteinflüsse, wie beispielsweise Feuchtigkeit oder auch Kondensation, verstärkt auf. Dies erfordert neue Herangehensweisen hinsichtlich der dauerhaften Gewährleistung der Funktionalität. Aus diesen Gründen gewinnt die Betrachtung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) besondere Bedeutung, da zukünftig konventionelle Materialien und Herstellungsprozesse den neuen Anforderungen nicht mehr genügen werden [66].

Die Ermittlung der Zuverlässigkeit erfolgt mit der Hilfe von Prüfverfahren, die durch festgelegte Abläufe eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse erlauben sollen. Dabei werden Beschleunigungsfaktoren angewendet, die eine Zeitraffung der Tests gegenüber den real auftretenden Belastungen bewirken und Resultate in überschaubaren Zeiträumen zur Verfügung stellen. Eine Voraussetzung für die Gewinnung von aussagekräftigen Ergebnissen ist jedoch, dass die Prüfung in geeigneter Weise die zu testende äußere Belastung nachbildet. Hier bestehen aktuell Defizite, da für Umwelteinflüsse, wie die Kondensation, die bisher nicht spezifisch geprüft wurden, Testbedingungen zu Grunde liegen, die der Aufgabenstellung nicht ausreichend gerecht werden. Hier können angepasste und neue Prüfverfahren Abhilfe leisten [141].

Die Nacharbeit von Bauelementen gewinnt trotz aller qualitätssichernden Maßnahmen in der Baugruppenfertigung weiterhin an Bedeutung. Im Mittelpunkt steht dabei der Reparaturprozess unmittelbar nach den Inspektions- und Prüfschritten am Ende der Produktionslinie. Das zentrale Ziel ist dabei, den selektiven Austauschprozess einer einzelnen Komponente so durchzuführen, dass solche nachgearbeiteten Baugruppen mit derselben Zuverlässigkeit verbaut werden können wie fehlerfrei produzierte Produkte.

2.1 Auswirkungen dezentraler Einbauorte auf Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Die Entwicklung der Elektrik und Elektronik in Kraftfahrzeugen spiegelt sich in einem stetig steigenden Anteil an der Wertschöpfungskette wieder. Bezogen auf elektronische

Baugruppen lässt sich dies gut an der Einbausituation verdeutlichen. Diesem Trend folgend werden die Einbauplätze klassifiziert, wie beispielsweise in Tabelle 1. Diese Einteilung erfolgt allerdings nicht immer einheitlich [55]. Somit finden sich in der Literatur und bei herstellerepezifischen Anforderungsprofilen unterschiedliche Angaben [61]. In der Vergangenheit wurden nur einige einfache Steuergeräte an geschützten Orten im Fahrzeuginnenraum eingesetzt. Dem aktuellen Trend folgend, werden immer komplexere Funktionalitäten mit hochintegrierten Systemen dezentral realisiert. Im Mittelpunkt der aktuellen Forschung steht die erhöhte thermische Belastung, wie sie beispielsweise bei der stetig steigenden Anzahl von Steuergeräten, die im Motorraum verbaut werden, auftritt [101][107]. Ein verstärkender Effekt ergibt sich aus der Verwendung von leistungsstarken, miniaturisierten Bauelementen mit erhöhter Abwärme [94]. Aufgrund der Umgebungsbedingungen muss dabei die Elektronik einerseits durch ein geeignetes Gehäuse geschützt werden, wodurch jedoch andererseits oft eine effektive Wärmeabfuhr verhindert wird [50].

Klassifizierung	R1 Fahrgastraum	R2 Motorraum	R3 Motorumgebung	R4 Motoranbau
Thermische Belastung	-40 °C ... +85 °C	-40 °C ... +105 °C	-40 °C ... +105 °C	-40 °C ... +125 °C
Vibration: Zufällig (effektiv) Sinus (maximal) Dauer	2,8 g ... 100 Hz 8 h	2,8 g ... 100 Hz 8 h	2,8 g ... 1000 Hz 16 g ... 440 Hz 22 h	2,8 g ... 1000 Hz 24 g ... 440 Hz 22 h

Tabelle 1: Klassifizierung der Einbauorte in Kraftfahrzeugen und typische Belastungswerte für die Qualifizierung [5]

Für die Bewertung der Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppen standen Prüfungen mit erhöhter oberer Grenztemperatur für Lagerung und Temperaturschockbelastung im Vordergrund. Innerhalb des Verbundprojekts hotEL („Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperaturelektronik am Beispiel der Kfz-Elektronik“) wurden bestehende Technologien einer Maximaltemperatur von 165 °C ausgesetzt [91]. Dies entsprach einem zusätzlichen Temperaturhub von 40 K gegenüber bisherigen Untersuchungen. Diese Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf die eingesetzten Materialien für Substrate, Oberflächenmetallisierungen und Lotlegierungen im Hinblick auf die erhöhten thermischen Belastungen [125]. Insbesondere bei den Temperaturschockzyklen zeigte sich, dass der aufgebrachte Lötstopplack Risse verursachte, die die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Leiterplatten erheblich einschränken können. Die Scherkraftanalysen haben gezeigt, dass die gemessenen Kräfte nach 500 Zyklen, bei der Verwendung von gängigen bleifreien Loten, deutlich geringer als im Ausgangszustand waren. Weiterhin konnte ein Einfluss von Padgeometrien und der eingebrachten Lotmenge nachgewiesen werden. Im Bereich der Anschlussflächenmetallisierung zeigte die Verwendung einer Nickelsperrschicht bei einer Belastung mit der oberen Grenztemperatur von 165 °C weiterhin einen geeigneten Schutz gegen das steigende intermetallische Phasenwachstum.

Im Rahmen des BMBF Projekts HiTAP („Aufbau, Montagetechnik und Applikationsuntersuchung von High Temperature Advanced Packages am Beispiel Automobilelektronik“) wurden am Beispiel eines Motorsteuergerätes unter anderem Zuverlässigkeitsuntersuchungen für miniaturisierte Bauelementformen gemäß den erhöhten Anforderungen für Motoranbauten (Tabelle 1) durchgeführt [75]. Der Schwerpunkt der Analyse bildeten dabei miniaturisierte Flip Chip Bauelemente mit unterschiedlichem Raster und der Vergleich von bleihaltigen und bleifreien Lotlegierungen, die Temperaturwechseltests in einem Zweikammerschrank mit zwei Temperaturprofilen, zum einem von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ und zum anderen von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, unterzogen wurden [45]. Eine deutlich höhere Ausfallrate konnte bei dem erhöhten Temperaturprofil nachgewiesen werden. Zusätzliche mechanische Tests bei $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ beziehungsweise $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Anschluss an eine Hochtemperaturlagerung und 300 Temperaturzyklen führten zu einer höheren Ausfallrate unter Vibrationsbelastung bei steigender Temperatur. Entgegen den Erwartungen zeigte sich eine höhere Zuverlässigkeit der Baugruppen mit bleihaltiger Lotlegierung, trotz des deutlich niedrigeren Schmelzpunktes. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, dass in weiterführenden Untersuchungen die allgemeinen Annahmen in Bezug auf die Zuverlässigkeit gründlich zu hinterfragen und zu verifizieren sind.

Die Ergebnisse von anwendungsbezogenen Untersuchungen für den Einsatz von integrierten Sensoren und Aktoren in Kraftfahrzeugen zeigten die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Produktentwicklungsprozesses, da Zuverlässigkeitsaspekte bereits von Beginn entscheidend beeinflusst werden können [71][99]. Bezogen auf den wichtigen Faktor der mechanischen Stabilität der Verbindungsstellen, hat sich eine deutliche Abhängigkeit der Ausfallrate von der Wahl der Materialien und der verwendeten Geometrien gezeigt. Weitere Untersuchungen im Bereich der Prüfparametervariation haben die Auswirkungen der Verweilzeit bei Temperaturwechsel und -schocktest bei zwei verschiedenen oberen Grenztemperaturen aufgezeigt. Eine Erhöhung dieser Temperatur von $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ergab eine um 40 % geringere Lebensdauer, die mit der Weibull-Analyse bestimmt wurde [1][69]. In ergänzenden Versuchsreihen wurde die Vibrationsbelastung von hochempfindlichen elektronischen Baugruppen mit dem Ziel analysiert, durch geeignete Schutzmaßnahmen die auftretenden Belastungen zu reduzieren. Voraussetzung war die Bestimmung des Eigenschwingungsverhaltens der untersuchten Baugruppe und der kritischen Frequenzbereiche. Eine auf Basis eines theoretischen Modells angepasste mechanische Isolation wurde erprobt und eine Reduktion der einwirkenden Kräfte im kritischen Frequenzbereich konnte nachgewiesen werden [130].

Die Auswirkung von erhöhter thermischer Belastung bei Lagerung und Temperaturwechseltests auf die resultierenden Schädigungsmechanismen wurden auch mit einer Analyse des intermetallischen Phasenwachstums und der Rissbildung bewertet [98]. Ein quantifizierbares Kriterium bei Untersuchungen war die Bestimmung des thermischen Widerstands. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der verwendeten Lotlegierung und dem Risswachstum konnte dabei nachgewiesen werden. Die exemplarischen Untersuchungen zeigten weiterhin, dass auch die Metallisierung der Leiterplatte und der Bauelemente einen erheblichen Einfluss besaßen.

Die vorstehend genannten Untersuchungen hinsichtlich der Ermittlung der Zuverlässigkeit von elektronischen Komponenten und Baugruppen mit erhöhten Anforderungsprofilen basierten im Wesentlichen auf der Erhöhung der oberen Grenztemperaturen für die Prüfverfahren Temperatúrauslagerung und Temperaturwechseltests. Dabei konnte ein signifikantes Ansteigen der Versagensfälle beobachtet werden. Hinsichtlich des Ziels einer Zuverlässigkeitsprognose für dezentrale Einbauorte sind weitere Untersuchungen hinsichtlich einer Quantifizierung des Temperatureinflusses unabdingbar. Weiterhin müssen allerdings auch andere Faktoren vertieft betrachtet werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Defizite ermittelt, die den Ausgangspunkt für weitergehende Untersuchungen in dem Themenfeld Zuverlässigkeitsermittlung bildeten. Der erste Schwerpunkt dabei war eine Gegenüberstellung der Auswertung von Aufbauvarianten hinsichtlich der Fertigung und der Zuverlässigkeit, da die Betrachtung der Ergebnisse von Zuverlässigkeitsuntersuchungen zwar ein wichtige, aber nicht die alleinige Basis für die Bestimmung einer Vorzugsvariante war. Daneben wurden für die zyklengenaue Bestimmung der Ausfallzeitpunkte während der Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen mit beschleunigten Alterungsverfahren verschieden komplexe Messaufbauten für Online-Messungen bewertet, die für eine weitaus genauere Quantifizierung von Lebensdauerprognosen erforderlich sind.

2.2 Prüfstrategien für die Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Sicherstellung der Qualität von elektronischen Komponenten und Produkten erfolgt mit Hilfe einer festzulegenden Prüfstrategie, bei der einzelne Prüfverfahren für unterschiedliche Anforderungen Anwendung finden. Im Allgemeinen wurden lange Zeit die Hauptbelastungsarten Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Vibration in einzelnen Prüfungen untersucht, mit dem Ziel, eine Gesamtaussage für die Zuverlässigkeit der Verbindungstechnik eines Bauelements auf einer Leiterplatte zu treffen. Da aber unter üblichen Einsatzbedingungen für elektronische Produkte die Umweltbelastungen nicht einzeln auftreten, werden die Testobjekte mehreren Prüfungen unterzogen.

Einwirkungen mehrerer Prüfbelastungen

Erfordert eine Qualifizierungsstrategie die Prüfung mit mehreren Belastungen, so können diese nacheinander oder gleichzeitig auf die Testobjekte einwirken. Die erste Variante, die so genannte sequentielle Strategie, erfordert in jedem Fall eine genaue Betrachtung der Abfolge der Einzelprüfungen [131]. Die Besonderheit dieses Vorgehens liegt darin, dass das Prüfergebnis von der Reihenfolge der Einzelprüfungen abhängt. Ein typisches Beispiel ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Mit den unbelasteten Testobjekten werden die beiden Prüfungen Temperaturschock und Vibration nacheinander durchgeführt. Nach dem Prüfen wird die Anzahl der ausgefallenen Prüflinge bestimmt. Die in praktischen Untersuchungen festgestellte signifikante Abweichung der ermittelten Ausfälle ließ sich mit der genaueren Betrachtung der Auswirkungen der beiden einzelnen Belastungen nachvollziehen. Bei der Temperaturschockprüfung wurden thermisch induzierte Risse in den Lötstellen verursacht, die bei der anschließenden Vib-

rationsbelastung erweitert wurden und somit zu einer Erhöhung der Versagensfälle (Prüfergebnis T-V) während der zweiten Prüfung führten.

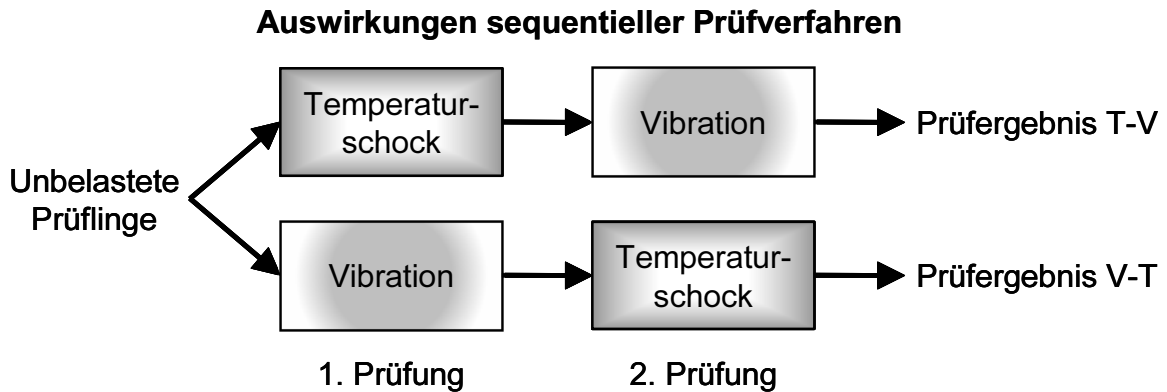


Bild 2: Prüfablauf bei der Anwendung der sequentiellen Prüfstrategie am Beispiel von Temperaturschock- und Vibrationsbelastung

Der umgekehrte Ablauf führte bei der Vibrationsprüfung zu mechanisch induzierten Rissen in den Lötstellen, die geringer ausgeprägt waren als die thermisch induzierten Risse. Daher zeigten sich diese Prüflinge weit weniger anfällig gegenüber der anschließenden Temperaturschockbelastung. Für die Konzeption von Prüfplänen mit aufeinander folgenden Belastungen ist somit immer eine kritische Betrachtung einer möglichen Vorschädigung durch den vorangegangenen Test und der Wirkungsweise der nachfolgenden Belastung notwendig. In der Praxis haben sich für die Qualifizierung mehrere Kombinationen für sequentielle Prüfabläufe bewährt, von denen beispielhaft einige in der nachfolgenden Tabelle 2 mit ihren Wirkungsweisen aufgeführt wurden.

Sequentielle Belastungen	Auswirkungen
(1) Temperaturschock (2) Feuchtelagerung (3) Kältelagerung	Eindringen der Feuchtigkeit in die thermisch induzierten Risse, die während der Kältelagerung gefriert, und dadurch die vorhandenen Risse erweitert.
(1) Vibration (2) Feuchtelagerung (3) Kältelagerung	Eindringen der Feuchtigkeit in die mechanisch induzierten Risse, die während der Kältelagerung gefriert, und dadurch die vorhandenen Risse erweitert.
(1) Temperaturschock (2) Feuchtelagerung (3) Vibration	Eindringen der Feuchtigkeit in die thermisch induzierten Risse, die zu einem verminderten Reibungskoeffizienten führt. Bei dem abschließenden Vibrationstest ändert sich somit die mechanische Belastung.
(1) Feuchtelagerung (2) Temperaturschock	Absorption von Feuchtigkeit in die Bauelemente und Schaltungsträger, die während der Temperaturschocks verdampfen kann und zu hohen internen mechanischen Spannungen führt.

Tabelle 2: Ausgewählte sequentielle Prüfabläufe und die zu erwartenden Fehlermechanismen [131]

Bei der Auswahl der Einzelprüfungen und der Festlegung der Reihenfolge ist darauf zu achten, dass die Belastungen zu einander in Wechselwirkung stehen und eingetretene Vorschädigungen verstärkt werden.

Die gleichzeitige Belastung eines Prüflings mit verschiedenen Einflüssen wird als kombinierte Umweltprüfung bezeichnet (engl. Combined Enviromental Reliability Test - CERT) [30]. In vielen Fällen ist eine sequentielle Prüfstrategie sinnvoll und ausreichend, jedoch gilt dies für Baugruppen, die an exponierten, dezentralen Einbauorten Anwendung finden, nur in beschränktem Umfang. Eine generelle Empfehlung besteht darin, dass, bei einem zu erwartenden simultanen Auftreten unterschiedlicher Belastungen im Anwendungsfall, auch kombinierte Prüfungen im Rahmen der Qualifizierung durchzuführen sind [131]. Die Hauptbelastungsarten sind dabei Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Vibration, die im Allgemeinen immer zusammen auftreten. Weitere mögliche Belastungen, wie beispielsweise Staub, Salzwasser oder Luftdruck, können je nach Einbau- und Einsatzort einwirken. In einem solchen Fall ist eine anwendungsspezifische Prüfstrategie zu konzipieren. Die Bedeutung von kombinierten Prüfungen kann am Beispiel der drei Hauptbelastungen anhand der schematischen Darstellung in Bild 3 verdeutlicht werden. Dabei stehen die Fehlerarten, die durch die einzelnen und kombinierten Prüfungen auftreten können im Mittelpunkt. Die Fehler F1, F2 und F3 treten bei der Einwirkung einer einzelnen Belastung auf. Bei der Anwendung der möglichen Belastungskombination können neue Fehlerbilder F12, F13, F23 oder F123 identifiziert werden, die bei Einzelprüfungen nicht in Erscheinung treten oder bei sequentiellen Prüfabläufen nur in abgeschwächter Form erscheinen.

Auftreten von Fehlerarten in Abhängigkeit von Belastungskombinationen

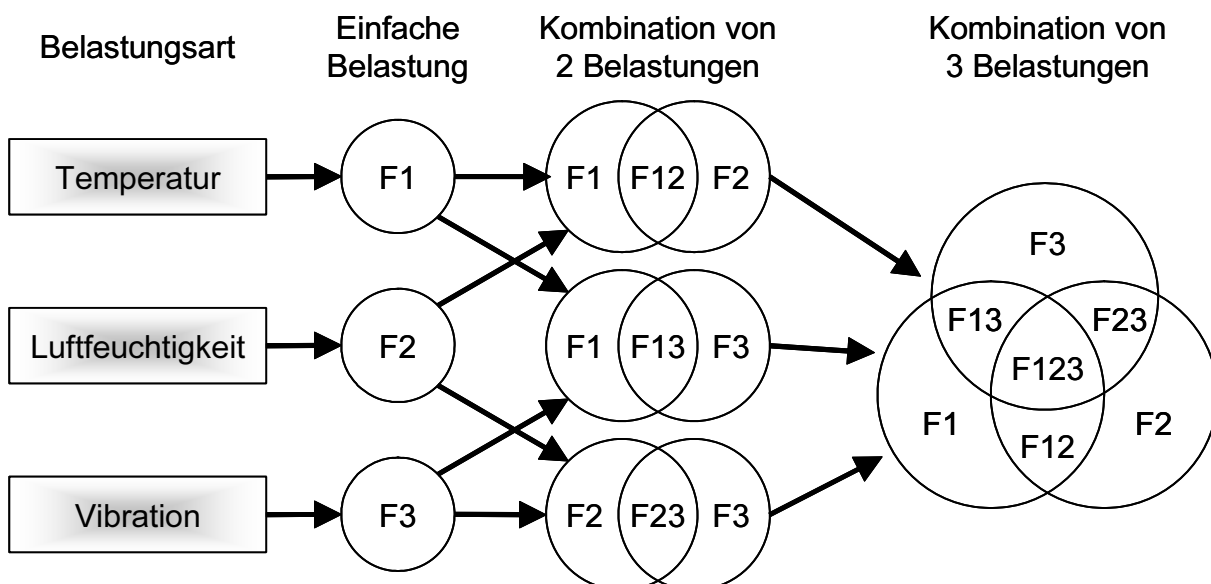


Bild 3: Auswirkungen von kombinierten Prüfungen auf die möglichen, eintretenden Fehlerarten [30]

Mit einem solchen Vorgehen, das an reale Einsatzbedingungen angelehnt ist, können die im Labor erzeugten Ausfallarten besser die realen Feldausfälle nachbilden. Dabei tritt auch eine zeitliche Beschleunigung um den Faktor drei bis fünf ein, die zu einer sig-

nifikanten Reduzierung der Prüfdauer führt [30]. Eine Auswahl von kombinierten Prüfungen, die in der Elektronikproduktion Anwendung finden, werden in Tabelle 3 aufgeführt.

Kombinierte Belastungen	Auswirkungen
Vibration/mech. Schock Temperaturauslagerung	Starke Auswirkungen bei der Verwendung von Kunststoffmaterialien. Unter Temperatureinwirkung Gefahr der Erweichung bzw. Versprödung, die zu Änderung der mechanischen Resonanzfrequenz führen kann.
Luftfeuchtigkeit Temperaturwechsel	Unter erhöhter Temperatur kann die umgebende Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen, die in das Innere der Komponenten und Schaltungsträger gelangen kann.
Niedriger Luftdruck Temperaturauslagerung	Niedriger Luftdruck verringert die Wärmeabfuhr von Baugruppen an die umgebende Atmosphäre und führt zu einer höheren Eigenerwärmung.
Vibration Schadgaslagerung	Bildung von hochohmigen Verbindungsstellen aufgrund von Reibkorrosion, insbesondere bei Steckverbindungen.

Tabelle 3: Ausgewählte kombinierte Prüfabläufe und die zu erwartenden Auswirkungen auf die Verbindungstechnik [131]

Aus den vorausgegangenen Ausführungen ließ sich die Notwendigkeit von kombinierten Prüfungen für Baugruppen an dezentralen Einbauorten ableiten. Weitergehende Untersuchungen zeigten darüber hinaus auch den Einfluss der Prüfachrichtung bei Vibrationsprüfungen [51]. Eine ausführliche Zusammenstellung von unterschiedlichen Belastungsarten und deren Kombinationen sowie von signifikanten Fehlerarten und Fehlermechanismen findet sich in der Literatur [138].

Ausfallorientierte Prüfstrategie mit HALT/HASS

Ein anderes Vorgehen für die Optimierung der Zuverlässigkeit von elektronischen Produkten erfolgt mit dem HALT-Test (Highly Accelerated Life Test). Dieses Verfahren wird während des Entwicklungsprozesses eingesetzt, mit dem Ziel potentielle Schwachstellen mittels extremer Stresstests zu identifizieren. Nach dem Abschluss des nachstehend beschriebenen Optimierungsverfahrens mittels HALT, kann basierend auf den Ergebnissen eine fertigungsbegleitende, zerstörungsfreie HASS-Prüfung (Highly Accelerated Stress Screening) erfolgen, mit der sichergestellt werden kann, dass die im HALT-Verfahren identifizierten Mängel beseitigt wurden.

Für einen erfolgreichen Qualifikationstest ist es zwingend notwendig, vor dem Testbeginn eine detaillierte Versuchsplanung durchzuführen. Hierbei ist die Zusammenarbeit der Entwicklungsabteilung des zu prüfenden Produkts und der HALT-Spezialisten erforderlich. Dabei werden die nachfolgenden Punkte eingehend diskutiert: Definition der Funktion des Produkts, der zu überwachenden Parameter und der Fehlerkriterien sowie die Festlegung der Stressfaktoren, der Aufbau der Aufspannvorrichtungen für die mechanischen Tests und die Ermittlung der notwendigen Prüflingsanzahl. Die Durchführung der Tests erfolgt mit einer speziellen Prüfkammer (Bild 4 links), die unter anderem

einen Prüftemperaturbereich von $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufweist und Temperaturänderungen bis 60 K/min erlaubt [13]. Damit können mit dem integrierten Shaker Vibrations-test bei schnellen Temperaturwechseln durchgeführt werden, was bei bisherigen Anlagen nicht möglich war.

Stresstest an Systemeinheiten mittels HALT (Highly Accelerated Life Test)



Quelle: SGS
Germany GmbH

HALT- Anlage

HALT Standardtestverfahren

- (1) Stressbelastung des Prüflings außerhalb der Spezifikation.
Bestimmung der oberen/unteren Funktions-/Zerstörungsgrenze:
 - ☐ Temperatureinwirkung ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}/+200\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - ☐ Schnelle Temperaturwechsel (max. 60 K/min)
 - ☐ Vibrationseinwirkung (max. 50 g_{rms})
 - ☐ Kombinierte Stress (Vibration und Temperatur)
 - (2) Analyse der Versagensursache anhand der ersten aufgetretenen Schwachstelle der geprüften Systemeinheit
 - (3) Festlegung einer Abhilfemaßnahme zur Beseitigung der Schwachstelle und Bereitstellung angepasster/neuer Prüflinge
- Wiederholung der Schritte (1)-(3) bis zum festgelegten Prüfende

Bild 4: Testanlage für HALT-Untersuchungen und standardisierter Testablauf [78]

Der eigentliche Prüfablauf erfolgt mit einem iterativen Verfahren, bei dem die Prüflinge mindestens den genannten vier Prüfschritten unterzogen werden (Bild 4 rechts). Die Besonderheit des HALT-Verfahrens liegt darin, dass bei allen Prüfungen die Belastung so weit schrittweise erhöht wird bis Funktionsstörungen auftreten. Dabei können zusätzliche Stressfaktoren eingebracht werden, wie beispielsweise eine Schwankung der Versorgungsspannung für die Prüflinge. Bei dem Auftreten eines Ausfalls wird der Testablauf abgebrochen und eine Fehleranalyse durchgeführt. Nach der Integration einer geeigneten Gegenmaßnahme wird der Prüfablauf mit verbesserten Prüflingen wiederholt [14]. Dieses Vorgehen wird im idealen Fall solange angewendet, bis ein Ausfall erst bei Belastungsparametern außerhalb jeglicher Spezifikationsgrenzen eintritt. Abschließend werden die Belastungsparameter für den fertigungsbegleitenden HASS-Test festgelegt, mit dem Ziel mögliche Fertigungsmängel zu erkennen, aber gleichzeitig den späteren Einsatz des Produktes nicht beeinträchtigen. Die Anwendung der HALT/HASS-Verfahren findet in immer mehr Industriezweigen, wie zum Beispiel in der Automobilbranche oder in dem Telekommunikationsbereich, Einzug.

Eine weitere Notwendigkeit zeigte sich für eine Weiterentwicklung von bestehenden Prüfanlagen und Prüfverfahren, wie es am Beispiel für die Bestimmung der mechanischen Scherkräfte verdeutlicht werden konnte. Die zunehmende Miniaturisierung der Anschlussstrukturen in der Aufbau- und Verbindungstechnik wirkt sich auf die Ausbildung der Lotstellen aus, wobei hinsichtlich der Prüftechnik die sogenannten nanoskalierten Alterungsmechanismen von besonderem Interesse waren [84]. Die immer kleineren Strukturen resultierten in höheren Anforderungen an die Anlagentechnik und den Anwender. Sowohl der Einfluss des Bedieners als auch auftretende Produktionsfehler, wie beispielsweise verdrehte oder in z-Richtung verkippte Bauelemente, erschwerten zuverlässige Aussagen über die Abscherkraft. Eine wesentliche Verbesserung ergab sich

diesbezüglich durch die Integration eines Kamerasystems, das einerseits eine Verdrehung des Prüfobjekts erfasste und den Prüftisch entsprechend in der x-y-Ebene korrigierte. Andererseits wurde mit der hochauflösenden Kamera die tatsächliche z-Höhe des abzuscherenden Bauelements ermittelt und der Schermeisel exakt ausgerichtet. Somit konnte ein wesentlicher Beitrag für die Ermittlung von Kraftmessungen im Rahmen von Zuverlässigkeitsuntersuchungen geleistet werden, insbesondere für hochminiaturisierte Lotverbindungen, die zukünftig bei der Nano-AVT in zunehmendem Maße auftreten werden [105].

2.3 Trends bei der Nacharbeit von elektronischen Baugruppen

Die Nacharbeit von elektronischen Bauelementen ist ein ebenso ungeliebter wie notwendiger Aspekt bei der Herstellung von elektronischen Baugruppen. Trotz aller Maßnahmen zu Steigerung der Prozesssicherheit, verbleiben am Ende der Fertigungskette Lötstellen, die den Anforderungen, wie unter anderem in der Richtlinie IPC-A-610 definiert, nicht genügen [44]. Der Reparaturprozess, der im Allgemeinen in einem Austausch eines als defekt identifizierten Bauelements besteht, erfordert die Bereitstellung eines geeigneten Nacharbeitssystems und einen erheblichen Zeitaufwand, so dass dabei die entstehenden Kosten den Wert der auszutauschenden Komponente weit übersteigen können. Dennoch kann mit einer erfolgreichen Nacharbeit die gesamte Baugruppe wieder der Wertschöpfungskette zugeführt werden, mit dem Resultat, dass eine Nachproduktion entfallen kann. Die Kosten hierfür können bei komplexen Produkten, wie beispielsweise Steuergeräte für Anwendungen in Automobilen, durchaus ein Mehrfaches einer Reparatur betragen [38].

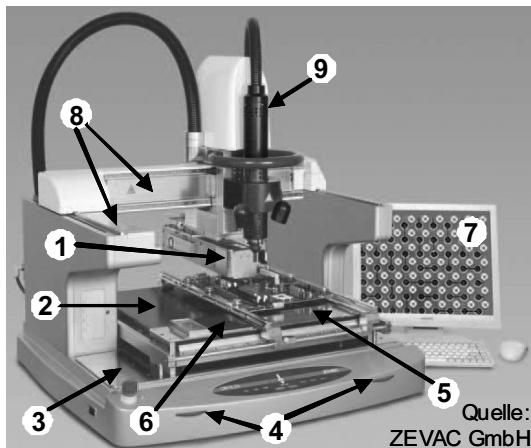
Die technologische Zielsetzung eines jeden Nacharbeitsprozesses besteht nun darin, den Austausch so durchzuführen, dass eine solche Baugruppe denselben Qualitätskriterien entspricht wie ein „fehlerfrei“ produziertes Produkt. Aufgrund verschiedenster Entwicklungen steigen die Anforderungen an die Nacharbeitssysteme und erfordern Systemverbesserungen und die Integration neuer Funktionalitäten. Dies wird im Nachfolgenden anhand von ausgewählten Beispielen verdeutlicht, die zurzeit die Anbieter von Nacharbeitssystemen in der aktuellen Gerätegeneration verwirklichen.

Systemausstattung eines hochautomatisierten Nacharbeitssystems

Die Anforderungen an den Reparaturprozess für miniaturisierte Bauelemente oder komplexe Bauteilgeometrien mit sehr geringen Anschlussrastern können mit manuell geführten Werkzeugen nicht mehr erfüllt werden. Dies gilt insbesondere für die Einhaltung der Reproduzierbarkeit. Weiterhin müssen auch alle Eingriffe in eine Baugruppe dokumentiert werden können, vor allem die Parameter des einwirkenden Temperaturprofils. Die Auswirkungen auf die zugehörige Systemtechnik können anhand eines technisch aktuellen Produkts verdeutlicht werden (Bild 5). Das Ziel aller Automatisierungsmaßnahmen war es, den Einfluss des Bedieners auf das Prozessergebnis weitgehend zu eliminieren und somit mögliche Fehlerquellen zu minimieren. Für den hier nicht explizit erwähnten Auslötprozess gilt prinzipiell dasselbe wie für den Einlötprozess.

Das hochgenaue Platzieren einer neuen Komponente stellt dann eine große Herausforderung dar, wenn das Bauelement extrem klein ist (Zweipoler der Größe 0201 und 01005), das Rastermaß bei freiliegenden Kontakten gering ist ($\leq 500 \mu\text{m}$) oder verdeckte Anschlussstrukturen besitzt (z. B. BGA). Mit Hilfe einer Spiegeloptik kann der Bediener die Leiterplatte exakt zu dem Bauteil ausrichten. Ein komplexes Visionsystem ermöglicht es, sowohl extrem kleine Komponenten als auch großflächige BGAs bis zu 75 mm Kantenlänge ohne Systemumbauten und Einbußen in der Bildqualität zu verarbeiten. Die vollmotorisierte Steuerung des Kamerasystems, die über die Bediensoftware erfolgt, eliminiert die Notwendigkeit jeglicher manueller Berührung.

Integriertes Nacharbeitssystem



Systemkomponenten

- 1 - MFOV (multiple field of view) Vision System
- 2 - 4-Zonen Unterheizung (max. 6.000 W)
- 3 - Grundplatte mit integrierter Kraftmessung
- 4 - X/Y - Feineinstellung
- 5 - Aufnahmeplatz für Bauelemente
- 6 - Ablage für Waffle Trays
- 7 - Systemsteuerung über Bediensoftware
- 8 - Linearantriebe für X/Y - Positionierung
- 9 - Heizkopf Oberheizung (max. 2.000 W)

Bild 5: Systemaufbau eines halbautomatischen Selektivlötgerätes für die Nacharbeit und Prototypenaufbau (Onyx 29, Fa. ZEVAC) [77]

Eine Besonderheit bei dem gezeigten System war die Integration eines Kraftmesssystems, das alle Bewegungen vom Lötkopf auf die Leiterplatte und Bauelementaufnahme mit einem geschlossenen Regelkreis überwacht. Diese Erweiterung trägt wesentlich zu reproduzierbaren Abläufen bei.

Eine weitere Entwicklung in der Baugruppenfertigung besteht darin, dass die Schaltungsträger sowohl großflächiger werden als auch immer mehr Lagen aufweisen, die die Masse der Baugruppen signifikant erhöhen. Dieser Umstand und die Umstellung auf bleifreie Prozesse erforderten deutlich höhere Heizleistungen. Dies gilt insbesondere für die Unterheizung, mit der eine vollflächige Vorwärmung des gesamten Schaltungsträgers erfolgt. Das dargestellte System erlaubt hierfür eine Heizleistung von maximal 6.000 W. Weiterhin wurde eine gleichmäßige Wärmeabstrahlung dadurch realisiert, dass die Heizwendel optimiert angeordnet wurde, und somit die Baugruppe homogen aufgeheizt werden konnte. Diese Maßnahmen trugen zur Steigerung des Qualitätsniveaus in der Nacharbeit bei. [49]

Hybridheizkopf in Nacharbeitswerkzeugen

Die am Markt verfügbaren Nacharbeitssysteme lassen sich unter anderem in zwei prinzipielle Kategorien einteilen. Diese sind auf der einen Seite die Heißgassysteme, die mittels Luft oder Stickstoff die Wärme übertragen und auf der anderen Seite die Anla-

gen, die Infrarotstrahlung erzeugen. Letztere Systeme zeichnen sich durch eine gleichmäßigere Wärmeeinbringung aus, bei der der Aufheizgradient bei circa 2 K/s begrenzt ist. Mit Hilfe eines Konvektionssystems kann ein Wert von bis zu 10 K/s erreicht werden, der weit über der IPC Empfehlung von 4 K/s liegt. Eine Neuentwicklung der Fa. Ersä verbindet die Vorteile beider Technologien mit der Realisierung einer Hybridoberheizung (Bild 6) [93].

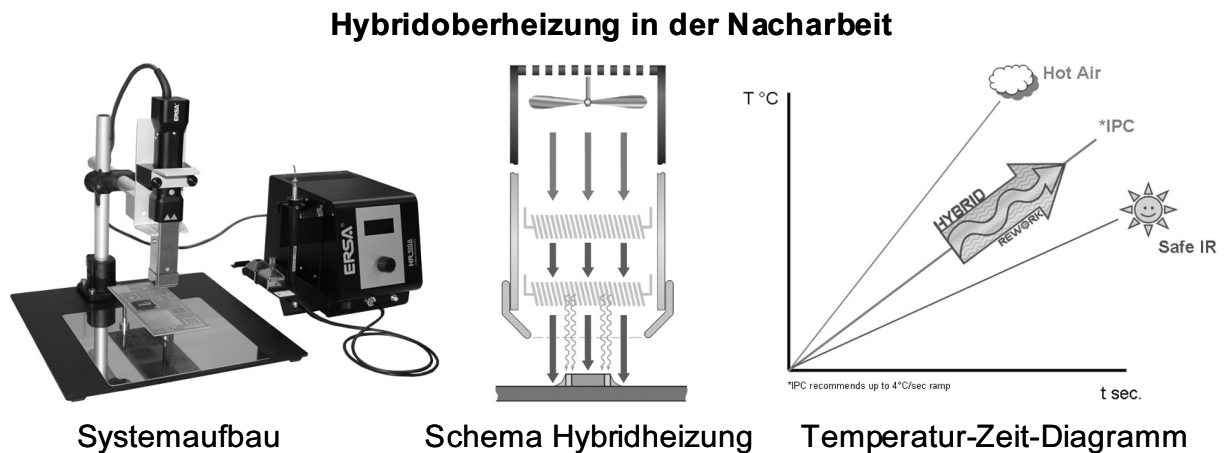


Bild 6: Kombination von Heißluft und Infrarot für die Wärmeübertragung in der Nacharbeit (Bildquellen: Fa. Ersä)

Der Aufbau des Heizkopfs ist in Bild 6 Mitte dargestellt. Über einen Heizwendel wird ein definierter Luftstrom gezielt erwärmt und durch eine nachfolgende Infrarotquelle auf das Bauelement gelenkt. Mit der Steuerung des Volumens des Heizluftstroms steht ein großer Bereich für den resultierenden Aufheizgradienten zur Verfügung. Ein Auslötprozess kann somit zeitoptimiert erfolgen und der anschließende Einlötprozess hinsichtlich der thermischen Belastung optimiert werden. Der aktuelle Systemaufbau kann mit einer Infrarotunterheizung kombiniert werden, mit dem Ergebnis, dass ein kompaktes, aber höchst effizientes System zur Verfügung steht. Eine zukünftige Integration in ein High-End-Rework System ist prinzipiell möglich, hängt aber von der Akzeptanz der zukünftigen Anwender der aktuellen Lösung ab.

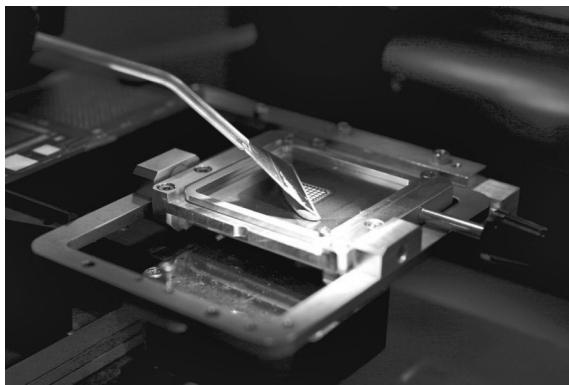
Strategien für die Nacharbeit von QFN-Bauelementen

Die Einführung der Bauelementform QFN (Quad Flat No-lead) stellte eine ganz neue Herausforderung für die Herstellung und die Reparatur dar. Dieser kompakte Gehäusotyp zeichnet sich durch sehr gute thermische, induktive und kapazitive Eigenschaften aus, bei gleichzeitig sehr geringem Platzbedarf [87]. Im Gegensatz zu QFP (Quad Flat Pack) Bauelementen besitzen sie keine Anschlussbeinchen, sondern weisen Kontaktierungsflächen auf der Unterseite entlang der Kanten auf. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, manuell mit einem LötKolben zu arbeiten. Der wesentliche Unterschied zu BGA (Ball Grid Array) Komponenten bezüglich der Nacharbeit besteht darin, dass ein BGA mit seinen Anschlussballs Lotdepots zur Verfügung stellt. Für einen QFN muss daher vor dem eigentlichen Einlötprozess neues Lot eingebracht werden. Hierfür wurden zwei

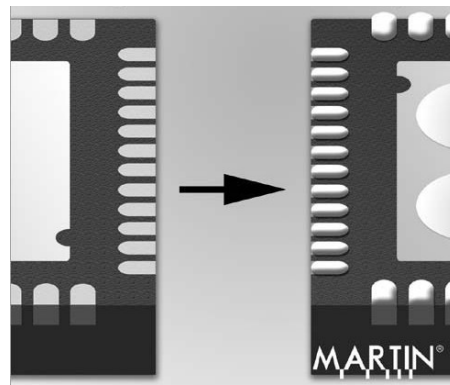
innovative Verfahren entwickelt, die grundsätzlich verschiedene Ansätze verfolgen. Bei den Alternativen ist gemeinsam, dass das Lot über dem QFN eingebracht wird.

Das erste Verfahren „Direct Component Printing“ der Fa. Finetech zeichnet sich dadurch aus, dass der QFN über eine Druckschablone, die Bestandteil eines Ergänzungsmoduls des Nacharbeitssystems ist, mit einem Minirakel unmittelbar vor dem Einlöten belotet wird (Bild 7 links) [76]. Die Ausrichtung des QFN gegenüber der Druckschablone und anschließend gegen die Baugruppe erfolgt mit demselben Kamerasystem. Ein entscheidender Vorteil ist dabei, dass zwischen den Arbeitsschritten Beloten und Einlöten kein manueller Eingriff des Bedieners erforderlich ist.

Verfahren zur Neuloteinbringung für QFN-Bauelemente



**Direct Component Printing
(Fa. Finetech)**



**QFN-Prebumping
(Fa. Martin)**

Bild 7: Alternative Strategien für die Loteinbringung bei QFN (Quad Flat No-lead) Bauelementen in der Nacharbeit

Einen ganz anderen Weg beschreibt das Verfahren „Prebumping“ der Fa. Martin. Dabei werden Lotdepots entsprechend der Anschlussflächen auf eine Keramikplatte dispensiert, der QFN darauf platziert und anschließend umgeschmolzen. Auf diese Weise erhält der QFN ähnlich wie ein BGA ein eigenes Lotdepot (Bild 7 rechts) [7]. Abschließend kann der QFN ähnlich wie ein BGA eingelötet werden. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass das eigentliche Nacharbeitssystem nicht spezifisch erweitert werden muss. Auf der anderen Seite wird der QFN insgesamt zweimal thermisch extrem belastet.

3 Gestaltung, Durchführung und Auswertung von Untersuchungen mit beschleunigten Prüfverfahren

Im Rahmen von Qualifizierungsprozessen in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) werden häufig Prüfverfahren eingesetzt, die das Ziel haben, Prüflinge beschleunigt zu altern. Eine Beschleunigung wird dadurch erreicht, dass die Belastungen, die auf die Prüflinge einwirken, im Vergleich zu den real einwirkenden Umweltbedingungen stark erhöht werden. Im Gegensatz zu Untersuchungen mit Belastungsprofilen, wie sie beim praktischen Einsatz auftreten, können erheblich kürzere Prüfzeiträume verwirklicht werden. Damit ergibt sich beispielsweise bereits in einer Entwicklungsphase einer Baugruppe die Möglichkeit, auf die Ergebnisse von Prüfungen zurückzugreifen und somit Maßnahmen für die Erhöhung der Zuverlässigkeit zu realisieren. Dabei ist zu beachten, dass die Prüfparameter für die Beschleunigung so gewählt werden, dass sich der Fehlermechanismus nicht ändert [131]. Für die Ermittlung von Beschleunigungsfaktoren existieren mathematische Modelle, die eine theoretische Bestimmung derselben ermöglichen. Bei Temperaturtests werden häufig die Beziehungen nach Arrhenius oder Coffin-Manson verwendet [142]. Dabei wird die Anzahl der Temperaturzyklen bis zum Ausfall des Prüflings in Abhängigkeit des Temperaturhubs bestimmt. Somit soll von den Ergebnissen einer beschleunigten Prüfung auf die reale Lebensdauer zurückgeschlossen werden. Problematisch ist dabei, dass diese Beziehungen einen empirischen Faktor enthalten, der sich erheblich auf das Ergebnis auswirkt. Dies gilt in der Regel auch für weitere Modelle anderer Belastungsarten.

Es ist leicht ersichtlich, dass die Vorhersage von Lebensdauern mit beschleunigten Alterungsverfahren mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Für den in der Praxis häufig verwendeten Temperaturschocktest ist die Übertragung von einer bestimmten Zyklenzahl auf eine Lebensdauer in Jahren äußerst schwierig. Somit verbleiben für solche Zuverlässigkeitsuntersuchungen zwei Zielstellungen. Einerseits kann mit dem Durchlauf eines Qualifizierungsprogramms eine Produktfreigabe erfolgen, beziehungsweise können durch die Analyse von entdeckten Fehlern Schwachstellen identifiziert werden. Bei der Festlegung der Anforderungen und der Auswahl der Einzelprüfungen sind geltende Richtlinien und Erfahrungswerte zu nutzen (Bild 8 links). Ein ausführliches Beispiel für ein bedarfsgerechtes Prüfprogramm folgt im Abschnitt 4.1. Andererseits können mit Zuverlässigkeitsuntersuchungen alternativ aufgebaute Prüflinge vergleichend bewertet werden. Hierfür werden mindestens zwei Varianten von Testobjekten bereitgestellt und qualifiziert, die sich hinsichtlich von Einzelaspekten unterscheiden. Dies kann sowohl Materialien als auch Prozesse betreffen (Bild 8 rechts). Beispielsweise kann so der Einfluss für das Auftreten des Lötfehlers Tombstone bei dem Einsatz von Reflowlötanlagen mit unterschiedlichen Wirkprinzipien (Konvektions- bzw. Kondensationslöten) und verschiedenen Lötprofilen (Sattel- bzw. Rampenprofil) untersucht werden [21].

Der Schwerpunkt in diesem Kapitel liegt in dem zielgerichteten Vorgehen bei der Gestaltung, der Durchführung und der Auswertung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen für die Bewertung von Alternativen in der Aufbau- und Verbindungstechnik von elektronischen Baugruppen. In jeder dieser drei Phasen gilt es spezifische Besonderheiten zu

berücksichtigen. Im ersten Abschnitt soll am Beispiel von geometrischen Varianten der Schablonendurchbruchgeometrie und der Anschlussflächen auf der Leiterplatte die günstigste Variante ermittelt werden. Dabei stehen die Analyse des Layouts eines Testschaltungsträgers, der Aufbau mit den Bauelementen und die anschließende Temperaturschockprüfung im Vordergrund.

Anwendungsfelder für beschleunigte Alterungsverfahren

Einsatzqualifizierung

- ☐ Festlegung der Anforderungen an die Baugruppe
- ☐ Auswahl der Einzelprüfungen
- ☐ Spezifizierung der Belastungsparameter und Prüfzeit
- ☐ Funktionsprüfungen vor, während und nach den Einzelprüfungen



Temperaturschockschrank (Fa. Weiss)

Vergleich von Varianten (AVT)

- ☐ Verwendung verschiedener Materialien (z. B. Lote)
- ☐ Alternative Prozessparameter (z. B. Lötprofile)
- ☐ Geometrische Varianten (z. B. Pad- oder Schablonenlayout)

Alternativ: Variation von Prüfparametern mit identischen Prüflingen

Bild 8: Hauptanwendungsfelder für beschleunigte Alterungsverfahren im Rahmen von qualifizierenden Untersuchungen

Anschließend wird der Einsatz von elektrischen Messmitteln zu permanenten Überwachung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, den sogenannten Online-Messungen, dargestellt. Dies erfolgt mit dem Ziel, zusätzliche Aussagen über den Prüfverlauf zu erhalten. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Aspekten der Erhöhung der Prüflingsanzahl, der Analyse des elektrischen Verhaltens unmittelbar vor und nach einem erstmaligen Ausfall und den Auswirkungen von Messaufbauten auf die Aussagekraft einer Untersuchung. Abschließend werden softwarebasierte Verfahren präsentiert, die die für die Auswertung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen angewendete Weibull-Analyse ergänzen. Damit konnten sowohl der Einfluss des Stichprobenumfangs bestimmt, als auch die Weibull-Parameter fortlaufend prognostiziert werden.

3.1 Einfluss von Schablonen- und Padvarianten auf den Herstellungsprozess und die Zuverlässigkeit von BGA-Bauelementen

Ein Anwendungsfeld für beschleunigte Prüfungen liegt in der vergleichenden Bewertung von Varianten in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Allerdings ist dabei zu beachten, dass nicht nur der Belastungstest selbst für eine abschließende Aussage über die Zuverlässigkeit herangezogen werden kann, sondern auch schon der Herstellungsprozess Einfluss auf die spätere Lebensdauer besitzt. In diesem Abschnitt wird am Beispiel einer Einsatzqualifizierung von Ball-Grid-Array (BGA) Bauelementen mit einem Rastermaß von 500 µm der Einfluss von Varianten der Druckschablonengeometrie und des Layouts der Anschlussflächen auf der Leiterplatte untersucht. Das vorrangige Ziel dieser Untersuchung ist es, die beste Variante hinsichtlich des Herstellungsprozesses und der Langzeitzuverlässigkeit zu ermitteln. Hierfür wurde im ersten Schritt ein geeigneter

Testschaltungsträger konzipiert, der alle zu untersuchenden Alternativen umfasste. Anschließend wurde der Lotpastendruck hinsichtlich des Transfers des Verbindungsmediums auf die Leiterplatte analysiert. Weiterhin wurde die Ausbildung der Kontaktstellen unter den BGAs begutachtet, die von der Lotmenge und der Gestaltung der Anschlussflächen abhing.

Bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit wurde eine Temperaturschockprüfung mit den Dummybauelementen durchgeführt, die in der industriellen Praxis für den Nachweis der Zuverlässigkeit angewendet wird [134]. Diese Bauelemente ermöglichen eine elektrische Messung des Durchgangswiderstands durch alle Kontaktstellen, den bei BGAs sogenannten Anschlussballs beziehungsweise Lotballs. Als Grenztemperaturen wurden $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die beiden Kammern festgelegt. Die Auswertung erfolgte nach einer definierten Zyklenzahl, bei der der elektrische Durchgangswiderstand für jeden Prüfling als Kriterium herangezogen wurde. Abschließend wurden alle gewonnenen Erkenntnisse in einer Bewertungsmatrix verdichtet.

3.1.1 Testvarianten und -layout

Für die Untersuchungen wurde ein BGA mit insgesamt 356 Anschlüssen verwendet. Das Rastermaß betrug $500\text{ }\mu\text{m}$, so dass bei der Verarbeitung dieser Bauelemente die Schablonengeometrie und die Gestaltung der Anschlussflächen (Pads) von wesentlicher Bedeutung waren. Insgesamt wurden drei Parameter mit jeweils zwei oder drei Einstellungen ausgewählt. Für die Schablonendurchbruchgeometrie wurden die Schablonendicke und der Durchmesser der Öffnung für die einzelnen Anschlusspads variiert.

Bei der Schablonendicke wurde zunächst von der nominellen Stärke von $120\text{ }\mu\text{m}$ ausgegangen. Dieser Wert rührte daher, dass alle Bauelemente auf dem späteren Produkt damit in der Regel ohne Probleme verarbeitet werden können. Dies trifft beispielsweise auf große Zweipoler und Kondensatoren zu, die eine verhältnismäßig hohe Lotmenge benötigen. Andererseits kann bei kleinen Anschlussstrukturen, wie für den hier zu untersuchenden BGA, eine Schablonenstärke von $120\text{ }\mu\text{m}$ zu einem ungenügenden Schablonenauslöseverhalten führen. Damit würde signifikant weniger oder ungleichmäßig Lotpaste durch die Schablone auf die Leiterplatte übertragen werden. Die Verhältnisse werden günstiger, wenn die Schablone dünner ist oder der Schablonendurchbruch vergrößert wird. Die Kennzahlen und Empfehlungen hierfür sind in der IPC Richtlinie 7525A zu finden [41]. Aus diesem Grund wurden neben der nominellen Stärke von $120\text{ }\mu\text{m}$ noch die beiden Dicken von $80\text{ }\mu\text{m}$ und $100\text{ }\mu\text{m}$ untersucht. Die Schablone für die Leiterplatte wurde als Stufenschablone realisiert. Hierfür wurden an den benötigten Stellen die Schablonen ausgeschnitten und durch sogenannte Patches mit den verringerten Dicken ersetzt. Die prozesssichere Verwendung solcher Schablonen wurde bereits eingehend untersucht und ist bei Einhaltung von Mindestabständen zu benachbarten Strukturen unbedenklich [38].

Eine weitere Variation der Lotpastenmenge erfolgte mit der Untersuchung von zwei unterschiedlichen Größen der Schablonendurchbrüche. Neben einem 1:1-Durchbruch, der dieselben geometrischen Abmessungen wie die zugehörigen Anschlussflächen auf der

Leiterplatte aufwies, wurden um $30\text{ }\mu\text{m}$ vergrößerte Öffnungen qualifiziert. Somit sollte ein erhöhtes Lotvolumen für die Ausbildung der Kontaktstellen zur Verfügung gestellt werden. Abschließend wurden drei geometrische Varianten der Pads auf der Leiterplatte in das Untersuchungsprogramm einbezogen. Die Ausgangsvariante waren kreisrunde Pads mit einem Durchmesser von $250\text{ }\mu\text{m}$, die um ca. 20 % gegenüber den Anschlussballs der BGAs reduziert waren, entsprechend der Empfehlung der IPC Richtlinie 7351 [40]. Die Durchkontaktierungen auf der Leiterplatte (Mikrovias) wurden dabei zwischen den Pads realisiert. Eine erste Alternative bestand in der Verlagerung der Mikrovias in die Pads hinein (Bild 9), die offen belassen wurden. Als Ausgleich für die Öffnung im Pad wurde der Durchmesser um $30\text{ }\mu\text{m}$ vergrößert. Eine weitere Variante war die Ausführung der Pads und der zugehörigen Schablonenöffnungen als Achtecke (Bild 9) mit einer Breite von $280\text{ }\mu\text{m}$. Der Vorteil dieser Ausführungsform besteht darin, dass zwischen den Pads mehr Platz für Leiterbahnen zur Verfügung steht und somit der Entflechtungsprozess für ein späteres Produkt vereinfacht wird.

Alternative Geometrien

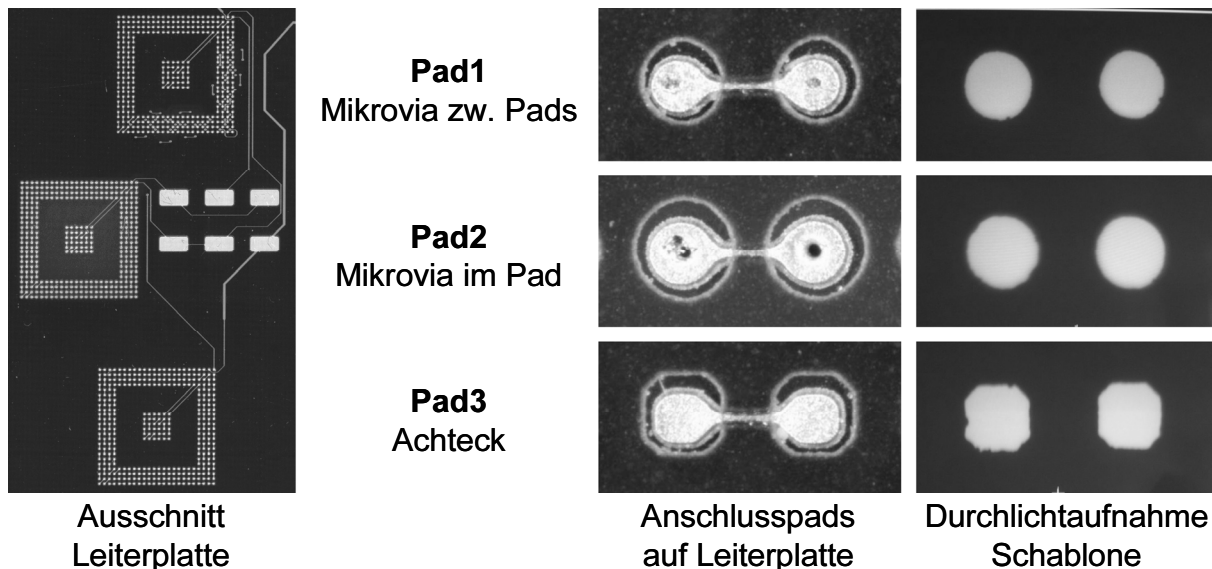


Bild 9: Varianten der Anschlussflächen auf dem Testschaltungsträger und der zugehörigen Schablonendurchbrüche für das BGA-Bauelement (Rastermaß $500\text{ }\mu\text{m}$)

Aus den beschriebenen Alternativen für die drei Parameter ergaben sich insgesamt 18 Aufbauvarianten, die vergleichend bewertet wurden (Tabelle 4). Die dabei eingeführte Nomenklatur erleichterte im weiteren Verlauf die Auswertungen.

Parameter	Varianten	Nomenklatur
Schablonendicke	120 µm 100 µm 80 µm	S120 S100 S080
Durchmesser des Schablonendurchbruchs	1:1 zum Pad +30 µm zum Pad	D1 D2
Pad-Layout	Kreis 250 µm Kreis mit Mikrovia 280 µm Achteck 280 µm	Pad1 Pad2 Pad3

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Parameter mit den verwendeten Einstellungen und Benennung der einzelnen Varianten

3.1.2 Analyse des Herstellungsprozesses

Der für die Untersuchung zugehörige Testschaltungsträger beinhaltete alle 18 Varianten. Die Bewertung des Herstellungsprozesses erfolgte anhand des transferierten Lotpastenvolumens und der Anzahl der erfolgreich kontaktierten BGAs nach dem Reflow-lötprozess [52]. Insgesamt wurden vier Einzelkriterien für eine quantifizierte Bewertung herangezogen und mit jeweils maximal zwei Punkten bewertet:

- Theoretische Kennzahl für das Auslöseverhalten,
- Druckbildanalyse,
- Schablonenanalyse,
- elektrische Kontaktierung.

Im Nachfolgenden werden die vier Kriterien erläutert und anhand von signifikanten Beispielen exemplarisch veranschaulicht.

Theoretische Kennzahl für das Auslöseverhalten der Lotpaste

Eine theoretische Betrachtung für den Schablonendruck erfolgte anhand der IPC Richtlinie 7525A [41]. Darin werden die beiden Eigenschaften Druckbarkeit (Aspect Ratio) und Auslöseverhalten (Area Ratio) quantifiziert, die sich aus den geometrischen Daten der Schablonenöffnung ergeben. Die jeweiligen Kennzahlen hierfür (Druckbarkeit (KD) und Auslöseverhalten (KA)) sind gemäß (Gl. 1) und (Gl. 2) definiert und mit den empfohlenen Mindestwerten ergänzt.

$$KD = \frac{\text{Breite / Durchmesser Schablonenöffnung}}{\text{Schablonendicke}} \stackrel{!}{\geq} 1,5 \quad (\text{Gl. 1})$$

$$KA = \frac{\text{Fläche der Schablonenöffnung}}{\text{Mantelfläche des Schablonendurchbruchs}} \stackrel{!}{\geq} 0,66 \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Werte für die Kennzahlen KD der Druckbarkeit nach (Gl. 1) lagen für alle 18 Varianten zwischen 2,08 und 3,88. Dieses Kriterium war somit stets erfüllt und floss nicht in

die weitere Auswertung ein. Ein ganz anderes Bild ergab sich für das Auslöseverhalten nach (Gl. 2). Für einen kreisförmigen Durchbruch mit einem Durchmesser d und einer Schablonendicke D gilt allgemein (Gl. 3):

$$KA(d,D) = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d^2}{d \cdot \pi \cdot D} = \frac{1}{4} \cdot \frac{d}{D} \quad (\text{Gl. 3})$$

Damit konnten die grundsätzlichen Einflüsse der drei Variationsparameter aus Tabelle 4 betrachtet werden. Die Schablonendicke D geht in Mantelfläche des Schablonendurchbruchs ein, mit dem Effekt, dass geringere Dicken zu einem besseren Kennwert führen. Für den zweiten Parameter Durchmesser des Schablonendurchbruchs führte die Einstellung +30 μm zu besseren Kennwerten. Bei dem dritten Parameter Pad-Layout bzw. Form des Schablonendurchbruchs unterschieden sich die Einstellung 1 und 2 im Durchmesser. Somit gilt dieselbe Aussage wie für den zweiten Parameter. Bei den Einstellungen 2 (kreisförmiger Durchbruch) und 3 (achteckiger Durchbruch) ergaben sich jeweils für die Variante Achteck geringfügig bessere Kennwerte. Die Extremwerte bei den 18 Varianten traten bei den folgenden Einstellungen auf:

- $KA_{S080D2Pad3} = 1,01$ (Schablonendicke 80 μm , Überdruckung 30 μm , Pad: Achteck),
- $KA_{S120D1Pad1} = 0,52$ (Schablonendicke 120 μm , keine Überdruckung, Pad: Kreis).

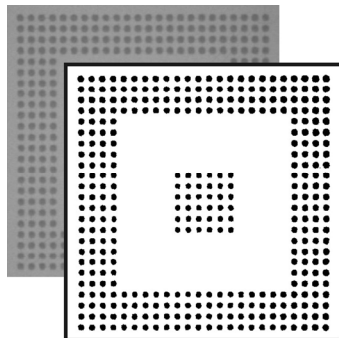
Bei insgesamt neun Varianten wurde der Mindestwert von 0,66 deutlich überboten (2 Pkt.), bei drei Varianten knapp überschritten (1 Pkt.) und für sechs Varianten unterschritten (0 Pkt.).

Druckbildanalyse

Nachdem für alle 18 Varianten die theoretischen Kennzahlen berechnet wurden, erfolgte in einem zweiten Schritt eine praktische Untersuchung des transferierten Lotpastenvolumens. Anhand eines ausgewählten Drucks wurde zunächst das Druckbild auf der Leiterplatte mit Hilfe von Röntgenaufnahmen analysiert. Für jede Aufbaualternative entstand eine Aufnahme, die anschließend erheblich kontrastverstärkt wurde, mit dem Ziel eine vergleichende Betrachtung zu vereinfachen. In Bild 10 sind exemplarisch die beiden Varianten mit der höchsten und der niedrigsten Kennzahl für das Auslöseverhalten dargestellt. Im günstigeren Fall (S080D2Pad3) waren alle 356 Anschlussstellen deutlich und relativ gleichmäßig zu erkennen (Bild 10 links). Ein gegensätzliches Bild zeigte sich dagegen bei der Variante S120D1Pad1. Auf der bearbeiteten Aufnahme erschienen die gedruckten Lotdepots in stark unterschiedlicher Ausprägung, in einzelnen Fällen blieben die entsprechenden Stellen ganz frei (Bild 10 rechts). Mit einem Vergleich mit den Originalaufnahmen konnte sichergestellt werden, dass die inhaltsreduzierten Bilder ausreichend aussagekräftig hinsichtlich einer Bewertung des Druckbildes waren. Gleichzeitig wurde die Korrelation zwischen den theoretisch ermittelten Kennzahlen für das Auslöseverhalten und den Druckbildern bestätigt. Die Aussagekraft des Grenzwertes von 0,66 (Gl. 2) war für die vorliegende Untersuchung hoch. Alle Aufnahmen wurden in drei Klassen für die spätere Gesamtbewertung eingeteilt: gleichmäßige Abbildung aller 356

Anschlussstellen (2 Pkt.), einzelne akzeptable Ungleichmäßigkeiten (1 Pkt.) oder starke Schwankungen der Lotdepots (0 Pkt.).

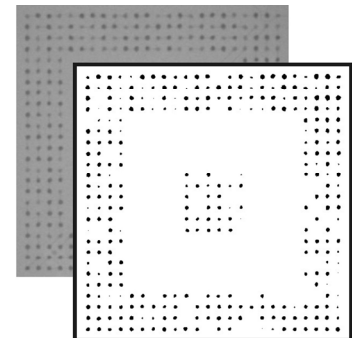
Röntgenanalyse



S080D2Pad3
(80 μm /+30 μm /Pad3)
 $KA_{S080D2Pad3} = 1,01$



Röntgenzelle
(Fa. Macrotron)



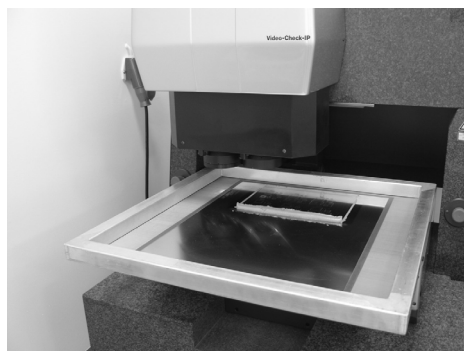
S120D1Pad1
(120 μm /1:1/Pad1)
 $KA_{S120D1Pad1} = 0,52$

Bild 10: Druckbildanalyse anhand von Röntgenaufnahmen ohne und mit Kontrastverstärkung für die günstige und ungünstige Variante bezüglich des Auslöseverhaltens

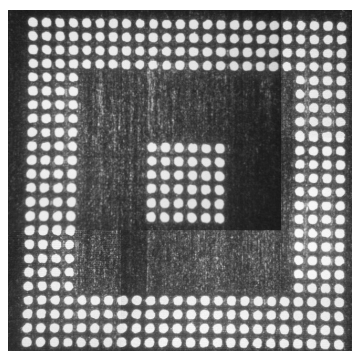
Schablonenanalyse

Anschließend erfolgte eine weitere Auswertung hinsichtlich der transferierten Lotpaste. Hierfür wurde für den schon zuvor untersuchten Druck die in der Schablone verbliebene Paste begutachtet. Anhand von Durchlichtaufnahmen, für die die Optik einer Koordinatenmessanlage verwendet wurde, konnten verbleibende Lotpastenreste in den Schablonendurchbrüchen identifiziert werden. Im Bild 11 wurden der Aufbau und die Aufnahmen der beiden Varianten mit den günstigsten und ungünstigsten Kennzahlen für das Auslöseverhalten nach der IPC Richtlinie 7525A dargestellt.

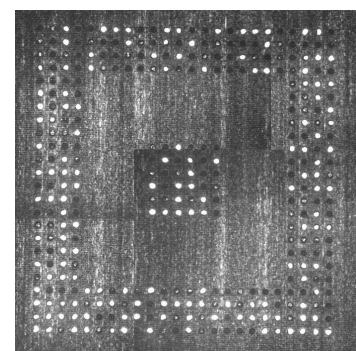
Druckbildanalyse



Aufbau für Durchlicht-
aufnahme der gedruckten
Schablone



S080D2Pad3
(80 μm /+30 μm /Pad3)
 $KA_{S080D2Pad3} = 1,01$

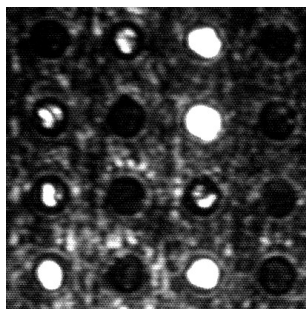


S120D1Pad1
(120 μm /1:1/Pad1)
 $KA_{S120D1Pad1} = 0,52$

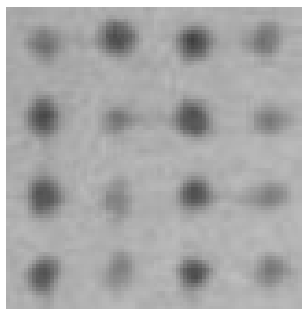
Bild 11: Durchlichtaufnahmen der Druckschablone unmittelbar nach dem Druckprozess

Anhand der Aufnahmen konnte eine Korrelation zwischen den theoretischen Kennwerten und den praktischen Ergebnissen ebenfalls verifiziert werden. Für die Bewertung wurden drei Abstufungen vorgenommen: alle Durchbrüche waren in der Aufnahme klar als helle Punkte zu erkennen (2 Pkt.), einzelne Durchbrüche verblieben dunkel (1 Pkt.) oder eine erhebliche Anzahl dunkler Punkte waren zu erkennen (0 Pkt.). Allerdings zeigten weitere Analysen, dass dunkle Schablonendurchbrüche auf diesen Aufnahmen nicht zwangsläufig auf ein deutlich verringertes, transferiertes Lotpastenvolumen schließen ließen (Bild 12). Bereits einzelne verbleibende Lotkugeln können zu dunklen Bereichen in den Aufnahmen führen. Im Bild 12 sind die Aufnahmen der Schablonen mit denen des Druckbildes (Röntgenaufnahme und Mikroskopaufnahme) für einen identischen Bereich der ungünstigsten Variante dargestellt. Die Durchlichtaufnahmen der Schablone lieferten eine rein qualitative Information im Gegensatz zu den Röntgenaufnahmen. Allerdings ist zu beachten, dass aus den letztgenannten Aufnahmen nicht exakt auf ein transferiertes Lotpastenvolumen geschlossen werden konnte. Hierfür wäre der Einsatz eines spezifischen Lotpasteninspektionssystems notwendig [92].

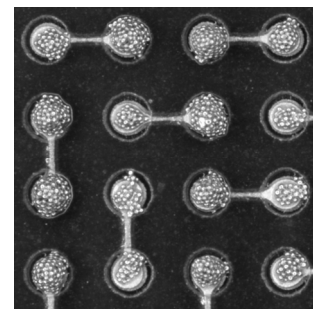
Vergleich unterschiedlicher Analysearten



Durchlichtaufnahme
gedruckte Schablone



Röntgenaufnahme
gedruckte Leiterplatte



Mikroskopaufnahme
gedruckte Leiterplatte

Bild 12: Vergleich unterschiedlicher Analysearten für den Lotpastentransfer am Beispiel der Variante S120D1Pad1 ($KA_{S120D1Pad1} = 0,52$)

Elektrische Kontaktierung

Für die später folgenden Zuverlässigkeitsuntersuchungen wurden 39 Leiterplatten aufgebaut, so dass insgesamt 702 BGA-Bauelemente hinsichtlich der elektrischen Kontaktierung ausgewertet werden konnten. Nach der Herstellung der Testbaugruppen wurde der elektrische Durchgangswiderstand der Daisy-Chain Bauelemente gemessen. Lagen die Messwerte signifikant außerhalb eines relativen Wertes von 25 % um den Mittelwert, bezogen auf die Pad-Layout Variante, wurde der Baustein als nicht sicher kontaktiert klassifiziert. Bei der Bewertung der einzelnen Varianten wurden wiederum drei Abstufungen vorgenommen: maximal ein BGA mit abweichenden Widerstandswert (2 Pkt.), zwei oder drei Abweichungen (1 Pkt.) oder mehr als vier auffällige BGAs (0 Pkt.). Bei insgesamt drei der 18 Aufbauvarianten erfolgte eine Einteilung in die zuletzt genannte Klasse.

3.1.3 Beschleunigte Alterung mittels Temperaturschockbelastung

Bei der Beurteilung einer Aufbauvariante ist, neben dem zuvor untersuchten Herstellungsprozess, die Zuverlässigkeit über die prognostizierte Lebensdauer von großer Bedeutung. Eine wesentliche Prüfung ist dabei der Temperaturschocktest. Hierbei wird eine mechanische Belastung, die bei Temperaturänderungen auf die Lötstellen wirkt, beschleunigt nachgebildet. Die Schockbelastung wird dadurch erreicht, dass die Prüfanlage zwei Kammern zur Verfügung stellt, die auf verschiedenen Temperaturniveaus gehalten werden. Bei Qualifizierungen für Anwendungen in der Industrie- oder Automobil-elektronik werden als Grenztemperaturen in der Regel -40 °C und $+125\text{ °C}$ angewendet. Die Umlagerung zwischen den Kammern erfolgt innerhalb weniger Sekunden, allerdings hängt die Änderungsgeschwindigkeit der Prüflingstemperatur von einer Mehrzahl von Faktoren ab, wie beispielsweise der Gesamtprüfmasse, der Lage innerhalb der Kammer oder dem herrschenden Luftstrom. Nach dem Erreichen einer Schwelltemperatur nahe dem Sollwert in der Kammer, verbleibt das Prüfgut für 15 Minuten auf diesem Temperaturniveau.

Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften bezüglich des Wärmeausdehnungsverhaltens der beteiligten Materialien, treten erhebliche mechanische Spannungen auf, die von den Lötstellen abgefangen werden müssen [60]. Dabei kommt dem Abstand zwischen den Anschlussflächen auf der Leiterplatte und dem kontaktierten Bauelement eine erhebliche Bedeutung zu. Dieser so genannte Stand-Off hat somit einen Einfluss auf die Zyklenfestigkeit. Ein höherer Stand-Off wirkt sich dabei positiv auf die Zuverlässigkeit aus [70]. Anhand von Schifffbildern wurden exemplarisch für die Aufbauvarianten S100D2, Pad1-3 (Schablonendicke $100\text{ }\mu\text{m}$, Schablonenöffnung $30\text{ }\mu\text{m}$ gegenüber dem Pad vergrößert) die Stand-Off Höhen h bestimmt (Bild 13).

Einfluss der Padgeometrie auf die geometrische Ausbildung der Lotballs

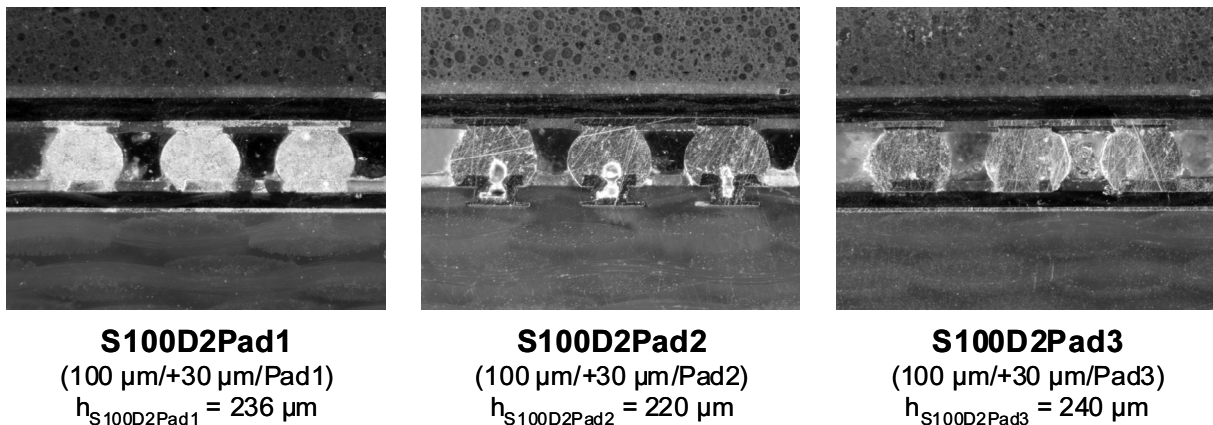


Bild 13: Vergleich der Stand-Off Höhen der Anschlussballs in Abhängigkeit der Pad-Layouts (Varianten S100D2, Pad1-3)

Für die Varianten Pad1 und Pad3 wurden ähnliche Stand-Off Höhen ermittelt. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Pad-Layouts lag in der Größe der Anschlussflächen auf der Leiterplatte. Die Fläche des kreisförmigen Pads (Pad1) betrug rund 68 % des vergrößerten achteckigen Pads (Pad3). Dennoch stellte sich ein ähnlich

hoher Stand-Off der Anschlussstellen ein. Bei der Variante Pad2 konnte ein Teil des Lotes in die offene Bohrung fließen, so dass ein ca. 8 % geringerer Stand-Off nachgewiesen werden konnte. Weiterhin konnten anhand der Schliffbilder (Bild 13 Mitte und Bild 16 Mitte) Hohlbereiche direkt über den Mikrovias festgestellt werden. Aufgrund des gemessenen Stand-Offs wurde für die Bewertung ein Punkt für die Varianten mit Pad1 oder Pad3 vergeben und für die Varianten mit Pad2 kein Punkt.

Die Auswertung der elektrischen Kontaktierung erfolgte anhand der 39 verfügbaren Testschaltungsträger. Da bei der Versuchsreihe nach 750 Zyklen nahezu alle BGAs ausgefallen waren, wurde für die weitere Auswertung der Anteil der ausgefallenen BGAs nach 500 Zyklen ermittelt (Bild 14). Diejenigen BGAs, die bereits nach dem Aufbau der Baugruppen fehlerhaft kontaktiert waren, wurden bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt. Zwei Tendenzen waren deutlich erkennbar. Zum einem schnitten die Varianten mit einer höheren Schablonendicke günstiger in der Untersuchung ab. Zum anderen zeigte das Layout Pad2 in der Mehrzahl der Fälle das schlechteste Verhalten. Für die quantifizierte Bewertung wurden fünf Bereiche festgelegt: bis maximal 7,5 % Ausfälle (4 Pkt.), bis max. 15 % (3 Pkt.), bis max. 22,5 % (2 Pkt.), bis max. 30 % (1 Pkt.) und darüber (0 Pkt.).

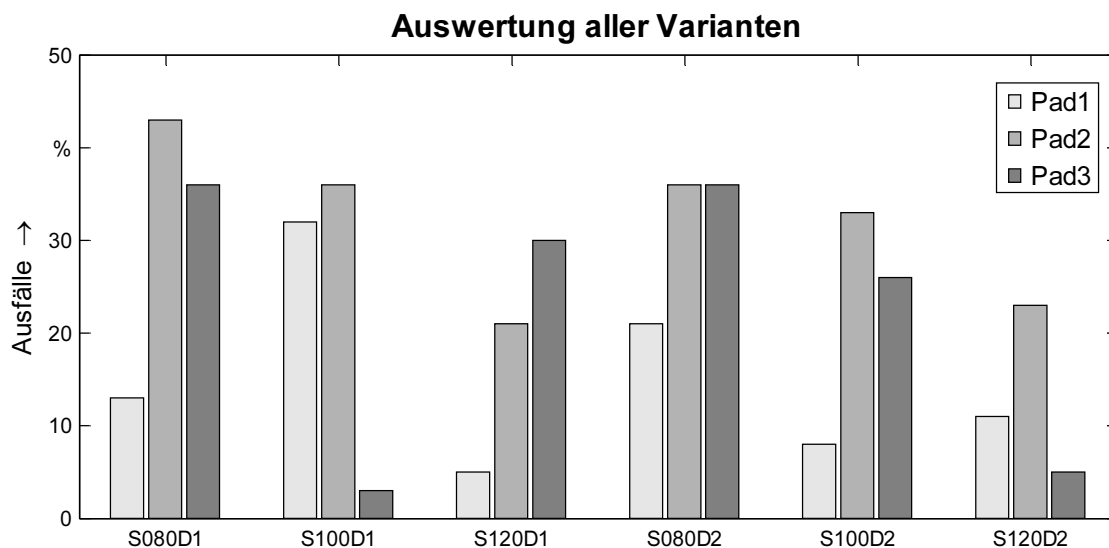


Bild 14: Relative Ausfallhäufigkeit der 18 Aufbauvarianten nach 500 Zyklen Temperaturschock (-40 °C/+125 °C)

In Ergänzung zu den Einzelbewertungen wurden zusätzlich noch die drei Parameter Schablonendicke, -durchbruch und Pad-Layout der Aufbauvarianten getrennt betrachtet. Dabei wurde für jede Einstellung eines Parameters maximal ein Punkt vergeben und den jeweiligen Varianten zugeordnet. Bei der Betrachtung des Parameters Schablonendicke (Bild 15 links) und Pad-Layout (Bild 15 rechts) war der Einfluss der jeweils drei Einstellungen eindeutig erkennbar. Es erfolgte eine Zuordnung von 0, 0,5 bzw. 1 Punkt auf die einzelnen Varianten. Die Bedeutung der Schablonendicke für die Zuverlässigkeit konnte eindrucksvoll nachgewiesen werden. Bei der alleinigen Betrachtung dieses Aspektes wäre eine Erhöhung der Dicke zu empfehlen, was allerdings ganz im Gegensatz zu den Ergebnissen des Herstellungsprozesses im vorangegangenen Ab-

schnitt stand. Die Auswertung für die Varianten des Pad-Layouts zeigte eine fast identische Abstufung der Ausfallhäufigkeit. Bei der Betrachtung der Einzelwerte in Bild 14 fiel der Unterschied zwischen Pad1 und Pad3 nicht so eindeutig auf, wie es sich aus der kumulierten Darstellung in Bild 15 ergab. Die Bewertung erfolgte entsprechend zur derjenigen für die Schablonendicke. Die beiden Einstellungen für den Durchmesser des Schablonendurchbruchs waren im Mittel über alle Varianten gleichwertig (Bild 15 Mitte), mit dem Ergebnis, dass für alle Varianten 0,5 Punkte zugeordnet wurden.

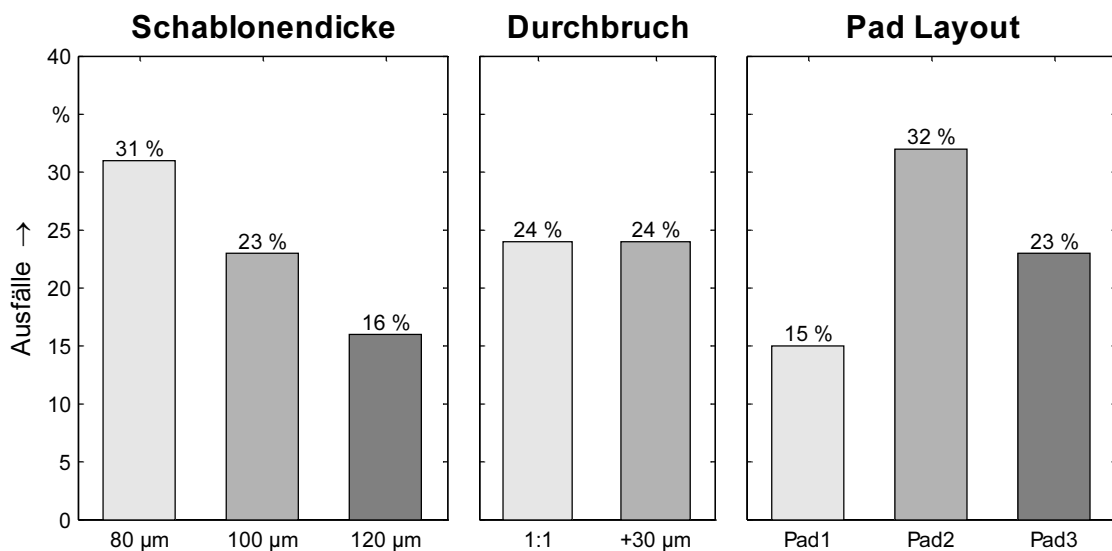


Bild 15: Auswertung der Ausfallhäufigkeiten nach den Variationsparametern Schablonendicke, Durchbruchgeometrie und Layout der Anschlussflächen

Abschließend wurde anhand von ausgewählten Schliffbildern der Fehlermechanismus für die verschiedenen Pad-Layouts analysiert. Bei allen drei Varianten konnte eine Rissbildung an der Grenzfläche zwischen Bauelementunterseite und der Lotverbindung nachgewiesen werden (Bild 16). In Ergänzung zu diesem bekannten Effekt konnte bei der Variante Pad2 zusätzlich noch eine Rissbildung zwischen Leiterplattenoberfläche und Lotstelle identifiziert werden. Generell war festzuhalten, dass die geometrische Ausbildung der Lotstelle bei einem offenen Mikrovia sehr ungünstig ausfiel [95].

Versagensanalyse

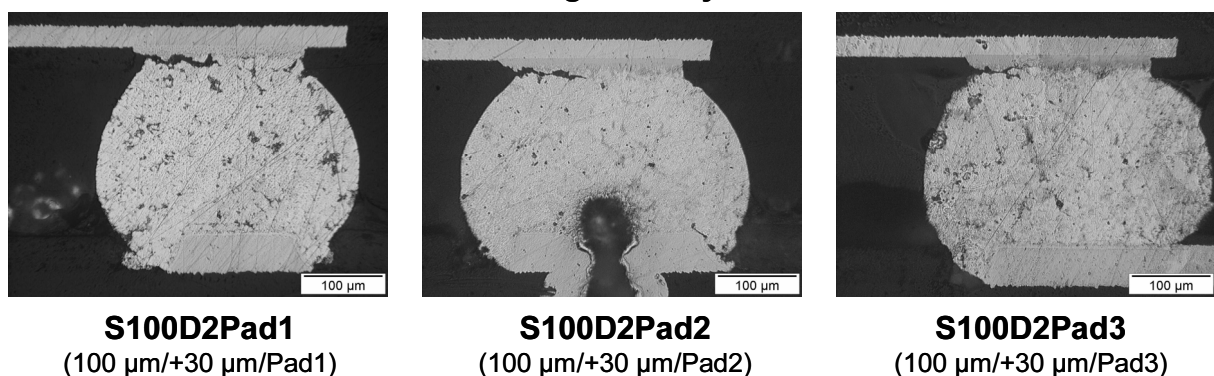


Bild 16: Analyse des Fehlermechanismus anhand von Schliffbildern (Varianten S100D2) nach 750 Zyklen Temperaturschock (-40 °C/+125 °C)

3.1.4 Bewertung der Ergebnisse

Die zuvor beschriebenen Bewertungsschritte für die beiden Bereiche Herstellungsprozess und Zuverlässigkeit wurden auf alle 18 Varianten angewendet. Für eine Darstellung mit größtmöglicher Aussagekraft wurden alle untersuchten Varianten in einem Diagramm so als Punkte platziert, dass die Punktzahlen für den Herstellungsprozess auf der horizontalen Achse und diejenigen für die Zuverlässigkeit auf der vertikalen Achse (Bild 17) aufgetragen wurden. Die achsennahe Lage von Punkten weist bei dieser Art der Veranschaulichung auf Aufbaualternativen hin, die in mindestens einem der beiden Bewertungsbereiche unzureichend abschnitten. Die Gesamtpunktzahl kann anhand der diagonal verlaufenden Hilfslinien abgelesen werden.

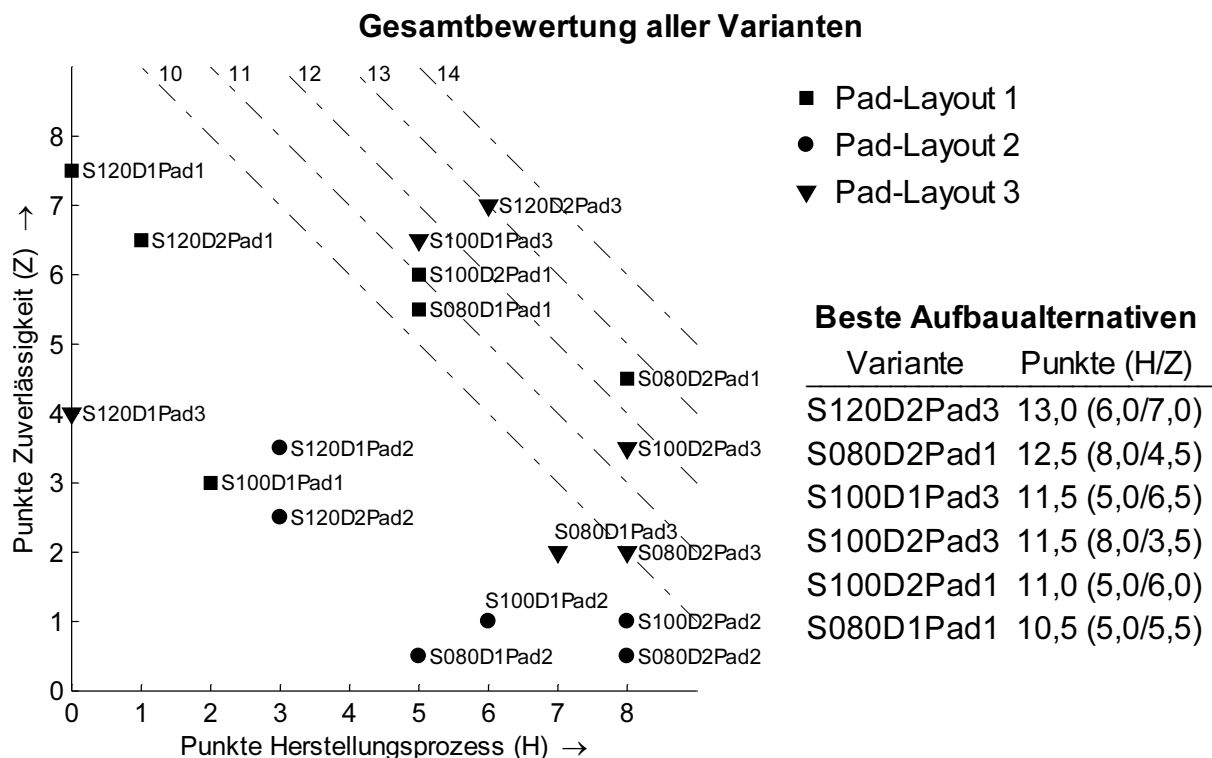


Bild 17: Gegenüberstellung der Bewertungen für den Herstellungsprozess und für die Zuverlässigkeit

Im ersten Schritt der Gesamtbewertung wurden nur die Varianten betrachtet, die in beiden Bereichen mindestens 3,5 der möglichen Punkte erhielten. Damit verblieben noch sechs von 18 Varianten, darunter keine mit einem Mikrovias im Pad (Layout Variante Pad2). Bei der Betrachtung der sechs punktbesten Varianten zeigte sich ein stark heterogenes Bild. Die Pad-Layout Varianten Pad1 und Pad3 waren jeweils dreimal vertreten, mit einer Tendenz zu Pad3. Der für die Untersuchung wesentliche Unterschied war, dass durch den vergrößerten Schablonendurchbruch von Pad3 gegenüber Pad1 einerseits die Kennzahl für das Auslöseverhalten günstiger war und andererseits mehr Lotpaste gedruckt wurde. Bei dem Parameter Durchmesser des Schablonendurchbruchs zeigte eine Überdruckung von 30 µm gegenüber den Anschlussflächen fast durchgehend eine bessere Gesamtpunktzahl als für ein 1:1 Durchbruch. Alle drei Schablonen-

dicken waren unter den besten sechs Varianten vertreten. Die hier für ein optimiertes Druckbild eingesetzten dünnen Schablonen bzw. Schablonenbereiche mit einer Dicke von 80 µm zeigten ein günstiges Verhalten im Herstellungsprozess, aber nur vereinzelt im Bereich der Zuverlässigkeit. Bei den 120 µm Varianten war es genau umgekehrt. Dennoch sind unter den besten drei Varianten alle drei Schablonendicken zu finden. Letztendlich ist eine Festlegung einer geeigneten Schablonendicke nur unter Berücksichtigung aller Aspekte sinnvoll.

Die wesentlichen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchung liegen darin, dass optimierte Parameter bezüglich der Schablonengeometrie und damit des Transfers von Lotpaste auf den Schaltungsträger zu unzureichenden Ergebnissen bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen führen können und umgekehrt. Insbesondere war die Schablonendicke der Parameter, der die Gegensätzlichkeit der beiden analysierten Bereiche Herstellungsprozess und Zuverlässigkeit am Besten verdeutlichte. Soll in der industriellen Praxis eine Einsatzqualifizierung von BGA-Bauelementen mit geringem Rastermaß erfolgen, können aus den vorliegenden Ergebnissen folgende Erkenntnisse abgeleitet werden: Für die Erreichung des Ziels, diese Bauelemente mit einer geringen Ausschussrate beim Aufbau von Baugruppen zu verarbeiten und gleichzeitig eine Langzeitzuverlässigkeit zu erreichen, ist es notwendig die Schablonenparameter zu optimieren.

Hierfür müssen nicht zwangsläufig komplexe Leiterplatten eingesetzt werden, es genügen einfache Teststrukturen mit Daisy-Chain Strukturen. Allerdings sollten die Schaltungsträger von der Dicke und dem prinzipiellen Lageraufbau denjenigen entsprechen, welche in dem späteren Produkt oder in der Produktkategorie verwendet werden. Der Aufwand hierbei liegt in der Beschaffung von mehreren Schablonen, die die möglichen geometrischen Alternativen beinhalten. Das transferierte Lotpastenvolumen und dessen Gleichmäßigkeit kann mit einem Lotpasteninspektionssystem verifiziert werden. Der zeitliche Aufwand einer solchen Untersuchung ist im Gegensatz zu mehrwöchigen Temperaturschockprüfungen sehr gering. Letztere kann nach Ermittlung einer geeigneten Schablonengeometrie mit einer geringeren Anzahl von Varianten durchgeführt werden. In Hinblick auf die Zuverlässigkeit sollte eine eher dickere Schablone verwendet werden und eine Überdruckung der Anschlussflächen stattfinden. Aktuelle Entwicklungen in der Schablonentechnologie, wie beispielsweise nanobeschichtete Schablonen, eröffnen das Potential, sehr gute Drucke auch bei geringeren Kennzahlen für das Auslöseverhalten zu realisieren [102][103].

3.2 Online-Überwachung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Die Prüfverfahren zur Zuverlässigkeitsbestimmung erfordern üblicherweise eine hohe Prüfdauer. So wird beispielsweise für Temperaturschockuntersuchungen mit einer Haltezeitdauer von 15 Minuten je Temperaturniveau ungefähr eine Woche für 250 Zyklen benötigt. Die praktische Vorgehensweise ist oftmals so, dass nach je 250 Zyklen die Prüflinge der Prüfeinrichtung entnommen werden und die Kontaktierung der Verbindungsstellen mit einer elektrischen Widerstandsmessung überprüft wird. Allerdings können so Ausfallzeitpunkte nur grob bestimmt werden. Eine solche Bestimmung der charakteristi-

schen Lebensdauer einer Aufbauvariante, die mit Hilfe der im nächsten Abschnitt im Detail beschriebenen Weibull-Analyse erfolgt, ist daher mit erheblichen Ungenauigkeiten behaftet. Die exakte Ermittlung des Ausfallzeitpunktes kann somit nur mit einer permanenten Überwachung jedes einzelnen Prüflings, einer sogenannten Online-Messung, erfolgen. Dabei wird der Durchgangswiderstand der Testbauelemente, die eine Daisy-Chain-Kontaktierung aufweisen müssen, fortlaufend bestimmt. Es kann leicht nachvollzogen werden, dass die Aufzeichnung von mehreren Messwerten pro Sekunde für jedes Messobjekt schnell zu einer gigantischen Datenmenge führt. Daher erfolgt in Prüflaboren die Überwachung so, dass die aktuellen Messwerte mit einem festzulegenden Maximalwert laufend verglichen werden. Bei Überschreitung des Schwellwertes wird der zugehörige Zeitpunkt festgehalten. Ergänzend können auch maximale und minimale Werte für einen Temperaturzyklus aufgezeichnet werden [32][34].

In diesem Abschnitt werden zwei Aspekte näher untersucht. Zunächst wird anhand einer fortlaufenden Datenaufzeichnung das Verhalten des elektrischen Durchgangswiderstands bis zu dem Beginn eines Ausfalls und darüber hinaus analysiert. Dies ist deshalb notwendig, da die ersten Ausfallerscheinungen nicht zu einem dauerhaften Ausfall führen müssen, wie nachfolgend gezeigt wird. Parallel wird ein vereinfachter Messablauf untersucht. Hier ist das Ziel, zu ermitteln, mit welchem Aufwand welche Aussagekraft erreicht werden kann. Anschließend wird ein Konzept zur signifikanten Reduzierung des Messaufwands vorgestellt und die Ergebnisse anhand einer exemplarischen Messreihe diskutiert. Im industriellen Umfeld werden umfangreiche Einsatzqualifizierungen insbesondere für komplexe Bauelementgeometrien durchgeführt. Daher wurden die praktischen Untersuchungen anhand eines BGA Bauelements mit einem Rastermaß von 500 µm durchgeführt.

3.2.1 Ausfallanalyse mit permanenter Messdatenaufzeichnung

Bei Temperaturschockuntersuchungen finden vorzugsweise Daisy-Chain-Bauelemente Verwendung. Das Ziel, einen durchgehenden elektrischen Pfad durch alle Anschlusskontakte zu bilden, wird dadurch erreicht, dass benachbarte Anschlüsse abwechselnd im Bauelement und auf der Leiterplatte miteinander verbunden werden. Somit können mit zwei Anschlusspunkten alle Lotstellen auf elektrischen Durchgang geprüft werden. Insbesondere für Quad-Flat-Pack (QFP) Bauelemente und Area-Array-Bauelemente mit bis zu mehreren Hundert Anschlüssen kann die Verbindungstechnik somit bei Zuverlässigkeitsversuchen geprüft werden. Vor der Durchführung solcher Untersuchungen ist es notwendig festzulegen, ob lediglich ein Totalfall des Bauelements ($R_{\text{Bauelement}} \rightarrow \infty$), das Überschreiten eines Schwellwertes oder der quantitative Verlauf des Widerstands über den Prüfzeitraum ermittelt werden soll. Hiervon hängt der Aufwand für die Messtechnik und der zugehörigen Messschaltung ab. Zunächst wurde der Fall betrachtet, den quantitativen Widerstandsverlauf eines einzelnen Bauelements zu überwachen. Dem Ersatzschaltbild des Messaufbaus (Bild 18) ist zu entnehmen, dass der Widerstand R_x des betrachteten Bauelements nach dem Prinzip der Vier-Punkt-Messung bestimmt werden

konnte [133]. Dies war notwendig, da eine möglichst genaue Messung eines kleinen Widerstands, der für die hier untersuchten Komponenten unter $1\ \Omega$ lag, erfolgen sollte.

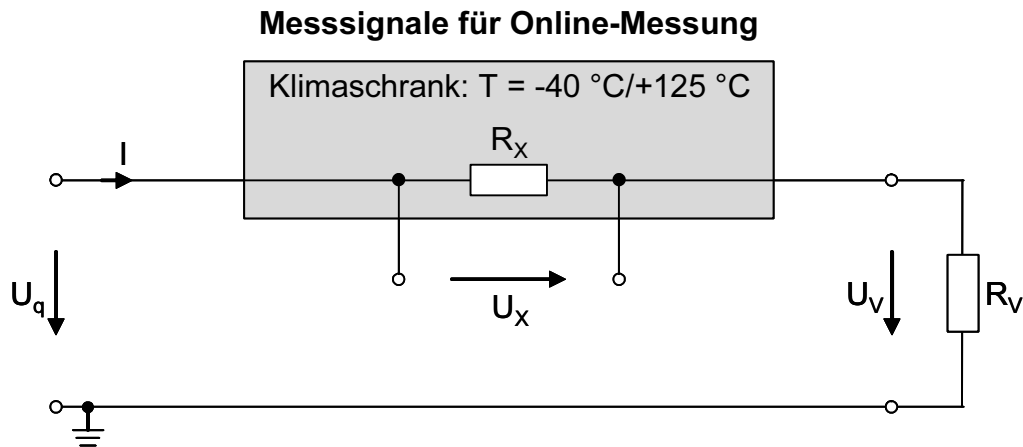


Bild 18: Ersatzschaltbild für die permanente Überwachung eines Daisy-Chain-Bauelements (R_X) während einer Temperaturschockprüfung

Der Vorwiderstand R_V dient in Abstimmung mit der Quellspannung U_q zur Einstellung des Messstroms I , der einerseits so gering sein muss, dass durch diesen keine signifikante Eigenerwärmung des Prüflings mit dem Widerstand R_X entsteht. Andererseits sollte der Strom so hoch wie möglich sein, damit die Messspannung U_X ausreichend präzise ermittelt werden kann. Die Untersuchungen wurden mit einem Messstrom von $I \approx 10\text{ mA}$ durchgeführt. Im Nachfolgenden wird der berechnete Widerstand mit der Vierpunkt-Messmethode mit $R_{X,1}$ bezeichnet. Mit Hilfe der beiden gemessenen Spannungen U_X und U_V kann nun der Widerstand $R_{X,1}$ während der Lagerung im Temperaturschockschrank bestimmt werden (Gl. 4).

$$I = \frac{U_V}{R_V} = \frac{U_X}{R_X} \Rightarrow R_{X,1} = R_V \cdot \frac{U_X}{U_V} \quad (\text{Gl. 4})$$

Diese Vorgehensweise war zwar die genauest mögliche, aber bedingte doch einen erheblichen Messaufwand. Für jeden Prüfling wurden vier Messleitungen in den Temperaturschockschrank benötigt und jeweils die Spannungen U_X und U_V erfasst. Da die Messung des verhältnismäßig kleinen Signals U_X hochgenau erfolgen musste, wurde die Spannungsmessung differentiell durchgeführt, so dass hier zwei Messkanäle benötigt wurden [85]. Als eine Alternative wurde eine deutlich einfachere, aber auch ungenauere Berechnung des Widerstandwertes für R_X durchgeführt. Hierbei wurden sämtliche Leitungswiderstände vernachlässigt und für die Berechnung wurde neben der Quellspannung lediglich die Spannung über dem Vorwiderstand herangezogen. Dieser Widerstand wird im Folgenden mit $R_{X,2}$ bezeichnet. Für diesen gilt (Gl. 5):

$$R_{X,2} = \frac{U_X}{I} = \frac{U_q - U_V}{I} = \frac{R_V}{U_V} \cdot (U_q - U_V) = R_V \cdot \left(\frac{U_q}{U_V} - 1 \right) \quad (\text{Gl. 5})$$

Da hier die Quellspannung für den Messaufbau in die Berechnung von $R_{X,2}$ einging, wurde eine mögliche Zeitvarianz von U_q berücksichtigt. Anstatt drei Messkanäle wurde nur noch ein Kanal je Prüfling benötigt und zusätzlich noch ein weiterer Kanal zur Erfassung der Quellspannung. Die gleichzeitige Untersuchung von mehreren Prüflingen konnte mit einer Parallelisierung des Messaufbaus aus Bild 18 erreicht werden. Die Erfassung von U_q erfolgte nur einmalig für den gesamten Messaufbau. Somit konnte die Anzahl der benötigten Messkanäle von $3 n_{\text{Prüflinge}}$ auf $n_{\text{Prüflinge}} + 1$ reduziert werden. Die Auswirkungen auf die Aussagekraft dieser Vereinfachung wurden nachfolgend vergleichend betrachtet. Zunächst wurde der Widerstandsverlauf eines BGAs während der Temperaturschocklagerung untersucht. Der Vergleich der temperaturabhängigen Durchgangswiderstände für die beiden Berechnungsarten ((Gl. 4) und (Gl. 5)) mit der umgebenden Lufttemperatur in Bild 19 zeigte, dass die Erwärmung bzw. das Abkühlen des BGAs der Umgebungstemperatur nachfolgt ohne aber deren Überschwingungsverhalten aufzuweisen.

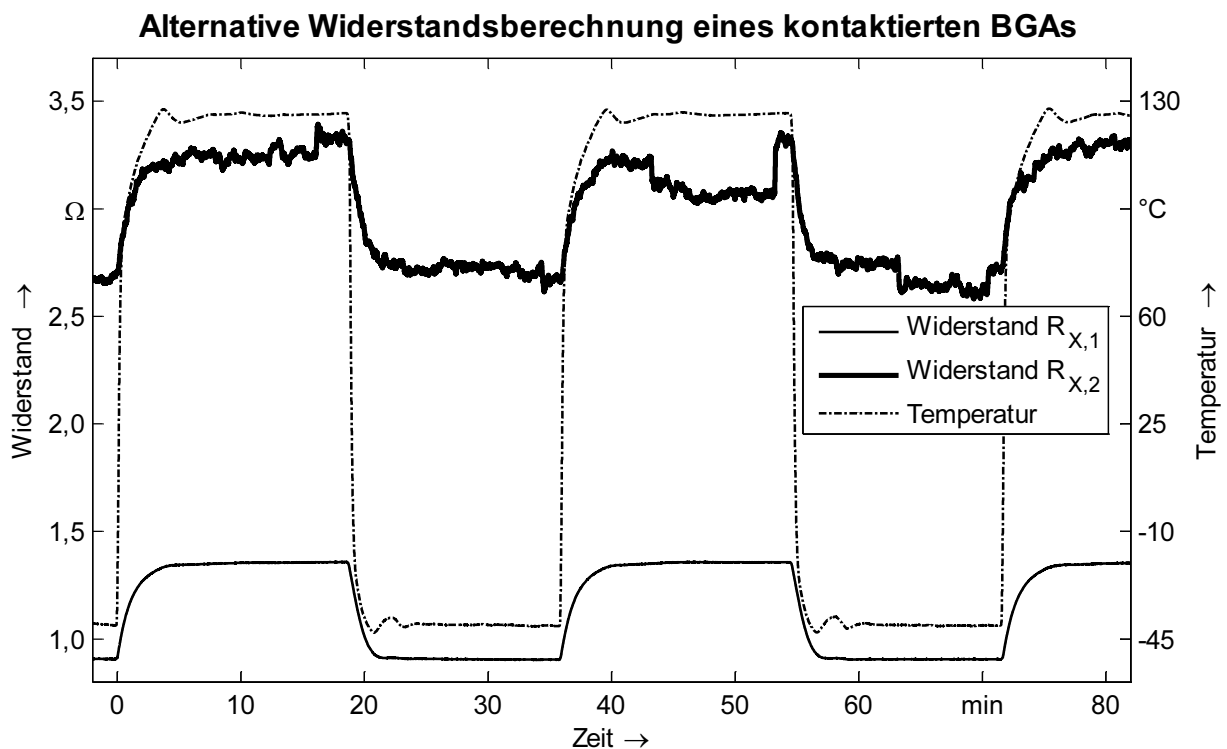


Bild 19: Exemplarische Widerstandsverläufe für einen kontaktierten BGA während Temperaturschocklagerung (-40 °C/+125 °C) bei Anwendung von zwei unterschiedlichen Berechnungsmethoden

Eine Reduzierung des Rauschens der Kurvenverläufe, die mit einer Abtastfrequenz von 20 Hz erfasst wurden, erfolgte mit Hilfe einer fortlaufenden Mittelung über ein Zeitfenster von 5 s. Bei beginnender Umlagerung trat der maximale Gradient der Widerstandsänderung auf. Der Verlauf der Messkurven zeigte von Zyklus zu Zyklus näherungsweise ein konstantes Verhalten. Bei den Messwerten für $R_{X,2}$ ergaben sich im Vergleich zu den genauer bestimmten Werten für $R_{X,1}$ zwei Auffälligkeiten. Die Absolutwerte waren ungefähr um 2 Ω erhöht. Dies lag darin begründet, dass bei der Ermittlung von $R_{X,2}$ zusätzlich zu dem Widerstand des BGAs auch noch sämtliche Leitungswiderstände ein-

flossen, die bei dem realisierten Aufbau eine Länge von ca. 10 m aufwiesen. Dennoch ließen sich aus dem Verlauf die einzelnen Zyklen gut erkennen. Die zweite Abweichung im Vergleich mit der Messkurve für $R_{X,1}$ bestand darin, dass der Verlauf deutlich verrauscht war und Schwankungen auch innerhalb eines Temperaturniveaus auftraten. Dieses Verhalten ließ sich damit erklären, dass bei der Berechnung von $R_{X,2}$ die Messwerte für U_q eingingen, die im Gegensatz zu U_x aus messtechnischen Gründen mit einem wesentlich größeren Messbereich erfolgen mussten.

Da der Widerstandshub in einem Bereich lag, der aufgrund der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen, insbesondere von Kupfer und Zinn, zu erklären war, konnte aus dem dargestellten Verlauf auf eine einbahnfreie Kontaktierung geschlossen werden. Weiterhin war erkennbar, dass die Gesamtzykluszeit im vorliegenden Abschnitt ca. 35,8 Minuten betrug und somit die ideale Zyklusdauer von 30 Minuten überstieg. Dies lag in der Tatsache begründet, dass die Haltezeit von 15 Minuten erst nach dem Erreichen einer Schranke um die Solltemperaturen von -40 °C bzw. $+125\text{ °C}$ begann. Vertiefende Untersuchungen zeigten, dass dies von mehreren Bedingungen abhängen kann, unter anderem von der Platzierung des Temperatursensors zur Steuerung des Kammerprofils, von der Vorhaltetemperatur der jeweilig inaktiven Kammer und auch von der Anordnung sowie der Gesamtmasse der Prüflinge.

Für die Analyse des Ausfallverhaltens und der zyklengenauen Bestimmung des Ausfallzeitpunkts des BGAs musste zunächst ein geeignetes Kriterium festgelegt werden. Bei nicht permanent überwachten Versuchsreihen, bei denen der elektrische Durchgangswiderstand in regelmäßigen Abständen bei Raumtemperatur bestimmt wird, beispielsweise nach jeweils 250 Zyklen, wird oftmals ein prozentualer Anstieg von 3 % bis 10 % vom Ausgangswert herangezogen [134]. Anhand der durchgeführten Online-Messung erfolgte die Untersuchung des Widerstandsverhaltens zeitgenau. Als Ausfallkriterium wurde das erste Abweichen des Widerstandsverlaufs gegenüber dem bis dahin quasi kontinuierlichen Verhalten festgelegt. In Bild 20 ist der Bereich um den Zeitpunkt der erstmalig signifikanten Auffälligkeiten des BGAs dargestellt. Der zeitliche Nullpunkt in der Abbildung wurde zur besseren Darstellung in den Beginn des ersten abweichenden Zyklus verschoben. Aus dem Verlauf von $R_{X,1}$ war deutlich erkennbar, dass während der ersten drei auffälligen Zyklen der Widerstandswert im unteren Temperaturbereich anstieg und im vierten Zyklus deutlich erhöht war. Im oberen Temperaturbereich fand zunächst lediglich ein stetiger Anstieg statt. Wesentlich war jedoch, dass im betrachteten Zeitraum eine elektrische Kontaktierung erhalten blieb. Ein vollständiges, dauerhaftes Versagen lag im vorliegenden Beispiel erst ca. 200 Zyklen später vor. Bis dahin wechselten sich Phasen mit und ohne Kontaktierung unregelmäßig ab.

Eine weitere Analyse der Verläufe zeigte, dass erst nach einigen Zyklen der Widerstand erheblich anstieg. Aus dem Verlauf der genaueren Berechnungsmethode ($R_{X,1}$) ließen sich die Auffälligkeiten zu Beginn des Ausfalls einfach erkennen. Bei der alternativen Methode ($R_{X,2}$) konnte das Ansteigen des Widerstandsniveaus im unterem Temperaturbereich eher erahnt als erkannt werden. Dennoch waren die Abweichungen im vierten und im sechsten Zyklus deutlich zu identifizieren. Anhand des Kurvenverlaufs für $R_{X,2}$ in Bild 20 konnte der Beginn des Ausfalls erst einige Zyklen später festgestellt werden. Es

ist festzuhalten, dass mit dieser Vorgehensweise der Versagenszeitpunkt nicht exakt, aber dennoch gut bestimmt werden konnte. Unter Berücksichtigung, dass dieser Effekt bei allen Prüflingen in ähnlichem Umfang auftrat und dass bei einem Vergleich von Aufbauvarianten eine Ungenauigkeit von weniger als zehn Zyklen die Aussagekraft einer Untersuchung nicht wesentlich beeinflusst, kann der vereinfachte Messaufbau für praktische Untersuchungen herangezogen werden. Eine exakte Bestimmung des Ausfallzyklus erforderte jedoch eine Widerstandsbestimmung nach dem Vierpunkt-Messprinzip.

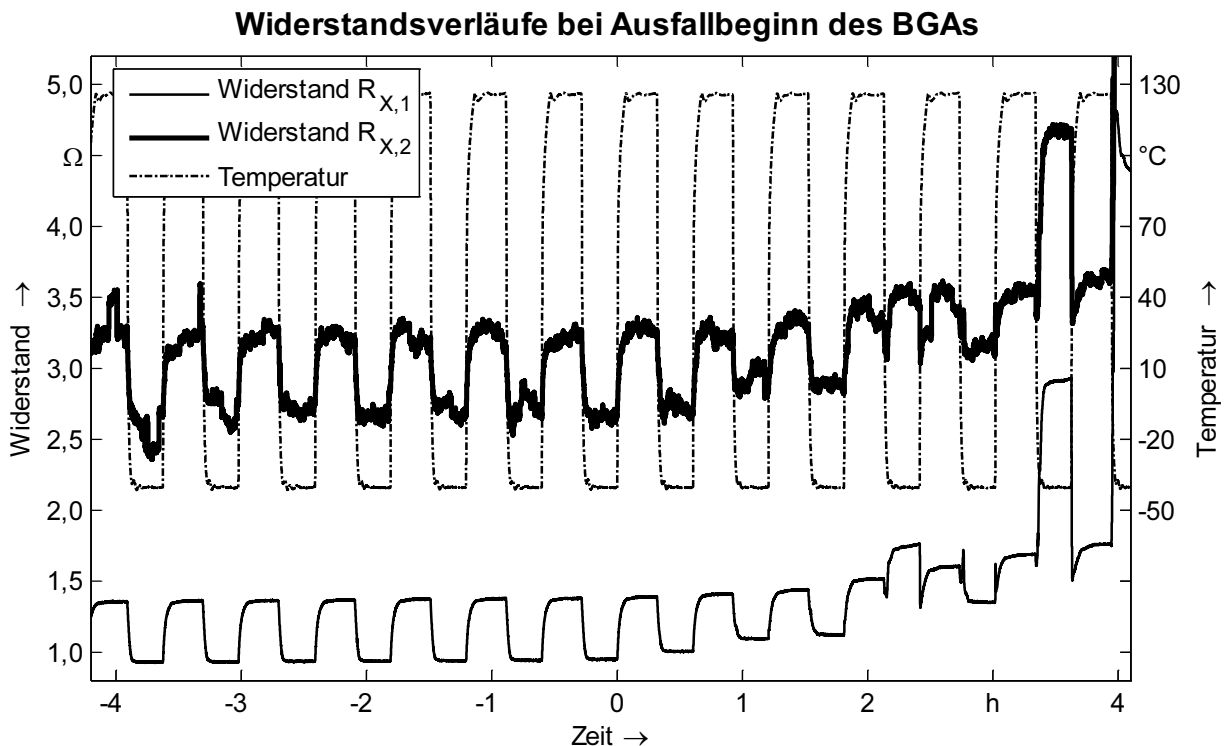


Bild 20: Widerstandsverläufe mit den alternativen Berechnungsmethoden für $R_{X,1}$ und $R_{X,2}$ vor und nach Beginn der ersten Auffälligkeiten des BGAs

Weitere Untersuchungen zeigten, dass der elektrische Durchgangswiderstand über die Zyklenzahl minimal aber stetig anstieg. Aus diesem Grund wurden die vorliegenden Messwertverläufe detailliert ausgewertet. Hierfür wurde für jeden Zyklus, getrennt nach oberen und unteren Temperaturbereichen, die Widerstandskennzahlen $R_{-40\text{ °C}}$ und $R_{+125\text{ °C}}$ bestimmt. Dazu wurden aus den Wertepaaren von Widerstand und Temperatur über einen Zeitraum von drei Minuten unmittelbar vor dem Kammerwechsel eine Ausgleichsgerade errechnet und die repräsentativen Werte bestimmt. In Bild 21 ist die Vorgehensweise exemplarisch mit den Widerstandswerten für $R_{X,1}$ dargestellt. In dem vorliegenden Fall flossen jeweils 3.600 Wertepaare in die Berechnung von $R_{-40\text{ °C},1}$ und $R_{+125\text{ °C},2}$ ein.

Diese Vorgehensweise konnte auf die genauere und vereinfachte Berechnungsweise angewendet werden. Da bei näherer Betrachtung die Widerstandsverläufe für $R_{X,1}$ und $R_{X,2}$ aufgrund einer thermischen Trägheit der Anschlussstrukturen des BGAs nicht exakt der parallel aufgezeichneten Umgebungstemperatur folgten, war dieses Verfahren mit Schwankungen behaftet.

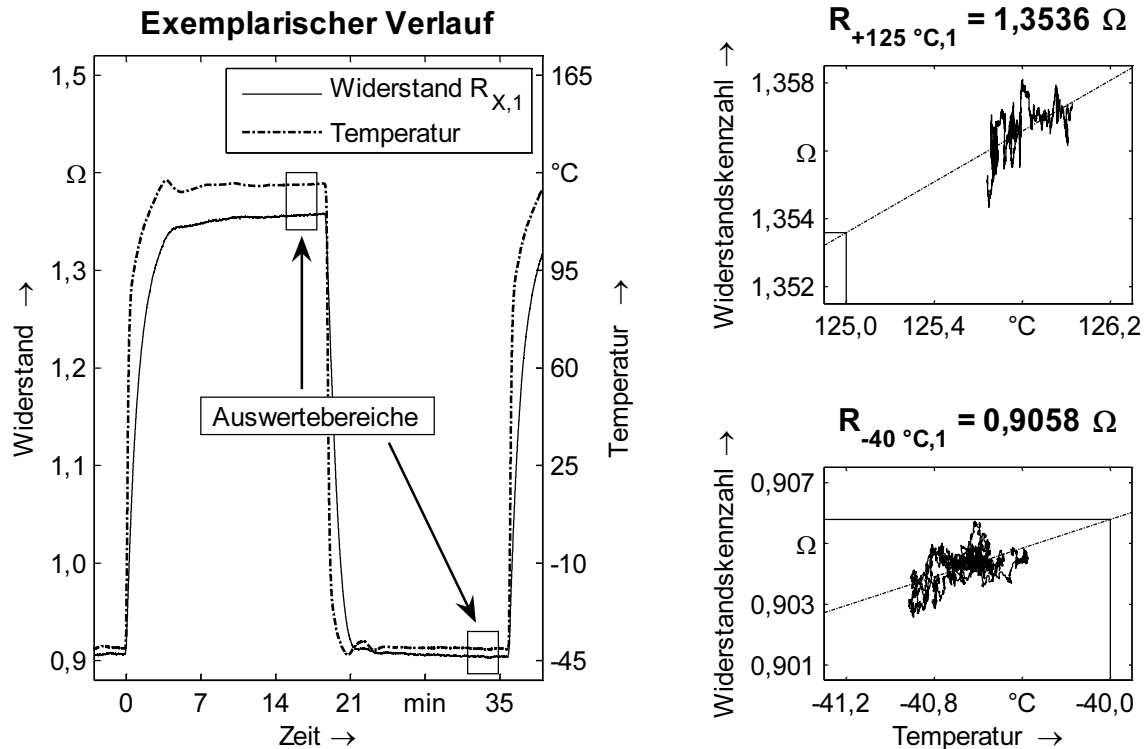


Bild 21: Bestimmung der zyklenspezifischen Kennzahlen $R_{-40 °C,1}$ und $R_{+125 °C,1}$ aus dem Widerstands- und Temperaturverlauf

Eine tiefergehende Analyse erfolgte mit den Messdaten in einem von Bereich 100 Zyklen vor und 30 Zyklen nach ersten Auffälligkeiten. Für jeden Zyklus wurden die Widerstandskennzahlen $R_{-40 °C}$ und $R_{+125 °C}$ für die beiden Berechnungsmethoden in dem Bild 22 aufgetragen. Mit der Anwendung des Prinzips der Vierpunkt-Messung bei dem genaueren Verfahren konnten bis zu dem Ausfallbeginn beziehungsweise dem Beginn der Auffälligkeiten im Widerstandsverlauf sehr gleichmäßige Kennzahlen für beide Temperaturbereiche ermittelt werden. Bei einer intensiven Betrachtung der erhaltenen Kurven begann eine Änderung des bis dahin nahezu linearen Verlaufs bereits ca. acht Zyklen vor dem bis dahin als exakten Ausfallzyklus (relativer Zyklus 0) bestimmten Zeitpunkts. Mit dem Erreichen des relativen Zyklus 0 änderten sich aber die Widerstandskennzahlen signifikant. Unter Berücksichtigung aller erhaltenen Ergebnisse wurde deutlich, wie schwierig eine Festlegung des exakten Ausfallzeitpunkts war. Schließlich wurde das bisherige Kriterium für die Bestimmung des Ausfallzyklus beibehalten, das auf einer Betrachtung des möglichst genau ermittelten Widerstandsverlaufs, wie in Bild 20 dargestellt, basierte. Dies bildete keinen prinzipiellen Widerspruch zu dem Verlauf in Bild 22 links, da die Abweichungen bei den Widerstandskennzahlen als gering eingestuft wurden.

Die Auswertung mit dem vereinfachten Messaufbau (Bild 22 rechts) zeigte einerseits deutliche Schwankungen bei den ermittelten Widerstandskennzahlen, aber auch andererseits, dass der Ausfall, der aus der Grafik durch ein Ausbrechen aus dem Schwankungsbereich entnommen werden konnte, mit einer Genauigkeit von wenigen Zyklen bestimmt werden konnte.

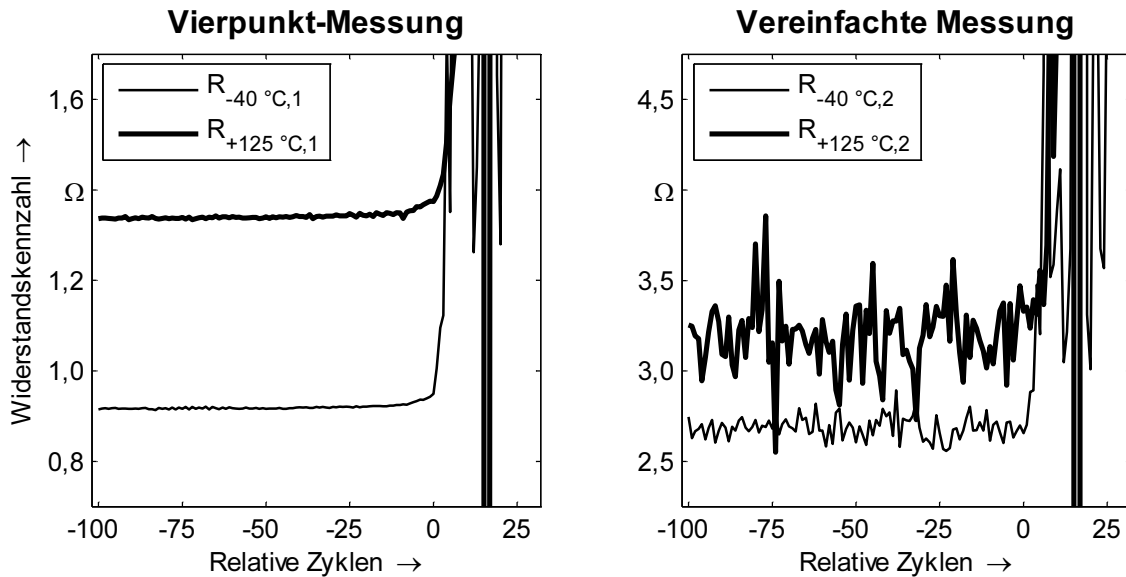


Bild 22: Verlauf der Widerstandskennzahlen $R_{-40\text{ °C}}$ und $R_{+125\text{ °C}}$ in dem Bereich vor und nach dem Beginn von Auffälligkeiten in dem Widerstandsverlauf (relativer Zyklus 0).

Mit Hilfe der vorgestellten Online-Messung konnte nachgewiesen werden, dass eine nahezu exakte Bestimmung des Ausfallzeitpunkts, beziehungsweise der ersten Auffälligkeiten, während einer Temperaturschockprüfung möglich ist. Mit der Ermittlung des zeitlichen Widerstandsverlaufs konnte zusätzlich das elektrische Verhalten nach dem erstmaligen Auftreten von signifikanten Abweichungen untersucht werden. Dabei war festzuhalten, dass diese Auffälligkeiten zunächst nicht dauerhaft auftraten und während einer Messung bei Raumtemperatur nicht zwangsläufig erkennbar gewesen wären. Weiterhin wurde mit einem alternativen, vereinfachten Messaufbau nachgewiesen, dass mit diesem ebenso ein Ausfallzeitpunkt bestimmt werden kann, allerdings mit der Behaftung einer Unsicherheit von wenigen Zyklen. Bei der Konzeption eines Prüf- und Messaufbaus muss daher zunächst festgelegt werden, welche Genauigkeit für eine Zuverlässigkeitsuntersuchung erreicht werden soll. Mit der fortlaufenden Bestimmung der Widerstandskennzahlen für jeden Zyklus kann jedoch für die meisten Untersuchungen mit einem vereinfachten Aufbau ein ausreichendes Ergebnis erzielt werden.

3.2.2 Aufbau zur Erhöhung der Prüflingsanzahl

Die Aussagekraft von Zuverlässigkeitsuntersuchungen steigt in der Regel mit der Erhöhung der Anzahl von Prüflingen. Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Messaufbauten so gestaltet, dass jedes einzelne Objekt überwacht wurde. Das Ziel, den Ausfallzeitpunkt eines Testbauelementes zyklengenau zu ermitteln, konnte mit erheblichem Messaufwand erreicht werden. Mit der Reduzierung der Genauigkeit wurde die Anzahl der benötigten Messkanäle auf $n_{\text{Prüflinge}} + 1$ verringert. Eine weitere Reduzierung wurde im nächsten Schritt mit einem neuen Konzept für einen Messaufbau erreicht. Der zentrale Aspekt hierbei war, dass parallel zu jedem Prüfling ein definierter Widerstand, der wesentlich größer als der Ausgangswiderstand des Testobjekts ($R_x < 1\ \Omega$) war, geschaltet wurde. Bei einem funktionsfähigen Prüfling kann der Parallelwiderstand ver-

nachlässigt werden. In Falle eines Versagens bestimmt dieser den Widerstand der Parallelschaltung. Das Konzept für eine Prüfung von zwölf Testobjekten je Messkanal wurde entsprechend dem Ersatzschaltbild in Bild 23 realisiert. Bereits in dieser Phase erfolgte eine Festlegung der Widerstandswerte entsprechend der Widerstandsreihe E12, beginnend mit 1 k Ω [54].

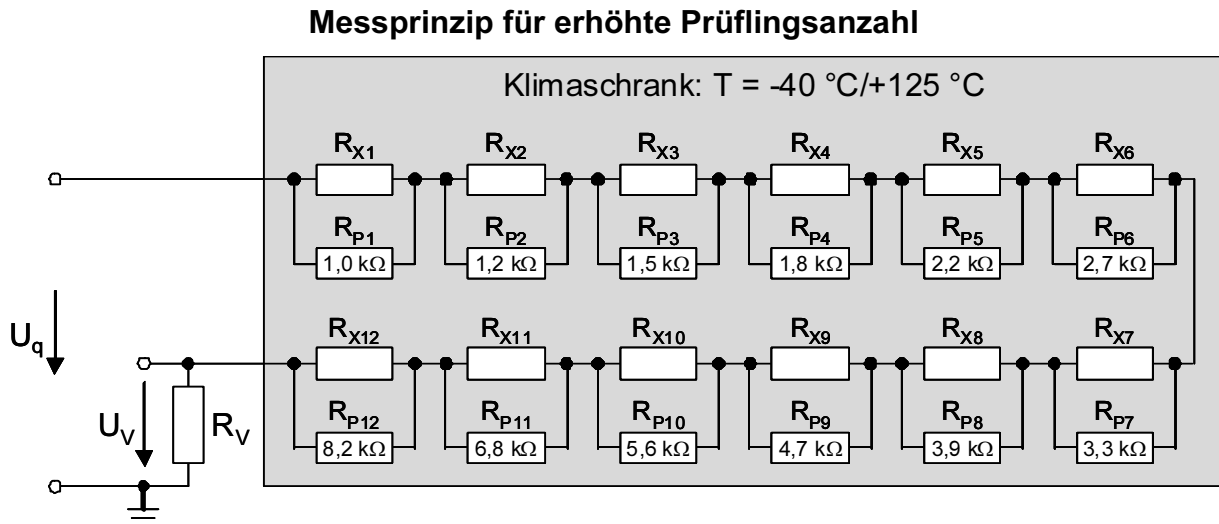


Bild 23: Ersatzschaltbild für einen Messaufbau mit zwölf Prüflingen ($R_{X1} - R_{X12}$) je Messkanal

Der zu überwachende Widerstand R_X ergibt sich nach (Gl. 6). Dem Bild 23 kann entnommen werden, dass der gesamte Aufbau leicht parallelisierbar ist. Unter Berücksichtigung einer gemeinsamen Spannungsquelle U_q beträgt die Gesamtzahl der in einem solchen Fall notwendigen Messkanäle $n_{\text{Prüflinge}}/12 + 1$.

$$R_X = \sum_{i=1}^{12} R_{X_i} = R_V \cdot \frac{U_q - U_V}{U_V} = R_V \cdot \left(\frac{U_q}{U_V} - 1 \right) \quad (\text{Gl. 6})$$

Bei der Wahl des Vorwiderstands R_V musste berücksichtigt werden, dass jede Änderung des Widerstands R_X um einen Wert R_{P_i} sicher detektiert werden konnte, dass heißt die Spannungsänderung am Vorwiderstand R_V musste deutlich größer als die Messauflösung sein. Ein geeigneter Wert wurde zu $R_V = 10 \text{ k}\Omega$ ermittelt und für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet. Eine weitere Voraussetzung war, dass die Verbindungstechnik der Widerstände im Prüfzeitraum nicht versagte. Bei der Verwendung von SMD-Widerständen auf den Testplatinen boten sich Zweipoler der Größe 0402 an, da deren Zuverlässigkeit bei Temperaturschockuntersuchungen höher ist als bei größeren Bauformen. Weiterhin sollte die zuvor aufgezeigte Eigenschaft von komplexen Bauelementgeometrien, dass vom Auftreten der ersten elektrischen Auffälligkeiten bis zum dauerhaften Versagen eine unbestimmte Zeit vergehen kann, bei der Qualifizierung des Konzeptes untersucht werden.

Am Beispiel einer Messkette mit zwölf hoch miniaturisierten Area-Array-Bauelementen wurden die wesentlichen Ergebnisse der Versuchsreihe anhand des zugehörigen Wi-

derstandsverlaufs verdeutlicht. Bei der Betrachtung des berechneten Widerstands über den gesamten Prüfzeitraum von 830 Stunden in Bild 24 konnten mehrere Aspekte entnommen werden. Bei dieser Auswertung wurde aus den Messwerten, die mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet wurden, jeweils der Maximalwert über einen Zeitraum von 10 Minuten dargestellt. Somit erfolgte eine drastische Reduzierung der Rohdatenmenge. Für die notwendigen Detailauswertungen konnte auf die ursprünglichen Daten zurückgegriffen werden. Zunächst waren im ersten Drittel des dargestellten Verlaufs drei Stufen aufgetreten, die drei Parallelwiderständen, und damit jeweils einem einzelnen Prüfling, genau zugeordnet werden konnten. Bereits in dieser Übersichtsdarstellung war zu erkennen, dass die Stufen eine unterschiedliche Breite aufwiesen, was darauf hindeutete, dass die Ausfälle, wie erwartet, nicht unmittelbar von dauerhafter Natur waren, sondern ein Wiederkontaktieren über einen gewissen Zeitraum erfolgte.

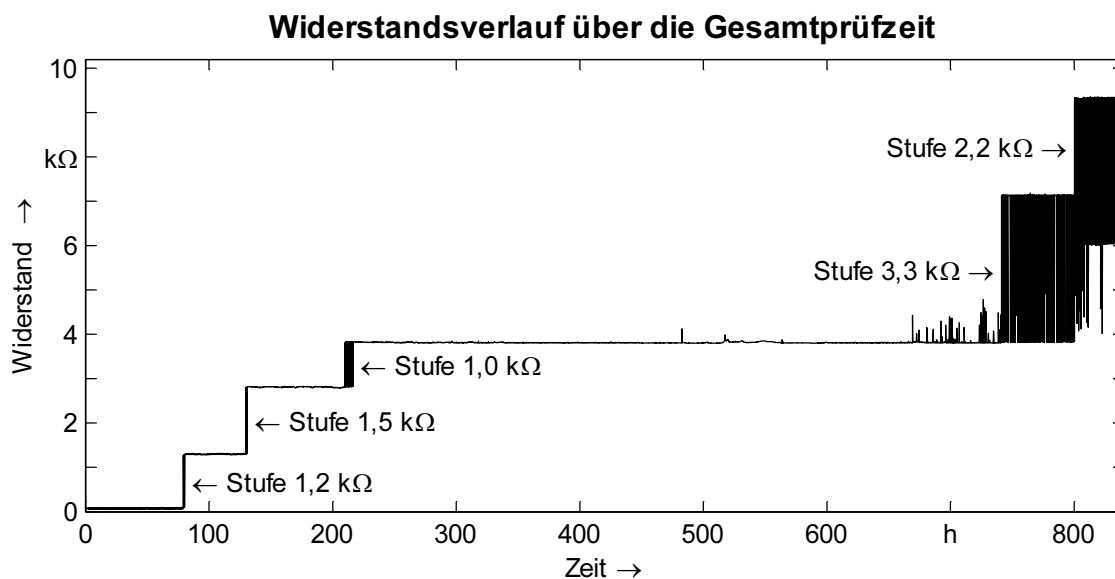


Bild 24: Widerstandsverlauf einer Messkette mit zwölf Prüflingen über 830 Stunden

Eine eingehende Analyse des Widerstandsverlaufs für den ersten und den dritten Ausfalls erfolgte im Anschluss. Gegen Ende der Untersuchung traten offensichtlich zwei weitere Ausfälle auf, die allerdings beide zu keiner permanenten Unterbrechung der Daisy-Chain-Kette führten. Im Hinblick auf die Qualifizierung des Konzepts zur Erhöhung der Prüflingsanzahl konnte einerseits der Nachweis für die Wirksamkeit des gewählten Ansatzes erbracht werden, aber andererseits benötigte die Bestimmung der Ausfallzeitpunkte eine weitergehende Auswertung der Widerstandsverläufe. Eine exakte Zuordnung eines zeitlichen Ausfallpunkts zu einem Prüfzyklus erfolgte mit der Auswertung des Temperaturverlaufs, der parallel zu den Widerstandsmessungen mit Hilfe eines Sensors in der Prüfkammer aufgezeichnet wurde.

Im nächsten Schritt wurde der Widerstandsverlauf für den ersten Ausfall eingehend analysiert. In der Darstellung in Bild 25 erfolgte eine Verschiebung des zeitlichen Nullpunkts in den Flankenwechsel des Temperaturverlaufs bei dem Übergang von der kalten Kammer in die warme Kammer für den auffälligen Zyklus. Die Höhe des Stufensprungs betrug $1,2 k\Omega$, so dass eine eindeutige Zuordnung zu dem Prüfling innerhalb der Messkette erfolgen konnte. Bei einer Versuchsreihe zur Bestimmung der sogenann-

ten charakteristischen Lebensdauer mit Hilfe der Weibullanalyse, die im nachfolgenden Abschnitt ausführlich betrachtet wird, wäre eine Zuordnung nicht notwendig gewesen, da hierfür lediglich die Ausfallzeitpunkte herangezogen werden. Für die Anfertigung von Schliffbildern ist es jedoch von wesentlicher Bedeutung, ob ein Prüfling ausgefallen war, beziehungsweise kann mit einer Online-Überwachung der Versuchsablauf unterbrochen werden, mit dem Ziel den betroffenen Prüfling gezielt aus der fortzuführenden Untersuchung auszuschleusen.

Das erstmalige Dekontaktieren begann unmittelbar nach einem Kammerwechsel von dem kalten in den warmen Bereich. Da der Temperatursensor sich frei über dem Prüfgut befand, war die gemessene zeitliche Verzögerung von 6 s bis zu dem detektierten Widerstandsanstieg dadurch zu erklären, dass die Auswirkungen des Temperaturschocks auf das Testobjekt von dessen thermischer Masse abhängen. Bereits nach zweieinhalb Zyklen trat eine dauerhafte elektrische Unterbrechung auf. Von besonderem Interesse war der exakte Widerstandsverlauf während der ersten Phase der Unterbrechung (Bild 25 rechts).

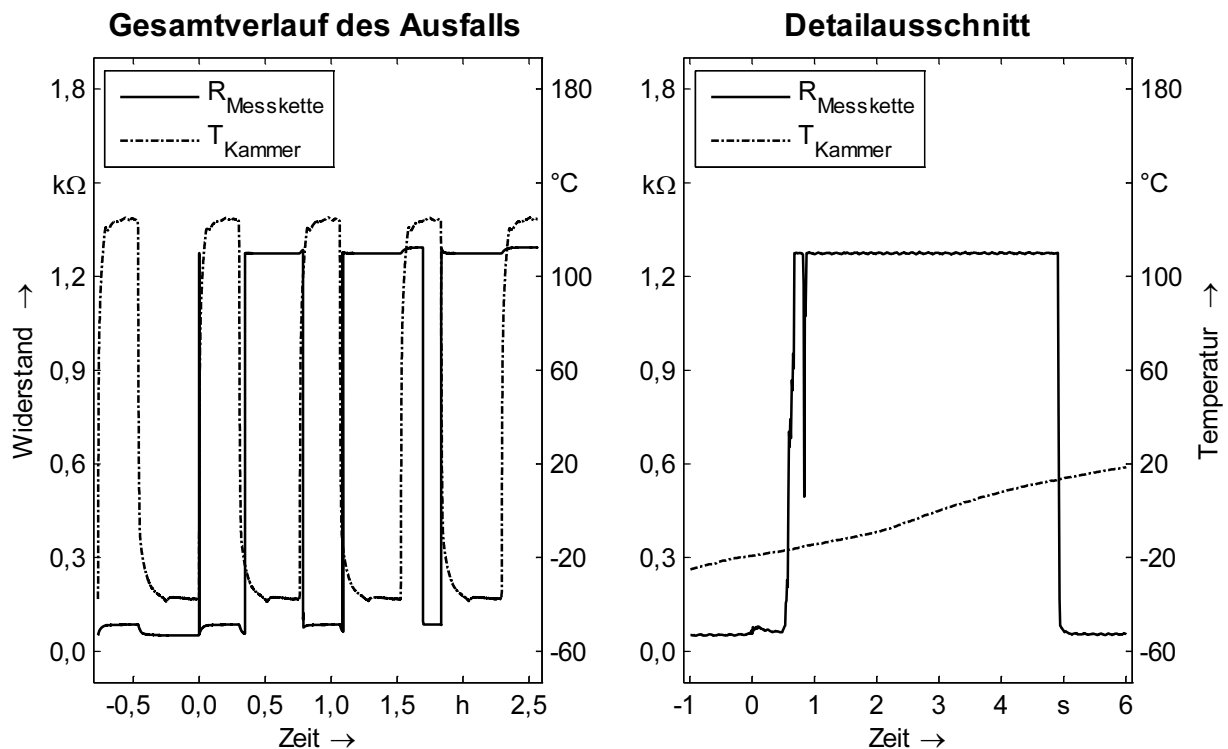


Bild 25: Erster Ausfall in der Messkette bei dem Prüfling mit dem Parallelwiderstand von 1,2 kΩ

Die Dauer dieses Abschnitts betrug lediglich rund 5 s, mit einem anschließenden unauffälligen Verhalten bis zum nächsten Temperaturwechsel. Der Ausfall begann mit einem geringen Anstieg des Widerstands der Messkette, der nach ca. 0,5 s zu einem erstmaligen Versagen der Kontaktierung führte. Nach einer weiteren halben Sekunde reduzierte sich der Widerstand kurzfristig. Dieser Effekt konnte nur durch die hohe Abtastrate von 100 Hz nachgewiesen werden. Die Auswertung von weiteren Messketten zeigte, dass beginnende elektrische Auffälligkeiten mit einem Flankenwechsel korrelieren, sowohl

bei dem Wechsel von kalt nach warm als auch umgekehrt. Weiterhin konnte im Widerstandsverlauf auch eine minimale Erhöhung im oberen Temperaturbereich entnommen werden. Dies würde prinzipiell eine Zuordnung der Zyklusnummer zu den Ausfällen ermöglichen, wobei es sich allerdings zeigte, dass dies gegen Ende der Prüfdauer mit der Überlagerung von mehreren Ausfällen deutlich aufwändiger wurde.

Ein anderes Bild zeigte sich bei der Analyse des dritten Ausfalls, der dem Prüfling mit dem Parallelwiderstand von 1,0 k Ω zugeordnet wurde. Die Phase bis zu dem endgültigen Versagen betrug hier siebeneinhalb Zyklen (Bild 26). Dabei traten Sprünge im Widerstandsverlauf, mit einer einmaligen Ausnahme, bei jedem Flankenwechsel auf. Nach dem vorletzten Wechsel vor dem permanenten Versagen konnten mehrfache Unterbrechungen und Wiederkontaktierungen festgestellt werden. Somit deutete sich in diesem Fall der dauerhafte Ausfall an.

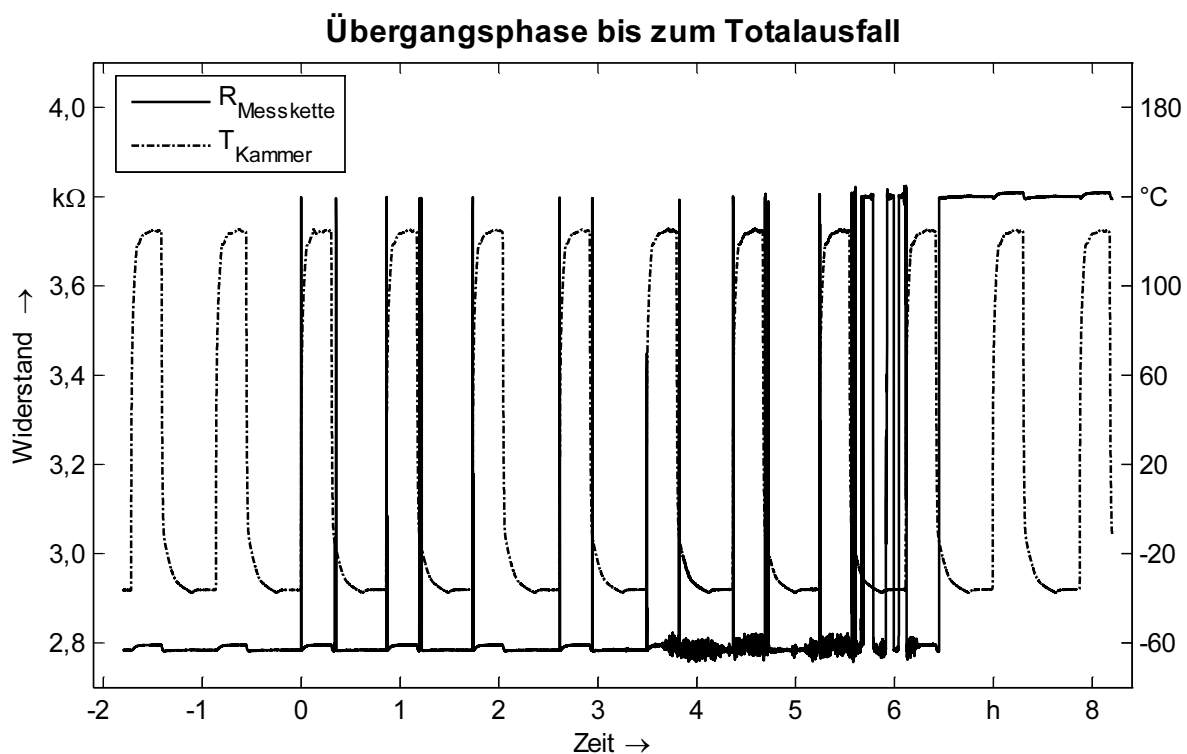


Bild 26: Ausfall in der Messkette bei dem Prüfling mit dem Parallelwiderstand von 1,0 k Ω

Eine Auswertung der ersten vollständigen Fehlfunktion ergab hier eine Unterbrechungsdauer von 1,5 s, die damit deutlich kürzer als bei dem zuvor analysierten Ausfall war. Bereits an dieser Stelle der Auswertung, die parallel zu der laufenden Versuchsreihe erfolgte, konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass jeder Ausfall ein unterschiedliches elektrisches Verhalten aufwies. Eine Analogie findet sich bei der Analyse von Schliffbildern an Area-Array-Bauelementen. Die Ausbildung von Rissen kann in der Regel an den Grenzflächen von Lotstelle zu Bauelement beobachtet werden, allerdings sind die Rissverläufe und die Größe der Risse bei jedem Objekt verschieden.

Ein ganz anderes Bild zeigte sich bei den beiden Prüflingen, die gegen Ende der Untersuchung ausfielen. Der in Bild 27 dargestellte Abschnitt zeigt den Widerstandsverlauf

der Messkette wenige Zyklen nachdem der Wert von $9,3\text{ k}\Omega$, der in Zusammenhang mit den drei bereits zuvor ausgefallenen Prüflingen das Versagen der beiden Objekte mit den Parallelwiderständen $2,2\text{ k}\Omega$ und $3,3\text{ k}\Omega$ eindeutig nachwies, erstmals erreicht wurde. Bei dem ersten Temperaturwechsel in Bild 27 kontaktierten offensichtlich wieder beide Objekte. Anschließend konnte zunächst ein eindeutiger Anstieg um $2,2\text{ k}\Omega$ und danach eine ebenso deutliche Stufe mit $3,3\text{ k}\Omega$ identifiziert werden. Dies zeigte, dass beide Prüflinge in dem dargestellten Abschnitt unabhängig voneinander elektrisch versagten und wiederkontaktierten. Mit dem Erreichen des Endes des Zyklus versagten beide Objekte, die allerdings bei dem nachfolgenden Temperaturwechsel fast simultan wieder elektrischen Durchgang hatten (Stufe mit $5,5\text{ k}\Omega$). Der zeitliche Versatz zwischen den beiden Prüflingen betrug dabei $8,8\text{ s}$.

Überlagerung zweier Ausfälle

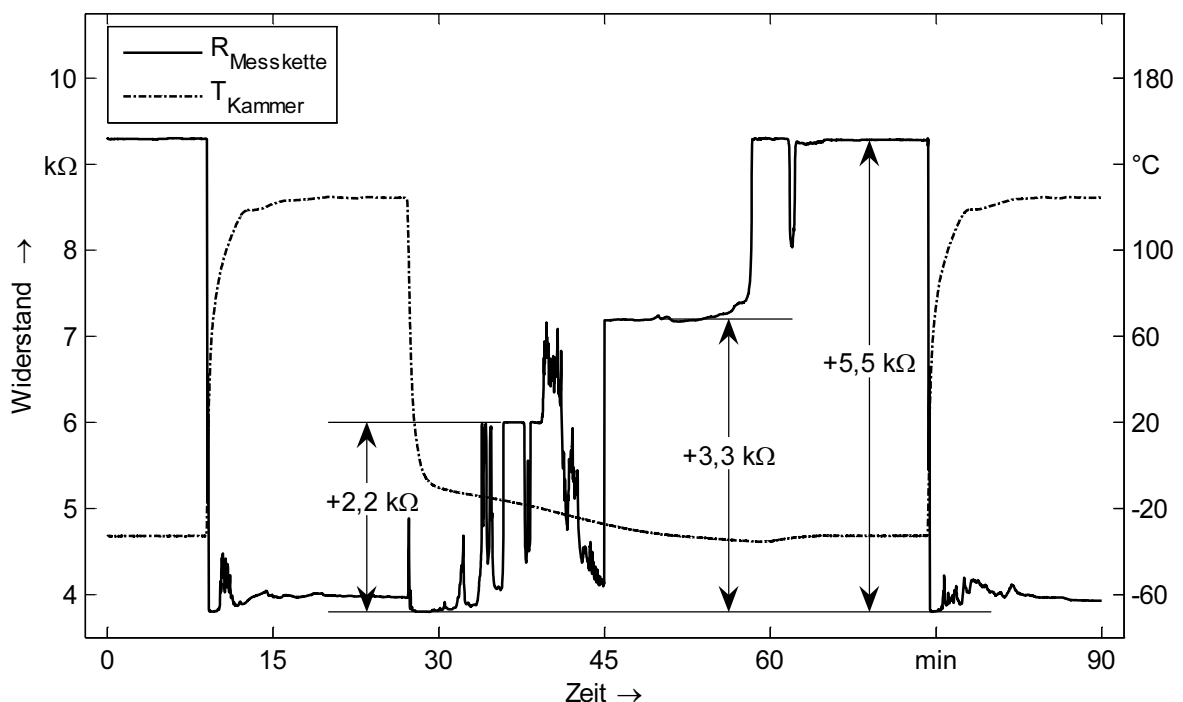


Bild 27: Überlagerung von zwei Ausfällen der Prüflinge mit den Parallelwiderständen $2,2\text{ k}\Omega$ und $3,3\text{ k}\Omega$

Der beobachtete Effekt, dass bei zeitlich späteren Ausfällen der Übergang bis zu einem dauerhaften Versagen erheblich mehr Zeit bzw. Zyklen benötigte, konnte auch bei anderen Messketten festgestellt werden. Anhand der Widerstandsverläufe ergab sich die besondere Problematik für die Auswertung der Versuche. Das Ziel, eine genaue Bestimmung des Zeitpunkts des ersten Versagens eines einzelnen Objektes, konnte bei den ersten drei Ausfällen einfach erreicht werden. Bei den beiden nachfolgenden Versagensfällen war es notwendig, die Messwertverläufe manuell zu begutachten. Dabei wurden die ersten Anzeichen von Unregelmäßigkeiten, die sich in einem Anstieg um einen nicht eindeutigen Wert zeigten, dem nächsten Sprung um einen Wert aus der Widerstandsreihe E12 zugeordnet.

Das präsentierte Konzept für eine Erhöhung der Prüflingsanzahl in Bezug auf die notwendige Anzahl von Messkanälen konnte mit Erfolg umgesetzt werden. Gegenüber einer Einzelüberwachung trat jedoch die Problematik auf, dass aufgrund des abschnittsweisen rauschartigen Verhaltens der Widerstandswerte eine eindeutige Identifizierung bei quasi zeitgleichen Ausfällen nur mit hohem Aufwand möglich war. Dabei ist eine Fehlzurordnung um wenige Zyklen nicht auszuschließen. Eine Überprüfung der Verdrahtung des Messaufbaus zeigte bezüglich des Rauschens keine Auffälligkeiten. Der Grund für die undefinierten Schwankungen bis zur Höhe des Werts des Parallelwiderstands konnte somit eindeutig den Prüflingen zugeordnet werden. Mit der Auswertung von Schliffbildern nach Versuchsende konnte eine massive Rissbildung durch die Anschlussstellen der Area-Array-Bauelemente als Ursache für das elektrische Versagen nachgewiesen werden.

3.3 Erweiterte Auswertungen von Zuverlässigkeitsuntersuchungen

In der industriellen Praxis werden im Rahmen von Qualifizierungsprozessen für neu einzuführende Bauelemente unter anderem Prüfungen mit beschleunigten Alterungsverfahren durchgeführt, die für eine Zuverlässigkeitsbestimmung herangezogen werden. Dazu werden in der Regel eine geeignet große Anzahl von Daisy-Chain-Bauelementen verwendet und das Auftreten des elektrischen Versagens untersucht. Bei einer grundsätzlichen Einsatzqualifizierung eines neuen, komplexen Bausteins, beispielsweise eines QFPs oder BGAs mit kleinem Anschlussraster, wird oftmals das Erreichen einer Mindestzyklenzahl gefordert. Die Übertragung einer so ermittelten Mindestlebensdauer in eine reale Lebensdauer gestaltet sich aber äußert schwierig, da die Einsatzbedingungen und die daraus resultierenden Belastungen im Allgemeinen vorab nicht bestimmt werden können. Weiterhin werden die Komponenten während einer Temperaturschock-Prüfung weitaus höheren Belastungen ausgesetzt als im späteren Feldeinsatz. Das Ziel der Prüfung ist es, mit den verstärkten äußeren Einflüssen, die Lebensdauer stark beschleunigt nachzubilden, ohne dass sich der Schädigungsmechanismus ändert. Die Aussagekraft einer Untersuchung, dass zum Beispiel ein BGA 1.500 Temperaturzyklen unbeschadet übersteht, ist aber beschränkt, wenn kein Vergleichsbaustein zur Verfügung steht oder aber ein anderes Bauelement, zum Beispiel aufgrund von Abkündigungen des Lieferanten, ersetzt werden soll. Im letzteren Fall tritt häufig die Situation auf, dass die neue Komponente eine andere Geometrie bezüglich der Anschlussstrukturen (z. B. BGA ersetzt QFP), eine veränderte Anschlusszahl oder ein anderes Rastermaß aufweist.

Ein anderes Bild ergibt sich, wenn verschiedene Aufbauvarianten vergleichend bewertet werden sollen (siehe Abschnitt 3.1). Solche Varianten können sich hinsichtlich vieler Aspekte unterscheiden:

- Komponenten mit gleicher Spezifikation verschiedener Lieferanten,
- Prozessparameter (z. B. Rakeldruck, Bestückkraft, Lötprofil),
- Variationen der eingesetzten Materialien (Schablonengeometrie, Padlayout).

Für jede Variante kann eine so genannte charakteristische Lebensdauer ermittelt werden. Hierzu muss der Stichprobenumfang sinnvoll gewählt werden. Dieser Aspekt wird im Abschnitt 3.3.2 detailliert betrachtet. Bei elektronischen Komponenten und Produkten hat sich dabei die Weibull-Analyse als geeignetes Verfahren etabliert [68]. Voraussetzung für diese Analyse ist die Bestimmung der Ausfallzeitpunkte jeder einzelnen Komponente. Die Konzeption von entsprechenden Versuchsaufbauten zur zyklengenauen Ermittlung des Versagens wurde im vorangegangenen Abschnitt 3.2 ausführlich beschrieben. In diesem Abschnitt wird die Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer T_c einer Versuchsvariante anhand von den ermittelten Ausfallzeitpunkten näher untersucht. Insbesondere werden die bisher wenig betrachteten Aspekte des Einflusses des Stichprobenumfangs und der Prognose von T_c während der oftmals über Wochen laufenden Temperaturschock-Prüfungen anhand von geeigneten Software-Algorithmen intensiv betrachtet. Dabei stehen weniger die mathematischen Grundlagen als die Praxisrelevanz bei der Anwendung dieser Hilfsmittel im Mittelpunkt.

3.3.1 Weibull-Analyse für elektronische Komponenten

Das Ziel einer Ausfallanalyse für eine definierte Aufbauvariante ist die Bestimmung von wenigen, charakteristischen Kenngrößen, mit denen eine Quantifizierung des Versagensverhaltens bzw. der Zuverlässigkeit erfolgen soll. Ausgehend von wissenschaftlichen Untersuchungen zur Werkstoffermüdung wurde von dem schwedischen Forscher Waloddi Weibull im Jahr 1939 die nach ihm benannte Weibull-Verteilung erfolgreich angewendet. [135]

Zunächst wird jedoch das Ausfallverhalten von technischen Produkten im Allgemeinen betrachtet, das in einem ersten Schritt qualitativ mit der weithin bekannten Badewannenkurve beschrieben wird. In dieser Kurve wird die Ausfallrate λ über der Zeit aufgetragen. In Bild 28 ist der typische, zeitliche Verlauf dargestellt.

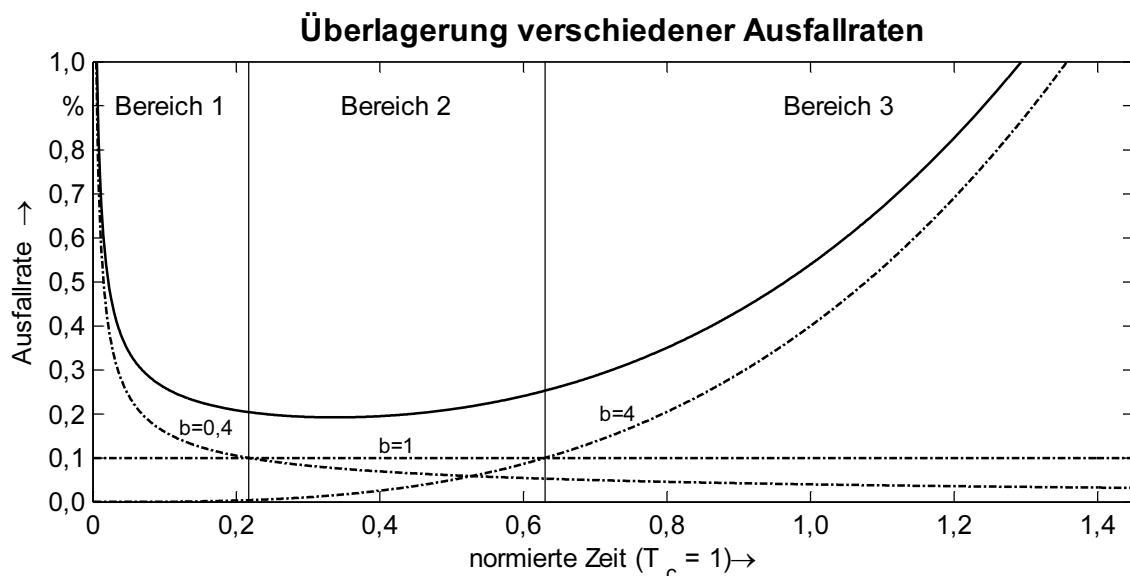


Bild 28: Zeitlicher Verlauf und Überlagerung von Kurven für drei charakteristische Ausfallraten (Badewannenkurve)

Die Gesamtkurve ergibt sich als eine Überlagerung von drei Einzelkurven, die verschiedene Ausfallmechanismen widerspiegeln. In den drei signifikanten Bereichen dominiert jeweils eine der Teilkurven. Die bei der Normierung verwendete charakteristische Lebensdauer T_c und die eingetragenen Parameter b für die Ausfallsteilheit, werden bei den nachfolgenden Erläuterungen zu der Weibull-Analyse eingehend erläutert. Die Bedeutung der einzelnen Abschnitte für die Aufbau- und Verbindungstechnik von elektronischen Baugruppen wird nachstehend eingehend betrachtet.

Der Bereich 1 beschreibt Frühausfälle, deren Ursache in der Regel versteckte Fertigungsmängel sind. Das bekannteste Beispiel hierfür ist die kalte Lötstelle, bei der zunächst eine elektrische Verbindung vorhanden ist. Die mechanische Ausbildung der Kontaktstelle ist allerdings so unzureichend, dass diese bei geringer äußerer Belastung versagt. Bei der Durchführung von Temperaturschockprüfungen können zwei Fälle auftreten: Falls nur einzelne Bauelemente von kalten Lötstellen betroffen sind, fallen diese so frühzeitig aus, dass diese sich eindeutig vom Verhalten der restlichen Prüflinge unterscheiden und identifiziert werden können. Für die Berechnung der charakteristischen Lebensdauer können diese Ausfallzeitpunkte unberücksichtigt bleiben, da die Ermittlung der Zyklenfestigkeit nicht von Abweichungen in den Herstellungsprozessen verfälscht werden soll. Treten allerdings Fertigungsmängel bei einer großen Zahl der Prüflinge auf, so besteht die Gefahr der Fehlinterpretierung der gesamten Untersuchung. Bei einer vergleichenden Prüfung von verschiedenen Aufbauvarianten sind die Ergebnisse immer dann mit besonderer Sorgsamkeit zu betrachten, wenn eine Alternative ohne stichhaltige Erklärung eine sehr niedrige Zuverlässigkeit aufweist. In einem solchen Fall ist eine Wiederholung der Versuchsreihe in Betracht zu ziehen.

Der Abschnitt mit einer nahezu konstanten Ausfallrate (Bereich 2) ist gekennzeichnet von zufälligen Ausfällen, die beispielsweise durch unvorhersehbare äußere Einflüsse auftreten. Bei Temperaturschock-Belastung im Labor kann dieser Bereich in der Regel vernachlässigt werden, da der Prüfaufbau im Allgemeinen sorgsam vorbereitet wird. Weiterhin besteht die Möglichkeit, solche Ausfälle mit der Weibull-Analyse von den Versagensfällen des Bereichs 3 zu trennen. Dieser letzte Bereich der Verschleiß- oder Spätausfälle ist derjenige, der bei der Analyse der Lötstellenfestigkeit von größtem Interesse ist. Die Ursache für diese Ausfälle liegt in der Rissbildung in der Verbindungsstelle, die sich stetig fortsetzt und letztendlich zu einem elektrischen Versagen führt [104]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein solches Verhalten zunächst nicht dauerhaft auftritt, wie im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde.

Der entscheidende Vorteil der Anwendung der Weibull-Verteilung ist, dass alle drei zuvor erläuterten Bereiche mit unterschiedlichen Ausfallverhalten berücksichtigt werden können. Die Ausfallwahrscheinlichkeit gibt an, wie groß die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls eines Objekts beziehungsweise der Anteil von ausgefallenen Prüflingen zum Zeitpunkt t ist. Für eine weibullverteilten Größe gilt (Gl. 7):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_c}\right)^b} \quad (\text{Gl. 7})$$

Dabei werden die charakteristische Lebensdauer mit T_c und die Ausfallsteilheit mit b bezeichnet. Die Ausfallrate $\lambda(t)$ gibt die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls eines Objekts zum Zeitpunkt t an, bzw. mathematisch korrekt im Zeitraum zwischen t und $t+dt$ (mit $dt \rightarrow 0$). Die Ausfallrate ergibt sich aus der Verteilungsfunktion gemäß (Gl. 8), wobei die Ausfalldichtfunktion $f(t)$ die erste Ableitung der Verteilungsfunktion $F(t)$ ist.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{F'(t)}{1-F(t)} = \frac{-e^{-\left(\frac{t}{T_c}\right)^b} \cdot (-b) \cdot \left(\frac{t}{T_c}\right)^{b-1} \cdot \frac{1}{T_c}}{e^{-\left(\frac{t}{T_c}\right)^b}} = \frac{b}{T_c} \cdot \left(\frac{t}{T_c}\right)^{b-1} \quad (\text{Gl. 8})$$

Aus der (Gl. 7) ergibt sich die Bedeutung der charakteristischen Lebensdauer. Diese gibt unabhängig von der Ausfallsteilheit b an, dass zum Zeitpunkt T_c die Ausfallwahrscheinlichkeit 63,2 % beträgt (Gl. 9).

$$F(T_c) = 1 - e^{-\left(\frac{T_c}{T_c}\right)^b} = 1 - e^{-1} \approx 0,632 = 63,2 \% \quad (\text{Gl. 9})$$

Weiterhin kann mit der Berechnung der ersten Ableitung der Ausfallrate das Monotonieverhalten einer Weibull-Verteilung einfach verifiziert werden (Gl. 10). In der Praxis bedeutet dies für komplexe Objekte, dass meistens eine Überlagerung von Weibull-Verteilungen mit verschiedenen Ausfallsteilheiten b vorzufinden ist.

$$\lambda'(t) = \frac{b}{T_c} \cdot (b-1) \cdot \left(\frac{t}{T_c}\right)^{b-2} \cdot \frac{1}{T_c} = (b-1) \cdot \frac{b}{T_c^b} \cdot t^{b-2} \begin{cases} < 0 & \text{für } b < 0 < 1 \\ = 0 & \text{für } b = 1 \\ > 0 & \text{für } b > 1 \end{cases} \quad (\text{Gl. 10})$$

Bei einer Zuverlässigkeitsuntersuchung mittels Temperaturschock-Belastung ist jedoch der Fehlermechanismus der Rissbildung in den Lotstellen von vorrangigem Interesse. Falls die Auswertung ergibt, dass die Ausfallzeitpunkte sich gut mit einer Weibull-Verteilung beschreiben lassen und dabei $b > 1$ gilt, kann die Annahme getroffen werden, dass kein zusätzlicher Ausfallmechanismus vorliegt. In der Literatur findet man neben der Verteilungsfunktion mit den beiden Parametern T_c und b (Gl. 7) auch eine drei-parametrische Verteilungsfunktion, die als dritten Parameter noch eine Größe t_0 für eine ausfallfreie Zeit zu Beginn der Lebensdauer der Prüfobjekte aufweist. In der Praxis der Zuverlässigkeitsuntersuchungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik kann mit $t_0 = 0$ gerechnet werden. Somit wird im Nachfolgenden nur die zwei-parametrische Variante betrachtet.

Die hohe Akzeptanz der Weibull-Analyse ist auch dadurch begründet, dass mit Hilfe des sogenannten Lebensdauernetzes sich die Kenngrößen T_c und b relativ einfach graphisch bestimmen lassen. Anhand von Bild 29 wurde die Vorgehensweise an einem Beispiel einer Prüfung von $N = 72$ hochminiaturisierten Bauelementen, von denen 70 im

Prüfzeitraum ausfielen, verdeutlicht. Im ersten Schritt wurden die vorhandenen Ausfallzeitpunkte aufsteigend sortiert, so dass $T_j \leq T_{j+1}$ gilt. Dementsprechend wurde anschließend eine Häufigkeitssumme H_j zugeordnet. Die Berücksichtigung eines statistischen Vertrauensniveaus von 50 % für die aufsteigend geordneten Ausfallzeitpunkte führt bei einem Stichprobenumfang N zu (Gl. 11). Da aus dieser Gleichung in der Regel H_j nicht geschlossen bestimmt werden kann, wird in der Praxis auf Wertetabellen zurückgegriffen oder ein Näherungswert nach (Gl. 12) verwendet, der sich gut bewährt hat [104]. Eine rechnergestützte Auswertung erlaubt eine Berechnung der Werte H_j mit einer iterativen Näherung. Bei den nachfolgenden Berechnungen wurden die Werte für H_j solange angenähert, bis sich für den linken Term in (Gl. 11) ein Wert von $0,5 \pm \varepsilon$ mit $\varepsilon = 10^{-7}$ ergab.

$$\sum_{k=j}^N \binom{N}{k} \cdot H_j^k \cdot (1-H_j)^{N-k} = 0,5 = 50 \% \quad (\text{Gl. 11})$$

$$H_j \approx \frac{j-0,3}{N+0,4} \quad (\text{Gl. 12})$$

Die so erhaltenen Wertepaare wurden in das Lebensdauernetz eingetragen, auf der Abszisse die Ausfallzeitpunkte T_j bzw. der Ausfallzyklus während der Temperaturschockprüfung und auf der Ordinate die zugehörigen Häufigkeitssummen H_j . Die Besonderheit des Lebensdauernetzes besteht in der Transformation der beiden Achsen. Durch die zweimalige Anwendung des natürlichen Logarithmus und durch Umformung ergibt sich aus der Gleichung für die Ausfallwahrscheinlichkeit (Gl. 7) die Darstellung nach (Gl. 13), die eine lineare Kurve ersten Grades beschreibt. Liegen nun die Wertepaare der Zuverlässigkeitsuntersuchung in dem Lebensdauernetz ($T_j \rightarrow \ln(T_j)$; $H_j \rightarrow \ln\{-\ln[1-H_j]\}$) annäherungsweise auf einer Geraden, so liegt eine Weibull-Verteilung vor.

$$\underbrace{\ln\{-\ln[1-F(t)]\}}_y = \underbrace{b \cdot \ln(t)}_{a_1 \cdot x} + \underbrace{[-b \cdot \ln(T_c)]}_{a_0} \quad (\text{Gl. 13})$$

Der Einsatz von Rechnerprogrammen erlaubt es, aus den vorhandenen Wertepaaren ($T_j; H_j$) eine Ausgleichsgerade mit den Koeffizienten a_1 und a_0 in einem transformierten Koordinatensystem zu berechnen. Die beiden Parameter der Weibull-Verteilung ergeben sich anschließend nach (Gl. 14):

$$b = a_1 \quad \text{und} \quad T_c = e^{\frac{a_0}{b}} = e^{\frac{-a_0}{a_1}} \quad (\text{Gl. 14})$$

In dem Bild 29 wurden die Ausfallzyklen der bereits zuvor erwähnten Versuchsreihe (Stichprobenumfang $N = 72$, 70 Ausfälle im Prüfzeitraum) eingetragen. Die vorliegenden Punkte konnten zunächst in drei Bereiche eingeteilt werden. Dem ersten Abschnitt wurden die drei frühesten Ausfälle zugeordnet, die deutlich unterhalb der Ausgleichsge-

rade lagen. Da die Anzahl dieser Punkte im Vergleich zu dem Stichprobenumfang gering war, wurde keine gesonderten Berücksichtigung in der Auswertung durchgeführt, da der Einfluss auf die Bestimmung der Parameter der Ausgleichsgerade als vernachlässigbar betrachtet werden konnte.

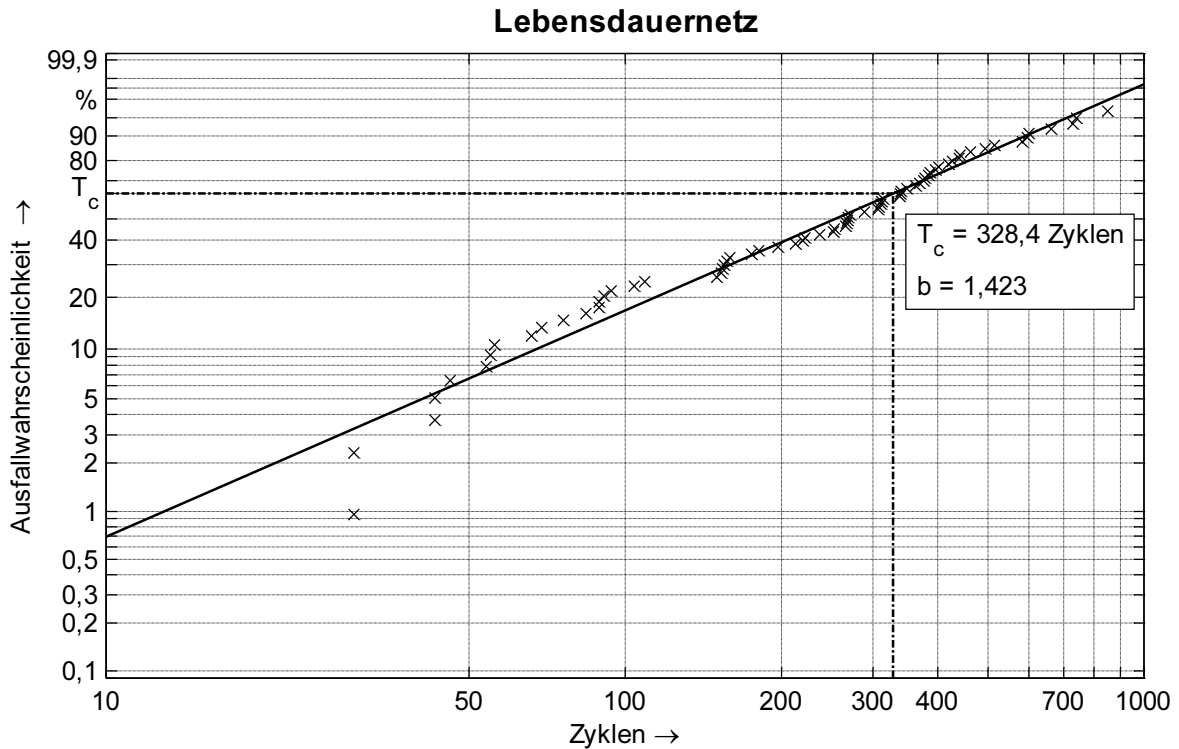


Bild 29: Lebensdauernetz zur Bestimmung der Weibull-Parameter anhand eines Beispiels mit dem Stichprobenumfang $N = 72$ (Ausfall von 70 Prüflingen im Prüfzeitraum)

Der zweite Abschnitt umfasste die nachfolgenden Punkte, die oberhalb der Geraden lagen (bis zum Zyklus 109). Hierbei handelte es sich nicht um Zufallsausfälle, da die Ausfallsteilheit b für die Werte in diesem Bereich über 1,5 lag. Die Fragestellung, ob hier ein anderer Ausfallmechanismus als für das Versagen der Punkte im dritten Bereich, der sich dadurch auszeichnete, dass die Punkte gut auf der Ausgleichsgeraden lagen, vorlag, konnte nicht beantwortet werden. Die Lücke zwischen den beiden letzten Bereichen von Zyklus 109 bis 150 könnte allerdings auch rein zufällig aufgetreten sein, mit der Konsequenz, dass es sich letztendlich um einen Bereich mit einem Ausfallmechanismus handelte.

Zusammenfassend war festzuhalten, dass in jedem Fall eine Analyse über die reine mathematische Berechnung der Weibull-Parameter charakteristische Lebensdauer und Ausfallsteilheit hinaus erfolgen sollte. Dies gilt insbesondere für Untersuchungen mit geringen Stichprobenumfängen. Weiterhin war aus dem Beispiel auch ersichtlich, dass bei der Anwendung der Weibull-Analyse nicht alle Prüfobjekte ausgefallen sein müssen. Eine Prognose für die Parameter T_c und b ist theoretisch bereits nach entdeckten Ausfällen zu mindestens zwei verschiedenen Zeitpunkten bzw. Zyklenzahlen möglich. Es

würde sich dabei allerdings um eine Extrapolation handeln, deren Aussagekraft kritisch zu bewerten ist. Dieser Aspekt wird im Abschnitt 3.3.3 näher untersucht.

3.3.2 Einfluss des Stichprobenumfangs

Die Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen erfolgt anhand einer Anzahl von Prüflingen. Die Festlegung dieses Stichprobenumfangs trägt wesentlich zu der Aussagekraft des Versuchs bei. Je höher die Anzahl der Testobjekte gewählt wird, desto geringer wird die statistische Unsicherheit des Ergebnisses. Andererseits stehen bei qualifizierenden Untersuchungen weitere Aspekte im Vordergrund, die Rückwirkung auf die Anzahl der Prüflinge haben können:

- Verfügbarkeit von geeigneten Testbauelementen mit Daisy-Chain-Struktur,
- Kosten für die Durchführung der Testreihe (Bauelemente, Leiterplatten, Nutzung von Temperaturschockschränken),
- Aufwand für einen Messaufbau und Auswertung bei zyklengenaue Bestimmung der Ausfallzeitpunkte.

Diese Faktoren gewinnen an Bedeutung, falls mehrere oder gar eine Vielzahl von Aufbauvarianten miteinander verglichen werden sollen. In einem solchen Fall müssen von jeder Variante eine definierte Anzahl von Testobjekten für eine Untersuchung herangezogen werden. Einen Anhaltspunkt gibt der IPC-9701A Standard [43]. Dort wird vorgeschlagen, dass für jede Variante 32 Prüflinge zu untersuchen sind. Darüber hinaus soll bei der Herstellung der Testbaugruppen jeweils ein Rückstellungsmuster berücksichtigt werden. Die Anwendung und damit die Festlegung des Stichprobenumfangs anhand dieser Empfehlung gibt dem Anwender einerseits in der Regel eine Sicherheit, dass die Untersuchung zu aussagekräftigen Ergebnissen führt. Weiterhin führt dieses Vorgehen zu einer formalen Absicherung gegenüber dem Auftraggeber, da ein Verweis auf einen IPC-Standard im Qualitätssicherungswesen eine sehr hohe Akzeptanz gewährleistet. Andererseits verbleibt eine Unsicherheit, ob eine geringere Anzahl von Prüflingen zu einem ähnlichen oder zumindest ausreichenden Ergebnis führen würde.

Im Nachfolgenden wird zunächst ein neuentwickelter Analyse-Algorithmus konzipiert, mit dessen Hilfe aus den Ergebnissen einer vorliegenden Untersuchung ein reduzierter Stichprobenumfang nachgebildet werden kann. Das Ziel hierbei war, auf Basis dieser Art der Datenauswertung einen $\pm 2\sigma$ Vertrauensbereich für die charakteristische Lebensdauer zu bestimmen. Dabei wurden wiederum dieselben Daten wie bei der zuvor beschriebenen Grundlagen der Weibull-Analyse verwendet.

Eine Veranschaulichung dieser Aufgabenstellung erfolgte durch eine Blockbildung. Im vorliegenden Fall waren die insgesamt $N = 72$ Objekte auf sechs Leiterplatten mit jeweils zwölf Bauelementen verteilt. Alle Prüflinge auf einer Leiterplatte flossen immer in ihrer Gesamtheit in die Analyse ein. Somit wurden jeweils alle ganzzahligen Vielfachen von zwölf als Stichprobenumfang s ausgewertet. Eine Betrachtung des Stichprobenumfangs $s = 48$ erfolgte so, dass für alle Kombinationen für vier von sechs möglichen Leiterplatten die charakteristische Lebensdauern T_c und die Ausfallsteilheiten b ermittelt wurden. Der Binomialkoeffizient gibt die Anzahl aller möglichen Kombination für die

Wertepaare T_c/b an und errechnet sich bei der Auswahl von vier aus sechs möglichen Leiterplatten nach (Gl. 15) [106]:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \xrightarrow{n=6, k=4} \frac{6!}{4!2!} = \frac{6 \cdot 5}{2 \cdot 1} = 15 \quad (\text{Gl. 15})$$

In Bild 30 links wurden in einem ersten Schritt aus allen zuvor beschriebenen Möglichkeiten die jeweiligen Wertepaare T_c/b bestimmt und um den zentralen Punkt $T_{c,s=72} = 328,4$ Zyklen/ $b_{s=72} = 1,423$, der sich bei der Berücksichtigung aller verfügbarer Daten ergab, aufgetragen. In dem gezeigten Ausschnitt waren für die reduzierten Stichprobenumfänge $s = 60$ und $s = 48$ nahezu alle Punkte zu finden. Einzelne Kombinationen lagen aber auch für diese Fälle außerhalb des dargestellten Bereichs. Für die Stichprobenumfänge $s = 36$ und kleiner lagen nur noch wenige oder einzelne Punkte nahe dem Zentralpunkt. Ausgehend von diesen Daten wurden für jeden reduzierten Stichprobenumfang die Mittelwerte und Standardabweichungen aus allen Kombinationen bestimmt. Dies führte zu dem Diagramm in Bild 30 rechts, in dem neben den Mittelwerten die Bereiche $\pm 2\sigma$ aufgetragen wurden. Mit einer abnehmenden Anzahl von berücksichtigten Prüflingen, weitete sich der Bereich für die zu erwartende charakteristische Lebensdauer deutlich auf. Wäre für die Untersuchung lediglich eine Leiterplatte mit zwölf Komponenten geprüft worden, ließe sich ein 2σ -Vertrauensbereich zu $T_{c,s=12} = 326,9 \pm 137,7$ Zyklen bestimmen. Ob ein solch großer Unsicherheitsbereich akzeptabel ist, hängt von den Ergebnissen der Vergleichsvarianten ab.

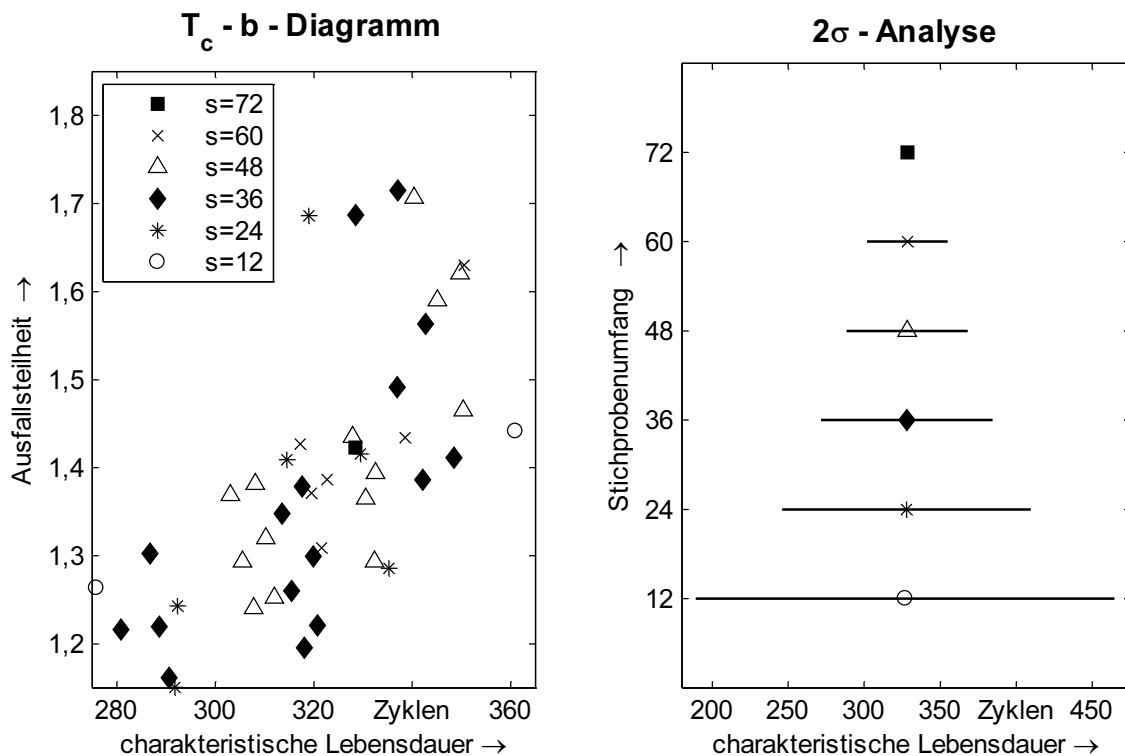


Bild 30: Weibull-Parameter bei unterschiedlich stark reduzierten Stichprobenumfängen und Bestimmung der zugehörigen 2σ -Bereiche für die charakteristische Lebensdauern

Eine solche blockweise Betrachtung ist immer dann sinnvoll, wenn der Gesamtumfang der Untersuchung N groß genug ist und sich die Prüflinge geeignet gruppieren lassen, wie dies im vorliegenden Fall, mit sechs Testschaltungsträger auf denen sich je zwölf einzelne Prüflinge befanden, war. Bei einer geringen Anzahl von Testobjekten können alle möglichen Kombinationen der reduzierten Stichprobenumfänge herangezogen werden.

Als Beispiel für die Verifikation des Vorgehens wurden die Ausfallzeitpunkte zweier Varianten aus einer Versuchsreihe zur Untersuchungen des Einfluss einer Eigenerwärmung herangezogen (siehe Abschnitt 4.2, Bild 49 rechts). Dabei wurden für jede der beiden Varianten sieben Prüflinge bis zum Ausfall belastet. Die genauen Ausfallzyklen werden in der nachfolgenden Tabelle 5 in aufsteigender Reihenfolge aufgelistet:

Variante 1	Variante 2
352 Zyklen	423 Zyklen
360 Zyklen	511 Zyklen
386 Zyklen	709 Zyklen
408 Zyklen	762 Zyklen
455 Zyklen	883 Zyklen
476 Zyklen	1134 Zyklen
591 Zyklen	1452 Zyklen

Tabelle 5: Ausfallzyklen der beiden Vergleichsvarianten mit jeweils sieben Prüflingen

Bei der Berücksichtigung aller sieben Testobjekte ergab sich ein Ergebnis mit einer eindeutig höheren charakteristischen Lebensdauer $T_{c,2} = 953$ Zyklen für die Variante 2 gegenüber der Variante 1 mit $T_{c,1} = 468$ Zyklen. Die Ergebnisse der Anwendung der 2σ -Analyse für die reduzierten Stichprobenumfänge $s = 2$ bis $s = 6$ wurden in Bild 31 graphisch aufgearbeitet.

Hieraus ergaben sich zwei wesentliche Erkenntnisse. Zunächst wurde deutlich, wie ein reduzierter Stichprobenumfang bei einem vergleichsweise niedrigen Gesamtumfang von $N = 7$ einen erheblichen Einfluss auf die charakteristische Lebensdauer hat. Bei der Auswahl von vier beliebigen Prüflingen wäre mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % $T_{c,2}$ zu 953 ± 270 Zyklen bestimmt worden. Dieser Unsicherheitsbereich war so erheblich, dass eine Festlegung des Stichprobenumfangs von $s = 4$ sicherlich zu überdenken wäre. Da es sich aber hier um eine vergleichende Untersuchung zweier Belastungsvarianten handelte, standen bei der Auswertung nicht die absoluten Mittelwerte und die Breite der 2σ -Bereiche im Vordergrund, sondern die relative Lage der 2σ -Balken der Vergleichsvarianten zueinander. Da in diesem Fall die beiden jeweiligen Enden jedoch erheblich auseinander lagen (143 Zyklen), konnte die Aussage getroffen werden, dass ein Stichprobenumfang von $s = 4$ ausreichend gewesen wäre. Eine weitere Reduzierung zeigte die Stärke des neuen Auswertungsverfahrens. Für einen Wert $s = 3$ betrug der Abstand lediglich noch 26 Zyklen. Ein solcher Stichprobenumfang wäre extrem grenz-

wertig und bedürfte weiterer Betrachtungen. Mit einer Festsetzung $s = 2$ trat eine Überlappung der beiden 2σ -Bereiche auf, der in dem Bild 31 mit einer verstärkten Linie gekennzeichnet wurde.

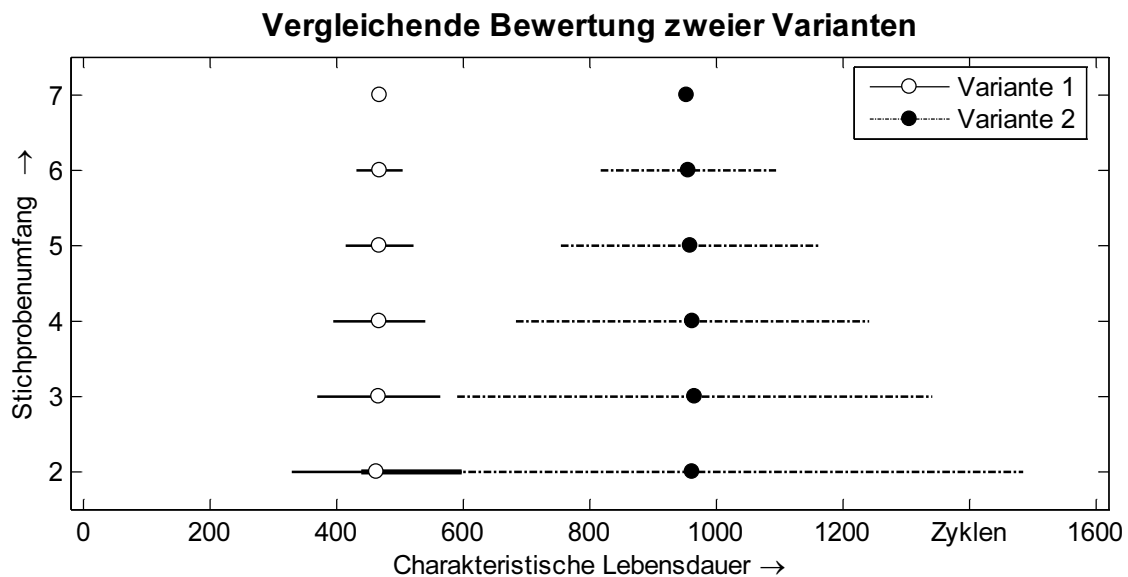


Bild 31: Betrachtung der 2σ -Analyse für reduzierte Stichprobenumfänge von zwei Vergleichsvarianten ($N = 7$)

Das vorgestellte Verfahren bietet eine neue Möglichkeit für die Bewertung des Stichprobenumfangs. Dabei ist allerdings einschränkend zu beachten, dass für die sinnvolle Anwendung die Ausfallzeitpunkte bzw. -zyklen nahezu vollständig vorliegen sollten. Eine absolute Aussage über eine geeignete untere Schranke für den Stichprobenumfang ist allerdings nicht möglich. Der Vorteil liegt in der vergleichenden Betrachtung von zwei oder mehreren Vergleichsvarianten. Mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens und der zugehörigen grafischen Darstellung der Ergebnisse kann auf einfache Weise beurteilt werden, ob zwei oder mehrere Aufbau- oder Belastungsalternativen signifikant unterschiedliche charakteristische Lebensdauern aufweisen. Das Kriterium hierbei ist, ob bereits bei einer geringen Reduzierung des Stichprobenumfangs die 2σ -Bereiche sich annähern beziehungsweise überlappen. In einem solchen Fall hätte die Untersuchung nur eine geringe Aussagekraft. Weiterhin ist bei solchen Versuchsreihen eine Unsicherheit zu berücksichtigen, die nicht immer mit einer mathematischen Berechnung von Kennzahlen ausgedrückt werden kann.

3.3.3 Prognose bei Langzeituntersuchungen

Die Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen kann im Falle von Temperaturschockprüfungen mehrere Wochen benötigen. Bei einer Haltezeit von 15 Minuten nach Erreichen einer definierten Temperaturschwelle für das obere und untere Temperaturniveau können in der Praxis 250 bis 280 Zyklen pro Woche durchgeführt werden. Auf der anderen Seite sind oft schnelle Ergebnisse wünschenswert, da so unter anderem Entwicklungszeiten verkürzt werden können. Mit dem Auftreten von unbefriedigenden Ergebnissen nach mehreren Wochen kann die Problematik auftreten, dass ein eventuell notwendiges Re-Design bezüglich der Aufbau- und Verbindungstechnik zeitlich nicht

mehr realisierbar ist. Daher ist es von besonderer Bedeutung, in wieweit sich mit Hilfe von bereits vorliegenden Ausfällen eines zu untersuchenden Stichprobenumfangs eine Prognose des endgültigen Ergebnisses möglich ist. Im Abschnitt 3.3.1 wurde aufgezeigt, dass für eine Weibull-Analyse das Vorliegen von zwei Ausfällen zur Berechnung einer Ausgleichsgeraden, und damit des Parameters der charakteristischen Lebensdauer, ausreichend ist.

Auf der Basis dieser Fragestellung wurde ein Auswerteverfahren entwickelt, das ausgehend von den bereits eingetretenen Ausfällen, eine charakteristische Lebensdauer bestimmt. Mit dem Vorliegen von zusätzlichen Versagenszeitpunkten wurde der bis dahin ermittelte Wert aktualisiert. Diese Methodik wurde zunächst wiederum an dem bereits bekannten Beispiel mit dem Stichprobenumfang $N = 72$ verifiziert. Die verstärkte Linie in Bild 32 zeigte die zugehörige Prognoselinie, bei der die charakteristische Lebensdauer über die lineare Prüfdauer aufgetragen wurde. Ein Auftragen der Ausfallnummer auf der Abszisse ist für die Aufgabenstellung ungeeignet, da in diesem Fall der Zeitpunkt für die zugehörigen Prognosewerte nicht hervorgeht. Mit der Verfügbarkeit der ersten Ausfallzeitpunkte wurde die charakteristische Lebensdauer zu einem Wert zwischen 110 und 150 Zyklen ermittelt, der sich im Anschluss auf den Zielwert $T_c = 328$ Zyklen annäherte. Ab einer Prüfdauer von 289 Zyklen ergab die Prognose bereits Werte, die nur noch maximal $\pm 4,2$ Zyklen von der endgültigen Lebensdauer entfernt lagen.

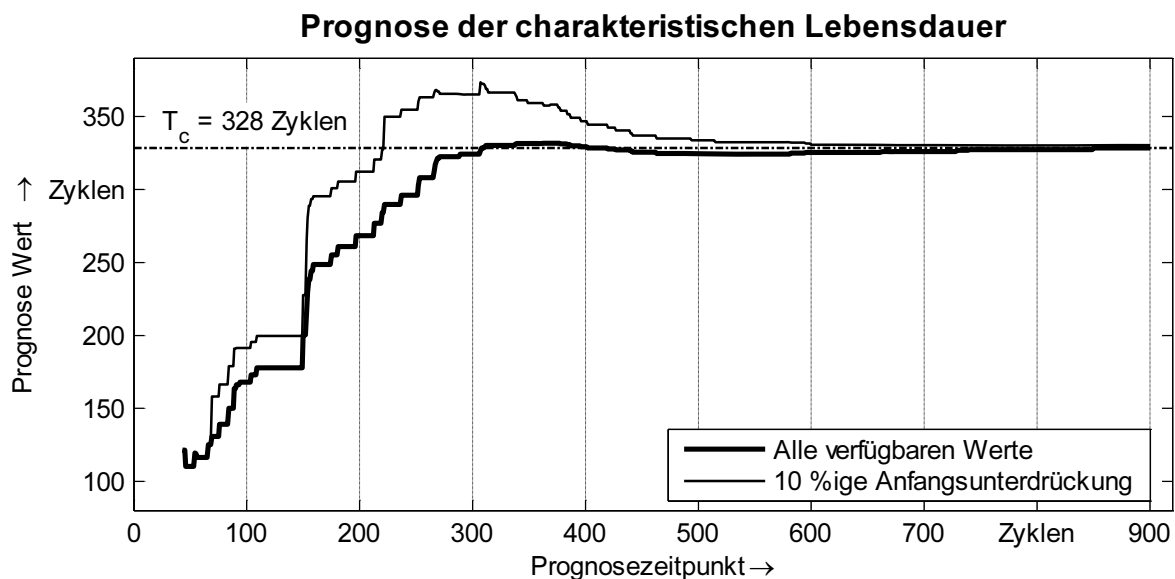


Bild 32: Prognose der charakteristischen Lebensdauer bei einem Stichprobenumfang $N = 72$ und der zugehörige Verlauf für eine 10 %ige Anfangsunterdrückung

Eine solche geringe Schwankungsbreite ist in der Regel von ausreichender Genauigkeit. Dabei ist allerdings einschränkend zu berücksichtigen, dass bei einer Prognose parallel zu einer laufenden Versuchsreihe der weitere Verlauf der Prognoselinie nicht bekannt wäre. In dem vorliegenden Beispiel würde ein Versuchsbetreuer bei der Betrachtung des sich entwickelnden Verlaufs erst nach ungefähr 440 Zyklen den weiteren, nahezu konstanten Verlauf erwarten können. Zu diesem Zeitpunkt war bereits ein Versagen von 82 % der Prüflinge eingetreten, so dass der zeitliche Gewinn bei der Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer als eher gering zu bewerten war.

Die Gründe für die starken Abweichungen zu Beginn der Prognose ergaben sich aus der Weibullanalyse selbst. Bei der Betrachtung der Ausfallzeitpunkte im Lebensdauer-netz (Bild 29) war zu erkennen, dass die Abstände auf der Ordinate von zwei benachbarten Punkten anfänglich sehr viel größer als bei späten Ausfällen waren. Deshalb ergaben sich signifikante Änderungen für die Lage der Ausgleichsgeraden, und damit für die prognostizierte charakteristische Lebensdauer, falls nur wenige Punkte verfügbar waren. Ein Ansatz, um diesen Effekt entgegen zu wirken, bestand darin, dass ein prozentualer Anteil der Punkte mit den niedrigsten Ausfallzyklen nicht in die Berechnung mit einging. In dem Bild 32 wurden ergänzend zu der ursprünglichen Prognose der Verlauf der Berechnungen mit einer sogenannten 10 %igen Anfangsunterdrückung aufgetragen. Hier bedeutete 10 %, dass von den verfügbaren Ausfallzeitpunkten die ersten 10 % der Werte vernachlässigt wurden. Sobald zehn Werte verfügbar waren, wurde der erste Ausfall ignoriert, nach 20 Ausfällen die ersten beiden Werte und so weiter. Der erwartete Effekt stellte sich bei anfänglichen Prognosezeitpunkten in der Form ein, dass diese Werte deutlich näher an dem Zielwert von $T_c = 328$ Zyklen lagen. Im weiteren Verlauf trat dann ein deutliches Überschwingen auf, wie es aus der Regelungstechnik für einen PT_2 Regler bekannt ist [62]. Bei der Vorhersage der charakteristischen Lebensdauer war dieses Verhalten jedoch ungeeignet für eine frühere Abschätzung des Zielwerts gegenüber der ursprünglichen Prognose. Ein weiterer Prognoseverlauf mit einer Anfangsunterdrückung von 20 % zeigte ein noch größeres Überschwingen. Eine Verbesserung der Abschätzung konnte mit einer parallelen Betrachtung der beiden Kurven in Bild 32 erreicht werden. Nach dem Überschreiten des Maximums des Verlaufs mit der Anfangsunterdrückung und der Annäherung der beiden Kurven konnte zumindest eine grobe Vorhersage des Endwerts erfolgen.

Entsprechend den Untersuchungen zu dem Stichprobenumfang wurde das Verfahren zur Prognose auch mit den Daten der vergleichenden Untersuchung zur Eigenerwärmung (Tabelle 5) verifiziert. Zusätzlich wurde auch das numerische Verhältnis der beiden prognostizierten charakteristischen Lebensdauern aufgetragen (Bild 33), das bei der vollständigen Berücksichtigung aller Ausfallzeitpunkte 2,04 bei Versuchsende betrug.

Bei dieser Analyse für eine vergleichende Bewertung von zwei Varianten stand die Frage im Mittelpunkt, ab welchem Zeitpunkt das relative Verhältnis der prognostizierten charakteristischen Lebensdauern vorhersagbar war. Mit dem Ausfall des dritten Prüflings der Variante 2 (Zyklus 709) stabilisierte sich der Prognosewert für $T_{c,2}$. Ab diesem Zeitpunkt war eine Aussage über das Zuverlässigkeitsverhältnis der beiden Varianten möglich. Dies galt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Prognosewerte bei allen ausgewerteten Zuverlässigkeitsuntersuchungen mit späteren Prognosezeitpunkten prinzipiell anstiegen, wenn auch nicht immer streng monoton steigend, wie in dem gezeigten Beispiel für die Variante 2.

Das vorgestellte Verfahren für die Prognose zeigte deutlich, dass eine Vorhersage ab einem bestimmten Zeitpunkt bereits während der Versuchsdurchführung möglich war. Die Vorteile des Verfahrens ergaben sich besonders in vergleichenden Untersuchungen, bei denen im Idealfall der Stichprobenumfang höher gewählt werden sollte, als in

dem dargestellten Beispiel mit $s = 7$. Dennoch ergaben sich auch hier aussagekräftige Ergebnisse. Ein weitergehender Algorithmus mit der Unterdrückung von anfänglichen Ausfallzeitpunkten führte nicht zu einer besseren, zeitlich früheren Abschätzung der endgültigen charakteristischen Lebensdauer. Dennoch konnten damit zusätzliche Informationen gewonnen werden, die allerdings nicht unabhängig von weiteren Auswertungsverfahren genutzt werden konnten.

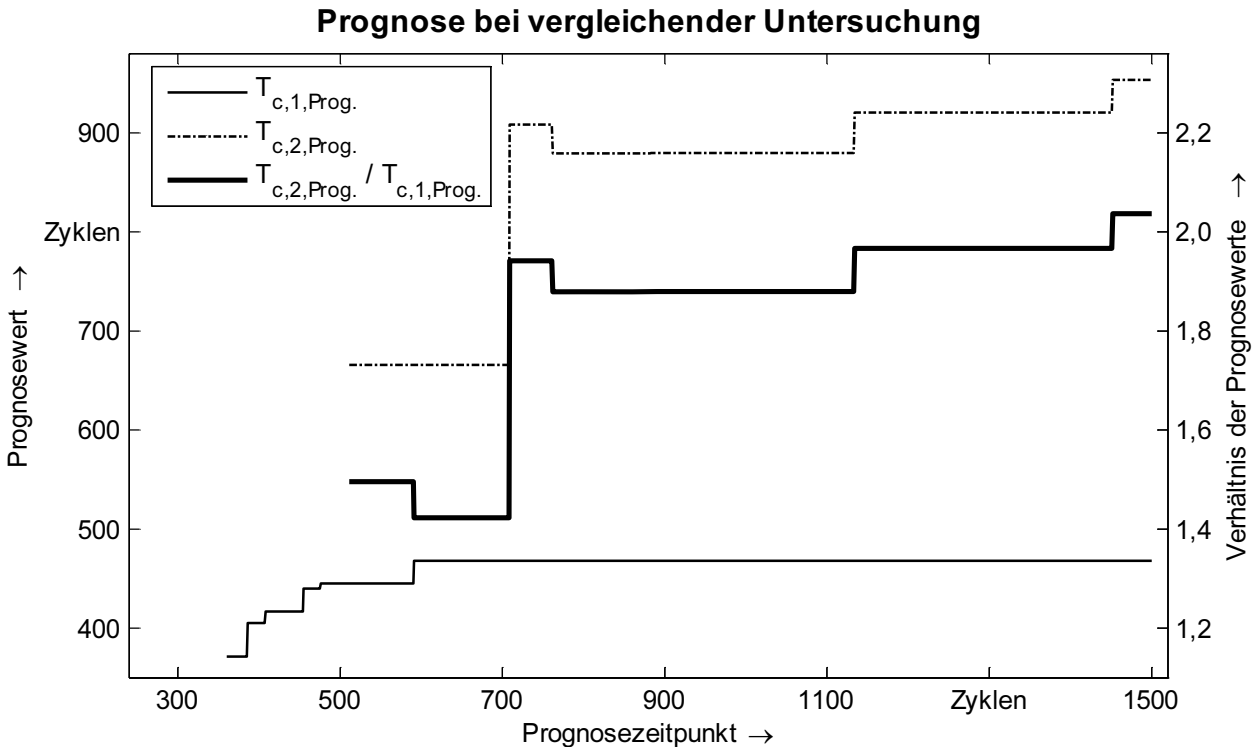


Bild 33: Verlauf der Vorhersage der charakteristischen Lebensdauern bei einer vergleichenden Untersuchung ($N = 7$) und deren numerisches Verhältnis

3.4 Zusammenfassung

Die Durchführung von Qualifizierungsprozessen mit beschleunigten Prüfverfahren kann in der Regel mit standardisierten Abläufen erfolgen. Ein wesentlicher Mangel ist dabei die Übertragbarkeit von Einzelergebnissen auf reale Einsatzbedingungen. Die Stärke solcher Verfahren kommt besonders bei vergleichenden Untersuchungen zum Tragen. Dabei können mit der Gestaltung von Versuchsreihen, mit verbesserten Aufbauten zur Online-Überwachung und mit ergänzenden Auswertungen zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wurden drei Einflussparameter hinsichtlich der Auswirkungen von Schablonen- und Padlayout Varianten mit insgesamt 18 Aufbaualternativen untersucht. Der besondere Anspruch der Versuchsreihe war der Einsatz von ergänzenden Analyseverfahren, die gegenüber der Verwendung von standardisierten Einzelverfahren zusätzliche Informationen generierten. Somit konnten alle Varianten mit zwei quantifizierbaren Kennzahlen bewertet werden, die die beiden Hauptbereiche Herstellungsprozess und Zuverlässigkeit abdeckten. Dabei konnte ein-

drucksvoll belegt werden, wie einzelne Parameter zu gegenläufigen Ergebnissen führten. Beispielsweise zeigte der Einsatz von dünnen Schablonen für Bauelemente mit miniaturisierten Anschlussstrukturen eine deutliche Verbesserung im Schablonendruck und damit der Ausbeute von kontaktierten Komponenten, aber auch eine signifikante Verringerung in der Zuverlässigkeit bei Temperaturschockprüfungen. Damit konnte dem Anwender eine belastbare Basis für die Festlegung einer Vorzugsvariante gegeben werden.

Im zweiten Abschnitt wurden die Potentiale einer Online-Überwachung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen aufgezeigt. Im Mittelpunkt stand dabei die Ermittlung der Aussagekraft von unterschiedlich komplexen Prüflings- und Messaufbauten. Somit konnte einerseits nachgewiesen werden, dass mit einer Einzelüberwachung der Testobjekte mit Hilfe einer Vierpunktmessung des elektrischen Durchgangswiderstands der zyklengenaue Ausfallzeitpunkt bestimmt werden kann. Auf der anderen Seite wurde ein Messaufbau präsentiert, der es erlaubte, mit einem Messkanal mit einer Zweipunktmessung zwölf Prüflinge simultan zu überwachen. Dabei musste allerdings die Auswertung der Messwertverläufe mit hoher Sorgfalt erfolgen und der gleichzeitigen Einschränkung, dass die Ausfallzeitpunkte nicht mehr exakt bestimmbar waren. Der Anwender kann auf der Basis der präsentierten Vorgehensweisen und Ergebnisse eine Entscheidung treffen, ob mit einem vereinfachten Messaufbau eine für ihn noch akzeptable Genauigkeit erzielt werden kann. Abschließend wurden für die Weibullauswertung ergänzende Auswertungsverfahren zu der Bestimmung des Einflusses des Stichprobenumfangs und ein Prognoseverfahren für die Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer bereits während noch nicht abgeschlossener Versuchsreihen präsentiert. Diese beiden Verfahren geben dem Anwender die Möglichkeit zusätzliche Informationen über seine Versuchsreihen zu erhalten und deren Aussagekraft besser einzuordnen.

4 Angepasste Prüfschritte und Messaufbauten zur Ermittlung der Zuverlässigkeit

Die Qualifizierung von Systemen, Prozessen und Komponenten in der Elektronikproduktion hat insbesondere im Rahmen des Qualitätssicherungswesens hohe Bedeutung. Mit der zunehmenden Komplexität, die sich beispielsweise in der Miniaturisierung von Komponenten, in einer steigenden Integrationsdichte auf Schaltungsträgern oder auch in veränderten Umgebungseinflüssen zeigen können, tritt die Bestimmung von Zuverlässigkeitsaspekten im Vorfeld des Gebrauchs immer weiter in den Vordergrund. Hierfür gibt es eine Reihe von Normen, Standards und Richtlinien, die für eine Qualifizierung wertvolle Hilfestellung geben. Bei einer Betrachtung von neuen Aspekten können allerdings bestehende Prüfabläufe nicht immer die gewünschten Ergebnisse liefern. In solchen Fällen müssen unter besonderer Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an die zu untersuchenden Prüflinge etablierte Verfahren in geeigneter Weise angepasst werden. Dazu kann es auch notwendig werden, die zugehörigen Versuchsaufbauten und Messverfahren ebenfalls zu modifizieren. In diesem Kapitel werden anhand von zwei Beispielen bedarfsgerechte Zuverlässigkeitsuntersuchungen konzipiert und exemplarisch durchgeführt.

Zunächst wird anhand eines innovativen Kontaktierungsverfahrens für spritzgegossene Schaltungsträger (engl. Molded Interconnect Devices - MID), dessen prinzipielle Funktionsfähigkeit bereits in einer Grundqualifizierung des Verbindungskonzeptes nachgewiesen war, tiefer gehende Prüfschritte entworfen. Entsprechend den Ausführungen zu beschleunigten Prüfverfahren im vorangegangenen Kapitel wird dabei als zentraler Aspekt eine vergleichende Bewertung von Aufbauvarianten, die in diesem Fall in einer unterschiedlichen Oberflächenmetallisierung der Kontaktflächen besteht, durchgeführt. Anschließend wird der Einfluss einer signifikanten Eigenerwärmung eines Bauelementes bei einem Einsatz unter hohen Umgebungstemperaturen auf die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen analysiert. Hierzu wird ein geeigneter Versuchsaufbau entworfen und die aufgezeichneten Online-Messdaten vielfältig ausgewertet. Dabei stehen nicht Aufbauvarianten im Mittelpunkt, sondern alternative Belastungsprofile, die zu einer unterschiedlich hohen Erwärmung der Prüflinge führen.

4.1 Bedarfsgerechte Qualifizierung eines innovativen Kontaktierungsverfahrens für MID-Baugruppen mit Folienflachleitern

Eine elektronische Baugruppe ist in einem komplexen System, wie es beispielsweise ein Automobil darstellt, eine Komponente, die erst im Zusammenwirken mit weiteren Funktionselementen, zum Beispiel Aktoren oder Sensoren, ihre Funktion erfüllen kann. Die Verbindung der einzelnen Teilsysteme erfolgt in der Regel mit mehradrigen Kabeln, die Signale und Versorgungsströme übertragen. Alternativ hierzu können Signaldaten zumindest teilweise drahtlos übertragen werden. Diese Methode findet zurzeit nur in geringem Umfang Einzug in mechatronische Systeme und erfordert eine ganz andere

Betrachtungsweise hinsichtlich der Datenintegrität [80]. Eine Alternative zu den bisher im Vordergrund stehenden Rundleiterstrukturen stellen Flachleiter dar. Die rechteckigen Leiterquerschnitte eröffnen das Potential für eine optimale Ausnutzung von beengten Einbauorten, wie etwa im Dachhimmel von Kraftfahrzeugen [48][58].

Weiterhin bietet der Einsatz der 3D MID-Technologie enorme Möglichkeiten, mechanische und elektrische Funktionen auf einem Schaltungsträger zu integrieren, und somit Bauräume optimal auszunutzen. Bei der Herstellung von dezentralen, mechatronischen Teilsystemen können spritzgegossene räumliche Schaltungsträger eine technische und wirtschaftliche Alternative darstellen. Die Realisierung einer elektrisch lösbaren Anbindung dezentraler MID-Baugruppen an die Kabelbaumstruktur auf Basis folienisolierter Flachleiter (engl. Flexible Flat Cable - FFC) bietet eine Chance, neue Lösungen zu entwickeln, die die Besonderheiten der beiden Verbindungspartner berücksichtigen. Hierzu entstand ein Verbindungskonzept, das drei wesentliche Merkmale aufweist, die sich grundlegend von bisherigen Lösungen unterscheiden [25]. Auf der MID-Baugruppe wird eine erhabene Kontaktzone realisiert, die im Spritzgussprozess ohne nennenswerten Mehraufwand hergestellt werden kann. Für die Kontaktierung der Flachleiter werden Kontaktfenster freigelegt und mit einer Oberflächenveredelung, zum Beispiel chemisch Zinn oder chemisch Nickel/Gold, versehen. Diese planaren Flächen werden von der gegenüberliegenden Seite mit Hilfe einer Anpressplatte auf die Kontakthöcker des MID-Schaltungsträgers kontaktiert, wobei eine langhubige Krafteinbringung eine dauerhafte, sichere Verbindung ermöglichen soll. Dieses Konzept zeichnet sich dadurch aus, dass die Anzahl der Schnittstellen und Zusatzteile im System sowie das Gewicht signifikant reduziert werden können. Gleichzeitig ist der Aufwand für die Montage aufgrund des Integrationsgrades geringer als bei konventionellen Lösungen. [9][27][28]

Die Etablierung des innovativen Verbindungskonzepts hängt unter anderem davon ab, in wieweit die Zuverlässigkeit im Vorfeld einer konkreten Anwendung nachgewiesen werden kann. In vorangegangenen Arbeiten wurde bereits eine Grundqualifizierung durchgeführt, bei der gezeigt werden konnte, dass das Kontaktierungsprinzip eine elektrische Verbindung zwischen dem Schaltungsträger und dem Flachleiter ermöglicht. Im Einzelnen wurden dabei mit einem vereinfachten Funktionsdemonstrator auf der Basis des in Bild 34 dargestellten Konzepts die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde die Kontaktkraft für zwei unterschiedliche Anpressplatten (1,5 mm Dicke/30 % Glasfaserfüllung und 2 mm Dicke/50 % Glasfaserfüllung) vor und nach thermischer Alterung (500 Zyklen Temperaturschocklagerung -40 °C/+80 °C) ermittelt. Das Ergebnis war die Festlegung der Geometrie und des Glasfaserfüllungsgrades für die Anpressplatte (Version 2 mm/50 %). Parallel dazu wurde nachgewiesen, dass sich der Kontaktwiderstand bereits bei einer Kontaktkraft von 0,4 N je Verbindungsstelle stabilisierte. Bei einer geforderten Mindestkraft von 2 N konnte dieser Aspekt als unkritisch betrachtet werden. Bei Untersuchungen zur Stromerwärmung konnte eine Stromträgfähigkeit von 5 A erzielt werden und dabei die Temperaturbelastung in der Kontaktzone als unkritisch angesehen werden. [21]

Konzept des multifunktionalen Demonstrators

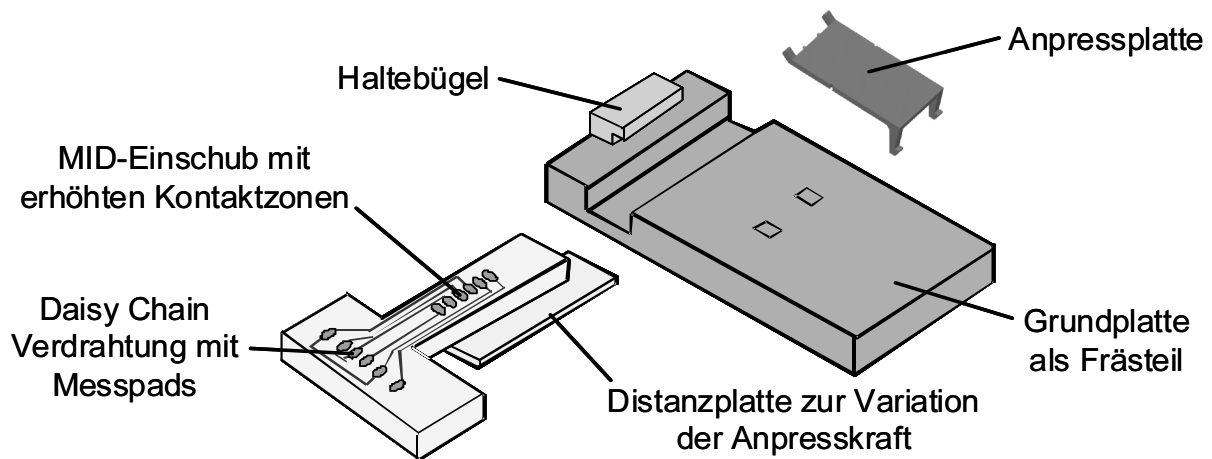


Bild 34: Konzeptionelle Entwicklung des Demonstrators unter Berücksichtigung konstruktiver und funktioneller Aspekte [21]

Abschließend wurden die Kontaktwiderstände bei der Verwendung der beiden alternativen Anpressplatten während der zuvor erwähnten Temperaturschocklagerung bestimmt. Auch hier zeigte nur die Vorzugsvariante einen zufriedenstellenden Verlauf. Mit den durchgeführten Arbeiten konnte anhand von experimentellen Untersuchungen der Nachweis geführt werden, dass das Verbindungskonzept für eine Direktverbindung von MID-Baugruppen und Folienleitern realisierbar ist. Die wesentlichen Ergebnisse dabei waren, dass die Temperaturbelastung an der Kontaktstelle selbst nicht der kritische Faktor ist, wie es häufig bei konventionellen Steckverbindersystemen der Fall ist. Weiterhin wurde deutlich, dass für eine dauerhafte Einbringung der Kontaktkraft die konstruktive Auslegung und die Materialauswahl, insbesondere vor dem Hintergrund einer Kunststoffvariante, besonders zu berücksichtigen sind.

Für den Nachweis der Praxistauglichkeit waren ergänzende Zuverlässigkeitsuntersuchungen notwendig, die unter besonderer Berücksichtigung der charakteristischen Eigenschaften des Verbindungssystems erfolgten. Ein Prüfprogramm mit standardisierten Abläufen wäre dabei nicht zielführend gewesen. In diesem Abschnitt werden nachfolgend die Entwicklung und die Umsetzung eines bedarfsgerechten Qualifizierungsprogramms dargestellt. Im Vordergrund standen dabei die Anpassung und Optimierung der einzelnen Untersuchungsschritte [111][114].

4.1.1 Konzeption von optimierten Prüfabläufen und Messaufbauten

Nachdem die Funktionsfähigkeit des innovativen Verbindungskonzepts prinzipiell nachgewiesen war, galt es durch ergänzende Zuverlässigkeitsuntersuchungen mit angepassten Aufbauvarianten die Praxistauglichkeit nachzuweisen. In einem ersten Schritt wurden die bisher erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse detailliert analysiert. Ein wesentliches Ziel ist dabei die Einbindung aller Aspekte und Komponenten. Bei der Betrachtung der vier Hauptkomponenten Grundkörper, MID-Körper, Anpressplatte und Flachleiter steht die Bestimmung der Variationspotentiale im Mittelpunkt. Die weiteren Qualifizierungsschritte sollten die unterschiedlichen Belastungsarten, die in der indus-

triellen Praxis auftreten, berücksichtigen. Dabei wurden die vier Hauptbelastungsarten Stromerwärmung, Temperaturschocklagerung, Wärmeauslagerung und erhöhte Temperaturbelastungen identifiziert (Bild 35).



Bild 35: *Variationspotenziale und Zielstellung für die Qualifizierung des Verbindungskonzepts [110]*

Bereits in der Phase der Grundqualifizierung ergab sich, dass die Kupferschichtdicke auf dem MID-Körper einen Mindestwert von 35 μm aufweisen sollte. Andernfalls war das Ziel der Stromtragfähigkeit von 5 A nicht einzuhalten. Eine weitere Erhöhung der Kupferschicht wurde nicht in Erwägung gezogen, da auch auf Standardbaugruppen diese Dicke üblicherweise verwendet wird. Bei der Realisierung von Feinleiterstrukturen, mit Leiterbahnbreiten und -abständen geringer als 200 μm , wird die Kupferschicht in der Regel auf 18 μm verringert. Solche Strukturen sind aber in der Regel für Maximalströme von deutlich weniger als 5 A konzipiert. Da alle vorangegangenen Untersuchungen mit Zinn(Sn)-Oberflächen in der Kontaktzone durchgeführt wurden, lag ein Vergleich mit der beständigeren Oberfläche Nickel/Gold (Ni/Au) nahe. Die Variation der Oberflächenmaterialien erfolgte sowohl für den MID-Körper als auch für die Kontaktfenster der Flachleiter, da vorzugsweise materialgleiche Werkstoffe für ein Kontaktierungssystem eingesetzt werden sollten. Weiterhin wurden neben den vorhandenen Grundkörpern aus Aluminium noch zwei Vergleichskörper aus Kunststoff (Polybutylenterephthalat - PBT) aufgebaut. Dieses Material zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus: gute Dimensionsstabilität, hohe Härte, Steifigkeit und Festigkeit sowie gute elektrische Kennwerte. Die nachteilige Eigenschaft der beschränkten Reflowlötauglichkeit war bei den qualifizierenden Untersuchungen für das Verbindungskonzept von untergeordneter Bedeutung [29].

Vor dem Beginn des bedarfsgerechten Qualifizierungsprogramms wurden für jede einzelne zu untersuchende Belastungsart die bisherigen Prüfabläufe und Messaufbauten hinsichtlich eines optimalen Erkenntnisgewinns kritisch hinterfragt und optimiert. Für die einzelnen Untersuchungen konnten in der Konzeptionsphase nachfolgende Ergebnisse gewonnen werden.

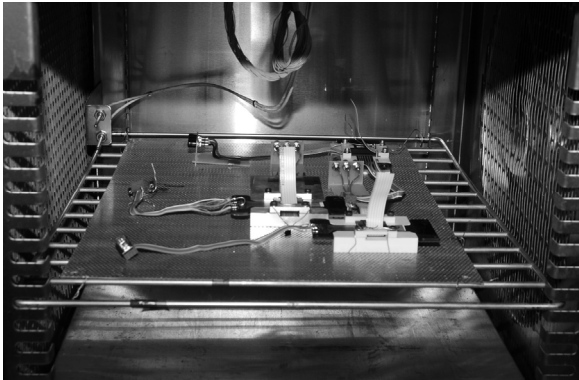
Stromerwärmungsverhalten

Im Rahmen der Grundqualifizierung wurden an jeweils zwei Messpunkten, an einer Kontaktstelle zwischen der MID-Baugruppe und dem Folienleiter sowie an einem Leiterzug abseits der Kontaktierungszone, die Temperaturen bei verschiedenen Strombelastungen ermittelt. An dem ersten Messpunkt hatte sich eine deutlich geringere Erwärmung eingestellt. Als Grund hierfür konnte eine sehr gute Wärmeabfuhr aus der Kontaktzone über den Flachleiter identifiziert werden. Die Fragestellung, wie sich das System verhält, wenn anstatt des Aluminiumgrundkörpers (Bild 35 oben rechts), der eine hohe thermische Leitfähigkeit aufwies, ein reines Kunststoffsystem eingesetzt wird, bleibt offen. Weiterhin war für eine endgültige Beurteilung des thermischen Verhaltens die Wärmeverteilung über das Gesamtsystem von Interesse. Somit wurde für die zweite Qualifizierungsphase ein Grundkörper aus PBT verwendet und in Ergänzung zu den beiden Thermoelementen Thermographieaufnahmen erstellt. Dies geschah vor dem Hintergrund Erkenntnisse über das thermische Verhalten des Gesamtsystems zu gewinnen.

Temperaturschocklagerung

Bei der vorangegangenen Versuchsreihe wurde das Verhalten der beiden verfügbaren Anpressplatten nach 500 Zyklen Temperaturschocklagerung ($-40\text{ °C}/+80\text{ °C}$) untersucht. Wie bereits bei den Untersuchungen zur Stromerwärmung zeigte nur die dickere Version (2 mm Dicke /50 % Glasfaserfüllung) ein zufriedenstellendes Ergebnis. Bei den weiteren Betrachtungen wird der Vergleich der beiden Oberflächenmetallisierungen Zinn und Nickel/Gold im Mittelpunkt stehen. Insbesondere soll dabei die zu erwartende bessere Zuverlässigkeit der letzteren Variante quantifiziert werden. Darüber hinaus wird auch ein Vergleich zwischen dem Aluminium- und dem Kunststoffgrundkörper erfolgen, da sich die metallische Version über einen Gebrauchszeitraum, aufgrund der sich einstellenden Relaxation des Kunststoffes, in der Regel günstiger verhält. Der Messaufbau wurde so verändert, dass die Durchgangswiderstände von insgesamt drei Demonstratoren mit jeweils sechs Kontaktstellen gemessen werden konnten. Die Anpassung der Demonstratoren erfolgte derart, dass eine Messung über einen festverdrahteten Stecker mit einem Vierpunkt-Widerstandsmessgerät erfolgen konnte (Bild 36). Die Dauer der Versuchsreihe wurde auf 1000 Zyklen erweitert, das Messintervall auf drei Offline-Messungen pro Woche festgelegt.

Prüflingsanordnung im Schockschrank



Festverdrahtete Offline-Messung

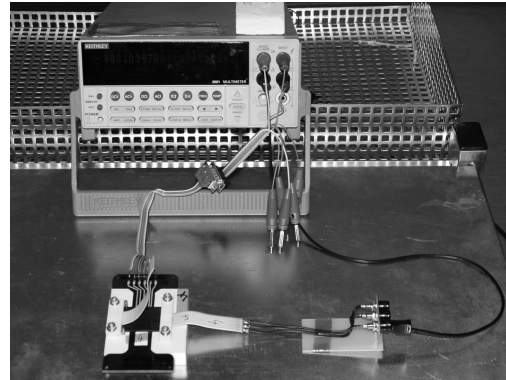


Bild 36: Optimierter Prüflingsaufbau für Temperaturschocklagerung (-40 °C/+80 °C) mit festverdrahteter Offline-Messung

Für die Bewertung dieses Qualifizierungsschrittes wurden zwei Kriterien festgelegt. Das erste Kriterium war der Anstieg des gemessenen Widerstandswerts gegenüber dem Ausgangswert (0 Zyklen). Die absoluten Messwerte waren von untergeordneter Bedeutung, da bedingt durch den Prüflingsaufbau die Messstrecken nicht identisch waren. Da der Widerstandsanstieg letztendlich auf eine Veränderung in der Kontaktzone zurückzuführen war, ergab der Widerstandsanstieg die quantifizierbare Größe mit der höchsten Aussagekraft. Bei der Auswertung der Werte wurde zusätzlich berücksichtigt, dass die elektrischen Widerstandswerte stark von der Umgebungstemperatur abhängig sind. Der maßgebliche lineare Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands für Kupfer beträgt $\alpha_{Cu,20\text{ °C}} \approx 0,39\text{ \%/K}$, bezogen auf eine Referenztemperatur von 20 °C [35]. Aus diesem Grund wurden die Prüflinge nach der Entnahme aus dem Temperaturschockschrank und vor den Zwischenmessungen der Raumtemperatur angepasst. Zusätzlich wurde während der Messungen die exakte Umgebungstemperatur präzise festgehalten. Anschließend fand eine Messwertkorrektur auf eine Vergleichstemperatur von 20 °C nach (Gl. 16) statt.

$$R_{20\text{ °C}} = \frac{R(T)}{1 + \alpha_{Cu,20\text{ °C}} \cdot (T - 20\text{ °C})} \quad (\text{Gl. 16})$$

Das zweite Kriterium war die optische Begutachtung der Oberflächen der Kontaktzonen auf dem MID-Körper und den Flachleitern. Im Vordergrund stand dabei der qualitative Vergleich der beiden Metallisierungen. Das Ziel hierbei war die Ermittlung der Grenzen für verzinnete Oberflächen, die bei Erfüllung der Anforderungen einer Nickel/Gold Beschichtung aus wirtschaftlichen Gründen vorzuziehen wäre.

Temperaturauslagerung

Die Qualifizierung der Auslagerung in feuchter Wärme ist neben der Temperaturschocklagerung die wesentliche Untersuchung für den Nachweis der Praxistauglichkeit [111]. Die standardisierten Versuchsbedingungen liegen bei einer Temperatur von 85 °C und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 %. Im Gegensatz zu der Temperaturschocklagerung kann hierfür ein Klimaschrank mit einer Kammer verwendet werden, der die

Temperatur und die Feuchtigkeit in sehr engen Grenzen regelt. Für die Auswertung bei dieser Untersuchung wurden wiederum die beiden Kriterien Widerstandsanstieg und optische Bewertung der Kontaktoberflächen herangezogen. Neben zwei komplett montierten Funktionsdemonstratoren wurden zusätzlich auch Einzelkomponenten für ergänzende Begutachtungen ausgelagert. Die montierten Aufbauten wurden fest mit Messkabeln für die Widerstandsmessung verbunden, die aus dem Klimaschrank herausgeführt wurden. Mit diesem Aufbau konnte während der gesamten Versuchsdauer von 1000 Stunden der Widerstandswert für die einzelnen Kontaktstellen werktäglich ermittelt werden. Alle Messungen fanden bei einer Temperatur von 85 °C statt, so dass keine Messwertkorrektur erforderlich war. Somit konnten bei dieser Versuchsreihe die Widerstandsmessungen ohne Unterbrechung des Prüfablaufs durchgeführt werden.

Erhöhte Temperaturbelastung

Das Kontaktierungsverfahren eignet sich besonders für die dezentrale Anbindung von MID-Baugruppen. Bei den bisherigen Betrachtungen wurde von Einsatzbedingungen ausgegangen, wie sie im Fahrzeuginnenraum gegeben sind. Ergänzend hierzu wurde eine zusätzliche Untersuchung konzipiert, die die Möglichkeiten des Verbindungsprinzips bei höheren Temperaturen aufzeigen sollte. Diese erfolgte mit einer zusätzlichen Temperaturschocklagerung, bei der die obere Grenztemperatur von +85 °C auf +125 °C angehoben wurde. Da der Demonstratoraufbau für diese Belastung nicht ausgelegt war, musste dieser angepasst werden. Anstatt des Kunststoffes (Polyamid 4.6) als Material für die Anpressplatte wurde eine Variante aus Federstahl eingesetzt. Die unterschiedlichen Dicken konnten mit einem ergänzenden FR4-Rahmen ausgeglichen werden. Für das ursprüngliche Isolationsmaterial der Flachleiter, einem thermoplastischen Polyurethanmaterial (TPU), wurde PBT verwendet. Bei dieser Untersuchung stand der zu erwartende Rückgang der Kontaktkraft während des Prüfzeitraums im Vordergrund.

4.1.2 Ergebnisse der angepassten Untersuchungen

Nach der Konzeptionierung von optimierten Prüfabläufen und Messaufbauten, wie sie zuvor beschrieben wurden, konnten anschließend die Detailuntersuchungen für die Qualifizierung des Kontaktierungsverfahrens erfolgen.

Stromerwärmungsverhalten

Mit der Verfügbarkeit von Grundkörpern aus PBT wurde zunächst ein Vergleich mit der bisherigen metallischen Variante durchgeführt. Die Herstellung der Leiterbahnstrukturen der MID-Körper erfolgte mit dem Verfahren Laser-Direkt-Strukturierung. Anschließend wurde eine Grundmetallisierung mit Kupfer von ca. 5 µm Dicke aufgetragen. Da es sich bereits in Vorversuchen zeigte, dass ein völliges Versagen der Leiterbahnen bei einem angelegten Strom von 1,5 A auftrat, wurde die Kupferschicht galvanisch auf eine Dicke von ca. 35 µm nachverstärkt [117]. Diese beiden Aufbauten wurden mit einer Stromstärke von anfänglich 0,5 A in Schritten von 0,5 A bis maximal 6 A belastet. Nachdem sich jeweils die thermischen Verhältnisse stabilisiert hatten, wurden die thermischen Verhältnisse mit Hilfe einer Thermographiekamera der Demonstratoren aufgenommen.

Das Bild 37 zeigt bei ausgewählten Stromstärken deutlich den Einfluss der Grundkörpermaterialien.

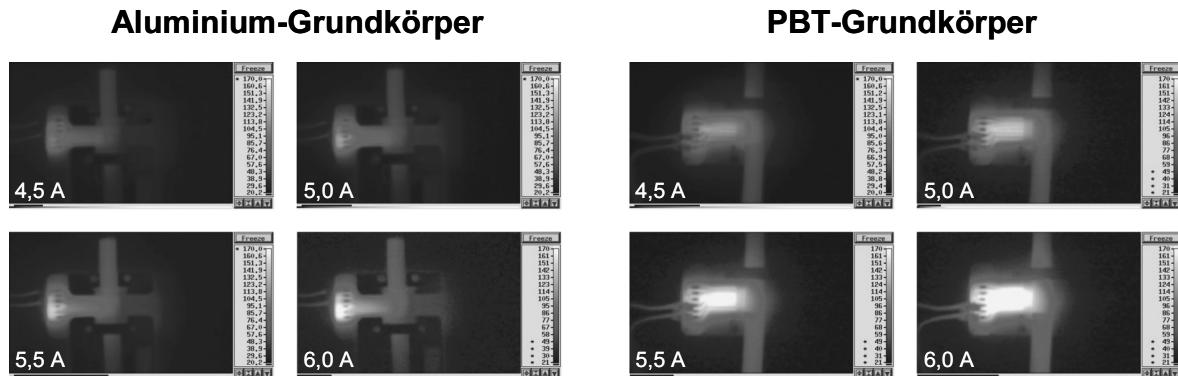


Bild 37: Einfluss der Grundkörpermaterialien Aluminium und Polybutylenterephthalat (PBT) auf das Stromerwärmungsverhalten des Gesamtsystems

Aus den Aufnahmen war deutlich zu erkennen, wie sich unterschiedliche Temperaturen auf den Funktionsdemonstratoren einstellten. Dabei kam der Umstand zum Tragen, dass der Anschlussbereich für die Einprägung des Stroms nicht vom Grundkörper unterstützt war. Bei der Verwendung der Aluminiumvariante wurde die Wärme im Wesentlichen über den Grundkörper abgeleitet. Die höchsten Temperaturen traten somit in der nicht unterstützen Zone auf. Im Bereich der Kontaktzone fand eine signifikante Wärmeableitung über die Flachleiter statt. Entscheidend hierfür war der, gegenüber den Leiterstrukturen auf dem MID-Körper, verhältnismäßig große Querschnitt der Flachleiteradern von 1,54 mm x 200 µm. Bei der Betrachtung der Aufnahmen mit dem PBT-Grundkörper zeigte sich, wie aufgrund der verringerten Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes die heißesten Stellen nun im Bereich der Leiterbahnen auf dem MID-Körper auftraten. Die Kontaktstellen selbst erschienen hiervon auch beeinflusst. Eine ergänzende Auswertung erfolgte anhand der parallel aufgezeichneten Temperaturen mit Thermoelementen (Bild 38).

Die gemessene Temperatur an der Kontaktstelle bei einer Strombelastung von 5 A betrug 83 °C bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C. Durch die vergleichsweise hohe Wärmeabfuhr über den Flachleiter ist diese Erwärmung als unproblematisch zu bewerten. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die Leiterzüge auf dem MID-Körper als wesentlich kritischer zu bewerten sind. Hier wurden Temperaturen von 140 °C bei einer Stromstärke von 5 A nachgewiesen, die oberhalb der im ursprünglichen Anforderungskatalog definierten 110 °C lagen [21]. Eine geeignete Abhilfemaßnahme kann hier ein angepasstes Layout des Schaltungsträgers leisten, beispielsweise durch eine Vergrößerung der Leiterbahnbreite beziehungsweise der Leiterbahndicke. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Kunststoffen, die eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit aufweisen [4].

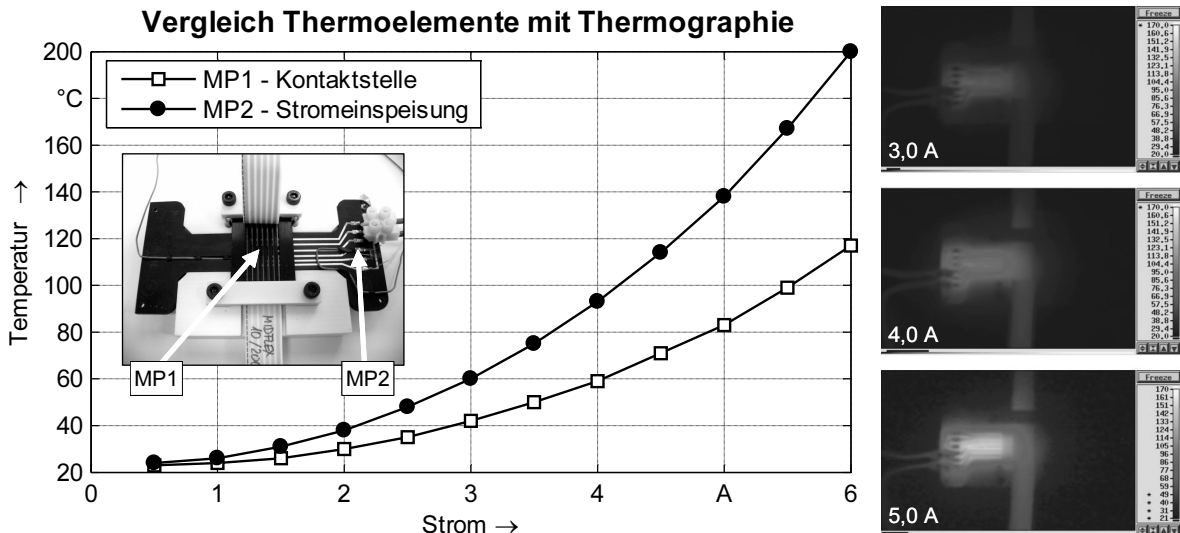


Bild 38: *Stromerwärmung an zwei charakteristischen Messpunkten des Demonstrators (PBT-Grundkörper) und zugehörige, ausgewählte Thermographiebilder*

Temperaturschocklagerung

Die Versuchsreihe zur Temperaturschocklagerung erfolgte mit insgesamt drei Demonstratoren, die jeweils sechs einzelne Kontaktstellen bereitstellten. Mit diesem Vorgehen konnten zwei Analysen durchgeführt werden, mit denen weitere Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit des Kontaktierungssystems gewonnen werden konnten. Der erste Vergleich wurde mit den beiden Oberflächenmetallisierungen Zinn und Nickel/Gold durchgeführt. Dabei wurden zwei Grundkörper aus Kunststoff (PBT) eingesetzt, mit dem Ziel eine zukünftige MID-Anwendung möglichst gut nachzubilden. Weiterhin wurde ein zur Verfügung stehender Aluminiumgrundkörper genutzt, um den Einfluss des Grundkörpermateri als zu quantifizieren. Hierbei wurde als Metallisierung für die Kontaktzone Nickel/Gold für den MID-Körper und den Flachleiter ausgewählt. Innerhalb des Prüfzeitraums von 1000 Zyklen erfolgten insgesamt 15 Messungen mit jeweils 18 Einzelwerten (drei Demonstratoren mit jeweils sechs Kontaktstellen). Im Rahmen der Auswertung wurden neben den Mittelwerten der einzelnen Demonstratoren auch die Einzelwerte graphisch aufgearbeitet (Bild 39).

Der Vergleich der unterschiedlichen Oberflächenmetallisierungen fiel eindeutig zugunsten der Variante Nickel/Gold aus. Während sich die Werte noch bis ca. 400 Zyklen relativ gleichmäßig erhöhten, verhielten sich anschließend einzelne Kontaktstellen mit Zinn-Oberflächen auffällig. Besonders die Tatsache, dass die Messwertverläufe kein stetiges Verhalten zeigten, wies auf eine unzureichende Zuverlässigkeit der Zinnvariante hin. Ergänzend zu den eigentlichen Versuchsergebnissen blieb festzuhalten, dass der Verlauf dieses Mittelwerts (Bild 39 unten rechts) nur beschränkt aussagekräftig war, da die zugrunde liegenden Einzelwerte verschiedenartiges Verhalten aufwiesen. Weiterhin konnte festgehalten werden, dass es sich bei den auffälligen Kontaktstellen nicht um einzelne Ausreißer handelte, sondern bei drei von sechs Verbindungen auftrat. Bereits bei der Grundqualifizierung, die mit Zinn-Oberflächen durchgeführt wurden, konnte ein

unstetiges Verhalten der Mittelwerte beobachtet werden. Ein prinzipielles Problem im Aufbau der Demonstratoren erschien daher unwahrscheinlich.

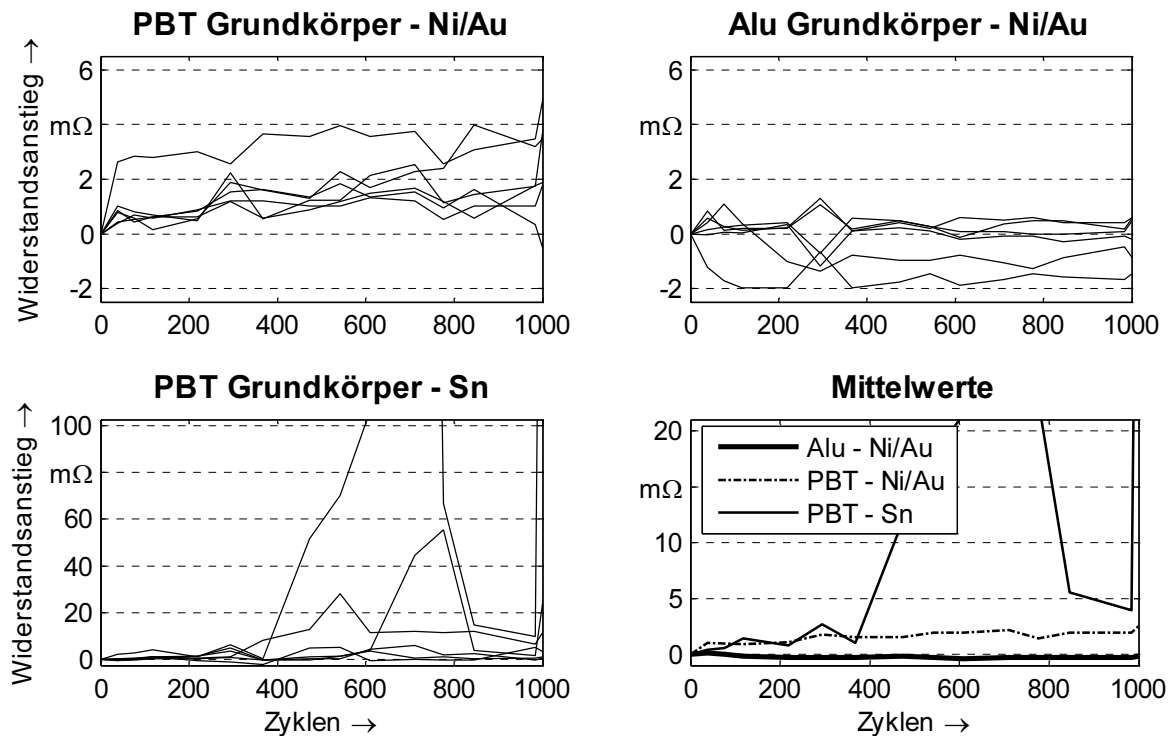


Bild 39: Widerstandserhöhung von alternativen Demonstratoraufbauten (Oberflächen- und Grundkörpermateriale) während der Temperaturschocklagerung (1000 Zyklen -40 °C/+80 °C)

Dem Vergleich der beiden Grundkörpermateriale mit den Nickel/Gold-Oberflächen lagen ganz andere Messwertverläufe zugrunde. Im gesamten Prüfzeitraum zeigte sich ein relativ gleichmäßiger Verlauf der Einzelwerte, die dargestellten Schwankungen lagen im Bereich der Genauigkeit, die mit dem Prüfaufbau und dem Messverfahren erreichbar waren. Hier waren auch die Mittelwerte (Bild 39 unten rechts) aussagekräftig. Bei der Aluminiumvariante konnte keine Änderung festgestellt werden. Dies ist kein Widerspruch zu der im Abschnitt 3.2 getroffenen Aussage, dass über den Testzeitraum bei Temperaturschocklagerungen an Bauelementen eine stetige Erhöhung des Durchgangswiderstands stattfindet. Aufgrund der dort vorhandenen Lötstellen treten in den Kontaktzonen intermetallische Phasenbildungen auf, die über den Prüfzeitraum an Dicke zunehmen und einen Einfluss auf das Widerstandsverhalten besitzen. Bei dem hier untersuchten Kontaktierungsverfahren handelt es sich um eine kraftschlüssige Verbindung mit artgleichen Metallen. Die Messwerte für den Grundkörper aus PBT stiegen langsam, aber stetig an. Der Anstieg, dessen Mittelwert nach 1000 Zyklen 2,6 mΩ betrug, lag in einem akzeptablen Rahmen. Somit konnte bei dieser Untersuchung die Kunststoffvariante in Kombination mit den Nickel/Gold-Oberflächen als zuverlässig bewertet werden.

Im Anschluss an die Temperaturschocklagerungen wurden die Kontaktoberflächen der Flachleiter und der erhöhten Kontaktzone der MID-Körper der beiden Demonstratoren

mit den Grundkörpern aus PBT analysiert. Bei der Betrachtung der Kontakthöcker auf den MID-Körpern konnten, neben einer geringfügigen Abplattung, keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Wesentliche Unterschiede wurden allerdings bei der Betrachtung der freigelegten Kontaktfenster auf den Flachleitern festgestellt. Nach der Belastung von 1000 Zyklen waren bei der Variante Nickel/Gold die Kontaktzonen deutlich zu erkennen (Bild 40 rechts). Eine relative Bewegung zwischen dem MID-Körper und dem FFC fand nur auf engstem Raum statt. Ein völlig anderes Verhalten zeigt sich dagegen bei den Zinn-Oberflächen (Bild 40 links), bei denen, ausgehend von einer Kontaktposition in der Mitte der freigelegten Fenster, eine deutliche Bewegung zu dem Rand des Fensters stattfand. Ein Stillstand ergab sich erst am Rand der Kontaktfläche. Mit dem realisierten Versuchsaufbau konnte keine Aussage über den zeitlichen Verlauf dieses Effektes getroffen werden.

Oberflächen der Flachleiter nach Temperaturschocklagerung

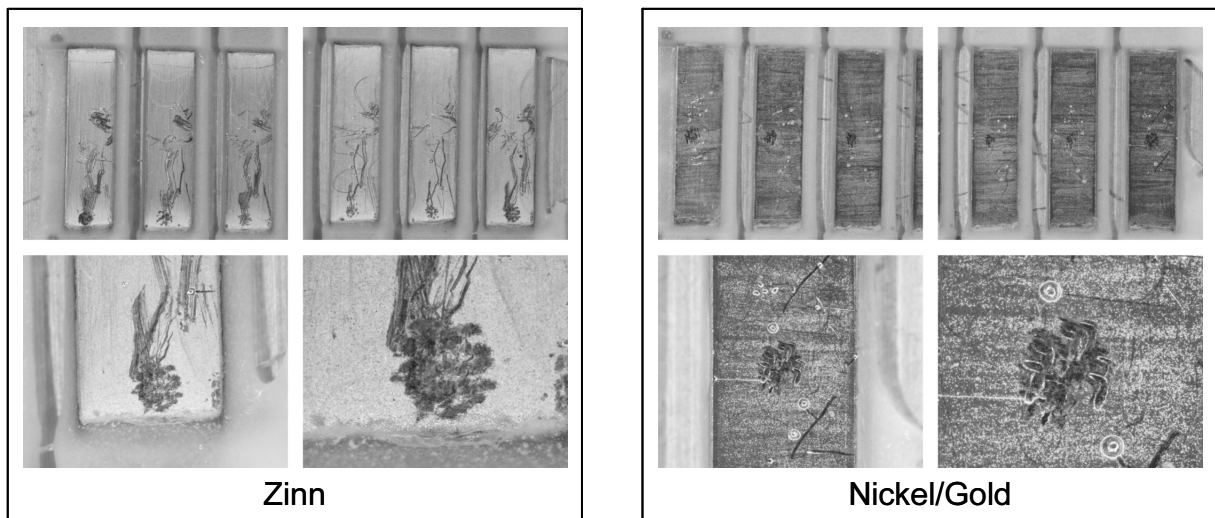


Bild 40: Vergleich der Oberflächen Zinn und Nickel/Gold in der Kontaktzone der Flachleiter nach der Temperaturschocklagerung (1000 Zyklen $-40\text{ °C}/+80\text{ °C}$, Grundkörper aus PBT)

Die Aufnahmen belegten, dass der Einsatz von Nickel/Gold als Oberflächenmetallisierung der Verwendung von Zinn vorzuziehen ist. Auf der anderen Seite bestand bei dem verwendeten Aufbau noch Optimierungspotenzial, der in Form einer zusätzlichen Fixierung des Flachleiters in Längsrichtung realisiert werden kann.

Temperaturauslagerung

Für diese Versuchsreihe wurden zwei Demonstratoren mit den Aluminium-Grundkörpern aufgebaut, da die PBT-Varianten bereits 1000 Zyklen Temperaturschocklagerung ausgesetzt waren und somit kein zweifelsfreier Rückschluss auf einen unbelasteten Kunststoff zu erwarten war. Weiterhin erfolgte die Prüfung bei konstanter Temperatur, so dass der als kritisch zu bewertende Faktor Temperaturwechsel nicht zum Tragen kam. Die beiden Varianten unterschieden sich in den Oberflächenmetallisierungen Nickel/Gold (Ni/Au) und Zinn (Sn). Mit der festen Verdrahtung von Messleitungen an den Demonstratoren konnten die Messungen des elektrischen Durchgangswider-

stands nach dem Vierpunktprinzip ohne Unterbrechung der Temperaturlagerung erfolgen. Im Prüfzeitraum wurden die zwölf Einzelwerte (zwei Demonstratoren mit jeweils sechs Kontaktstellen) werktäglich erfasst. Innerhalb der Versuchsdauer von 1000 Stunden ergab sich bei der Oberflächenmetallisierung Nickel/Gold keine aussagekräftige Änderung. Bei der Zinn-Variante konnte dagegen ein Anstieg der Widerstände nachgewiesen werden (Bild 41).

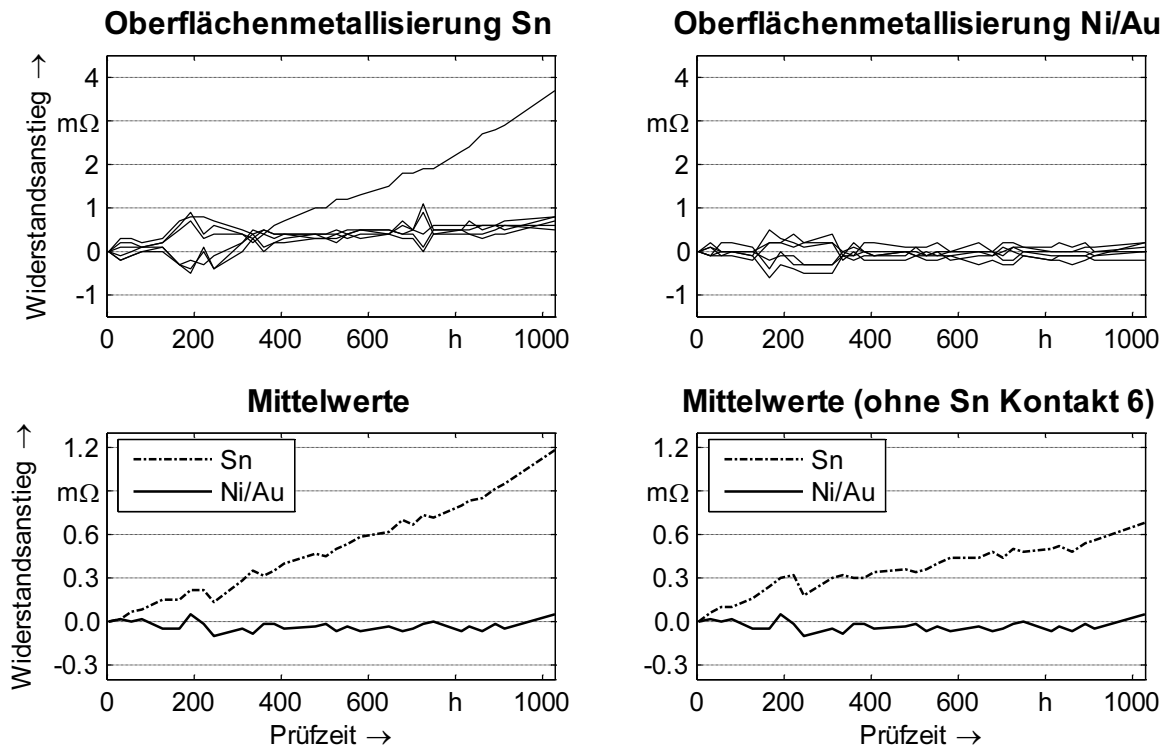


Bild 41: Vergleich der Widerstandserhöhungen für die Oberflächenmetallisierungen Zinn und Nickel/Gold während der Auslagerung in feuchter Wärme (1000 Stunden 85 °C/85 % rF)

Hier verhielt sich eine Kontaktstelle (Kontakt 6) deutlich auffälliger (Bild 41 oben links) als die anderen fünf Kontaktstellen. Dabei handelte es sich um einen außen liegenden Kontakt. Allerdings wurde in den nachfolgenden Analysen kein Zusammenhang zwischen der geometrischen Lage der Kontaktstelle und dem Widerstandsverhalten gefunden. Für eine aussagekräftige Quantifizierung wurden die Mittelwerte der Kontaktstellen herangezogen. Bei der Zinn-Variante wurde aufgrund der zuvor beschriebenen Auffälligkeit der Mittelwert mit und ohne der auffälligen Kontaktstelle gebildet (Bild 41 unten). Das ungünstigere Verhalten des Zinn-Demonstrators wurde auch bei der Vernachlässigung des Kontaktes 6 deutlich nachgewiesen. Hier betrug der Anstieg der Widerstandswerte im Mittel 0,7 mΩ nach 1000 Stunden. Bei der Temperaturschocklagerung konnte bei dem entsprechenden Demonstrator schon nach knapp 400 Zyklen (Bild 39 unten rechts: Ende des weitgehend unauffälligen Bereichs) ein durchschnittlicher Anstieg von ca. 1,5 mΩ ermittelt werden. Zwar waren diese Werte nicht direkt vergleichbar, allerdings zeigte sich, dass ein Temperaturwechsel mit den Mikrobewegungen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhalten der beteiligten Kom-

ponenten, einen höheren Einfluss auf das Widerstandsverhalten der Kontaktstellen aufwies.

Nach der Temperaturlagerung von 1000 Stunden wurden die montierten Demonstratoren nochmals zehn Temperaturschockzyklen unterzogen und anschließend die Oberflächen der Kontaktstellen optisch analysiert. Die Nickel/Gold-Oberflächen des MID-Teils und des FFCs waren dabei unauffällig, im Gegensatz zu der Zinn-Variante. Die Oberflächen wurden im Wesentlichen durch die Temperaturlagerung stark angegriffen (Bild 42), so dass die Kupfermetallisierung teilweise zum Durchscheinen kam. Dies konnte anhand von weiteren ausgelagerten Komponenten (MID-Körper, Flachleiter) verifiziert werden, die während des Belastungszeitraums nicht montiert waren. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die Oberflächenvariante Zinn, insbesondere mit einer geringen Schichtstärke von ca. 1 µm (Metallisierungsverfahren chemisch Zinn), für eine derartigen Belastung (1000 h bei 85 °C/85 % rF) ungeeignet war.

Kontaktflächen nach Auslagerung in feuchter Wärme

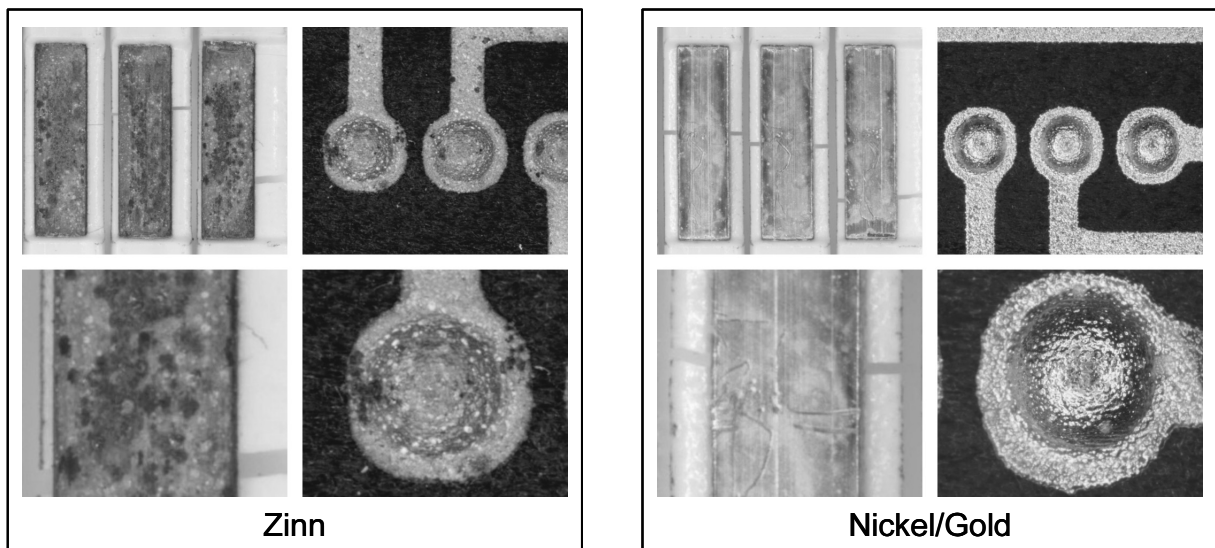


Bild 42: Vergleich der Oberflächen Zinn und Nickel/Gold in der Kontaktzone für die MID-Körper und die Flachleiter nach Auslagerung in feuchter Wärme (1000 Stunden 85 °C/85 % rF)

Erhöhte Temperaturbelastung

Ergänzend zu den vorausgegangenen Temperaturschock-Untersuchungen wurden zwei Demonstratoren mit einer Anpressplatte aus Federstahl aufgebaut. Die beiden Demonstratoren unterschieden sich wiederum in der Oberflächenmetallisierung Zinn und Nickel/Gold. Die Grenztemperaturen bei dieser Untersuchung wurden mit -40 °C und +125 °C festgelegt. Nach 667 Zyklen wurde die Versuchsreihe abgebrochen, da ein Großteil der Messwerte für die elektrischen Widerstandswerte auffällig war. Da allerdings der verwendete Federstahl aufgrund seiner Steifigkeit lediglich eine Dicke von 0,3 mm aufwies, musste der Aufbau der Demonstratoren modifiziert werden. Weiterhin war eine Entkopplung der einzelnen Kontaktstellen nicht in dem Maße wie bei der Kunststoffvariante gegeben. Aus diesen Gründen war ein Vergleich der ermittelten Wer-

te für den Widerstandsanstieg nicht aussagekräftig. Dennoch ließen sich qualitative Aussagen über die beiden Oberflächenmetallisierungen treffen.

Die Zinn-Variante verhielt sich dabei wiederum deutlich schlechter als die Nickel/Gold-Variante, sowohl bezüglich des elektrischen Widerstandsverhaltens als auch bei den optischen Begutachtungen der Kontaktoberflächen. Weiterhin wurden die Kontaktkräfte der einzelnen Kontaktstellen vor und nach den Temperaturschockzyklen miteinander verglichen. Die Verringerung fiel mit 35 % nach den 667 Zyklen ($-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$) relativ gering aus, insbesondere vor dem Hintergrund einer früheren Messung im Rahmen der Grundqualifizierung mit der Anpressplatte aus Kunststoff. Die Abnahme betrug 61 % nach 500 Zyklen bei einem geringeren Temperaturhub ($-40\text{ °C}/+80\text{ °C}$).

Die Ergebnisse zeigten, dass für eine praktische Anwendung ein Aufbau mit einem umspritzten Federstahlplättchen in jedem Fall in Betracht gezogen werden sollte. Somit könnte der Vorteil einer Kunststofflösung, der in einer besseren Vereinzelung der Kontaktkräfte liegt, mit denen einer metallischen Variante, die eine über die Gebrauchsdauer geringere Abnahme der Kontaktkraft aufweist, optimal miteinander verknüpft werden.

4.1.3 Gesamtbewertung des Qualifizierungsprogramms

Mit dem Untersuchungsprogramm wurde ein innovatives Kontaktierungsprinzip für eine lösbare Direktkontaktierung von MID-Baugruppen und folienisolierten Flachleitern qualifiziert. Wesentlich für die erfolgreiche Bearbeitung war der systematische, stufenweise Aufbau der einzelnen Qualifizierungsschritte. Dabei wurden umfangreiche Erkenntnisse gewonnen, sowohl für das Kontaktierungsprinzip selbst als auch für die Anpassungen der Prüfabläufe, die eine stetige Optimierung des Verbindungskonzepts erlaubten. Im Rahmen der Zuverlässigkeitsuntersuchungen wurden ausgehend von standardisierten Prüfungen spezifische Anpassungen mit dem Ziel, das Verbindungskonzept auf seine Praxistauglichkeit hin zu qualifizieren, getroffen.

Im Vordergrund standen dabei zwei Aspekte. Einerseits wurde die elektrische Zuverlässigkeit mit beschleunigten Alterungsverfahren nachgewiesen und andererseits ein Vergleich zwischen den beiden Metallisierungen Zinn und Nickel/Gold durchgeführt. Über alle Prüfungen hinweg konnten mit der Variante Nickel/Gold bessere Ergebnisse erzielt werden. Insbesondere bei hohen Anforderungen bezüglich Temperatur und Feuchte wurden die Unterschiede zwischen den Oberflächenmetallisierungen deutlich. Mit den erarbeiteten Ergebnissen steht nun eine Wissensbasis für zukünftige Anwendungen von MID-Baugruppen und Folienleitern im Allgemeinen und insbesondere für Anforderungen, wie sie in Kraftfahrzeugen vorherrschen, zur Verfügung. Weiterhin zeigte sich, dass die kostengünstigere Alternative Zinn in den Untersuchungen bis zu einer entsprechenden Versuchsdauer akzeptable Ergebnisse lieferte und durchaus für Anwendungen mit geringeren Anforderungen berücksichtigt werden kann.

Weiterhin konnten mit der Konzeption und der Durchführung eines bedarfsgerechten Qualifizierungsprogramms, das die speziellen Herausforderungen des Verbindungskonzepts berücksichtigte, neue Erkenntnisse für die Vorbereitung und Auswertung der einzelnen Prüfschritte gewonnen werden. Zunächst konnte bei den Untersuchungen zur Stromerwärmung gezeigt werden, dass zwei verschiedene Analysemethoden, die Ver-

wendung von Thermoelementen und der Einsatz von Thermographieaufnahmen, erst im Zusammenspiel eine Aussage über die Wärmeverteilung erlaubten. Es ergab sich ein ähnlicher Informationsgewinn wie bei der Schablonenanalyse in Abschnitt 3.1.2, bei der drei unterschiedliche Analysearten ein ganzheitliches Bild ergaben (Bild 12).

Bei der Bestimmung der Widerstandsänderungen zeigte sich der Vorteil einer Messwerterfassung mit fest installierten Messleitungen, die mit einem Stecker abgeschlossen waren. Es stellte sich eine deutliche Steigerung der Messgenauigkeit im Vergleich zu dem Einsatz von Doppelmessspitzen für eine Vier-Punkt-Widerstandsmessung ein. Diese Verbesserung setzte allerdings einen erheblich größeren Aufwand für die Vorbereitung der Prüflinge voraus. Daher muss prinzipiell für jede Untersuchung abgewogen werden, ob eine hochgenaue, quantitative Bestimmung der Zielgrößen erforderlich ist. Für den Erhalt einer Aussage „Funktioniert“ oder „Funktioniert nicht“ kann ein vereinfachter Messaufbau genügen, eventuell sogar unter der Vernachlässigung einer Vier-Punkt-Messung.

Bei der Bestimmung von Widerstandswerten in zeitlichen Abständen, wie bei der Temperaturschocklagerung ohne Onlinemessung, die einen noch wesentlich höheren Aufwand erfordert, konnte eine Steigerung der Aussagekraft der Kurvenverläufe durch eine Korrektur der Messwerte auf eine Referenztemperatur erzielt werden. Dieser Effekt gewinnt besonders dann an Bedeutung, wenn die interessierende Zielgröße, im vorgestellten Qualifizierungsprogramm die Bestimmung kleinster Widerstandsänderungen, im Verhältnis zu den aufgenommen Messgrößen sehr klein ist.

4.2 Analyse des Einflusses einer Eigenerwärmung auf die Verbindungstechnik bei hohen Umgebungstemperaturen

Die Herstellung und der Einsatz elektronischer Baugruppen erfolgt im innovativen Umfeld stetig steigender Anforderungen. Insbesondere die Zunahme von Sicherheits- und Komfortfunktionen in mobilen elektronischen Systemen wirkt sich unmittelbar auf die einzusetzenden Technologien bei der Herstellung derartiger Produkte aus. Die Gewährleistung der Qualität von Baugruppen erfordert eine kontinuierliche Betrachtung der auftretenden Belastungen und Versagensmechanismen sowie eine angepasste Strategie für die Ermittlung der Zuverlässigkeit [68][141]. Die externen Einflüsse auf die Elektronik von dezentralen Systemen, wie in Bild 43 dargestellt, werden kontinuierlich ansteigen, so dass konventionelle Materialien und die damit verbundenen Herstellungsprozesse den neuen Anforderungen nicht mehr genügen [66].

Für den Einsatz in Kraftfahrzeugen wurden in der Vergangenheit nur einige einfache Steuergeräte an geschützten Orten im Fahrzeuginnenraum verbaut. Bei aktuellen Modellen werden verstärkt neue Funktionalitäten mit hochintegrierten Bauelementen realisiert [74]. Die Einbauorte liegen dabei so nahe wie möglich an den Wirkorten. Im Mittelpunkt der aktuellen Forschung steht die erhöhte thermische Belastung, wie sie beispielsweise bei der stetig steigenden Anzahl von immer komplexeren Steuergeräten, die im Motorraum verbaut werden, auftreten [101][107]. Zusätzlich werden leistungs-

starke miniaturisierte Bauelemente mit erhöhter Abwärme eingesetzt [94]. Nachfolgend werden ausgehend von der Einbausituation einer Baugruppe in einem Hybridantrieb die Auswirkungen der Eigenerwärmung von Bauelementen auf deren Zuverlässigkeit untersucht.

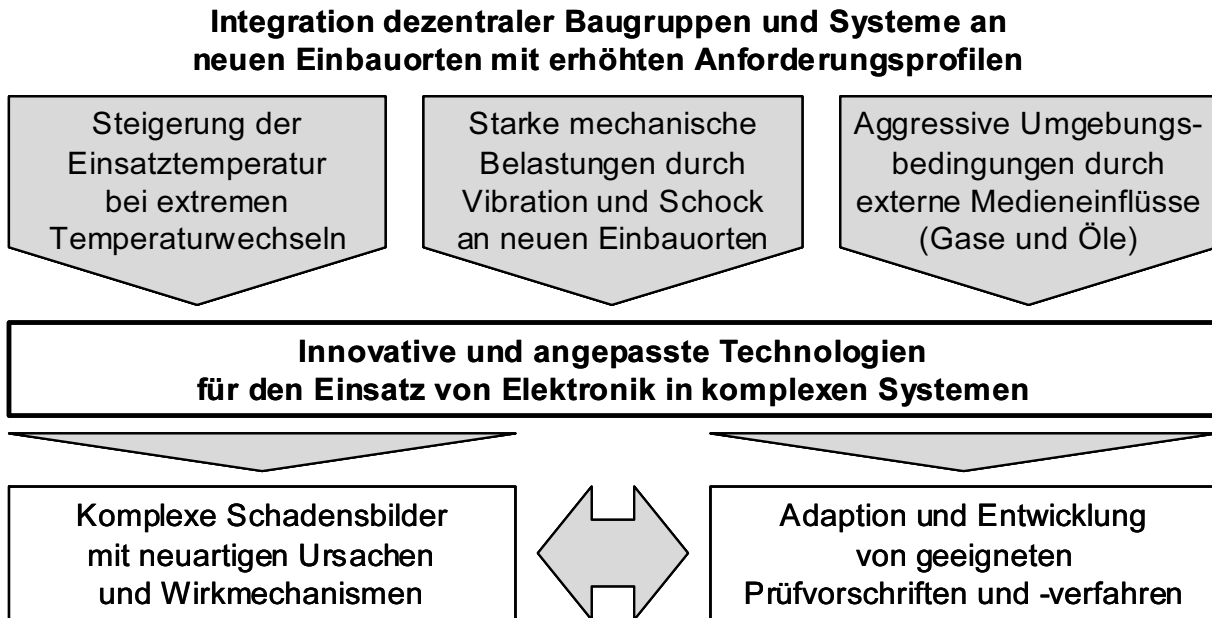


Bild 43: Anforderungen und Auswirkungen bei einem dezentralen Einsatz von elektronischen Baugruppen

4.2.1 Aufgabenstellung und Prüfkonzzept

Bei der Realisierung der elektronischen Steuerung des Umrichters wurde eine optimale Integration in das Gesamtsystem angestrebt. Die auftretenden Temperaturen in der Umgebung können bis zu 150 °C erreichen. Um den Einsatz konventioneller Technologie auf Basis von FR4 bzw. FR5 Schaltungsträgern zu gewährleisten, wurde als Einbauort der Kühlmantel um den Motor gewählt (Bild 44). Somit kann sichergestellt werden, dass die Temperatur unter der Baugruppe maximal die Kühlmitteltemperatur erreicht, die im Betrieb zwischen 85 °C und 115 °C liegt. Mit der Verwendung von Semi-Flex-Übergängen in der Baugruppe konnte die formschlüssige Fixierung erreicht werden [65]. Vor dem Hintergrund einer solchen Anwendung wird in diesem Abschnitt der Einfluss der Eigenerwärmung von Bauelementen mit hoher elektrischer Verlustleistung auf die Zuverlässigkeit der Verbindungstechnik untersucht.

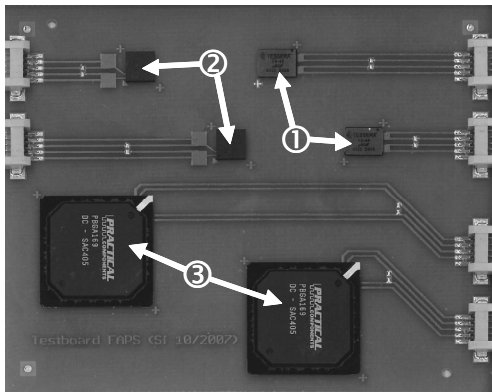
Für die systematische Untersuchung der Eigenerwärmung war zunächst die Konzeption eines Prüfaufbaus erforderlich. Von besonderer Bedeutung war dabei die Einbringung einer Verlustleitung in die Bauelemente. Da für diese grundlegenden Untersuchungen das Versagen der Anschlussstrukturen im Vordergrund stand, wurden in diesem ersten Schritt keine funktionsfähigen Mikroprozessoren verwendet, sondern Testbauelemente mit interner Daisy-Chain-Strukturierung. Dadurch konnten ein Versuchsaufbau und die zugehörige Auswertung in Anlehnung an bekannte Testverfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik erfolgen.



Bild 44: Elektrische Antriebsmaschine mit integrierter Steuerelektronik an einem Einbauort mit extremen thermischen Belastungen [65]

Für die praktischen Untersuchungen standen prinzipiell zwei Arten der Wärmeeinbringung zur Auswahl. Die erste Möglichkeit bestand darin, dass ein niederohmiger Widerstand auf dem zu untersuchenden Bauelement aufgebracht wird und für die Untersuchung gezielt bestromt wird. Alternativ konnte eine Erwärmung mit einer Bestromung durch die Daisy-Chain-Struktur erfolgen. Vor dem Hintergrund einer realitätsnahen Nachbildung wurde die erste Möglichkeit verworfen, da die Wärme außerhalb des Bauelements erzeugt werden würde und durch das gesamte Gehäuse zu den Anschlussstrukturen transferiert werden müsste. Dies ist insbesondere für Komponenten mit Kunststoffmaterialien ein verhältnismäßig träger Prozess. Mit der Bestromung der Daisy-Chain-Struktur erfolgte die Erzeugung der Wärme direkt im Bauelement und bewirkte eine unmittelbare Erwärmung der Verbindungsstellen. Dies bildete zwar die Verhältnisse in einer realen Komponente auch nicht vollständig nach, allerdings erfolgte hier die Wärmeerzeugung in elektrisch leitfähigen Strukturen des Bauelements.

In Hinblick auf eine Konzeptionierung eines beschleunigten Prüfablaufs war eine zyklische Belastung der Bauelemente wesentlich, da die permanente Erwärmung und Abkühlung der Verbindungsstellen letztendlich zu einer Schädigung der Kontaktstellen führen würde. Hierfür waren die zwei Parameter elektrische Leistung im Bauelement und die Dauer der einzelnen Zyklen festzulegen. Um die Anzahl der potentiellen Variationen zu beschränken, wurde die Dauer eines Prüfzyklus auf 30 s festgelegt, die sich in 15 s Belastung zur Erwärmung und 15 s zum Abkühlen aufteilte. Unterschiedliche Belastungsprofile wurden somit über die elektrische Beschaltung der Bauelemente realisiert. Bei der Auswahl der Daisy-Chain-Bauelemente ergab sich eine weitere Randbedingung, nämlich dass der fließende Strom in einer Größenordnung liegen musste, die eine wesentliche Beeinflussung des Messaufbaus ausschloss. Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden Testbaugruppen mit drei verschiedenen Area-Array-Bauelementen hergestellt. Dabei wurde berücksichtigt, dass eine Messung des Durchgangswiderstands einer jeder einzelnen Komponente mit Hilfe einer Vierpunktmessung erfolgen konnte. Darüber hinaus sollten diese Spannungsmessungen permanent während der geplanten Versuche erfolgen. Dies wurde mit der Integration eines Steckers für jedes Bauelement realisiert. In Bild 45 wurden neben dem Testschaltungsträger ausgewählte Kennwerte der drei untersuchten Daisy-Chain-Komponenten aufgeführt.

Testschaltungsträger**Bauelemente**

	Typ	Raster	Gehäuse
①	CSP46	0,75 mm	Silicium
②	µBGA36	0,75 mm	Kunststoff
③	BGA169	1,50 mm	Kunststoff

Bild 45: Testschaltungsträger und Eigenschaften von drei Area-Array-Bauelementen

In der Praxis wird die Verlustleistung eines Bauelements auf dessen Fläche bezogen. Im Rahmen der Konzeptphase wurden die drei Komponenten hinsichtlich der Eignung für eine Versuchsreihe analysiert. Von besonderer Bedeutung war dabei eine Abschätzung des notwendigen Stroms für die Wärmeeinbringung. Ein solcher wurde, unter Berücksichtigung des Ausgangswiderstands bei Raumtemperatur, für eine Flächenleistung von 1 W/cm^2 berechnet (Tabelle 6). Der CSP46 (Chip Scale Package mit 46 Anschlüssen) wurde aufgrund seines hohen Ausgangswiderstands für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Der Grund für den deutlich höheren Wert lag in dem internen Aufbau der Daisy-Chain-Struktur. Die Verbindungen von benachbarten Anschlüssen waren dabei deutlich dünner als bei den anderen Bauelementen. Unter Berücksichtigung, dass bei der Berechnung der Flächenleistung der Wert des Stroms quadratisch eingeht, konnte für den CSP46 ein Wert von 15 W/cm^2 mit einem Strom von unter 1 A erreicht werden. Hierbei wurde ein Widerstandsanstieg des Bauelements bei höheren Temperaturen nicht berücksichtigt, da sich in einem solchen Fall die Verhältnisse bezüglich des notwendigen Stroms günstiger gestalten.

Bauelement	Fläche	Ausgangswiderstand bei Raumtemperatur	Stromstärke für 1 W/cm^2
CSP46	$0,413 \text{ cm}^2$	$6,807 \Omega$	$0,25 \text{ A}$
µBGA36	$0,360 \text{ cm}^2$	$0,061 \Omega$	$2,43 \text{ A}$
BGA169	$5,290 \text{ cm}^2$	$0,406 \Omega$	$3,61 \text{ A}$

Tabelle 6: Berechnete Stromstärke für die Einprägung einer elektrischen Verlustleistung von 1 W/cm^2

4.2.2 Realisierung eines Prüfaufbaus für die zyklische Leistungseinbringung

Die Durchführung der Versuchsreihen erfolgte mit einem Prüf- und Messaufbau, der einerseits eine parallele Untersuchung mehrerer Prüflinge ermöglichte und andererseits eine zyklische Belastung verwirklichte. Diese erfolgte so, dass jeweils eines der beiden auf dem Testschaltungsträger vorhandenen CSP46-Bauelemente 15 s aktiv bestromt wurde und das andere Bauelement in dieser Zeit unbelastet blieb. Somit konnte sicher-

gestellt werden, dass eine permanente Erwärmung und Abkühlung der Anschlussstrukturen der Komponenten erfolgte. Mit dieser Maßnahme konnte eine gegenseitige Beeinflussung auf einer Testplatine minimiert werden. Da allerdings auch das elektrische Verhalten in der Abkühlphase von Interesse war, wurde in diesen Abschnitten die CSP46 Komponenten mit einem geringen Messstrom beaufschlagt, der keine signifikante thermische Beeinflussung verursachte. Die Messzyklen wurden mit der Verwendung eines Relais so verwirklicht, dass softwaregesteuert alle 15 s jeweils abwechselnd ein Widerstand R_P vor dem eigentlichen Vorwiderstand R_V in Reihe geschaltet wurde (Bild 46). Für den späteren Messaufbau wurde der Vorwiderstand R_V ähnlich wie der Widerstand des CSP46 gewählt und der zusätzliche Widerstand R_P ungefähr 50-mal höher als R_V .

Aufbau für alternierende Belastung von Prüflingen

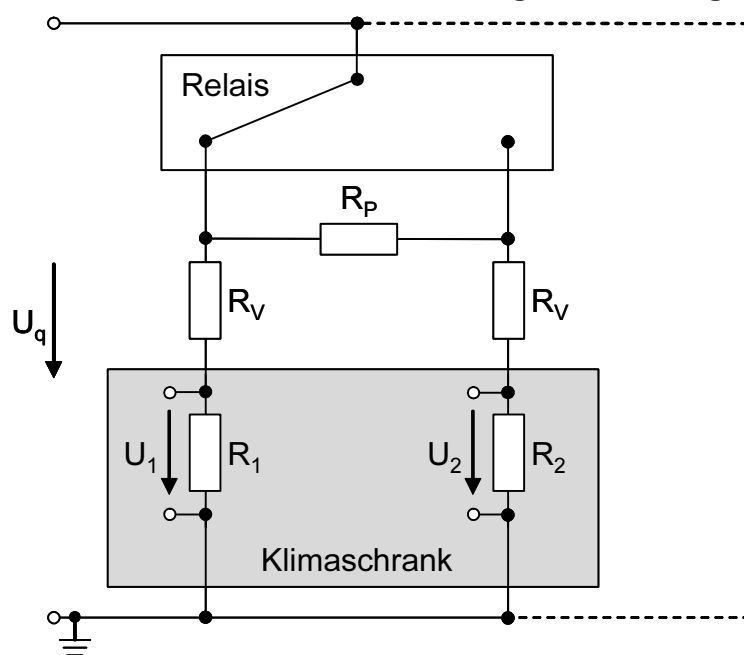


Bild 46: Ersatzschaltbild des Messaufbaus für die Untersuchungen des Effektes der Eigenerwärmung an zwei CSP-Bauelementen für eine abwechselnde Belastung (R_1 und R_2)

In dem vorstehenden Bild war der aktive Zweig, der eine Eigenerwärmung über die Daisy-Chain-Struktur ermöglichte, derjenige mit dem Widerstand R_1 . Aus den gemessenen Spannungen konnte R_1 nach (Gl. 17) berechnet werden. Für den in dem Ersatzschaltbild passiven Zweig mit dem Widerstand R_2 konnte der gesuchte Widerstand nach (Gl. 18) berechnet werden.

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_q - U_1}{R_V} \Rightarrow R_1 = R_V \cdot \frac{U_1}{U_q - U_1} \quad (\text{Gl. 17})$$

$$\frac{U_2}{R_2} = \frac{U_q - U_2}{R_V + R_P} \Rightarrow R_2 = (R_V + R_P) \cdot \frac{U_2}{U_q - U_2} \quad (\text{Gl. 18})$$

Die über dem CSP46-Bauelement abfallende Leistung in dem aktiven Zweig ergab sich nach (Gl. 19). Anhand der später aufgenommenen Messwerte konnte bestätigt werden, dass in der sogenannten passiven Phase des Zyklus die Leistung an den untersuchten Komponenten lediglich rund ein Fünfhundertstel betrug.

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1} = \frac{U_1^2}{R_V} \cdot \frac{U_q - U_1}{U_1} = \frac{1}{R_V} \cdot U_1 (U_q - U_1) \quad (\text{Gl. 19})$$

Aus der (Gl. 19) konnte die abfallende Leistung für die numerische Auswertung der Versuche aus den beiden Spannungsmesswerten und dem Vorwiderstand errechnet werden. Dabei war zu berücksichtigen, dass mit der Erwärmung des CSP46 auch dessen Widerstand R_1 anstieg und sich die abfallende Spannung U_1 bei gleichbleibender Quellspannung erhöhte. Eine detaillierte Betrachtung der Auswirkung der Temperaturänderung wurde in dem nachfolgend beschriebenen Vorversuch durchgeführt (Bild 48).

Der in Bild 46 dargestellte Aufbau konnte mehrfach parallel an die Spannungsquelle angeschlossen werden. Somit ergab sich zunächst keine prinzipielle Begrenzung der Anzahl von Prüflingen. Mit der Verwendung des Messmoduls NI-USB 6015 von National Instruments konnten acht Spannungssignale in der Betriebsart „differenzielle Erfassung“ gemessen und aufgezeichnet werden [85]. Da ein Messkanal für die Erfassung der Quellspannung freigehalten wurde, konnten letztendlich sieben CSP46-Bauelemente in einem Versuchsdurchlauf geprüft werden. Der realisierte Aufbau für die Klimakammerversuche für vier Testschaltungsträger mit insgesamt acht Prüflingen ist in Bild 47 gezeigt.

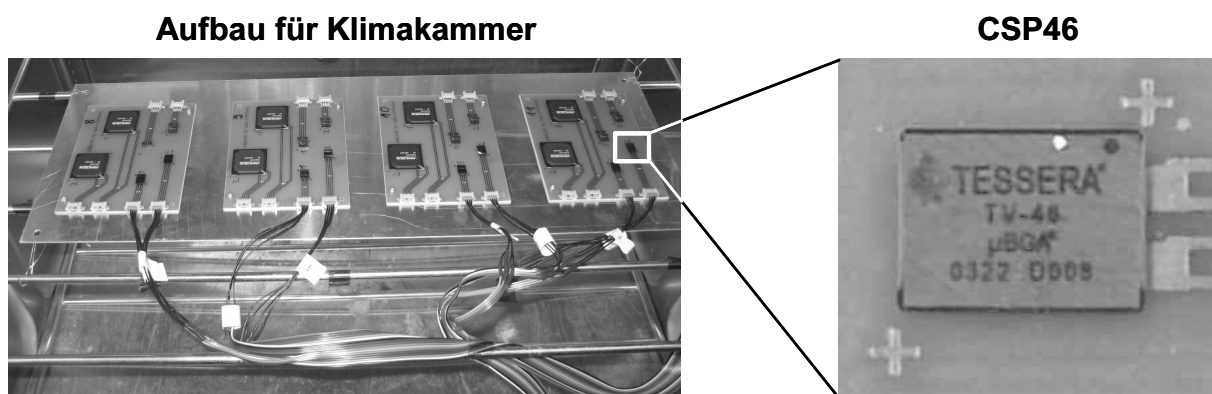


Bild 47: Aufbau mit vier Testschaltungsträgern für die zyklische Belastung mit einer Eigenerwärmung in einem Klimaschrank (links) und Testbauelement CSP46 mit Kontaktierung für eine Vier-Punkt-Messung (rechts)

Von den Testobjekten wurde eines nicht der zyklischen Belastung unterworfen und stand bei den weiteren Analysen als Vergleichsobjekt zur Verfügung. Damit konnte der Einfluss einer ausschließlichen Temperaturbelastung ohne aktive Bestromung unter-

sucht werden. Der Einsatz einer Grundplatte aus Aluminium sollte ausgehend von dem Szenario des Einbauortes in dem Hybridmotor eine Abfuhr der erzeugten Eigenwärme ermöglichen.

Anschließend wurden Vorversuche durchgeführt, die anhand der Auswertung von Messwertverläufen erste Rückschlüsse auf die Eignung des Messaufbaus und der zu erwartenden Widerstandsverläufe zuließen. In Bild 48 wurden exemplarisch der errechnete Widerstand und die Flächenleistung über einen Zeitraum von zwei Zyklen dargestellt. Der Prüfling befand sich dabei in einem thermischen Gleichgewicht, das sich wenige Zyklen nach Prüfbeginn einstellte. Dieses war dadurch gekennzeichnet, dass sich der CSP46 am Ende des Zyklus wieder auf demselben Widerstandsniveau, und damit auch derselben Temperatur, befand wie zu Beginn des Zyklus. Bei der Betrachtung des Widerstandsverlaufs zeigte sich ein starker Anstieg während der Phase der aktiven Bestromung. In dem gezeigten Beispiel fand ein Hub von rund 23 % statt.

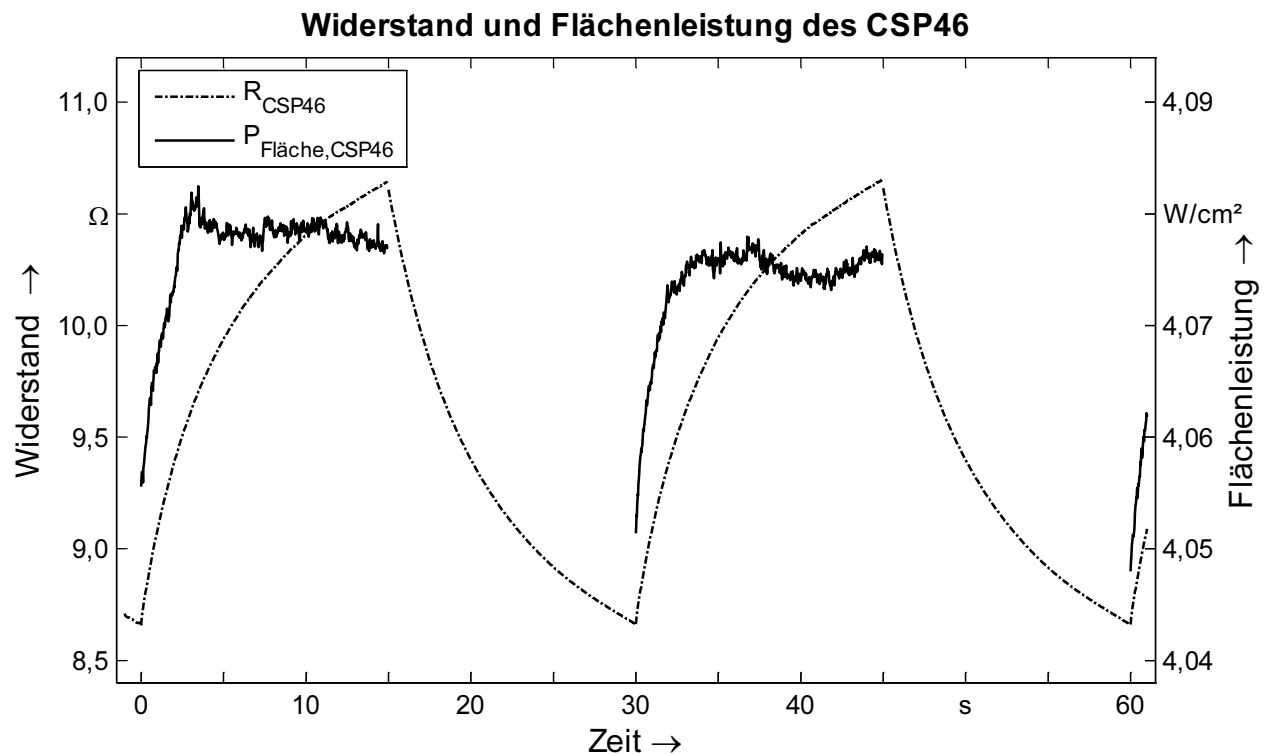


Bild 48: Verlauf des Widerstands und der Flächenleistung eines CSP46 über zwei Prüfzyklen ($T_{Umgebung} = 115\text{ °C}$) im thermischen Gleichgewicht (Zeitachse in den Beginn des ersten dargestellten Zyklus verschoben)

Eine Rückrechnung von dem ermittelten Widerstand auf eine Temperatur war nicht möglich, da aufgrund der inneren Struktur des CSP46, mit sehr dünnen Verbindungen zwischen den vergleichsweise großen Anschlussballs, eine inhomogene Temperaturverteilung vorlag. Dennoch war dem Kurvenverlauf zu entnehmen, dass hier eine erhebliche thermische Wechselbelastung auftrat. Ein ganz anderes Bild zeigte der Verlauf der wirkenden Flächenleistung auf den CSP46. Unter der Berücksichtigung des Anfangsanstiegs zu Beginn der aktiven Bestromung trat lediglich eine Erhöhung der elektrischen Leistung von ca. 0,7 % auf. Diese minimale Schwankung resultierte aus einer

geeigneten Wahl des Vorwiderstands. Die abfallende Leistung an dem temperaturabhängigen Widerstand R_1 ergibt sich in Abhängigkeit desselben nach (Gl. 20):

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1} = U_q^2 \cdot \frac{R_1^2}{R_1 \cdot (R_1 + R_V)^2} = \dots = \frac{U_q^2}{R_1 + 2R_V + \frac{R_V^2}{R_1}} \quad (\text{Gl. 20})$$

Unter der Annahme, dass der Vorwiderstand R_V so gewählt wird, dass dessen Wert einem mittleren Wert des CSP46 im aktiven Abschnitt des Zyklus entspricht, so bewirkt eine Änderung von R_1 um 20 % eine Änderung der Leistung von lediglich 1,25 %. In dem Versuchsaufbau wurde für den Vorwiderstand R_V ein Keramikwiderstand mit $10,19 \, \Omega$ gewählt. Dem Bild 48 ist zu entnehmen, dass mit den ausgewählten Parametern eine quasi konstante Leistungseinbringung mit dem Versuchsaufbau erfolgte. Eine Änderung der Belastung konnte demnach mit einer Anpassung der Quellspannung U_q auf einfache Weise erfolgen.

Die spätere Analyse von Ausfällen sollte anhand eines vereinfachten Kennwerts für jeden Zyklus erfolgen. Unter der Annahme, dass ein Ausfall durch einen festzulegenden Widerstandsanstieg, der in dem Fall einer offenen elektrischen Verbindung gegen unendlich geht (in (Gl. 17) für $U_1 = U_q$), gekennzeichnet ist, wurde in einer automatisierten Auswertung jeweils das Widerstandsmaximum für jeden Zyklus berechnet. In Ergänzung hierzu wurde entsprechend auch der Spitzenwert für die Flächenleistung ermittelt.

4.2.3 Bestimmung der Zuverlässigkeit bei unterschiedlichen Belastungsprofilen

Im Vordergrund der nachfolgenden Versuchsreihe stand die Analyse des Ausfallverhaltens für die Testbauelemente des Typs CSP46. Dazu wurden jeweils sieben Komponenten parallel mit dem in Bild 47 gezeigten Aufbau in einem Klimaschrank, ohne den Einsatz einer Regelung der relativen Luftfeuchtigkeit, durch die Daisy-Chain-Struktur thermisch belastet. Mit dem Ziel eines schnellen Erkenntnisgewinns wurde mit einer hohen Belastungsstufe begonnen und diese wurde in den nachfolgenden Versuchsdurchläufen schrittweise reduziert. Bei der Versuchsreihe betrug die Umgebungstemperatur in der Klimakammer $T_U = 115 \, ^\circ\text{C}$. Diese Temperatur wurde festgelegt, da die Steuerbaugruppe aus dem Hybridmotor (Bild 44) auf dem Wasserkühlkreislauf montiert ist, und die dort auftretende Maximaltemperatur an der Unterseite des Schaltungsträgers eben diese $115 \, ^\circ\text{C}$ beträgt. Die höhere Lufttemperatur über der Baugruppe wurde in diesem Stadium der Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Insgesamt wurden in vier verschiedenen Belastungsstufen jeweils sieben CSP46-Bauelemente untersucht. Da bereits nach der Herstellung der Testbaugruppen die Ausgangswiderstände Schwankungen von Komponente zu Komponente aufwiesen, wurden für alle Bauelemente die mittlere Flächenleistung während der Zyklen 91 bis 100 ermittelt (Tabelle 7). Zu diesem Zeitpunkt waren alle CSP46 noch unauffällig bezüglich ihres Widerstandsverhaltens. Trotz der Schwankungen der Widerstandswerte im Ausgangszustand, waren die Flächenleistungen aller Komponenten einer Belastungsstufe nahezu identisch.

Belastungsstufe	Mittlere Flächenleistung während der Bestromungsphase (Zyklus 91 -100)
1	$P_{\text{mittel},1} = 4,94 \text{ W/cm}^2$
2	$P_{\text{mittel},2} = 4,08 \text{ W/cm}^2$
3	$P_{\text{mittel},3} = 3,55 \text{ W/cm}^2$
4	$P_{\text{mittel},4} = 3,22 \text{ W/cm}^2$

Tabelle 7: Eingeprägte Flächenleistung der vier Belastungsstufen während der aktiven Zyklusphase

Bei der Durchführung der Versuchsreihen zeigte sich, dass bei den Belastungsstufen 1 und 2 alle Prüflinge bereits nach kurzer Versuchsdauer versagten (Bild 49 links). Bei der Betrachtung der Widerstandsverläufe konnte beobachtet werden, dass nach einer Übergangsphase von circa 50 bis 300 Zyklen ein völliges elektrisches Versagen eintrat. Anhand der Einzelverläufe aller Prüflinge dieser beiden Belastungsstufen konnte bereits ein Zusammenhang zwischen der Höhe der eingepprägten Eigenerwärmung und der Ausfallzeitpunkte qualitativ hergestellt werden. Unter der Belastungsstufe 1 traten die Ausfälle deutlich früher ein, insbesondere bei der Betrachtung der aufsteigend sortierten Zeitpunkte des Eintretens des endgültigen Versagens.

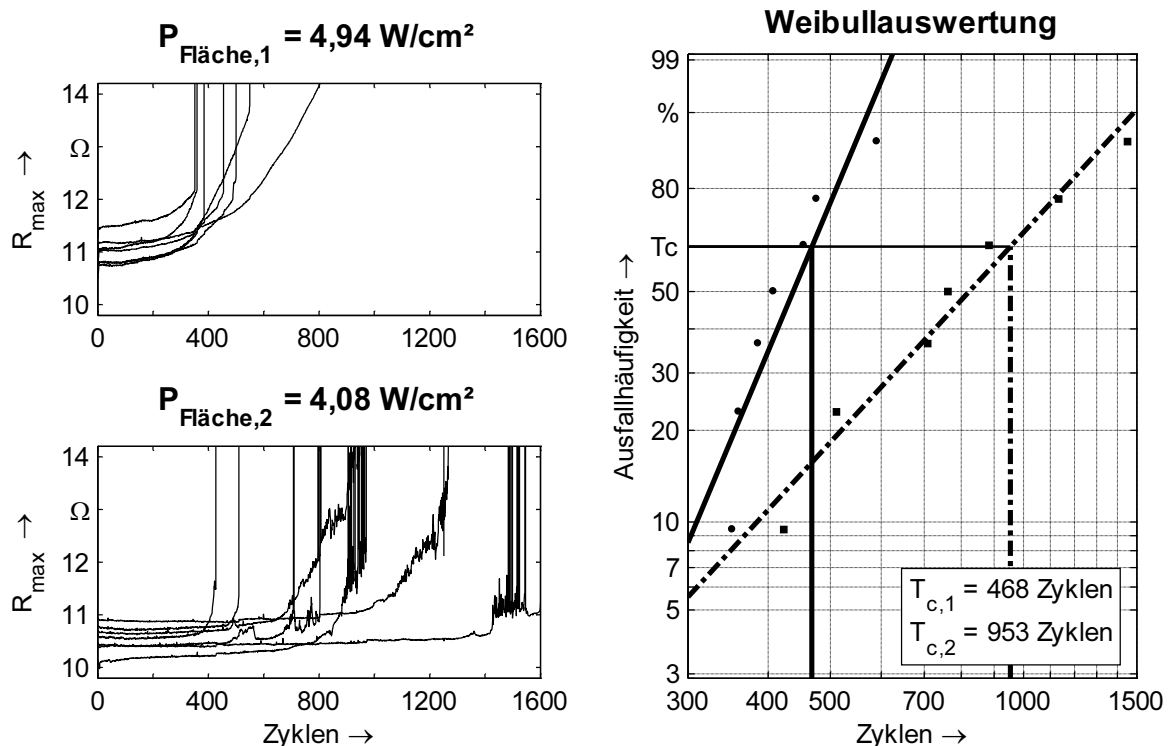


Bild 49: Verlauf der Widerstandsmaxima für die Belastungsstufen 1 und 2 (links) und die zugehörigen Weibullauswertungen (Ausfallkriterium 10 %iger Anstieg des Widerstands) (rechts)

Weiterhin war den Kurvenverläufen zu entnehmen, dass das Widerstandsniveau bei der Belastungsstufe 1 deutlich höher war als bei dem Versuchsdurchlauf 2. Eine Begrün-

dung dieses Verhaltens lag in der höheren Energieeinbringung, die zu einer stärkeren Erwärmung der Testobjekte und damit zu einem stärkeren Anstieg des Durchgangswiderstands führte. Die Quantifizierung der beiden Versuchsdurchläufe erfolgte mit der Bestimmung der jeweiligen Kenngröße der charakteristischen Lebensdauer anhand der Weibullanalyse.

Zunächst wurde ein geeignetes Kriterium für die Ausfallzeitpunkte festgelegt unter Berücksichtigung der prinzipiell unterschiedlichen Widerstandsverläufe der einzelnen Prüflinge vor dem endgültigen elektrischen Versagen. Schließlich wurde derjenige Zyklus als Ausfallzyklus bestimmt, bei dem der Maximalwert des Widerstands erstmals um 10 % gegenüber dem Mittelwert der Zyklen 91 bis 100 erhöht war. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da in den ersten Prüfzyklen noch Schwankungen aufgrund der verwendeten Spannungsquelle auftraten und sich die Testobjekte noch nicht in einem thermischen Gleichgewicht befanden. Mit Hilfe der Weibullauswertung in Bild 49 rechts wurden die charakteristischen Lebensdauern zu $T_{c,1} = 468$ Zyklen und $T_{c,2} = 953$ Zyklen berechnet. Die Reduzierung der einwirkenden Flächenleistung um 17,4 % führte zu einer Steigerung der Lebensdauer von 104 %.

Nach der Beendigung dieser Versuchsdurchläufe wurde eine zerstörungsfreie Analyse der Verbindungsstellen mit Hilfe von Röntgenaufnahmen durchgeführt. Dabei zeigte sich bei den CSP46 der Belastungsstufen 1 und 2, im Gegensatz zu einem unbelasteten Vergleichsmuster (Bild 50 rechts), eine Auflösung der scharfen Konturen der Anschlussballs (Bild 50 links). Lediglich die beiden Lotstellen, die nach außen zu den Leiterbahnen mit der Einspeisung für die Bestromung führten, zeigten kein abnormes Abbild. Anhand dieser Aufnahmen wurde vermutet, dass der Schädigungsmechanismus der Rissbildung, der bei Temperaturschockprüfungen vorzugsweise auftritt, hier nicht wirkte.

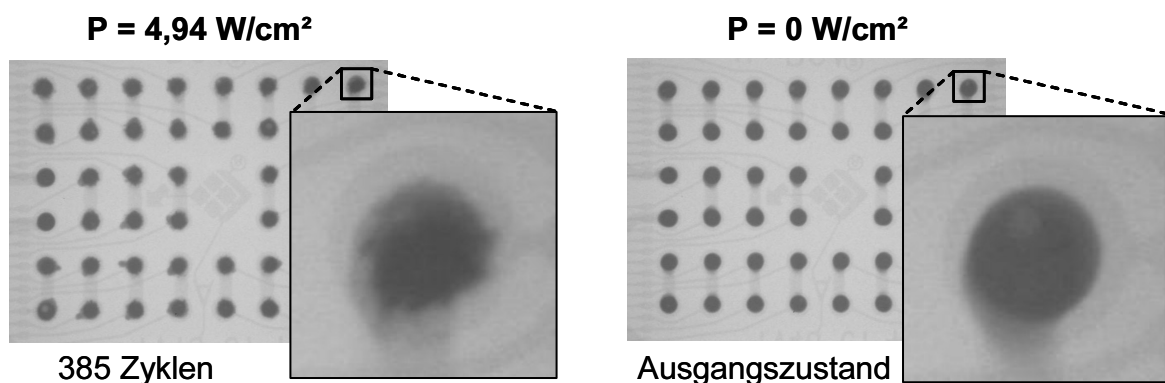


Bild 50: Röntgenaufnahmen nach dem Versagen eines CSP46 (385 Zyklen, Belastungsstufe 1) (links) und eines unbelasteten Vergleichsmusters (rechts)

Die beiden CSP46 aus dem vorangegangenen Bild wurden in einem nächsten Schritt mit der Anfertigung von Schliffbildern einer zerstörenden Analyse unterzogen. Dabei zeigte sich eine völlige Veränderung der Geometrie der Lotstellen (Bild 51 links und Mitte). Die Auswertung der Aufnahmen ergab drei wesentliche Unterschiede zu dem Bild einer unbelasteten Verbindungsstelle nach dem Herstellungsprozess (Bild 51 rechts). Zunächst fiel die Anhäufung von kleinen Lunkern in den betroffenen Lotstellen an der Grenzfläche

zu den Anschlussflächen auf der Leiterplatte auf. Die ursprünglichen Kupferflächen an der Unterseite der CSP46 oberhalb der Lotballs lösten sich praktisch auf. Die beiden Lotstellen in Bild 51 selbst wiesen einen signifikant unterschiedlichen Stand-Off auf, mit Lotresten neben den verbliebenen Verbindungsstellen (in den Aufnahmen jeweils rechts). Diese drei Auffälligkeiten lieferten bei ganzheitlicher Betrachtung deutliche Indizien dafür, dass diese Lotstellen während der Belastungszyklen permanent aufschmolzen und erstarrten. Die Temperaturen an den oberen Grenzflächen wurden dabei so hoch, dass sich die Kupferflächen in der Lotlegierung auflösten. An den unteren Grenzflächen trat eine Entmischung auf, die sich einer grundsätzlich anderen Struktur auf den Schliffbildern zeigte. Das Entstehen von Lunkern lag darin begründet, dass, aufgrund der besseren Wärmeabfuhr über die Leiterplatte, die Aufschmelz- und Erstarrungsprozesse mit deutlich geringeren Temperaturgradienten abliefen. Somit konnten sich die kleinen Hohlräume ausbilden. Die in den beiden Aufnahmen rechts erkennbaren satellitenartigen Lotreste entstanden höchstwahrscheinlich durch die schnellen Erstarrungsprozesse, bei denen das flüssige Lot sich nicht mehr zu einer homogenen Masse zusammenfinden konnte. Dieser Effekt trat nicht in unmittelbarer Nähe der entmischten Bereiche auf. Eine nähere Betrachtung der intermetallischen Phasen erfolgte nicht, da aufgrund der zuvor beschriebenen Effekte keine signifikanten Veränderungen diesbezüglich an den Grenzflächen beobachtet wurden.

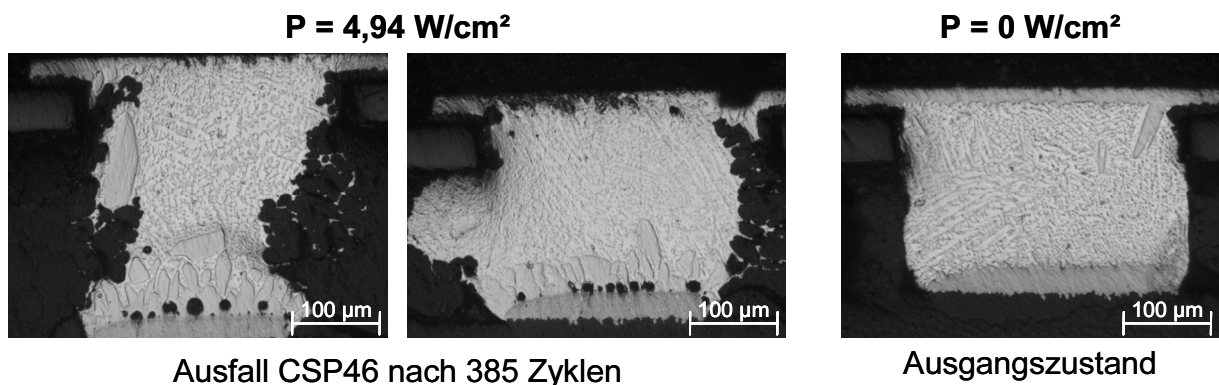


Bild 51: Schliffbilder von zwei Anschlussballs nach dem Versagen des CSP46 bei Belastungsstufe 1 (links und Mitte) und unbelastetes Vergleichsmuster (rechts)

Ein anderes Verhalten der Widerstandsverläufe ergab sich bei den Belastungsstufen 3 und 4. Bis zu einer Versuchsdauer von circa 7.000 Zyklen konnte kein wesentlicher Widerstandsanstieg festgestellt werden. Ab diesem Zeitpunkt stiegen die berechneten Werte kontinuierlich an, teilweise über den vierfachen Wert des Ausgangswerts beim Versuchsende für die Belastungsstufe 3 (32.000 Zyklen) hinaus (Bild 52 links oben). Der Versuchsdurchlauf für die Belastungsstufe 4 wurde nach 22.760 Zyklen beendet, da im Anschluss kein völliges elektrisches Versagen zu erwarten war. Der Anstieg der Widerstandsmaxima fiel über alle Prüflinge geringer als bei der Belastungsstufe 3 aus (Bild 52 links unten). Für die Weibullauswertung wurde ein geeignetes Ausfallkriterium gesucht. Dies war hier von besonderer Bedeutung, da keine elektrischen Ausfälle auftraten. Die Größenordnung der Anstiege der Widerstandswerte ließ allerdings auf eine

massive Schädigung der Verbindungsstellen schließen, wie sich bei der späteren Analyse der Schlibbilder zeigen sollte. Im Rahmen einer möglichst einheitlichen Vorgehensweise wurde auch hier ein Anstieg von 10% gegenüber dem jeweiligen Mittelwert aus den Zyklen 91 bis 100 herangezogen. Dies führte zu den charakteristischen Lebensdauern von $T_{c,3} = 8.688$ Zyklen und $T_{c,4} = 14.703$ Zyklen (Bild 52 rechts).

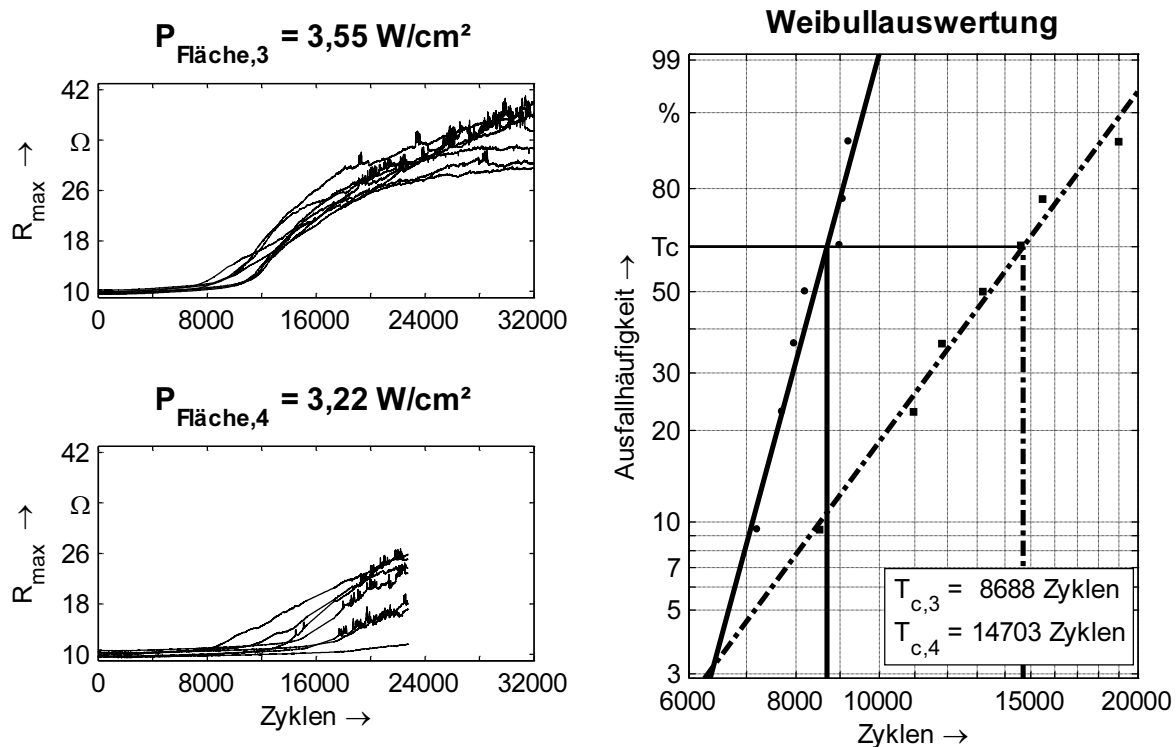


Bild 52: Verlauf der Widerstandsmaxima für die Belastungsstufen 3 und 4 (links) und die zugehörigen Weibullauswertungen (Ausfallkriterium 10 %iger Anstieg des Widerstands) (rechts)

Die Festlegung des Ausfallkriteriums für die vorliegenden Widerstandsverläufe war diskussionswürdig, da der herangezogene Wert von 10 % nicht mit einem konkreten Versagen korrelierte. Eine diesbezügliche, weitere Auswertung der Daten sollte den Zusammenhang zwischen dem Ausfallkriterium prozentualer Widerstandsanstieg und der Aussagekraft der dabei ermittelten charakteristischen Lebensdauer verdeutlichen. Hierzu wurden die entsprechenden Werte für die Versuchsreihen mit den Belastungsstufen 3 und 4 für einen Bereich von 2 bis 20 % ermittelt (Bild 53). Mit der Erhöhung des prozentualen Kriteriums für einen Ausfall nach oben, stiegen auch die berechneten Werte für $T_{c,3}$ und $T_{c,4}$. Am Ende der Kurve für $T_{c,4}$ konnte eine Stufe identifiziert werden. Der Grund hierfür war, dass der Widerstand eines Prüfobjekts während des Versuchszeitraums nur um maximal 19,4 % anstieg, und somit im Falle eines höheren Wertes für das Ausfallkriterium als funktionstüchtig betrachtet wurde. Ab diesem Kriterium erfolgte die Weibullauswertung mit lediglich sechs anstatt bis dahin mit sieben Ausfällen, mit der Folge, dass sich die Berechnungsgrundlage für die Ausgleichgerade änderte. Dieses Verhalten war ein weiterer Beleg dafür, dass die Ermittlung von signifikanten Kenngrößen, wie in diesem Fall der charakteristischen Lebensdauer, immer mit gesichertem

Wissen einher gehen sollte. Ansonsten besteht die Gefahr der Fehlinterpretation der Auswertung.

Für die vergleichende Bewertung der beiden Belastungsstufen wurden in diesem Fall nicht die absoluten Werte, sondern das Verhältnis zwischen diesen herangezogen. Eine Betrachtung von Ausfallkriterien kleiner als 2 % wurde verworfen, da gerade zu Versuchsbeginn noch geringe Schwankungen für die berechneten Maximalwiderstände auftraten. Ausgehend von einem Wert von 1,88 verringerte sich das Verhältnis zunächst kontinuierlich bis auf 1,65 und anschließend nach der bereits zuvor erwähnten Stufe auf 1,59. Da die Veränderung in einem kleinen Bereich stattfand, kann der Schluss gezogen werden, dass die Festlegung des Ausfallkriteriums in einem weiten Bereich erfolgen konnte, ohne dass sich die Aussagekraft für die vergleichende Bewertung prinzipiell änderte. Weiterhin kann mit der Festlegung eines kleinen prozentualen Anstiegs die Versuchsdauer reduziert werden. In dem vorliegenden Beispiel wären bei einer Festlegung einer Schranke von 2 % alle 14 Testobjekte für die Belastungsstufen 3 und 4 nach 85,6 Stunden (entspricht 10.266 Zyklen) als ausgefallen betrachtet worden, gegenüber 130,7 Stunden (15.681 Zyklen) bei 5 % bzw. 158,2 Stunden (18.989 Zyklen) bei 10 % Widerstandsanstieg. Für die Belastungsstufen 1 und 2 ergab sich ein ähnliches Ergebnis.

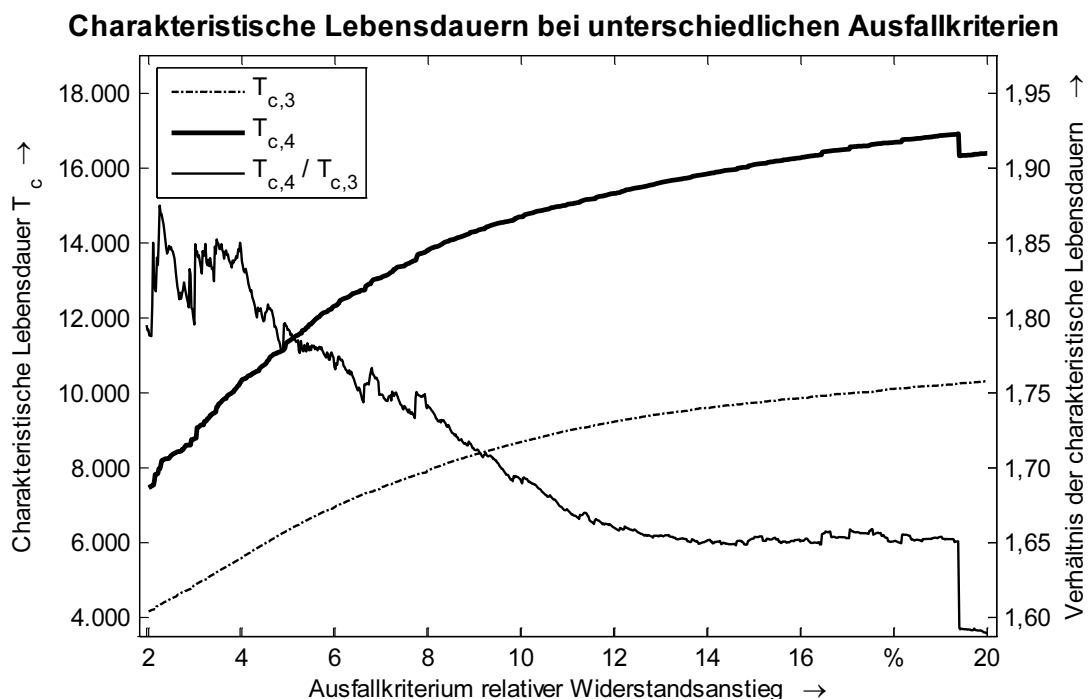


Bild 53: Abhängigkeit der charakteristischen Lebensdauer vom Ausfallkriterium für die Belastungsstufen 3 und 4 und deren numerisches Verhältnis

Abschließend wurden von einer Lotstelle eines CSP46 mit der Belastungsstufe 4 ein Schliffbild angefertigt (Bild 54 links). Als Vergleichsobjekt wurde ein Bauelement ausgewählt, das parallel in der Klimakammer bei 115 °C für 190 Stunden stromlos lagerte (Bild 54 rechts). Somit konnten die Auswirkungen einer ausschließlichen Temperatureinwirkung beurteilt werden. Bei der Betrachtung der bestromten Lotstelle fielen zwei Aspekte auf. Zunächst konnte eine Entmischung der Lotlegierung festgestellt werden,

die insbesondere im Vergleich zu dem unbelasteten Objekt deutlich wurde. Weiterhin wuchsen die intermetallischen Phasen zwischen der Lotverbindung und den beiden Kupferstrukturen an der Ober- und Unterseite der Anschlussstelle. In Zusammenhang mit dem ermittelten elektrischen Verhalten mussten auch diese Lotstellen als erheblich geschädigt beurteilt werden. Auf der anderen Seite würde ein solches Bauelement auf einer funktionsfähigen Baugruppe mit hoher Wahrscheinlichkeit unauffällig bleiben.

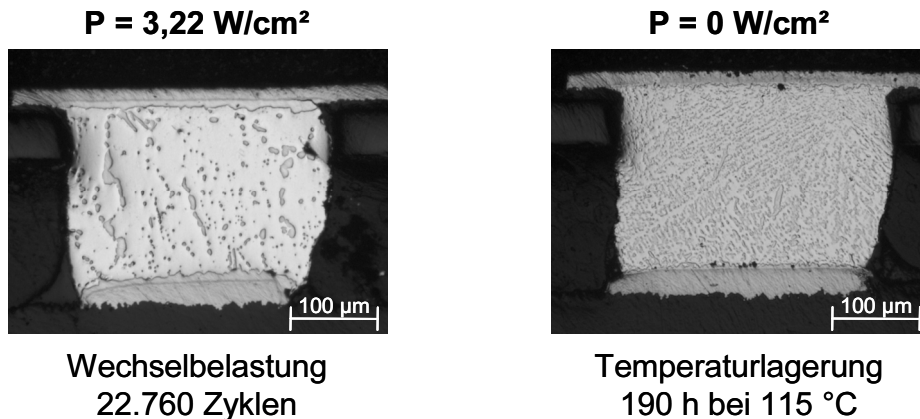


Bild 54: Schliffbilder von einem belasteten Anschlussball (Belastungsstufe 4) ohne elektrisches Versagen (links) und Vergleichsmuster nach paralleler Temperaturlagerung (rechts)

Die vorgestellten Untersuchungen zu dem Einfluss einer Eigenerwärmung auf Bauelemente an Einbauorten mit hoher Temperatureinwirkung zeigten drei wesentliche Erkenntnisse, die über die Einzelergebnisse hinausgingen. Zunächst trat ein Wechsel des Fehler- beziehungsweise des Schädigungsmechanismus mit steigender Belastung auf. Dies war deshalb von besonderer Bedeutung, da bei der Versuchsdurchführung die berechneten Widerstandswerte und das festgelegte Ausfallkriterium nicht zwangsläufig auf ein solches Verhalten hinwiesen. Das Indiz, das der Auswertung einen Hinweis lieferte, war der sprunghafte Anstieg der ermittelten charakteristischen Lebensdauer zwischen den Belastungsstufen 2 und 3. Bei der Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen ist es bei einem Auftreten von derartigen Ergebnissen zwingend notwendig, die Versuchsbedingungen einschließlich der einwirkenden Belastung kritisch zu hinterfragen.

Bei den beiden höchsten Belastungsstufen schmolzen die Lotstellen in jedem Zyklus auf und erstarrten wieder. Dieses Verhalten konnte anhand der permanenten Messdatenerfassung und -auswertung für die verwendeten CSP46-Bauelemente allerdings nicht unmittelbar festgestellt werden. Hierzu waren ergänzende Analysen notwendig, bei denen sowohl zerstörungsfreie als auch zerstörende Verfahren eingesetzt wurden. Die ganzheitliche Betrachtung aller Einzelergebnisse und -erkenntnisse ergab schließlich eine Aufklärung über die aufgetretenen Effekte. Insbesondere bei neuen oder angepassten Prüfungen ist eine Versuchsauswertung und -analyse mit möglichst vielen unterschiedlichen Verfahren zu empfehlen.

In Hinblick auf die Einbausituation der Baugruppe in dem Bild 44, die formschlüssig auf dem Kühlmantel der Antriebsmaschine platziert ist, konnte die Wirksamkeit einer Wär-

meabfuhr über die gegenüberliegende Seite des Schaltungsträgers anhand der Schliffbilder nachgewiesen werden. Mit der Verwendung von elektronischen Bauelementen mit hoher elektrischer Verlustleistung bei einer Umgebungstemperatur von bis zu 150 °C können allerdings in den Lotstellen Temperaturen auftreten, die diese nachhaltig schädigen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass die Wirksamkeit von Entwärmungskonzepten anhand der Gefügestruktur der Verbindungsstellen bewertet werden kann. Dies gilt insbesondere für Untersuchungen mit verschiedenen Belastungsszenarien oder Wärmeableitungsvarianten, bei denen eine vergleichende Analyse mit Schliffbildern erfolgt.

4.3 Zusammenfassung

Die Ermittlung der Zuverlässigkeit von Systemen, Prozessen und Komponenten erfolgt durch die Anwendung von Prüfverfahren, die in der Regel mögliche reale Belastungen verstärkt nachbilden. Von besonderer Bedeutung sind hierbei vergleichende Untersuchungen mit dem Ziel eine Vorzugsvariante zu bestimmen. Mit der Einführung von Innovationen tritt die Problematik auf, dass etablierte Methoden nur bedingt anwendbar sind. Dasselbe gilt auch für Qualifizierungen, bei denen Aspekte auftreten, die von bisherigen Verfahren nur bedingt abgedeckt werden. In diesem Kapitel wurden anhand von zwei konkreten Beispielen die Optimierung von Prüfschritten und Testaufbauten untersucht. Vor der Durchführung von Qualifikationsschritten ist eine detaillierte Analyse der zu untersuchenden Eigenschaften und der zugehörigen Mess- und Zielgrößen notwendig. Anschließend können Testobjekte und Messaufbauten so modifiziert werden, dass ein höchst möglicher Erkenntnisgewinn erfolgen kann.

Bei der Qualifizierung des Verbindungskonzeptes in Abschnitt 4.1 konnten mit der Verwendung von festverdrahteten Messleitungen für eine Vier-Punkt-Widerstandsmessung kleinste Unterschiede bei den beiden Oberflächenmetallisierungen Zinn und Nickel/Gold nicht nur festgestellt, sondern darüber hinaus auch quantifiziert werden. Der praktische Nutzen liegt darin, dass mit einem solchen Vorgehen die Grenzen einer sowohl technologisch als auch wirtschaftlich einfacheren Lösung, die in diesem Fall die Variante mit den Zinn-Oberflächen war, aufgezeigt werden kann. Weiterhin konnte bei der Analyse des Stromerwärmungsverhaltens mit dem parallelen Einsatz von Thermoelementen und Thermographieaufnahmen nachgewiesen werden, dass mit einer Kombination von mehreren Untersuchungsmethoden zusätzliche Informationen über das Gesamtsystemverhalten gewonnen werden können. Hieraus kann eine prinzipielle Empfehlung für den Einsatz möglichst vieler Prüf- und Messverfahren gegeben werden.

Die Analyse des Einflusses einer Eigenerwärmung von Bauelementen mit hoher elektrischer Verlustleistung zeigte die Notwendigkeit der kritischen Betrachtung von Einzelergebnissen. Mit der Verringerung der einwirkenden Belastung auf die Verbindungstechnik trat ein Wechsel des Schädigungsmechanismus auf. Bei der Anwendung eines festdefinierten Ausfallkriteriums und gleichzeitiger automatisierter Messdatenauswertung kann eine solche Änderung nicht zwangsläufig erkannt werden. Insbesondere traten bei der höchsten Belastungsstufe Effekte auf, die unter realen Bedingungen nicht auftreten

würden. Auch kann eine Empfehlung gegeben werden, dass jeder Qualifizierungsschritt mit ergänzenden Analysen, die bei den gezeigten Untersuchungen in der Anfertigung von Röntgenaufnahmen und von Schliffbildern lag, bewertet werden sollte. Eine genaue Betrachtung aller Einzelaspekte bei einer Aufgabenstellung, die vom Standard abweicht, ist unausweichlich.

5 Konzeption und Qualifizierung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Einflusses von Kondensation

Die Sicherstellung von Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Komponenten, Baugruppen und Systeme gewinnt sowohl für den jeweiligen Hersteller als auch für den Anwender immer mehr an Bedeutung. Speziell in der Automobilbranche, bei der mit jedem Modellwechsel die Komplexität der Elektronik ansteigt und diese zudem enormen mechanischen und klimatischen Belastungen ausgesetzt sind, müssen mit geeigneten Prüfverfahren die Qualität und Zuverlässigkeit bei allen auf das Produkt einwirkenden Umwelteinflüsse gewährleistet werden. Das Ziel für den späteren Betrieb eines Fahrzeuges ist dabei einerseits die Absicherung sicherheitsrelevanter Funktionen, wie beispielsweise mit dem Antiblockiersystem (ABS) oder dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP), und andererseits die zuverlässige Gewährleistung von Komfortfunktionen, bei denen aktuell die Ausweitung von Infotainmentsystemen und Fahrerassistenzsystemen, zum Beispiel eine adaptive Abstandskontrolle (ACC), den Schwerpunkt bilden. Gerade mit letzteren wollen sich die Automobilhersteller von ihren Wettbewerbern abgrenzen und zusätzliche Marktanteile gewinnen. [74]

Vor allem in Fahrzeugen der Oberklasse ist ein stetiger Trend hinsichtlich der quantitativen Steigerung der Anzahl von Steuergeräten, Mikroprozessoren und Sensoren, die jeweils eine Größenordnung von 50 bis 100 angenommen haben, zu verzeichnen [134]. Weiterhin sind mittlerweile bis zu 70 % aller Steuergeräte in modernen Kraftfahrzeugen permanent mit der Bordnetzspannung verbunden und es besteht bei einer Fehlfunktion eines Steuergeräts die Gefahr, dass es zu einer Entladung der Fahrzeugbatterie kommt. Neben dem fahrzeugtopologischen Wandel stellt zudem die fortschreitende Miniaturisierung der Elektronik bei zugleich steigender Funktionserhöhung und deren Einbau direkt am Wirkungsort immer höhere Anforderungen an die eingesetzten elektronischen Komponenten [24][63].

Zusätzlich zu den extremen Umgebungsbedingungen an Einbauorten wie Motor-, Abgas- oder Getriebestrang beeinflussen zunehmend auch die härteren Umweltbedingungen, denen heutige Kraftfahrzeuge ausgesetzt sind, die Zuverlässigkeit der Elektronik. So werden beispielsweise Kraftfahrzeuge baugleich für den europäischen Markt und auch für Länder mit tropischen, maritimen oder trockenen Klimata produziert. Trotz der höheren klimatischen Beanspruchungen sollen die Elektronikanwendungen dauerhaft zuverlässig betrieben werden.

Da aber für jedes Fahrzeug unter gleichen Produktionsbedingungen die gleichen Qualitätsanforderungen, die heute bei 15 Jahren Betriebszeit und 300.000 km Laufleistung liegen, verlangt werden, müssen an die einzelnen Baugruppen bzw. Steuergeräte hohe Anforderungen gestellt werden, um eine angemessene Qualität des Gesamtsystems Kraftfahrzeug sicherzustellen. Daher werden im Zuge der kontinuierlichen Qualitätsverbesserungsinitiativen vieler Automobilhersteller immer härtere Qualitätsanforderungen an die Zulieferer von elektronischen Komponenten, Modulen und Systemen gestellt. Neben optimierten Fertigungsabläufen mit strengen Qualitätskontrollen führt gerade die Weiterentwicklung im Hinblick auf robustes Design zur Minimierung des Ausfallrisikos

und zur Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen [134]. Andererseits tritt in der Praxis immer wieder der Fall auf, dass Fahrzeuge liegen bleiben oder aufgrund des Eingreifens eines Steuergerätes nur eingeschränkt nutzbar sind. Dabei wird oftmals ein Ausfall oder eine Fehlfunktion einer elektronischen Baugruppe diagnostiziert. Weiterhin kann hier die Situation eintreten, dass bei einer anschließenden Ursachensuche kein Fehler festgestellt wird. Bei einem solchen Szenario wird oftmals das Auftreten einer temporären Betauung in Erwägung gezogen.

In diesem Kapitel wird am Beispiel von Betauung der Einfluss auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen untersucht. Hierzu wurde ein bisher nicht zur Verfügung stehendes Prüfverfahren konzipiert und exemplarisch verifiziert. Ausgangspunkt waren dabei Daten aus umfangreichen Fahrzeugmessungen, die unter verschiedenen Testbedingungen an unterschiedlichen Einbauorten in einem Kraftfahrzeug gewonnen wurden. Anschließend wurden für besonders signifikante Einbauorte die klimatischen Bedingungen im Labor mit Hilfe eines Klimaschranks nachgebildet und mit speziell entwickelten Testplatinen der Einfluss von Betauung auf diese untersucht. Bei der Analyse der Ausfallmechanismen lag besonderes Augenmerk auf der elektrochemischen Migration in Form von Dendriten. [113]

5.1 Auftreten und quantitative Erfassung von Betauung

Eine notwendige Voraussetzung für die Abschätzung der Zuverlässigkeit bei elektronischen Baugruppen unter Umwelteinflüssen ist der Einsatz von anerkannten Prüfverfahren. Bei einem Qualifikationsprozess für eine Komponente oder eine Baugruppe werden ausgewählte Prüflinge verschiedensten Belastungen, entweder einzeln oder kombiniert, ausgesetzt. Verschiedene Prüfverfahren sind dabei etabliert wie beispielsweise Temperaturschocklagerung, Wärmeauslagerungen mit langsamen Temperaturänderungen, Auslagerung in feuchter Wärme oder auch zyklische Belastung in Klimakammern mit der Möglichkeit Temperatur und relative Feuchte zu profilieren. In der Praxis wird häufig für die Qualifizierung des Einflusses von feuchter Wärme ein Profil mit zwei Varianten angewendet, wie es in der DIN EN 60068-2-30 festgelegt ist [19]. Dabei wird ein Prüfzyklus mit einer Dauer von 24 Stunden verwendet, bei dem die Temperatur zwischen zwei Niveaus (+25 °C und +40 °C bzw. +55 °C) mit einer maximalen Änderungsgeschwindigkeit von 0,17 K/min geregelt wird. Die relative Luftfeuchte wird während des gesamten Zyklus bei mindestens 90 % gehalten, bzw. sind in der Variante 2 in der Abkühlphase auch Werte zwischen 80 % und 90 % zulässig.

Für eine spezifische Betauungsprüfung sind diese Klimakammerprofile nur bedingt aussagekräftig [129]. Da hier lediglich die einwirkende klimatische Belastung festgelegt ist, kann beispielsweise aufgrund der thermischen Masse des Prüflings und der Einbausituation eines Schaltungsträgers (Gehäuse) Betauung eintreten oder auch nicht. Dieser Prüfablauf ist daher nicht geeignet, reproduzierbar Kondensation auf elektrisch leitfähigen Strukturen zu gewährleisten. In diesem Abschnitt werden zunächst die physikalischen Grundlagen für das Auftreten von Betauung zusammengefasst und ein Sensor vorgestellt, der eine flächenbezogene Messung der Wassermasse ermöglicht. Dies ist

eine wesentliche Voraussetzung für die Konzeption und die Qualifizierung eines neuen Prüfverfahrens zur Bestimmung des Einflusses von Kondensation auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen.

5.1.1 Grundlagen der Betauung

Für das Verständnis des Effektes Betauung ist es zunächst notwendig, die physikalischen Vorgänge zu analysieren und die unterschiedlichen Mechanismen für die Bildung von Wasser auf der Oberfläche von Baugruppen zu erläutern. Befinden sich Komponenten und Systeme im Einsatz, so unterliegen diese einer atmosphärischen Belastung und damit auch immer einer Feuchtebelastung, bei der die Baugruppenoberfläche mit dem Wasserdampf der Atmosphäre im Gleichgewicht steht. Der aus der Meteorologie bekannte Begriff der relativen Feuchte (rF) stellt dabei das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Wasserdampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck dar. Bereits bei einer relativen Luftfeuchte von etwa 40 % findet Adsorption statt und es lagern sich dünnste Wasserfilme im molekularen Maßstab auf der Oberfläche an. Bei ca. 60 % relativer Feuchte bildet sich ein bis zu vier Moleküllagen dicker Film, der mit hygroskopischen Verunreinigungen in Wechselwirkung treten kann. Mit dem Erreichen von relativen Luftfeuchtwerten von etwa 80 % kann sich ein bis circa zehn Moleküllagen dicker Wasserfilm auf der Oberfläche bilden, der sich bereits ähnlich verhält wie normales Wasser, und chemische Prozesse, wie zum Beispiel Lösungsvorgänge oder ionische Prozesse, initiieren kann.

Die notwendigen Bedingungen für das Auftreten von Betauung sind davon grundsätzlich verschieden. Eine Betauung tritt immer dann auf, wenn der Sättigungsdampfdruck bei einer bestimmten Temperatur überschritten wird. Bei einem Transfer einer kalten Baugruppe in eine warme Umgebung kommt es zu einer Abkühlung der an der Baugruppe angrenzenden Luft, und, da diese weniger Wasser aufnehmen kann als die warme Luft, überschüssiges Wasser kondensiert aus. Dieses Wasser lagert sich in Form von Tröpfchen auf der Oberfläche ab. Dabei schwankt der Wasserdampfgehalt der Luft mit der Temperatur. Die atmosphärische Luft kann beispielsweise bei 10 °C noch 30 g Wasserdampf je Kubikmeter aufnehmen, jedoch bei -30 °C nur noch 0,4 g. Jede Wasserdampfmenge, die den „Sättigungswert“ überschreitet, kondensiert mehr oder weniger schnell zu flüssigem Wasser. Je größer die Übersättigung, desto mehr Wasser kondensiert.

Die Temperatur, bei der Kondensation theoretisch beginnt, wird als Taupunkt bezeichnet. Bei dieser herrscht eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % (maximale Sättigung) und der Wasserdampfpartialdruck entspricht genau dem Wasserdampfsättigungsdruck. Zur mathematischen Berechnung der Taupunkttemperatur hat sich die Formel von Magnus als geeignet erwiesen. Diese mathematische Berechnung des Taupunkts T_{Tau} erfolgt nach (Gl. 21) unter Verwendung der Koeffizienten nach Magnus (Tabelle 8) und dem Wasserdampfpartialdruck p_d [72].

$$T_{Tau} = \frac{-\ln\left(\frac{p_d}{C_1}\right) \cdot C_3}{\ln\left(\frac{p_d}{C_1}\right) - C_2} \quad (\text{Gl. 21})$$

Phase	Temperatur	C ₁	C ₂	C ₃
Eis	-50,9 °C - 0,0 °C	6,10714 mbar	22,44294	272,440 °C
Wasser	-50,9 °C - 0,0 °C	6,10780 mbar	17,84362	245,425 °C
Wasser	0,0 °C - 100,0 °C	6,10780 mbar	17,08085	234,175 °C

Tabelle 8: Magnus Koeffizienten für die Berechnung der Taupunkttemperatur

Für die endgültige Berechnung des Taupunkts T_{Tau} muss der Wasserdampfpartialdruck p_d bekannt sein. Dieser Wert kann entweder aus veröffentlichten Dampfdrucktabellen entnommen werden oder aus der Lufttemperatur T , der relativen Feuchte rF und den Magnus-Koeffizienten nach (Gl. 22) berechnet werden.

$$p_d = C_1 \cdot e^{\frac{C_2 \cdot T}{C_3 + T}} \cdot \frac{rF}{100 \%} \quad (\text{Gl. 22})$$

Allerdings ist der Effekt Betauung nicht allein mit den beschriebenen Zusammenhängen zu charakterisieren. Hinter dieser vereinfachten Betrachtungsweise stehen komplexe Abläufe. Dabei kann der Feuchtigkeitsniederschlag aus der Atmosphäre nicht nur aus unterschiedlichsten Stoffen wie Gasen und Aerosolen sowie deren Verbindung mit atmosphärischen Kontaminationskeimen bestehen. Weiterhin hat die Reinheit der Oberfläche, auf der sich das Kondensat bildet, einen maßgeblichen Einfluss. Dies ist dadurch begründet, dass erst durch die Anwesenheit von Verunreinigungen Keime für Kondensationsstellen entstehen. Darüber hinaus haben die Oberflächenspannung und die molekularen Bindungskräfte des Kondensates, die Rauigkeit der Oberfläche sowie das Oberflächenmaterial Einfluss auf die Taubildung sowie den Grad der Betauung. Die erwähnten Einflussfaktoren können dazu führen, dass bei gleichem Umgebungsklima, durch Temperatur und relative Luftfeuchte definiert, die Taupunkttemperatur angehoben wird und Betauung bereits oberhalb der rechnerisch ermittelten Taupunkttemperatur einsetzt [18].

5.1.2 Quantitative Messung von Wassermassen

Für die Bewertung des Einflusses von Betauung auf die Zuverlässigkeit ist es erforderlich, das Auftreten des kondensierten Wassers quantitativ zu erfassen. Aus dieser Aufgabenstellung können für eine Anwendung auf elektronische Baugruppen eine Vielzahl von Anforderungen für eine sensorische Erfassung abgeleitet werden:

- miniaturisiertes Design zur Messwertgewinnung an unterschiedlichsten Einbauorten,
- geringe thermische Masse des Sensors,

- geringe Leistungsaufnahme zur Vermeidung von thermischen Einflüssen,
- hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte,
- Langzeitstabilität gegenüber Umwelteinflüssen (z. B. Säuren),
- einfacher Kalibrierprozess des Sensors,
- Ausgabe der Größen Umgebungstemperatur, Baugruppentemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und flächenbezogene Wassermasse.

Für die Messung von Betauung werden kommerziell Sensoren angeboten, die auf Basis von optischen oder elektrischen Wirkprinzipien arbeiten. Allerdings waren die optischen Sensoren einerseits durch die Baugröße der Sender- und Empfangseinheit für die Platzierung in oder auf elektronischen Baugruppen ungeeignet. Andererseits war die Ableitung einer Wassermasse aufgrund von Reflexionsänderungen wenig praxistauglich, da hier die Flächenbedeckung stärker als die Höhe der Wasserbedeckung für die Messwertbildung eingeht. Dahingegen erfüllte ein Sensor des CiS Institut für Mikrosensorik (CiS) weitgehend die zuvor genannten Anforderungen. Diese Sensoren beruhen auf einem kapazitiven Messprinzip. Das Grundmodul besteht aus einem in Silizium integrierten Streufeldkondensator, einem Temperatursensor und einem integrierten Kapazitäts-Frequenz-Wandler. Durch eine Kondensatbildung auf der Sensoroberfläche wird die Dielektrizitätskonstante verändert und bewirkt so eine Kapazitätserhöhung, die zu einer Frequenzänderung des Sensorelements führt [16][127].

Die Anforderung einer möglichst geringen thermischen Masse wird dadurch erfüllt, dass der eigentliche Sensor auf einer Leiterplatte der Größe 14 mm x 6 mm nur mit den notwendigsten Bauelementen aufgebaut ist. Diese elektronische Schaltung wandelt die Kapazität des Streufeldkondensators in ein Frequenzsignal um, das in der zweiten Teil-einheit weiterverarbeitet wird. Dort erfolgt eine Linearisierung und ein Abgleich mit den abgelegten Kalibrierdaten. In einem letzten Schritt wird der Messbereich des Sensors, der abhängig von den Kammstrukturen auf der Sensoroberfläche ist, in ein lineares Ausgangssignal von 0 V bis 1 V abgebildet (Bild 55) [88].

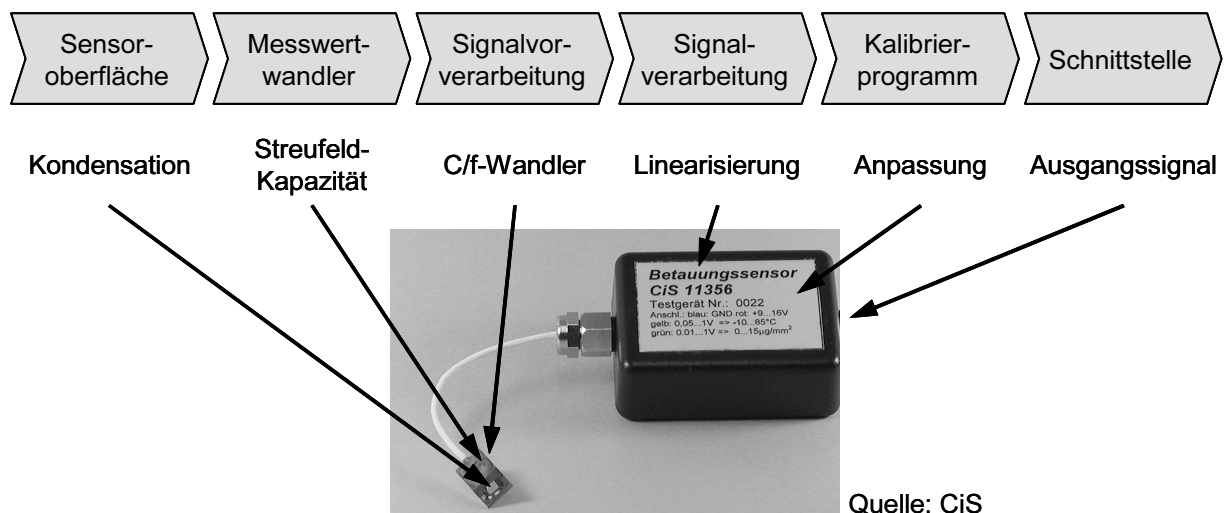


Bild 55: Aufbau und Prinzip der Messwertbildung des eingesetzten Betauungssensors [128]

Die Temperatur des Sensorelements wird ebenfalls als lineares Spannungssignal ausgegeben. Die Erfassung der relativen Luftfeuchtigkeit und der Umgebungstemperatur erfolgt mit einem zweiten Sensorsystem, das ähnlich wie das für die Betaungsmessung aufgebaut ist [89]. Für die optimale Erfassung der lokalen, klimatischen Bedingungen sollte die Platzierung in der unmittelbaren Nähe des ersten Sensorsystems erfolgen. Mit einem solchen Aufbau ist die Erfassung der vier geforderten Größen gewährleistet. Von weiterem Interesse ist der Kalibrierprozess des Sensors. Hierbei wird das Frequenzsignal, das von der sensorischen Teileinheit bereitgestellt wird, mit optischen Aufnahmen der Sensoroberflächen abgeglichen. Anhand von wenigen, charakteristischen Wertepaaren kann eine Linearisierungskurve ermittelt werden, die in der Auswerteeinheit des Sensorsystems abgelegt wird (Bild 56). Dieses Konzept für die Betaungsmessung erfüllt die Anforderungen in besonderem Maße, da mit einem hochintegrierten Aufbau eine direkte Messung einer Wassermasse erfolgen kann und für die weitere Auswertung ein lineares Spannungssignal bereitgestellt wird. Eine Anpassung an unterschiedliche Messbereiche kann mit einer angepassten Strukturierung des Halbleiters erfolgen.

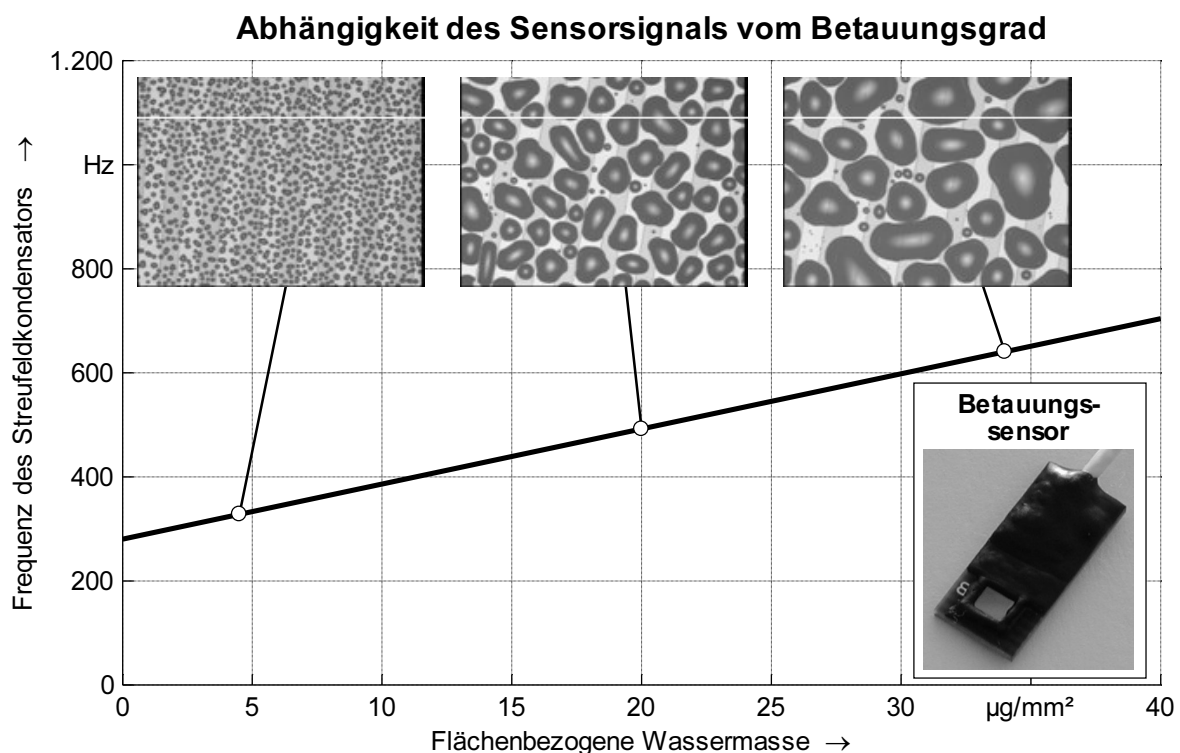


Bild 56: Kalibrierung des Betaungssensors anhand optischer Auswertung der Sensoroberfläche

5.2 Analyse des Ausfallmechanismus

Der aktuelle Trend zu fortschreitender Miniaturisierung in der Aufbau- und Verbindungstechnik wird auch in Zukunft anhalten. Dadurch werden Leiterbahn- und Kontaktabstände immer weiter reduziert und die Feldstärken nehmen bei gleichbleibenden Span-

nungspegeln zu. Darüber hinaus werden Leiterplatten auf Grund der Verwendung von No-Clean Lotpasten am Ende des Herstellungsprozesses nicht mehr gereinigt und somit verbleiben Flussmittelrückstände und andere Prozessverunreinigungen auf den Baugruppen zurück. Dies hat im trockenen Zustand in den allermeisten Fällen keine Auswirkungen, aber in Kombination mit Wasser können sich elektrolytische Lösungen bilden. Bereits wenige Monolagen Wasser reichen aus, um einen leitenden Pfad zwischen benachbarten Leitern zu erzeugen. Ein solcher Pfad kann unter anderem auch durch eine im vorangegangenen Abschnitt auftretende Betauung verursacht werden. Dadurch können eine Reihe von Ausfallmechanismen auftreten, von denen die elektrochemische Migration im Rahmen dieses Kapitels im Mittelpunkt der Betrachtungen steht [17][82]. Für das Verständnis der Vorgänge und zur Abgrenzung zur elektrochemischen Migration werden nachfolgend drei weitere elektrochemische Mechanismen, die in der Mikroelektronik auftreten können, erläutert.

Galvanische Korrosion

Die galvanische Korrosion ist eine Art der nassen Korrosion und entsteht aus der Kombination von edlen mit unedleren Metallen. Jene tritt auf, wenn zwei oder mehr unterschiedliche Metalle, in Verbindung mit einer elektrolytischen Lösung, in Kontakt stehen. Als Elektrolyt dient dabei adsorbierte oder diffundierte Feuchte in Kombination mit Verunreinigungen. Durch den Kontakt zweier verschiedener Metalle mit unterschiedlichen elektrochemischen Potentialen entsteht eine galvanische Zelle. Dabei fungiert das Metall mit dem höheren elektrochemischen Potential als Kathode und das mit dem niedrigeren Potential als Anode. Hierbei stellt die Anode das aktive Metall dar, an dem die meiste Korrosion auftritt, wohingegen die Kathode das edle und korrosionsbeständige Metall darstellt [132]. Aufgrund des Potentialunterschiedes zwischen unterschiedlichen Metallen kommt es zu einem Stromfluss von der Anode zur Kathode, wodurch Wasserstoff freigesetzt wird und alkalische Verbindungen an der Kathode gebildet werden. Ausschlaggebend für die galvanische Korrosionsrate ist dabei die Ionisationsrate an der Anode. Je mehr Anodenmaterial in Lösung geht, desto stärker findet die galvanische Korrosion statt.

Korrosionsinduzierte Kriechströme

Eine wichtige Rolle bei Ausfällen in der Mikroelektronik nehmen Fehler aufgrund von korrosionsinduzierten Kriechströmen ein. Insbesondere an Kupferkontakten und Kupfermetallisierungen können in sulfidierenden Industriegasatmosphären, in Abhängigkeit von Art und Grad der Kontaminationen, welche in der Regel hygroskopisch wirken, ab ca. 60 % relativer Luftfeuchte korrosionsinduzierte Kriechströme auf elektronischen Baugruppen auftreten. Im Gegensatz zur elektrochemischen Migration werden dabei jedoch keine festen Brücken zwischen benachbarten Leitern gebildet. Stattdessen führt die Lösung von Kupfersulfat sowie ionische und organische Verunreinigungen durch Wasserfilme während der Betauungsphase zur Erhöhung der Leitfähigkeit des Feuchtigkeitsfilms. Dadurch kann es aufgrund von Leckströmen und Kurzschlüssen zu Funktionsstörungen oder Funktionsausfällen elektronischer Komponenten und Systeme

kommen. Nach einer Abtrocknung des Schaltungsträgers verschwindet dieses Phänomen wieder, allerdings verbleiben Kontaminationskeime nach wie vor auf der Oberfläche. Bei einer erneuten Betauung der Leiterplatte gehen diese Keime wieder in Lösung mit der Folge, dass Kriechströme aufgrund einer Aufkonzentration der Verunreinigungen verstärkt auftreten [120][122].

Conductive Anodic Filament

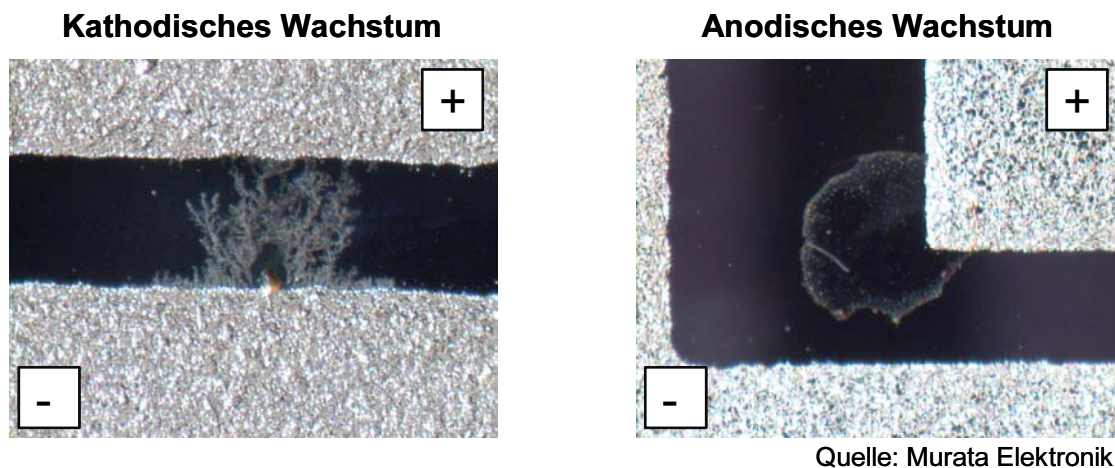
Bei diesem Fehlermechanismus tritt ein abrupter Abfall des Isolationswiderstandes zwischen benachbarten Leitern unterschiedlichen Potentials auf. Die Ursache hierfür ist ein leitender Film von der Anode zur Kathode unterhalb der Substratoberfläche des Schaltungsträgers. Dieses Filament, genannt Conductive Anodic Filament (CAF), ist das Resultat eines elektrochemischen Korrosionsprozesses, der an der Anode beginnt, und entlang der Glasfasern im Substrat in Richtung der Kathode wächst. Insbesondere bei mehrlagigen Leiterplatten, die sich unter anderem durch reduzierte Leiterbahnabstände oder Durchkontaktierungen zwischen verschiedenen Ebenen auszeichnen, stehen mehrere Wege zur Verfügung, um leitende Pfade zwischen Anode und Kathode zu bilden [59]. Die grundlegenden Voraussetzungen für diesen Ausfallmechanismus sind die Anwesenheit von Kupfer, elektrischer Spannung und Glasfasern, wobei die Adsorption von Wasser und anschließende Diffusion des Wassers in das Laminat die Prozesse auslöst. Bei Anwesenheit von wässriger Lösung kann sich ein Elektrolyt bilden und einen stromleitenden Pfad bereitstellen, der bei vorhandener Potentialdifferenz elektrochemische Prozesse initiieren kann. Im Gegensatz zur elektrochemischen Migration in Form von Dendriten, bei der Metallionen in Lösung gehen und auf der Substratoberfläche von der Kathode zur Anode wandern, wachsen CAFs von der Anode aus und bestehen nicht aus Metall, sondern aus Kupfersalzen [96].

5.2.1 Mechanismus der elektrochemischen Migration

Dieser Mechanismus ist durch leitende Metallbrücken gekennzeichnet, sogenannte Dendriten, die sich zwischen benachbarten, leitenden Strukturen auf der Substratoberfläche bilden. In der Regel beginnt das Wachstum an der Kathode, der Struktur mit dem niedrigeren elektrischen Potential [26]. Alternativ kann ein anodisches Wachstum auftreten, bei dem die leitende Brücke nicht aus reinem Metall, wie bei dem kathodischen Dendritenwachstum, sondern aus Metallsalzkomplexen besteht. Dies ist der Fall, wenn der Konzentrationsgradient der migrierenden Metallionen im Vergleich zu dem Potentialgradienten groß genug ist, damit eine Diffusion der Ionen gegen das elektrische Feld möglich ist. Dabei sind der Potentialgradient durch die angelegte Spannung und der Konzentrationsgradient durch die Stromdichte, der Größe der aktiven Anodenfläche und der Diffusionsgeschwindigkeit der gelösten Metallionen bestimmt. In dem Bild 57 sind beide Formen der elektrochemischen Migration gezeigt.

Für das Auftreten dieses Ausfallmechanismus werden bei elektronischen Baugruppen vor allem zwei Faktoren vorausgesetzt. Einerseits eine Potentialdifferenz in Form einer Gleichspannung zwischen zwei elektrisch leitfähigen Strukturen und andererseits ein leitender Wasserfilm zwischen den Elektroden. Die Ausbildung eines leitenden Pfads

erfordert lediglich wenige Monolagen Wasser, die entweder bei einem Umgebungsklima mit sehr hohem Wasseranteil in der Luft oder durch Betauung, in Verbindung mit Verunreinigungen aus der Luft oder Rückständen aus dem Herstellungsprozess, entstehen [17]. Die weiteren Betrachtungen erfolgen für das kathodische Dendritenwachstum, das eine wesentlich höhere Praxisrelevanz aufweist. Der Mechanismus der elektrochemischen Migration wird in drei Schritte eingeteilt, die nachfolgend am Beispiel von Kupfer erläutert werden.

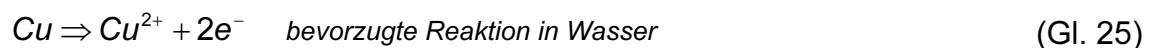


Quelle: Murata Elektronik

Bild 57: Elektrochemische Migration in Form von kathodischem und anodischem Brückenwachstum bei einer elektrischen Feldstärke von 500 V/mm (Umgebungsklima: 85 °C/85 % rel. Feuchte)

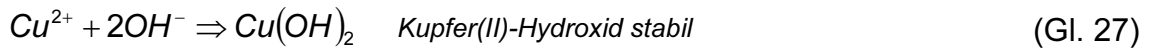
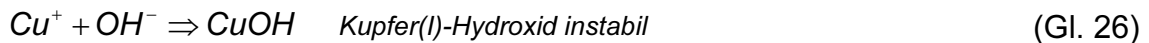
Elektrolyse von Wasser und Metallauflösung an der Anode

Bei der Lösung von Metallen an der Anode wirken vorhandene Halogeniden, wie beispielsweise Chlor, als Katalysator. Aus diesem Grund löst sich bei einem höheren Kontaminationsgrad mehr Metall. Es gelten für diese Elektrolyse von Wasser an der Anode die (Gl. 23) bis (Gl. 25).



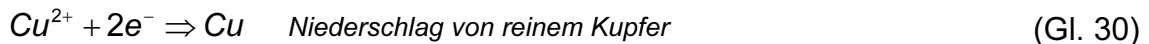
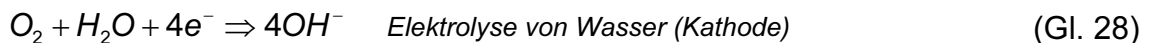
Diffusion von Metallionen über leitende Pfade zur Kathode

Die Diffusion der gelösten Metallionen wird dabei wesentlich von der angelegten Feldstärke bestimmt. Ist diese geringer als 1 V/mm, gelangen die Kupfer- und Hydroxidionen nicht an die gegenüberliegende Elektrode und es lagert sich im Zwischenraum Kupfer(II)-Hydroxid ab ((Gl. 26) und (Gl. 27)).



Elektrolyse von Wasser und Reduktion der Metallionen an der Kathode

An der Kathode erfolgt nach der Elektrolyse von Wasser die Anlagerung von Kupfer oder Kupferkomplexen nach (Gl. 28) bis (Gl. 32).



5.2.2 Einflussfaktoren für das Wachstum von Dendriten

In der Theorie sind Leiterbahnen im Idealfall gerade und ohne Defekte, was zu der Berechnung der wirkenden elektrischen Feldstärke E nach (Gl. 33) führt, die von der angelegten Spannung U , beziehungsweise von der Potentialdifferenz, sowie von dem Abstand d abhängt.

$$E = \frac{U}{d} \quad (\text{Gl. 33})$$

In der Praxis können bei Leiterbahnen Ungleichmäßigkeiten im Strukturierungs- und Metallisierungsprozess auftreten, die zu einer lokalen Verringerung des Abstands zwischen diesen und einer Erhöhung der dort wirkenden Feldstärke führen. Diese Stellen sind besonders prädestiniert für die Bildung von Dendriten [17][122]. Von besonderer Bedeutung ist dieser Effekt, wenn die Leiterbahnabstände im Zuge des anhaltenden Trends der Miniaturisierung abnehmen. Die elektrochemische Migration wurde für Aluminium, Kupfer, Gold, Zinn, Nickel, Blei, Palladium und Lötzinn beobachtet, wohingegen Metalle mit Passivierungsschichten wie Chrom, Aluminium und Wolfram von diesem Ausfallmechanismus nicht betroffen sind [56]. Die Affinität von Metallen zur Bildung von Brücken in Form von Dendriten ist unterschiedlich und weist eine Abstufung nach (Gl. 34) auf.

$$\text{Affinität : } Ag > Cu > Pb > Sn/Pb > Sn > Au \quad (\text{Gl. 34})$$

Weitere Faktoren, die den Ausfallmechanismus durch elektrochemische Migration beeinflussen sind die Temperatur, die vorhandene Wassermasse, die angelegte Spannung, der pH-Wert, der Kontaminationsgrad sowie das Substratmaterial [79]. Besonders kritisch bei Ausfällen durch elektrochemische Migration ist deren Nachweis. Gewachsene Dendriten können bei einem Kurzschluss aufgrund thermischer Erhitzung verbrennen, wodurch deren Nachweis extrem schwierig wird. Damit ist häufig bei der Fehlerdiagnose kein Fehler feststellbar. Das Bild 58 zeigt exemplarisch das Wachsen eines Dendriten unter Laborbedingungen. Bei dem Aufbau für diese Bilderreihe wurde mit einer Strombegrenzung, wie sie im nächsten Abschnitt beschrieben wird, ein Durchbrennen des Dendriten verhindert.

Entstehung eines Dendriten

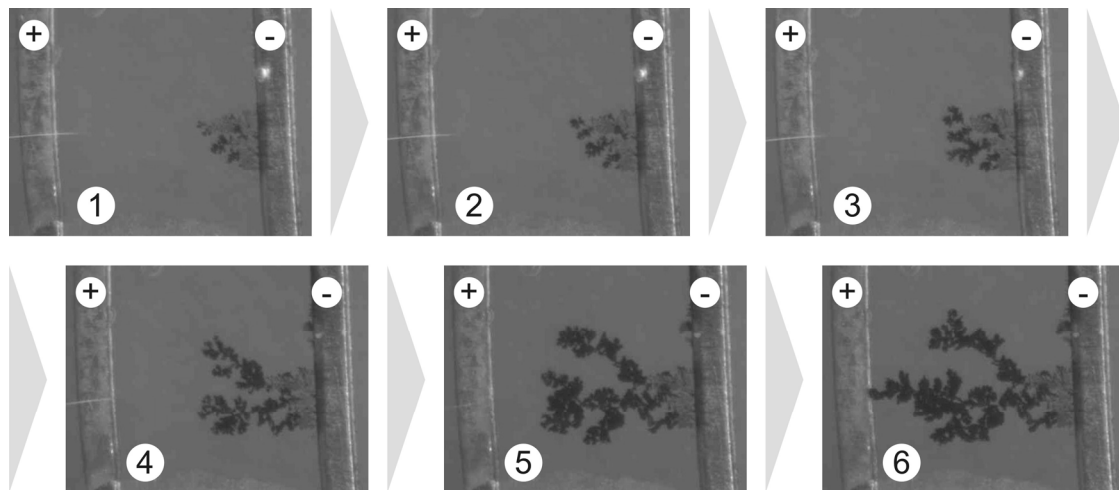


Bild 58: Beispielhaftes kathodisches Dendritenwachstum (Leiterbahnabstand 1 mm, Potentialdifferenz 9 V)

5.3 Konzeption eines geeigneten Prüfverfahrens

Im nächsten Schritt wurde ein Prüfverfahren konzipiert, das es ermöglichen sollte, gezielt und reproduzierbar Betauung unter Laborbedingungen nachzustellen. Da mit vorhandenen Prüfabläufen Wasserfilme auf Baugruppen im Wesentlichen durch einen Temperaturanstieg bei einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit erzeugt werden, musste hier eine andere Herangehensweise gewählt werden. Eine solche konnte mit der Verwendung von Betauungssensoren zur quantitativen Wassermengenbestimmung, die im vorangegangenen Abschnitt präsentiert wurde, realisiert werden. Für einen optimalen Erkenntnisgewinn war es notwendig, bereits in der Konzeptionsphase geeignete Bewertungskriterien für die spätere Auswertung festzulegen. Mit einem solchen Vorgehen können notwendige Strukturen und Messpunkte optimal bei dem Entwurf der Testplatten berücksichtigt werden. Weiterhin sollte auch die Möglichkeit der permanenten Messdatenerfassung während der gesamten Prüfdauer vorgesehen werden und dabei

die gewonnenen Erfahrungen aus den Untersuchungen zur Temperaturschocklagerung aus dem Abschnitt 3.2.1 einfließen.

5.3.1 Festlegung eines Klimakammerprofils

Die Konzeption von Prüfprofilen für Untersuchungen in Klimakammern erfolgt üblicherweise so, dass auf die Prüflinge einwirkenden Umwelteinflüsse beschleunigt nachgestellt werden. In der Regel werden die Parameter Temperatur und relative Feuchte mit dem Ziel variiert, reale Belastungsszenarien beschleunigt nachzustellen. Dabei war zu beachten, dass die sich einstellenden Ausfallmechanismen erhalten blieben und keine andersartigen Fehlerbilder auftraten. Ein weiteres Ziel war es, ein Klimaprofil zu entwickeln, das sich an den klimatischen und zeitlichen Verläufen orientiert, wie diese in Kraftfahrzeugen in der Praxis auftreten. Dadurch war gewährleistet, dass einerseits realitätsnah der Einfluss von Betauung geprüft wurde, und andererseits keine Fehlermechanismen bei der Analyse an den noch zu definierenden Testplatinen auftraten, die nicht auf Steuergeräteplatinen am jeweiligen Einbauort im Automobil hätten entstehen können, sofern diese nicht ausreichend geschützt waren.

Aus einer Kooperation mit einem Automobilhersteller standen umfangreiche Klimadaten für verschiedene Einbauorte zur Verfügung. Für jeden dieser Orte wurden die Messgrößen Temperatur auf der Baugruppenoberfläche, Umgebungstemperatur, relative Luftfeuchte und Betauung erfasst. Mit der Aufzeichnung derselben Größen während der Klimakammerversuche konnten anschließend die Belastungen durch die im Labor nachgestellten Prüfprofile mit denen in der automobilen Praxis verglichen werden. Von besonderer Bedeutung für eine sich einstellende Kondensation von Wasser sind nicht die absoluten Werte für die Temperatur und der relativen Luftfeuchte, sondern die auftretenden Gradienten. Bei der Ermittlung des Klimakammerprofils wurde diejenige, reale Messung zugrunde gelegt, bei der die größte Betauung auftrat. Damit sollte für die Grundqualifikation die Bildung eines ausreichenden Wasserfilms sichergestellt werden. Hierfür hat sich ein karosserienaher Einbauort als geeignet erwiesen. Bei einer Umlagerung aus einer kalten in eine warme Umgebung, traten dort signifikante Messwerte auf.

Für die Einstellung der Kammerprofile wurden unstrukturierte Schaltungsträger verwendet, die bezüglich des Materials (FR4) und der Abmessungen ähnlich zu den späteren Testplatinen waren. Da das thermische Verhalten, und damit auch die zu erwartende Betauung, wesentlich von deren Masse abhängt, musste ein Aufbau festgelegt werden, der die wesentlich geringere Masse, im Vergleich zu Steuergeräten in Kraftfahrzeugen, ausgleichen würde. Aus diesem Grund wurden die Laborplatinen auf einer zusätzlichen Messingplatte fixiert und eine gute thermische Koppelung mittels eines dünnen doppelseitigen Wärmeleitklebebands sichergestellt. In Bild 59 wurden exemplarisch für zwei Kammerprofile, die während der Phase der Nachbildung realer Verhältnisse evaluiert wurden, die Klimakammerparameter, die Messwerte für Temperatur und Betauung sowie die rechnerische Taupunktpunkttemperatur nach (Gl. 21) und (Gl. 22) aufgetragen.

Die Gesamtdauer eines Zyklus wurde mit 105 Minuten festgelegt. Dies war zwar deutlich unter der Zykluszeit des Prüfprofils nach der DIN EN 60068-2-30, aber das Ziel dieses Prüfablaufs war die beschleunigte Generierung einer Vielzahl von Betauungszyklen

[19]. Aus diesem Grund dienten die ersten 45 Minuten des Zyklus zur Anpassung der Testplatten an die Kammertemperatur und die Kammerfeuchte. Anschließend wurden die regelbaren Parameter erhöht. Die beiden Klimakammerprofile wiesen denselben Temperaturverlauf auf, dessen Gradient in der Anstiegsphase 1 K/min betrug. Der Unterschied lag in dem oberen Grenzwert für die relative Luftfeuchte, die 80 % bzw. 90 % betrug (Bild 59 oben). Mit dieser Maßnahme wurde sichergestellt, dass die Annäherung der Taupunkttemperatur an die Baugruppentemperatur, die maßgeblich von der relativen Feuchte abhängt, im zweiten Profil erheblich schneller erfolgte (Bild 59 unten). Dadurch begann die Betauung erheblich früher und der Sensor ging bereits nach kurzer Zeit in Sättigung ($15 \mu\text{g}/\text{mm}^2$). Bei dem ersten Profil, mit einer Obergrenze der relativen Feuchte von 80 %, erfolgte zunächst ebenfalls ein starker Anstieg der Betauung, jedoch wurde ein Maximum bei ca. $8,5 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ erreicht.

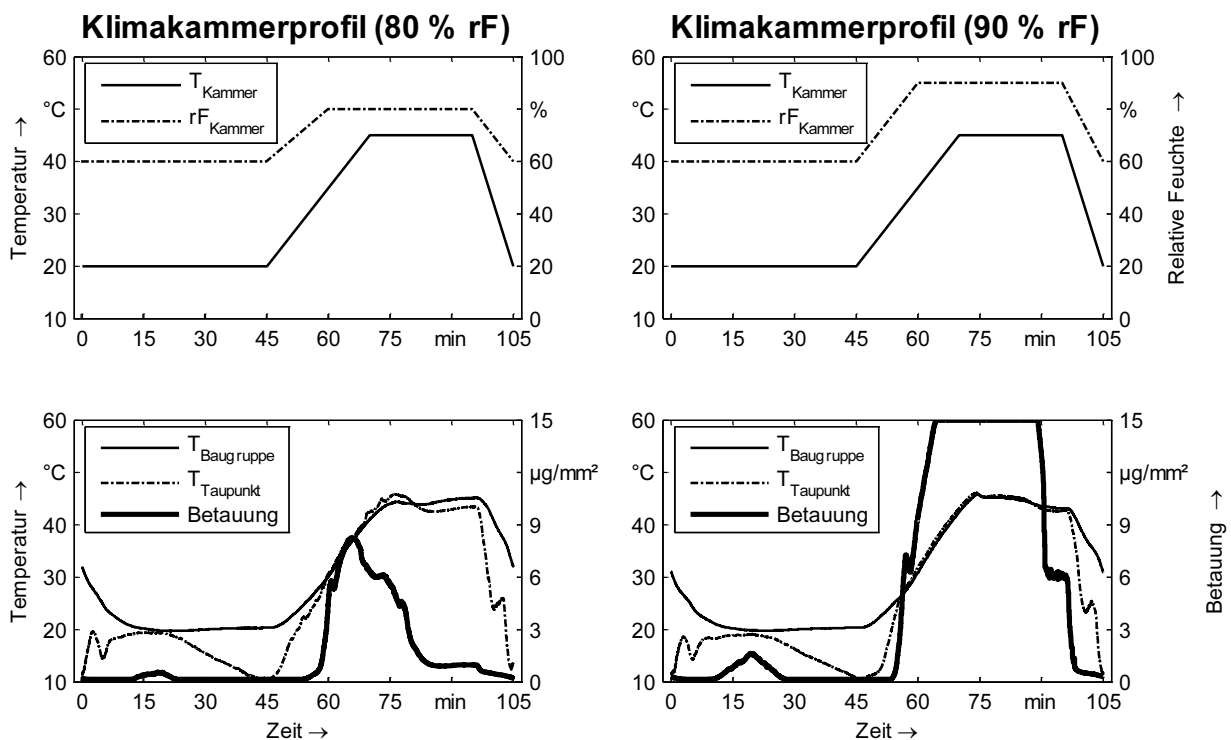


Bild 59: Einstellung der Parameter der Klimakammer für Betauungsprüfungen

Anschließend unterschritt die Taupunkttemperatur wieder die Baugruppentemperatur im oberen Abschnitt des Zyklus und es stellte sich eine Abtrocknung der Oberfläche ein. Weiterhin zeigte sich, dass aus der Temperaturdifferenz zwischen der Baugruppe und dem Taupunkt zwar das Auftreten von Betauung abgeleitet werden kann, aber eine Quantifizierung nicht möglich ist. Nachdem unterschiedliche Kammerprofile aufgenommen wurden, erfolgte für die spätere Grundqualifikation des Prüfverfahrens eine Festlegung der Kammerparameter entsprechend dem rechten Profil aus Bild 59. Damit sollte sichergestellt werden, dass bei der Durchführung der Versuchsreihen eine ausreichende Betauung entsteht. Dabei wurden letztendlich dünnere Messingplatten verwendet, die einerseits die Dauer des Sensorsignals in Sättigung reduzierten, aber andererseits das Erreichen des Wertes von $15 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ gewährleisteten.

5.3.2 Bestimmung von Bewertungskriterien

Eine Auswertung der Versuche sollte anhand von Bewertungskriterien erfolgen, die so definiert werden müssen, dass aus den Ergebnissen eine größtmögliche Aussagekraft abgeleitet werden kann. Dies musste insbesondere bei den vergleichenden Untersuchungen gelten, wie diese für die nachfolgende Grundqualifizierung erfolgen sollten, bei der verschiedene Einflussfaktoren einbezogen wurden. Weiterhin war zu berücksichtigen, dass das Auftreten von Betaung nur der Auslöser für ein mögliches Versagen auf einer Baugruppe ist. Bei den durchgeführten Vorversuchen, bei denen unter anderem die Aufnahmen des wachsenden Dendriten (Bild 58) entstanden waren, wurde der Stromfluss im Detail beobachtet. Es zeigte sich, dass der Stromfluss während der Betaungsphasen deutlich angestiegen war. Insbesondere konnten dabei sprunghafte Anstiege festgestellt werden. Für eine nähere Betrachtung dieser Sprünge wurde eine Kammstruktur, wie diese auf dem Testboard IPC-B-25A für die Qualifikation von Flussmitteln verwendet wird, herangezogen. Mit dem Einsatz eines hochohmigen Vorwiderstands konnte dabei eine Strombegrenzung realisiert werden, die das unmittelbare Durchbrennen von Dendriten verhindern sollte.

Aus diesen Erkenntnissen konnte der Stromfluss als eindeutige Auswirkung von aufgetretener Betaung identifiziert werden. Für die Festlegung von quantitativen Bewertungskriterien wurden daraus zwei Größen abgeleitet. Die erste Größe sollte dabei den Zeitpunkt der erstmaligen Bildung eines Dendriten, der eine elektrisch leitende Verbindung zwischen benachbarten Leiterzügen herstellte, abbilden. Bei den Voruntersuchungen wurde eine Untergrenze von $10\ \mu\text{A}$ als Mindestanstieg des überwachten Stroms bei der Bildung eines Kurzschlusses durch einen Dendriten beobachtet. Daraus abgeleitet wurde für den Vorwiderstand ein Wert vom $100\ \text{k}\Omega$ festgelegt. Das bedeutete, dass sich die zu messende Spannung über dem Vorwiderstand um mindestens $1\ \text{V}$ erhöhen musste. Da ein sprunghafter Anstieg bestimmt werden sollte, musste der Zeitraum zwischen der Erfassung von zwei Messwerten geeignet klein gewählt werden. Andererseits sollte eine permanente Datenerfassung erfolgen, bei der mit einer Erhöhung der Abtastfrequenz die Menge der auswertenden Daten linear anstieg. Um beiden Aspekten gerecht zu werden, erfolgte die Messdatenaufzeichnung mit einer Frequenz von $10\ \text{Hz}$. Ähnliche Überlegungen erfolgten bei der Festlegung der Prüfdauer. Im Gegensatz zu Temperaturschocklagerungen konnte hier die Zyklenanzahl drastisch reduziert werden, da die Auswirkungen der erzeugten Betaung bereits während der ersten Zyklen zu erwarten war. Bei den Vorversuchen waren Migrationserscheinungen innerhalb der ersten zehn Stunden zu erkennen. Daher wurde eine Prüfzeit von 24 Stunden festgesetzt, die 13 Zyklen zu 105 Minuten und einer nachfolgenden Verweilzeit in der Klimakammer von 75 Minuten entsprach. Für eine vereinfachte numerische Auswertung wurde die Zeit auf die Gesamtprüfdauer normiert.

Als zweite Größe für die Auswertung wurde der maximal auftretende Strom während des Prüfablaufs herangezogen. Hieraus konnte abgeleitet werden, wie tragfähig die gebildeten und eventuell wieder durchgebrannten Brücken auf Gesamtstrukturebene waren. Dieses Kriterium erlaubte daher eine Aussage über die Anfälligkeit des Prüf Szenarios gegenüber Betaung. Bei dem Kriterium Stromsprung findet lediglich der Zeitpunkt

des erstmaligen Auftretens eines einzelnen Dendriten Eingang in das Ergebnis. Da mit der Integration eines Widerstands zur Strombegrenzung der maximal auftretende Strom von der Prüfspannung abhängig war, wurde hier ebenfalls eine Normierung auf den maximal möglichen Strom durchgeführt. Dieser stellt sich dann ein, wenn der ohmsche Widerstand der Teststruktur gegenüber dem Vorwiderstand vernachlässigbar klein wird. Zusammenfassend ergeben sich die beiden quantifizierbaren Bewertungskriterien:

- Bewertungskriterium 1: Normierte Zeit bis zum ersten Stromsprung größer 10 μA ,
- Bewertungskriterium 2: Maximaler, normierter Strom im Prüfzeitraum.

Weitere aussagekräftige Bewertungskriterien konnten im Rahmen der Konzeptionsphase nicht ermittelt werden. Dies hätte erst dann erfolgen können, wenn eine entsprechende Anzahl von Messreihen durchgeführt worden wäre. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund von korrosionsinduzierten Kriechströmen sich zusätzliche Effekte einstellen könnten. Dennoch wurden die beiden vorgestellten Bewertungskriterien so festgelegt, dass die sich ergebenden Werte im Wesentlichen von dem Brückenwachstum aufgrund von elektrochemischer Migration abhängen.

In Ergänzung zu den geplanten Untersuchungen mit benachbarten Leiterzügen, die mittels Kammstrukturen realisiert werden können, sollte die Anfälligkeit von Bauelementen hinsichtlich Migrationserscheinungen qualifiziert werden. Hierzu wurden Keramik Kondensatoren üblicher Baugrößen ausgewählt, die während der Prüfdauer permanent an die Messspannung angebunden waren. Da Kondensatoren bei anliegender Gleichspannung im geladenen Zustand keinen Stromfluss zulassen, liegt hier zwischen den Anschlusspolen ein elektrisches Potential an, das unter Betauungseinfluss Migrationserscheinungen hervorrufen kann. Die Auswertung für ein solches Testszenario sollte rein optisch erfolgen, mit dem Ziel eine qualitative Information zu erhalten.

5.3.3 Testplatine und Einflussfaktoren für die Grundqualifikation

Aus den vorangegangenen Überlegungen ergaben sich die funktionellen Anforderungen an die Testplatine. Die Bildung von Dendriten sollte mit einer permanenten Stromüberwachung von Kammstrukturen erfolgen, die zwangsläufig zu der Integration eines Steckers für die Anbindung an die Messwerterfassung führte. Die Vorwiderstände wurden ebenfalls integriert, da die Gefahr der Bildung von Migrationserscheinungen aus zwei Gründen zu vernachlässigen ist. Einerseits wurde eine große Bauform gewählt (CR1206) und andererseits fällt zwischen den Anschlussflächen nur eine geringe Spannung ab, solange die zu überwachenden Kammstrukturen elektrisch isolierend wirken. Die Realisierung einer kostengünstigen Datenerfassung erfolgte mit Modulen zur Spannungsmessung. Daher erfolgte die Strombestimmung anhand einer Spannungsmessung über einen definierten Vorwiderstand. Die optische Auswertung erfolgte zum einen mit Keramik Kondensatoren der Größen 1206, 0805, 0603 und 0402 und zum anderen mit zusätzlichen Kammstrukturen, denen kein Widerstand für eine Strombegrenzung vorgeschaltet war. Dies führte zu dem in Bild 60 dargestellt Layout.

Die Kammstrukturen wurden mit drei verschiedenen Leiterbahnabständen aufgebaut (0,2 mm, 0,3 mm und 0,4 mm), die somit eine zusätzliche Variation der herrschenden

elektrischen Feldstärke ermöglichte. Eine Brückenbildung während der Betaungsphasen zwischen den Messleitungen wurde dadurch verhindert, dass jeweils ein potentialfreier Leiterzug dazwischen platziert wurde. Mit jeder Leiterplatte konnten drei Kammstrukturen kontinuierlich überwacht werden und weitere drei standen, neben insgesamt 32 Kondensatoren, zur optischen Begutachtung zur Verfügung.

Testschaltungsträger

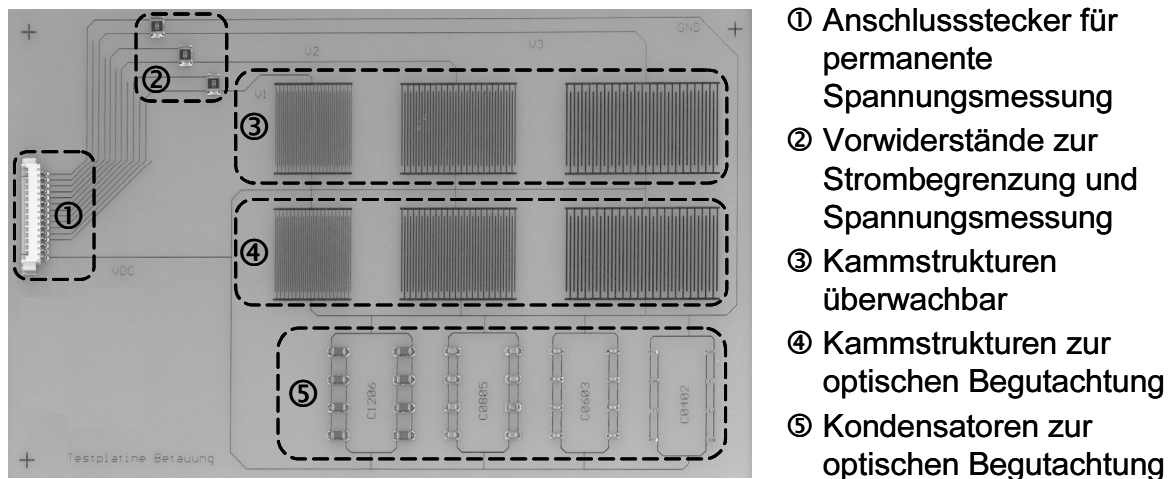


Bild 60: Testplatine zur Untersuchung des Einflusses von Betaung

Für die nachfolgende Grundqualifikation des Prüfverfahrens wurden drei Einflussgrößen berücksichtigt. Der erste Faktor war ein Reinigungsprozess der Platinenoberflächen vor dem Beginn des Prüfablaufs. Dies war deshalb von besonderem Interesse, da mit der Verwendung von sogenannten No-Clean Lotpasten eine zusätzliche Säuberung von Verunreinigungen und Flussmittelresten bei der Herstellung von Baugruppen nicht erfolgt. Die Fragestellung war hier, ob und inwieweit ungereinigte Oberflächen für Migrationserscheinungen anfällig sind. Die Reinigung der Testplatinen erfolgte in Anlehnung an den Abschnitt 2.6.3.3 der IPC TM-650 Richtlinie, in der das Vorgehen zur Prüfung des Oberflächenisolationswiderstandes zur Bewertung von Flussmitteln behandelt wird. Hierbei wurden die zu testenden Muster mit destilliertem Wasser und einer weichen Bürste für mindestens 30 Sekunden gesäubert und anschließend wiederum mit destilliertem Wasser und Isopropanol abgespült. Abschließend folgte die optische Inspektion der Platinen auf offensichtliche Defekte. Die Handhabung der Leiterplatten erfolgte ausschließlich mit Gummihandschuhen an den Ecken [46].

Der zweite Einflussfaktor bestand in dem Vergleich zweier Metallisierungsoberflächen der Leiterbahnstrukturen. Dabei wurden die Hälfte der Leiterplatten mit reinen Kupferoberflächen hergestellt und die andere Hälfte wurde zusätzlich mit einer Oberfläche „chemisch Zinn“ versehen. Die letzte Einflussgröße bestand in der Variation der angelegten Prüfspannung, die entweder 7 V oder 10 V betrug. Da für jeden der drei Einflussfaktoren zwei Einstellungen vorgesehen waren, ergaben sich insgesamt acht verschiedene Varianten für die nachfolgenden Versuche zur Qualifizierung. Dabei standen für jede Alternative vier Testplatinen bereit.

5.4 Grundqualifizierung des Prüfverfahrens

Nach der eingehenden Analyse des Fehlerbilds der elektrochemischen Migration und der hierfür wesentlichen Ursachen, wurde im vorangegangenen Abschnitt ein Konzept für ein geeignetes Prüfverfahren entwickelt. Parallel dazu wurde eine Testplatine entworfen, die eine Bewertung der zu untersuchenden Einflussfaktoren anhand von qualitativen und quantitativen Kriterien erlaubte. In diesem Abschnitt wird zunächst ein Messaufbau vorgestellt, der eine Erfassung und Auswertung des zu überwachenden Stromflusses über die Kammstrukturen ermöglicht. Daran anschließend werden anhand von ausgewählten Versuchen die wesentlichen Merkmale der gewonnenen Ergebnisse aufgezeigt. Abschließend werden die Ergebnisse aller durchgeführten Messreihen und Analysen mit statischen Verfahren und geeigneten Methoden ausgewertet. Die beiden angestrebten Ziele der Grundqualifizierung waren der Nachweis der Eignung des konzipierten Prüfverfahrens und eine erste Bewertung der Einflussfaktoren, die für die Versuchsreihen ausgewählt wurden.

5.4.1 Messaufbau und Versuchsplan

Die Auswahl der Messtechnik erfolgte unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte: Jede Testplatine war so aufgebaut, dass jeweils die drei Spannungen über den Vorwiderständen zu den Kammstrukturen aufgezeichnet werden konnten. Zusätzlich sollten die Klimakammertemperatur, eine ausgewählte Testplatinentemperatur, die relative Feuchte sowie der Betaungsgrad erfasst werden. Dafür standen die Sensoren aus dem Abschnitt 5.1.2 bereit, die ebenfalls ein Spannungssignal zur Verfügung stellten. Die notwendige Anzahl der aufzuzeichnenden Signale ergab sich nach (Gl. 35).

$$n_{\text{Messkanäle}} = 3 \cdot n_{\text{Testplatinen}} + 4 \quad (\text{Gl. 35})$$

Für den Messaufbau standen zwei Module für die Datenerfassung von National Instruments (NI-USB 6009) bereit, wobei jedes Modul im Single-Mode-Betrieb acht Spannungssignale mit einer Auflösung von 13 Bit aufzeichnen konnte [86]. Somit konnten jeweils vier Testplatinen parallel dem Prüfablauf unterzogen werden. Mit Hilfe der Software LabView von National Instruments wurde ein Messprogramm erstellt, welches die parallele Aufzeichnung aller 16 Kanäle der beiden Module bei einer Abtastrate von 10 Hz verwirklichte [33]. Alle Messdaten wurden sowohl während der Prüfdauer in Echtzeit grafisch dargestellt als auch in einem ASCII-File auf dem Messrechner abgespeichert. Die Onlineanzeige diente dazu, die Funktionsfähigkeit des Messaufbaus auf einfache Weise zu prüfen, zum Beispiel dadurch, dass sich während der Betaungsphasen eine signifikante Stromerhöhung einstellte. Die eigentliche detaillierte Auswertung der Daten sollte allerdings nach Beendigung des Prüfablaufs erfolgen. Hierfür wurde die Software Matlab eingesetzt, die es erlaubte, große Datenmengen in Hinblick auf die Zielstellung der Untersuchungen geeignet aufzuarbeiten [126]. Während eines Prüfdurchlaufs von 24 Stunden fielen jeweils rund 14,7 Millionen Einzelmesswerte an.

Bei der Versuchsplanung wurden drei Einflussfaktoren berücksichtigt, die jeweils zwei Einstellungen aufwiesen (Tabelle 9). Diese Anzahl erlaubte es, einen vollfaktoriellen

Versuchsplan aufzustellen, bei dem für jede Variante vier Testplatinen untersucht wurden. Bezüglich der Keramikkondensatoren standen folglich je Variante und Baugröße 32 Bauelemente für die Auswertung bereit. Mit diesem Versuchsplan stand eine ausreichende Anzahl von Testobjekten zur Verfügung, die eine genügend hohe Aussagekraft für den gesamten Prüfablauf erwarten ließen. Die drei Leiterbahnabstände wurden nicht explizit als Einflussfaktor herangezogen, allerdings wurden die sich einstellenden Effekte bei den Kammstrukturen dennoch getrennt ausgewertet. Mit dieser Maßnahme sollte dem Umstand Rechnung getragen werden, dass aufgrund der Miniaturisierung bei der Gestaltung von elektronischen Baugruppen ein genaueres Bild über die Anfälligkeit gegenüber Migrationerscheinungen gewonnen werden sollte.

Einflussfaktor	Einstellung 1	Einstellung 2
Reinigung	ungereinigt	gereinigt
Oberflächenmetallisierung	Kupfer verzinnt	Reinkupfer
Prüfspannung	7 V	10 V

Tabelle 9: Einflussfaktoren für die Grundqualifizierung und deren Einstellungen für die Versuchsreihen

5.4.2 Exemplarische Ergebnisse

Die Bildung der Kennzahlen für die beiden Bewertungskriterien, die auf die permanent überwachten Kammstrukturen angewendet wurden, erfolgte ausgehend von den jeweiligen Stromverläufen. Das Bild 61 zeigt exemplarisch den Verlauf des Stroms und der gemessenen Betauung bei einer Kammstruktur mit einem Abstand von 0,2 mm zwischen den Leiterzügen. In dem linken Teil der Darstellung wurde der gesamte Prüfzeitraum von 24 Stunden mit den 13 Betauungszyklen dargestellt. Die Ursache für den im Ausgangszustand gemessenen Strom von ca. 5 μA konnte nicht exakt ermittelt werden. Bei der weiteren Auswertung aller durchgeführten Versuche nahm dieser Effekt jedoch keinen Einfluss auf die gewonnenen Erkenntnisse und wurde somit nicht weiter berücksichtigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein signifikanter Anstieg des Stromflusses mit den Betauungsphasen korreliert.

Bei dem gezeigten Beispiel trat das erstmalige Versagen der elektrischen Isolation der Kammstruktur im zweiten Zyklus auf (Bild 61 rechts). Dabei erfolgte die Erhöhung des Stroms nicht unmittelbar mit dem Anstieg der gemessenen Betauung, sondern erst wenige Minuten danach. Dies zeigte deutlich, dass das Wachstum von Dendriten nicht alleine aufgrund der Anwesenheit von Wasser bzw. Flüssigkeiten entstand, allerdings eine wesentliche Begünstigung für das Auftreten von Migrationerscheinungen darstellte. Weiterhin ist aus den Messwertverläufen das Erreichen der Messgrenze von 15 $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ des eingesetzten Betauungssensors in jedem Zyklus sicher gewährleistet. Das eingestellte Klimakammerprofil erwies sich somit für die Grundqualifizierung des Prüfverfahrens als geeignet. Die genaue Betrachtung des Stromverlaufs während der Trockenphasen zeigte eine stetige Erhöhung des sogenannten Ruhestrompotentials. Dieser Effekt ist darin begründet, dass die gewachsenen Dendriten eine permanente

Leitfähigkeit zwischen den Leiterzügen ermöglichten. Eine Überprüfung dieser Annahme erfolgte mit der optischen Begutachtung der Kammstrukturen nach Ende des Prüfablaufs.

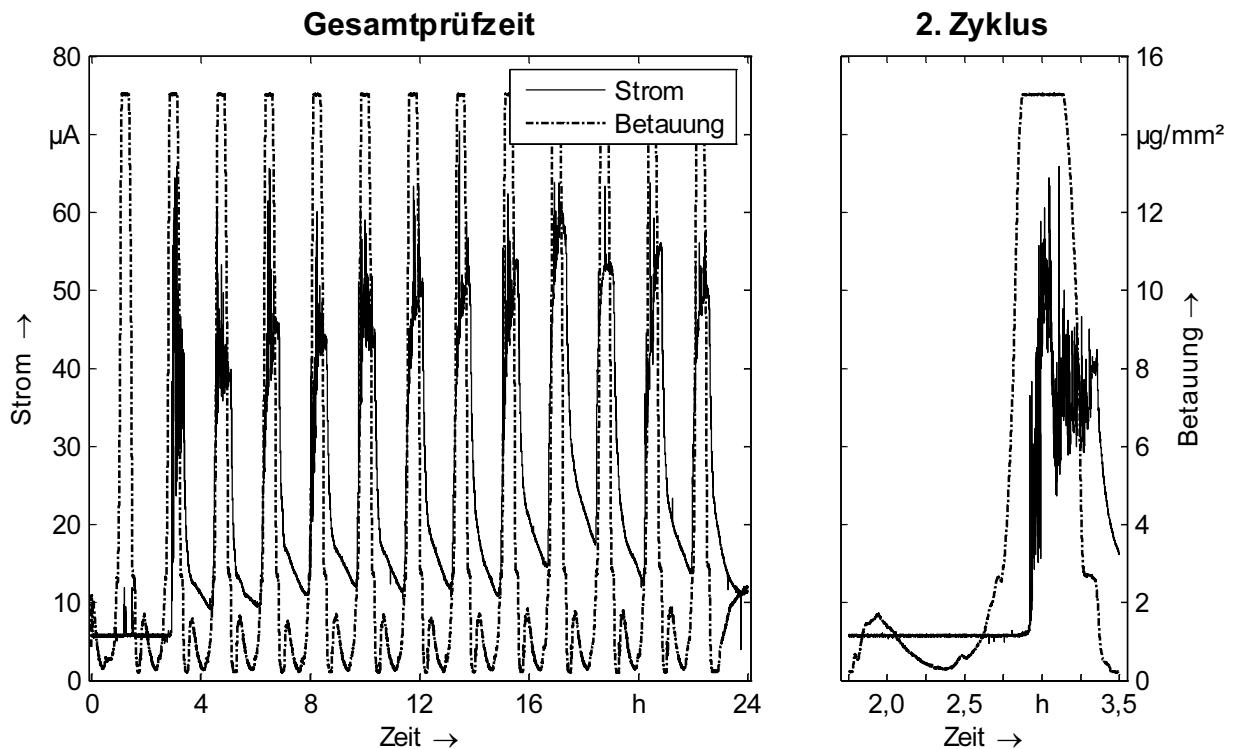


Bild 61: Strom- und Betauungsverlauf über einer Kammstruktur (0,2 mm, gereinigte Platine, Kupferoberfläche, 10 V Prüfspannung) während der Prüfdauer (links) und in der ersten auffälligen Betauungsphase (2. Zyklus) (rechts)

Die Bestimmung des Bewertungskriteriums 2 (BK2), des normierten Maximalstroms während der Prüfung, erfolgte aus den vorliegenden Messdaten wie folgt: Der größte gemessene Strom betrug 70,35 μA und trat im achten Zyklus auf. Der mögliche Maximalstrom ergab sich aus dem verwendeten Vorwiderstand (100 k Ω) und der angelegten Prüfspannung (10 V) zu 100 μA . Aus diesen Angaben erfolgte eine Quantifizierung dieses einzelnen Versuchs nach (Gl. 36).

$$BK2 = I_{\text{norm,max}} = \frac{70,35 \mu\text{A}}{100 \mu\text{A}} = 0,7035 \quad (\text{Gl. 36})$$

Das Bewertungskriterium 1 (BK1), der normierten Zeit bis zum ersten Stromsprung größer 10 μA , leitete sich aus dem Stromverlauf ab. Hierzu wurden die Differenzen aller aufeinanderfolgenden Messwerte für den Strom gebildet. In dem Bild 62 wurde derselbe Versuch wie zuvor ausgewertet. Eine Vielzahl von Stromsprüngen trat dabei im zweiten und im fünften Zyklus auf. Das Auftreten von korrosionsinduzierten Kriechströmen würde nicht zu solchen Sprüngen führen.

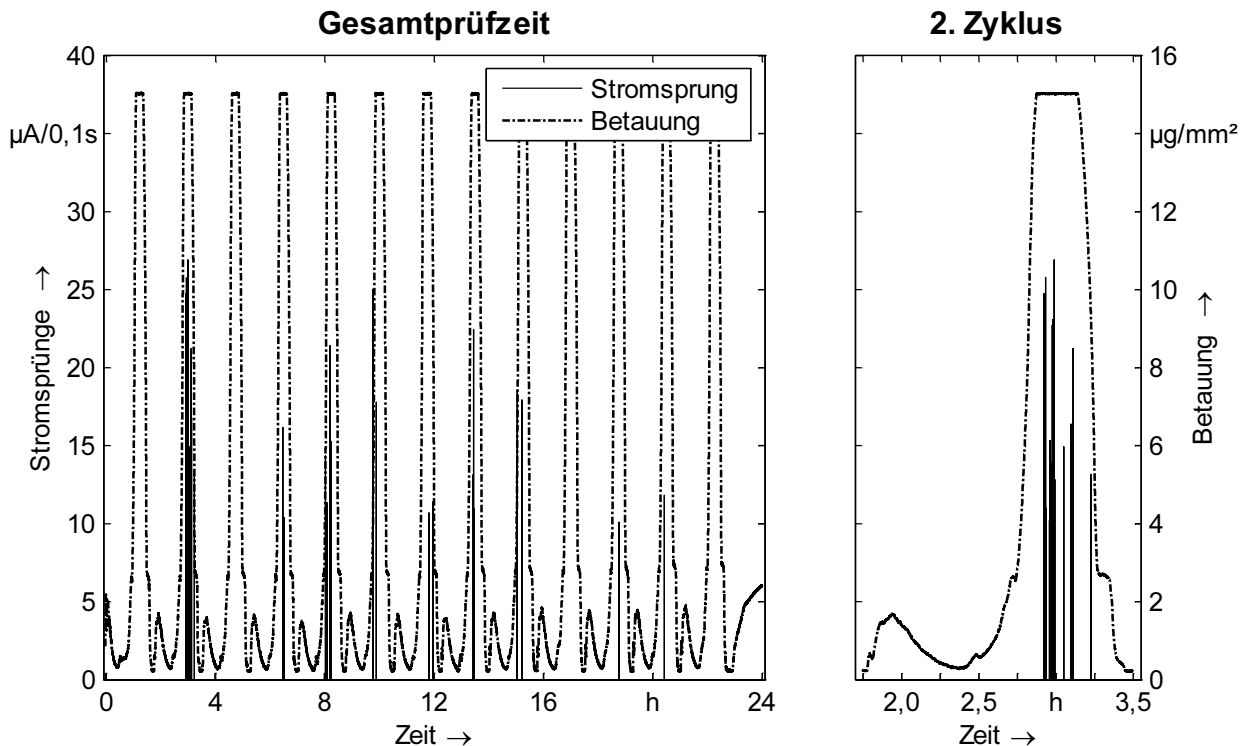


Bild 62: Detektierte Stromsprünge und Betauungsverlauf über einer Kammstruktur (0,2 mm, gereinigte Platine, Kupferoberfläche, 10 V Prüfspannung) während der Prüfdauer (links) und in der ersten auffälligen Betauungsphase (2. Zyklus) (rechts)

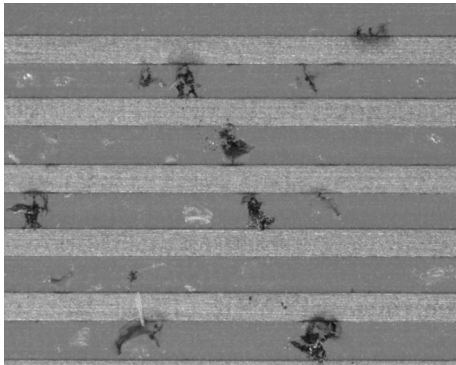
Für die Ermittlung des Bewertungskriteriums 1 (BK1) erfolgte die Bestimmung des ersten Stromsprungs größer 10 μA . Bei der Auswertung der Daten konnten im zweiten Zyklus (Bild 62 rechts) insgesamt 18 solcher Sprünge entdeckt werden, von denen der Erste zum Zeitpunkt $t = 2,921$ h mit einem Wert von 24,7 $\mu A/0,1$ s detektiert wurde. Hieraus ergab sich für die spätere Auswertung eine Kennzahl nach (Gl. 37).

$$BK1 = t_{norm,1. Sprung} = \frac{2,921 h}{24 h} = 0,1217 \quad (Gl. 37)$$

Nach der Beendigung der Versuche wurden die Testplatinen optisch begutachtet. Das Ziel war dabei, Migrationserscheinungen, die während der Prüfdauer entstanden waren, zu identifizieren. Hierfür standen die Kammstrukturen und die Keramik Kondensatoren zur Verfügung. Mit diesem Vorgehen konnte kein Rückschluss auf das zeitliche Eintreten von Migration gezogen werden. So konnte bei der Begutachtung der Kammstrukturen keine Klassifizierung einer Anfälligkeit gegenüber Betauung nach den untersuchten Varianten vorgenommen werden. Es zeigten nahe zu alle Prüflinge erhebliche Schädigungen, wie exemplarisch in Bild 63 links dargestellt. Bei der Analyse der Keramik Kondensatoren wurden für eine Auswertung alle Bauelemente mit Spuren von Migration ausgezählt. Damit sollte der Einfluss der Baugröße, eines Reinigungsprozesses und der angelegten Spannung ermittelt werden. Das Bild 63 rechts zeigte einen Kondensator,

der auf der Oberseite an der linken Kontaktkappe, die in dem Messaufbau als Kathode wirkte, erste Migrationsspuren aufwies.

Kammstruktur 0,2 mm



Keramikkondensator (0805)

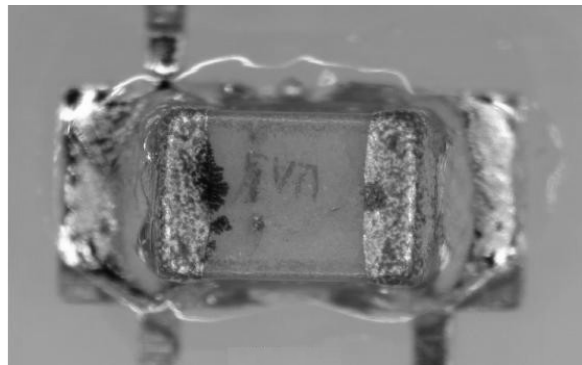


Bild 63: Migrationerscheinungen unter Betauungseinfluss an einer Kammstruktur (0,2 mm, ohne Reinigung, Oberfläche verzinnt, 10 V Prüfspannung) und an einem Keramikkondensator der Bauform CC0805 (rechts)

5.4.3 Auswertung der Versuchsreihen

Die Basis für die Auswertung der einzelnen Versuche mit permanenter Stromüberwachung waren 32 Testplatinen, auf denen jeweils drei Kammstrukturen mit den Abständen 0,2 mm, 0,3 mm und 0,4 mm vorhanden waren. Unter Berücksichtigung der drei Einflussfaktoren mit zwei Einstellungen waren für jede Variante somit vier Prüflinge vorhanden. Die erste Auswertung erfolgte anhand des Bewertungskriteriums 1, dem Auftreten des ersten Stromsprungs größer 10 μ A. Dabei wurden die Haupteffekte für jeden Einflussfaktor ermittelt [53]. Allerdings zeigte es sich, dass für den größtmöglichen Erkenntnisgewinn eine parallele Darstellung der Haupteffekte, bei gleichzeitiger Trennung nach den Kammabständen, am geeignetsten war (Bild 64). Hieraus ließen sich die wesentlichen Ergebnisse für die durchgeführte Untersuchung ableiten. Der Einfluss des Reinigungsprozesses war über alle Teststrukturen am größten. Bei den Kammabständen 0,3 mm und 0,4 mm stieg die Zeit bis zum ersten Stromsprung über dem Schwellwert extrem an. Der absolute Anstieg für die Objekte mit 0,2 mm Abstand fiel mit 0,05 (0,06 \rightarrow 0,11) zwar numerisch gering aus, aber es war zu berücksichtigen, dass hier eine Verschiebung vom ersten in den zweiten Zyklus auftrat (Bild 64 links). Dies ist bei der vergleichenden Betrachtung aller Abstände als signifikant einzuordnen. Die Anfälligkeit gegenüber Betauung sank mit der Vergrößerung der Strukturgrößen. Dieses deutliche Ergebnis konnte bei der Auswertung aller drei Einflussfaktoren gewonnen werden.

Die Auswertung der Varianten mit unterschiedlicher Oberflächenmetallisierung (Bild 64 Mitte) ergab für die beiden Kammabstände von 0,3 mm und 0,4 mm keinen signifikanten Einfluss. Ein anderes Bild lag bei dem Vergleich der Kämmen mit 0,2 mm Abstand vor. Hier zeigte sich mit dem Anstieg von 0,06 auf 0,10 ein ähnliches Ergebnis wie bei dem Einflussfaktor Reinigung. Aufgrund der Tatsache, dass bei den anderen beiden untersuchten Abständen kein solches Verhalten, im Gegensatz zu der Auswertung des Einflusses eines Reinigungsprozesses, zu beobachten war, konnte bei einer ganzheitli-

chen Betrachtung keine Signifikanz aus diesen Versuchsreihen abgeleitet werden. Der Einfluss der Prüfspannung auf das Eintreten von Stromsprüngen blieb im Rahmen des zu Erwartenden. Mit der Erhöhung der Prüfspannung stieg die elektrische Feldstärke an, die die Bildung von Migrationerscheinungen entsprechend (Gl. 33) begünstigte. Bei allen drei Kammabständen trat der erste Stromsprung deutlich früher auf (Bild 64 rechts). Die Abstufungen zwischen den verschiedenen Abständen waren deutlich und korrelierten gut mit der Abnahme der einwirkenden elektrischen Feldstärke.

Auswertung des Bewertungskriteriums Stromsprung

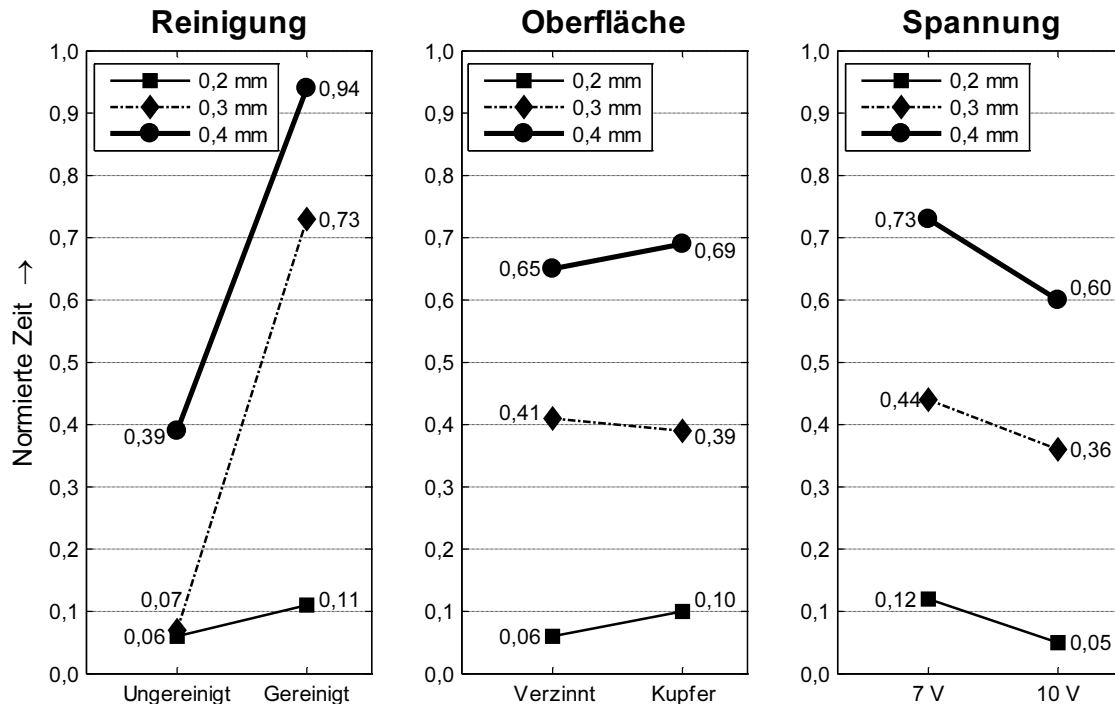


Bild 64: Auswertung der untersuchten Einflussfaktoren für das Bewertungskriterium Stromsprung (BK1) getrennt nach den Abständen der Kammstrukturen

Anschließend wurde die detaillierte Auswertung für das Bewertungskriterium 2, des normierten Maximalstroms, durchgeführt. Der Einfluss des Reinigungsprozesses war auch hier wieder sehr ausgeprägt. Bei allen Kammabständen trat eine signifikante Reduzierung des gemessenen Maximalstroms im gereinigten Zustand auf (Bild 65 links). Mit der Verringerung der Abstände erhöhte sich der Maximalstrom. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass bei kleineren zu überwindenden Distanzen der elektrische Widerstand der Dendriten geringer ist, und der Strom somit größer wird. Bei den beiden anderen Einflussfaktoren ergab sich aus den Untersuchungen keine Signifikanz bezüglich der Auswirkungen der jeweiligen Einstellungen. Die ermittelten Kennzahlen für dieses Bewertungskriterium unterschieden sich nur geringfügig (Bild 65 Mitte und rechts). Hier zeigte auch die angelegte Prüfspannung keinen Einfluss, da bei der Normierung des Stroms auf den maximal möglichen Strom der Wert der Quellspannung herausfiel.

Die Betrachtung der beiden definierten Bewertungskriterien zeigte deutlich den erheblichen Einfluss des Reinigungsprozesses vor der Prüfbelastung. Dieses Ergebnis ist gerade vor dem Hintergrund der Verwendung von sogenannten No-Clean Lotpasten in

der industriellen Praxis von besonderer Bedeutung. Aus der durchgeführten Untersuchung konnte abgeleitet werden, dass für elektronische Baugruppen, die aufgrund ihres Einbauortes durch Betauung gefährdet sind, eine Reinigung am Ende des Herstellungsprozesses überdacht werden muss. Weiterhin resultiert aus dem Trend der stetigen Miniaturisierung eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke zwischen leitenden Strukturen. Daher kann die Empfehlung gegeben werden, bereits im Designprozess einer Baugruppe die späteren Feldstärken abzuschätzen und so weit wie möglich zu reduzieren.

Auswertung des Bewertungskriteriums Maximalstrom

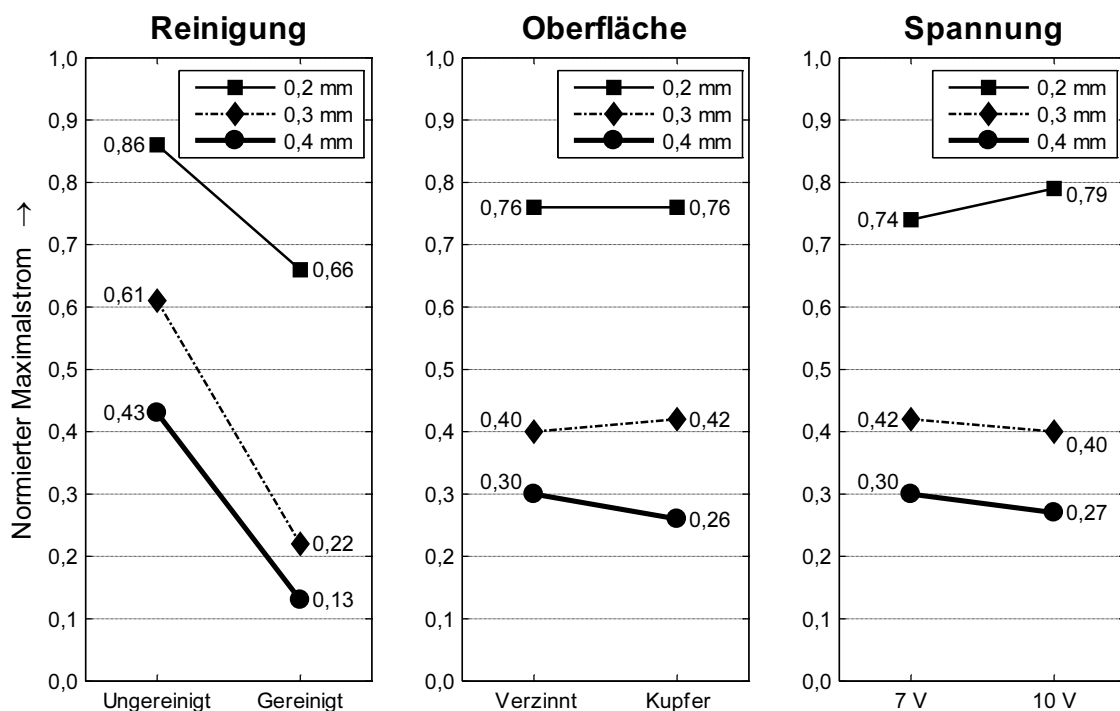


Bild 65: Auswertung der untersuchten Einflussfaktoren für das Bewertungskriterium Maximalstrom (BK2) getrennt nach den Abständen der Kammstrukturen

Abschließend erfolgte die Auswertung der von Migrationsspuren befallenen Keramik-kondensatoren (Bild 66). Insgesamt wurden hierfür 1024 Kondensatoren optisch begutachtet. In einem ersten Schritt erfolgte eine Unterteilung nach der Baugröße, da bei kleineren Größen eine höhere elektrische Feldstärke zwischen den beiden Anschlusskappen herrscht. Allerdings wurde mit den Untersuchungen die Annahme, dass die Anzahl der befallenen Kondensatoren mit der Verringerung der Baugröße ansteigt, nicht bestätigt (Bild 66 links). Lediglich die Baugröße 0805 wies einen Anteil von ca. 30 % geschädigter Bauelemente auf. Daneben wurde nur noch ein einziger Kondensator mit Migrationsspuren entdeckt. Eine erste Vermutung, dass die Komponenten unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten aufweisen könnten, wurde durch eine Analyse mittels Lasertriangulation widerlegt. Die vier verschiedenen Kondensatoren wurden von drei verschiedenen Herstellern bezogen und wiesen auch unterschiedliche Kapazitätswerte auf. Der betroffene Kondensatortyp hatte aber weder den höchsten noch den niedrigsten Nominalwert. Es ist anzunehmen, dass die Ursache im Herstellungsprozess der

Kondensatoren lag. Ein Nachweis konnte allerdings hierfür nicht erbracht werden. In der industriellen Praxis tritt immer wieder die Situation auf, dass Probleme mit dem Wechsel eines Lieferanten für eine identisch spezifizierte Komponente auftauchen und wieder verschwinden. Auch bei Bauelementen eines Lieferanten können Schwankungen der Qualität von Charge zu Charge festgestellt werden.

Im nächsten Schritt wurden die Anzahl der geschädigten 0805-Kondensatoren hinsichtlich der beiden Einflussfaktoren Reinigungsprozess und Prüfspannung ausgewertet (Bild 66 rechts). Wie bei den Kammstrukturen zeigte die Reinigung der Oberflächen der Kondensatoren eine deutliche Wirkung. Die ungereinigten Bauelemente waren ca. 3,5-mal häufiger von Migrationsspuren betroffen als die gereinigten Komponenten. Bezüglich der angelegten Prüfspannung waren die Kondensatoren, die mit 10 V beaufschlagt wurden, etwas stärker betroffen, da hier eine größere elektrische Feldstärke einwirkte. Diese Auswertung bestätigte hinsichtlich des Einflussfaktors Reinigung die Ergebnisse der Untersuchung mit den Kammstrukturen.

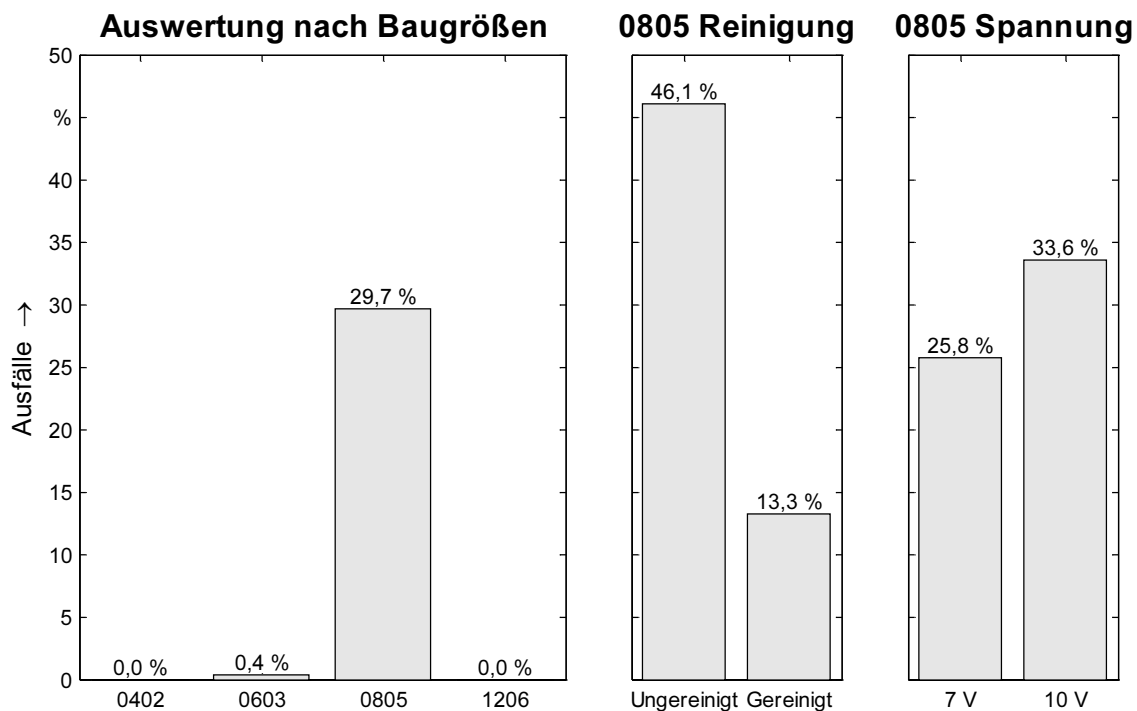


Bild 66: Auswertung der nach optischer Begutachtung auffälligen Keramikkondensatoren nach Bauform und Einflussfaktoren (Bauform 0805)

5.5 Zusammenfassung

Der Einsatz von elektronischen Baugruppen in mobilen Systemen, wie beispielsweise in Kraftfahrzeugen, stellt hohe Anforderungen an deren Qualität und Zuverlässigkeit. Dabei stellen unter anderem die einwirkenden Umwelteinflüsse für dezentrale Einbauorte ein Gefahrenpotential für die eingesetzte Mikroelektronik dar. Der bisher wenig betrachtete Aspekt der Betauung auf elektronischen Schaltungen gewinnt dabei an Bedeutung, da der Schädigungsmechanismus elektrochemische Migration durch aktuelle Entwick-

lungen auf Baugruppen- und Systemebene erheblich begünstigt wird. Der Anteil von Steuergeräten in modernen Automobilen, bei denen dauerhaft die Bordnetzspannung anliegt, beträgt bis zu 70 %. Mit der gleichzeitigen Verringerung von Abständen zwischen Leiterbahnen, Anschlussstrukturen von Bauelementen bzw. Steckerleisten, die unterschiedliches elektrisches Potential aufweisen können, erhöht sich die dort wirkende elektrische Feldstärke. Im Rahmen dieses Kapitels wurde ein Prüfverfahren konzipiert, das eine gezielte, zyklische Betauung auf einem Testschaltungsträger erzeugte. Die besondere Problematik hierbei war, dass bei der Verwendung von Klimaprüfschränken die beiden Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte geregelt werden können, aber nicht die Menge von kondensierter Feuchtigkeit. Diese hängt unter anderem von der Geometrie und der Masse des Prüfobjekts ab. Mit dem Einsatz eines Betauungssensors wurde ein geeignetes Klimakammerprofil ermittelt, das einen reproduzierbaren Betauungsgrad auf den Schaltungsträgern ermöglichte. Darüber hinaus wurden für eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Einflussfaktoren neue Bewertungskriterien definiert, mit denen eine Quantifizierung des zeitlichen Auftretens und des Maßes von gebildeten Dendriten ermöglicht wurde. Mit der Grundqualifizierung konnten wesentliche Probleme in diesem Zusammenhang eindrucksvoll nachgewiesen werden.

Die Verwendung von No-Clean-Lotpasten, die einen Reinigungsvorgang am Ende des Herstellungsprozesses nicht erfordern, kann aufgrund von Verunreinigungen oder Flussmittelresten zwischen zwei elektrisch leitfähigen Strukturen zu Kurzschlüssen unter Betauungseinfluss führen. Ein Reinigungsprozess konnte die Anfälligkeit in allen Versuchsreihen erheblich reduzieren. Weiterhin begünstigte eine höhere elektrische Feldstärke die Dendritenbildung. Hieraus lassen sich zwei Empfehlungen für Baugruppen, die an Einbauorten, die anfällig für Betauung sind, ableiten. Bereits in der Designphase können mit der Bestimmung der wirkenden elektrischen Feldstärken kritische Bereiche identifiziert werden und mit einer Optimierung des Layouts, beispielsweise durch eine Vergrößerung der Abstände oder einer Reduzierung der Spannungspegel, das Gefahrenpotential verringert werden. Nachdem die Eignung des Prüfverfahrens anhand von Teststrukturen gezeigt wurde, können in zukünftigen Untersuchungen drei Aspekte vertieft werden. Neben den Auswirkungen unterschiedlicher Klimakammerparameter auf die sich einstellende Betauung sind dies die Untersuchungen weiterer Bewertungskriterien hinsichtlich einer zusätzlichen Steigerung der Aussagekraft der Ergebnisse und die Einbeziehung von Bauelementen mit komplexen Anschlussstrukturen, zum Beispiel QFPs oder BGAs, und miniaturisierte Steckerleisten. Darüber hinaus kann der Prüfaufbau so erweitert werden, dass die Prüflinge in der Klimakammer auf einer regelbaren Kühlvorrichtung montiert werden, mit dem Ziel, noch besser eine auftretende Betauung zu steuern.

6 Innovatives Messverfahren zur Bestimmung der Phasenübergänge von Lot in der Nacharbeit

Die Bedeutung des Nacharbeitsprozesses, der dadurch gekennzeichnet ist, dass ein einzelnes Bauelement auf einer ansonsten als funktionsfähig zu betrachtenden Baugruppe ausgetauscht wird, steigt trotz aller Maßnahmen zur Steigerung der Ausbringung in der Produktion weiter an [119]. Die Alternative zu einem Reparaturprozess liegt in der unmittelbaren Entsorgung der Baugruppe. Dagegen sprechen heute im Wesentlichen zwei Gründe. Zunächst ist der ökologische Aspekt zu betrachten. Eine Beseitigung erhöht die Menge an sogenanntem Elektroschrott und zugleich den Bedarf an zusätzlichen Ressourcen für die Herstellung einer weiteren Baugruppe. Die Gesetzgeber der Länder der Europäischen Union haben diesbezüglich mit der Umsetzung der Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE) in jeweiliges, nationales Recht die Hersteller in die Verantwortung für den gesamten Produktlebenszyklus genommen [23]. Dies schließt ausdrücklich auch die Entsorgungskosten mit ein. Weiterhin treten ökonomische Gesichtspunkte in den Vordergrund [67]. Bei komplexen elektronischen Baugruppen, wie zum Beispiel Motorsteuergeräte in Automobilen, können alleine die Kosten für die Komponenten einer Baugruppe den finanziellen Aufwand für einen Nacharbeitsprozess nach dem erstmaligen Aufbau der Baugruppe, der im Nachfolgenden als Referenzprozess bezeichnet wird, weit übersteigen. Mit einem erfolgreichen Reparaturprozess kann bei hochpreisigen Systemen eine auffällige Baugruppe wieder in die Wertschöpfungskette zurückgeführt werden.

In diesem Kapitel wird am Beispiel der Bauelementform BGA (Ball Grid Array), die sich durch an der Unterseite flächig verteilte Anschlussstrukturen auszeichnet, ein neues Verfahren auf der Basis von elektrischen Widerstandsmessungen zur zeitlichen Bestimmung des Aufschmelzens und des Erstarrens der zu kontaktierenden Lotballs vorgestellt. Eine der vielfältigen Herausforderungen bei der BGA-Reparatur liegt in der optimierten Temperaturführung durch die eingesetzten Nacharbeitssysteme [39]. Es muss einerseits sichergestellt werden, dass die Aufschmelztemperatur des verwendeten Lotwerkstoffs für einen festzusetzenden Zeitraum sicher überschritten wird und andererseits soll die Temperaturbelastung des Bauelements und der gesamten Baugruppe minimiert werden. Letzteres ist von besonderer Bedeutung, da im Gegensatz zu dem Referenzprozess eine lokale Erwärmung stattfindet und somit die Temperaturgradienten auf der Baugruppe erheblich höher sind. Hier liegt prozessbedingt eine Gefahrenquelle, die zu einer endgültigen Ausschleusung der Baugruppen führen kann. Dieses Szenario rückt aufgrund der Verwendung von bleifreien Zinn-Silber-Kupfer-Lotlegierungen immer stärker in den Vordergrund [36]. Diese haben sich mit der Umsetzungen der europäischen Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment - RoHS) als Standardbasislegierung für den bleifreien Aufbau von elektronischen Baugruppen in der industriellen Praxis durchgesetzt

[22]. Die Prozesstemperaturen liegen hier rund 30 K höher als bei den abgelösten, bleihaltigen Lotwerkstoffen [6].

Ein bisher bekanntes Konzept für die zeitliche Bestimmung des Aufschmelzen von Lotballs lag in der Integration eines Nacharbeitssystems in eine In-Situ-Röntgenanlage [11][121]. Dabei wurde der Übergang in die schmelzflüssige Phase anhand einer Deformation des Lotballs aufgrund von asymmetrischen Padlayouts sicher erkannt. Diese Anpassung der Anschlussflächen bei Area-Array-Bauelementen wird bei der Röntgeninspektion nach dem Herstellungsprozess von Baugruppen ausgenutzt [20][136]. Der wesentliche Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass keine Anpassungen an den Schaltungsträger und an dem BGA-Bauelement notwendig sind. Auf der anderen Seite wirkt jedoch nachteilig, dass das Nacharbeitssystem komplett in eine Röntgenanlage platziert werden musste. Neben einer kritischen Betrachtung der notwendigen Investitionskosten müssen zusätzlich die einschlägigen gesetzlichen Verordnungen für den Betrieb einer Röntgenanlage berücksichtigt werden [97].

Nach einer Gegenüberstellung der bisher angewendeten Verfahren zur Ermittlung von Temperaturprofilen für den Referenzprozess und in der Nacharbeit, wird das neue Messverfahren präsentiert, das auf der Basis elektrischer Widerstandsmessungen beruht. Anhand exemplarischer BGA-Nacharbeiten werden die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens aufgezeigt. Da dieses Verfahren eine genaue Bestimmung der Zeitdauer, in der sich das Verbindungsmedium Lot über der Liquidustemperatur verweilt, ermöglicht, kann die lokale Wärmeeinbringung bezüglich der wirkenden Maximaltemperaturen minimiert werden. Abschließend werden die Einsatzpotentiale des innovativen Messverfahrens aufgezeigt.

6.1 Temperaturprofilierung in Produktion und Nacharbeit

Die Temperaturprofilierung ist sowohl für die Produktion von elektronischen Baugruppen als auch bei der Nacharbeit einzelner Komponenten von wesentlicher Bedeutung für die Qualität und Zuverlässigkeit. Die Vorgehensweisen sind aber dennoch von ganz unterschiedlicher Natur. In der Produktion ist eine massive Wärmeeinbringung über die gesamte Baugruppe erforderlich, während im Nacharbeitsprozess eine gezielte selektive Übertragung der Energie auf die Lötstellen eines einzelnen Bauelements notwendig ist (Bild 67).

6.1.1 Optimierung der Wärmeeinbringung im Reflowlötprozess

Die Wärmeeinbringung bei dem Referenzprozess erfolgt während des Lötens mit Hilfe von Konvektion oder Kondensation über die gesamte Baugruppe [8]. Für die Überwachung des Temperaturprofils werden in der Regel Thermoelemente eingesetzt, die auf dem Schaltungsträger angebracht werden. Dabei sollen insbesondere kritische Punkte überwacht werden. Diese sind die zu erwartenden heißesten und kältesten Stellen auf der Baugruppe [42]. Hiermit kann sichergestellt werden, dass alle Anschlussstrukturen aufschmelzen und gleichzeitig keine Überbelastung an der Oberseite von Bauelementgehäusen auftreten. Mit dem Einsatz von spezifischen Datenloggern, die zusammen mit

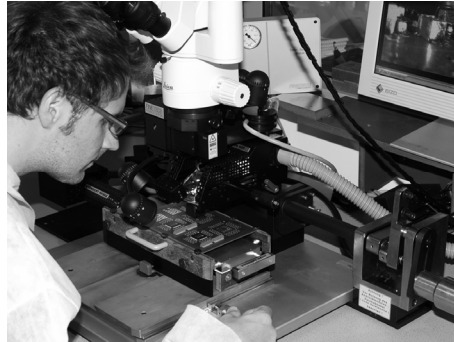
der Baugruppe durch eine Lötanlage transportiert werden können, kann eine Erfassung der herrschenden Temperaturen erfolgen. Da das Verhalten einer Lotpaste neben der genauen Zusammensetzung der Lotlegierung auch von dem enthaltenen Flussmittel abhängt, geben die Hersteller dieser Verbindungsmedien in der Regel eine Empfehlung für ein Temperaturprofil.

Referenzprozess



- ☐ Wärmeeinbringung
Global über der Baugruppe mit Konvektion oder Kondensation
- ☐ Herausforderung
Berücksichtigung des gesamten Bauelementspektrums

Nacharbeitsprozess



- ☐ Wärmeeinbringung
Lokal für ein einzelnes Bauelement mit Heißgas oder Infrarot
- ☐ Herausforderung
Hohe Temperaturgradienten im Umfeld der Wärmeeinbringung

Bild 67: Wärmeeinbringung im Referenz- und im Nacharbeitsprozess und die Herausforderungen für die Temperaturprofilierung

Die Auswirkungen einer Optimierungsmaßnahme wird in dem Bild 68 aufgezeigt. Die gestrichelte Linie stellt den Temperaturverlauf bei der Verwendung eines in der Lötanlage verfügbaren bleifreien Sattelprofils dar. In Ergänzung hierzu wurde die Empfehlung des Herstellers für die verwendete Lotpaste grau hinterlegt [79]. Dabei kann dem Kurvenverlauf entnommen werden, dass sowohl die Maximaltemperatur in der Lötphase (Peakzone) um mindestens 10 K zu hoch als auch die Dauer der Sattelphase (Soakti-me) zu lang war. Nach der Reduzierung der Solltemperaturen in den sieben verfügbaren Heizzonen und einer Beschleunigung des Transportsystems um 10 % ergab sich das optimierte Profil, das sich nahezu über dem gesamten Verlauf in den empfohlenen Bereich einpasste.

Eine besondere Herausforderung bei komplexen Baugruppen liegt darin, dass einzelne Verbindungsstellen nicht mit der notwendigen Wärme versorgt werden. Die möglichen Gründe können in der Anbindung an massive Kupferleiterbahnen oder an Funktionsstrukturen zur Wärmeableitung in der Leiterplatte liegen. Des Weiteren können auch thermische Abschattungseffekte auftreten, wenn kleine Zweipoler in unmittelbarer Umgebung von sehr massereichen Komponenten liegen. In einem solchen Fall wäre ein Re-Design der Baugruppe zu empfehlen, sofern dies bei hochintegrierten Schaltungsträgern möglich ist. Auf der anderen Seite muss sichergestellt werden, dass keine Überbelastungen an anderen Stellen auf der Baugruppe auftreten. Bei der Beurteilung von Lötprofilen haben sich zwei Kennzahlen etabliert. Neben der auftretenden Maximaltemperatur in der Lötzone ist die Temperaturdifferenz zwischen der kältesten und

wärmsten gemessenen Temperatur in dieser Phase von besonderem Interesse bei der Analyse der Profile und damit der eingestellten Lötanlagenparameter. Ein neuer Ansatz bei der Entwicklung ist der Einsatz von Simulationstechniken für Lötprozesse, der den Aufwand bei der Temperaturprofilierung signifikant reduzieren kann [3].

Optimierung eines Temperaturprofils im Referenzprozess

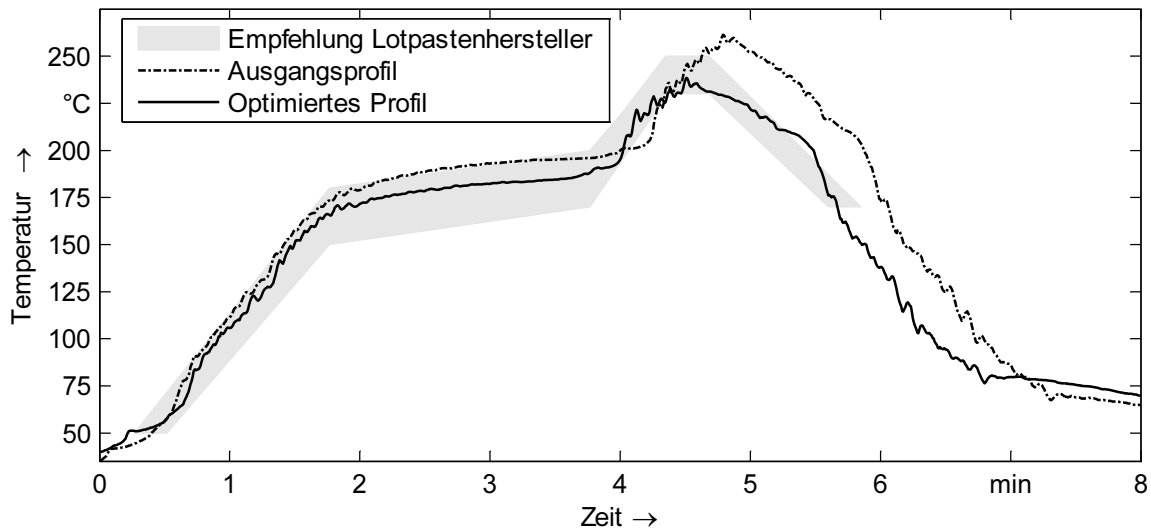


Bild 68: Verlauf der gemessenen Temperaturen an einer Lötstelle vor und nach der Optimierung des Temperaturprofils im bleifreien Referenzprozess

6.1.2 Temperaturermittlung für die BGA-Nacharbeit

Bei der Ermittlung von Temperaturprofilen in der Nacharbeit für BGA-Bauelemente ist für den hier betrachteten bleifreien Prozess mit großer Sorgfalt vorzugehen [137]. Insbesondere soll dabei eine möglichst homogene Temperaturverteilung über alle Anschlussstellen hinweg erreicht werden [38]. Darüber hinaus muss die Belastungsgrenze des Gehäuses berücksichtigt werden, die, je nach Dicke der Komponente, bei 250 °C bis 260 °C liegt [47]. Der konventionelle Ansatz für die Erfassung der herrschenden Temperaturen besteht im Aufbau eines Testschaltungsträgers mit dem nachzuarbeitenden BGA-Bauelement. Dabei soll die Leiterplatte bezüglich des Lagenaufbaus und des Massenverhältnisses derjenigen entsprechen, bei der die eigentlichen Austauschprozesse vorgenommen werden sollen. Idealerweise wird bereits im Produktionsprozess eine ausreichende Anzahl von Rückstellmustern zu diesem Zweck eingeplant.

Eine Verdeutlichung dieser Herausforderung erfolgte anhand einer Testbaugruppe, die mit drei Thermoelementen versehen wurde. Wie auch bei den späteren Untersuchungen in diesem Kapitel wurde ein BGA mit einer vollbesetzten 13 x 13 Matrix bei einem Rastermaß von 1,5 mm verwendet. Dazu wurden zwei Sensoren durch Bohrungen von der Unterseite mit ausgewählten Anschlussballs an der Ecke und in der Mitte des BGAs verbunden [73]. Der dritte Sensor wurde auf der Oberseite des BGAs fixiert, mit dem Ziel die Maximaltemperatur während der Lötphase zu bestimmen. Eine exemplarische Messung mit den Messwertverläufen der drei Sensoren für zwei Temperaturprofile zeigt das Bild 69.

Dem ersten Temperaturprofil lagen Prozessparameter zugrunde, wie sie bei einem ähnlichen Bauelement erfolgreich angewendet wurden. Sowohl die maximale Temperatur von 248,7 °C an der Oberseite des BGAs als auch die Zeitdauer über der Liquidustemperatur von 40,5 s bzw. 47,1 s waren hinsichtlich der thermischen Belastung für den BGA günstig (Bild 69 oben). Letztere Werte lagen zwar unter den in dem JEDEC-Standard 020D geforderten Mindestwert von 60 s, jedoch ergab eine optische Begutachtung während eines Nacharbeitsprozesses mit diesem Profil, dass der Lotball an der Ecke des BGAs deutlich über einer Minute aufgeschmolzen war [47]. Eine weiter gehende Analyse dieses scheinbaren Widerspruchs erfolgte mit einer Vergleichsmessung, bei der die Kühlphase 20 s früher initiiert wurde (Temperaturprofil 2).

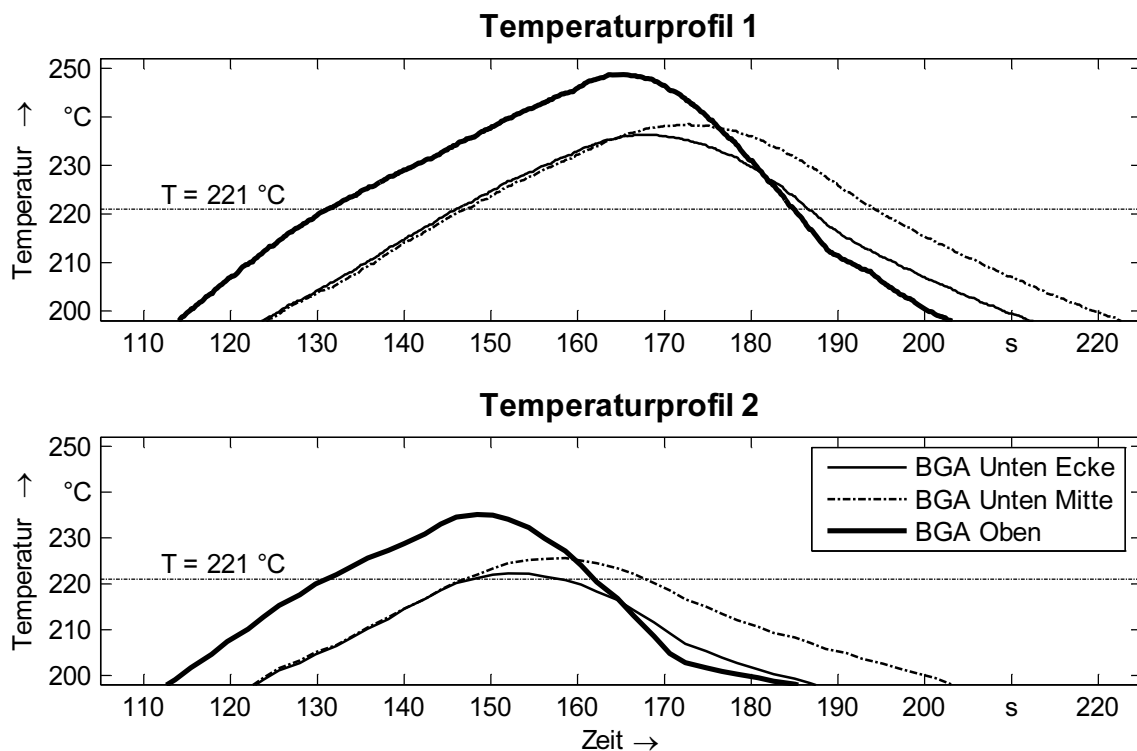


Bild 69: Temperaturverläufe an drei Messpunkten während eines Nacharbeitsprozesses an einem BGA für zwei Lötprofile in der Peakzone

Die Auswirkungen der Verkürzung der Heizphase waren deutlich erkennbar. Insbesondere der Temperaturverlauf an der Ecke des BGA war auffällig, mit einer Maximaltemperatur von 222,3 °C und einer Zeit über Liquidus von 10,0 s. Aus diesen Werten wurde zunächst auf eine unzureichende Lötstelle geschlossen. Die optische Betrachtung ergab jedoch, dass die Balls ausreichend lange aufgeschmolzen waren und keinerlei Anlass zu einer Beanstandung gaben. Mit diesen Messungen konnte nachgewiesen werden, dass trotz aufwendiger Präparierung von Schaltungsträgern aus den Messungen mit den Thermoelementen nicht eindeutig auf das Lötresultat geschlossen werden kann. Insbesondere können geringste Abweichung bei den Bohrungen und den Fixierungen der Thermoelemente auftreten, mit dem Ergebnis, dass nicht mehr die Temperatur der Lotballs erfasst wird. Diese Erkenntnisse bildeten den Ausgangspunkt für einen innovativen Ansatz für die Bestimmung der Phasenübergänge in der Nacharbeit und der Ermittlung der Zeitdauer über der Liquidustemperatur.

6.2 Messverfahren zur Schmelzpunktdetektion mit elektrischen Widerstandsmessungen

Bei der Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen mit Hilfe von Temperaturschocklagerungen (Abschnitt 3.2.1) und auch bei den Versuchen zur Eigenerwärmung von Bauelementen (Abschnitt 4.2.2) zeigte sich eine starke Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von der Temperatur. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren der Anlass, diese Messaufbauten auf den Nacharbeitsprozess zu übertragen. Das primäre Ziel war dabei nicht die absolute Erfassung der Temperaturen, sondern die Erkennung der Phasenübergänge der Anschlussstrukturen von BGA-Bauelementen, die sich aus Standardlotlegierungen zusammensetzten. Die Erwartung dabei war, dass sich bei dem Aufschmelzen und dem Erstarren des Lots signifikante Änderungen des elektrischen Widerstands erkennen ließen. Dabei treten zwei physikalischen Effekte in den Vordergrund der Betrachtungen. Zum einen ändert sich der spezifische Widerstand eines Metalls bei dem Übergang von der festen in die flüssige Phase. Zum anderen erfordert ein Phasenübergang zusätzliche Energie (Schmelzenthalpie), ohne dass eine Temperaturerhöhung stattfindet. Dieser Effekt wurde mit den Lotballs des in diesem Kapitel verwendeten BGA169 mit einer DSC-Analyse (Differential Scanning Calorimetry) verifiziert (Bild 70) [37]. Dem Messwertverlauf konnte neben der signifikanten Änderung der Energieeinbringung auch die Breite des Aufschmelzbereichs von 4,3 K, die sich aus den Schnittpunkten der eingetragenen Tangenten berechnet, entnommen werden.

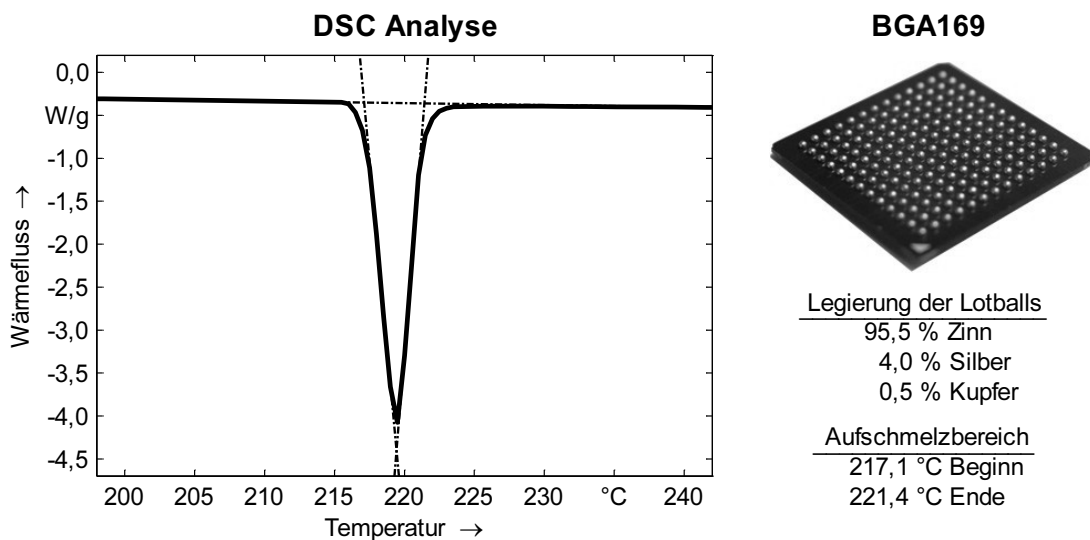


Bild 70: Differential Scanning Calorimetry (DSC) Analyse des Aufschmelzvorgangs der Anschlussballs des BGA169

6.2.1 Alternatives Messprinzip auf der Basis elektrischer Messungen

Dem hier vorgestellten Messverfahren für die Bestimmung der Phasenübergänge von Lotballs unter BGAs liegen elektrische Messungen während der Lötprozesse, insbesondere dem Einlötprozess, zugrunde. Hierbei wurden die Widerstände durch jeweils zwei benachbarte Balls bestimmt. Eine wesentliche Voraussetzung war, dass der BGA

und das Leiterplattenlayout eine Daisy-Chain Kontaktierung aufwiesen. Die Herausforderung bei diesem Verfahren lag in der messtechnischen Bestimmung von geringsten Widerstandsänderungen. Bei den in dieser Untersuchung verwendeten BGAs (BGA169, 1,5 mm Raster, 23 mm Kantenlänge) betrug das Ausgangsniveau des Widerstands bei einer Messung durch zwei benachbarte Balls weniger als 2 mΩ bei Raumtemperatur. Der Versuchsaufbau musste folglich Änderungen im Bereich von deutlich unter einem Zehntel-Milliohm registrieren. Das Prinzip des Messverfahrens wird in Bild 71 links dargestellt. Bei den Messungen wurde wiederum das Vierpunkt-Messprinzip angewendet. Die Verzweigungspunkte waren dabei die Anschlussflächen der zwei benachbarten Lotballs, die im Inneren des BGAs elektrisch kurzgeschlossen waren. Somit konnte die Messstrecke durch die Lotkugeln und der internen Verbindung optimal kurz gehalten werden [115][118].

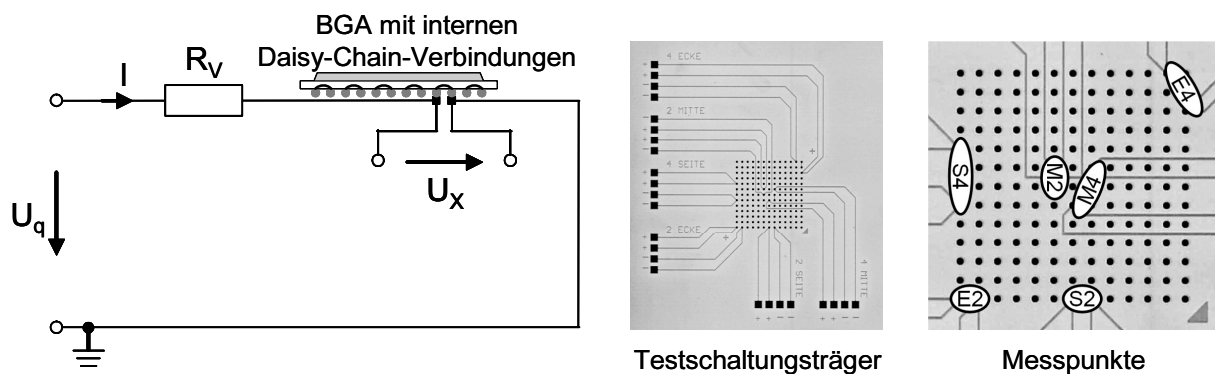


Bild 71: Ersatzschaltbild für die Messung des elektrischen Durchgangswiderstands zweier benachbarter Anschlussballs (links) und Testschaltungsträger (Mitte - invertierte Darstellung) für Zwei- und Vier-Ball-Messungen mit den Messpunkten (rechts)

Die Festlegung des für die Messschaltung benötigten Vorwiderstands erfolgte vor dem Hintergrund von zwei gegensätzlichen Randbedingungen. Einerseits sollte der Wert für R_V so gering wie möglich gewählt werden, damit die über dem zu ermittelnden Widerstand R_X abfallende Spannung U_x den Messbereich in großem Umfang ausnutzt. Andererseits kann dabei der sich einstellende Strom so groß werden, dass eine hierdurch verursachte Eigenerwärmung das Messergebnis verfälschen kann. In jedem Fall war der gewählte Vorwiderstand R_V mit 90,9 Ω wesentlich größer als der zu untersuchende Widerstand R_X . Dessen Wert kann aus den beiden überwachten Spannungen bei zulässiger Vernachlässigung weiterer Leitungswiderstände R_L nach (Gl. 38) berechnet werden.

$$I = \frac{U_q}{R_V + R_L + R_X} = \frac{U_x}{R_X} \quad \xrightarrow{R_V \gg R_L, R_X} \quad R_X \approx R_V \cdot \frac{U_x}{U_q} \quad (\text{Gl. 38})$$

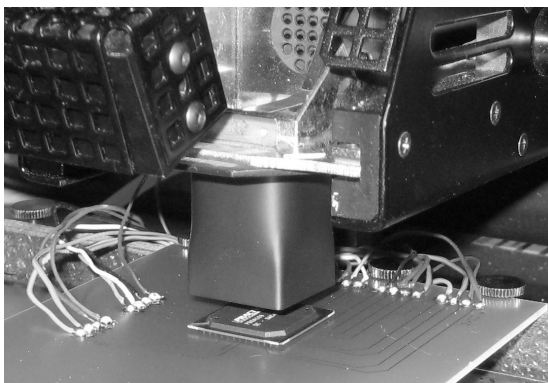
Mit einer ergänzenden Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass mit dem festgelegten Vorwiderstand $R_V = 90,9 \Omega$ und einer Quellspannung von $U_q \approx 7,5 \text{ V}$ keine mit dem Messaufbau nachweisbare Eigenerwärmung im BGA-Bauelement auftrat. Ein Ziel bei der Nacharbeit von BGA-Bauelementen ist die Erreichung einer möglichst homoge-

nen Temperaturverteilung unter dem BGA, die optimalerweise in einem synchronen Aufschmelzen und Erstarren resultiert [64]. Für die Analyse dieses Aspektes wurde ein Testschaltungsträger so aufgebaut, dass die drei Bereiche Ecke (E2), Seite (S2) und Mitte (M2), mit jeweils zwei benachbarten Anschlussballs, verwirklicht wurden (Zwei-Ball-Messungen) (Bild 71 Mitte und rechts). Zusätzlich wurden entsprechende Messstrecken durch vier Lotballs realisiert (E4, S4 und M4), mit denen ergänzende Informationen gewonnen werden sollten (Vier-Ball-Messungen). Der Anschluss der Messleitungen erfolgte für jedes Messobjekt an vier Messpads. Mit der Verwendung von Heißgas-systemen für den Nacharbeitsprozess musste die Problematik berücksichtigt werden, dass aufgrund der räumlichen Nähe die Lötstellen für die Messleitungen bei der Verwendung üblicher Lotmaterialien ausschmelzen und dekontaktieren können. Eine Abhilfe leistete die Verwendung eines höher schmelzenden Lotdrahts der Legierung Pb93Sn5Ag2 mit einem Aufschmelzbereich von 296 °C bis 301 °C, der sich bei den praktischen Versuchsreihen bewährte.

6.2.2 Exemplarische Messwertverläufe

Die Untersuchungen wurden mit der Nacharbeitsstation Fineplacer der Fa. Finetech durchgeführt. Die Wärmeübertragung erfolgt bei diesem System mit Heißgas, für das bei den Versuchen das Medium Stickstoff ausgewählt wurde. Die Aufzeichnung aller sechs Messkanäle erfolgte mit einer Abtastrate von 100 Hz, so dass sprunghafte Änderungen in den Widerstandsverläufen zeitlich hochgenau aufgelöst werden konnten. Der Versuchsaufbau in der Nacharbeitsstation mit dem Testschaltungsträger und den zugehörigen Messleitungen (jeweils vier für jedes Messobjekt) kann in dem Bild 72 links entnommen werden. Die ersten Messungen erfolgten mit einem Temperaturprofil, das sowohl eine hohe Temperatur in der Peakzone aufwies, als auch eine ausreichend lange Lötphase beinhaltete (Bild 72 rechts). Damit konnte sichergestellt werden, dass der BGA sicher kontaktierte.

Versuchsaufbau



Temperaturprofilierung

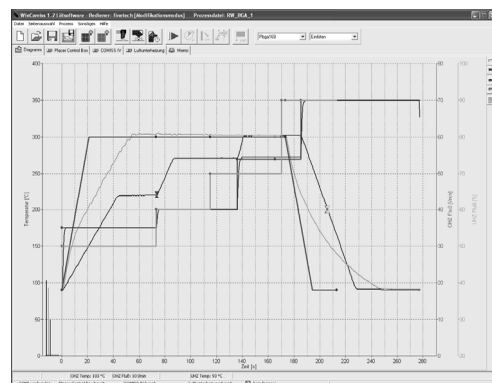
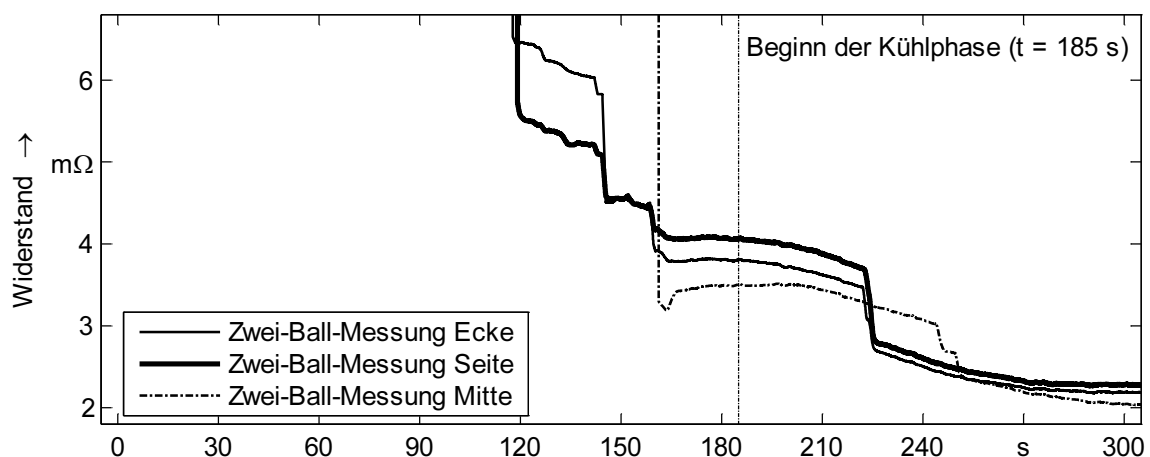


Bild 72: Versuchsaufbau für die Messungen des elektrischen Durchgangswiderstands während des Nacharbeitsprozesses (links) und ein zugehöriges Temperaturprofil für die Grundqualifizierung (rechts)

Die Messreihen wurden bei dem Einlötprozess aufgenommen, da hierbei im Gegensatz zu dem Auslötprozess eine definierte Abkühlungsphase stattfand. Auf die Anschlussflä-

chen für die einzulötenden BGA-Bauelemente wurden vor dem Platzieren auf den Testschaltungsträgern pastöses Flussmittel aufgetragen. Mit dieser Maßnahme konnte gewährleistet werden, dass keine Verschiebung des BGAs vor dem endgültigen Kontaktieren durch den Heißgasstrom auftrat. Das Flussmittel wirkte elektrisch isolierend, so dass zu Beginn des Einlötprozesses alle Messstrecken einen unendlichen Widerstand besaßen. Entsprechend sinnvolle Widerstandswerte ergaben sich erst nach dem vollständigen Entweichen des Flussmittels und der beginnenden Kontaktierung der Lotballs, die durch den Übergang in die schmelzflüssige Phase gekennzeichnet waren. Die errechneten Widerstandsverläufe bei der Zwei-Ball-Messung für die drei Bereiche Ecke, Seite und Mitte des BGAs wurden in dem Bild 73 oben aufgetragen. Eine detaillierte Betrachtung der Kurven führte zu drei Erkenntnissen. Die Lotballs am Rand des BGAs begannen nach 116,7 s (Ecke) bzw. nach 118,1 s (Seite) zu kontaktieren. In dem Bereich danach fielen die beiden Widerstandswerte stufenweise ab, bis die Anschlussstellen unter der Mitte des BGA nach 160,3 s kontaktierten. Dies war ein Indiz dafür, dass das Aufschmelzen der inneren Lotballs deutlich später als in den Randbereichen stattfand. Eine Verifikation erfolgte mit einem zweiten Lötprozess, der im Anschluss an den dann bereits kontaktierten BGA durchgeführt wurde (Bild 73 unten).

1. Nacharbeitsprozess (BGA auf Flussmittel)



2. Nacharbeitsprozess (BGA bei Prozessbeginn kontaktiert)

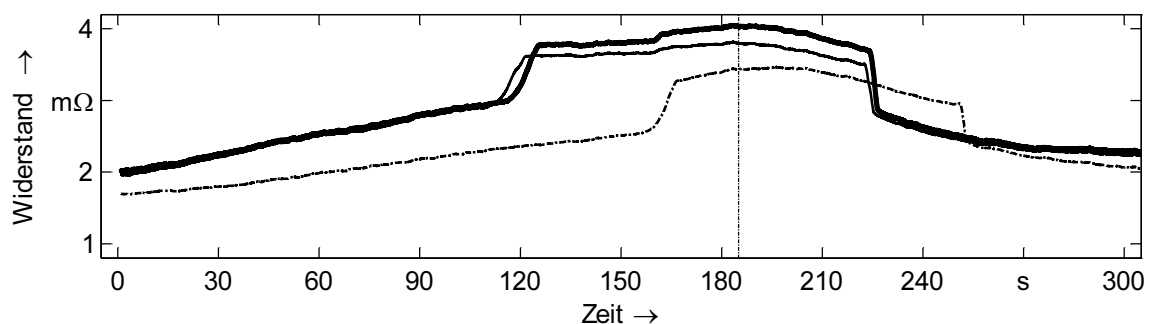


Bild 73: Widerstandsverläufe der Zwei-Ball-Messungen für den ersten (oben) und zweiten (unten) Nacharbeitsprozess

Die zweite Erkenntnis resultierte aus der Betrachtung des Bereichs um den Beginn der Kühlphase, die bei dem zugrunde liegenden Temperaturprofil 185 s nach Prozessbe-

ginn begann. Während die Widerstandswerte für die Messpunkte Ecke und Seite unmittelbar danach abnahmen, erreichte die Kurve für den Messpunkt in der Mitte des BGA wesentlich später einen Maximalwert. Dies galt sowohl für den ersten als auch für den zweiten Einlötprozess. Das Erstarren dieser Balls erfolgte erst 58 s nach Beginn der Kühlphase. Der Zeitabstand zwischen dem vollständigen Aufschmelzen der Balls in der Mitte und dem Start der Kühlphase betrug lediglich 19 s (Bild 73 unten). Daraus ließ sich ableiten, dass bei einem Einlötprozess mit möglichst geringer thermischer Belastung auf den BGA der Heißgasstrom unmittelbar nach dem Aufschmelzen abgeschaltet werden kann. Die Lotballs verbleiben auch bei einer Aktivierung eines Kühlstroms lange genug schmelzflüssig, um eine Ausbildung der Lotstelle mit guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften zu gewährleisten. Die dritte Erkenntnis wurde bei der genauen Betrachtung der Widerstandsverläufe während des Erstarrens gewonnen. Im Gegensatz zu dem Aufschmelzen, das ein kontinuierlicher Vorgang war, konnte bei dem Übergang von der flüssigen in die feste Phase ein quasi diskretes Verhalten nachgewiesen werden. In dem Bild 73 oben konnte dies gut auf dem Verlauf der Balls in der Mitte entnommen werden, bei dem eine Zwischenstufe mit einer Dauer von 6,1 s zu erkennen war. Dabei war allerdings zu berücksichtigen, dass alle Kurvenverläufe in dem Bild 73 über ein geeignet langes Fenster gleitend gemittelt wurden, um das vorhandene Rauschen der Messsignale für eine bessere Darstellung weitgehend zu unterdrücken.

Im nächsten Schritt erfolgte eine genauere Analyse der beiden Übergänge anhand des Widerstandsverlaufs für die Vier-Ball-Messung in der Mitte eines BGAs, der vor dem Beginn des Einlötprozesses bereits kontaktiert war (Bild 74).

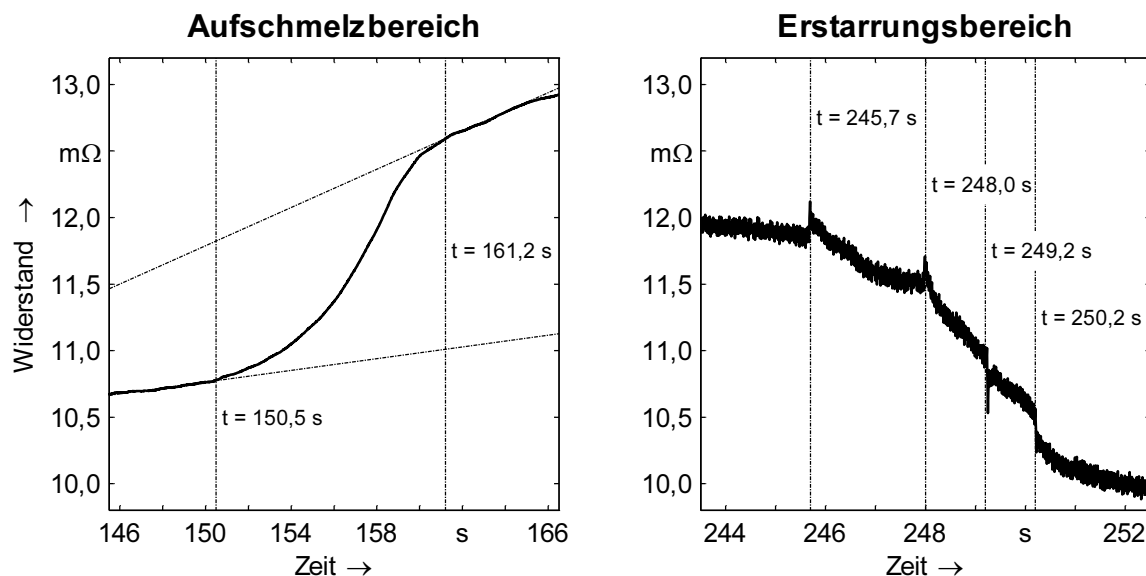


Bild 74: Widerstandsverläufe während der Phasenübergänge bei einer Vier-Ball-Messung in der Mitte des BGAs

Für die Bestimmung der Zeit des Aufschmelzens der vier Balls wurde das signifikante Abweichen von den Verläufen vor und nach dem Übergang herangezogen (Bild 74 links). Die vier Balls schmolzen in einem Zeitraum von 10,7 s auf. Dabei galt es allerdings zu bedenken, dass keine Trennung der vier Balls möglich war. Dennoch konnte

anhand von Videoaufnahmen von Randballs nachgewiesen werden, dass der Prozess des Aufschmelzens einige Sekunden benötigte. Dies korrelierte sehr gut mit dem Ergebnis der DSC-Analyse der Lotballs aus Bild 70.

Die Videoaufnahmen belegten ebenso, dass der Erstarrungsprozess zeitlich diskret ablief. Bei der Darstellung des zugehörigen Widerstandsverlaufs in Bild 74 rechts wurde auf eine fortlaufende Mittelung der Werte verzichtet. Die vier signifikanten Stufen konnten auf diese Weise eindeutig identifiziert werden. Die sprunghafte Änderung des Verlaufs bedeutete, dass eine Erstarrung in weniger als einer hundertstel Sekunde stattfand. Der zeitliche Versatz vom ersten bis zu dem vierten Sprung betrug in dem gezeigten Beispiel 4,5 s. Die Auswertung der weiteren Messkurven ergab, dass benachbarte Anschlussstellen des BGAs ein nicht exakt vorhersagbares Verhalten bezüglich des Zeitpunkts des Erstarrens aufwiesen und statistischen Schwankungen unterlagen.

Mit dem vorgestellten Versuchsaufbau konnte der Nachweis erbracht werden, dass das neue Messverfahren geeignet war, das Aufschmelzen und das Erstarren von Lotballs bei BGA-Bauelementen zeitlich eindeutig zu bestimmen. Darüber hinaus konnten wesentliche Erkenntnisse über den Einlötprozess gewonnen werden, insbesondere der erhebliche zeitliche Versatz zwischen äußeren und inneren Anschlussstellen. Es konnte festgehalten werden, dass bei Nacharbeitssystemen die Betrachtung der inneren Lotballs für die Temperaturprofilierung am wichtigsten ist. Der Heizprozess könnte prinzipiell in dem Moment beendet werden, wenn die zentralen Kontaktstellen vollständig aufgeschmolzen sind, unter Berücksichtigung eines Zeitpuffers von wenigen Sekunden.

6.3 Analyse von Nacharbeitsprozessen

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde die prinzipielle Tauglichkeit des Messverfahrens eindrucksvoll nachgewiesen. Zwei Fragestellungen, die sich aus den Erkenntnissen dieser Grundqualifizierung ergaben, waren, wie mit diesem Verfahren die Auswirkungen unterschiedlicher Temperaturprofile ermittelt werden können, und ob ein Vergleich unterschiedlicher Nacharbeitssysteme mit dieser Messmethode möglich ist.

6.3.1 Auswirkungen von Temperaturprofilen auf die Dauer der schmelzflüssigen Phase

Ein wesentliches Ziel der Temperaturprofilierung in der Nacharbeit ist die Minimierung der thermischen Belastung während der beiden Aus- und Einlötprozesse. Der Auslötprozess ist dabei prinzipiell nachrangig zu betrachten, da hier das Bauteil in der Regel nicht wiederverwendet wird. Allerdings kann eine zu hohe thermische Belastung zu einer Schädigung der Anschlussflächen auf dem Schaltungsträger führen. Bei dem Einlötprozess zeigte sich im Rahmen der Grundqualifizierung (6.2.2), dass die Dauer des schmelzflüssigen Zustands des Lotes als unkritisch betrachtet werden konnte, da die Anschlussballs nach dem Abschalten der Heizelemente noch ausreichend lange für eine vollständige Benetzung der Anschlussflächen nicht erstarrten.

Aus den vorstehenden Überlegungen ergab sich das Optimierungspotential nicht in der Verkürzung des Temperaturprofils, sondern in der Absenkung der Maximaltemperaturen. Bei den praktischen Untersuchungen hierzu wurde ausgehend von dem im vorangegangenen Abschnitt verwendeten Temperaturprofil, das im Weiteren mit Profil 1 bezeichnet wird, ein angepasstes Profil 2 abgeleitet. Dazu wurden in den beiden Spitzenzonen die Solltemperaturen im System um jeweils 10 K abgesenkt (Bild 75 oben links). Dies resultierte systembedingt in einem geringfügig verkürzten Profil, dessen Kühlphase gegenüber dem Profil 1 2,5 s früher begann.

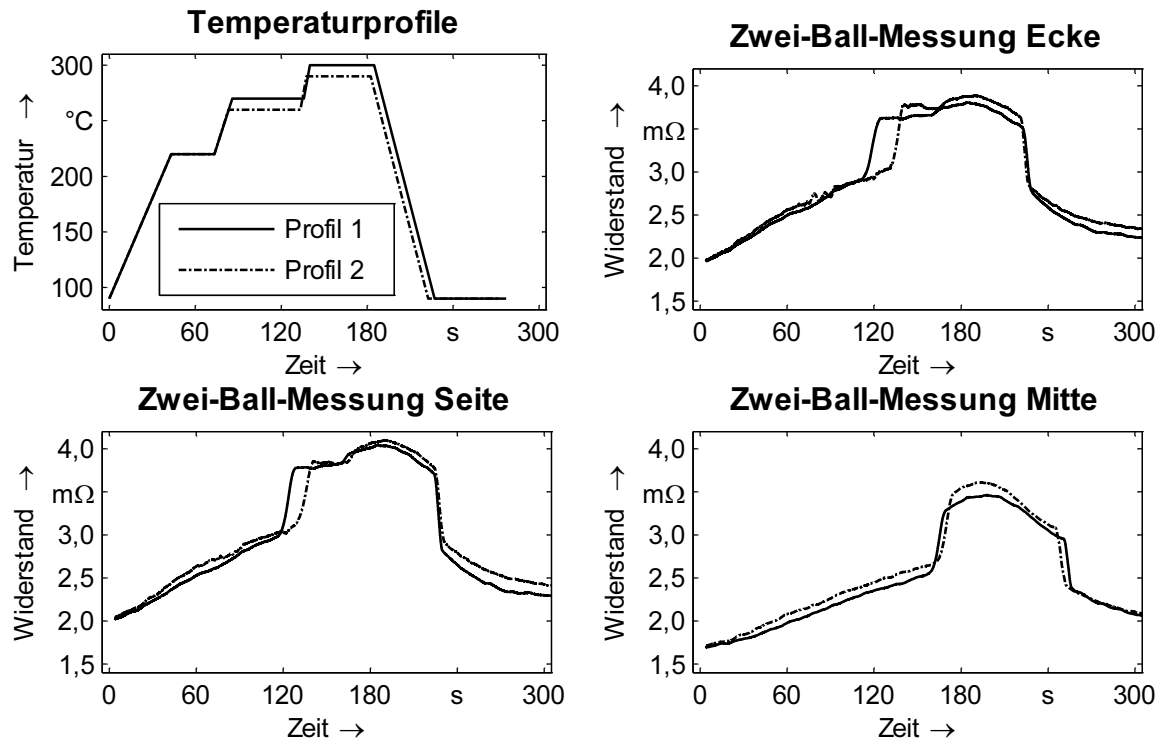


Bild 75: Vergleich der Auswirkungen von zwei Temperaturprofilen (oben links) auf die Widerstandsverläufe in den Bereichen Ecke, Seite und Mitte (Nacharbeitungssystem Fa. Finetech)

Bei dem Messort Ecke (Bild 75 oben rechts) ergab sich eine Verlängerung bis zu dem Beginn des Aufschmelzens von 19 s, an der Seite (Bild 75 unten links) von 13 s und in der Mitte von lediglich 3 s. Die entsprechenden Zeitpunkte für das Erstarren waren bei beiden Temperaturprofilen für die Lotballs an der Ecke und an der Seite ähnlich, lediglich die mittleren Balls erstarrten ca. 5 s früher. Die vollständigen Ergebnisse der numerischen Auswertung für alle Messungen wurden in die Tabelle 10 übertragen. Die Kühlphase bei dem Profil 1 begann nach 185 s, bei dem Profil 2 nach 182,5 s. Die Bestimmung der exakten Erstarrungszeitpunkte erfolgte anhand der Auswertung der nicht gemittelten Widerstandsverläufe.

Die Auswertung der Daten bestätigte, dass die Aufschmelzphase bei dem abgesenkten Profil 2 deutlich später abgeschlossen war, mit der Ausnahme der Vier-Ball-Messung an der Ecke. Hier zeigte sich, dass zeitliche Schwankungen von einem zum nächsten Lötprozess auftraten. Ein möglicher Grund hierfür könnte ein unterschiedlich starkes Absacken des BGAs nach dem vollständigen Aufschmelzen aller Lotballs gewesen sein, das

sich auf den Stand-Off auswirkte. Dies könnte zu veränderten thermischen Verhältnissen geführt haben, insbesondere falls eine geringe Verkipfung des BGAs nach dem ersten Lötprozess auftrat. Der bedeutendste Unterschied zwischen den beiden Temperaturprofilen lag in der Verringerung der Zeit, in der sich die Lotballs in der schmelzflüssigen Phase befanden. Diese Zeitdauer wurde aus der Differenz zwischen dem Mittelwert der Erstarrungszeitpunkte und dem Ende der Aufschmelzphase berechnet. Mit der Ausnahme der bereits zuvor erwähnten auffälligen Messung (Vier-Ball-Messung Ecke), ergaben sich signifikante Reduzierungen, die an der Ecke 18 s, an der Seite 12 s und in der Mitte 9 s betrugen. Dabei ergab sich über alle Messungen eine minimale Dauer über Liquidus von 75 s (Vier-Ball-Messung Mitte), die in jedem Fall für eine sichere Ausbildung der Lötstellen ausreichend war.

Messort	Messart	Temperaturprofil	Zeitbereich Aufschmelzen	Zeitpunkte Erstarren	Zeitdauer über Liquidus
Ecke	Zwei-Ball	1	110,9 s - 120,9 s	222,5 s, 224,1 s	102,4 s
		2	130,3 s - 137,6 s	220,7 s, 222,1 s	83,8 s
	Vier-Ball	1	137,7 s - 147,5 s	226,0 s, 228,2 s, 228,8 s, 230,2 s	80,8 s
		2	137,2 s - 148,0 s	221,3 s, 223,8 s, 225,3 s, 225,6 s	76,0 s
Seite	Zwei-Ball	1	115,7 s - 125,2 s	223,9 s, 225,3 s	99,4 s
		2	128,7 s - 137,3 s	224,8 s, 226,4 s	88,3 s
	Vier-Ball	1	139,8 s - 149,4 s	232,2 s, 234,2 s, 234,4 s, 236,1 s	84,8 s
		2	144,3 s - 154,7 s	224,6 s, 227,1 s, 227,2 s, 228,5 s	72,2 s
Mitte	Zwei-Ball	1	156,9 s - 166,0 s	250,6 s, 252,0 s	85,3 s
		2	160,2 s - 171,3 s	245,4 s, 247,7 s	75,3 s
	Vier-Ball	1	150,5 s - 161,2 s	245,7 s, 248,0 s, 249,2 s, 250,2 s	87,1 s
		2	154,2 s - 162,9 s	239,8 s, 241,2 s, 243,2 s, 244,5 s	79,3 s

Tabelle 10: Übersicht aller Zeitpunkte und -bereiche für das Aufschmelzen und Erstarren der Lotballs für zwei Temperaturprofile (Nacharbeitssystem Fa. Fine-tech)

Bei dem vorgestellten Messverfahren wurden jeweils die drei Messpunkte Ecke, Seite und Mitte des BGAs erfasst. Es zeigte sich, dass die Lotballs in der Mitte unter dem BGA als letzte aufschmolzen. Für eine prozesssichere Durchführung des Einlötprozesses genügt folglich dieser Messpunkt für die Einstellung eines Temperaturprofils. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass mit diesem Verfahren lediglich die Kontak-

tierung der Anschlussstellen überwacht werden konnte, jedoch nicht die auftretenden Maximaltemperaturen an der Oberseite des BGA-Gehäuses. Hierfür ist in jedem Fall eine zusätzliche Messung der dortigen Temperatur mit Hilfe eines Thermoelements notwendig.

Eine Alternative zur präsentierten punktuellen Messung durch zwei oder vier Lotballs stellte eine Messung durch alle Anschlussstrukturen dar. Dafür ist eine konventionelle Daisy-Chain-Struktur auf der Baugruppe notwendig, wie diese für eine Messung des Durchgangswiderstands erforderlich ist. Dabei lassen sich jedoch nicht Zeitpunkte beziehungsweise Zeitbereiche für das Aufschmelzen und Erstarren der einzelnen Lotballs bestimmen. Dennoch ist hier eine prinzipielle Aussage über den Kontaktierungsvorgang möglich und die Ermittlung der Zeit über der Liquidustemperatur.

6.3.2 Vergleich der Wärmeeinbringung unterschiedlicher Nacharbeitssysteme

Die am Markt verfügbaren Nacharbeitssysteme können bezüglich der Art und des Umfangs des Systemaufbaus und des Konzepts für die Prozesswärmeeinbringung unterteilt werden [38]. Mit einer Unterheizung wird dabei das Ziel verfolgt, eine gleichmäßige Erwärmung der gesamten Leiterplatte zu erzielen [2]. Bei bleifreien Lötprozessen auf der Basis von Zinn-Silber-Kupfer-Legierungen mit einem Schmelzbereich um die 220 °C wird dabei eine vollflächige Aufwärmung auf ca. 130 °C bis 150 °C angestrebt. Die Art der Wärmeeinbringung bei der Unterheizung, die je nach Systemausführung mit Heißgas oder Infrarotstrahlung realisiert werden kann, ist für den Einlötprozess von nachrangiger Bedeutung, da hierfür eine funktional unabhängige Oberheizung zum Einsatz gelangt.

Bei der Methode Konvektion mit Heißgas können die zwei Einflussgrößen, die Heizleistung und die daraus folgende Auslasstemperatur des bauteilspezifischen Werkzeugs sowie das Volumen des Gasstroms, geregelt werden. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist daneben noch die geometrische Gestaltung des Werkzeugs. Bei der Verwendung von Stickstoff als Heißgas in der Nacharbeit ergeben sich dieselben Vorteile wie bei dem Konvektionlöten im Referenzprozess, wie beispielsweise eine verbesserte Benetzung des Lotwerkstoffs [20]. Ein erhebliches Gefahrenpotential besteht allerdings darin, dass kleine Bauelemente in der unmittelbaren Umgebung des nachzuarbeitenden BGAs aufgrund eines starken Gasstroms aufschmelzen und weggeblasen werden können [119]. Dies trifft insbesondere für hoch miniaturisierte Baugruppen zu, bei denen Zweipoler nur wenige Millimeter von BGAs platziert werden.

Eine vergleichende Untersuchung wurde anhand des im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Versuchsaufbaus durchgeführt. Die Fragestellung, die mit dieser Untersuchung beantwortet werden sollte, war, ob sich zwei Nacharbeitssysteme, bei denen die Werkzeuge zur Verteilung des Heißgasstroms andersartig gestaltet sind, hinsichtlich des zeitlichen Verhaltens des Aufschmelzens und des Erstarrens unterscheiden. Als Alternativsystem wurde eine Nacharbeitungsstation der Fa. Metcal eingesetzt. Bei dem Durchlauf mit dem Ausgangsprofil (Profil 1), das mit der Verwendung von Thermoelementen ermittelt wurde, ergab sich, dass alle gemessenen Lotballs bereits 56 s vor dem Ende des letzten Heizabschnitts aufgeschmolzen waren. Aus diesem Grund wurde ein

weiteres Profils abgeleitet (Profil 2), das diesem Umstand Rechnung trug und um 45 s verkürzt wurde (Bild 76 oben links). Bei dem Vergleich der Temperaturprofile der beiden Systeme war zu beachten, dass es sich bei den angegebenen Temperaturwerten um systeminterne Messstellen handelte und sie daher nicht vergleichbar waren. Bei der nachfolgenden detaillierten Auswertung wurden die Vier-Ball-Messungen nicht dargestellt, da hierbei keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen wurden.

Der wesentliche Unterschied, im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen, hinsichtlich der Optimierung des Temperaturprofils war, dass bis zu dem Aufschmelzen der Lotballs beide Profile identisch waren (Bild 76 oben links). Dennoch konnte bei der Messung an der Ecke des BGAs (Bild 76 oben rechts) eine Verschiebung des Aufschmelzens um 8 s festgestellt werden (Tabelle 11). Die Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden, als mögliche Gründe wurden eine unterschiedliche Stand-Off-Höhe vor der Messung in Kombination mit einer Verkipfung sowie eine unterschiedliche Temperatur des BGAs zu Prozessbeginn in Erwägung gezogen.

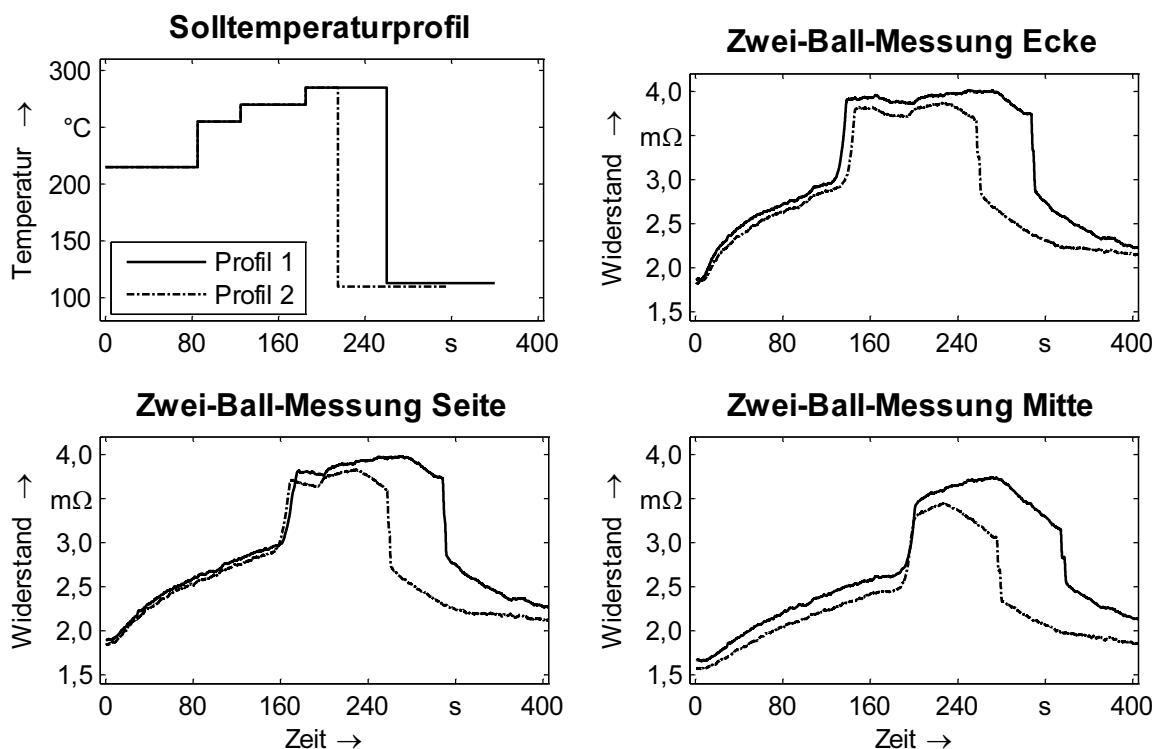


Bild 76: Vergleich des Temperatursprofils und des zeitlich optimierten Profils (oben links) und die zugehörigen Widerstandsverläufe in den Bereichen Ecke, Seite und Mitte für das Alternativsystem (Fa. Metcal)

Eine detaillierte Auswertung aller charakteristischen Zeitpunkte der Zwei-Ball-Messungen erfolgte analog zu der ersten Untersuchung (Tabelle 11). Die Verkürzung der Heizphase um 45 s resultierte in einer deutlichen Verkürzung der Liquidusphase, die an der Ecke und in der Mitte 58 s und an der Seite 46 s betrug. Die minimale Zeitdauer der schmelzflüssigen Phase konnte zu 77 s in der Mitte des BGAs bestimmt werden.

Die Analyse der Ergebnisse wurde mit einem direkten Vergleich der Widerstandsverläufe der beiden Nacharbeitssysteme abgeschlossen. Hierfür wurden die jeweils verbesserten Temperaturprofile herangezogen. Das Ziel, eine optimale Vergleichsdarstellung zu gewährleisten, wurde dadurch erreicht, dass eine zeitliche Normierung auf den Beginn der Kühlphasen in den jeweiligen Nacharbeitssystemen erfolgte (Bild 77). Bei beiden Systemen wurde das Optimierungsziel, den Beginn der Kühlphase unmittelbar nach dem vollständigen Aufschmelzen der zentralen Balls zu initiieren, auf unterschiedliche Weise erreicht. Sowohl eine Absenkungen der Solltemperaturen in der Heizphase, als auch das Verkürzen selbiger führte zum Ziel. Somit konnte die thermische Belastung auf den BGA erheblich reduziert werden.

Messort	Messart	Temperaturprofil	Zeitbereich Aufschmelzen	Zeitpunkte Erstarren	Zeitdauer über Liquidus
Ecke	Zwei-Ball	1	125,2 s - 138,0 s	307,2 s, 308,9 s	170,1 s
		2	133,4 s - 145,8 s	256,8 s, 259,2 s	112,2 s
Seite	Zwei-Ball	1	159,4 s - 175,1 s	308,0 s, 310,4 s	134,1 s
		2	154,6 s - 168,7 s	257,1 s, 259,5 s	89,6 s
Mitte	Zwei-Ball	1	182,8 s - 200,9 s	334,1 s, 337,0 s	134,7 s
		2	182,2 s - 199,8 s	275,8 s, 278,1 s	77,2 s

Tabelle 11: Übersicht der relevanten Zeitpunkte und -bereiche für das Aufschmelzen und Erstarren der Lotballs für die Zwei-Ball-Messungen (Nacharbeitssystem Fa. Metcal)

Ein weiteres, bemerkenswertes Ergebnis war, dass bei beiden Systemen die Zeitpunkte des Erstarrens der Balls, bezogen auf den Beginn der Kühlphase, fast identisch waren. Der maximale zeitliche Versatz bei dem Erstarren für das erste Nacharbeitssystem betrug 27 s, bei dem zweiten Nacharbeitssystem 21 s. Ein deutlicher Unterschied ergab sich bei dem zeitlichen Versatz des Aufschmelzens, der durch die Differenz der Zeitpunkte zwischen dem Ende der Aufschmelzphase der mittleren Balls und derjenigen an der Ecke beziehungsweise an der Seite bestimmt wurde. Bei dem Nacharbeitssystem 1 ergab sich eine Dauer von 34 s im Gegensatz zu dem Nacharbeitssystem 2 mit 54 s. Das Ziel, einen gleichmäßigen Ablauf des Umschmelzprozesses zu erreichen, konnte mit dem ersten System besser erreicht werden. Dieser Einlötprozess wurde mit einem höheren Temperaturgradienten in der Aufheizphase erreicht, so dass als weitere Optimierungsmaßnahme die Erreichung des maximal zulässigen Gradienten anzustreben ist.

Der Vergleich der beiden Nacharbeitssysteme ergab hinsichtlich des Aufschmelzen und des Erstarrens der Lotballs von BGA-Bauelementen prinzipiell ähnliche Ergebnisse. Bei dem Aufschmelzen resultierte eine längere Prozesszeit in einem deutlich größeren zeitlichen Versatz der einzelnen Messpunkte in der Reihenfolge Ecke, Seite und Mitte. Jedoch waren auch hier wieder die zentralen Balls diejenigen, die sich am letzten verflüs-

sigten. Bezüglich der Optimierung der Temperaturprofile kann nachfolgende Vorgehensweise empfohlen werden. Der Beginn der Kühlphase soll unter Berücksichtigung eines festzulegenden Zeitpuffers, beispielsweise 15 s, unmittelbar nach dem Aufschmelzen der zentralen Balls unter dem BGA erfolgen. Das Auftreten von diesbezüglichen zeitlichen Reserven kann genutzt werden, um entweder die thermische Belastung zu reduzieren (Verringerung der Maximaltemperatur und des Gradienten in der Aufheizphase) oder den Beginn der Kühlphase früher einzuleiten (ohne Auswirkung auf die Maximaltemperatur und den Gradienten in der Aufheizphase). Weiterhin kann eine Anhebung des Temperaturgradienten in der Aufheizphase dazu führen, dass das Umschmelzen der Anschlussstellen gleichmäßiger abläuft.

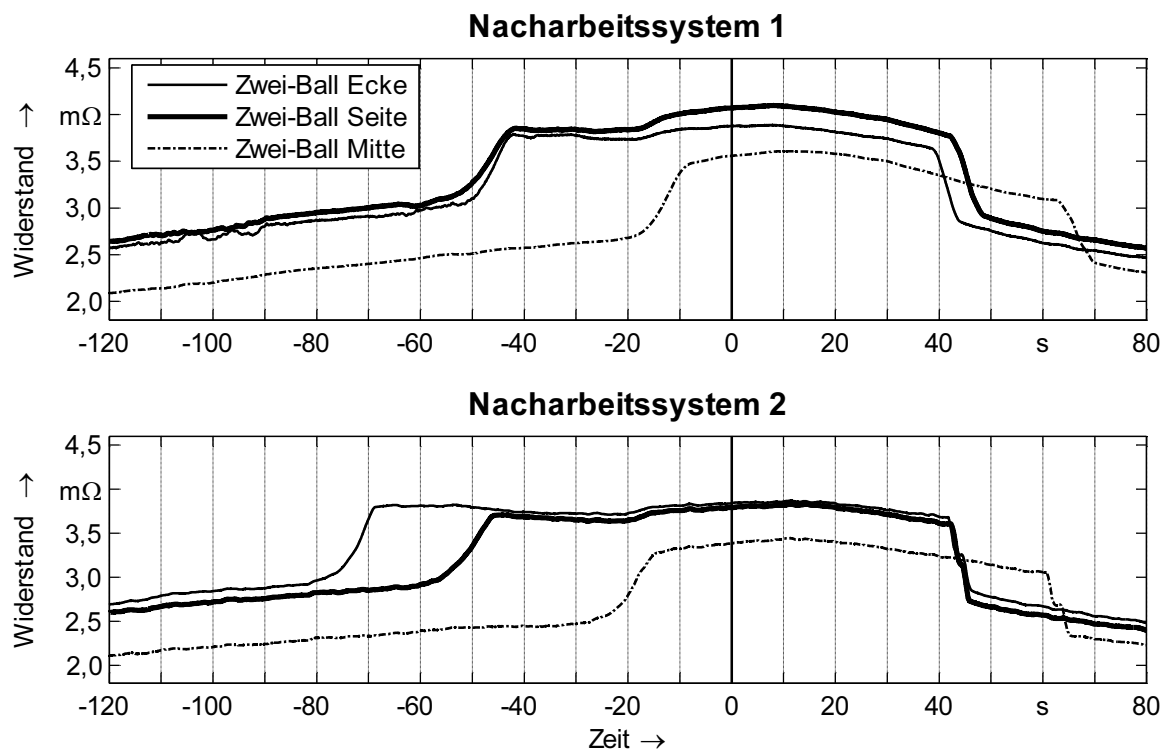


Bild 77: Widerstandsverläufe der Zwei-Ball-Messungen an den drei Messorten für die verbesserten Temperaturprofile der beiden Nacharbeitssysteme (Normierung der Zeitachse auf das Ende der Heizphase)

6.4 Einsatzpotentiale des Messverfahrens

Das neue Messverfahren für die Bestimmung der Phasenübergänge bewährte sich mit der Verwendung von Testschaltungsträgern und dem Einsatz von Daisy-Chain-Bauelementen. Die Durchführung und die Auswertung der Messungen erforderten einerseits hohen Aufwand, aber andererseits konnte ein erheblicher Erkenntnisgewinn bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Phasenübergänge während der Lötprozesse erlangt werden. Die verbleibende Fragestellung war, wie das Verfahren in die Praxis übertragen werden kann. Im Vordergrund standen dabei die möglichen Anwendungen für

Area-Array-Bauelemente auf funktionsfähigen Baugruppen. Neben dem Schwerpunkt der Nacharbeit sollte ebenso der Referenzprozess betrachtet werden.

6.4.1 Nacharbeit von BGA-Bauelementen

Die verfügbaren Testbauelemente mit Daisy-Chain-Kontaktierung eignen sich optimal für die Anwendung des elektrischen Messverfahrens zur Bestimmung der Phasenübergänge, mit dem Nachteil, dass sich der innere Aufbau gegenüber einem funktionalen Bauelement erheblich unterscheiden kann, trotz identischer Abmaße und Gehäusematerialien. Weiterhin erforderte der Einsatz von Daisy-Chain-Bauelementen entsprechende Testschaltungsträger, die sich ebenfalls von den funktionalen Baugruppen bezüglich des Aufbaus, insbesondere von massehaltigen Kupferebenen, unterscheiden können. Die Übertragung von Temperaturprofilen, die mit Testbauelementen oder Testbaugruppen gewonnen werden, auf reale Baugruppen kann aus diesen Gründen zu nicht optimalen oder im ungünstigsten Fall zu unzureichenden Lötstellen führen. Bei der Analyse dieser Problemstellung ergaben sich in der Kombination mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Messverfahren drei Lösungskonzepte, die das Ziel einer verbesserten Prozesseinstellung für funktionale Baugruppen verfolgten (Tabelle 12).

Konzept	Benötigte Bauelemente	Anforderungen an Schaltungsträger
(1) Modifizierter Oberflächenlayer	„Standard“ Daisy-Chain-BGA	Baugruppe mit angepasstem Layout für BGA auf dem obersten Layer
(2) BGAs mit intern kontaktierten Anschlüssen	Modifizierte, funktionale BGAs	Modifizierte Baugruppe
(3) Einsatz von Foliensubstraten	„Standard“ Daisy-Chain-BGA	Unveränderte Baugruppe, sowie Foliensubstrat mit Daisy-Chain-Strukturierung

Tabelle 12: Lösungskonzepte zur Ermittlung optimaler Nacharbeitsprozessparameter unter Verwendung des elektrischen Messverfahrens und die abgeleiteten Anforderungen an die benötigten Bauelemente und Schaltungsträger

Die Basis für das erste Konzept bildet die funktionale Baugruppe, auf deren Oberseite sich der BGA befindet, der nachzuarbeiten ist. Die Baugruppe wird auf dem obersten Layer so verändert, dass die funktionale Strukturierung der Anschlussflächen für das BGA so angepasst wird, dass benachbarte Balls oder auch alle Balls (Standard Daisy-Chain-Layout) elektrisch während des Nacharbeitsprozesses überwacht werden können (Bild 78). Idealerweise wird die Strukturierung so ausgeführt, dass die Leiterzüge für die Messkanäle an einem Stecker enden, der in irgendeiner Form auf der Baugruppe vorhanden ist. Dabei ist anzustreben, dass, insbesondere mit dem Einsatz eines Nacharbeitssystems mit der Wärmeübertragung mittels Heißgas, der Abstand zwischen BGA und Anschlussstecker möglichst groß realisiert wird.

Der Aufwand besteht bei diesem Konzept in der Anfertigung von zusätzlichen Schaltungsträgern, die für die Temperaturprofilierung benötigt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass mit jedem verfügbaren Nacharbeitssystem, mit dem ein Austausch des BGAs in Frage kommt, eine eigene Profilierung durchgeführt werden muss. Ein Synergiepotential kann genutzt werden, falls im Rahmen einer Produktqualifizierung die Verbindungstechnik des BGAs auf der Baugruppe untersucht werden soll. Hier kann eine durchgehende Daisy-Chain-Struktur realisiert werden, anhand derer Offline- oder Online-Messungen während einer Temperaturlagerung oder Temperaturschocklagerung einfach ermöglicht werden.

Testbaugruppe mit modifiziertem Oberflächen-Layer

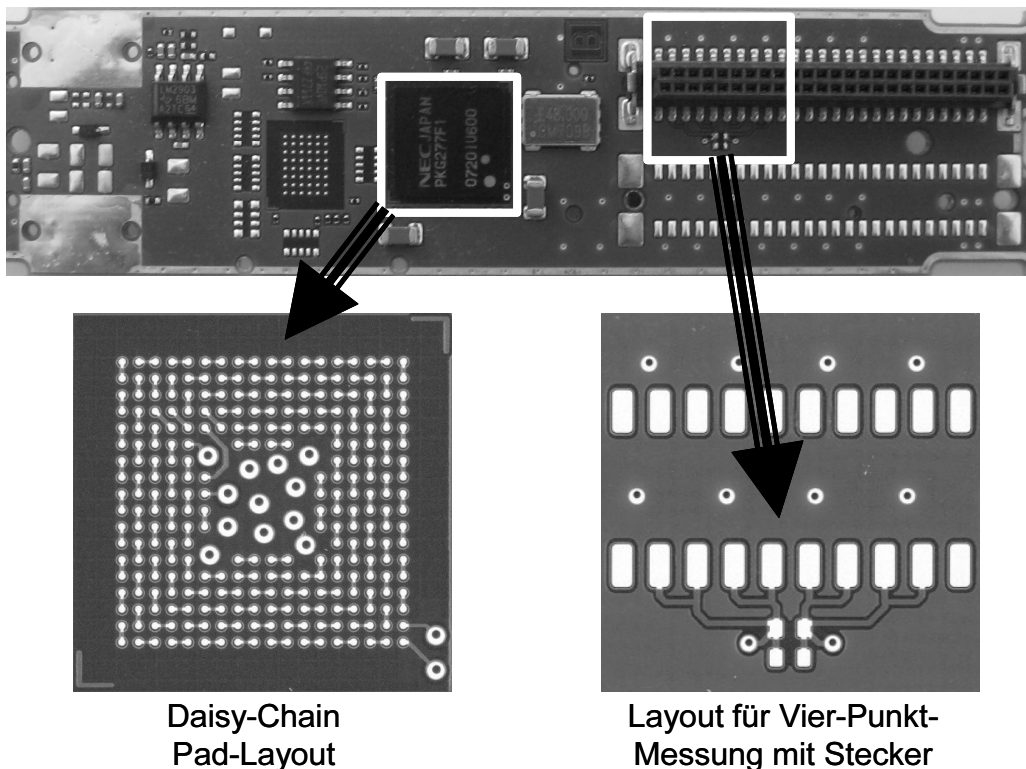


Bild 78: Beispiel für ein modifiziertes Layout auf dem obersten Layer einer Funktionsbaugruppe

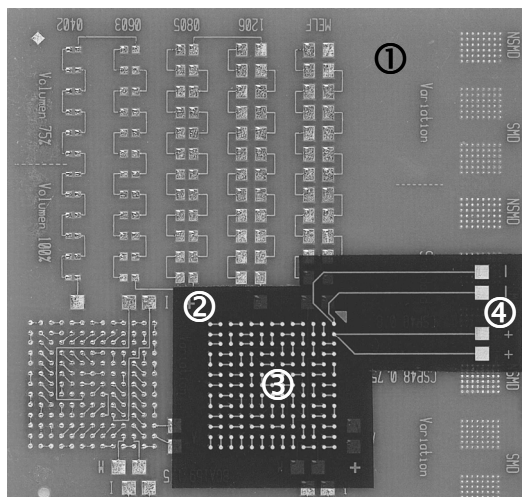
Das zweite Konzept nutzt die teilweise vorhandene Eigenschaft bei BGAs, dass einzelne Anschlussstellen funktionell nicht genutzt werden. Mit einer internen Verbindung zweier benachbarter Anschlüsse kann ein Messkanal für das elektrische Messverfahren geschaffen werden. Am Beispiel des Intel Prozessors PXA270 lässt sich eine Variante des Konzepts aufzeigen. Bei diesem BGA sind zentral 36 sogenannte „Center Ground Balls“ vorhanden, die mit dem Ground-Layer der Leiterplatte verbunden werden sollen [81]. Eine Modifikation dieses Bausteins in der Weise, dass zwei dieser Balls intern verbunden werden, ermöglicht die Realisierung eines Messkanals. Eine Alternative besteht in einer Erweiterung des BGAs mit paarweisen zusätzlichen Lotballs in dem Raum zwischen den Peripheriekontakten und der zentralen Ballmatrix.

Die Nutzung derartiger Messkanäle setzt voraus, dass das Layout der funktionalen Baugruppe in geeigneter Weise modifiziert wird. Dazu müssen von den zu betrachten-

den Anschlussflächen zusätzliche Leiterbahnen an ebenfalls zusätzliche Kontaktpads geführt werden. Ebenso wie bei dem ersten Konzept ist hier die Realisierung mit einem Stecker ideal. Der Vorteil dieses Konzepts besteht darin, dass die modifizierte Baugruppe auch für den Aufbau des eigentlichen Produkts genutzt werden kann. Der Aufwand hierfür ist als gering zu bewerten. Weiterhin ermöglicht diese Variante eine Kontrolle aller Nacharbeitsprozesse und geht damit weit über das übliche Vorgehen der Prozesseinstellung und anschließender Anwendung der ermittelten Parameter hinaus.

Dem letzten Konzept liegt ein ganz anderes Vorgehen zugrunde. Dabei wird die unveränderte Baugruppe zusammen mit Daisy-Chain-Testbauelementen verwendet. Zusätzlich wird ein ausreichend temperaturbeständiges Foliensubstrat eingesetzt, das mit einer Daisy-Chain-Teststruktur und den zugehörigen Leiterzügen für den Anschluss an die Messeinrichtung versehen ist (Bild 79) [136]. Diese Folienschaltung, die auf der Unterseite nicht strukturiert ist und somit elektrisch isolierend wirkt, wird exakt über den Anschlussflächen der Baugruppe ausreichend fixiert. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Prozessparameter anhand des Einlötprozesses für den Daisy-Chain-BGA auf der Folienschaltung.

Foliensubstrat zur Ermittlung der Prozessparameter



Kombination von Funktionsbaugruppe mit Daisy-Chain-BGA

- ① Nachzuarbeitende Baugruppe
- ② Foliensubstrat
- ③ Strukturierung für Daisy-Chain-BGA
- ④ Anschlussflächen für Vierpunkt-Messung

Bild 79: Einsatz eines strukturierten Foliensubstrats für die Ermittlung der Prozessparameter für beliebig strukturierte Baugruppen

Entscheidend bei diesem Konzept ist, dass der Einfluss der zusätzlichen Folie mit den wenigen Kupferflächen auf das Umschmelzen der Lotballs zu vernachlässigen ist. Die Herausforderung bei diesem Verfahren liegt in der sicheren Befestigung der Folie auf der Baugruppe bei Prozesstemperaturen von ca. 250 °C bei dem Einsatz von üblichen bleifreien Lotlegierungen.

6.4.2 Anwendung im Referenzprozess

Die Untersuchungen für das Messverfahren wurden abgeschlossen mit einer Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten im Referenzprozess. Der Nacharbeitsprozess bot erleichterte Bedingungen, da diese ortsfest mit einer lokalen Wärmeeinwirkung abliefen. Im Gegensatz hierzu erfordert die Messung von Spannungen in einer Reflowlötanlage

erheblich mehr Aufwand. Eine erste Möglichkeit besteht darin, dass hochtemperaturbeständige Messleitungen aus der Anlage herausgeführt werden. Ein wesentlicher Nachteil ist dabei die Entfernung zwischen Messobjekt und Messeinrichtung, die mit Kabeln von bis zu zehn Metern Länge verbunden sind. Die zweite Möglichkeit nutzt für die Messdatenerfassung nicht konventionelle Module zur Erfassung von analogen Spannungen, sondern einen vorhandenen Temperaturlogger, der für die Messung in einer Lötanlage konzipiert ist [90]. Bei den üblicherweise verwendeten Thermoelementen vom Typ „K“ beträgt die abfallende Thermospannung bei 0 °C 0 mV und bei 1.300 °C 52,41 mV. Eine Spannungsmessung kann dadurch erzielt werden, dass die ausgegebenen Temperaturen mit Hilfe von Wertetabellen in Spannungen zurückgerechnet werden [83]. Bei dieser Vorgehensweise ist sicherzustellen, dass die auftretenden Spannungen über dem Messobjekt in der Peakzone der Lötanlage den Messbereich nicht überschreiten würden. Weiterhin muss der Vorwiderstand (siehe Bild 71) so gewählt werden, dass die abfallende Spannung am heißesten Punkt einen Wert von rund 50 mV nicht überschreiten würde. Auf der anderen Seite wurde angestrebt, den Messbereich so gut wie möglich auszunutzen. Parallel zu der Spannungsmessung erfolgte bei einer praktischen Messung eine Aufzeichnung der Temperatur an der Oberseite des Bauelements mit einem Thermoelement. Der Versuch wurde mit einem CSP46 durchgeführt, der auch im Abschnitt 4.2 verwendet wurde (Bild 45 und Bild 47 rechts). Da der Ausgangswiderstand bei ca. 7 Ω lag, war eine Widerstandserhöhung durch den Übergang von der festen in die flüssige Phase zu vernachlässigen. Das vorrangige Ziel des Versuchs war es, über eine Rückrechnung des gemessenen Widerstands in eine Temperatur nach (Gl. 16) die zeitliche Dauer über Liquidus zu ermitteln. Die so ermittelten Temperaturverläufe wurden in Bild 80 aufgetragen.

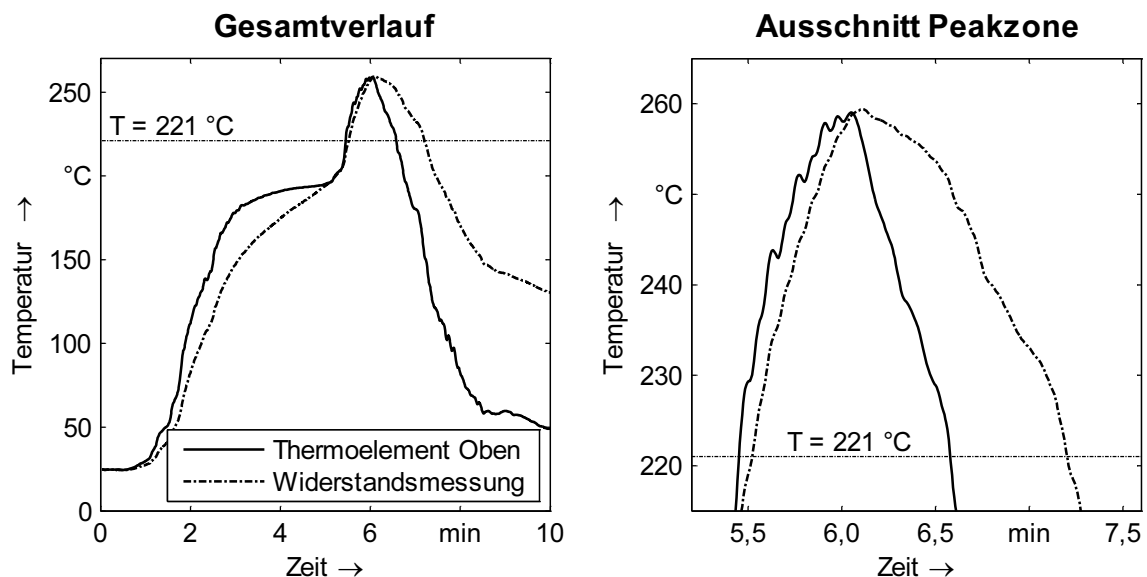


Bild 80: Vergleich der Temperaturverläufe eines Thermoelements (Sensorposition oben) und einer aus dem Durchgangswiderstand zurückgerechneten Temperatur (Daisy-Chain Struktur)

Ein Verweilen der Testbaugruppe vor dem Durchlauf durch die Lötanlage gewährleistete, dass beide Kurven mit demselben Temperaturniveau begannen. Dem Gesamtver-

lauf (Bild 80 links) konnte deutlich entnommen werden, wie der Temperaturanstieg an den Anschlussstrukturen derjenigen auf der Oberseite des CSP nachlief. Daneben zeigte die Auswertung für die Peakzone (Bild 80 rechts), dass nach dem Beginn der Kühlphase die Lotballs unter dem CSP46 signifikant langsamer abkühlen als die Oberseite des Bauelements. Die Zeitdauern, bei denen die Temperaturen über 221 °C lagen, betrugen für den Sensor auf der Oberseite 67,5 s und aus der Berechnung des Widerstandswerts 100,6 s. Somit konnte nachgewiesen werden, dass auch im Referenzprozess die Zeiten über Liquidus höher waren als diejenigen, die durch Messungen mit Thermoelementen ermittelt wurden. Aus den Versuchsergebnissen konnte abgeleitet werden, dass im Referenzprozess mit Temperaturprofilen gearbeitet werden kann, die aufgrund von Messungen mit Thermoelementen als grenzwertig erscheinen, aber dennoch die Ausbildung von zuverlässigen Lötstellen gewährleisten.

6.5 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Messverfahren ließen sich gegenüber der Temperaturerfassung mit Thermoelementen ergänzende Prozessinformationen gewinnen. Der Übergang von der festen in die flüssige Phase der Lotlegierung und umgekehrt konnte exakt erfasst werden. Bei den untersuchten BGA-Bauelementen mit verdeckten Anschlussstrukturen konnte eindrucksvoll nachgewiesen werden, dass die beiden Teilprozesse Aufschmelzen und Erstarren der Lotballs völlig unterschiedlich abliefen. Das Aufschmelzen war ein kontinuierlicher Ablauf, der für die untersuchten bleifreien Anschlusslegierungen ca. 7 s bis 10 s benötigte. Die äußeren Balls schmolzen dabei wesentlich früher als die zentralen Balls auf. Im Gegensatz hierzu erfolgte das Erstarren der Balls in einem Bruchteil einer Sekunde. Dies führte zu den charakteristischen Stufen in den Widerstandsverläufen. Aus diesen Erkenntnissen ließen sich Empfehlungen für die Optimierung von Nacharbeitsprofilen ableiten. Der zentrale Aspekt war hierbei, dass die mittleren Lotballs als letzte aufschmolzen. Die Aufgabe in der Temperaturprofilierung besteht nun darin, die thermische Belastung so zu reduzieren, dass die Heizphase unmittelbar, unter Berücksichtigung einer zeitlichen Reserve, nach der Verflüssigung der zentralen Anschlussstrukturen endet. Dies kann sowohl mit einer Absenkung der systeminternen Solltemperaturen als auch mit einer zeitlichen Verkürzung der Heizzonen erfolgen. Die Messungen zeigten weiterhin, dass auch bei einem frühen Beginn der Kühlphase die Lotballs ausreichend lange schmelzflüssig zur Ausbildung einer Lotstelle mit guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften blieben.

Abschließend wurden mehrere Konzepte für die Nutzung des neuen Messverfahrens zur Unterstützung der Temperaturprofilierung bei BGA-Nacharbeiten präsentiert. Die innovativste Alternative lag in der Kombination von Daisy-Chain-Bauelementen und funktionalen Baugruppen, bei der ein geeignet strukturiertes Foliensubstrat auf die Anschlussflächen des BGAs platziert wird. Eine direkte Nutzung des Messverfahrens bei funktionalen Nacharbeiten ist jedoch nur bei gleichzeitiger Anpassung von Bauelementen und Schaltungsträgern möglich, wie dies beispielsweise bei dem Prüfverfahren Boundary-Scan nach dem JTAG-Standard verwirklicht wurde [10].

7 Nacharbeit von Bauelementen auf Folienschaltungen

Der Einsatz von flexiblen Schaltungsträgern eröffnet neue Potentiale für den Einsatz von elektronischen Baugruppen. Je nach den Anforderungen an das Endprodukt können die spezifischen Vorteile gegenüber starren Substraten zum Tragen kommen. Insbesondere wurden zwei Bereiche als Treiber für den Einsatz biegeschlaffer Schaltungen identifiziert [108]. Dies sind auf der einen Seite Anwendungen, die eine stetig kleiner werdende Größe ausweisen, wie beispielsweise Ultraschallsensoren in medizinischen Geräten oder Anzeigeinstrumente in Automobilen. Auf der anderen Seite erfordern Anwendungen in der Informationstechnologie extrem hohe Geschwindigkeiten, die bei Festplattenköpfen und DVD-Lasereinheiten mit flexiblen Schaltungsträgern realisiert werden. Einige signifikante Vorteile von Folienschaltungen sind die Aspekte Gewichtseinsparung, Biegeweichselfestigkeit und Vibrationsbeständigkeit [136].

Aktuelle Entwicklungen greifen diese Potentiale von strukturierbaren Folienmaterialien auf, mit dem Ziel eine möglichst große Bandbreite an Bauelementformen prozesssicher zu verarbeiten [12]. Mit der Entwicklung einer hierfür geeigneten Produktionslinie für die Herstellung von Folienschaltungen am Lehrstuhl FAPS können mit entsprechenden Produkten aufgrund ihrer Biegsamkeit bisher unzugängliche Einbauräume erschlossen werden (Bild 81) [11][15].

Produktionslinie



Folientestschaltung

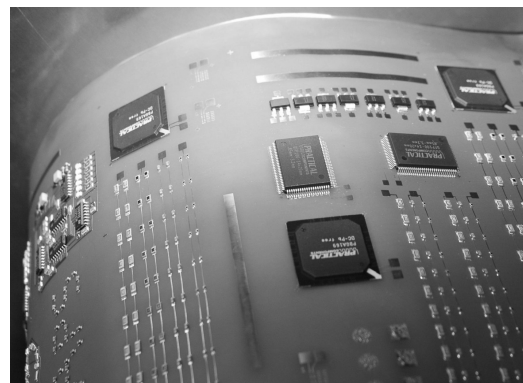


Bild 81: Modifizierte SMT-Linie (links) für den Aufbau von Folienschaltungen (rechts) am Lehrstuhl FAPS

Auf dieser Anlage können Substratmaterialien für unterschiedlichste Anforderungen bezüglich Temperaturbeständigkeit, Metallisierbarkeit und Lötbeständigkeit verarbeitet werden [29][136]. Dies können einerseits sogenannte Low-Cost Anwendungen sein, bei denen beispielsweise PEN (Polyethylenaphthalat) als Folienmaterial zum Einsatz kommt, das sich mit Zinn-Wismut Lotlegierungen (Schmelzpunkt Sn42Bi58: 138 °C) bleifrei verarbeiten lässt [100]. Auf der anderen Seite können auch Produkte mit hochtemperaturbeständige Materialien, wie beispielsweise Polyimide, mit Standard Bleifrei-Legierungen (Zinn-Silber-Kupfer, z. B. Sn96,5Ag3Cu0,5) ohne Änderungen in derselben Anlage prozesssicher hergestellt werden.

Mit der Verfügbarkeit einer Produktionslinie für die Herstellung von Folienschaltungen mit einem breiten Spektrum von Bauelementen unterschiedlichster Geometrien wird in

diesem Kapitel die Fragestellung untersucht, wie die Nacharbeit von Bauelementen auf Foliensubstraten idealerweise erfolgen kann. Im Mittelpunkt der Analysen und Untersuchungen stehen dabei wiederum BGA-Bauelemente, die im vorgegangenen Kapitel verwendet wurden, und einseitige Folienschaltungen, wie sie auf der in Bild 81 gezeigten Produktionslinie verarbeitet werden.

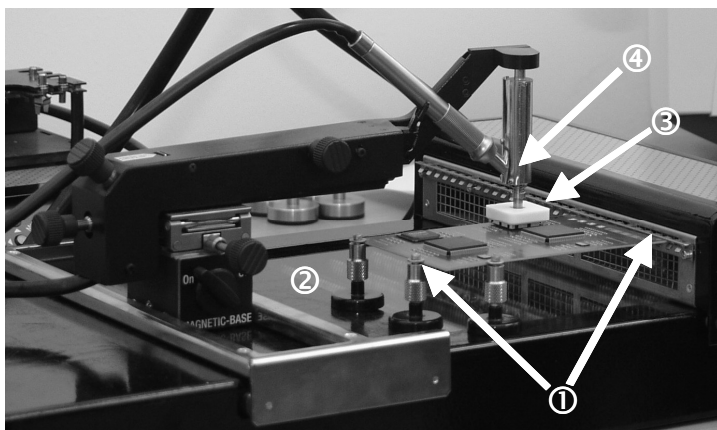
7.1 Analyse und Konzeptentwicklung für die Nacharbeit auf biegeschlaffen Substraten

Die Foliensubstrate unterscheiden sich von starren Schaltungsträgern durch zwei wesentliche Eigenschaften, die erhebliche Auswirkungen auf die Anlagentechnik und die Prozessführungen, sowohl im Referenzprozess als im Nacharbeitsprozess, besitzen. Neben der Biegeschlaffheit ist dies die Dicke der verwendeten Folien, die bei 50 µm beginnt. Aus diesen Punkten ergeben sich die beiden Fragestellungen, inwieweit bestehende Nacharbeitssystemkonzepte für die Verarbeitung von Folienschaltungen geeignet sind und welche funktionalen Anpassungen beziehungsweise Änderungen eine optimale Nacharbeit ermöglichen würden [116].

7.1.1 Analyse bestehender Nacharbeitssysteme für starre Baugruppen

In einem ersten Schritt wurden die charakteristischen Eigenschaften eines bestehenden Nacharbeitssystems bezüglich der Handhabung von Schaltungsträgern, der Prozesswärmeübertragung und der Prozessführung analysiert. Dabei wurde von einer typischen BGA-Nacharbeit ausgegangen, wie sie in Bild 82 dargestellt ist.

Systemaufbau eines konventionellen Nacharbeitssystems



Charakteristische Aspekte

- ① Fixierung der Baugruppe
- ② Unterheizung (Infrarot)
- ③ Spezifisches Luftauslasswerkzeug für die Oberheizung
- ④ Lage des internen Temperatursensors

Bild 82: Nacharbeitssystem für die Verarbeitung von starren Baugruppen

Die vier charakteristischen Aspekte bei der Verarbeitung von starren Baugruppen wurden in einem nächsten Schritt dahin gehend analysiert, ob und welche besonderen Eigenschaften von Folienschaltungen neue oder angepasste Systemlösungen erfordern (Tabelle 13).

Aspekt	Merkmale bestehender Nacharbeitssysteme	Offene Fragen bei der Verarbeitung von Folienschaltungen
①	Fixierung der starren Baugruppen mittels Klemmvorrichtungen	Verarbeitung der biegeschlaffen Folien-schaltungsträger ?
②	Großflächige Vorwärmung durch eine Unterheizung (Heißluft oder Infrarot)	Integration der Vorwärmung in eine neue Systemlösung ?
③	Einbringung der lokalen Prozesswärme von oben (Heißgas oder Infrarot)	Alternative Prozesswärmeführung durch das dünnere Foliensubstrat ?
④	Prozessüberwachung und -regelung mit Sensoren in der Wärmezuführung (Heißgas) und Thermoelementen auf der Baugruppe	Integration zusätzlicher Temperatursensoren in eine neue Systemlösung ?

Tabelle 13: Gegenüberstellung von Systemeigenschaften bestehender Nacharbeitssysteme und Fragestellungen für die Behandlung von Folienschaltungen

Aus der Analyse ergaben sich die drei Schwerpunkte für die Entwicklung von neuen Systemkonzepten, die in geeigneter Weise Berücksichtigung finden konnten. Diese waren die Fixierung der Folienschaltungen, die Einbringung der Wärme für die notwendigen Aus- und Einlötprozesse und die Integration von Temperatursensoren für die Überwachung und Regelung des Nacharbeitsprozesses.

7.1.2 Konzeptentwicklung einer integrierten Handhabungsvorrichtung

Der erste Punkt, der eingehend betrachtet wurde, war die Fixierung der Folienschaltungen. Dies war unabhängig davon, ob ein Heißgas- oder ein Infrarotsystem zum Einsatz kommen würde. Bei der Heißgasvariante ist es unumgänglich, die biegeschlaffe Baugruppe ortsfest zu fixieren, da bei aktuellen Nacharbeitsanlagen Gasvolumina von deutlich über 20 Liter pro Minute auf ein BGA einwirken können. Aber auch bei einer Wärmeübertragung mit Infrarotstrahlung kann eine Verschiebung während des Aufheizens und des Abkühlens des Foliensubstrats aufgrund von Ausdehnungsvorgängen nicht ausgeschlossen werden. Eine erste Möglichkeit der Fixierung besteht darin, dass das Substrat auf eine unstrukturierte FR4-Platte aufgebracht wird und mittels Kaptonband oder einer zu definierenden Klemmvorrichtung befestigt wird. Anschließend kann dieser Verbund konventionell auf den Nacharbeitssystemen verarbeitet werden. Dabei wirkt nachteilig, dass keine vollflächige Fixierung, insbesondere im Bereich um das nachzuarbeitende Bauelement, erfolgt. Bei dem zweiten Lösungsweg wird der Gesichtspunkt der Ansaugung des Folienschaltungsträgers aus der Produktionslinie für Folienschaltungen aufgegriffen. Diese Alternative wird in der nachfolgenden Konzeptentwicklung eingehend betrachtet, da im Gegensatz zu der ersten Alternative grundsätzlich neue Aspekte berücksichtigt werden.

Die vorangegangenen Überlegungen resultieren darin, dass für die Fixierung der Folienschaltung eine Handhabungsvorrichtung zu konzipieren ist. Dazu werden auf der planaren Oberfläche vertikale Bohrungen mit geringem Durchmesser benötigt, die im Inneren so zusammengeführt wurden, dass ein Anschluss für eine Unterdruckpumpe

ermöglicht wird. Bereits für diese Anforderung ergibt sich die Notwendigkeit eines komplex strukturierten Funktionsbauteils, das ein definiertes Hohlraumsystem beinhaltet. Mit einer flachen, quaderförmigen Realisierung mit den Abmaßen einer konventionellen Leiterplatte ergibt sich Möglichkeit, eine solche Vorrichtung in bestehende Nacharbeitungssysteme zu integrieren (Bild 83). Mit diesem ersten Konzept konnte bereits mit einem einfachen Testaufbau ein erfolgreicher Einlötprozess für ein BGA durchgeführt werden.

Lösungskonzepte und -potentiale für die Nacharbeit von Folienschaltungen

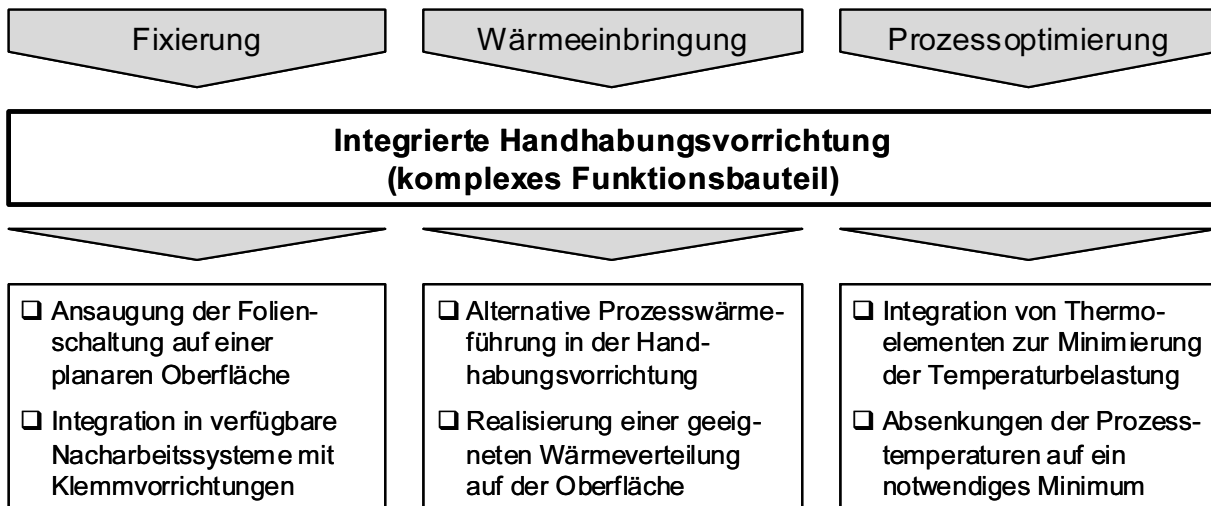


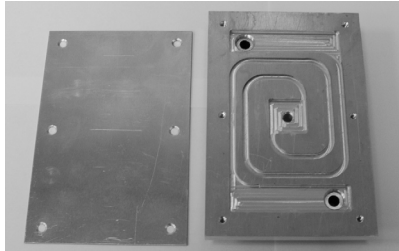
Bild 83: Integration funktionaler Aspekte in eine Handhabungsvorrichtung und erschließbare Potentiale für die Verarbeitung biegeschlaffer Substrate

Der zweite Aspekt der Wärmeeinbringung wird mit dem ersten auf derartige Weise verknüpft, dass die Prozesswärme nicht von einer Ober- und Unterheizung erfolgt, sondern durch die Handhabungsvorrichtung selbst. Der zentrale Gesichtspunkt ist dabei, eine Wärmeverteilung auf der planaren Oberfläche so zu realisieren, dass in der Mitte, wo sich der nachzuarbeitenden BGA befinden soll, eine Temperatur über dem Schmelzpunkt des Lots wird. Weiterhin soll im Umfeld eine erhebliche Erwärmung stattfinden, mit dem Ziel, den auftretenden Temperaturgradienten zu minimieren. Das entwickelte Lösungskonzept zeichnete sich dadurch aus, dass Heißluft zentral von unten in die Mitte des Funktionsbauteils eingebracht wird und so den Bereich unter dem BGA erwärmt. Die Abfuhr der Prozesswärme erfolgte mittels eines oberflächennahen Kanalsystems, das schneckenförmig von innen nach außen strukturiert ist. Diese Form sollte sicherstellen, dass sich radial um den Mittelpunkt ein gleichmäßiges Temperaturgefälle einstellen sollte. Mit Hilfe eines Testaufbaus wurde dieses Konzept ohne Berücksichtigung der weiteren Aspekte verifiziert (Bild 84).

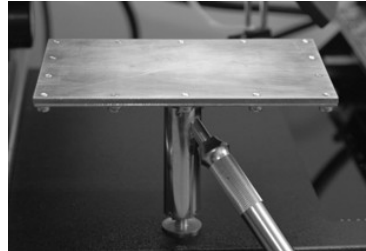
Mit dem Aufbau konnten in der Mitte der Handhabungsvorrichtung maximal circa 200 °C erreicht werden, die für einen bleifreien Prozess nicht ausreichten. Eine Erhöhung der Heizleistung in der Luftzufuhr erbrachte keine signifikante Temperaturerhöhung, da eine erhebliche Wärmeabfuhr über die große Oberfläche der Testvorrichtung erfolgte. In den Randbereichen konnten Temperaturen von rund 120 °C gemessen werden, die somit in der Größenordnung lagen, wie dies mit einer Unterheizung in konventionellen Nacharbeitungssystemen erzielt werden soll. Weiterhin konnte nachgewiesen

werden, dass sich die angestrebte radiale Temperaturabnahme einstellte. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Voruntersuchung bestanden darin, dass einerseits die Größe der metallischen Oberfläche deutlich verringert werden musste und andererseits die Gesamtmasse des Aufbaus zu reduzieren ist, was mit einem möglichst dünnen Funktionsbauteil zu realisieren war.

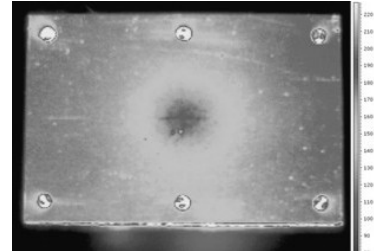
Testaufbau Wärmeeinbringung



Strukturiertes Kanalsystem
mit zentralem Einlass und
äußeren Auslässen



Einbringung der Prozess-
wärme mittels Heißluftgriffel
zentral von unten



Thermographieaufnahme für
die Analyse der Wärmever-
teilung auf der Oberfläche

Bild 84: Vorversuchsaufbau für die Analyse der Temperaturverteilung bei der Prozesswärmeführung in der Handhabungsvorrichtung

Der letzte zu berücksichtigende Aspekt bestand in der Integration eines Temperatursensors in die Handhabungsvorrichtung, der für eine optimierte Prozessüberwachung und -regelung genutzt werden kann. Der bei Heißgassystemen verfügbare Sensor ist in der Gasstromzuführung platziert, mit der Folge, dass die dort gemessenen Temperaturen bis zu 100 K über den am Bauelement wirkenden Temperaturen liegen. Das Ziel besteht darin, den Sensor so zu integrieren, dass die Temperaturen an den Anschlussstrukturen, insbesondere bei BGA Komponenten, möglichst genau abgebildet werden. Mit einer solchen Maßnahme kann die Temperaturbelastung auf das Bauelement und die gesamte Folienschaltung minimiert werden. Als optimaler Einbauort wurde die Stelle oberflächennah direkt unter der Mitte der Handhabungsvorrichtung identifiziert. Eine wesentliche Nebenbedingung war dabei, dass der Sensor nicht dem Luftstrom ausgesetzt sein würde, da dies zu erheblichen Abweichungen und nicht reproduzierbaren Messungen führen könnte. An einem solchen Messort soll die Oberflächentemperatur des Funktionsbauteils mit geringen Abweichungen erfasst werden, die, aufgrund der geringen thermischen Masse der Folien, auch der Temperatur an den Lotballs des BGAs entsprechen sollte.

Hinsichtlich der Prozessoptimierung wird ein weiterer positiver Effekt erwartet, der in einer weitgehend homogenen Temperaturverteilung unter dem BGA liegt, da der metallische Aufbau zu einer Vergleichmäßigung der Oberflächentemperatur in dem Bereich der Anschlussstrukturen des BGAs führen sollte.

7.2 Aufbaualternativen für die Nacharbeit von BGA-Bauelementen

Eine vollintegrierte Systemlösung, die alle in dem vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Aspekte beinhaltet, erfordert ein im Inneren komplex strukturiertes Funktionsbauteil. Eine der bei der Konzeptentwicklung nicht explizit genannten Anforderungen

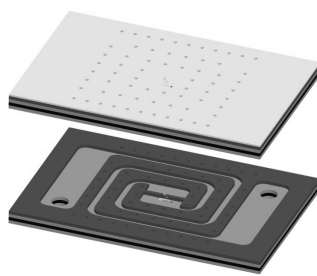
an die Handhabungsvorrichtung war eine Dauergebrauchstemperaturbeständigkeit von mindestens 250 °C, die für bleifreie Lötprozesse mit Zinn-Silber-Kupfer Legierungen erforderlich ist. Daraus leitet sich die Notwendigkeit eines metallischen Aufbaus ab. Dieser Gesichtspunkt ist bei der Auswahl des Herstellungsverfahrens von hoher Bedeutung, da die Potentiale der generativen Verfahren für Werkstücke, den Rapid-Technologien, besonders berücksichtigt werden [31]. In einem ersten Schritt wurden mehrere Rapid-Verfahren hinsichtlich der Eignung für den Aufbau eines Funktionsbauteils analysiert. Anschließend wird nach dem Aufbau einer vollintegrierten Handhabungsvorrichtung eine weitere teilintegrierte Systemlösung entwickelt, die eine Erweiterung eines konventionellen Nacharbeitssystems darstellt.

7.2.1 Einsatz von Rapid-Technologien

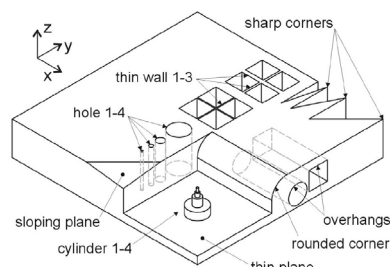
Die Herstellung von Werkstücken erfolgt üblicherweise mit abtragenden Verfahren, wie beispielsweise Bohren oder Fräsen. Im Gegensatz hierzu bieten die Rapid-Technologien einen gänzlich anderen Weg, da hier die Bauteile schichtweise aus pulverförmigem Ausgangsmaterial aufgebaut werden. Somit kann ein dreidimensionales Bauteil stufenweise hergestellt werden und letztendlich wieder auf ein zweidimensionales Problem reduziert werden [139]. In der Anfangsphase der Etablierung von Rapid-Verfahren wurden im Wesentlichen Kunststoffteile aufgebaut, die die Anforderung bezüglich der Temperaturfestigkeit für die hier vorliegende Problemstellung nicht erfüllten. Mit der Entwicklung von Rapid-Verfahren für die Herstellung von metallischen Bauteilen änderte sich die Situation grundlegend [109].

Die Analyse für ein geeignetes Rapid-Verfahren erfolgte anhand eines CAD-Modells, das die wichtigsten funktionalen Aspekte der zu entwickelnden Handhabungsvorrichtung einschloss (Bild 85 links). Die vergleichende Bewertung erfolgte für insgesamt vier Herstellungsverfahren. Dies waren Laserformen (LF), direktes und indirektes Metalllasersintern (DMLS, IMLS) sowie Metallfolien LOM (Laminated Object Manufacturing) (MF-LOM) [139]. Die Verfahren wiesen unterschiedliche Stärken und Schwächen auf, die im Rahmen von Benchmark-Untersuchungen anhand eines komplexen Testkörpers (Bild 85 Mitte und rechts) für die ersten drei Verfahren eingehend ausgewertet wurden [57]. Das Verfahren Metallfolien LOM wurde in weiteren Untersuchungen analysiert und bewertet [123]. Die Besonderheit hierbei ist, dass einzelne Metallfolien mit einer typischen Dicke von 100 µm bearbeitet werden, beispielsweise mit Laserschneiden, und anschließend in einem Diffusionsschweißprozess dauerhaft zu einem Bauteil gefügt werden [124].

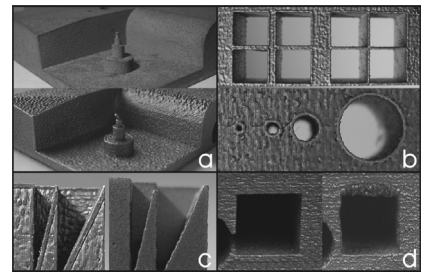
Analyse von Rapid-Verfahren für die Foliennacharbeit



CAD-Modell
Handhabungsvorrichtung
Foliennacharbeit



CAD-Modell
Benchmark-Körper
(Quelle: Universität Leuven)



Details der realisierten
Benchmark-Körper
(Quelle: Universität Leuven)

Bild 85: CAD-Modelle für die Spiegelung der Anforderungen der Handhabungsvorrichtung mit den Eigenschaften von spezifischen Aspekten bei der Herstellung metallischer Bauteile mit Rapid-Verfahren

Für das Funktionsbauteil wurden zunächst vier Kriterien ausgewählt [112]. Von besonderer Bedeutung ist die Realisierung von horizontalen Kanälen für eine definierte Temperierung. Dabei müssen im Herstellungsprozess Überhänge erzeugt werden, die prozesstechnisch mit den Verfahren LF und DMLS lediglich in Grenzen zu erzeugen sind. Bei dem Verfahren Metallfolien-LOM sind derartige Strukturen wesentlich besser zu generieren, insbesondere wenn die Kanäle ein geringes Verhältnis von Breite zu Höhe aufweisen. Die Erzeugung von vertikalen Bohrungen mit kleinen Durchmessern können mit den Verfahren LF und DMLS besser realisiert werden als mit IMLS. Dabei sind für MF-LOM gleichwertige Ergebnisse zu den erst genannten Verfahren zu erwarten. Weiterhin ist eine planare Oberflächenstruktur für eine sichere Fixierung der Folienschaltung bei einer definierten Temperaturprofilierung unabdingbar. Auch hier ist MF-LOM verfahrensbedingt vorzuziehen, ein möglicher Verzug an den Rändern des Bauteils kann in geringem Maß toleriert werden. Andererseits kann die Oberfläche im Anschluss an die Herstellung prinzipiell nachbearbeitet werden. Die Dichtigkeit der Kanalstrukturen ist bei dem IMLS-Verfahren geringer zu bewerten als bei den anderen Verfahren. Eine Übersicht dieser Ergebnisse wurde in Tabelle 14 zusammengestellt. Für den geplanten Aufbau waren weitere Kriterien, die für andere Anwendungen wichtig erschienen, wie beispielsweise die Festigkeit des Werkstücks, die Herstellungszeit oder die Generierung von freistehenden Strukturen, von untergeordneter Bedeutung.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass ein schichtweiser Aufbau aus einzelnen vorgefertigten Ebenen, wie es die Grundlage für das Verfahren Metallfolien LOM ist, für die Problemstellung der Foliennacharbeit am geeignetsten erscheint. Da zu dem Zeitpunkt des Aufbaus der Funktionsbauteile keine Anlage zur Verfügung stand, wurden die nachfolgend aufgebauten Handhabungsvorrichtungen aus einzelnen Aluminiumplatten mit geringer Dicke realisiert, die konventionell mit den abtragenden Verfahren Bohren und Fräsen hergestellt wurden und anschließend temperaturbeständig verklebt wurden.

Kriterium	Anforderung	LF	DMLS	IMLS	MF-LOM
Horizontale Kanäle	Oberflächennahe Temperierung	-	-	o	+
Vertikale Bohrungen < 1 mm Durchmesser	Ansaugung der Folie	+	+	o	+
Planarität der Oberfläche (ohne Nachbearbeitung)	Ebene Fixierung der Folie während thermischer Belastung	o	o	+	++
Dichtigkeit der Kanalstrukturen	Minimierung der Ansaugleistung und Wärmeverluste	+	+	o	+

Tabelle 14: Bewertung von vier Rapid-Verfahren zur Herstellung metallischer Bauteile

7.2.2 Realisierung einer integrierten Handhabungsvorrichtung

Das zentrale Element der ersten integrierten Handhabungsvorrichtung war ein Funktionsbauteil, das die drei Aspekte der Fixierung, Prozesswärmeführung und Temperaturmessung (Bild 83) beinhaltete. Hierzu wurde ein CAD-Modell entwickelt (Bild 86 links), an dessen vier Ebenen die Integration veranschaulicht werden konnte. Für die Fixierung wurden die Bohrungen durch die Ebene 1 auf der Unterseite der Ebene 2 zu einem gemeinsamen Hohlraum zusammengeführt, der mit einer Bohrung durch die Ebenen 3 und 4 zu einem Auslass geführt wurde.

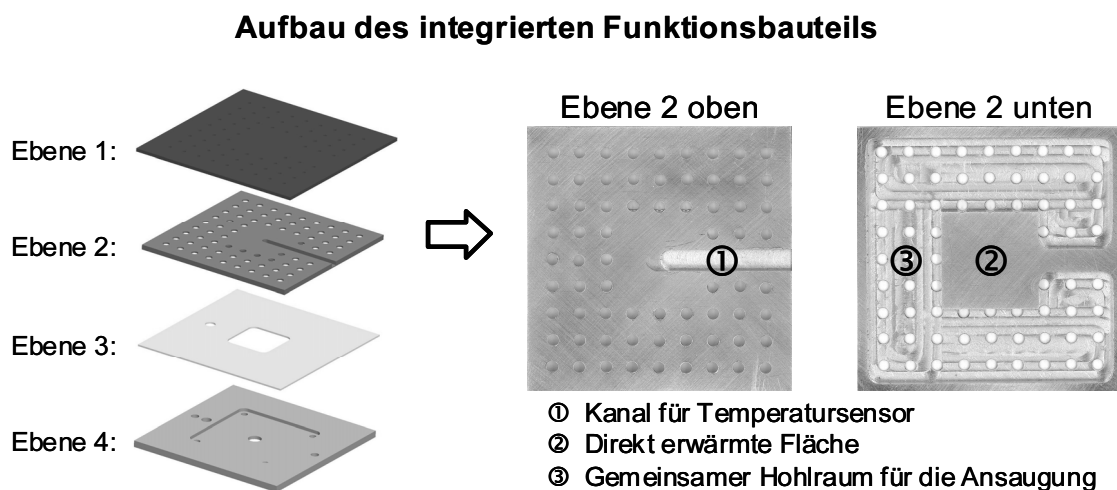


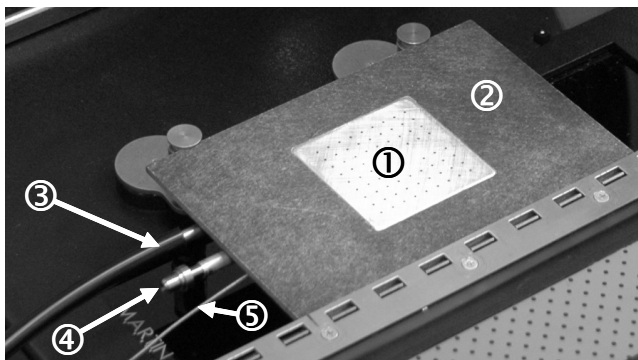
Bild 86: CAD-Modell des Funktionsbauteils (links) und Ober- und Unterseite der realisierten Ebene 2 (rechts)

Die Prozesswärme wurde zentral durch einer Bohrung von unten in einen Hohlraum geführt, der aus der Aussparung der Ebene 3 und der mittigen Vertiefung auf der Oberseite der Ebene 4 bestand. Dieser Hohlraum enthielt zusätzlich vier Bohrungen an den unteren Ecken, die als Auslässe für die Heißluft dienten. Die Wärmeübertragung auf die Oberseite des Funktionsbauteils erfolgte durch die Erhitzung der zentralen Fläche auf der Unterseite der Ebene 2 (② in Bild 86 rechts). Weiterhin enthielt das Funktionsbauteil

einen horizontalen Kanal auf der Oberseite der Ebene 2 (① in Bild 86 rechts) für die Aufnahme eines Thermoelements, wodurch der Messort sehr nahe an die zu überwachende Stelle, den Lotballs des nachzuarbeitenden BGAs verlagert wurde. Dabei war besonders zu berücksichtigen, dass die strömende Heißluft nicht auf den Temperatursensor auftraf.

Das Funktionsbauteil wurde anschließend in einen Rahmen aus temperaturbeständigem Material gesetzt (② in Bild 87), wie es auch für Baugruppenträger in Wellenlötanlagen eingesetzt wird. Alle externen Anschlüsse wurden von dem Funktionsbauteil unter dem Rahmen an die Seite herausgeführt. Die gesamte Handhabungsvorrichtung konnte komplett unabhängig betrieben werden oder auch, wie in Bild 87 dargestellt, mit Klemmvorrichtungen in ein konventionelles Nacharbeitssystem eingespannt werden. In einem solchen Fall ist ein paralleler Betrieb mit der dort verfügbaren Unterheizung denkbar.

Handhabungsvorrichtung zur Foliennacharbeit



- ① Integriertes Funktionsbauteil
- ② Temperaturbeständige Halterung
- ③ Anschluss Ansaugung
- ④ Zuführung Prozesswärme
- ⑤ Zuleitung Thermoelement

Bild 87: Integrierte Handhabungsvorrichtung mit den Schnittstellen für die Ansaugung, Prozesswärmeeinbringung und Temperaturmessung

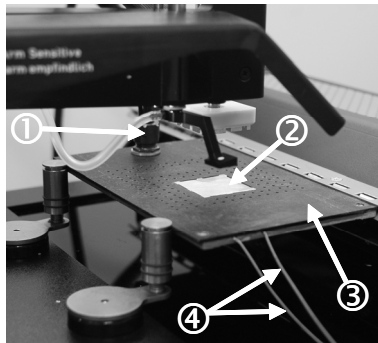
7.2.3 Erweiterung eines vorhandenen Systemkonzepts

Bei der Durchführung von Vorversuchen mit der zuvor beschriebenen Handhabungsvorrichtung zeigte sich einerseits, dass die Ansaugung und die Temperaturmessung den Erwartungen entsprachen, aber andererseits die Wärmeleitung und -übertragung als unzureichend bewertet werden mussten. Im Gegensatz zu den konventionellen Nacharbeitssystemen mit Heißgas, bei denen die Prozesswärme unmittelbar vor dem Werkzeugausslass mit Heizelementen erzeugt wird, erfolgte hier ein Wärmetransport über eine nicht zu vernachlässigende Strecke, die zu erheblichen Wärmeverlusten führte.

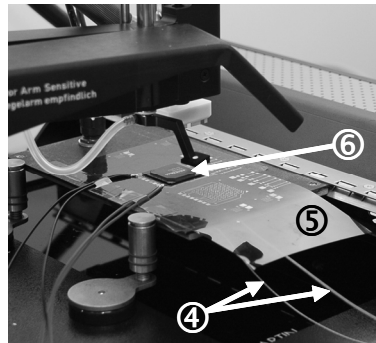
Diese Erkenntnisse flossen in die Entwicklung einer zweiten Handhabungsvorrichtung ein, die auf eine integrierte Prozesswärmeführung verzichtete (Bild 88). Die Ansaugung erfolgte entsprechend dem ersten Aufbau über einen Anschlussstutzen, der hier nach oben weggeführt wurde. Das zentrale Element dieser Vorrichtung bestand in einem Aluminiumeinlegeblech, das in Abstimmung mit der Heißluftdüse wenige Millimeter größer als der nachzuarbeitende BGA war. Ein Thermoelement wurde auf der Unterseite dieses Teils befestigt, wiederum mit dem Ziel die Temperatur an den Anschlussstellen des BGAs möglichst gut zu erfassen. Ein zweites Thermoelement wurde zusätzlich an der

Seite der Handhabungsvorrichtung platziert, allerdings ohne weiteren Erkenntnisgewinn in den nachfolgenden praktischen Untersuchungen.

Systemerweiterung ohne integrierte Prozesswärmeführung



Ohne Folienschaltung



Mit Folienschaltung

- ① Anschluss Ansaugung
- ② Aluminiumplatte
- ③ Temperaturbeständige Halterung
- ④ Zuleitungen Thermoelemente
- ⑤ Folienschaltung
- ⑥ Nachzuarbeitender BGA

Bild 88: Handhabungsvorrichtung mit integrierter Ansaugung und Temperaturerfassung für den Einsatz in konventionellen Nacharbeitssystemen

Die Zuführung der Prozesswärme erfolgte mittels eines Heißgasgriffels des Nacharbeitssystems. Dabei konnte auf die Funktionalitäten der zugehörigen Software, wie zum Beispiel der Parametrisierung der einzelnen Profilierungszonen zurückgegriffen werden.

7.3 Inbetriebnahme und exemplarische Messungen

Die praktischen Versuchsreihen wurden mit der Handhabungsvorrichtung aus dem Abschnitt 7.2.3 durchgeführt. Dabei standen neben dem Nachweis, mit dem Aufbau eine zuverlässige Nacharbeit durchführen zu können, zwei Einzelaspekte im Mittelpunkt. Dies war zunächst die Ermittlung, inwieweit die Temperatur des integrierten Sensors unter den Aluminiumeinlegeeteil mit den Temperaturen auf und unter dem BGA übereinstimmte. Anschließend wurde mit Hilfe des in Kapitel 6 präsentierten Messverfahrens untersucht, ob aufgrund des Einlegeteils unter der Folienschaltung eine Vergleichmäßigung der Temperaturverteilung auftrat, die mit der Bestimmung der Zeitpunkte für das Aufschmelzen und des Erstarrens nachgewiesen werden sollte.

7.3.1 Korrelation der Temperaturverläufe

Auf einer Folientestschaltung mit einem BGA wurden zwei Thermoelemente auf der Oberseite der Komponente und unter dem BGA befestigt. Eine Darstellung dieser Messwertverläufe zusammen mit der Temperatur des Sensors unter dem Einlegeeteil führte zu der Grafik in Bild 89 links. Wie zu erwarten war, lagen die Temperaturen des integrierten Sensors unter denjenigen der anderen Sensoren, da die Wärmeeinbringung von oben erfolgte. Bereits bei der Gesamtdarstellung konnte eine gute Korrelation der Kurvenverläufe entnommen werden. Eine ergänzende Auswertung wurde mit der Bestimmung der Temperaturdifferenzen zwischen den beiden „BGA-Sensoren“ und dem integrierten Sensor durchgeführt. Diese wurden in Bild 89 rechts zusammen mit dem absoluten Verlauf des Bezugssensors aufgetragen.

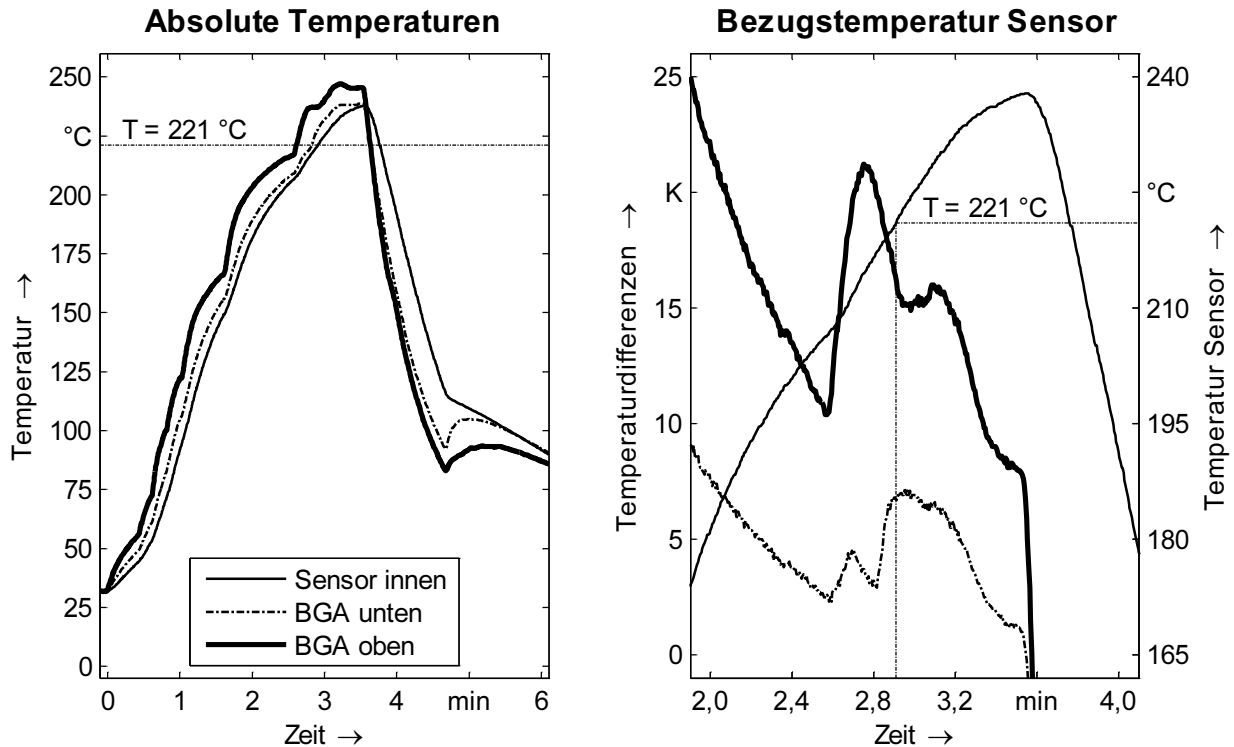


Bild 89: Vergleich der Temperaturverläufe des integrierten Sensors mit denjenigen auf und unter dem BGA

Die Differenzen stiegen immer dann an, wenn das Nacharbeitssystem intern die Heizleistung und somit die Temperatur der austretenden Heißluft steigerte. Dennoch konnte nachgewiesen werden, dass die Temperaturdifferenz zwischen dem integrierten Sensor und unter dem BGA in der Lötphase maximal 7 K betrug. Daraus lies sich ableiten, dass mit Erreichen der Temperatur des oberen Endes des Aufschmelzbereichs (hier 221 °C) an dem Sensor in der Handhabungsvorrichtung das Umschmelzen der Anschlussstrukturen sicher gewährleistet war und gleichzeitig eine Überbeanspruchung des BGAs zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgte. Ein Optimierungspotential besteht nun darin, anhand des Temperaturverlaufs des inneren Sensors die Heizleistung in dem Nacharbeitssystem so nachzuregeln, dass dessen Temperatur auf einem möglichst niedrigen, aber ausreichenden Niveau gehalten wird.

7.3.2 Anwendung des Messfahrens zur Bestimmung der Phasenübergänge

Die Versuche wurden mit einer Untersuchung abgeschlossen, die die Frage beantworten sollte, wie sich das Aluminiumeinlegeteil auf das Aufschmelzen und das Erstarren der Lotballs unter dem BGA auswirkte. Hierzu wurde das Layout des Testschaltungsträgers aus dem Kapitel 6 (Bild 71 rechts) auf ein Polyimid-Substrat übertragen und für die Anwendung des Messverfahrens zur Detektion der Phasenübergänge vorbereitet. Die Analyse erfolgte anhand der exemplarischen Messwertverläufe von den Widerstandswerten für zwei Ball-Paare in der Ecke und in der Mitte sowie dem Temperaturverlauf des Sensors in der Handhabungsvorrichtung (Bild 90).

Das Aufschmelzen an den Messpunkten Ecke und Mitte begann nahezu gleichzeitig mit einer Differenz von 1,4 s. Die Sensortemperatur betrug zu dieser Zeit 200 °C. Der Wi-

derstandswert für den Messpunkt in der Mitte des BGAs stieg in dieser Phase bis zu einem Maximalwert von 6,94 mΩ an, wobei sich der BGA nach dem Beginn des Aufschmelzens der Anschlussstrukturen bewegte.

Anwendung des Messverfahrens zur Bestimmung der Phasenübergänge

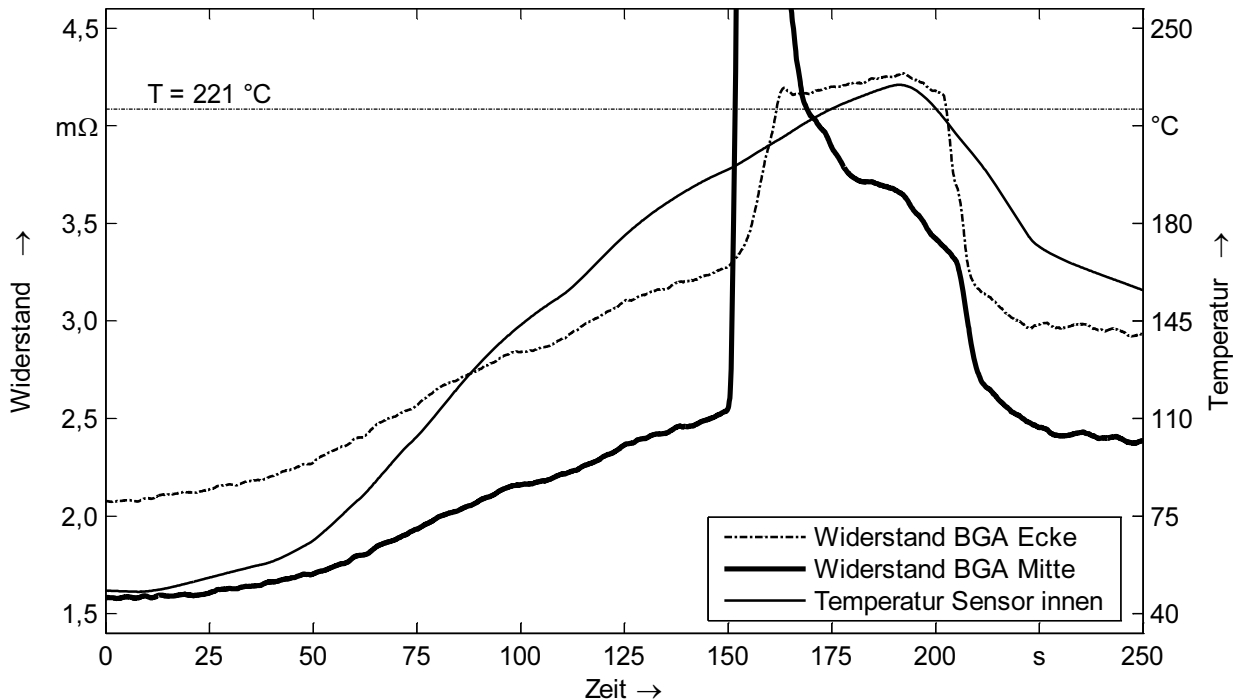


Bild 90: Widerstandsverläufe (gleitend gemittelt) durch zwei benachbarte Lotballs an der Ecke und in der Mitte eines BGAs und Temperatur im Inneren der Handhabungsvorrichtung

Mit dem Beginn der Kühlphase nach 191 s trat unmittelbar eine Reduzierung der Temperatur am inneren Sensor auf. Dafür war entscheidend, dass das Aluminiumeinlege teil eine hohe Wärmeleitfähigkeit besaß und die Wärme, insbesondere nach unten in die Handhabungsvorrichtung, schnell abstrahlen konnte. Anhand der ungefilterten Rohdaten konnten die Erstarrungszeitpunkte für den Messpunkt an der Ecke zu 201,9 s und 205,3 s sowie in der Mitte zu 204,8 s und 206,7 s bestimmt werden. Aus diesen Ergebnissen konnten zwei wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden. Im Gegensatz zu den starren Baugruppen, die im Kapitel 6 untersucht wurden, erfolgten die jeweiligen Phasenübergänge in einem zeitlich engen Fenster, mit der Folge, dass die Dauer vom ersten Aufschmelzen bis zu dem letzten Erstarren, bei gleichzeitiger Gewährleistung einer Mindestdauer für alle Anschlussstrukturen, deutlich kürzer war. Diese Eigenschaft bei der Nacharbeit von BGAs auf Folienschaltungen eröffnete das Potential für zeitlich kürzere Temperaturprofile und somit einer Reduzierung der thermischen Belastung für das Bauelement.

Weiterhin zeigte sich, dass der Sensor im Inneren der Handhabungsvorrichtung wiederum geringfügig niedrigere Temperaturen erfasste. Mit dem Erreichen eines Wertes von 221 °C an diesem Sensor kann das Aufschmelzen aller Lotballs des BGAs gewährleistet werden. Eine Erweiterung eines Nacharbeitssystems in der Form, dass der

Messwert des in der Handhabungsvorrichtung integrierten Sensors für eine Prozessregelung herangezogen wird, kann zu einer Regelung der Heizleistung oder des Luftstromvolumens genutzt werden. Darüberhinaus kann der Effekt des nahezu simultanen Erstarrens der Anschlussstrukturen wenige Sekunden nach der Initiierung der Kühlphase für eine wesentlich bessere Steuerung der Dauer der Liquidusphase herangezogen werden.

7.4 Zusammenfassung

Der Nacharbeitsprozess für komplexe Bauelementgeometrien auf Folienschaltungen unterscheidet sich gegenüber starren Baugruppen zunächst dadurch, dass das Substrat biegeschlaff und extrem dünn ist. Diese Eigenschaften dienen als Basis für die Fragestellungen, wie ein Nacharbeitssystem optimal die Aspekte der Fixierung von Folienschaltung, der Prozesswärmeführung und der Prozessoptimierung berücksichtigen kann. Das Ergebnis der Analyse erforderte eine flache, quaderförmige Handhabungsvorrichtung mit drei unabhängigen Hohlraumstrukturen für die Ansaugung der Folienschaltung, die Heißluftführung und einen Zugang für einen Temperatursensor, der möglichst nahe unter der Mitte der Oberfläche einen Messwert liefern sollte.

Der Konzeptentwicklung schloss sich eine Bewertung von Herstellungsverfahren für komplexe, metallische Funktionsbauteile an, bei der verschiedene Rapid-Verfahren eingehend betrachtet wurden. Das ermittelte Vorzugsverfahren war das Metallfolien-LOM (Laminated Object Manufacturing) Verfahren, das aufgrund seines schichtweisen Aufbaus mit vorgefertigten Ebenen die Anforderungen an die Nacharbeit von Folienschaltungen am besten erfüllte. Darauf aufbauend wurden anschließend ein vollintegrierter und ein teilintegrierter Systemaufbau aus einzelnen, dünnen Aluminiumplatten realisiert, mit denen die praktischen Versuche durchgeführt wurden. Insbesondere der letztgenannte Aufbau, bei dem die Prozesswärmeeinbringung über ein konventionelles Nacharbeitssystem erfolgte, zeigte sehr gute Ergebnisse hinsichtlich des zeitlichen Versatzes des Aufschmelzens und des Erstarrens der Lotballs der BGAs. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass eine Nacharbeit von BGA Bauelementen auf Folienschaltungen aufgrund des dünnen Substratmaterials und der neu entwickelten Handhabungsvorrichtung hinsichtlich der thermischen Belastung besser als bei starren Baugruppen möglich ist.

8 Zusammenfassung

Die Gewährleistung der Funktionsfähigkeit von elektronischen Baugruppen als integraler Bestandteil von Produkten und Systemen in allen Bereichen des täglichen Lebens, wie beispielsweise in Kraftfahrzeugen oder in der Medizintechnik, erfordert bereits in der Entwicklungsphase eine intensive Betrachtung von Zuverlässigkeitsaspekten. Dabei kommt der Abschätzung der zu erwartenden Lebensdauer und insbesondere im Vergleich unterschiedlicher Aufbau- oder Belastungsvarianten eine immer höhere Bedeutung zu. Die Herausforderungen liegen dabei unter anderem in der steigenden Variantenvielfalt und in den stetig verkürzten Zeiträumen vom Entwicklungsbeginn bis zur Markteinführung. Mit der Erschließung neuer Einbauräume für elektronische Produkte wirken auch andere Umwelteinflüsse auf die Aufbau- und Verbindungstechnik ein, deren Auswirkungen mit geeigneten Prüfverfahren zu untersuchen sind. Dieser Trend der Verwendung von Elektronik an dezentralen Wirkorten führt dazu, dass die Aussagekraft der Ergebnisse von etablierten Prüfstrategien abnimmt, da dabei spezifische Aspekte nicht ausreichend berücksichtigt werden können.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse entstanden in verschiedenen Forschungsprojekten, die sich mit unterschiedlichen Schwerpunkten für die Sicherstellung der dauerhaften Funktionsfähigkeit von Anwendungen mit elektronischen Baugruppen beschäftigten. Das zentrale Ziel war dabei, einen wesentlichen Beitrag für die Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion zu leisten. Im Mittelpunkt stand neben den erhaltenen Einzelergebnissen insbesondere das methodische Vorgehen, das auf ähnliche Fragestellungen in der Zukunft angewendet werden kann.

Die Bestimmung der Zuverlässigkeit erfolgt bei Qualifizierungsprozessen in der Regel mit beschleunigten Alterungsverfahren vor der Produkteinführung. In der vorliegenden Arbeit konnte eindrucksvoll gezeigt werden, wie verschiedene Aufbauvarianten hinsichtlich der Verarbeitbarkeit in der Herstellung und den Ergebnissen von Zuverlässigkeitsuntersuchungen teilweise stark gegensätzliche Ergebnisse lieferten. Eine Optimierung von Parametern für die Erhöhung der Zyklenfestigkeit ist daher anhand von weiteren Analysen, wie beispielsweise des Lotpastentransfers bei dem Schablonendruck, kritisch zu bewerten. Darüber hinaus zeigten die Untersuchungen zu den Online-Widerstandsmessungen, dass vereinfachte Messaufbauten zwar eine geringere Ergebnisqualität als bei dem Einsatz von hochgenauen Vierpunktmessungen ergaben, aber dennoch bei einer Bewertung von Vergleichsvarianten durchaus ausreichende Ergebnisse liefern konnten.

Die Aussagekraft von standardisierten Prüfbelastungen und die Bestimmung der zugehörigen Kenngrößen finden immer dann ihre Grenzen, wenn neue Systemkonzepte oder Belastungen auftreten. Am Beispiel eines neuen Kontaktierungsverfahrens für spritzgegossene Schaltungsträger mit Folienflachleitern wurde aufgezeigt, wie mit Hilfe von angepassten Prüfschritten und der Anwendung ergänzender Untersuchungsverfahren tiefergehende Erkenntnisse über das Gesamtsystem gewonnen wurden. Der Unterschied zwischen den vergleichend bewerteten Oberflächenmetallisierungen Zinn und

Nickel/Gold konnte hochgenau quantifiziert werden. Daraus ergab sich die Möglichkeit, die Grenzen für den Einsatz von Zinnoberflächen zu bestimmen. Bei der Untersuchung von neuen Belastungen, die im Rahmen dieser Arbeit anhand der Eigenerwärmung von Bauelementen bei stark erhöhten Umgebungstemperaturen analysiert wurde, zeigte sich, dass bei einer Festlegung eines Ausfallkriteriums ein Wechsel des Versagensmechanismus nicht zwangsläufig erkennbar war. Daraus kann die Empfehlung gegeben werden, eine möglichst große Anzahl von verschiedenen Analyseverfahren einzusetzen.

Ergänzend hierzu wurde für den Umwelteinfluss der Kondensation von Feuchtigkeit auf der Oberfläche von elektronischen Baugruppen ein ganz neues Prüfverfahren konzipiert. Die Schwerpunkte der Entwicklung lag in der systematischen Betrachtung der Aspekte des Fehlermechanismus der elektrochemischen Migration, der Festlegung von Einflussparametern und Bewertungskriterien vor dem Entwurf der Testschaltungsträger und der Durchführung der Versuchsreihen. Mit diesem methodischen Vorgehen wurde ein größtmöglicher Erkenntnisgewinn erzielt, der insbesondere die Notwendigkeit eines Reinigungsprozesses auch bei der Verwendung von No-Clean Lotpasten für betauungsanfällige Baugruppen verdeutlichte. Bei allen Untersuchungen zeigte sich eindrucksvoll, wie die bedarfsgerechte Konzeption und Durchführung von Qualifizierungsschritten und Prüfverfahren die Aussagekraft der Ergebnisse erheblich steigern konnte.

Im Bereich der Prozessanalyse wurde ein innovatives Messverfahren für die zeitlich exakte Bestimmung der Phasenübergänge von Lotballs an BGA Bauelementen während des Lötprozesses in der Nacharbeit entwickelt. Mit der Messung des elektrischen Durchgangswiderstands von paarweisen Anschlussstrukturen gelang es, getrennt nach peripheren und zentralen Messpunkten unter einem BGA, das dynamische Verhalten des Umschmelzens zu erfassen. Mit der Variation der Temperaturprofilparameter konnte die Basis für eine neue Bewertung von Optimierungsmaßnahmen gelegt werden.

Neben den konventionellen Schaltungsträgern werden zukünftig verstärkt Baugruppen mit alternativen Substratmaterialien für Anwendungen mit spezifischen Anforderungen eingesetzt. Hierzu werden auch biegeschlaffe Folienschaltungen mit komplexen Bauelementen, wie BGAs, Verwendung finden. Da verfügbare Nacharbeitssysteme auf starre Baugruppen ausgelegt sind, wurde eine neue Handhabungsvorrichtung konzipiert und exemplarisch aufgebaut, die eine effiziente Reparatur von Bauelementen auf Folienschaltungen ermöglichte. Dabei konnte ein integrierter Temperatursensor die tatsächlichen thermischen Verhältnisse wesentlich besser als bei bisherigen Systemen erfassen und bildete die Grundlage für eine Minimierung der Temperaturbelastung.

Im Rahmen dieser Arbeit gelang es, neue Erkenntnisse bei der systematischen Planung und Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfverfahren und der Analyse von Lötprozessen in der Nacharbeit zu gewinnen. Dabei standen sowohl die Anpassung von bestehenden Verfahren an die spezifischen Aufgabenstellungen als auch, soweit notwendig, die Entwicklung neuer Lösungen für die Bewältigung der Herausforderungen im Vordergrund.

Literaturverzeichnis

- [1] Addy, P. et al.: *Ergebnisbericht der Voruntersuchung „Einsatz produktbegleitender Informationssysteme und ihre Auswirkungen auf die Produktionstechnik (EPI)“*. Technische Universität Berlin: http://www.epi.tu-berlin.de/Abschlussbericht_EPI.pdf (Stand: 10/2002), Zugriff am 08.09.2008.
- [2] Affolter, B.: Reproduzierbare Lötprozesse in der Nacharbeit wie in der Fertigung. *Elektronikpraxis* (Hrsg.): <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/index.cfm?pid=897&pk=97361> (Stand: 2.11.2007), Zugriff am 14.08.2008.
- [3] Alvarez, C.: *Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.
- [4] Amesöder, S. et al.: *Injection moulding of thermally conducting Polymers for mechatronic applications*. In: Proceedings of The Polymer Processing Society 23rd Annual Meeting, Polymer Processing and Rheology Center - NRPP, Salvador/Brasilien, 27.-31. Mai 2007.
- [5] Bagung, D.; Wiesa, T.: *Zukünftige Anforderungen an Leiterplatten für die Automobilelektronik*. Podiumsdiskussion Verband der Leiterplattenindustrie SMT 2004, Nürnberg: <http://www.vdlev.org/download.php?id=1095208,109,3> (Stand 17.06.2004), Zugriff am 8.09.08.
- [6] Beine, H.: Bleifrei-Rework: Kleineres Prozessfenster. In: *Productronic*, Heft 9 (2004), S. 20-21.
- [7] Beine, H.: Prebumping von Finepitch-QFNs - Ready for Rework. In: *Productronic*, Heft 5 (2008), S. 40.
- [8] Bell, H.: *Reflowlöten - Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler*. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2004.
- [9] Berchtold, L. et al.: *Lösbare elektrische Kontaktierung dreidimensionaler spritzgegossener Schaltungsträger*. Deutsches Patent DE 10 2004 023 189.3, Anmeldetag 11.05.2004, Internationale Patentanmeldung Nr. PCT/EP2005/004887, Anmeldetag 04.05.2005, Offenlegungstag 01.12.2005.
- [10] Berger, M.: JTAG/Boundary Scan vs. In-Circuit Test. In: *GMM-Fachbericht 55, Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 - Systemintegration und Zuverlässigkeit*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2008, S. 353-358.
- [11] Bigl, T.: *Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.
- [12] Bigl, T.; Feldmann, K.; Reinhardt, A.: *Automated Reel-to-Reel Processing of Flexible Printed Circuit Boards*. In: Proceedings of 7th International Congress Molded Interconnected Devices, Research Association Molded Interconnected Devices 3-D MID e. V., Fürth, 27.-28. September 2006.

- [13] Böck, J.: Optimierung der Zuverlässigkeit. In: *ElektronikPraxis*, Heft 9 (2007), S. 46-48.
- [14] Böck, J.: Zuverlässigkeit erhöhen – Kosten reduzieren. In: *productronic*, Heft 12 (2006), S. 34-36.
- [15] Boiger, M.: *Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [16] Brokmann, G. et al.: *Parametrisiertes SPICE-Modell eines Streufeldkondensators zur Impedanzmessung in Flüssigkeiten und Gasen*. In Tagungsband: Sensoren & Meßsysteme. VDI Wissensforum IWB GmbH, Ludwigsburg, 13.-14. März 2000.
- [17] Bumiller, E.; Pecht, M.; Hillman, C.: Electrochemical Migration on HASL Plated FR-4 Printed Circuit Boards. In: *SMTA News and Journal of Surface Mount Technology*, Volume 17 (2004), Issue 2.
- [18] Cäsar, J.; Braunmiller, U.: *Betauung - Die unbekannte Größe*. In Tagungsband: Umwelteinflüsse erfassen, simulieren und bewerten, Gesellschaft für Umweltsimulation e. V., Pfinztal, 17.-19. März 2004.
- [19] DIN EN 60068-2-30: *Umgebungseinflüsse - Teil 2-30: Prüfverfahren Feuchte Wärme, zyklisch*. DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 6/2006.
- [20] Eisenbarth, M.: *Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2003.
- [21] Enser, W.: *Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [22] Europäische Union: *Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten*. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 27.01.2003.
- [23] Europäische Union: *Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte*. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 27.01.2003.
- [24] Feldmann, K.; Bigl, T.: *Entwicklungstrends und Rationalisierungspotentiale mechatronischer Systemlösungen im Kfz*. In Tagungsband: Mechatronik im Kfz - Funktionalitäten erhöhen und Kosten sparen, IIR, Mannheim, 13. Mai 2002.
- [25] Feldmann, K.; Craiovan, D.; Schimpf, C.: *Integration Mechanik/Elektronik*. In: TransMechatronic.de - Das Fachportal für Mechatronik: http://www.transmechatronic.de/fileadmin/images/Problembereiche_Loesungsansaetze/Integration_Mechanik_Elektronik_V2.pdf (Stand 27.10.2006), Zugriff am 18.01.08.

- [26] Feldmann, K.; Matzner, C.; Schimpf, C.: Kondensation auf Elektronikbaugruppen. In: *wt Werkstattstechnik online Jahrgang 97*, Heft 11/12 (2007), S. 873-878.
- [27] Feldmann, K.; Rösch, M.; Schimpf, C.: Innovationspotenziale durch mechatronische Konzepte und Systemlösungen. In: *Automobiltechnologie in Bayern*, 2006, S. 56-61.
- [28] Feldmann, K.; Rösch, M.; Schimpf, C.: Innovation Potentials by the use of Mechatronical Concepts and System Solutions. In: *Automotive Technology in Bavaria*, 2006, pp. 56-61.
- [29] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.): *3D-MID Technologie Räumliche elektronische Baugruppen: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [30] Fukumoto, H.: Great Expectations for the Combined Environmental Reliability Test (CERT). In: *ESPEC Technology Report*, Issue 4 (1997), pp. 16-26.
- [31] Gebhardt, A.: *Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing*. 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [32] Geiger, M.: Absolut sicher – Online-Messplatz für Zuverlässigkeitsprüfungen. In: *ElektronikPraxis*, Heft 22 (2003), S. 86-90.
- [33] Georgi, W.; Metin, E.: *Einführung in LabVIEW*. 3. Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [34] Gerhold, S. et al.: *Online-TWT für Zuverlässigkeitsuntersuchungen*. Podiumsdiskussion Verband der Leiterplattenindustrie SMT 2004, Nürnberg: <http://www.vdlev.org/download.php?id=539095,94,3> (Stand 17.06.2004), Zugriff am 08.09.08.
- [35] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: *Physik für Ingenieure*. 7. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1999.
- [36] Herzog, T. et al.: Bleifreie Lote - Verarbeitbarkeit im SMT-Prozess und Zuverlässigkeit von Chip-Lötverbindungen. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS)*, Heft 9 (2004), S. 1556-1565.
- [37] Höhne, G.; Hemminger, W.; Flammersheim, H.-J.: *Differential Scanning Calorimetry*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2003.
- [38] Holzmann, R.: *Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [39] Holzmann, R.; Feldmann, K.: Qualitätsoptimierung des Nacharbeitsprozesses durch die Analyse des Zuverlässigkeitsverhaltens alternativer Reparaturstrategien. In: *GMM-Fachbericht 37, Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2002, S. 295-302.
- [40] IPC-7351: *Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standard*. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn (IL), USA, 2/2005.

- [41] IPC-7525: *Stencil Design Guidelines*. Rev. A. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn (IL), USA, 2/2007.
- [42] IPC-7530: *Guidelines for Temperature Profiling for Mass Soldering Processes (Reflow & Wave)*. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn (IL), USA, 5/2001.
- [43] IPC-9701: *Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments*. Rev. A. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn (IL), USA, 2/2006.
- [44] IPC-A-610: *Acceptability of Electronics Assemblies*. Rev. D. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn (IL), USA, 2/2005.
- [45] IPC-SM-785: *Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments*. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Northbrook (IL), USA, 11/1992.
- [46] IPC-TM-650 2.6.3.3: *Surface Insulation Resistance, Fluxes*. Rev. B. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Northbrook (IL), USA, 6/2004.
- [47] IPC/JEDEC J-STD-020: *Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices*. Rev. D. IPC - Association Connecting Electronics Industries, Northbrook (IL), USA, 6/2007.
- [48] John, W.: *Möglichkeiten zur Integration von Elektronik in Flachleiter-Kabelsätze*. In Tagungsband: MID und Folie - Innovative Produktgestaltung und Prozesse, FAPS-TT GmbH, Nürnberg, 25. November 2003.
- [49] Keller, G.: Rostocker Technologietag „Löttechnik“. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS)*, Heft 6 (2008), S. 1202-1205.
- [50] Kempe, W.: *Einsatzbereiche für die Hochtemperaturelektronik*. In Tagungsband: 12. Workshop Mikrotechnische Produktion Technologien für die Hochtemperaturelektronik & HDI- und Hochtemperatur-Baugruppen, Kompetenznetzwerk Mikrotechnische Produktion, Dresden, 27.-28. April 2004.
- [51] Kin, Y.; Izumi, J.: What is Environmental Testing? Part 3. In: *ESPEC Technology Report*, Issue 3 (1997), pp. 1-20.
- [52] Klein Wassink, R. J.: *Weichlöten in der Elektronik*. 2. Auflage. Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 1991.
- [53] Kleppmann, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 3. Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2003.
- [54] Kories, R.; Schmidt-Walter, H.: *Taschenbuch der Elektrotechnik*. 6. Auflage. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2004.
- [55] Krapp, M.; Wiesa, T.; Goebel, U.: Zukünftige Anforderungen an Leiterplatten, Bauelemente und die Aufbau- und Verbindungstechnik für die Automobilelektronik. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS)*, Heft 11 (2003), S. 1781-1787.

- [56] Krumbein, S.J.: Metallic Elektromigration Phenomena. In: *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Volume 11 (1988), Issue 1, pp. 5-15.
- [57] Kruth, J.-P. et al.: *Benchmarking of different SLS/SLM Processes as Rapid Manufacturing Techniques*. In Tagungsband: Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI), Hogeschool Gent, Gent, 20.-23. April 2005.
- [58] Kunze, A.: *Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.
- [59] Lin, E.: *Anti-CAF "Conductive Anodic Filament" CCL Material*. Datei: <http://www.npc.com.tw/emd-new/di1/share/c4-01-4.htm>, Zugriff am 28.04.2008.
- [60] Luchs, R.: *Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1998.
- [61] Lugert, G.; Schottenloher, K.: *HOTCAR – High Operating Temperature Systems on Chip, Assembly and Reliability*. In: Proceedings of MEDEA+ T124 High Temperature Electronics. MEDEA+ Forum, Paris, 23.-24. November 2004.
- [62] Lutz, H; Wendt, W.: *Taschenbuch der Regelungstechnik*. 5. Auflage. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2003.
- [63] March, B. et al.: Ausfallverhalten elektronischer Baugruppen unter Betaungseinfluss. In: *GMM-Fachbericht 55, Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 - Systemintegration und Zuverlässigkeit*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2008, S. 203-206.
- [64] Martin, B.: Per Mausklick zum Bleifrei. In: *EPP - Elektronik Produktion & Prüftechnik*, Heft 2 (2005), S. 20-21.
- [65] März, M.; Eckardt, B.; Schletz A.: *Mechatronische Integration von Hochleistungselektronik in Komponenten des Antriebsstrangs von Hybridfahrzeugen*. In Tagungsband: Neue Elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge, Haus der Technik e. V., München, 20.-21. März 2007.
- [66] McCluskey, P. et al: Reliable use of commercial technology in high temperature environments. In: *Microelectronics Reliability*, Volume 40 (2000), pp. 1671-1678.
- [67] Melzer, K.: *Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [68] Meyna, A.; Pauli, B.: *Taschenbuch der Zuverlässigkeit und Sicherheitstechnik*. München: Carl Hanser Verlag, 2003.
- [69] Moreau, S.; Lequeu, T.; Jersian, R.: Comparative study of thermal cycling and thermal shocktests on electronic components reliability. In: *Microelectronics Reliability*, Volume 44 (2004), pp. 1343-1347.

- [70] Müller, J.: *Integrationspotential durch den Einsatz von Chip Scale Packages*. In Tagungsband: Deutsche IMAPS Konferenz 2000, IMAPS Deutschland, München, 9.-10. Oktober 2000.
- [71] Müller-Felder, R.; Knoblauch, V.: Reliability aspects of microsensors and micro-mechatronic actuators für automotive applications. In: *Microelectronics Reliability*, Volume 43 (2003), pp. 1085-1097.
- [72] N. N.: *Allgemeine Feuchtemesstechnik*. IST AG (Hrsg.): http://www.ist-ag.com/docs/Grundlagen_Feuchte_d.pdf (Stand: 12/2004), Zugriff am 28.04.2008.
- [73] N. N.: *BGA Component Rework Profile Development, Standard Method*. Circuit Technology Center, Inc. (Hrsg.): <http://www.circuitrework.com/guides/9-2-1.shtml> (Ausgabestand: E, 07.07.2000), Zugriff am 14.05.2008.
- [74] N. N.: Blockbusters & Pacemakers. In: *Automobil Produktion, Innovationen in der Automobilindustrie*, Sonderausgabe Mai (2008), S. 16-17.
- [75] N. N.: Design, Aufbau und Qualifikation von Demonstratoren (Siemens VDO). In VDI/VDE-IT (Hrsg.): *Reihe Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 91 – Aufbau, Montagetechnik und Applikationsuntersuchung von High Temperature Advanced Packages am Beispiel Automobilelektronik – HiTAP – Abschlussbericht Verbundprojekt 1999-2003*. Teltow: VDI Verlag, 2004, S. 279-333.
- [76] N. N.: *Direct Component Printing Module for QFN and MLF components*. FINETECH GmbH & Co. KG (Hrsg.): http://www.finetech.de/enid/9f7ca6bf2b01d27a3273e2004c1d2a9f,0/Rework_Modules___Tools/Direct_Component_Printing_on_MLF___QFN_f2.html, Zugriff am 15.09.2008.
- [77] N. N.: *Halbautomatisches Selektivlötgerät Onyx 29*. ZEVAC GmbH Selektiv-Löttechnik (Hrsg.): http://www.zevac.de/pdf/tech_data_onyx_29_d.pdf (Stand: 5/2005), Zugriff am 15.09.2008.
- [78] N. N.: *HALT (Highly Accelerated Life Test) – Stresstest an Systemeinheiten*. SGS Germany GmbH (Hrsg.): <http://www.sgs-cqe.de/images/stories/produktblaetter/deutsch/umwelt/p-305-2007.pdf> (Stand: 6/2008), Zugriff am 12.09.2008.
- [79] N. N.: *High-Reliability Lead-Free Solder Paste M31-GRN360-K1MK-V*. Senju Metal Industry Co.,Ltd. (Hrsg.): Datenblatt, Stand SME-P-41 2.0E Jan. 2005.
- [80] N. N.: *IKT 2020 - Forschung für Innovationen*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): <http://www.bmbf.de/pub/ikt2020.pdf> (Stand: 2007), Zugriff am 13.08.2008.
- [81] N. N.: *Intel® PXA27x Processor Family Desing Guide*. Intel Corp. (Hrsg.): <http://pubs.gumstix.org/documents/PXA%20Documentation/PXA270/PXA270%20Design%20Guide%20%5B280001-002%5D.pdf> (Stand: 5/2005), Zugriff am 30.07.2008.
- [82] N. N.: *Ionic Migration on Printed-Circuit Boards*. ESPEC Corp. (Hrsg.): http://www.espec.de/uploads/media/about_AMI___Read-Only___01.pdf (Stand: 6/2004), Zugriff am 28.04.2008.

- [83] N. N.: *ITS-90 Table for type K thermocouple*. National Institute of Standards and Technology (NIST) (Hrsg.): http://srdata.nist.gov/its90/download/type_k.tab, Zugriff am 12.08.2008
- [84] N. N.: *nanoPAL - Prüftechnik für Alterungsmechanismen in nanoskaligen Verbindungen*. Kompetenznetzwerk Mikrotechnische Produktion (Hrsg.): <http://www.mikrotechnische-produktion.de/index.php?id=94> (Stand: 3/2007), Zugriff am 12.09.2008.
- [85] N. N.: *NI DAQPad-6015/6016 Family Specifications*. National Instruments (Hrsg.): <http://www.ni.com/pdf/manuals/370969b.pdf> (Stand: 12/2005), Zugriff am 11.06.2008.
- [86] N. N.: *NI USB-6008/6009 User Guide and Specifications*. National Instruments (Hrsg.): <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303k.pdf> (Stand: 12/2007), Zugriff am 29.04.2008.
- [87] N. N.: *Reparatur von QFN – Keine Kompromisse!* FINETECH GmbH & Co. KG (Hrsg.): http://www.finetech.de/files/8e4588eede31de3c3cb9191b99c07211/obj682/QFN_deu_Nachbericht.doc (Stand: 13.06.2008), Zugriff am 15.09.2008.
- [88] N. N.: *Sensorbaugruppe BTF 11356A*. CiS Institut für Mikrosensorik (Hrsg.): Datenblatt Betaungssensor, Stand 13.10.2006.
- [89] N. N.: *Sensorbaugruppe BTF 11357A*. CiS Institut für Mikrosensorik (Hrsg.): Datenblatt Feuchtesensor, Stand 13.10.2006.
- [90] N. N.: *SlimKIC® 2000 Data Sheet*. KIC (Hrsg.): <http://www.kicthermal.com/products/SlimKIC-2000-en.pdf> (Rev. 0608A), Zugriff am 05.08.2008.
- [91] Neher, W.; Sauer, W.: Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Aufbautechnik an elektronischen Baugruppen für den Hochtemperatureinsatz im Kfz. In: *GMM-Fachbericht 44, Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik; Die Trends von heute – die Chancen von morgen*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2004, S. 139-146.
- [92] Niebling, R.: 3D-Messung inline. AOI von Lotpastendepots. In: *productronic*, Heft 11 (2006), S. 60-61.
- [93] Nolte, J.; Cannon, M.: Warum Hybrid-Rework? In: *EPP - Elektronik Produktion & Prüftechnik*, Heft 1-2 (2008), S. 18-19.
- [94] Nüchter, W.: Anforderungen und Methoden für die Freigabeprüfung hochbelasteter Baugruppen. In: *GMM-Fachbericht 44, Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik; Die Trends von heute – die Chancen von morgen*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2004, S. 281-286.
- [95] Pape, U. et al.: Einfluss der Prozessparameter auf die Porenbildung. In: *GMM-Fachbericht 44, Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik; Die Trends von heute – die Chancen von morgen*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2004, S. 361-366.

- [96] Pecht, M. et al.: Conductive Filament Formation: A Potential Reliability Issue in Laminated Printed Circuit Cards with Hollow Fibers. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Volume 22 (1999), Issue 1, pp. 80-84.
- [97] Peinsipp, N; Roos, G.; Weimer, G.: *Röntgenverordnung RöV - Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen in der Neufassung vom 30. April 2003*. 5. Auflage. Heidelberg: Forkel Verlag GmbH, 2003.
- [98] Poech, M.: Schädigungsmechanismen in bleifreien und bleihaltigen Lötverbindungen bei erhöhter Temperatur. In: *GMM-Fachbericht 44, Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik; Die Trends von heute – die Chancen von morgen*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2004, S. 273-280.
- [99] Powers, F. W.; Nicastri, P. R.: Automotive vehicle control challenges in the 21st century. In: Glattfelder, A. H. (Hrsg.): *Control Engineering Practice 8* (2000), pp. 605-618.
- [100] Reinhardt, A.; Feldmann, K.: *Verarbeitung von Bauelementen mit SnAgCu-Lotkugeln auf niedrig schmelzenden Loten*. In Tagungsband: *Folienschaltungen - Innovative Produktgestaltung und Prozesse*, FAPS-TT GmbH, Nürnberg, 4. Dezember 2007.
- [101] Riepl, T. et al: Leiterplatten für den Einsatz im KFZ mit erhöhten Anforderungen. In: *GMM-Fachbericht 44, Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik; Die Trends von heute – die Chancen von morgen*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2004, S. 133-138.
- [102] Rösch, M; Kozic, D.; Feldmann, K.: Qualifizierung des Schablonendrucks unter Verwendung nanobeschichteter SMT-Druckschablonen. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS)*, Heft 11 (2007), S. 2175-2179.
- [103] Rösch, M; Kozic, D.; Feldmann, K.: Eigenschaften und Potenziale von nanobeschichteten SMTDruckschablonen. In: *GMM-Fachbericht 55, Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 - Systemintegration und Zuverlässigkeit*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2008, S. 145-150.
- [104] Sauer, W.: *Prozesstechnologie der Elektronik - Modellierung, Simulation und Optimierung der Fertigung*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2003.
- [105] Schade, D. et al.: Multifunktionstester für die Automatisierte Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Baugruppen. In: *GMM-Fachbericht 55, Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 - Systemintegration und Zuverlässigkeit*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2008, S. 377-383.
- [106] Scharnbacher, K; Holland, H.: *Grundlagen statistischer Wahrscheinlichkeiten: Kombinationen, Wahrscheinlichkeiten, Binomial- und Normalverteilung, Konfidenzintervall, Hypothesentests*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2004.
- [107] Schilpp, A.: Zuverlässigkeit von Leiterplatten für den Automotive-Einsatz. In: *GMM-Fachbericht 44, Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik; Die Trends von heute – die Chancen von morgen*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2004, S. 147-152.

- [108] Schilpp, A.; Kostelnik, J.: Flexible Leiterplatten für zuverlässige und frei räumlich gestaltbare Mikrosysteme. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS)*, Heft 8 (2005), S. 1463-1468.
- [109] Schimpf C.: Einsatzpotenziale von Rapid-Technologien bei der Reparatur von elektronischen Bauelementen auf Folienschaltungen. In Gebhardt A. (Hrsg): *RTejournal - Forum für Rapid Technologie*, Ausgabe 4 (2007), URL: <http://www.rtejournal.de/archiv/ausgabe4/1205/> (Stand 28.10.2007), Zugriff am 19.09.2008.
- [110] Schimpf, C.: *Lösbare Direktkontaktierung von MID-Baugruppen mit Folienflächleitern*. In Tagungsband: Innovative Anwendungen der MID-Technik, Hahn-Schickard-Gesellschaft Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT), Stuttgart, 10. Oktober 2007.
- [111] Schimpf, C.: Lösbare Verbindungstechnik für die Kontaktierung von Folienflächleitern mit MID-Baugruppen. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS)*, Heft 12 (2007), S. 2432-2437.
- [112] Schimpf, C.: Qualitätsverbesserung bei der Nacharbeit von elektronischen Baugruppen durch den Einsatz von Rapid-Technologien. In Zäh, M., Reinhardt, G. (Hrsg.): *Seminarberichte 85, 3D-Erfahrungsforum Innovation im Werkzeug- und Formenbau*. München: Herbert Utz Verlag, 2007, S. 14-1 - 14-7.
- [113] Schimpf, C. et al.: Failure of electronic devices due to condensation. In Michel B.; Bhushan, B. (Hrsg): *Microsystem Technologies*. Online Ausgabe, URL: <http://www.springerlink.com/content/c27195251kt3q7w8/fulltext.pdf>. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. Stand: 06.06.2008, Zugriff am 19.09.2008.
- [114] Schimpf, C.; Enser, W.: Kontaktkünstler - Flachleiter für mechatronische Baugruppen im KfZ. In: *Elektromechnik I, Elektronik Praxis*, Sonderheft 3 (2006), S. 90-92.
- [115] Schimpf, C.; Feldmann, K.: *Analyse und Optimierung der Prozesswärmeführung zur qualifizierten Nacharbeit von Baugruppen*. In Tagungsband: Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, FAPS-TT GmbH, Nürnberg, 29. November 2005.
- [116] Schimpf, C.; Feldmann, K.: *Herausforderungen und Lösungskonzepte zur gesicherten Nacharbeit von Folienschaltungen*. In Tagungsband: Folienschaltungen - Innovative Produktgestaltung und Prozesse, FAPS-TT GmbH, Nürnberg, 4. Dezember 2007.
- [117] Schimpf, C.; Feldmann, K.: *Neue Konzepte zur lösbaren Direktkontaktierung von Folienflächleitern mit MID-Baugruppen*. In Tagungsband: Folienschaltungen - Innovative Produktgestaltung und Prozesse, FAPS-TT GmbH, Nürnberg, 5. Dezember 2006.
- [118] Schimpf, C.; Feldmann, K.: *Untersuchungen zur alternativen Temperaturermittlung in der bleifreien Nacharbeit von BGA-Bauelementen*. In Konferenzband: 14. FED Konferenz Elektronik-Design - Leiterplatten - Baugruppen 2006, Fachverband Elektronik-Design e. V., Kassel, 21.-23. September 2006.

- [119] Schimpf, C.; Rösch, M.; Feldmann, K.: Zuverlässigkeit von nachgearbeiteten Baugruppen. In: *GMM-Fachbericht 50, Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik - Erfolg durch Innovation*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2006, S. 268-273.
- [120] Schmitt, S.: *Einfluss von Betauung und Feuchteadsorption auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen*. 1. Auflage. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 1999.
- [121] Scholz, O. et al.: In situ real-time x-ray quality assessment of BGA and μ BGA connections during soldering. In: *Testing, reliability, and application of micro- and nano-material systems (Proceeding Series Vol. 5045)*, Bellingham (WA) USA: SPIE Verlag GmbH, 2003, S. 147-156.
- [122] Schweigart, H.: Humidity and pollution Effects on electronic equipment. In: Reichert, T. (Hrsg.): *Climatic and Atmospheric Pollution Effects on Materials and Equipment*. Pfinztal: Gesellschaft f. Umweltsimulation, 1999.
- [123] Seidel, S.: Herstellung von Serienwerkzeugen mittels Metallfolien-LOM. In Zäh, M., Reinhardt, G. (Hrsg.): *Seminarberichte 85, 3D-Erfahrungsforum Innovation im Werkzeug- und Formenbau*. München: Herbert Utz Verlag, 2007, S. 10-1 - 10-7.
- [124] Seidel, S; Schmidt, M.: *Mikro-LOM - Lasergestützter Schichtaufbau in der Feinwerktechnik*. In Tagungsband: Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik (LEF), Bayerisches Laserzentrum GmbH, Erlangen, 7.-8. März 2006.
- [125] Steffen, H.: *Leiterplatten für Hochtemperaturanwendungen*. In Tagungsband: 12. Workshop Mikrotechnische Produktion Technologien für die Hochtemperatur-elektronik & HDI- und Hochtemperatur-Baugruppen, Kompetenznetzwerk Mikrotechnische Produktion, Dresden, 27.-28. April 2004.
- [126] Stein, U.: *Einstieg in das Programmieren mit MATLAB*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [127] Steinke, A.; Brokmann, G.; March, B.: *Neue Mikrosensoren in der Bauwerksdiagnostik*. In Tagungsband: Feuchtetag 99. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin-Lichterfelde, 7.-8. Oktober 1999.
- [128] Steinke, A. et al.: Improved Reliability Tests for Electric Components by Innovative Micro Condensation Sensors. In Gessner T. (Hrsg.): *SMART SYSTEMS INTEGRATION 2007*, Berlin Offenbach: VDE Verlag, 2007, S. 329-332.
- [129] Suppa, M.: Prüf- und Teststrategie Schutzlacke und Lotpasten und Prozesse. In: *GMM-Fachbericht 55, Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 - Systemintegration und Zuverlässigkeit*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2008, S. 157-163.
- [130] Veprik, A. M.; Babitsky, V. I.: Vibration protection of sensitive electronic equipment from harsh harmonic vibration. In: *Journal of Sound and Vibration*, Volume 238 (2000), pp. 19-30.

-
- [131] Vogl, G.: *Umweltsimulation für Produkte - Zuverlässigkeit steigern, Qualität sichern*. Würzburg: Vogel Verlag, 1999.
- [132] Wikipedia: *Elektrochemische Spannungsreihe* - Wikipedia. Wikimedia Foundation Inc. (Hrsg.): http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrochemische_Spannungsreihe (Stand: 02.04.2008), Zugriff am 28.04.2008.
- [133] Wikipedia: *Vierletermessung*. Wikimedia Foundation Inc. (Hrsg.): <http://de.wikipedia.org/wiki/Vierletermessung> (Stand: 11.06.2008), Zugriff am 25.08.2008.
- [134] Wilde, J.: *Methoden zur Zuverlässigkeitsqualifizierung neuer Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik*. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2006.
- [135] Wilker, H.: *Weibull-Statistik in der Praxis (Band 3) - Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Produkte*. Norderstedt: Books on Demand, 2004.
- [136] Wölflick, P.: *Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.
- [137] Wood, P.; Park, M.: 10 Steps to lead-free Array Package Rework. In: *Global SMT & Packaging*, Issue 1 (2004), pp. 10-15.
- [138] Yamamoto, T.: Easy-to-read "Features of environmental testing" (Part 1). In: *ESPEC Technology Report*, Issue 10 (2000), pp. 8-18.
- [139] Zäh, M.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [140] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.(ZVEI) (Hrsg.): *2008 wieder Wachstum bei elektronischen Komponenten - Presseinformation Pr-95/2008*: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse/2008/Pr2008-095.pdf (Stand 23.06.2008), Zugriff am 01.09.08.
- [141] Zerna, T.: *Das Verbundprojekt „hotEL“*. In Tagungsband: 12. Workshop Mikrotechnische Produktion Technologien für die Hochtemperaturelektronik & HDI- und Hochtemperatur-Baugruppen, Kompetenznetzwerk Mikrotechnische Produktion, Dresden, 27.-28. April 2004.
- [142] Zhai, C. J.; Sidharth, Blish, R. II: Board level solder reliability versus ramp rate and dwell time during temperature cycling. In: *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Volume 3 (2003), Issue 4, pp. 207-212.

Summary

To ensure the functioning of electronic modules as an integral part of products and systems in all areas of everyday life, for example in automobiles or medical technology, an intensive examination of aspects of reliability – already during its development phase – is required. In this process the estimation of the expected durability and especially the comparison of different variants of constructions or loads become more and more important. Among other things the growing variety of versions and the constantly shortened periods between the start of the development phase and the introduction on the market are important challenges. By opening new installation spaces for electronic products also other environmental influences impact on the packaging of integrated circuits, whose effects are to be examined with appropriate test procedures. The shown tendency of using electronics closed to actuators and sensors leads to a decrease of significant results of established testing strategies because specific aspects cannot be considered adequately.

The described results evolved from diverse research projects, which dealt with different emphases on securing the permanent functional capability of applications with electronic modules. The main intention was to contribute to the optimization of reliability testing, testing procedures and rework processes within the electronic production. The obtained individual results and the ancillary procedure, which can be transferred to similar problems in the future, were most important.

In the qualification process the definition of the reliability usually takes place with accelerated ageing processes before the introduction of the product. This paper shows how diverse variants of construction partly supplied oppositional results concerning processability and reliability. The optimization of parameters for the increasing of the cycle strength by means of further analysis like the transferring of soldering paste with screen printing has to be evaluated critically. Moreover the analysis of the online resistance measurements showed that simplified test setups resulted in a minor accuracy of results compared to the high-precision four point measurements, but nevertheless could deliver sufficient results.

The significance of standardized test loads and the determination of related key figures is always limited if new emerging system designs or loads apply. The example of a new contacting procedure for molded interconnect devices with flexible flat cables showed how deep insights about the complete system were won through adapted test steps and the application of supplementing test procedures. The difference between the comparatively evaluated surface metallization tin and nickel/gold could be quantified with high precision. The resulting possibility was to specify the limits for the application of tin surfaces. The testing of new loads – like shown in this paper by means of self-heating of components under highly increased ambient temperature – showed that through the specification of a failure criterion a change of the malfunction mechanism wasn't necessarily identifiable. Hence the recommendation can be given to apply as many different evaluation procedures as possible.

Additional to this a totally new test procedure was designed for the environmental impact of bedewing of humidity on the surface of electronic modules. The development focused on the methodical examination of the aspects of the electrochemical migration's failure mechanism, the specification of influencing factors and assessment criteria previous to the conceptual design of the test interconnect devices and the test series realization. The maximum insight was gained by this methodical procedure, especially concerning the necessity of a cleaning process when using no-clean soldering paste for modules vulnerable to bedewing. All examinations showed impressively how the conception and realization of qualification steps and test procedures could increase the significance of the results remarkably.

In the field of process analysis an innovative measuring method for the temporal precise identification of the phase transitions of soldering balls in ball grid arrays (BGA) components during the soldering process in rework was developed. It was possible to record the dynamic behavior of remelting – peripheral and central measuring points being separated under a BGA – by measuring the electric forward resistance of paired BGA balls. A basis for a new evaluation of optimization measures could be built up by varying the temperature profile parameters.

In addition to the conventional basis material for printed circuit boards more and more modules with alternative substrate material for applications with specific requirements are going to be used. To this limp foil connections with complex components, like BGAs, are also going to be applied. A new operation device, which allowed for an efficient repair of components on foil substrates, was planned and assembled exemplarily because available rework systems are designed for rigid boards. Thereby an integrated temperature sensor was able to record the actual thermal conditions in a considerably better way than previous systems and thus provided a basis for the minimization of the thermal load.

Within the scope of this paper new insights in the methodical planning and realization of reliability testing, test procedures and the analysis of soldering processes in rework were won. The adaptation of existing procedures to specific problems and – as far as necessary – the developments of new solutions for coping with the challenges were of central importance.