



Abschlussbericht

RoBE – Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen

| | |
|---|---------------------------------------|
| Zuwendungsempfänger: Conti Temic microelectronic GmbH | Förderkennzeichen: 16N11463 |
| Teilvorhabensbezeichnung: Robustheit für Bonds in Steuergeräten für E-Fahrzeuge | |
| Projektleiter des Teilvorhabens: Frank Fella | |
| Tel.: 0911/9526 4442 Email: frank.fella@continental-corporation.com | |
| Laufzeit des Vorhabens (Bewilligungszeitraum): von: 01.08.2011 bis: 31.10.2014 | |

1. Inhalt

| | |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | 2 |
| 2. Kurzdarstellung des Vorhabens | 4 |
| 2.1. Aufgabenstellung..... | 4 |
| 2.2. Randbedingungen vor und während der Projektlaufzeit | 5 |
| 2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens | 8 |
| 2.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde | 11 |
| 2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 15 |
| 3. Erzielte Ergebnisse..... | 17 |
| 3.1. Ausfall- und Fehlermechanismen von Bondverbindungen für Hochstrom-anwendungen..... | 17 |
| 3.1.1. Rissbildung im Heelbereich des Bonddrahtes..... | 17 |
| 3.1.2. Rissbildung im Interface der Bondverbindung (Bonddraht/Halbleiter) | 18 |
| 3.2. Methoden zur Bewertung der Qualität der Bondverbindungen..... | 19 |
| 3.3. Testmethoden zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Bondverbindungen | 20 |
| 3.3.1. Vibration-/ Shakertest | 21 |
| 3.3.1. Mechanischer Biegewechseltest | 21 |
| 3.3.2. Active Powercycling..... | 23 |
| 3.3.3. Demonstrator | 23 |
| 3.4. Ansatzpunkte zur Robustheitssteigerung drahtgebondeter Aufbauten | 24 |
| 3.5. Systematische Optimierung der Bondparameter | 25 |
| 3.5.1. Parameterauswahl und DoE..... | 25 |
| 3.5.2. Zielgrößenoptimierung..... | 28 |
| 3.5.3. Effekt der Bondparameteroptimierung | 30 |
| 3.6. Charakterisierung von Bondverbindungen mittels EBSD (Electron backscatter diffraction) .. | 31 |
| 3.6.1. Analyse des Ausgangsdrahtes | 32 |
| 3.6.2. Analyse initialer Bondverbindungen | 33 |
| 3.6.3. Analyse prozesstechnisch bedingter thermischer Beeinflussung beim Demonstratoraufbau | 36 |
| 3.6.4. Analyse von Bondverbindungen auf Demonstratorebene nach Active-Powercycling .. | 38 |
| 3.6.5. Vergleich der Mikrostruktur auf Demonstratorebene vor und nach Active Powercycling . | 40 |
| 3.6.6. Zusammenfassung der EBSD-Analysen | 42 |
| 3.7. Materialänderungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit | 43 |
| 3.7.1. Untersuchung der mechanischen Eigenschaften mithilfe des mechanischen Biegewechseltests | 43 |
| 3.7.2. Vergleich der Stromtragfähigkeit | 47 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.7.3. | Auswirkung der Materialänderung (CuCorAl-Bonddraht) auf die Lebensdauer gebondeter Module im Active-Powercycling..... | 49 |
| 3.8. | Analyse des Einflusses der Oberflächenrauheit auf die Bondqualität | 52 |
| 3.8.1. | Ziel der Untersuchungen | 52 |
| 3.8.2. | Versuchsbeschreibung | 52 |
| 3.8.3. | Kennwerte und Definitionen der Oberflächenrauheit | 53 |
| 3.8.4. | Technologie, Parameter und Material | 54 |
| 3.8.5. | Bestimmung der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Vorschub-geschwindigkeit und Messrichtung | 55 |
| 3.8.6. | Zusammenfassung der Ergebnisse für den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Bondqualität..... | 61 |
| 4. | Kurzzusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse..... | 62 |
| 5. | Voraussichtlicher Nutzen..... | 63 |
| 6. | Veröffentlichungen..... | 64 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Arbeitsteilung zwischen den Verbundpartnern im Projekt RoBE | 11 |
| Abbildung 2: | Mikrorisse am Heel nach dem Bonden | 17 |
| Abbildung 3: | Riss im Heelbereich eines Al-Bonddrahtes..... | 17 |
| Abbildung 4: | Bond Lift-Off | 18 |
| Abbildung 5: | Verstärkte Bonddegradation – bei gleicher Lastwechselzahl – durch Lotschädigung..... | 19 |
| Abbildung 6: | Prinzip Schertest | 19 |
| Abbildung 7: | Auswertung Schertest an Al-Bondverbindung | 19 |
| Abbildung 8: | Wedgebreite in Abhängigkeit der Bondleistung | 20 |
| Abbildung 9: | Kritische Bondverbindungen für Biegewechselbelastung bei T-Zyklen | 21 |
| Abbildung 10: | Aufbau mechanischer Biegewechseltest | 22 |
| Abbildung 12: | Aufbau Demonstrator | 23 |
| Abbildung 11: | Temperaturverlauf im Powercycling..... | 23 |
| Abbildung 13: | Rissausbreitung im Interface einer Bondverbindung | 24 |
| Abbildung 14: | Übersicht der näher untersuchten Drahtmaterialien | 25 |
| Abbildung 15: | Prinzip der Parametervariation..... | 26 |
| Abbildung 16: | Wedge-Deformation | 26 |
| Abbildung 17: | Auswertung der Scherflächen | 26 |
| Abbildung 18: | Boxplot der Scherkräfte..... | 27 |
| Abbildung 19: | Zielgrößenoptimierung mittels Minitab-Software..... | 28 |
| Abbildung 20: | Verlauf Bond Force & Bond Power klassische und neu Bondstrategie | 29 |
| Abbildung 21: | Weibull-Statistik des Powercyclings..... | 30 |
| Abbildung 22: | [001]IPF Karte eines nicht gebondeten Al-Drahtes..... | 32 |
| Abbildung 23: | Korngrößenanalyse eines nicht gebondeten Al-Drahtes | 32 |
| Abbildung 24: | Korngrößenanalyse von Bonddraht a.) Baseline, b.) Opt.1 direkt nach dem Bondprozess..... | 33 |
| Abbildung 25: | Analyse der Korngröße oberhalb des Si-Substrates im Wedgebereich a.) Baseline, b.) Opt.1 | 34 |
| Abbildung 26: | [001] IPF Karte des Bonddraht a.) Baseline und b.) Opt.1 direkt nach dem Bondprozess..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 27: IPF Karte oberhalb des Silizium-Chips von Probe <i>Baseline</i> | 36 |
| Abbildung 28: Vergleich der Korngröße unterschiedlich gebondeter Drähte nach prozesstechnisch bedingter thermischer Beeinflussung | 37 |
| Abbildung 29: Korngrößen in Abhängigkeit der Bondparameter | 38 |
| Abbildung 30: Vergleich der Korngröße unterschiedlich gebondeter, prozessierter und gezykelter Drähte | 38 |
| Abbildung 31: Korngrößen in Abhängigkeit der Bondparameter nach zyklischer Belastung | 39 |
| Abbildung 32: Vergleich der Kornorientierung unterschiedlich gebondeter, prozessierter und gezykelter Drähte | 39 |
| Abbildung 33: Korngrößen vor zyklischer Belastung | 40 |
| Abbildung 34: Korngrößen nach zyklischer Belastung | 40 |
| Abbildung 35: Vergleich der Korngröße von Probe Opt.1 (Bond 2 und Bond 3) vor und nach APC | 41 |
| Abbildung 36: Kristallorientierungen ([001]-IPF) vor Active-Powercycling | 41 |
| Abbildung 37: Kristallorientierungen ([001]-IPF) nach nach Active-Powercycling | 42 |
| Abbildung 38: Lastwechselzahl versch. Drahtmaterialien im mech. Biegewechseltest | 44 |
| Abbildung 39: REM-Analyse ausgefallener Cu-Bondverbindungen | 45 |
| Abbildung 40: Oberflächenanalyse SEM | 45 |
| Abbildung 41: SEM-Analyse FIB-Schnitt | 46 |
| Abbildung 42: Messaufbau Thermografie/Stromtragfähigkeit | 47 |
| Abbildung 43: Thermografie paralleler Drahtbondverbindungen (n=7) | 47 |
| Abbildung 44: $\Delta T[K]$ in Abhängigkeit von $I[A]$ Abbildung 45: $\Delta T[K]$ in Abhängigkeit von n | 48 |
| Abbildung 46: CuCorAl 400 μm vs . Al 400 μm | 49 |
| Abbildung 47: CuCorAl 300 μm , Cu 300 μm vs . Al 300 μm | 49 |
| Abbildung 48: Cycles to Failure im Power Cycling gelöteter Aufbauten | 50 |
| Abbildung 49: Cycles to Failure im Power Cycling gesinterter Aufbauten | 51 |
| Abbildung 50: Oberfläche einer gefrästen Grundplatte | 52 |
| Abbildung 51: Ermittlung des R_z -Wertes | 53 |
| Abbildung 52: Ermittlung des R_a -Wertes | 53 |
| Abbildung 53: Messrichtung für Nanofokussmessungen | 55 |
| Abbildung 54: Rauheitskennwerte in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Messrichtung | 55 |
| Abbildung 55: Graphische Darstellung der Rauheit in Abh. von Vorschubgeschwindigkeit und Messrichtung | 56 |
| Abbildung 56: Boxplot Scherkraft über R_z -Wert | 57 |
| Abbildung 57: Scherwert und Bruchcode über R_z -Wert | 57 |
| Abbildung 58: ANOVA: Vergleich der einzelnen Stichproben (Scherwerte)_Teil 1 | 57 |
| Abbildung 59: ANOVA: Vergleich der einzelnen Stichproben (Scherwerte)_Teil 2 | 57 |
| Abbildung 60: Nanofokus Profilschnitt | 59 |
| Abbildung 61: Nanofokussmessung nach ISO4287 | 59 |
| Abbildung 62: Boxplot Scherkraft über R_z -Wert | 60 |
| Abbildung 63: Hypothesentest auf Standardabweichung für zwei Stichproben | 60 |
| Abbildung 64: Boxplot Scherkraft über R_z | 61 |

2. Kurzdarstellung des Vorhabens

2.1. Aufgabenstellung

Das Projekt „**RoBE – Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen**“ widmete sich dem ambitionierten Ziel, die sichere Vorhersage der Zuverlässigkeit von Bonddrahtverbindungen insbesondere für leistungselektronische Komponenten und deren Aufbau- und Verbindungstechnik zu gewährleisten, im Design- & Herstellprozess abzusichern sowie die Lebensdauer von Bonddrahtverbindungen signifikant zu verlängern. Diese Herausforderung betrifft sowohl gegenwärtige Hybrid- und Verbrennungsmotorkonzepte als auch zukünftige Elektroantriebe, da beide gleichermaßen von effizienten Elektrifizierungsansätzen abhängig sind.

Durch die Konzepte möglicher Smart-Grid-Integrationen erreichen die Anforderungen an die Verfügbarkeit im Bereich Leistungselektronik den Level von Infrastruktursystemen der Fahrzeugflotten. Die Bondverbindungstechnik hat sich dabei in der Leistungselektronik als höchstflexible, wirtschaftliche, zuverlässige und gewichtseffiziente Kontaktierungstechnik mit Großserientauglichkeit etabliert. Die Verbundpartner des Projekts **RoBE** waren und sind davon überzeugt, dass diese Vorteile auch zukünftig bestehen und bis ins Jahr 2020 durch keine andere Technologie verdrängt werden können. Daher stellte sich zu Beginn des Projekts die zentrale Aufgabe, die Bondverbindung bezüglich der neuen Anforderungen weiter zu ertüchtigen. Zur Absicherung der Zuverlässigkeit künftiger Leistungselektronik einhergehend mit einer stetigen Zunahme der Hochstrombonds durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen, muss jede einzelne Bondverbindung bei ihrer Herstellung eine Mindestlebensdauer garantieren. Diese zuverlässige Prognostizierbarkeit ist üblicherweise nicht ohne zerstörende Prüfung möglich. Des Weiteren erwiesen sich die heutigen Bondverbindungen in der Großserien-Leistungselektronik als die limitierende Schwachstelle hinsichtlich der Lebensdauer. Eine zentrale Vorgabe für das Projekt war daher, diese mindestens zu verdoppeln.

Zur Lösung dieser Themen war die Einbeziehung aller Mitwirkenden entlang der Prozesskette unter Betrachtung der mechatronischen Wechselwirkungen von Modul- bis Gesamtfahrzeugebene notwendig. Ein wichtiger Hebel zur weiteren Optimierung war auch der Einsatz von modifizierten Werkstoffen für den Draht und die Kontaktierungsfläche. Dabei wurden auf Basis von Simulationsergebnissen beispielsweise die Eigenschaften für die Oberfläche und

den Kern des Drahtes gezielt modelliert. Des Weiteren war die Geometrie der Verbindungsstelle anzupassen. Zusammen mit einer abgestimmten Prozesstechnik ergaben sich damit weitere Stellschrauben. Eine vielversprechende zukünftige prozesstechnische Alternative zu den klassischen Bondverfahren stellt das Laserstrahl-Mikroschweißen dar, welches als ein ergänzendes Fertigungsverfahren zum Bonden von Drähten und Bändchen mit Abmessungen im Bereich 100 - 500 µm erprobt wurde. Damit sollten auch mögliche technologische und ökonomische Vorteile erschlossen werden. Drähte und Bändchen sollten direkt auf die Leiterbahnen der Keramiksubstrate und Halbleiterbauelemente geschweißt werden. Durch dieses Verfahren kann u.a. auf zusätzliche, mit weiterem Aufwand verbundene Beschichtungen verzichtet werden, da ein großes Werkstoffspektrum beim Laserstrahl-Mikroschweißen bereits erprobt ist.

Überdies gab es im Verbund die Bestrebung, hochstromtragfähige Verbindungen mit großem Anbindungsquerschnitt ohne mechanische Schädigung der Substrate zu realisieren. Die Architektur der Baugruppen musste dabei nicht verändert werden. Die erfolgreiche Realisierung dieser Verfahrens- und Maschinenteknik bringt deutliche Vorteile hinsichtlich Robustheit, Effizienzsteigerung, Kostenreduzierung sowie Designfreiheit in der Aufbau- und Verbindungstechnik für Leistungsmodule mit sich.

Die im Rahmen des Projektes **RoBE** durchgeführten Simulationen und Charakterisierungen sollten zudem Beiträge für ein umfassendes Lebensdauermodell für die Drahtbondverbindung liefern. Dadurch sollte ein zuverlässiger Bondprozess mit vorhersagbarer Lebensdauer und die Etablierung von Konzepten für Health-Monitoring zur Steigerung der Einzel- und Systemzuverlässigkeit von Fahrzeug, Flotte und Smart Grid gewährleistet werden.

2.2. Randbedingungen vor und während der Projektlaufzeit

Das Vorhaben adressierte die wesentlichen Aspekte der Bekanntmachung des BMBF, mit der die Forschung im Bereich der Elektromobilität gefördert wird. Im Einzelnen wurde die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Robustheit aller elektrischen/elektronischen Komponenten (inkl. Modellierung, Simulation und Test) gesteigert, indem gezielt eine Schlüsseltechnologie zur Kontaktierung verbessert wurde. Veränderungen der Drahteigenschaften und Prozess-

bzw. Verfahrensführung basierten u.a. auch auf neuen Materialien für die Leistungselektronik und die Aufbau- und Verbindungstechnik. Das Lebensdauermodell für den Drahtbond beruhte u.a. auf werkstofftechnischen Erkenntnissen, die von den Firmen zeitnah und beschleunigt in industrielle Prozesse (z. B. Methodenentwicklung oder Tests) transferiert wurden. Durch die Entwicklung und Bewertung einer Kontaktierung mittels Laserstrahl-Mikroschweißen auf einer Drahtbondplattform wurde eine alternative werkstoff- und verfahrensorientierte Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität verfügbar. Damit verbunden wurden Möglichkeiten neuer Materialien für die Aufbau- und Verbindungstechnik erschlossen. Als wirtschaftlich handelnde Organisationen standen Forschung und Entwicklung zur Kostenreduktion durch Prozess- und Systemvereinfachungen bei allen Partnern in der Anforderungsliste.

Abgrenzung zu bereits öffentlich geförderten F&E-Vorhaben

Audi zeigte mit dem Forschungsprojekt „**e-performance**“ einen nachhaltigen Willen, das Thema Elektrotraktion ganzheitlich in Deutschland mit Industrie und Wissenschaft anzugehen. **RoBE** wurde hierzu in die bestehenden Aktivitäten integriert, wodurch ein enger Austausch sichergestellt wurde. Durch die momentan anlaufende Produktion der e-tron Modelle in Deutschland ist es zwingend erforderlich, das notwendige Know-How in Deutschland auf- und auszubauen. Ziel des Projektes „**Tesimat**“ war dazu die Schaffung verbesserter Grundlagen der Zuverlässigkeits- und Lebensdauerbeurteilung von mikro- und nanoelektronischen Komponenten und Systemen. Das Projekt unterschied sich insbesondere in den Dimensionen der betrachteten Komponenten und damit auch in den Modellen. Ziel des Vorhabens „**Wirecoat**“ war die Entwicklung, Verallgemeinerung und die Bereitstellung von abgestimmten Bondtechnologien und Prozessparametern für dünne, beschichtete Drähte auf vollautomatischen Wedge/Wedge-Bondmaschinen. Zur grundlegenden Evaluierung des Einsatzverhaltens unterschiedlicher beschichteter Drähte wurden dazu verschiedene Bonddraht-Beschichtungskombinationen auf ausgewählten Chip/Substratvarianten verarbeitet und die Bondbarkeit und Zuverlässigkeit mit üblichen Bewertungsverfahren charakterisiert. Die für das Projekt ausgewählten Drahtgeometrien und Werkstoffkombinationen sind für leistungselektronische Anwendungen allerdings ungeeignet. Ziel des Vorhabens „**CoMoLeFo**“ war die Entwicklung einer modellbasierten Messtechnik zur Prognose der Verfügbarkeit der Leistungselektronik für die Photovoltaik. Als Kontaktierungsverfahren beim Aufbau von Leistungsmodulen wurde das Schweißen mit schnell modulierter Laserstrahlung im Rahmen der

Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität untersucht. Kernaspekt dieser Arbeiten war jedoch die Verbindung zwischen dem Substrat (DCB oder DAB) und Stromkontakten (Leadframes oder Kontaktfinnen) auf Modulebene. Die Substitution von Bondtechniken bzw. die Kontaktierung auf Chipenebene waren nicht Bestandteil des Vorhabens.

Das Schweißen mit örtlicher Leistungsmodulation war als Alternative zum Punktschweißen ebenfalls Bestandteil des Projekts „*Self-adapting laser joining system for fast reconfigurable production systems – LASERDAPT*“ im Rahmen des Projekts „**MANUNET**“. Dort wurden unter anderem Verfahren zur Drahtkontaktierung und zur Montage von Solarmodulen untersucht; die werkstofftechnischen Aspekte, sowie die angestrebte Integration in eine Bondmaschine mit ihren spezifischen Randbedingungen verdeutlichen die Unterschiede zum Forschungsvorhaben **RoBE**. Die Forschungsinstitute verstehen sich grundsätzlich als wechselseitige Multiplikatoren und unterstützen bzw. beschleunigen damit die gemeinsame Nutzung der Grundlagen für die Entwicklungsprozesse der jeweiligen Projekte.

Industrielle und gesellschaftliche Relevanz des Themas

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) sind die Schlüsselkomponenten in modernen leistungselektronischen Systemen. Die Lebensdauer von IGBT hängt im Wesentlichen von der Quantität (Anzahl) und der Qualität (Höhe) der Lastzyklen ab. Dabei stellt der Drahtbond heute die lebensdauerlimitierende Schwachstelle dar. In der Vergangenheit überwogen Ausfälle der Lotverbindungen. Diesem Umstand wurde durch erhebliche Maßnahmen bei Design und Materialauswahl begegnet. An Alternativen zur Drahtbondverbindung wird derzeit in unterschiedlichen Ansätzen geforscht, allerdings erweisen sich die Kostenvorteile sowie die Erfahrungen mit dieser Technologie als sehr dominant. Zudem steht auch eine neue Technologie vor der Herausforderung, Materialien mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften zuverlässig zu verbinden und thermische Wechselbelastungen werden auch weiterhin Ermüdungseffekte provozieren. Dies führt dazu, dass neue Technologien für das Szenario 2020 nicht in Frage kommen. Die Anzahl der Bondverbindungen im E-Fahrzeug im Vergleich zum Fahrzeug mit konventionellem Verbrennungsmotor steigt jedoch um den Faktor 20 bis 50. Die Bedeutung der einzelnen Bondverbindung bezüglich Sicherheits- und Kundenrelevanz rückt daher in den Vordergrund.

Die aktuelle Praxis der mehrfach redundanten Bondverbindungen, Lebensdauerprognosen auf Basis ähnlicher Projekte sowie statistischer Lebensdaueraussagen nach Feldeinsatz sind bezüglich funktionaler Sicherheit, Rückstellung von Gewährleistungskosten, Verfügbarkeit für das Smart Grid eine ungenügende Grundlage für einen risikokontrollierten Einsatz von Elektrofahrzeugen in größeren Stückzahlen. Für den risikokontrollierten Einsatz muss die Lebensdauer jeder einzelnen Bondverbindung mit ihrer Herstellung abgesichert und prognostizierbar sein. Die Lösung dieser ungelösten Fragestellung ist Schwachstelle und damit Grundlage für einen robusten, effizienten und kostenoptimalen Einsatz der Leistungselektronik in Automobilen.

2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Aktivitäten zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Leistungselektronikmodulen wurden im Forschungsvorhaben **RoBE** aus drei parallelen Stoßrichtungen angegangen:

- Optimierung der AVT leistungselektronischer Module durch tiefgreifende Analyse und Modellierung der Wirkungen der einzelnen Prozessparameter auf die Lebensdauer des Endsystems bereits in der Entwicklungsphase und während der Anwendung industriegängiger Prozesse
Ziel: Prognostizierbare Lebensdauer der einzelnen Bondverbindungen
- Entwicklung innovativer Kontaktierungskonzepte durch Einsatz alternativer Materialien und Prozessabläufe auf Basis der erlangten Erkenntnisse
Ziel: Abgesicherte Verlängerung der Lebensdauer der Kontaktierung
- Health Monitoring einschließlich der notwendigen Modelle
Ziel: Steigerung der Einzel- und Flottenzuverlässigkeit für die Smart Grid Infrastruktur

Mit dem Ziel, bestehende Prozesse und vorhandenes Equipment der deutschen Zulieferer auch zukünftig trotz der stets wachsenden Lebensdaueranforderungen an die Produkte nutzen zu können, mussten fundierte Modelle für Beschreibung und Simulation der Zusammenhänge zwischen Materialien, Prozess und Umgebungsparametern für Leistungsmodule mit Einfluss auf die Zuverlässigkeit entwickelt werden. Die Erkenntnisse flossen direkt in Kon-

zepte zur Optimierung und Weiterentwicklung sowie bei bestehenden Lösungen in die Produktion zur Integration von Leistungsmodulen, welche aus den gelöteten Halbleitern, sowie der Drahtbondkontaktierung bestehen.

Innerhalb des ersten Arbeitsschwerpunktes wurde ein grundlegendes Verständnis zum Einfluss von Material und Gefügestruktur auf die Zuverlässigkeit der Bondverbindung erarbeitet. Als Chipkontaktierung wurden verschiedene Lote und Drahtmaterialien verwendet (Al-H11, Al-CR, Al-R-Drähte, etc.). Durch systematische Bonduntersuchungen sollten unterschiedliche Verbindungsqualitäten erzeugt und die mechanische Festigkeit der Interfaces und des Drahtmaterials (im Fall eines Bruchverlaufs innerhalb des Drahtes beim Schertest) durch einen Schertest überprüft werden. Aus diesen Ergebnissen galt es, eine geeignete Prozessüberwachung für den Bondprozess zu entwickeln, umzusetzen und zu validieren. Zur Absicherung der entwickelten Maßnahmen wurden die notwendigen Lebensdauervalidierungen erarbeitet und an Mustern umgesetzt. Auf dieser Basis wurde der Einsatz neuer Materialien, Geometrien, Verfahren mit ihren Auswirkungen auf die Lebensdauer bewertbar.

Im zweiten Arbeitsschwerpunkt sollten gezielt Materialien und Prozesse dahingehend verändert werden, dass eine um ein Vielfaches (mindestens 100%) verbesserte Zuverlässigkeit erreicht wird. Auf der Seite der Drahtbondtechnologie konnten hier auch alternative Drahtmaterialien, wie z.B. Al-ummantelte Kupferdrähte oder Al-Bändchen verwendet werden. Zu betrachtende Ansätze waren unter anderem:

- modifizierte Materialien bei Drähten/ Heavy Ribbon und Kontakten
- Verarbeitung auf nicht modifizierten Leistungshalbleitern
- Einbringung von Formteilen zur Kontaktierung bei Halbleitern, Substraten, Powerframes etc.
- Einfluss einer gezielten Veränderung der Bondtool- und Draht-Geometrien (z.B. in Richtung Dickdraht-Bändchen)
- geeignete Bondherstellprozessüberwachung für die verbesserte Bondverbindung
- Optimierung der Langzeitzuverlässigkeit über eine alternative Materialauswahl und damit verbundene Prozessänderungen

Im Rahmen des dritten Arbeitsschwerpunktes sollte das Zuverlässigkeitsmanagement für die Drahtbondtechnologie weiterentwickelt und damit an die zukünftigen Anforderungen ange-

passt werden. Dies umfasste Maßnahmen der Hersteller und Zulieferer zur Absicherung einer geforderten Zuverlässigkeit für alle Phasen des Produktlebens. Diese Entwicklungen sollten im dargestellten Projekt in eine neue laserbasierte Maschinen- und Verfahrenstechnik für die Aufbau- und Verbindungstechnik elektronischer und elektrotechnischer Komponenten umgesetzt werden. Zur Realisierung der geplanten neuen Verbindungstechnologie wurden die folgenden innovativen Lösungsansätze verfolgt:

- Integration von Laserstrahlführung, Bauteil- bzw. Kontakthandhabung, Anpressvorrichtung und Positionskontrolle in einem miniaturisierten Bearbeitungskopf, um einen sogenannten Pick-and-Join-Prozess zu ermöglichen
- Verwendung eines Mikrosanners, ggf. auf der Basis von Siliziumcarbid-Spiegeln, zur flexiblen Bewegung des Laserstrahls auf dem Kontaktpad
- Integration einer miniaturisierten Kamera in den Bearbeitungskopf zur Positionserkennung während der Kontaktierung
- Mikroschweiß-Verbindungstechnik mit schnell bewegter Faserlaser-Strahlung bei Wechselwirkungszeiten < 1 ms
- Kombination des Laserbearbeitungskopfes mit der Handhabung der Kontaktierungskomponenten wie Draht, Bändchen oder Bauteil

Mit der entwickelten Technik sollten zukünftig Schweißpunktgeometrien auf wenige 10 μm reduziert werden und über eine Bewegung des Laserstrahls die Wärmebelastung herabgesetzt und dadurch die Schweißtiefe exakt kontrolliert werden. Mit diesem System lassen sich gegenüber konventionellen Kontaktierungstechniken auch nicht-punktförmige Verbindungen, wie Mikroring-Schweißnähte oder gar Freiformverbindungen erzeugen, die eine optimale Anpassung der Kontaktierung an die Bauteilgeometrie ermöglichen. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt den festgelegten Arbeitsplan des Gesamtvorhabens und beschreibt die geplante Arbeitsteilung der beteiligten Projektpartner.

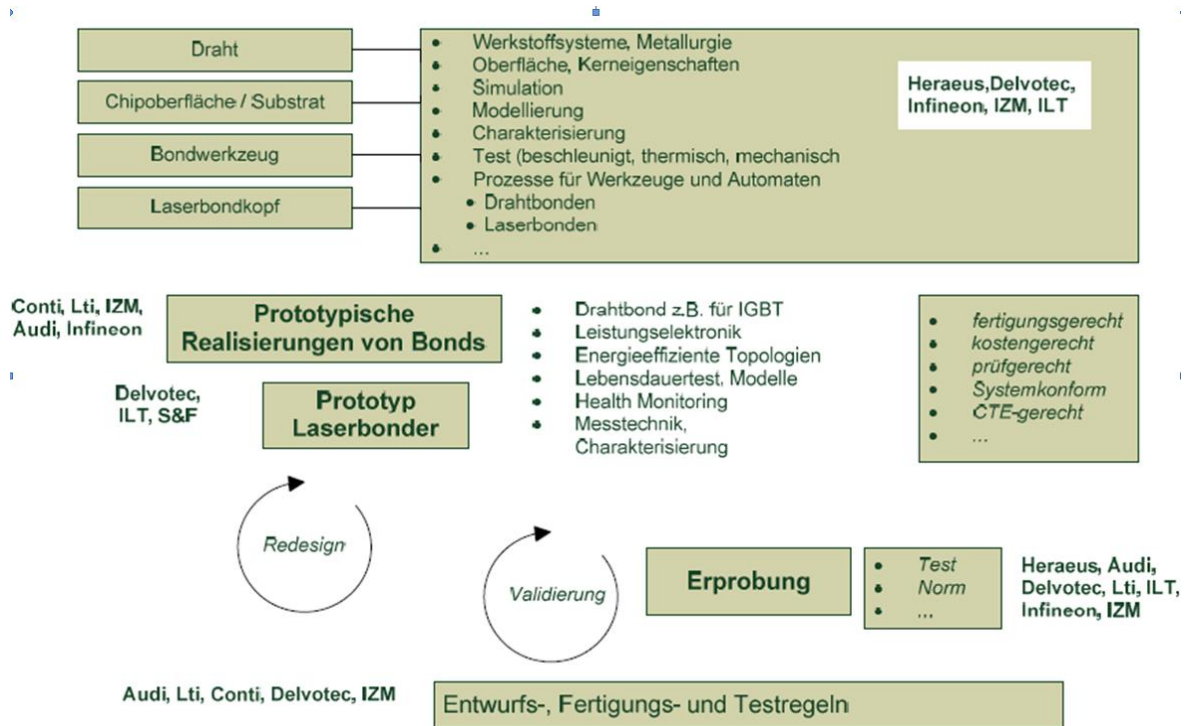


Abbildung 1: Arbeitsteilung zwischen den Verbundpartnern im Projekt RoBE

2.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Herausforderung

Die Zuverlässigkeit eines Produktes beschreibt seine Eigenschaft, während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Bedingungen eine definierte Funktionalität aufzuweisen. Die Analyse der Ausfallmechanismen von leistungselektronischen Systemen und die Entwicklung geeigneter Modelle zur Berechnung ihrer Lebensdauer sind seit der breiten Einführung von IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) in den 90er Jahren Gegenstand intensiver Forschung. Der inzwischen anerkannte Wissensstand geht davon aus, dass Materialermüdung aufgrund thermomechanisch induzierter Spannungen unter thermischer Wechselbelastung die Hauptausfallursache der Module darstellt. In modernen Leistungsmodulen betrifft dies im Wesentlichen das Abheben der Drahtbonds aufgrund eines mit der Beanspruchung fort-

schreitenden Risswachstums (Bond–Wire–Lift–Off) sowie die Degradation großflächiger Lötverbindungen, z. B. der Verbindung zwischen Substrat und Bodenplatte. Der Ausfall der Module wird beschleunigt durch die Alterung der Lötverbindung zwischen Chip und Substrat und durch die Rekonstruktion der Aluminium-Metallisierung auf der Chipoberfläche. Als Ausfallindikatoren werden elektrische Größen wie der Anstieg der IGBT-Sättigungsspannung (Schädigung der Drahtbonds und Rekonstruktion des Aluminiums) und des thermischen Widerstands (Lötverbindungen), z.B. nach DIN IEC 47E/114/CDV:1998-10, überwacht. Da der Ausfall der Module auf Ermüdung zurückzuführen ist, wird zur Modellierung der Lastwechselfestigkeit ein erweiterter Coffin-Manson-Ansatz gewählt. Dieser beschreibt die Anzahl der Lastwechsel bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums mit dem Temperaturhub am Chip als wesentlichen Parameter.

Dem Modell liegt physikalisch ein Bimetall-Effekt zugrunde, der zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auftritt. Darauf basiert das vereinfachte - im Wesentlichen Temperaturhübe auswertende - Modell für Ausfälle der Drahtbonds. In verfeinerten Modellen wird auf Basis empirischer Erkenntnisse die Abhängigkeit der Lebensdauer von der absoluten Sperrschichttemperatur des Chips (entweder als Mittelwert oder als Maximal- / Minimalwert) über einen Arrhenius-Term mit berücksichtigt. Die erste umfangreiche Studie zur Lebensdauer von Leistungsmodulen verschiedener Hersteller (LESIT) ergab ein Modell mit rein beschreibendem Charakter. Tatsächlich auftretende Fehlermechanismen sind ebenso wenig berücksichtigt wie die Daten des Aufbaus der Module. Heutige Leistungsmodule weisen im Vergleich zu den Ergebnissen im Projekt LESIT eine höhere Zuverlässigkeit auf, wobei technologische Fortschritte berücksichtigt werden müssen. Da insbesondere die Zuverlässigkeit der Drahtbonds im Fokus der Optimierung stand, ist in modernen Modulen ein höherer Einfluss der Lötermüdung auf die Lebensdauer, auch bei zum Beispiel aktiven Lastwechseln, zu beobachten. Eine umfangreiche Auswertung verschiedener Lastwechseluntersuchungen zeigt neben dem Temperaturhub und dem Absolutwert der Temperatur eine Abhängigkeit von weiteren Parametern wie der Einschalt- bzw. Zykluszeit und dem Belastungsstrom. Die Technologie der Leistungsmodule ist Veränderungen und Optimierungen unterworfen, die die Zuverlässigkeit beeinflussen. Dies betrifft z.B. das Ersetzen bleihaltiger durch bleifreie Lote oder die Einführung neuer Technologien wie die Niedertemperaturverbindungstechnik bzw. der Verzicht auf Lötverbindungen zugunsten von Federkontakten. Modelle zur Lebensdauervorhersage sind somit diesen Verände-

rungen kontinuierlich anzupassen. Zusätzlich zu den thermomechanischen Wechselbelastungen treten im Kontext der E-Mobilität auch Vibration und Schock als lebensdauerbeeinträchtigend auf. Dies war bei den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in **RoBE** explizit zu berücksichtigen.

Verfahrensalternative Laserstrahl-Mikroschweißen

Das Laserstrahl-Mikroschweißen ist eine seit langem eingeführte Technologie zur Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektrotechnik und kann für eine wesentlich größere Auswahl an Werkstoffen eingesetzt werden, da beide Fügepartner aufgeschmolzen werden. Aufgrund der kleinen Füge-Geometrien und sehr kurzen Prozesszeiten lassen sich mit neueren Lasersystemen auch artungleiche Metalle, wie etwa Kupfer mit Stahl oder Kupfer mit Aluminium verschweißen, womit eine verbesserte Anpassung der Werkstoffeigenschaften an die jeweiligen Anwendungen möglich wird. Die kleinen Bauteilabmessungen führen allerdings dazu, dass schon geringe Fertigungs- und Montagetoleranzen zu unterschiedlichen Fügespalten und Temperaturverteilungen führen können. Der Greif- und Spanntechnik für die eingesetzten Komponenten kommt deshalb beim Laserstrahl-Mikroschweißen eine besondere Bedeutung zu. Zur Lösung der Spaltproblematik wurde am Bayerischen Laserzentrum BLZ das „Laser-Droplet-Welding“ entwickelt, bei dem die Verbindung einzelner Bauteile und Kontakte über das laserinduzierte Abschmelzen eines Zusatzwerkstoffes erfolgt. Allerdings beschränkt sich der Einsatz auf die Verbindung zuvor exakt zueinander positionierter Bauteile und kann nicht zur Herstellung langgestreckter Kontaktbrücken im Packaging von Elektronikbauteilen wie beim konventionellen Draht-/Bändchen-Bonden verwendet werden. Für die Realisierung von Kontaktierungen wären bei diesem Verfahren zusätzliche Bauteile in Form von Brücken vonnöten. Als Kontaktierungstechnik für Drähte wird das Laserstrahlschweißen mit konventionellen lampengepumpten Festkörperlaser zurzeit nur in Ausnahmefällen eingesetzt. Die geringe Absorption von Kupferwerkstoffen bei einer Wellenlänge von 1 μm und die große Temperaturleitfähigkeit der Werkstoffe führen zu schlecht kontrollierbaren Schweißvolumina. Dies ist beim Schweißen auf der Leiterplatte kritisch, da eine zu große Schweißtiefe bzw. zu große Schmelzvolumina zu einer Zerstörung der beteiligten Bauteile führen können. Mit diodengepumpten Strahlquellen wie Faser- und Scheibenlasern stehen jedoch inzwischen Strahlquellen zur Verfügung, die Strahldurchmesser kleiner 30 μm ermöglichen und für das Schweißen ausreichende Pulsdauern und Leistungsdichten aufweisen. Mit diesen Strahl-

quellen ließen sich deutlich höhere Intensitäten erzielen und die in **RoBE** angestrebten neuartigen Verfahrensansätze realisieren. Das Laserstrahl-Mikroschweißen von Membranen war in diesem Zusammenhang ein zum Projektstart bereits etablierter Prozess, so dass die Antragsteller die berechtigte Hoffnung zur erfolgreichen Umsetzung hegten.

Stand von Wissenschaft und Technik

Mit den für das Vorhaben relevanten Schlüsselbegriffen Leistungstransistor, Bondverbindung, Monitoring/Diagnose und Temperaturmessung erfolgte eine weltweite Patentrecherche. Aus einer Grundmenge von 1,1 Mio. Nachweisen wurden 500 Fundstellen identifiziert. Für 20 Nachweise wurden Kurzbeschreibungen ausgewertet. Die Patente ließen sich grob in zwei Bereiche kategorisieren. Zum einen schützten Hersteller von Leistungstransistoren spezielle Aufbauten, die es ermöglichen die Temperatur auf dem Chip zu ermitteln. Zum anderen handelte es sich um Temperaturmessungen zur Sicherstellung der Qualität beim Bondprozess. Eine Patentrecherche hat eine Offenlegungsschrift (Anmeldejahr 2002) zur Lebensdauerprognose leistungselektronischer Bauelemente ergeben. Das in der Offenlegungsschrift beschriebene Verfahren unterscheidet sich fundamental von dem im Forschungsvorhaben RoBE verfolgten Konzept, da es nicht modellbasiert operiert und nicht die Schadensklassen mit den aktuellen Messwerten verknüpft, um so eine intelligente angepasste Datenkompression sowie Echtzeitfähigkeit für Klassifizierung und Auswertung vorzusehen. Das im Rahmen dieses Projekts verfolgte Konzept, mittels eines Echtzeit-Management-Systems Zustandsdaten elektronischer Systeme zu erfassen und in einem Modell zu verarbeiten, basiert auf Arbeiten des Fraunhofer IZM. Ein ähnlicher Ansatz wurde unter dem Begriff „Life Consumption Monitoring“ nach Kenntnis der Antragsteller noch am CALCE, Computer Aided Life Cycle Engineering in Maryland, USA verfolgt, wobei der Fokus dort auf der Methodenentwicklung und der allgemeinen Anwendbarkeit für elektronische Komponenten lag. Eine Vorrichtung und ein Verfahren zum laserunterstützten Thermokompressionsbonden werden in [EP00947281B1] beschrieben. Dabei wird der Bonddraht mittels Laserstrahlung während des Bondprozesses geheizt, um eine höhere Festigkeit und Prozesssicherheit zu erreichen. Ein Schweißen durch Anschmelzen beider Fügepartner mit Laserstrahlung wurde mit diesem Verfahren nicht erreicht, so dass hier die Vorteile der reinen Schweißtechnik für das Verbinden artungleicher Metalle nicht genutzt wurden. An der TU Berlin sind im Rahmen von Promotionen jeweils ein Patent zur Online- Prozesskontrolle und -führung während des

Bondvorgangs sowie zur zuverlässigkeitssteigernden Modifikation der Geometrie der Verbindungsstelle erteilt worden.

2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für eine erfolgreiche Umsetzung der gesteckten Ziele war die Einbeziehung aller Mitwirkenden entlang der Prozesskette unter Betrachtung der mechatronischen Wechselwirkungen von Modul- bis Gesamtfahrzeugebene unumgänglich. So fand das Projekt **RoBE** in Kooperation zahlreicher Partner aus Wissenschaft, Forschung und Industrie statt.

Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) entwickelte als Projektpartner unter Nutzung der Kompetenzen des Projektpartners S&F Systemtechnik zusammen mit dem Werkzeughersteller Delvotec zur Industrialisierung dieser neuen Verbindungstechnologie die notwendige Anlagentechnik und Herstellungsprozesse. Der Markt erwartet eine Ausweitung der Nutzungsdauer bei gleichzeitiger Steigerung der Zuverlässigkeit und dies ohne erhebliche Kostensteigerungen. Die Kooperationspartner Heraeus und Infineon/Eupec sind weltweit führend in diesen Forschungsgebieten; mit dem Projekt wurden diese Positionen gehalten bzw. ausgebaut. Zusammen mit einer angepassten Prozesstechnik ergaben sich damit weitere Stellschrauben. Die „gelaserten“ Bondverbindungen stellen sich dem Wettbewerb zu den klassischen Bondverbindungen. Deshalb war es unerlässlich, Projektpartner mit Systemkompetenz für leistungselektronische Anwendungen bereits zu diesem frühen Zeitpunkt ebenfalls zu involvieren. Die Firma Continental ist Zulieferer für die Automobilindustrie, während LTi komplette Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge vorrangig im gewerblich genutzten Bereich (z.B. Gabelstapler, mobile Arbeitsmaschinen) vermarktet. Beide Partner verfolgten das Ziel, ihre Aktivitäten zur Elektromobilität auszubauen, da dieser Markt als besonders innovativ und zukunftssträftig erachtet wird; die Synergien mit der allg. Antriebs- und Automatisierungstechnik (Maschinenbau) bei LTi sorgten für die ebenfalls gewünschte Breitenwirkung. Die Beteiligung der Firma Audi stellte schlussendlich die Integration in das Gesamtsystem Elektromobil sicher. Dies umfasste die Definition der nutzungsspezifischen Anforderungen ebenso wie die Spezifikation von geeigneten Test- und Prüfbedingungen, die zum Teil aufgrund der Ausweitung der lebensdauerbezogenen Anforderungen in diesem Projekt neu zu definieren waren. Das Fraunhofer IZM unterstützte als Forschungsinstitut die wissen-

schaftliche, experimentelle, sowie methodische und konzeptionelle Ausgestaltung aller Arbeitspakete in Abstimmung mit den Industriepartnern. Die am IZM im Rahmen des Projektes durchzuführenden Simulationen und Charakterisierungen sollten Beiträge für ein umfassendes Lebensdauermodell für die Drahtbondverbindung liefern. Dies gewährleistete einen zuverlässigen Bondprozess mit eindeutigen Lebensdauern und die Etablierung von Konzepten für Health-Monitoring zur Steigerung der Einzel- und Systemzuverlässigkeiten von Fahrzeug, Flotte und Smart Grid.

3. Erzielte Ergebnisse

3.1. Ausfall- und Fehlermechanismen von Bondverbindungen für Hochstromanwendungen

Detaillierte Analysen der möglichen Fehlermechanismen bilden die Grundlage, um Ansätze zur gezielten Beeinflussung von Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu erarbeiten. Dabei zeigte sich, dass die Lebensdauerbegrenzenden Fehlermechanismen von Bondverbindungen (AP1/AP2), auf mechanische, oder die Überlagerung von thermischem und mechanischem Stress zurückzuführen sind. Aus den Untersuchungen an Aufbauten nach Stand der Technik (2011) ergaben sich somit zwei dominierende Ausfallmechanismen der Bondverbindungen:

- Rissbildung im Heelbereich des Bonddrahtes
- Rissbildung im Interface der Bondverbindung (Drahtbond/Halbleiter)

3.1.1. Rissbildung im Heelbereich des Bonddrahtes

Als Heel wird im Allgemeinen der Übergangsbereich vom Bondwedge in den Drahtloop bezeichnet. Während des Bondprozesses wird der Draht im Heelbereich bereits stark gestresst. Bei Ultraschalleinwirkung, sorgt die über das Bondtool eingebrachte Bondkraft für eine Deformation des Drahtes. Diese Deformation verursacht – gerade bei zu stark gewählten Parametern – eine Einkerbung des Drahtes (siehe Abb.2), die zu einer Schwächung des Heels bei mechanischer Belastung (z.B. Vibration) führt.

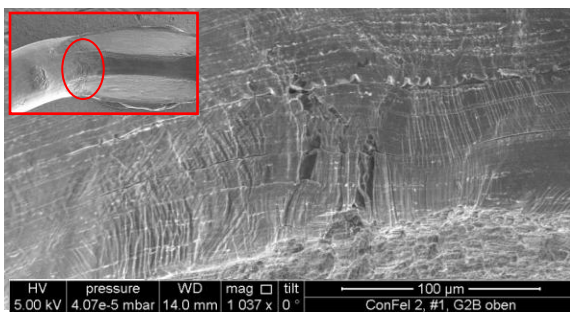


Abbildung 2: Mikrorisse am Heel nach dem Bonden

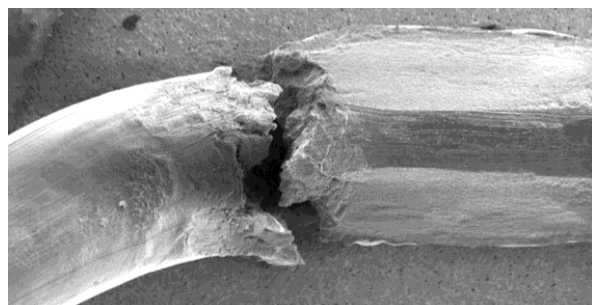


Abbildung 3: Riss im Heelbereich eines Al-Bonddrahtes

Darüber hinaus können Stauchungen und Mikrorisse durch plastische Deformation entstehen, die als Ausgangspunkt für die weitere Rissbildung dienen.

Mechanischer- und thermomechanischer Stress können zum fortschreitenden Wachstum der Mikrorisse führen, was zuletzt im vollständigen Bruch der Bondverbindung endet (siehe Abb.3).

Neben rein mechanischer Belastung wie Vibration, kann auch die Relativbewegung der beiden Bond-Wedges, welche bei Temperaturwechseln auf Grund unterschiedlicher CTEs (Coefficient of Thermal Expansion) verschiedener Komponenten auftritt, eine wiederholende Biegewechselbelastung des Bonddrahtes bewirken. Auch in diesem Fall kann ein Bruch des Bondheels die Folge sein. Der Rissfortschritt hängt stark davon ab, ob sich die Relativbewegungen verschiedener Raumrichtungen x, y und z überlagern und wie groß die daraus resultierende Verschiebung Δl ist.

3.1.2. Rissbildung im Interface der Bondverbindung (Bonddraht/Halbleiter)

Das Silicium des Halbleiters und das Aluminium des Bonddrahtes haben stark unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten (Si:2,8ppm/K; Al:24ppm/K). Aufgrund dieses Mismatches wird bei jedem Temperaturwechsel thermomechanischer Stress, auf den Kontaktbereich zwischen Bond und Halbleiter induziert. Von allen Seiten der Kontaktfläche breiten sich Risse in Richtung Zentrum aus. Am Ende, verliert der Draht komplett seine Anbindung (Abb.4: Lift-Off) zum Halbleiter und somit auch seine elektrische Funktion.

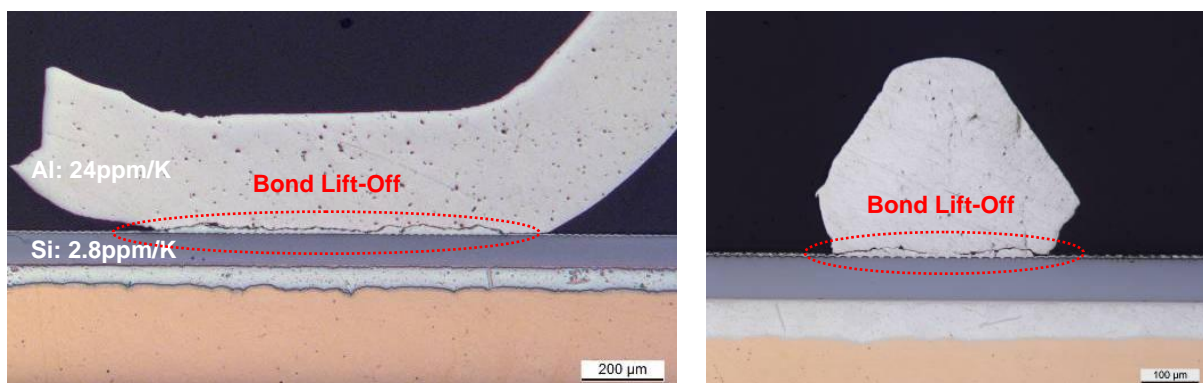


Abbildung 4: Bond Lift-Off

Die Degradationsgeschwindigkeit hängt primär vom Temperaturhub des Halbleiters ab. Erhöht sich dieser, – z.B durch Degradation des Lotes unter dem Halbleiter (siehe Abb.5) – wird auch der Ausfall der Bondverbindung beschleunigt. Bei der Beurteilung des Bondversa-

gens ist daher auch immer die Lotverbindung zu prüfen, um eine solche Beschleunigung des Ausfalls zu erkennen.

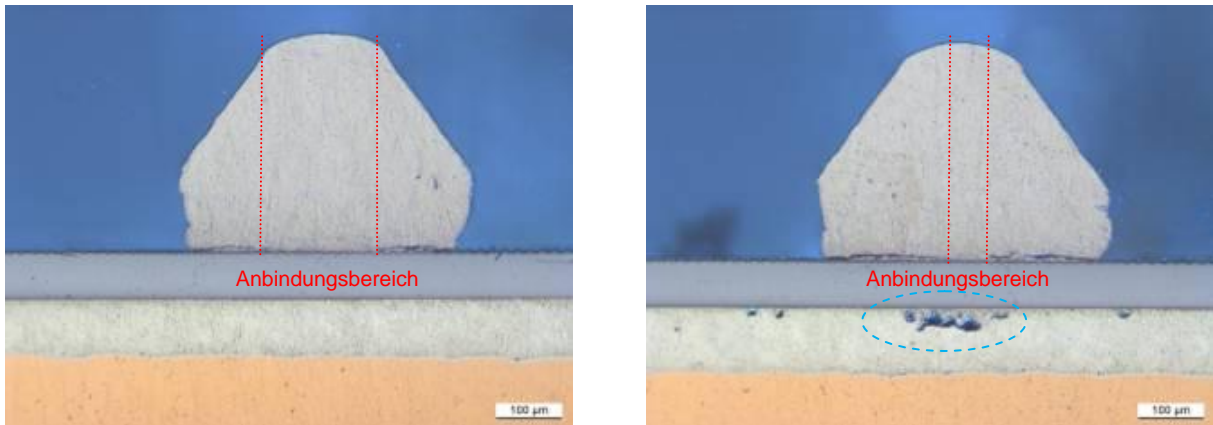


Abbildung 5: Verstärkte Bonddegradation – bei gleicher Lastwechselzahl – durch Lotschädigung

In der Anwendung treten Temperaturwechsel in hoher Zahl (bis zu 6Mill. Zyklen) auf. Der Fehlermechanismus Rissbildung im Interface Drahtbond/Chip gilt für die folgenden Untersuchungen als lebensdauerbegrenzend und sein Auftreten soll möglichst lange verzögert werden.

3.2. Methoden zur Bewertung der Qualität der Bondverbindungen

Zur Bewertung der initialen Bondqualität wird üblicherweise der Schertest verwendet. Dabei wird die Bondverbindung mit einem Meißel in definierter Höhe (10% des verwendeten Drahtdurchmessers) und Geschwindigkeit abgeschert. Die so ermittelte Scherkraft dient zusammen mit der resultierenden Scherfläche A (siehe Abb.7) als Messgröße für die Qualität der Bondverbindung.

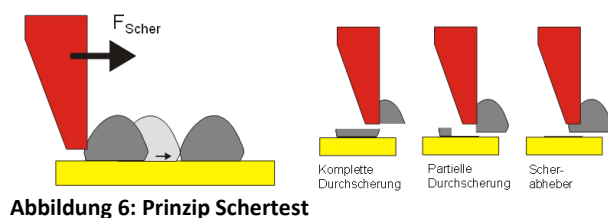


Abbildung 6: Prinzip Schertest

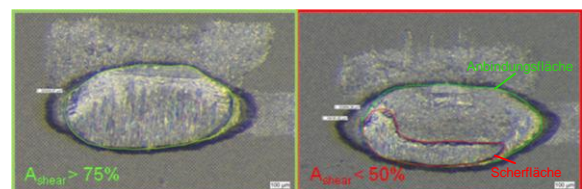


Abbildung 7: Auswertung Schertest an Al-Bondverbindung

Grundsätzlich sollte die initiale Bondverbindung folgende Kriterien erfüllen:

Scherkraft: Hohe Scherkraft mit möglichst geringer Streuung.

Scherfläche: Die Scherfläche sollte möglichst groß sein (Min:75% der Anbindungsfläche).

Beide Werte werden massiv von den Bondparametern beeinflusst, weshalb sie auch als Zielgröße für eine Parameteroptimierung herangezogen werden können.

Weiter muss eine Überdeformation des Bondwedges vermieden werden, da diese zu Vorschädigungen des Heelbereichs führen kann und somit den Bruch des Drahtes (Heelcrack) bei Belastung begünstigt. Als Maß dient hier die Wedgbreite der Bondverbindung. Diese sollte einen Maximalwert von 1,6 x Drahtdurchmesser nicht überschreiten.

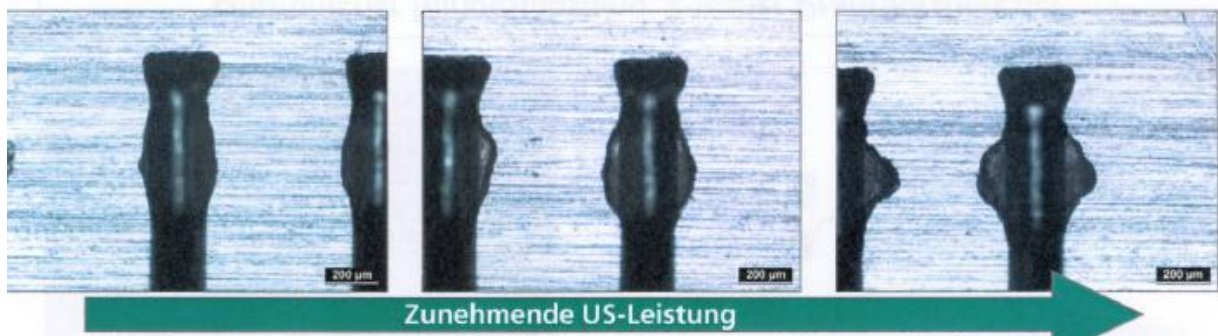


Abbildung 8: Wedgbreite in Abhängigkeit der Bondleistung

3.3. Testmethoden zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Bondverbindungen

Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Bondverbindungen am Demonstrator, wurden im Wesentlichen drei Testmethoden definiert:

- Vibration- oder Shakertest
- Mechanischer Biegewechseltest
- Active Powercycling

3.3.1. Vibration-/ Shakertest

Ziel diese Tests war es eine definierte, rein mechanische Belastung auf die Bondverbindungen des Demonstrators einwirken zu lassen und deren schädigende Wirkung zu analysieren. Hierfür wurde der Demonstrator auf einem Shaker befestigt und in z-Richtung belastet. Die Untersuchung wurde bei der Resonanzfrequenz/Eigenfrequenz (System: Bonddraht) durchgeführt, da in diesem Frequenzbereich die größte Relativbewegung des Bonddrahtes resultiert und die Bondverbindung somit maximal belastet wird.

Um die Bondverbindung zu kontrollieren wurde der Draht mit einem Messstrom beaufschlagt (elektr. Durchgang). Beim elektrischen Durchgang wird eine Thermospannung erzeugt. Der Datenlogger zeichnet eine Temperaturkurve auf, die bei Unterbrechung einen sprunghaften Anstieg aufzeigt. Zusätzlich wurden die Bondanschlüsse mittels Lichtmikroskopie, REM und Querschliffen untersucht.

3.3.1. Mechanischer Biegewechseltest

Um die mechanischen Eigenschaften verschiedener Drahtmaterialien zu analysieren, wurde in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik (IWM-Halle) eine Teststrategie (Mechanischer Biegewechseltest) entwickelt. Grundlage für das Testkonzept waren aufwendige optische Analysen, sog. Grauwertkorrelationsmessungen. Dabei wurde der Demonstrator von -40°C bis 140°C erwärmt und die daraus entstehende Verschiebung (in-plane und out-of-plane) ermittelt. Somit wurde die Relativbewegung der Wedges von kritischen Bondverbindungen ermittelt.

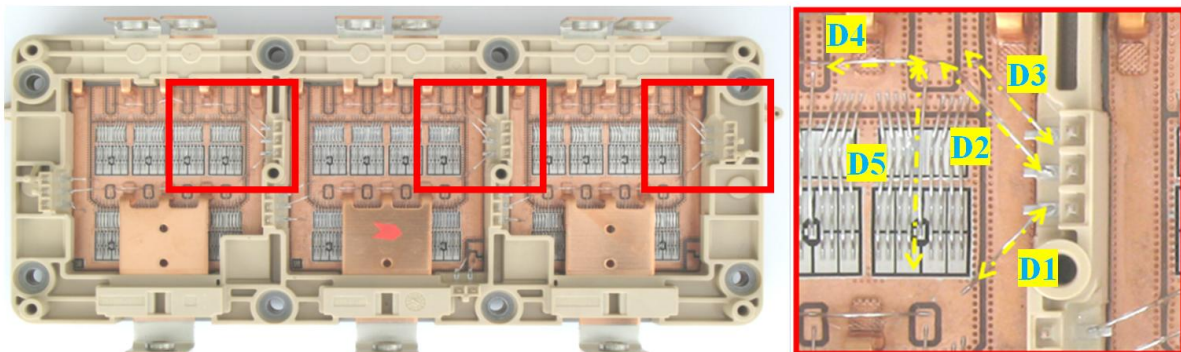


Abbildung 9: Kritische Bondverbindungen für Biegewechselbelastung bei T-Zyklen

Auf Basis der ermittelten Verschiebung konnten im Anschluss Lebensdaueruntersuchungen mit Hilfe eines 6-Achs-Piezo-Testers der Bondkontakte vorgenommen werden.

Die thermomechanische Belastung, die bei Temperaturwechsel entsteht (aufgrund unterschiedlicher CTEs der Basismaterialien), konnte mit dem Testkonzept in eine reine mechanische Belastung transformiert werden und ermöglicht so die beschleunigte Lebensdauerbeurteilung für diesen Lastfall.

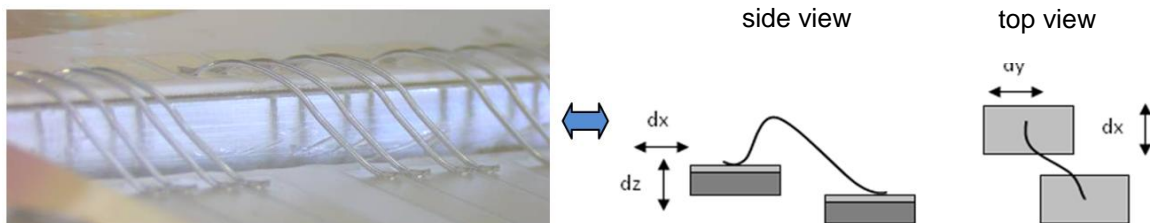


Abbildung 10: Aufbau mechanischer Biegewechseltest

Der mechanische Biegewechseltest verfügt über einen Piezo-Tisch mit zwei separaten Probenträgern. Ein Substrat bleibt starr (unten), eines ist in alle Raumrichtungen frei beweglich (oben). Die Substrate werden mit mehreren, parallelen Bonddrähten verbunden. Durch die Relativbewegung der beiden Substrate gegeneinander wird die mechanische Last auf die Bondverbindungen eingebracht. Die Bondgeometrie wird 1:1 vom Demonstrator übernommen. Die Testdistanz wurde aus den Ergebnissen der Grauwertkorrelationsmessung abgeleitet.

Testbedingungen: $dx = 68\mu\text{m}$, $dy = 73\mu\text{m} \rightarrow \Delta l (42^\circ) = -100\mu\text{m}$, Frequenz = sin 10Hz

3.3.2. Active Powercycling

Im Power Cycling kann eine Rissbildung im Interface Drahtbond/Chip gezielt erzeugt werden. Durch aktive Strombeaufschlagung wird ein periodisches Aufheizen bzw. Abkühlen des Halbleiters und der Bondverbindungen erreicht. Das ΔT des Halbleiters sowie die Collector-Emitter-Spannung U_{CE} werden aufgezeichnet, da diese Messgrößen bei fortschreitender Degradation vom ursprünglichen Wert abweichen. Überschreiten ΔT und U_{CE} vorab definierte Grenzwerte (Ausfallkriterien: $\Delta T > 120K$; Anstieg U_{CE} 10%), wird der Test unterbrochen und das entsprechende Testmuster für Analysen entnommen.

Testparameter:

| | |
|-----------------------------|------|
| Mittlere Temperatur T_m : | 90°C |
| Temperaturhub ΔT : | 100K |
| Stromfluss t_h : | 3s |
| Abkühlphase t_c : | 6s |

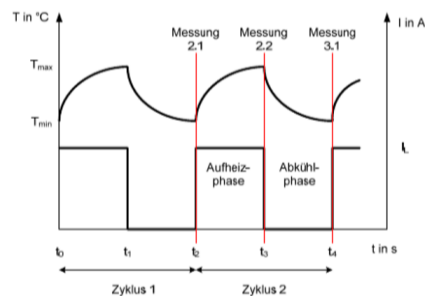


Abbildung 11:
Temperaturverlauf
im Powercycling

3.3.3. Demonstrator

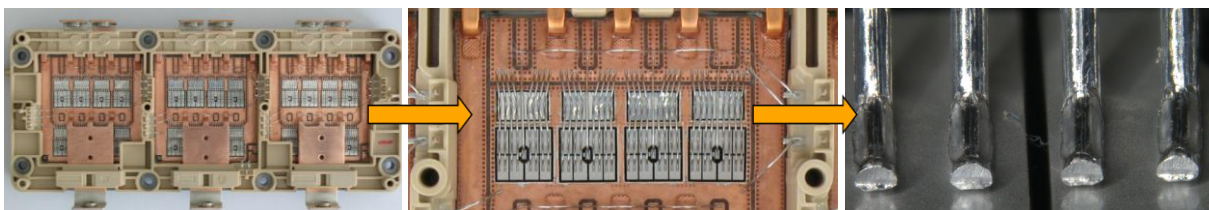


Abbildung 12: Aufbau Demonstrator

Bei dem Demonstrator handelt es sich um ein klassisches Leistungsmodul, dessen Basis ein massiver Kühlkörper bildet. Auf dem Kühlkörper montiert sind einzelne DCB-Substrate und der Polymer-Rahmen. Die Halbleiterbauelemente (Dioden/IGBTs) können je nach Anforderung aufgelötet oder gesintert werden. Der Aufbau beinhaltet insgesamt 600 stromführende Bondverbindungen, die für spätere Tests und Analysen genutzt werden können.

3.4. Ansatzpunkte zur Robustheitssteigerung drahtgebondeter Aufbauten

Durch die theoretischen Betrachtungen in der Definitionsphase des Projektes (AP1) und dem detaillierten Benchmarking des Stands der Technik, konnten zwei wesentliche Ansatzpunkte zur Optimierung der Aufbau und Verbindungstechnik und somit zur Steigerung der Zuverlässigkeit identifiziert werden.

Die Entstehung von Mikrorissen und die Rissausbreitung im Interface der Bondverbindung – die später zum sog. Bond-Lift-Off führt (siehe 3.1.2) – wird durch die Mikrostruktur der Bondverbindung definiert. Eine hohe Versetzungsdichte und die Korngröße des Drahtgefüges spielen hier eine wesentliche Rolle. Korngröße und Versetzungsdichte lassen sich durch die Prozessparameter beeinflussen. Die variable Einwirkung von Kraft und Ultraschalleistung über einen bestimmten Zeitraum, verursacht ein ständiges Wechselspiel von Ver- und Entfestigung des Drahtmaterials, was entscheiden für die Gefügeausbildung ist. Somit kann durch eine Optimierung der Bondparameter entscheidend auf die Zuverlässigkeit der Bondverbindung Einfluss genommen werden.

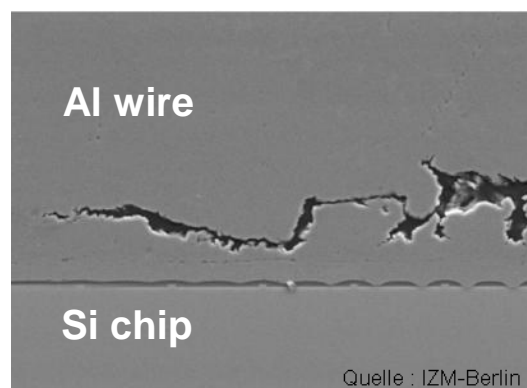
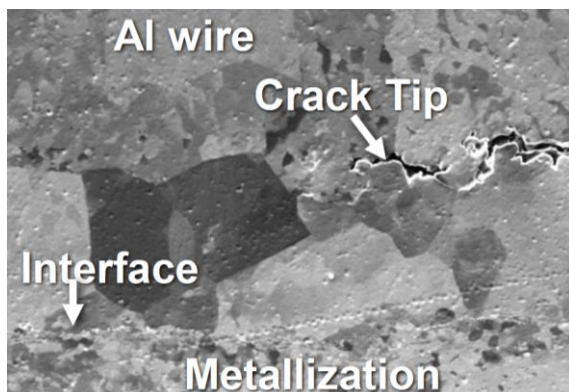


Abbildung 13: Rissausbreitung im Interface einer Bondverbindung

Weiter steht die Zuverlässigkeit der Applikation im direkten Zusammenhang mit dem verwendeten Drahtmaterial. Entscheidend sind hier Werkstoff, Härte/Festigkeit, Stromtragfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, Korrosionsverhalten, usw. Die Auswahl des Drahtmaterials muss somit gezielt für die jeweilige Anwendung erfolgen und abgestimmt sein auf Materialpaarungen, Umwelteinflüssen, Einsatzbedingungen. Neue Drahtmaterialien wie CuCoAl-Draht bieten hier immenses Potential zur Performancesteigerung.

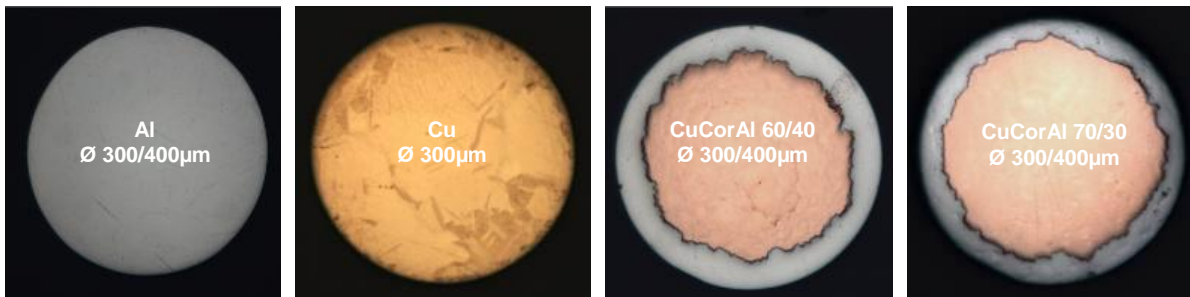


Abbildung 14: Übersicht der näher untersuchten Drahtmaterialien

3.5. Systematische Optimierung der Bondparameter

3.5.1. Parameterauswahl und DoE

In einer Versuchsreihe wurden, bei der Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Parameteroptimierung, insgesamt sieben **Prozessparameter** betrachtet:

- Touch Force, Start Force, Bond Force
- Start Power, Bond Power
- Start Ramp Time, Bond Ramp Time, Bond Hold Time

Zur Vorbereitung der Testreihe wurde die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) angewandt. Bei einer festgelegten Anzahl von Einzelversuchen ließ sich damit ein Gesamtversuchsplan so anlegen, dass die Ergebnisse mit statistischen Methoden ausgewertet werden konnte. Ziel war es, möglichst viel über die Zusammenhänge von Einflussparametern (Faktoren) und Zielgrößen zu erfahren.

Zielgrößen:

- Elektrische Funktion des Halbleiters
- Wedge-Deformation
- Scherkraft
- Scherfläche

Für die Variation der sieben ausgewählten Bondparameter Touch Force, Start Force, Bond Force, Start Power, Bond Power, Start Ramp Time, Bond Ramp Time und Bond Hold Time, wurde ein Versuchsplan im sog. Latin Hypercube Design nach Ye erstellt.

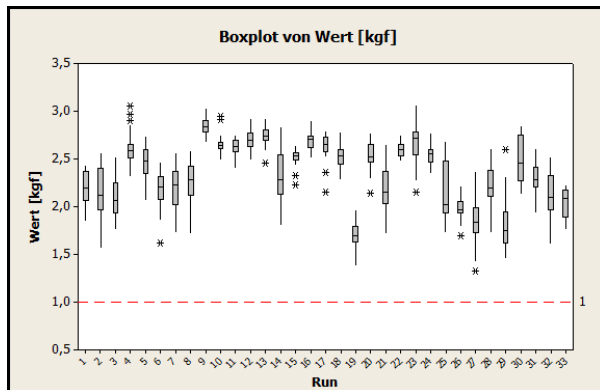


Abbildung 18: Boxplot der Scherkräfte

Die so gewonnenen Messwerte für Deformation, Scherkraft und Scherfläche lieferten die nötige Datenbasis, für eine Zielgrößenoptimierung mithilfe der Minitab-Software.

Abbildung 16: Die Roten Linien markieren die Unter- bzw. Obergrenze der zulässigen Deformation (1,1 x Ø-Draht bis 1,6x Ø-Draht). Die blauen Markierungen stellen den gemessenen Mittelwert der Wedgbreite – für jeweils 32 Bondverbindungen – über dem zugehörigen Parametersatz (Run) dar.

Abbildung 17: Zur Bewertung der Scherflächen wurden die resultierenden Scherflächen in fünf Gruppen eingeteilt (0-10%, 10-25%, 25-50%, 50-75%, 75-100% der Gesamtanbindungsfläche). Robuste Bondverbindungen sollten im Schertest alle im Bereich 75-100% liegen.

Abbildung 18: Bei jedem Schertest wurde die Kraft, die für das Abscheren der Bondverbindung aufgebracht werden muss, aufgezeichnet. Der Boxplot zeigt die Verteilung Messwerte in Abhängigkeit der verwendeten Bondparametersätze (Run). Die Darstellung beinhaltet dabei folgende Elemente:

- Ausreißer (*): Beobachtung, die außerhalb des oberen oder unteren Whiskers liegt.
- Oberer Whisker (I): Reicht bis zum maximalen Datenpunkt innerhalb von 1,5 Boxenhöhen ab dem oberen Rand der Box.
- Box für Interquartilbereich: Mittlere 50 % der Daten.
- Obere Linie- Q3 (drittes Quartil). 75 % der Daten sind kleiner als oder gleich diesem Wert.
- Mittellinie (–): Q2 (Median). 50 % der Daten sind kleiner als oder gleich diesem Wert.
- Untere Linie: Q1 (erstes Quartil). 25 % der Daten sind kleiner als oder gleich diesem Wert.
- Unterer Whisker (I): Reicht bis zum minimalen Datenpunkt innerhalb von 1,5 Boxenhöhen ab dem unteren Rand der Box.

3.5.2. Zielgrößenoptimierung

Mit dem Optimierungstool der Minitab-Software können die einzelnen Prozessparameter beliebig variiert werden (siehe Abb.19). Der prognostizierte Wert der jeweiligen Ausgangsgröße (Deformation, Scherfläche, Scherkraft und die zugehörigen Standardabweichungen) werden direkt ausgegeben. Die Auswirkung der Parameteränderung ist also sofort erkennbar.

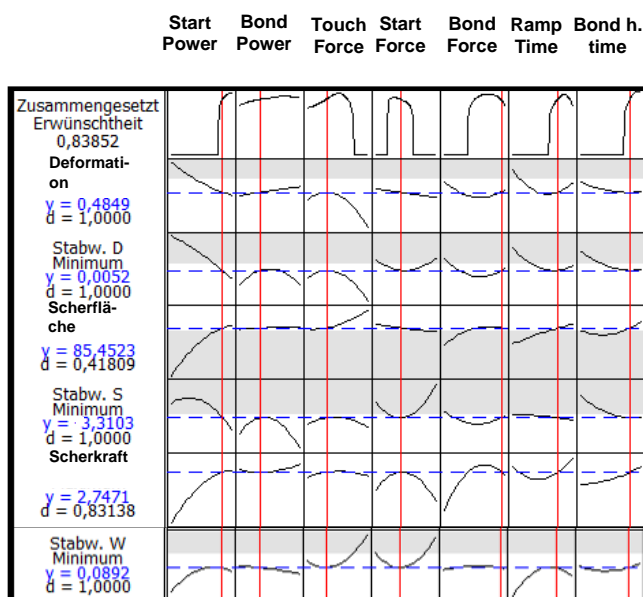


Abbildung 19: Zielgrößenoptimierung mittels Minitab-Software

Auf diese Art und Weise wurden drei optimierte Parametersätze Opt1, Opt2, Opt-LP generiert. Die Parametersätze Opt1 und Opt2 zielen auf eine Maximierung von Scherfläche und Scherkraft ab. Gleichzeitig wird versucht die Standardabweichung möglichst gering zu halten und eine Überdeformation des Drahtes zu vermeiden. Bei Parametersatz Opt-LP stand die Reduktion des Stress auf den Halbleiter während des Bondprozesses im Vordergrund.

Hier wurde die Ultraschallleistung bewusst niedrig gehalten. Die negative Auswirkung der geringen Bondleistung auf Scherfläche, Scherwert und somit die Bondqualität wurde bestmöglich durch die übrigen fünf Prozessparameter kompensiert.

Durch die Optimierung der Bondparameter wurde die Prozessführung wesentlich verändert. Die bisher übliche Strategie beim Drahtbonds beinhaltet einen Anstieg der Ultraschallleistung, von einer niedrigen Start Power auf ein deutlich höheres Niveau der Bond Power (siehe Abb.20).

Anhand der Untersuchung hat sich gezeigt, dass eine deutliche Verbesserung hinsichtlich Scherkraft und Scherfläche erreicht werden kann, wenn die Leistung umgekehrt wird. Die Start Power wird deutlich höher eingestellt und moderat auf eine niedrigere Bond Power her-

untergefahren (siehe Abb.20). Gleichzeitig wird die Bondkraft, von einer niedrigeren Start Force auf eine stärkere Bond Force hochgefahren.

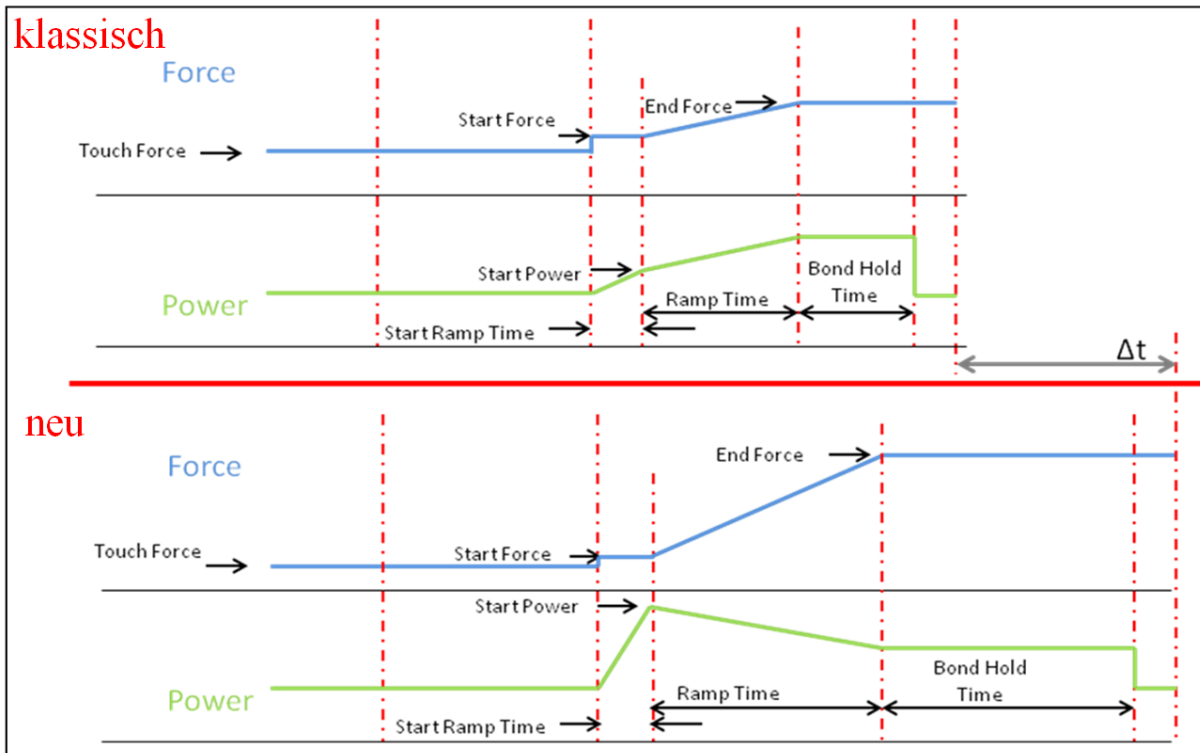


Abbildung 20: Verlauf Bond Force & Bond Power klassische und neu Bondstrategie

3.5.3. Effekt der Bondparameteroptimierung

Um den Effekt der Parametervariation zu ermitteln wurde ein Active-Powercycling (siehe 3.3.3) durchgeführt. Hierfür wurden Muster mit den optimierten Einstellungen (Opt.1, Opt.2, Opt-LP) aufgebaut. Analog wurden Demonstratoren mit den Standardparametern (Zero-Setting/Baseline) gebondet und getestet.

Testparameter:

| | |
|-----------------------------|------|
| Mittlere Temperatur T_m : | 90°C |
| Temperaturhub ΔT : | 100K |
| Stromfluss t_h : | 3s |
| Abkühlphase t_c : | 6s |

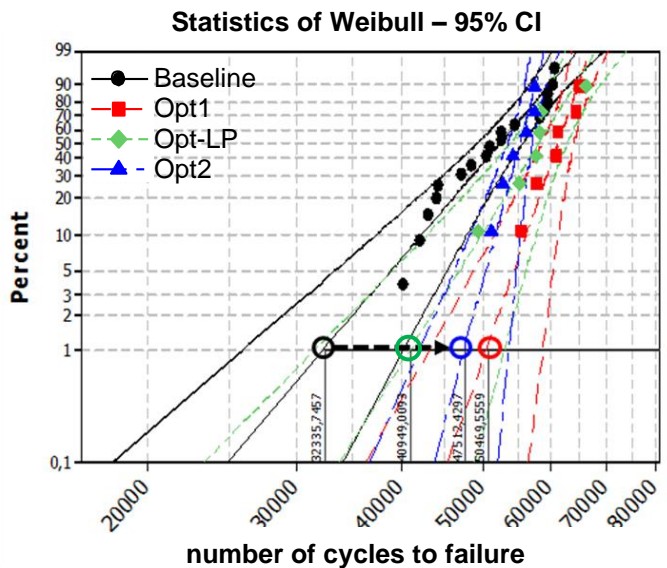


Abbildung 21: Weibull-Statistik des Powercyclings

Die optimierten Parameter Opt1 und Opt2 erreichen eine signifikant höhere Laufzeit im Power Cycling (siehe Abb.21). Wird die Ausfallwahrscheinlichkeit von einem Prozent als Grenzwert definiert, so ergibt sich ein Anstieg der Lastwechselfestigkeit, für Opt1 um 55% und Opt2 um 45%. Auch für die Parameter Opt-LP ist eine Verbesserung erkennbar. Der

Vertrauensbereich ist hier jedoch deutlich breiter und überlagert sich teilweise mit dem Konfidenzbereich der Baseline-Parameter. Die Steigerung der Lebensdauer ist hier also weniger signifikant. Dies bestätigt, dass die Ultraschalleistung einen sehr großen Einfluss auf die Robustheit der Bondverbindung hat. Die Ultraschalleistung muss jedoch zu jedem Zeitpunkt des Bondprozesses, in Kombination mit der vorherrschenden Bondkraft betrachtet werden. Gerade in der Anfangsphase(=Reinigungsphase) sorgt eine hohe Bondleistung, bei niedriger Kraftereinwirkung, für eine starke Relativbewegung des Drahtes auf der Bondfläche. Die spröden Partikel, der dabei aufbrechenden Oxidschicht des Drahtes, schleifen über die Oberfläche der Bondpartner. Durch die Schleifwirkung werden feine Kontaminationen und Oxidschichten der Bondflächen entfernt und Störstellen an Kontaktflächen erzeugt, was den Diffusionsprozess bei der Verschweißung begünstigt. Im weiteren Prozessverlauf, kann bei reduzierter Bondleistung und gleichzeitig erhöhter Bondkraft, die gesamte Ultraschalleistung in Walkarbeit umgesetzt werden (Anbindungs- und Diffusionsphase).

3.6. Charakterisierung von Bondverbindungen mittels EBSD (Electron backscatter diffraction)

Wie bereits beschrieben spielt das Gefüge der Bondverbindung eine wesentliche Rolle im Hinblick auf die Robustheit der Bondverbindung (siehe 3.4). Versetzungsdichte und Korngröße des Mikrogefüges lassen sich beispielsweise durch die Auswahl der Bondparameter beeinflussen. Um diese Zusammenhänge näher zu untersuchen wurden in Zusammenarbeit mit der TU-Berlin aufwendige Analysen mittels EBSD durchgeführt. Ausgehend vom initialen Drahtmaterial, über gebondete Muster mit unterschiedlichen Prozessparameter, bis hin zu kompletten Demonstratoren aus Zuverlässigkeits- und Lebensdauererests, wurden Strukturanalysen durchgeführt und Einflüsse von Prozessschritten und Lastfällen (im Test) auf das Gefüge erarbeitet.

3.6.1. Analyse des Ausgangsdrahtes

Die [001]-IPF Karte, dargestellt in Abbildung 22, zeigt eine regellose Verteilung der Kornorientierungen bzgl. der [001] Probenachse. Die Probenachse [001] entspricht der Richtung A3 (bzw. normal direction ND).

Des Weiteren ist kein Gradient der Kornorientierungen entlang des Drahtdurchmessers bezogen auf diese Probenachse erkennbar. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass reine Aluminiumdrähte meist eine ausgeprägte Fasertextur in Drahtzugsrichtung aufweisen. Hinsichtlich der radialen Probenrichtung liegt dabei meist eine regellose Orientierungsverteilung vor.

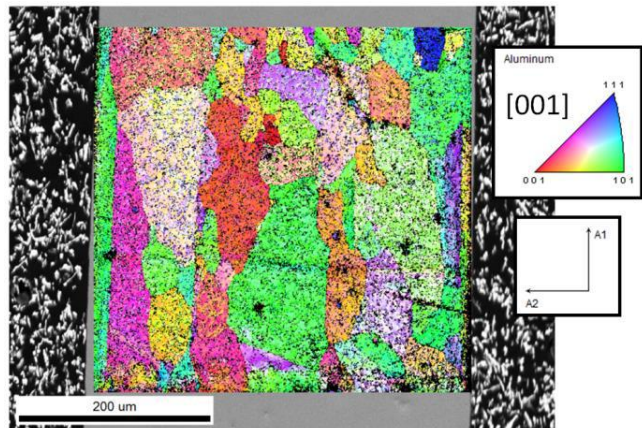


Abbildung 22: [001]IPF Karte eines nicht gebondeten Al-Drahtes

Die Ergebnisse der Korngrößenanalyse (siehe Abb. 23) zeigten, dass eine breite Korngrößenverteilung von minimal wenigen μm bis zu $\sim 120\mu\text{m}$ Durchmesser vorliegen. Im Mittel betrug der Durchmesser etwa $60\mu\text{m}$. Ein Gradient der Korngröße entlang des Drahtdurchmessers war nicht erkennbar.

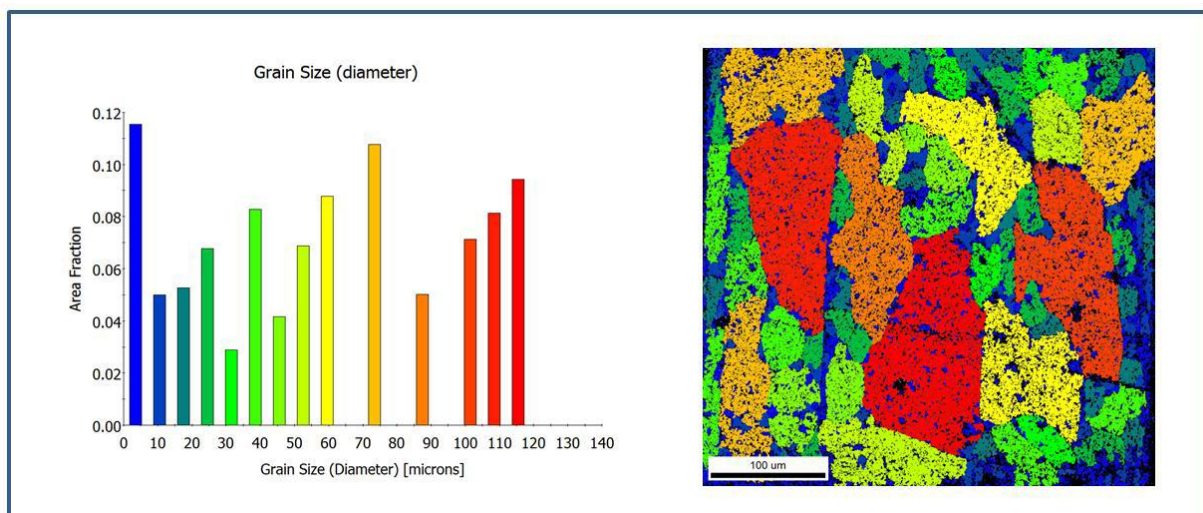


Abbildung 23: Korngrößenanalyse eines nicht gebondeten Al-Drahtes

3.6.2. Analyse initialer Bondverbindungen

Zur Untersuchung des Einflusses der Bondparameter auf die Mikrostruktur, wurden Bondverbindungen direkt nach dem Bondprozess analysiert, d.h. ohne weitere prozesstechnische oder Testbedingte Einflüsse auf das Drahtmaterial.

Analyse bzgl. der Korngröße

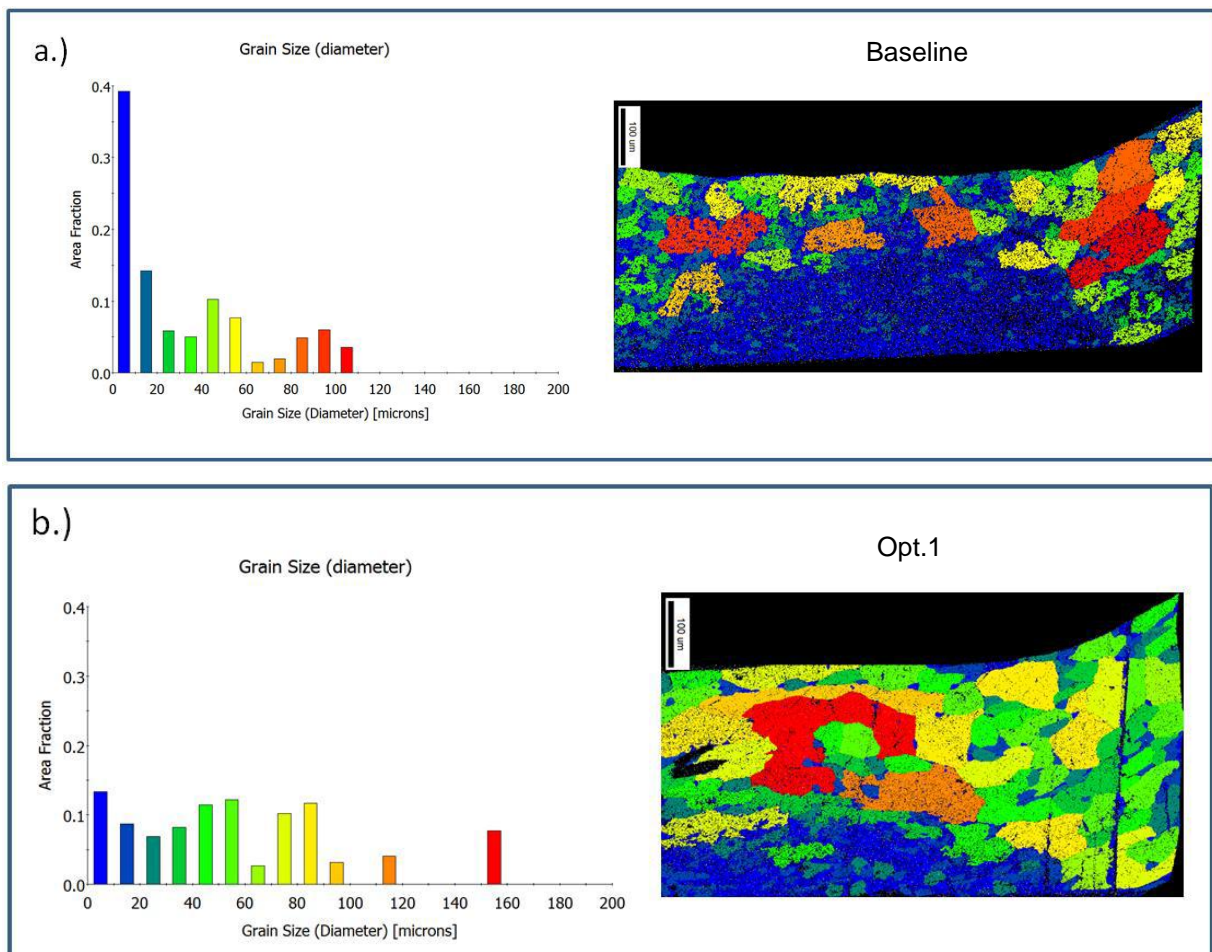


Abbildung 24: Korngrößenanalyse von Bonddraht a.) Baseline, b.) Opt.1 direkt nach dem Bondprozess

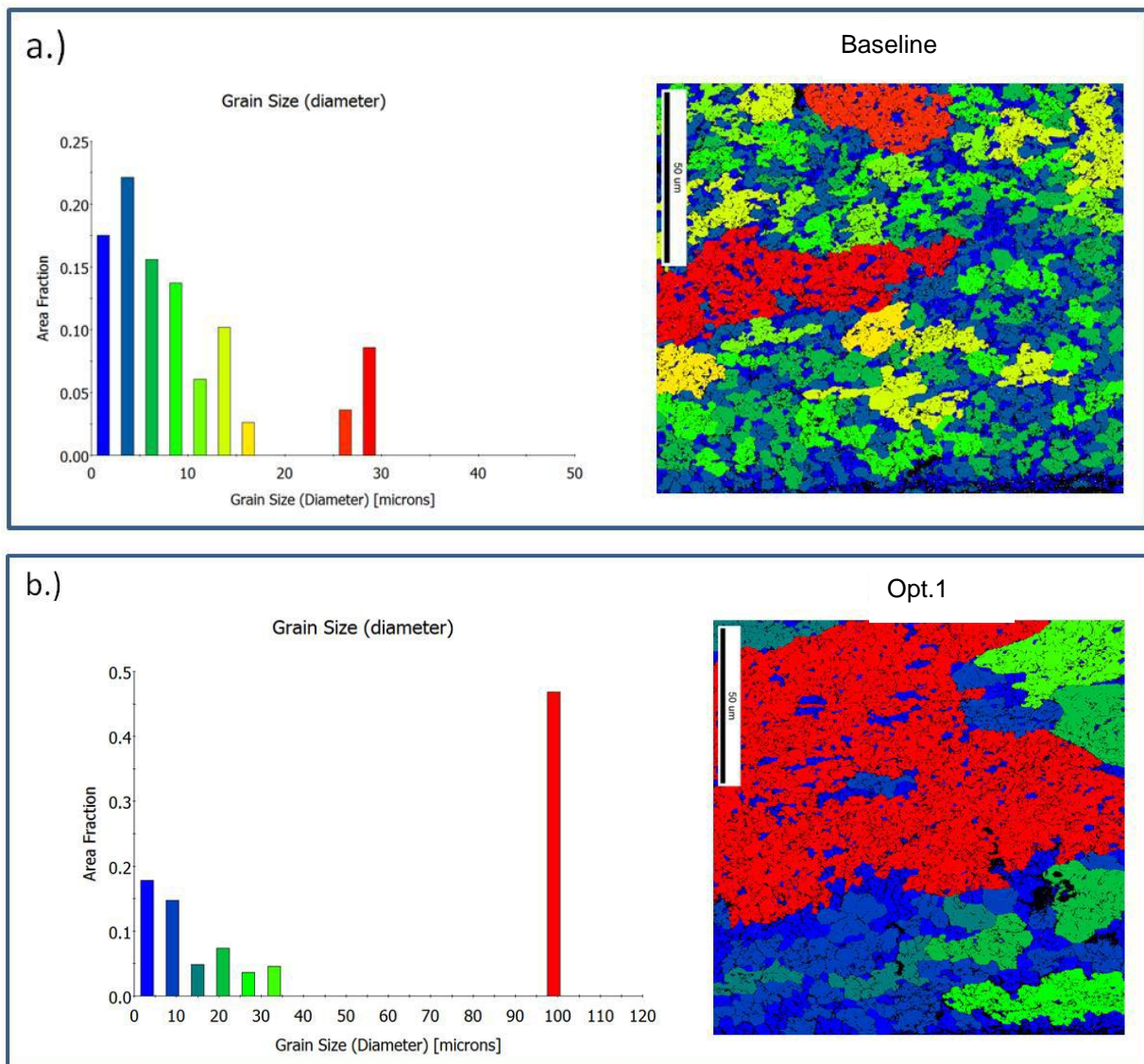


Abbildung 25: Analyse der Korngröße oberhalb des Si-Substrates im Wedgebereich a.) Baseline, b.) Opt.1

In Abbildung 24 und Abbildung 25 ist die Korngröße/Verteilung eines Bonddrahtes mit *Baseline*-Setting und eines Bonds mit *Opt.1*-Parameterset gebondet dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Korngröße im Wedgebereich kleiner als im Heelbereich ist. Des Weiteren ist ein ausgeprägter Korngrößegradient bzgl. der Bondhöhe (Abstand Silizium-Drahtoberseite) erkennbar. An der Drahtoberseite besitzt der Draht gröberes Korn als am Si-Chip-Interface. Der Bondprozess führt folglich zu einer Kornfeinung insbesondere im Wedgebereich wohingegen der Heelbereich relativ unbeeinflusst bleibt.

Analyse bzgl. Kristallorientierung

Abbildung 26 zeigt [001] IPF Karten der Probe *Baseline* und *Opt.1*. Anhand der [001]IPF Karte ist bei Probe *Baseline* bzgl. der [001] Achse keine Textur erkennbar. Bei Probe *Opt.1* scheint jedoch eine leichte [001]-A3 Vorzugsorientierung im Wedgebereich vorzuliegen.

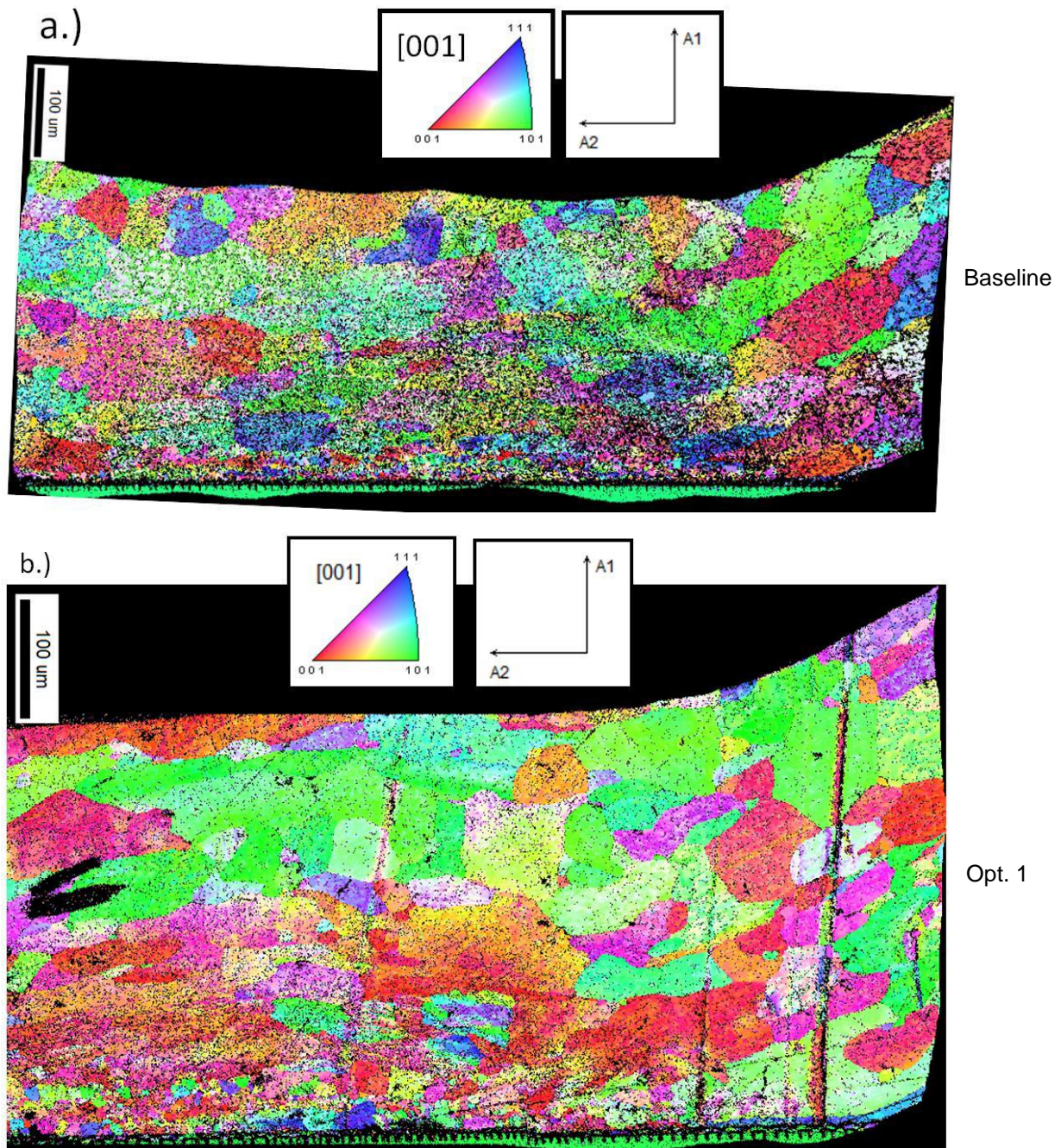


Abbildung 26: [001] IPF Karte des Bonddraht a.) Baseline und b.) Opt.1 direkt nach dem Bondprozess

Oberhalb des Si-Chips (ca. 200 μm) erscheint die Mikrostruktur (bzgl. Kornorientierung und Form) bei *Baseline* und *Opt.1* stärker beeinflusst als an der Drahtoberseite. Jedoch ist auch in einem höher aufgelösten Analysebereich (Abb. 27) bei Probe *Baseline* keine Vorzugsorientierung bzgl. der [001] Achse erkennbar. Auch hier wäre eine Analyse bzgl. weiterer Probenachsen für zukünftige Untersuchungen sinnvoll.

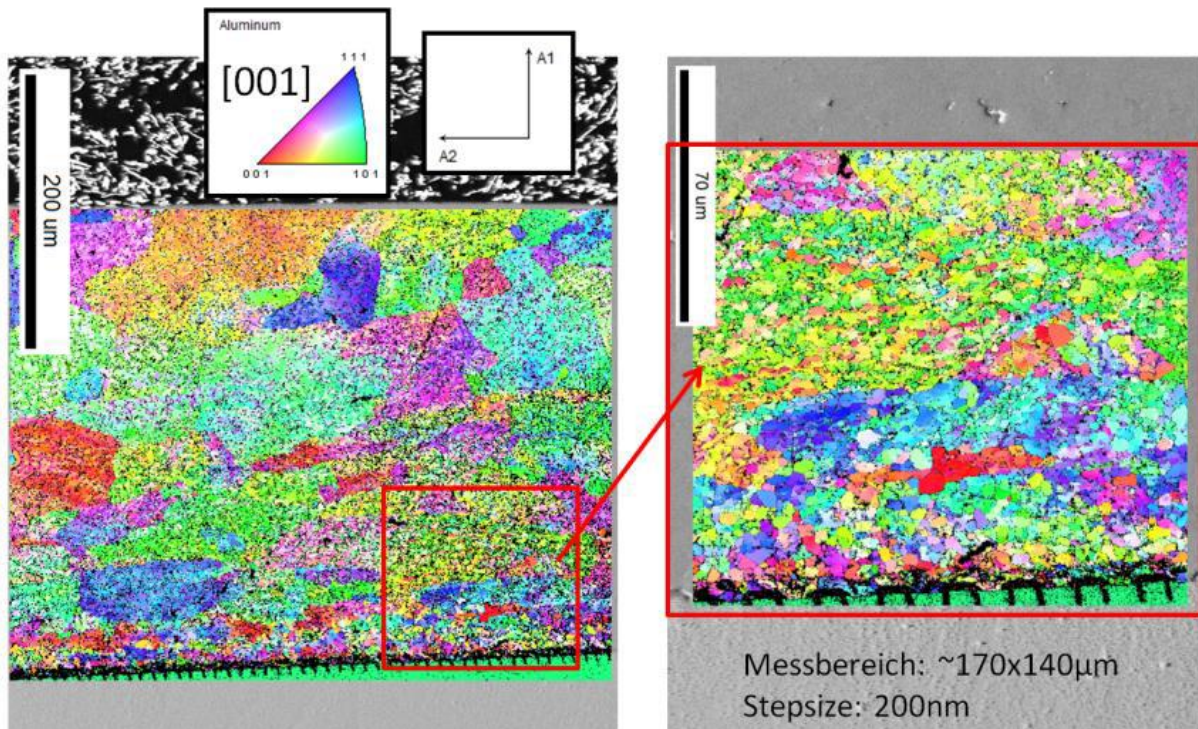


Abbildung 27: IPF Karte oberhalb des Silizium-Chips von Probe *Baseline*

3.6.3. Analyse prozesstechnisch bedingter thermischer Beeinflussung beim Demonstratoraufbau

Betrachtet man den Process-Flow beim Aufbau der Demonstratoren (Module), so ist zusehen, dass bei mehreren Prozessschritten eine erhöhte Temperaturbelastung vorliegt:

- Auflöten der gebondeten DCBs auf den Kühlkörper
- Silgelaushärtung
- Entgelen der Demonstratoren für Analysen

Daher wird die initial durch den Bondvorgang erzeugte Mikrostruktur an diesen Punkten beeinflusst. Der Grad dieser Belastung war unbekannt und sollte daher ebenfalls untersucht werden. Es war damit zu rechnen, dass die initiale Korngröße sowie Kornorientierung durch die einzelnen Temperaturbelastungen jeweils unterschiedlich stark verändert werden.

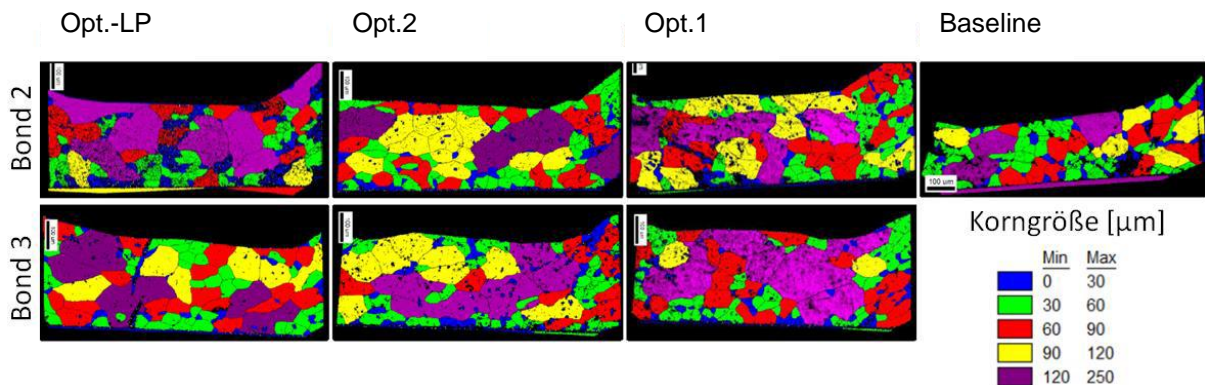


Abbildung 28: Vergleich der Korngröße unterschiedlich gebondeter Drähte nach prozesstechnisch bedingter thermischer Beeinflussung

Eindeutige Unterschiede in der Korngröße aufgrund der unterschiedlichen Bondprozesse waren nicht erkennbar.

Abbildung 29 zeigt eine quantitative Darstellung der ermittelten Korngrößen. Es ist zu sehen, dass die unterschiedlichen Bonddrähte ähnliche Flächenanteile der jeweiligen Korngröße aufweisen. Lediglich Opt.1_in_B3 und Opt.-LP_in_B2 weisen einen leicht höheren Anteil an ~ 240-260 μm Körnern auf. Unter der Annahme, dass sich Bonddraht 2 und 3 (B2 und B3) in ihrer Belastungsgeschichte nicht (merklich) unterscheiden, ist ein Vergleich zu Opt.1_in_B2 und Opt-LP_in_B2 sinnvoll. Aus diesem Vergleich kann geschlussfolgert werden, dass die Unterschiede in der Korngröße aus einer ungenügend großen Statistik (1 Schliffebene / Messbereich pro Bond) zu begründen sind. Da alle Bonds nach dem Bondprozess mehrere prozessbedingte Temperaturbelastungen erfahren haben, kann davon ausgegangen werden, dass diese zu einem starken Kornwachstum bzw. zur Rekristallisation und Kornwachstum geführt haben. Diese Temperaturbelastungen könnten zu Mikrostrukturveränderungen führen und eine direkte Unterscheidung des Einflusses der einzelnen Bondparameter auf die initiale Mikrostruktur erschweren bzw. verhindern.

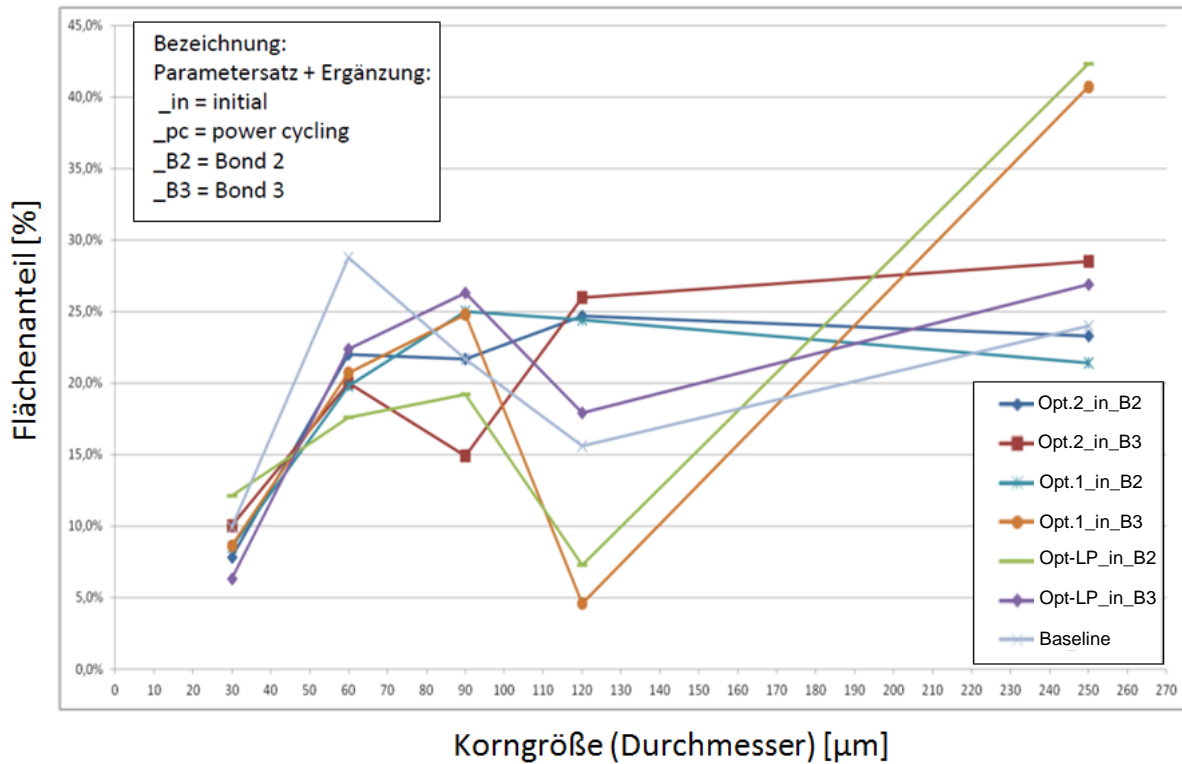


Abbildung 29: Korngrößen in Abhängigkeit der Bondparameter

3.6.4. Analyse von Bondverbindungen auf Demonstrateurebene nach Active-Powercycling

Analyse bzgl. Korngröße

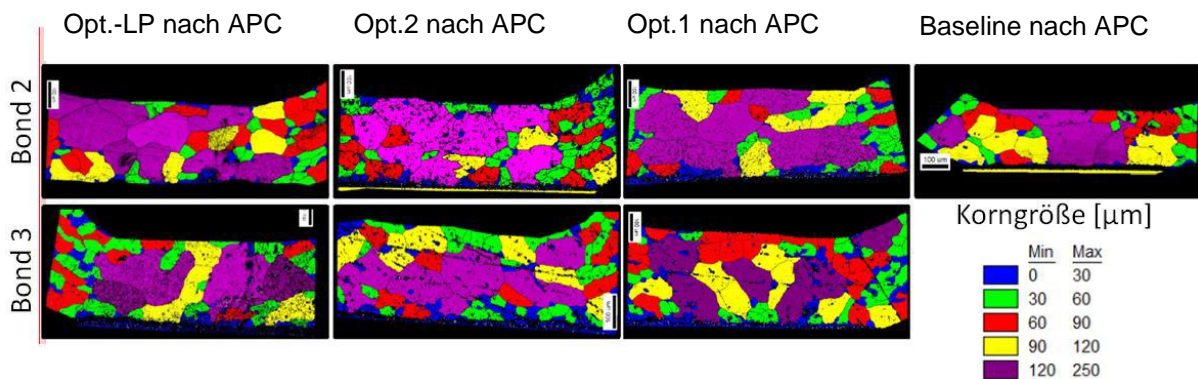


Abbildung 30: Vergleich der Korngröße unterschiedlich gebondeter, prozessierter und gezyklelter Drähte

Im Vergleich aller Proben ist kein signifikanter Unterschied in der Korngröße/Verteilung erkennbar. Alle Proben weisen einen ähnlichen Flächenanteil an Korngrößen zwischen 0-250µm auf. Abbildung 31 bestätigt, dass der Unterschied in der Korngröße zwischen den einzelnen Proben nur sehr gering ist. Der größte Flächenanteil fällt bei allen Proben auf Körner größer ~120µm. Ein Unterschied in der Korngröße/Verteilung ist aufgrund der geringen Statistik (zu geringer Anzahl an Messebenen/Proben) nicht eindeutig nachweisbar.

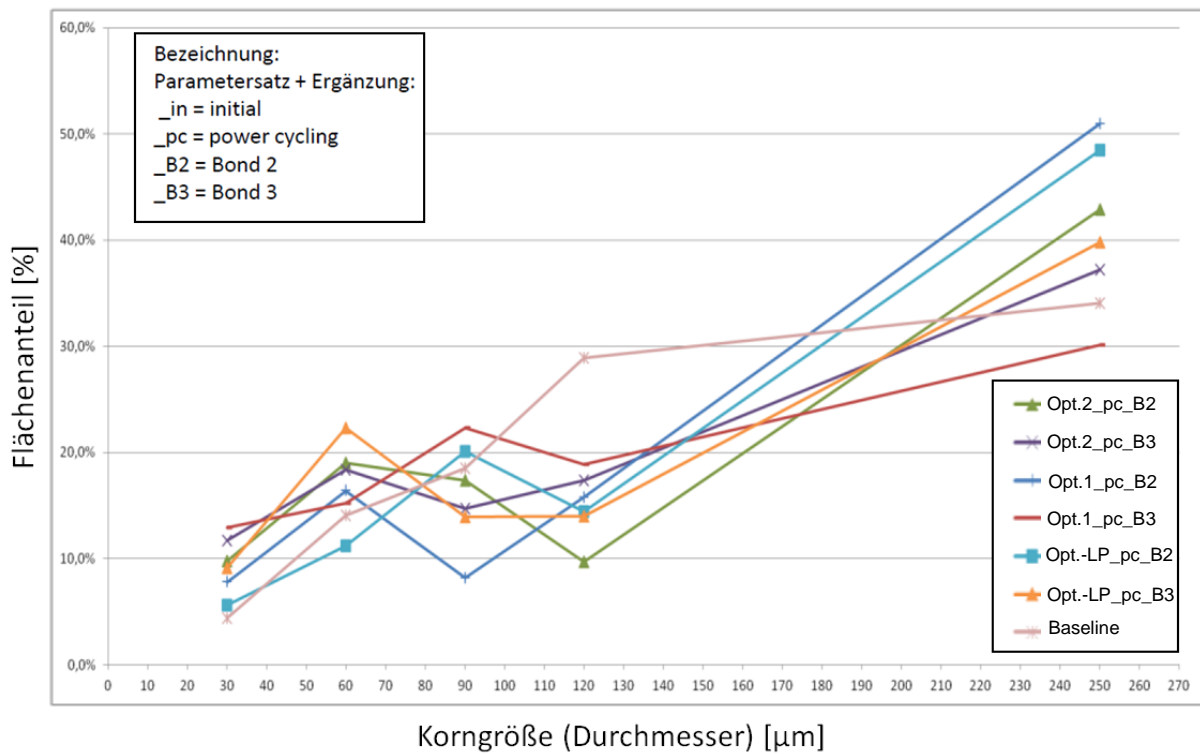


Abbildung 31: Korngrößen in Abhängigkeit der Bondparameter nach zyklischer Belastung

Analyse bzgl. Kristallorientierung

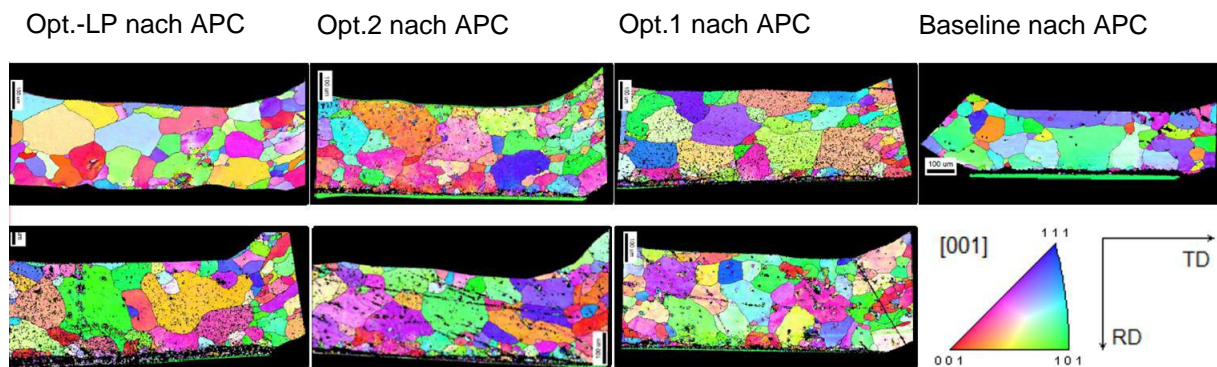


Abbildung 32: Vergleich der Kornorientierung unterschiedlich gebondeter, prozessierter und gezykelter Drähte

3.6.5. Vergleich der Mikrostruktur auf Demonstratorebene vor und nach Active Powercycling

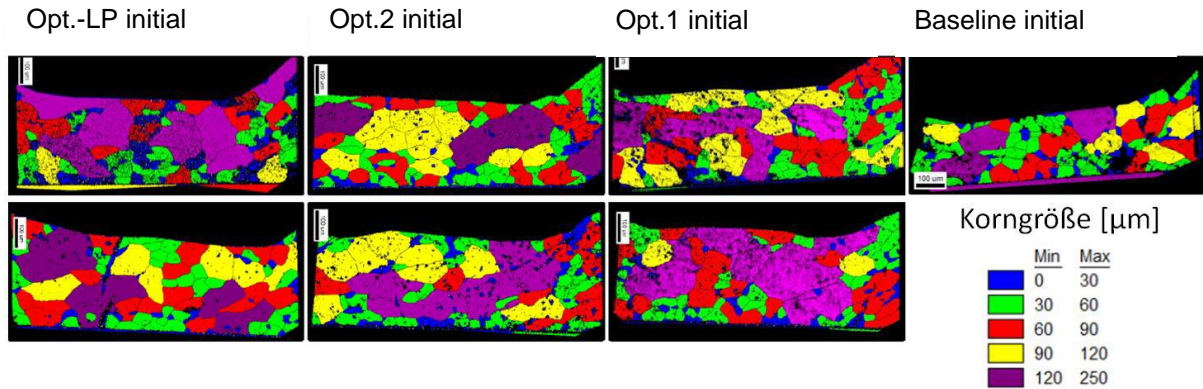


Abbildung 33: Korngrößen vor zyklischer Belastung

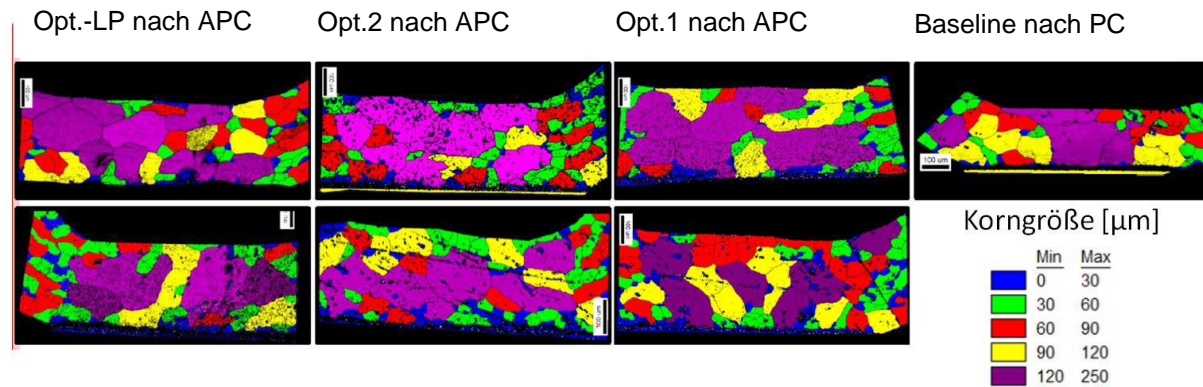


Abbildung 34: Korngrößen nach zyklischer Belastung

Es ist zu sehen, dass bei den meisten Bonddrähten eine leichte Zunahme des Flächenanteils von Körnern mit Größen zwischen 120-250 µm nach APC vorliegt. Jedoch zeigt Probe Opt.1, dass sich bereits zwei Bonddrähte (Bond 2 und Bond 3) nach APC deutlich in ihrer Korngröße unterscheiden. Dieser Unterschied entspricht in etwa dem im Vergleich vor und nach APC. Abbildung 35 verdeutlicht dieses anschaulich.

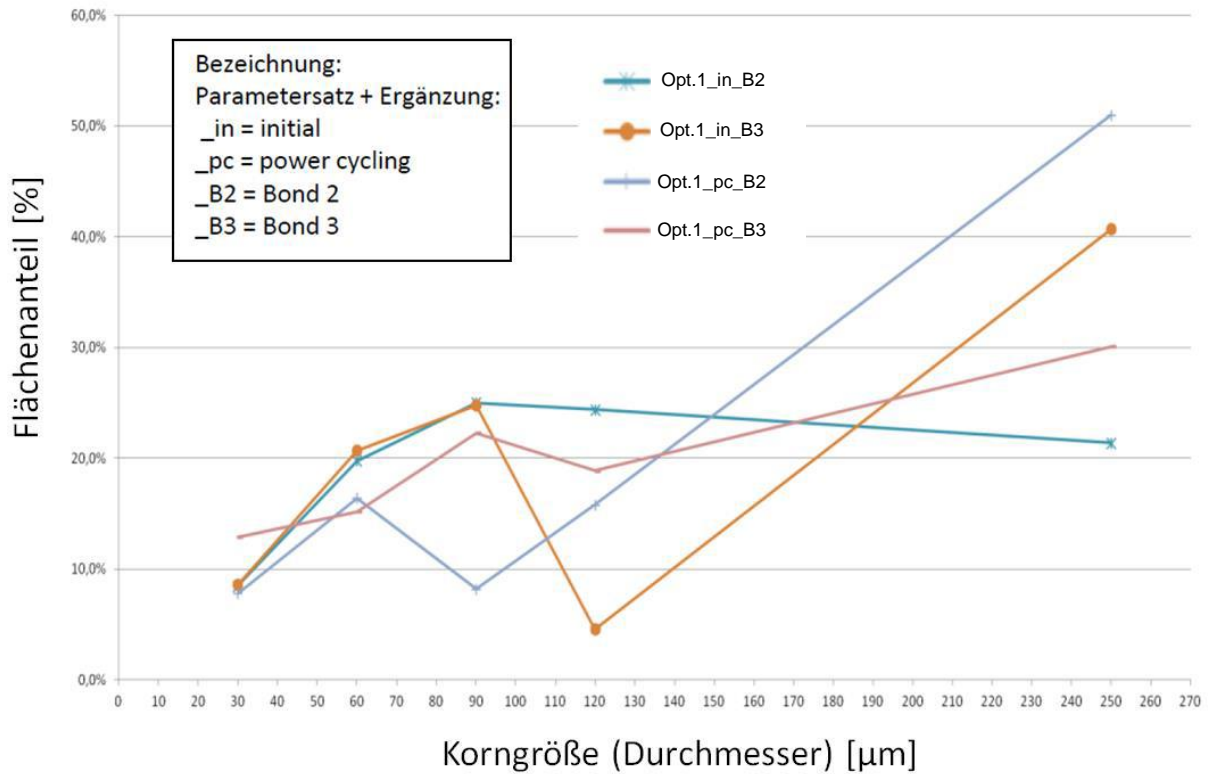


Abbildung 35: Vergleich der Korngröße von Probe Opt.1 (Bond 2 und Bond 3) vor und nach APC

Es ist daher davon auszugehen, dass die geringen Unterschiede in den Korngrößen im Vergleich „vor und nach APC“ aufgrund einer zu geringen statistischen Auswertung zustande kommen.

Analyse bzgl. Kristallorientierung

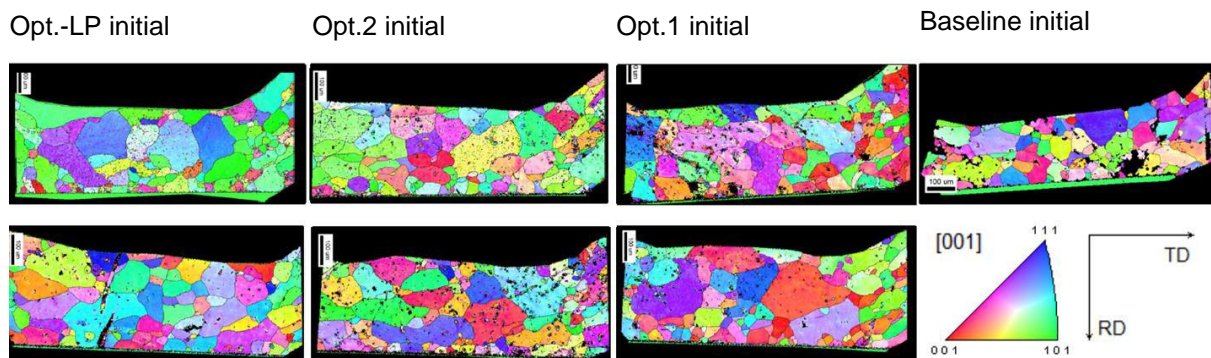


Abbildung 36: Kristallorientierungen ([001]-IPF) vor Active-Powercycling

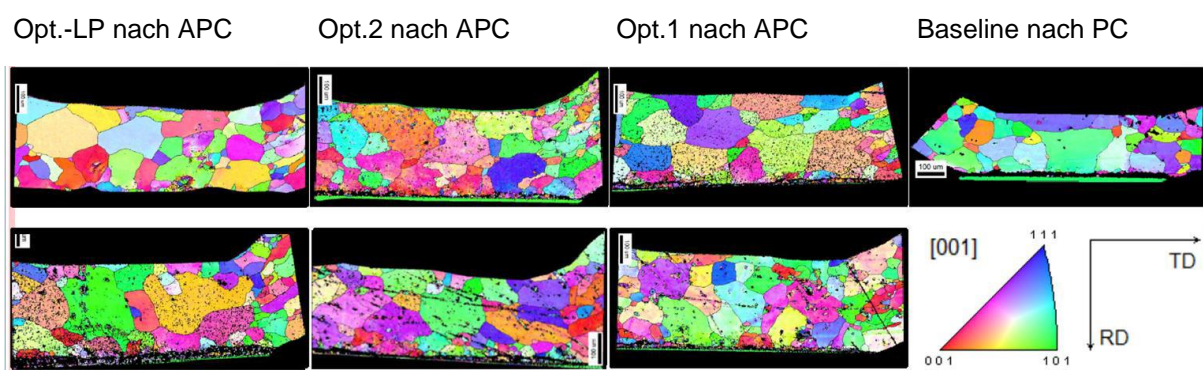


Abbildung 37: Kristallorientierungen ([001]-IPF) nach nach Active-Powercycling

Die Gegenüberstellung zeigt keine signifikanten Unterschiede in den Kristallausrichtungen bzgl. der [001] Probenachse. Vor sowie nach APC ist keine Vorzugsorientierung der Körner erkennbar.

3.6.6. Zusammenfassung der EBSD-Analysen

Die initiale, gebondete sowie gebondet und prozessierte Bonddraht-Mikrostruktur wurde mittels EBSD bzgl. Kornorientierung ([001]-IPF Karte) und Korngröße analysiert. Dabei wurde der Einfluss unterschiedlicher Bondprozesse miteinander verglichen. Die Ergebnisse der gebondeten und prozessierten Bonddrähte zeigen, dass Temperatureinwirkungen während des Process-Flow (Aufbau der Demonstratoren/Module) die initial gebondete Mikrostruktur signifikant verändert haben. Der Temperatureinfluss führt bei allen untersuchten Proben zu deutlichem Kornwachstum und regelloser Kornorientierung (bzgl. [001]). Zwischen den Proben war kein charakteristischer Unterschied in Korngröße und Orientierung erkennbar. Im Gegensatz dazu weisen die gebondeten Drähte ohne weiteren Temperatureinfluss einen deutlichen Gradienten in der Korngröße auf. Im Wedgebereich nimmt die Korngröße zum Si-Chips hin deutlich ab und liegt unterhalb der des initialen Drahtes. Ebenfalls zeigte sich anhand von Probe Baseline und Opt.1, dass unterschiedliche Bondparameter zu unterschiedlichen Korngrößen sowie Vorzugsorientierungen der Körner führen. Im Vergleich der Korngröße und Kornorientierungen vor und nach APC sind keine wesentlichen Unterschiede erkennbar. Dies kann jedoch aufgrund der geringen statistischen Auswertung nicht eindeutig belegt werden.

Es wird vermutet dass die auftretende Kornvergrößerung gemäß der Hall-Petch Beziehung die Streckgrenze des Drahtes herabsetzt und somit den Widerstand gegen Risswachstum

senkt. Somit ist als Folge dieser Temperaturbelastung ein schnelleres Risswachstum und somit ein schnelleres Ausfallen des Bonddrahtes zu erwarten.

3.7. Materialänderungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit

3.7.1. Untersuchung der mechanischen Eigenschaften mithilfe des mechanischen Biegewechseltests

Die Optimierung des Drahtmaterials erfolgte hinsichtlich mechanischer und thermischer Eigenschaften, sowie der Stromtragfähigkeit. Diesbezüglich wurde ein neues Drahtmaterial des Projektpartners HERAEUS (CuCorAl) ausgewählt. Dabei handelt es sich um einen mit Aluminium ummantelten Kupferdraht, der die thermischen und elektrischen Eigenschaften des Kupfers mit dem Bondverhalten des Aluminiums kombiniert. Als Referenz für die mechanischen Eigenschaften dienten ein reiner Aluminium und ein reiner Kupferdraht (siehe Abb. 14).

Untersucht wurden die folgenden Drahtmaterialien:

- Al: Ø400µm
- Cu: Ø300µm
- CuCorAl 70/30: Ø400µm
- CuCorAl 60/40: Ø400µm
- CuCorAl 60/40: Ø300µm

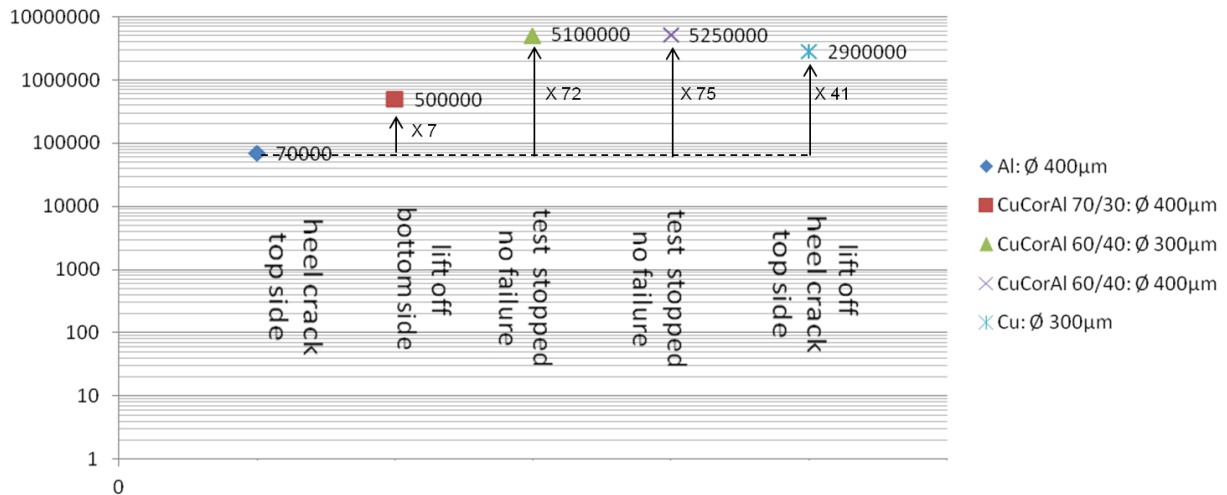


Abbildung 38: Lastwechselzahl versch. Drahtmaterialien im mech. Biegewechseltest (siehe 3.3.1)

Wie erwartet, versagten die Standard-Aluminiumdrähte im Heel (klassischer Heel-Crack). Dabei überdauerten die Al-Bondverbindungen im Mittel ca. 70000 Testzyklen.

Die CuCorAl -Drähte erreichten eine deutlich höhere Lastwechselzahl (siehe Abb. 38). Bei der Version mit 60vol. % Cu wurde der Test – für beide Drahtdurchmesser Ø 300/400µm – bei ca. 5.1 Mio. Testzyklen ohne Ausfall beendet. Die Version mit 70vol. % Cu versagte nach ca. 500.000 Lastwechseln. Allerdings kam es hier zum Abheben der Bondverbindung am Substrat (Lift-Off). Auf Grund der unterschiedlichen Ausfallmechanismen, lassen sich die Testergebnisse des CuCorAl 70/30 Drahtes nur eingeschränkt mit den restlichen Drahttypen (rein Al, rein Cu, CuCorAl 60/40) vergleichen. Der reine Cu-Draht erreichte eine durchschnittliche Lastwechselfestigkeit von 2.9 Mio. Testzyklen. Die Robustheit gegenüber mechanischer Belastung ist somit deutlich höher als beim reinen Al-Draht. Die Performance des CuCorAl 60/40 Drahtes konnte jedoch nicht erreicht werden. Bei reinem Cu-Draht, treten beide Fehlermechanismen – Heel Crack und Lift-Off – auf. Eine Optimierung der Bondparameter und einer Anpassung der Schichtdicken des Substrates, könnte vermutlich ein Lift-Off des Bond-Wedges (bei rein Cu und CuCorAl 70/30) vermieden werden, was zu einer deutlich höheren Lebensdauer im Test führen sollte.

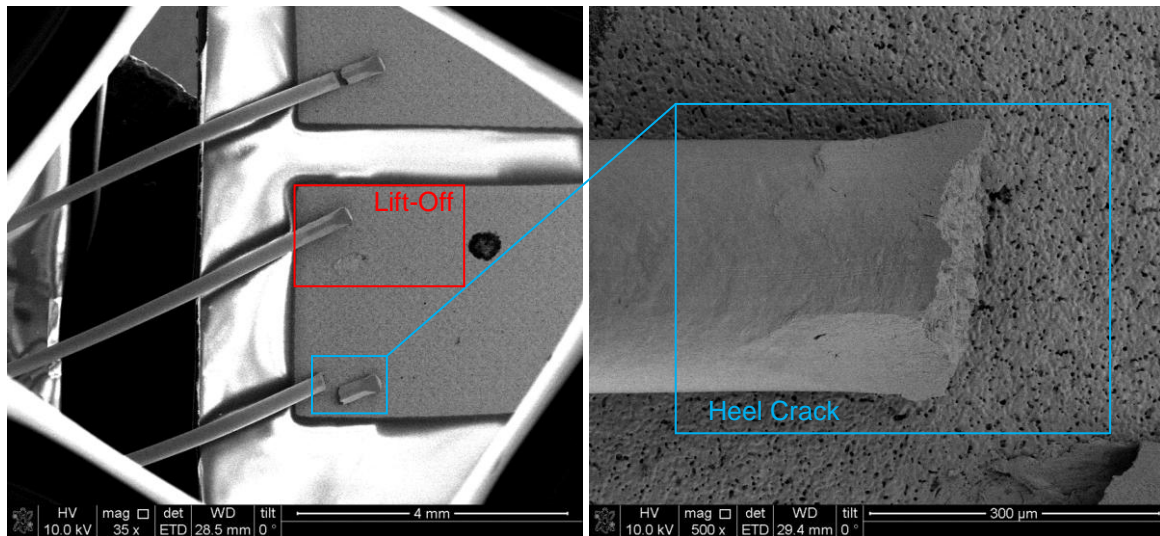


Abbildung 39: REM-Analyse ausgefallener Cu-Bondverbindungen

Um nähere Informationen über den Einfluss des mechanischen Stresses auf den CuCorAl - Draht zu bekommen, wurden SEM- (Scanning Electron Microscopy) und FIB-Analysen (Focused Ion Beam) an verschiedenen Drahtverbindung durchgeführt.

Die permanente plastische Deformation führt zu Materialaufwölbungen des Al-Drahtmantels (siehe Abb. 40). Im weiteren Testverlauf kommt es zu einer Verfestigung des Aluminiums und zur Bildung von Mikrorissen (siehe Abb. 40).

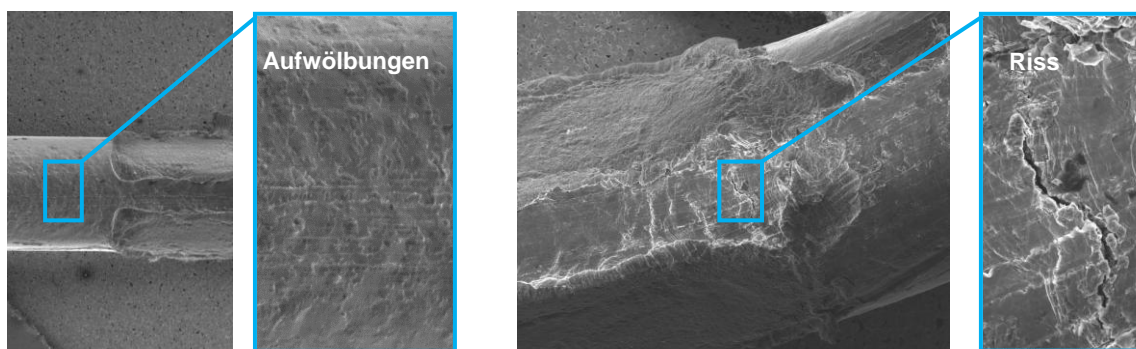


Fig. 40: Oberflächenanalyse SEM

Mit Hilfe der FIB-Präparation kann ein definierter Schnitt in den Draht eingebracht werden. So entsteht ein Querschnitt durch das Drahtmaterial, frei von mechanischen Einflüssen durch Schleifen oder Polieren. Feine Defekte in der Mikrostruktur des Drahtgefüges können so sichtbar gemacht und analysiert werden.

Auf diese Weise konnte in den plastisch deformierten Bereichen der Heels, eine Art Porenbildung im Aluminiummantel des Drahtes nachgewiesen werden. Weiter zeigten sich Mikrorisse im Interface zwischen Al-Mantel und Cu-Kern des Drahtes (s. Abb. 41).

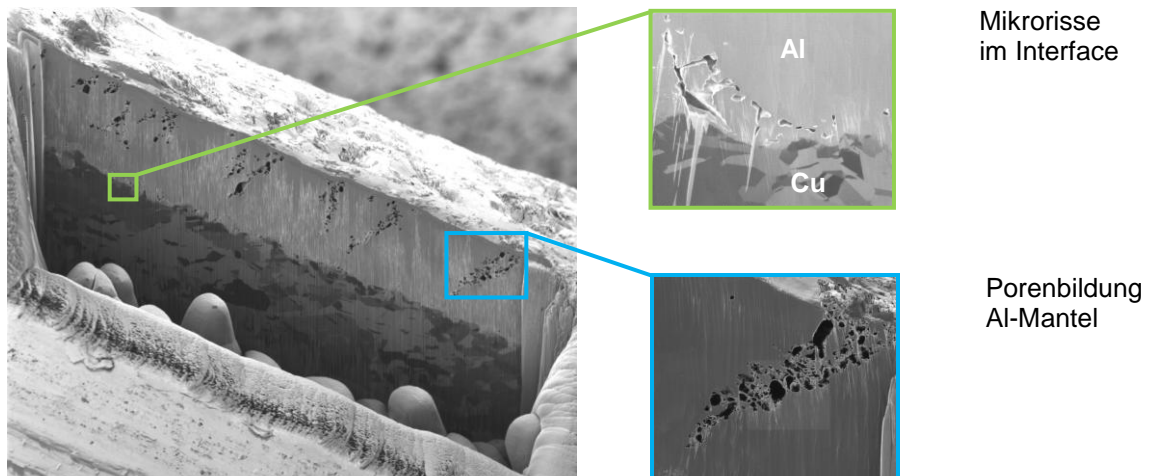


Fig. 41: SEM-Analyse FIB-Schnitt

Alle Schädigungen des CuCorAl-Drahtes beschränken sich lokal auf den Al-Mantel. Der Kupferkern des Drahtes bleibt weitestgehend unbeeinflusst. Die Festigkeit des CuCorAl (60/40) Drahtes wird durch die Schädigung des Al-Mantels marginal reduziert. Im Wesentlichen werden die mechanischen Eigenschaften aber durch das Kupfer im Draht bestimmt, weshalb diese auch nach dem Test nahezu unverändert sein sollten. Auch die elektrischen und thermischen Eigenschaften werden durch das Kupfer bestimmt und sollten keine größere Änderung erfahren.

3.7.2. Vergleich der Stromtragfähigkeit

Um die thermischen und elektrischen Eigenschaften des AlCu-Drahtes zu untersuchen, wurde ein Testaufbau zur Thermografie von Bondverbindungen entwickelt (s. Abb. 42).

Hierfür wurde ein DCB-Substrat mit Wärmeleitpaste auf eine „unendlich große“ Wärmesenke aufgebracht. In der ersten Kupferlage wurden durch einen Schnitt zwei Potentiale geschaffen, die mit $n=12$ parallelen Bonds verbunden wurden (s. Abb. 42).

Im Anschluss werden die Bondverbindungen schrittweise mit diskreten Strömen von 10-80A beaufschlagt. Die Maximale Temperatur (T_{max}) der Bonddrähte und die Substrattemperatur (T_{sub}) wurden mit Hilfe einer Thermokamera aufgenommen. Der absolute Temperaturanstieg (ΔT) der Bondverbindung wurde wie folgt berechnet:

$$\Delta T = T_{max} - T_{sub}$$

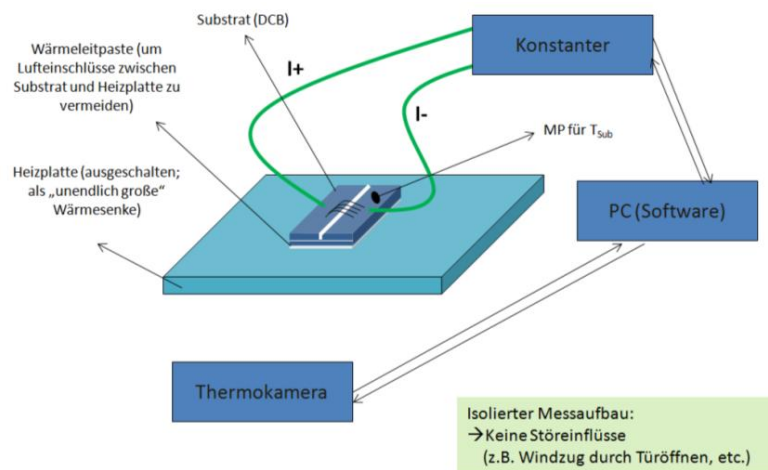


Abbildung 42: Messaufbau Thermografie/Stromtragfähigkeit

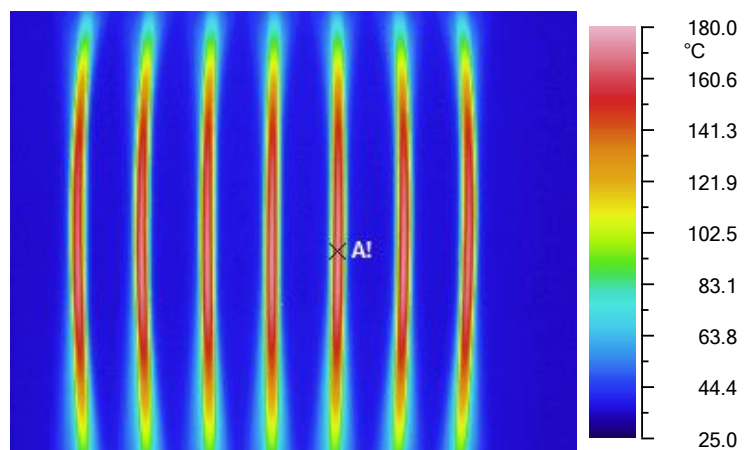


Abbildung 43: Thermografie paralleler Drahtbondverbindungen (n=7)

Nach jeder Messreihe wurde ein Draht aus dem Aufbau entfernt und die Messung erneut gestartet. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis nur noch ein Draht ($n=1$) übrig war. Anschließend wurde der Temperaturanstieg ΔT [K] in Abhängigkeit des Stromes I [A] und der Anzahl der Bonddrähte n berechnet.

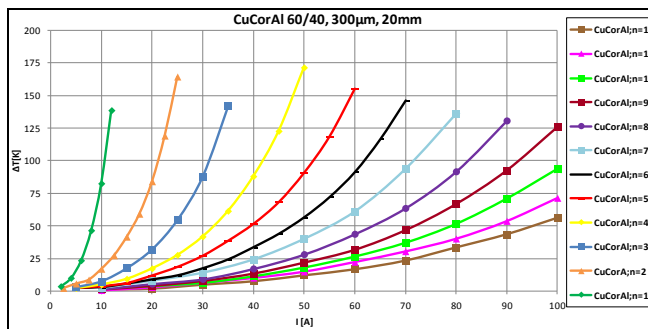


Abbildung 44: ΔT [K] in Abhängigkeit von I [A]

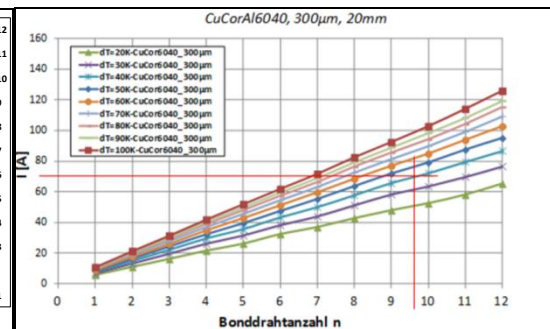


Abbildung 45: ΔT [K] in Abhängigkeit von n

Anhand der Daten können verschiedenen Kalkulationen durchgeführt werden:

- Für ein max. zulässiges ΔT_{\max} [K] und vorgegebenen Strom I [A], kann die benötigte Anzahl an Bonddrähten n berechnet werden.
- Für ein max. zulässiges ΔT_{\max} [K] und eine feste Anzahl an Bonddrähten n , kann der maximal zulässige Strom I [A] berechnet werden.
- Für einen vorgegebenen Strom I [A] und eine festgelegte Anzahl an Bonddrähten n , kann die resultierende Maximaltemperatur ΔT_{\max} [K] berechnet werden.

Ein Vergleich der ermittelten Werte für die verschiedenen Drahttypen (Al, CuCorAl, Cu) zeigt einen deutlichen Anstieg der Stromtragfähigkeit für CuCorAl und Cu (siehe Abb. 46/47).

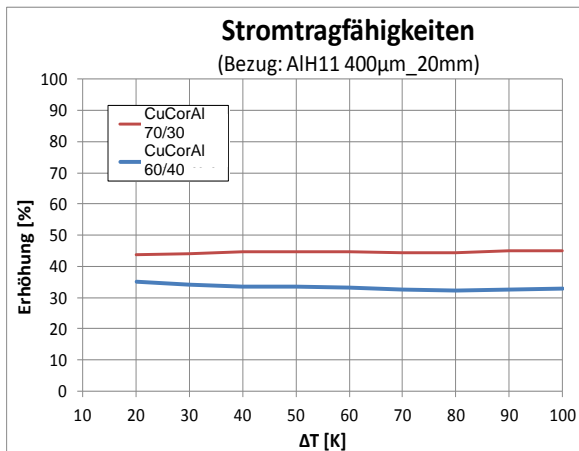


Abbildung 46: CuCorAl 400µm vs . Al 400µm

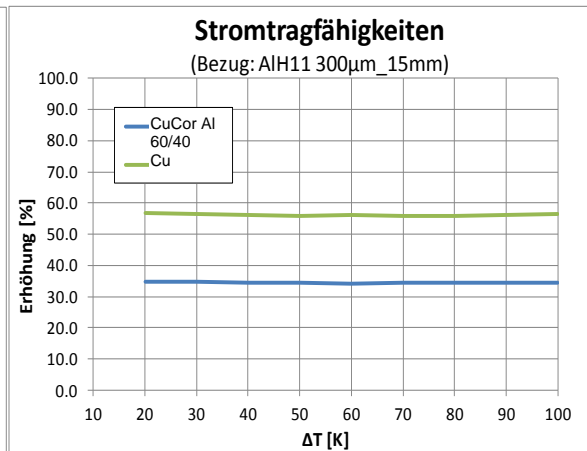


Abbildung 47: CuCorAl 300µm, Cu 300µm vs . Al 300µm

CuCorAl 60/40 → Al ≈ 35%
CuCorAl 70/30 → Al ≈ 43%

Cu → Al ≈ 57%
CuCorAl 60/40 → Al ≈ 35%

3.7.3. Auswirkung der Materialänderung (CuCorAl-Bonddraht) auf die Lebensdauer gebondeter Module im Active-Powercycling

Nach dem die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des alternativen Drahtmaterials (CuCorAl-Draht) untersucht und als vielversprechend eingestuft wurden, sollte eine positiver Effekt auf die Lebensdauer gebondeter Module im Powercycling nachgewiesen werden.

Im Aktive-Powercycling kann eine Rissbildung im Interface Drahtbond/Chip gezielt erzeugt werden. Durch aktive Strombeaufschlagung wird ein periodisches Aufheizen bzw. Abkühlen des Halbleiters und der Bondverbindungen erreicht. Das ΔT des Halbleiters sowie die Collector-Emitter-Spannung U_{CE} werden aufgezeichnet. Überschreiten ΔT und U_{CE} vorab definierte Grenzwerte ($\Delta T > 120K$; Anstieg U_{CE} 10%), wird der Test unterbrochen und das entsprechende Testmuster für Analysen entnommen.

Um den Effekt der Materialänderung zu ermitteln wurden Muster mit CuCorAl-Drähten (60/40, 70/30) aufgebaut. Der Test erfolgte im direkten Vergleich zu Al gebondeten Baugruppen (Baseline).

Testparameter:

Mittlere Temperatur T_m : 90°C
 Temperaturhub ΔT : 100K
 Stromfluss t_h : 3s
 Abkühlphase t_c : 6s

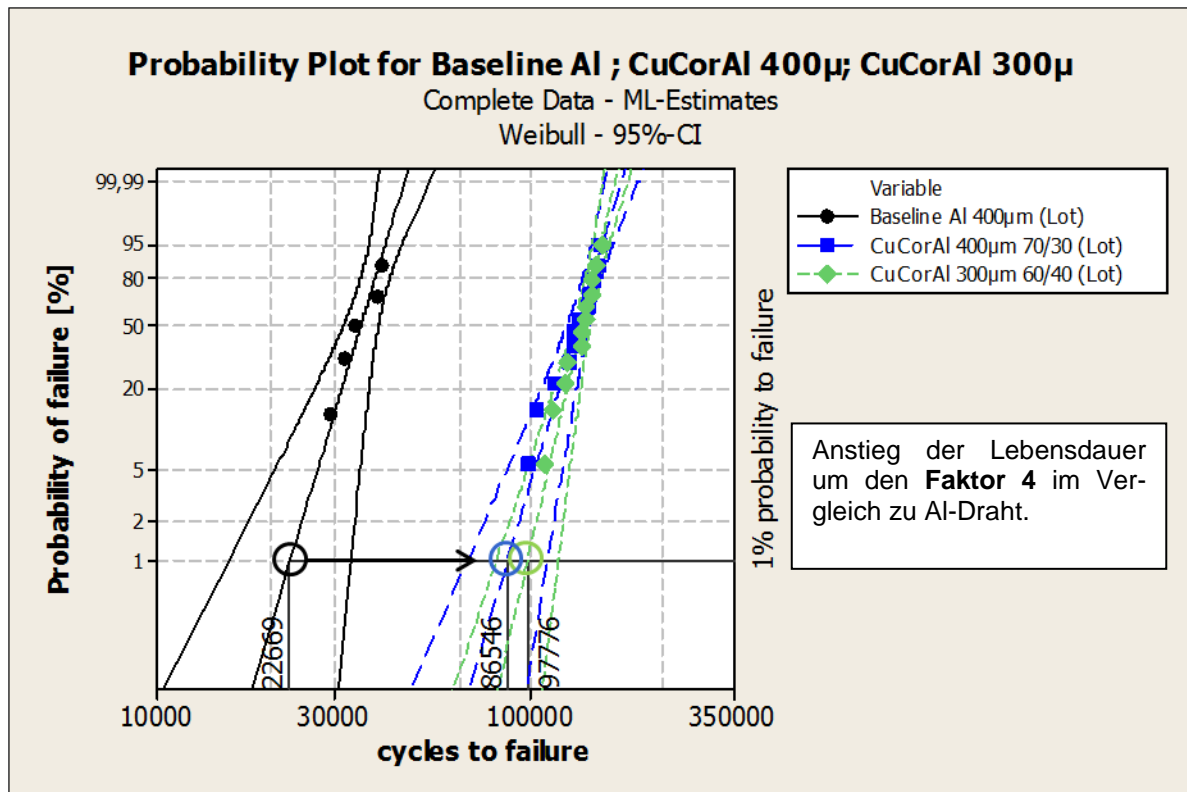


Abbildung 48: Cycles to Failure im Power Cycling gelöteter Aufbauten

Durch die Umstellung auf den CuCorAl-Draht konnte eine deutlich höhere Lastwechselzahl im Power Cycling erreicht werden. Es wurden zwei Versionen getestet, $\varnothing 400\mu\text{m}$ mit einem Volumenverhältnis CuCorAl von 70/30 und $\varnothing 300\mu\text{m}$ im Verhältnis 60/40. Bei beiden Drahttypen konnte ein ungefähre Anstieg der Lebensdauer um den Faktor 4 beobachtet werden. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der CTE des CuCorAl-Verbunddrahtes geringer ist, als der eines reinen Al-Drahtes (Cu: 16.5 ppm/K; Al: 24ppm/K). Somit ist der Mismatch in Bezug auf den Halbleiter (Si: 2,8ppm/K) geringer, was den Stress bei Temperaturwechseln deutlich reduziert.

Durch die höhere Robustheit des Bonddrahtes werden größere Lastwechselzahlen erreicht, was den thermomechanischen Stress für den gesamten Aufbau deutlich steigert. Dies führt

unweigerlich zu Schädigung der Lotverbindung (Rissbildung/Degradation). Ein schlechterer Wärmetransport der geschädigten Lotverbindung bewirkt einen deutlich höheren Temperaturanstieg ΔT bei Stromlast, was rückwirkend die Bondstelle stärker stresst und die Lebensdauer verkürzt.

Um den negativen Einfluss der Lotdegradation zu verhindern, wurden Aufbauten gefertigt deren Halbleiter (IGBTs) auf das Substrat (DCB) aufgesintert wurden. Die Sinterverbindung ist deutlich Robuster als die klassische Lotverbindung und bleibt auch bei hohen Lastwechselzahlen stabil.

Im Anschluss wurden diese Module ebenfalls mit verschiedenen Drahtmaterialien gebondet und im Active-Powercycling getestet (siehe Abb. 49).

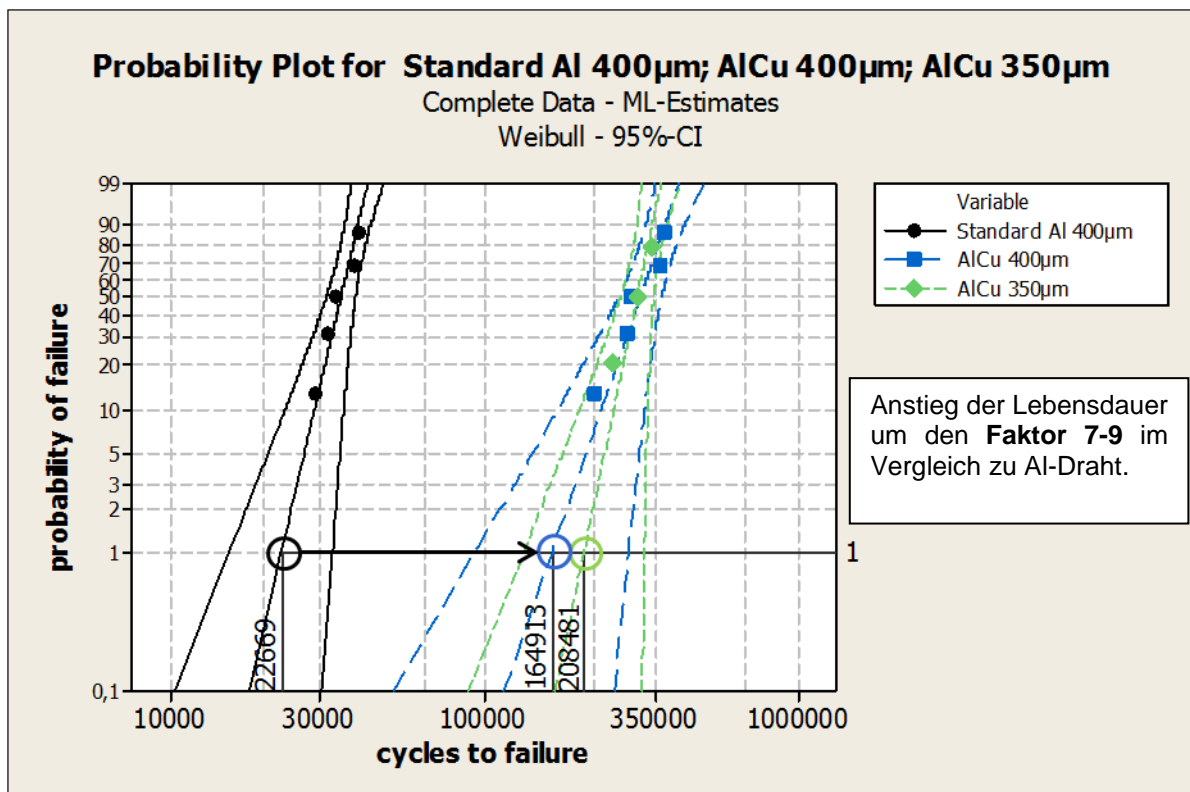


Abbildung 49: Cycles to Failure im Power Cycling gesintertter Aufbauten

Mit den gesinterten Aufbauten konnte, bei Verwendung des CuCorAl-Drahtes, sogar eine Steigerung der Lebensdauer um den Faktor 7-9 erreicht werden.

3.8. Analyse des Einflusses der Oberflächenrauheit auf die Bondqualität

3.8.1. Ziel der Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Bondflächen (Details siehe Versuchsbeschreibung) mit verschiedenen Topographien hinsichtlich ihrer Bondbarkeit untersucht. Insbesondere sollte gezeigt werden, wie Bondqualität und Oberflächenrauheit in Zusammenhang stehen.

3.8.2. Versuchsbeschreibung

Nach heutigem Stand der Technik werden die Bondflächen von Leistungskontakten (z.B. Massebond, Peripherieanschlüsse) häufig mechanisch vorbehandelt bzw. gefertigt. Ein gängiges Verfahren ist hierbei das Überfräsen der Kontaktfläche. Gerade bei Druckgussbaugruppen (z.B. Grundplatten/Kühlkörper) kann so, die nicht bondbare Gushaut entfernt werden und eine definierte Oberfläche des Grundmaterials geschaffen werden. Die dabei entstehende Rauheit wird definiert über die Prozessparameter beim Fräsen. Insbesondere Vorschubgeschwindigkeit, Überlappungsbereich und Umdrehungszahl sind hier maßgebend. Eine hohe Vorschubgeschwindigkeit ermöglicht eine kurze Prozesszeit und ist somit natürlich erwünscht. Es ist daher unbedingt notwendig, die damit einhergehende Oberflächencharakteristik zu untersuchen und die Auswirkungen auf die Bondqualität zu prüfen.

Im Folgenden wurden durch Variation der Vorschubgeschwindigkeit verschiedene Rauheiten eingestellt (siehe. Abb. 50). Es folgte die Messung der Rauheitskennwerte R_z , R_a , R_{max} in x- und y-Richtung mittels Nanofokus. Anschließend wurden die Oberflächen gebondet und die typischen Scher- und Pullwerte zur Charakterisierung der Bondqualität ermittelt.

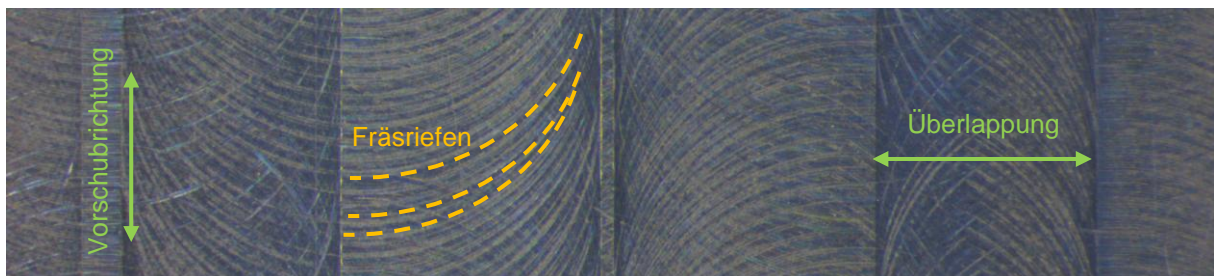


Abbildung 50: Oberfläche einer gefrästen Grundplatte

3.8.3. Kennwerte und Definitionen der Oberflächenrauheit

Die **gemittelte Rautiefe R_z** ist die Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltals innerhalb einer Einzelmessstrecke l_r . Üblicherweise ergibt sich R_z aus der Mittelung der Ergebnisse von fünf Einzelmessstrecken. Insgesamt reagiert R_z empfindlicher auf die Veränderung von Oberflächenstrukturen als R_a .

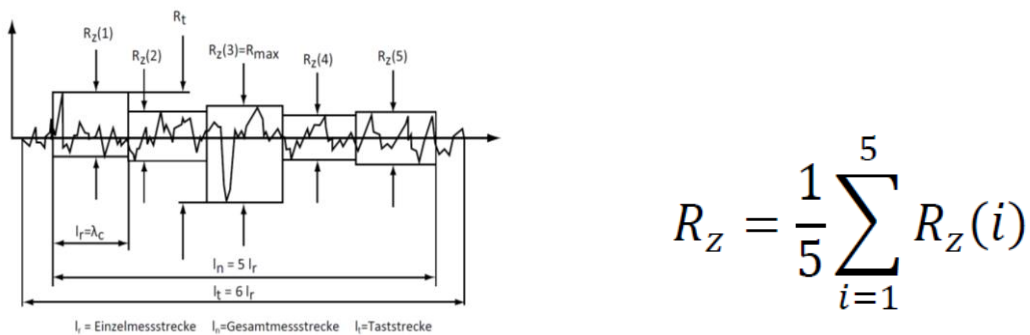


Abbildung 51: Ermittlung des R_z -Wertes

Der **arithmetische Mittenrauwert R_a** ist das arithmetische Mittel der Beträge der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils innerhalb der Einzelmessstrecke l_r . Er stellt die mittlere Abweichung des Profils von der mittleren Linie dar.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx \quad \text{bzw.} \quad R_a = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |z(x)| dx$$

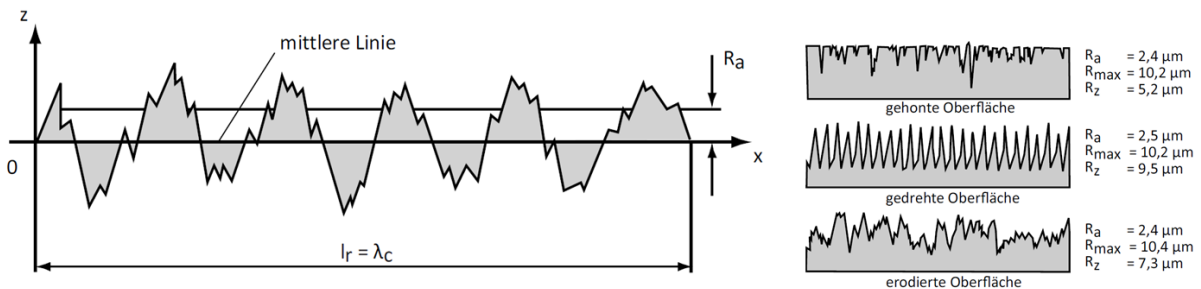


Abbildung 52: Ermittlung des R_a -Wertes

3.8.4. Technologie, Parameter und Material

Testreihe 1:

- › Bonder :Nr.1
- › Bonddraht: Al 200µm
- › Grundplatte
- › Umdrehungszahl: 2000 U/min, Vorschub 100, 200, 300 mm/min
- › Neuer Fräser, ohne Schmiermittel

Testreihe 2:

- › Bonder: Nr.2
- › Bonddraht Al 200µm
- › Grundplatte
- › Bondfläche gefräst

Bestimmung der Oberflächenkennwerte

- › Nanofokus µsurf
- › Auflösung < 20nm
- › Messung nach ISO 4287

3.8.5. Bestimmung der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und Messrichtung

Testreihe 1

Durch die Variation der Vorschubgeschwindigkeit (Vorschub: 100, 200, 300 mm/min) beim Fräsen werden unterschiedliche Rauheiten erzeugt. Die Kennwerte R_a , R_z und R_{max} werden im Anschluss mittels Nanofokus ermittelt. Um eine eventuelle Richtungsabhängigkeit der Kennwerte zu prüfen, werden die Nanofokusmessungen in x- und y-Richtung durchgeführt (siehe Abb. 53).

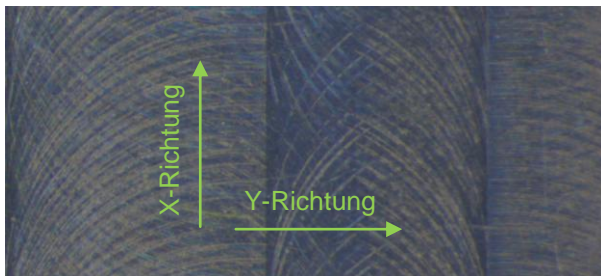


Abbildung 53: Messrichtung für Nanofokusmessungen

Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zeigt sich auch eine deutlich höhere Rauheit der Oberfläche. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von 100mm/min auf 300mm/min führt dazu, dass sich alle charakteristischen Kennwerte R_a , R_z und R_{max} ungefähr verdoppeln (siehe Abb.38). Zwischen den Messrichtungen x und y zeigen sich ebenfalls Abweichungen. Prinzipiell fallen die die Messwerte in y-Richtung niedriger aus (siehe Abb. 54).

| Vorschub [mm/min] | Richtung [µm] | R_a [µm] | R_a y/x | R_z [µm] | R_z y/x | R_{max} [µm] | R_{max} y/x |
|-------------------|---------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|---------------|
| 100 | Längs (x) | 0,58 | 0,74 | 3,51 | 0,75 | 3,75 | 0,87 |
| | Quer (y) | 0,43 | | 2,62 | | 3,28 | |
| 200 | Längs (x) | 0,95 | 0,64 | 5,43 | 0,70 | 6,07 | 0,76 |
| | Quer (y) | 0,61 | | 3,82 | | 4,64 | |
| 300 | Längs (x) | 1,31 | 0,60 | 7,44 | 0,71 | 7,95 | 0,76 |
| | Quer (y) | 0,78 | | 5,26 | | 6,01 | |

Abbildung 54: Rauheitskennwerte in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Messrichtung

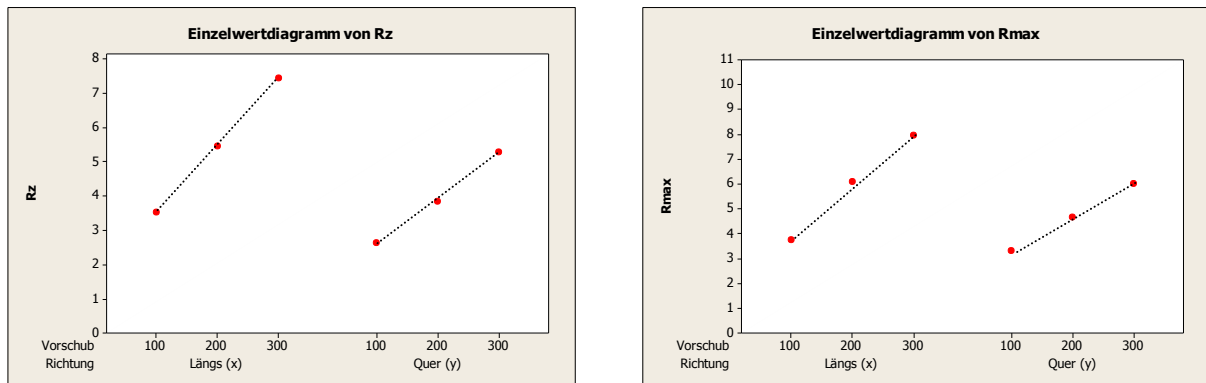


Abbildung 55: Graphische Darstellung der Rauheit in Abh. von Vorschubgeschwindigkeit und Messrichtung

Die so präparierten Bondflächen wurden im Anschluss mit einem Al-Draht ($\varnothing 200\mu\text{m}$) gebondet. Beim Bondprozess selbst zeigte keines der Muster besondere Auffälligkeiten. Alle Muster konnten problemlos – mit identischen Parametern – gebondet werden. Zur Bewertung der initialen Bondqualität wurde der Schertest durchgeführt. Charakteristische Messgrößen für die Bewertung sind Scherkraft und Scherfläche/Schercode der Bondverbindung (siehe auch 3.2).

Scherkraft:

- Kraft die der Meisel benötigt um die Bondverbindung abzuscheren. Die Scherkraft sollte möglichst hoch sein und geringe Streuung haben.

Scherfläche/Schercode:

- Bei guter Anbindung schert der Meisel komplett durch das Drahtmaterial.
-> Scherfläche 75-100%
 - Bei schlechter Anbindung hebt der Bond ganz, oder teilweise von der Oberfläche ab.
-> Scherfläche < 50%
- Die Scherfläche sollte mind. 50% betragen

Im Folgenden wurden die Ergebnisse des Schertests graphisch aufbereitet (Boxplot, Punktdiagramm und einfache ANOVA) und die Ergebnisse in Bezug auf die Bondqualität erarbeitet.

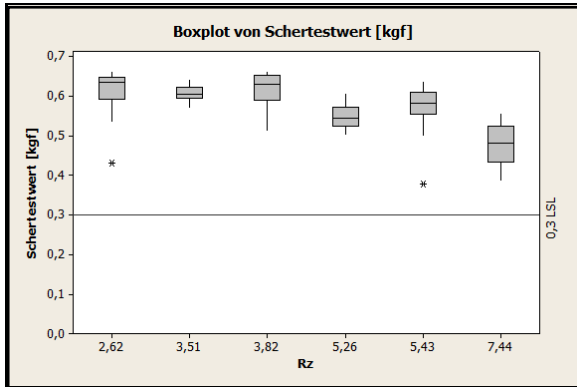


Abbildung 56: Boxplot Scherkraft über R_z -Wert

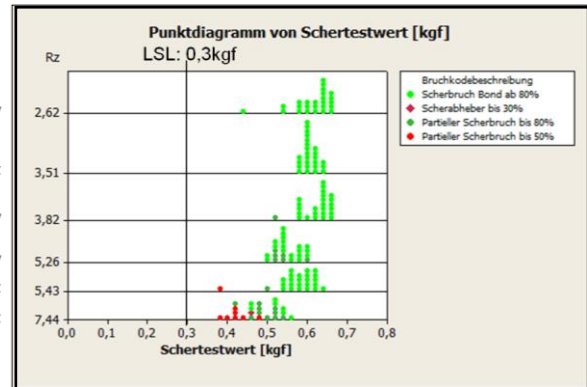


Abbildung 57: Scherwert und Bruchcode über R_z -Wert

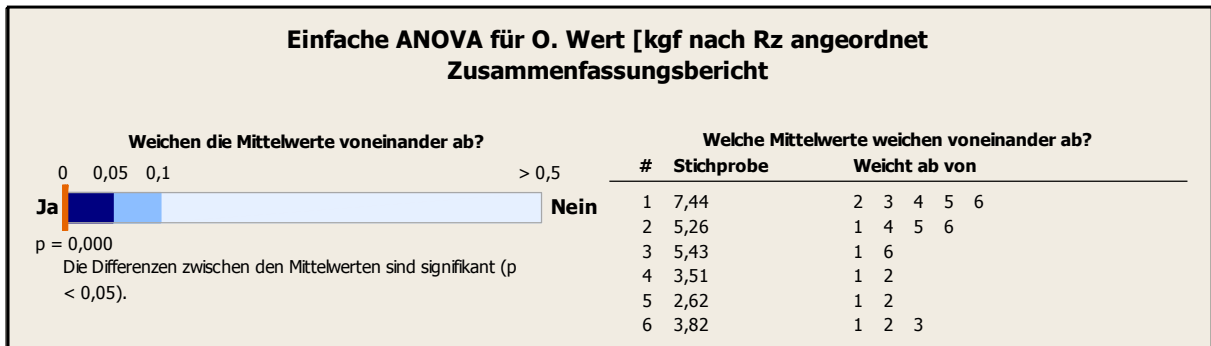


Abbildung 58: ANOVA: Vergleich der einzelnen Stichproben (Scherwerte)_Teil 1

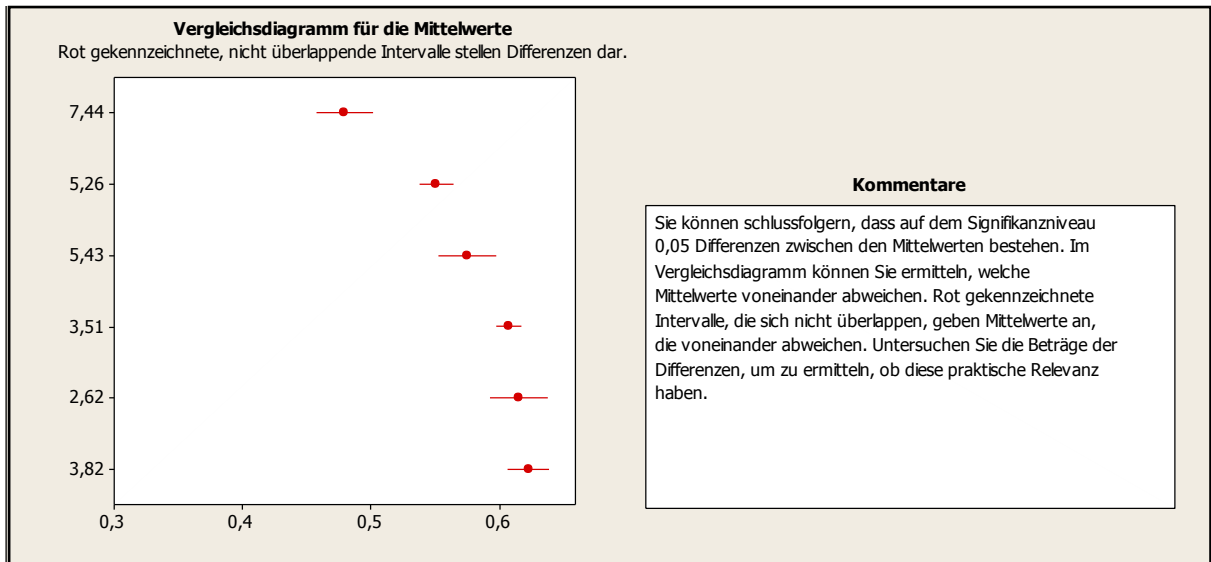


Abbildung 59: ANOVA: Vergleich der einzelnen Stichproben (Scherwerte)_Teil 2

Abbildung 56 zeigt die Boxplots der einzelnen Schertestmessreihen über dem jeweiligen R_z -Wert der Bondfläche. Die Darstellung eignet sich um mehrere Stichproben miteinander zu

vergleichen. Es lassen sich Aussagen über die Lage des Median, die Streuung und Verteilung der Daten, sowie Ausreißern machen.

Abbildung 57 teilt die Schertestergebnisse definierten Schercodes zu. Es wird die Häufigkeit der auftretenden Schercodes in Abhängigkeit des R_z -Wertes dargestellt. Gleichzeitig kann ein Zusammenhang zwischen Schercode und Scherkraft abgeleitet werden.

Abbildung 58/59 zeigt das Ergebnis der ANOVA (Analysis of Variance), die ebenfalls dazu genutzt wird Stichproben miteinander zu vergleichen. So lässt sich nachweisen, ob sich die vorliegenden Daten in Bezug auf Mittelwert und Standardabweichung signifikant unterscheiden.

Ergebnisse der Testreihe 1

Über den Schertest konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der gemittelten Rautiefe R_z und der Qualität der Bondverbindung nachgewiesen werden. Tendenziell zeigen die Daten eine Abnahme der Scherkraft mit ansteigendem R_z -Wert. Insgesamt konnten Stichproben von Oberflächen mit einem R_z -Wert zwischen 2,62 und 7,44 μm analysiert werden. Die Daten für R_z 2,62 μm 3,51 μm und 3,82 μm unterscheiden sich dabei nur gering (nicht signifikant nach ANOVA). Die Gruppen mit R_z -Werten größer 5,26 μm zeigen einen eindeutigen Abfall der Scherkraft. Die Gruppe der Messwerte mit maximalem R_z von 7,44 μm hat den niedrigsten Scherkraftwert und gleichzeitig die größte Streuung der Messwerte (signifikante Abweichung zu allen anderen Stichproben nach ANOVA).

Ab R_z 3,82 μm treten partielle Scherbrüche auf deren Anbindungsfläche jedoch deutlich größer als 50 % ist und somit noch den Qualitätsanforderung einer „guten“ Bondverbindung entsprechen. Bei R_z 5,43 μm gibt es den ersten partiellen Scherbruch mit Restanbindungsfläche kleiner 50%. Bei R_z 7,44 μm häufen sich die partiellen Scherbrüche <50% und es konnte zusätzlich ein kompletter Scherabheber detektiert werden.

Testreihe 2

Auch für diese Testreihe lagen Grundplatten vor, deren Bondflächen überfräst wurden. Die Muster konnten in zwei Gruppen (M1 und M2) eingeteilt werden. Die Kennwerte R_a , R_z und R_{max} wurden ebenfalls mittels Nanofokus bestimmt (siehe Abb. 60 & 61).

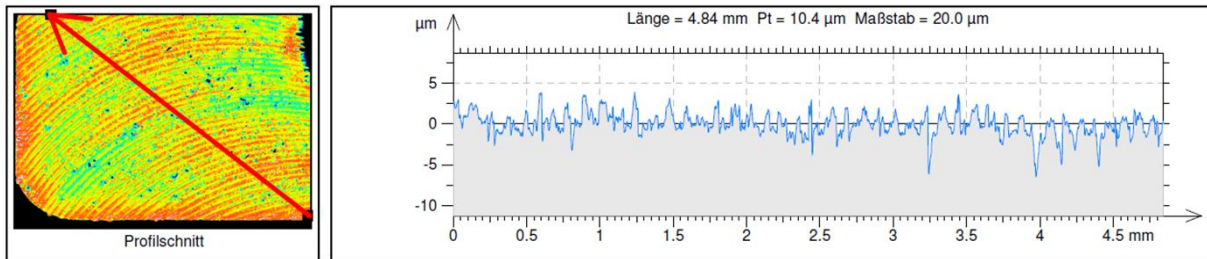


Abbildung 60: Nanofokus Profilschnitt

| Bezeichnung | R_a [µm] | R_z [µm] | R_{max} [µm] |
|-------------|---------------|---------------|-------------------|
| M1 | 0,96 | 7,26 | 9,11 |
| M2 | 0,75 | 5,38 | 7,48 |

Abbildung 61: Nanofokusmessung nach ISO4287

Analog zur Testreihe 1 (siehe Seite 43) wurden auch hier die Muster mit einem Al-Draht ($\varnothing 200\mu\text{m}$) gebondet. Die Prozessparameter unterscheiden sich leicht von denen der Testreihe 1, da es sich um eine etwas andere – auf Aluminium basierende – Legierung handelt. Innerhalb der Testreihe wurden identische Prozessparameter für M1 und M2 verwendet. Zur Bewertung der Bondqualität wurde der Schertest durchgeführt.

Ergebnisse der Testreihe 2

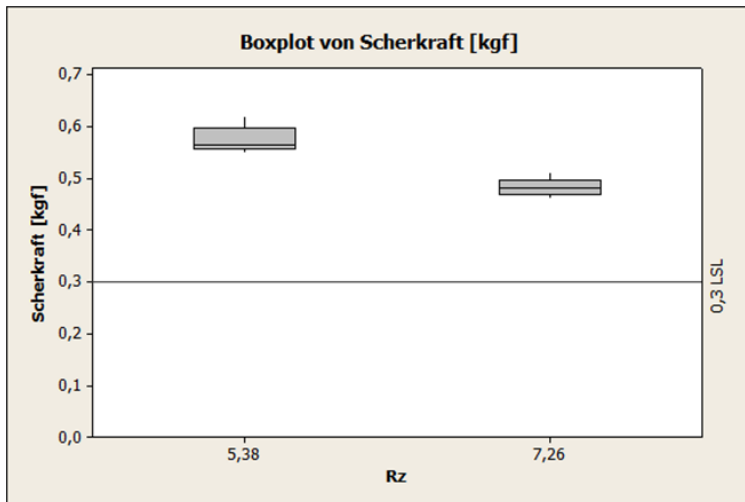


Abbildung 62: Boxplot Scherkraft über R_z -Wert

Die grafische Aufbereitung der Daten im Boxplot zeigt auch hier einen deutlichen Rückgang der Scherkraft bei höherem R_z -Wert. Der Median sinkt von 0,57 kgf für $R_z = 5,38\mu\text{m}$ auf 0,48 kgf für $R_z = 7,26\mu\text{m}$. Die Streuung der Scherwerte ist bei beiden Testreihen nahezu gleich groß. Dies zeigte ein Hypothesentest auf Standardabweichung für die beiden Stichproben (siehe Abb. 63).

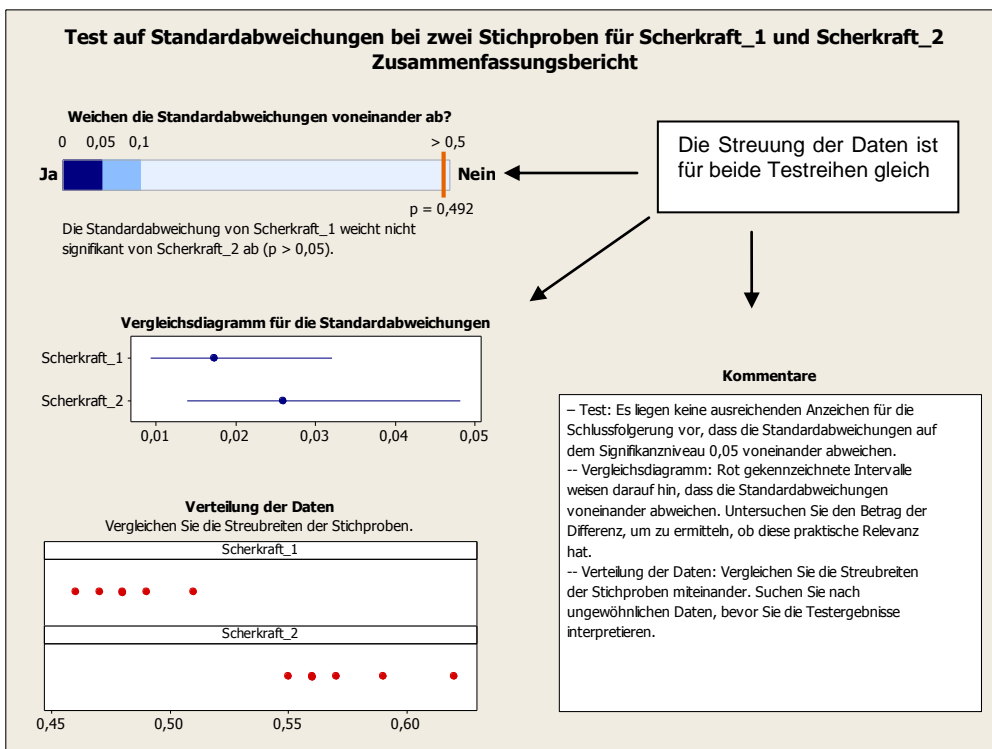


Abbildung 63: Hypothesentest auf Standardabweichung für zwei Stichproben

3.8.6. Zusammenfassung der Ergebnisse für den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Bondqualität

Die Ergebnisse der beiden Testreihen (1 und 2) lassen sich sehr gut zusammenbringen und ergänzen sich auf sinnvolle Art und Weise. Insgesamt wurden so in diesem Versuch Bondflächen mit R_z -Werten von $2,62\mu\text{m}$ bis $7,44\mu\text{m}$ untersucht. Die Bewertung der Bondqualität erfolgte jeweils über den Schertest. Beide Testreihen zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Bondqualität und gemittelter Rautiefe R_z (siehe Abb. 64). Die Scherwerte der Stichproben mit $R_z = 2,62 - 3,85\mu\text{m}$ unterscheiden sich kaum und liegen auf dem höchsten Niveau. Im Bereich $R_z = 5,26 - 5,43\mu\text{m}$ sinkt die Scherkraft im Durchschnitt leicht ab, untereinander bleiben die Stichproben vergleichbar. Die beiden Stichproben der größten R_z -Werte, $7,26\mu\text{m}$ und $7,44\mu\text{m}$ zeigen einen deutlichen Abfall der Scherkräfte.

Zusätzlich liefern die Ergebnisse der Testreihe 1 Informationen über das Auftreten unterschiedlicher Schercodes in Abhängigkeit des R_z -Wertes. Bei $R_z \geq 3,82\mu\text{m}$ treten partielle Scherbrüche auf deren Anbindungsfläche jedoch deutlich größer als 50 % ist und somit noch den Qualitätsanforderung einer „guten“ Bondverbindung entsprechen. Bei $R_z 5,43\mu\text{m}$ gibt es den ersten partiellen Scherbruch mit Restanbindungsfläche kleiner 50%. Bei $R_z 7,44\mu\text{m}$ häufen sich die partiellen Scherbrüche $<50\%$ (Anbindungsfläche) und es konnte zusätzlich ein kompletter Scherabheber detektiert werden.

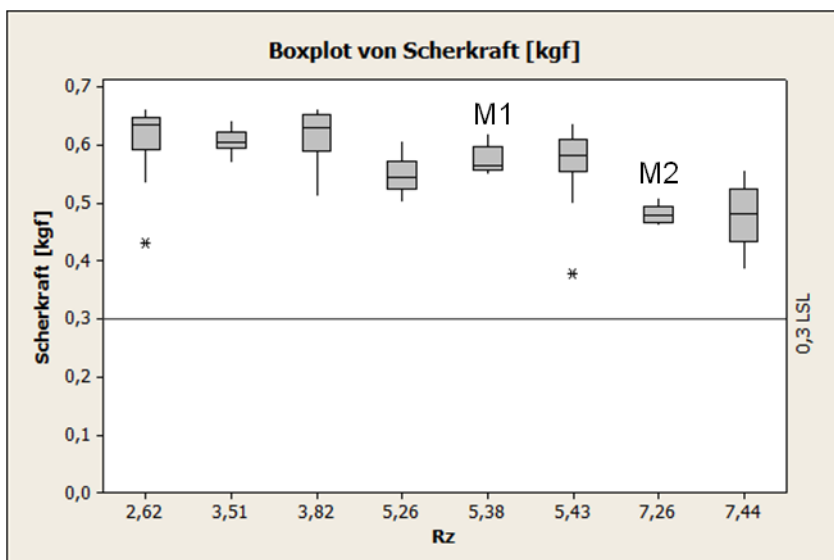


Abbildung 64: Boxplot Scherkraft über Rz

4. Kurzzusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Das Gesamtvorhaben RoBE sollte den Rahmen schaffen, den Drahtbondprozess für Hochstromanwendungen detailliert zu untersuchen, potenzielle Ansatzpunkte zur Optimierung des Prozesses zu analysieren und durch gezielte Weiterentwicklung der Aufbau- und Verbindungstechnik, eine signifikante Performancesteigerung drahtgebondeter Applikationen ermöglichen. Letzten Endes ist es gelungen, durch gründliche Analysen, umfangreiche Testreihen und zielorientierte Weiterentwicklung, das nötige Know-How und die Datenbasis zu schaffen, eine Mindestlebensdauer von Bonddrahtverbindungen zu gewährleisten und diese gleichzeitig signifikant (Faktor > 2) zu verlängern, was nur durch die intensive Zusammenarbeit im Konsortium möglich war.

So konnte im Rahmen des Projektes nachgewiesen werden, dass eine umfangreiche Optimierung der Bondprozessparameter (bis zu sieben Parameter) eine deutliche Steigerung der Lebensdauer von Drahtbondverbindungen (Faktor 1,5) bewirken kann.

Weiter wurden die Eigenschaften vielversprechender, alternativer Drahtmaterialien (wie CuCorAl-Draht), im Hinblick auf mechanische und thermomechanische Belastungen, anwendungsorientiert analysiert. Der aluminiumummantelte Kupferdraht CuCorAl zeigte dabei eine deutlich höhere Stromtragfähigkeit (bis zu 43% im Vergleich zu Al-Draht) und gleichzeitig einen enormen Anstieg der Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Belastung (Faktor > 75). Durch die Möglichkeit, diesen Draht auf den bisherigen Standardmetallisierungen für Halbleiter (Bare Dies) anwenden zu können – im Gegensatz zu reinen Kupferdrähten – ergibt sich hier immenses Potential zu Robustheitssteigerung drahtgebondeter Leistungselektroniken. Bestätigt wurde das im Rahmen des Projektes durch Active Power Cycling Tests, die – mit angepasster Aufbau- und Verbindungstechnik der Leistungshalbleiter (Sintern statt Löten) – eine Steigerung der Lebensdauer bis zu einem Faktor neuen ergaben.

Abschließend können die Ergebnisse als wegweisend für die zukünftige Produktion und Entwicklung leistungselektronischer Komponenten für Elektro- und Hybridfahrzeuge gesehen werden und somit können so einen entscheidenden Beitrag zu fortschreitenden Elektrifizierung der automobilen Infrastruktur leisten.

5. Voraussichtlicher Nutzen

Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Ergebnisverwertung in Deutschland

Mit dem Projekt wurden technologische Grundlagen geschaffen, um Elektromobilität als zuverlässige und nachhaltige Infrastruktur etablieren zu können. Das Konsortium leistete damit seinen Beitrag - zusammen mit regenerativer Energieversorgung und Netzbetrieb - für einen Paradigmenwechsel, der intensiv von Politik und Gesellschaft begleitet werden muss. Darüber hinaus sind die Erkenntnisse auch für das konventionelle Antriebskonzept sowie den Maschinen- und Anlagenbau hilfreich und notwendig, um im weltweiten Wettbewerb durch zuverlässige und innovative Produkte erfolgreich zu sein.

Positive Hebelwirkung für den Standort Deutschland

Neben der Automobilindustrie einschließlich der relevanten Zulieferkette für elektronische Systeme profitiert auch und gerade der deutsche Maschinen- und Anlagenbau sowie die Energietechnik. Oftmals sind in der Vergangenheit wegweisende Konzepte und Standards (bspw. CAN, QM) aus dem innovativen Automobilbereich in andere Branchen transferiert bzw. adaptiert worden. Diese Synergien sind durch die Beteiligung von LTi auch für dieses Projekt gegeben. Continental und Audi werden die im Projekt erarbeitete Qualität und Kompetenz zukünftig beim deutschen Maschinen- und Anlagenbau als Kunde einfordern. Die Schaffung neuer Produktionssysteme wird als wichtigste Aufgabe angesehen, um künftig eine rentable Produktion in Hochlohnländern zu ermöglichen. Optimierte Prozesse sowie eine flexible Produktion bei gleichbleibend höchster Qualität sind in diesem Zusammenhang die Schlüsselaspekte. Nur so wird es in Zukunft möglich sein, Fertigungsprozesse für Hochtechnologie-Produkte wirtschaftlich am Standort Deutschland zu betreiben oder sogar aus Niedriglohnländern zurück zu verlagern. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass Elektro- und Hybridfahrzeuge im Jahr 2020 einen weltweiten Marktanteil von 33% der Neufahrzeuge darstellen können, mit einem möglichen Umsatzvolumen bis zu 470 Mrd. USD. Mit der steigenden Bedeutung elektrischer Antriebe können potentiell bis zu 250 000 neue Arbeitsplätze in den Bereichen Batterie und Elektronik bis 2020 entstehen. Speziell für den Bereich

Elektronik wird mit der entwickelten Technologie eine Kontaktierungstechnik zur Verfügung gestellt, die folgende Vorteile aufweist:

- Verzicht auf Beschichtungswerkstoffe > Einsparung von Fertigungsschritten
- Größere Werkstoffauswahl als beim Bonden > hohe Flexibilität beim Produktdesign
- Höhere Temperaturfestigkeit > Breiteres Einsatzspektrum

6. Veröffentlichungen

In Abstimmung mit dem Projektträger wurden projektbezogene Informationen im Rahmen verschiedener Verbundveranstaltungen vorgestellt. Die Unternehmen kommunizierten den Projektinhalt und -fortschritt darüber hinaus im Rahmen der Verbandstätigkeiten. Signifikante und wegweisende Ergebnisse wurden durch vielfältige Demonstratoren, die von der Technologiedarstellung bis zum fertigen Elektrofahrzeug reichten, auch plakativ vorgestellt. Die Forschungsergebnisse wurden darüber hinaus auf nationalen und internationalen Kongressen mit Fachleuten z. B. auch aus anderen Branchen diskutiert.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse wurden von Continental bei folgenden renommierten Fachtagungen veröffentlicht:

- Elektronische Baugruppen und Leiterplatten (EBL) 2014; IBSN 978-3-87155-573-2
Paper mit Fachvortrag
- Smart System Integration (SSI) 2014; IBSN 978-3-86359-201-1
Paper mit Fachvortrag

Berichtsblatt

| | |
|---|---|
| 1. ISBN oder ISSN --- | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht |
| 3. Titel Verbundvorhaben: Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen Teilvorhaben: Robustheit für Bonds in Steuergeräten für E-Fahrzeuge | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Fella, Frank | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2014 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum --- |
| | 7. Form der Publikation Bericht |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Conti Temic microelectronic GmbH Sieboldstr. 19 90411 Nürnberg | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 16N11463 |
| | 11. Seitenzahl 65 |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn | 13. Literaturangaben --- |
| | 14. Tabellen --- |
| | 15. Abbildungen 64 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) | |
| 18. Kurzfassung Das Projekt RoBE – Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen – widmet sich dem ambitionierten Ziel, die sichere Vorhersage der Zuverlässigkeit von Bonddrahtverbindung insbesondere für leistungselektronische Komponenten und deren Aufbau- und Verbindungstechnik zu bestimmen und im Design- & Herstellprozess abzusichern sowie, damit verbunden, die Lebensdauer von Bonddrahtverbindungen signifikant zu verlängern (Faktor 2). In diesem Rahmen wird ein tiefes Verständnis der Einflussfaktoren und mechatronischen Zusammenhänge der Bondtechnologie entlang der kompletten Entwicklungs- und Entstehungskette erarbeitet. Durch die Optimierung der Bondprozessparameter, sowie die Entwicklung und anschließende Implementierung neuer, optimierter Drahtmaterialien, wird die Zuverlässigkeit der Bondverbindungen auf ein neues Level gehoben. | |
| 19. Schlagwörter Drahtbonds, Aufbau- und Verbindungstechnologie, Robustheit, Zuverlässigkeit, Elektromobilität | |
| 20. Verlag --- | 21. Preis --- |

Document Control Sheet

| | |
|---|--|
| 1. ISBN or ISSN --- | 2. type of document (e.g. report, publication) Final report |
| 3. title Joint project: Robustness of wire bonds for electric vehicles – RoBE Subproject: Robustness of wire bonds for electric vehicles control units | |
| 4. author(s) (family name, first name(s)) Fella, Frank | 5. end of project 31.10.2014 |
| | 6. publication date --- |
| | 7. form of publication Report |
| 8. performing organization(s) (name, address) Conti Temic microelectronic GmbH Sieboldstr. 19 90411 Nürnberg | 9. originator's report no. --- |
| | 10. reference no. 16N11463 |
| | 11. no. of pages 65 |
| 12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn | 13. no. of references --- |
| | 14. no. of tables --- |
| | 15. no. of figures 64 |
| 16. supplementary notes | |
| 17. presented at (title, place, date) | |
| 18. abstract <p>The ambitious object of RoBE is to enable a dependable prediction of lifetime for wire bond interconnections, esp. for high current applications, to rise up the lifetime significant (factor 2) and set a new benchmark for wire bond reliability. In this way, a deep understanding of the influencing factors and mechatronic relations of bonding technology along the entire development and process chain are worked out. By optimizing the process parameters and the developing respectively using of new wire materials the wire bond reliability is risen up to a new level.</p> | |
| 19. keywords Wire bonding, interconnection technology, robustness, reliability, electro mobility | |
| 20. publisher --- | 21. price --- |