



# Abschlussbericht

## RoBE – Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen

Zuwendungsempfänger: <b>Heraeus Deutschland GmbH &amp; Co. KG</b>	Förderkennzeichen: <b>16N11466</b>
Teilvorhabensbezeichnung: <b>Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen (RoBE) – Teilvorhaben: Modellierung und Charakterisierung von innovativen Bondverbindungen</b>	
Projektleiter des Teilvorhabens: <b>Peter Prenosil</b> <b>Heraeusstr. 12-14</b> <b>63450 Hanau</b>	Tel.: (061 81) 35 – 39 75 Email: peter.prenosil@heraeus.com
Laufzeit des Vorhabens (Bewilligungszeitraum): von: <b>01.08.2011</b> bis: <b>31.10.2014</b>	

## **Inhaltsverzeichnis**

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	3
1. Kurzdarstellung des Vorhabens .....	4
1.1. Aufgabenstellung.....	4
1.2. Randbedingungen vor und während der Projektlaufzeit .....	5
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	8
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	11
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	15
2. Erzielte Ergebnisse.....	17
2.1. Lösungsansätze .....	17
2.2. Konventionelle Bonddrähte .....	17
2.2.1. Vergleichende Bonduntersuchungen bisheriger Drähte.....	17
2.2.2. Einflüsse im Fertigungsprozess.....	18
2.3. AIX-Untersuchungen .....	18
2.4. CucorAI-Untersuchungen.....	21
2.4.1. Elektrische Kennwerte .....	21
2.4.2. Simulation .....	22
2.4.3. Messverfahren zur Bestimmung des Materialverhältnisses .....	23
2.4.4. Messung und Stabilität des Materialverhältnisses .....	24
2.4.5. Biegeverhalten.....	28
2.4.6. Bondversuche.....	29
2.4.7. Vergleich verschiedener Aluminiumschichtdicken .....	31
2.4.8. Lebensdauervergleich .....	32
2.4.8.1. Temperaturlagerung (HTS).....	32
3. Voraussichtlicher Nutzen.....	38
4. Veröffentlichungen.....	39

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Arbeitsteilung zwischen den Verbundpartnern im Projekt RoBE.....	11
Abb. 2: Bondfenster der konventionellen Bonddrahtqualitäten.....	18
Abb. 3: Bondfenster bei Variation des Fertigungsprozesses.....	18
Abb. 4: Phasendiagramm Aluminium - Scandium.....	19
Abb. 5: Auger-Tiefenprofil des AIX Drahts nach Homogenisierung.....	19
Abb. 6: Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Ausscheidungen.....	20
Abb. 7: Durchbrennstrom bei verschiedenen Drahtdurchmessern.....	22
Abb. 8: Simulationsergebnisse Aluminiumdraht und Manteldraht.....	23
Abb. 9: Von Mises Vergleichsspannung im Bondinterface.....	23
Abb. 10: Änderung von Leitfähigkeit und Gewicht in Abhängigkeit von der Schichtdicke.....	24
Abb. 11: Verschiebung der Schnittebene im Längsschliff.....	25
Abb. 12: Längsschliffe verteilt über 4kg einer Charge.....	25
Abb. 13: Querschliffe verteilt über 4kg einer Charge.....	26
Abb. 14: Gewichtsmessung für Gewichtsanteilsbestimmung.....	27
Abb. 15: Leitwertmessung zur Gewichtsanteilbestimmung.....	27
Abb. 16: CucorAl-Draht mit einem Biegeradius von 0,45 mm.....	28
Abb. 17: CucorAl-Draht mit einem Biegeradius von 1 mm.....	29
Abb. 18: Optimierungsdiagramm der Bond-DoE CucorAl (300µm) auf AlSi.....	30
Abb. 19: Bondfenster der Bond-DoE CucorAl (300µm) auf AlSi.....	30
Abb. 20: Schertest am Manteldrahtbonds in Abhängigkeit des Aluminiumanteils.....	31
Abb. 21: Loopwinkel in Abhängigkeit des Aluminiumanteils.....	32
Abb. 22: EBSD-Untersuchung zweier CucorAl-Varianten.....	32
Abb. 23: Zugfestigkeit bei 150°C Auslagerung.....	33
Abb. 24: Zugfestigkeit bei 200°C Auslagerung.....	34
Abb. 25: Zugfestigkeit bei 300°C Auslagerung.....	35
Abb. 26: elek. Leitfähigkeit bei 150°C.....	36
Abb. 27: elek. Leitfähigkeit bei 200°C.....	37
Abb. 28: elek. Leitfähigkeit bei 300°C.....	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: typische Bondparameter.....	21
--	----

## 1. Kurzdarstellung des Vorhabens

### 1.1. 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.

## **1.2. 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 Chipebene 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.

### **1.3. 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 Konzepte 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 angepasst 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  $10\ \mu\text{m}$  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.

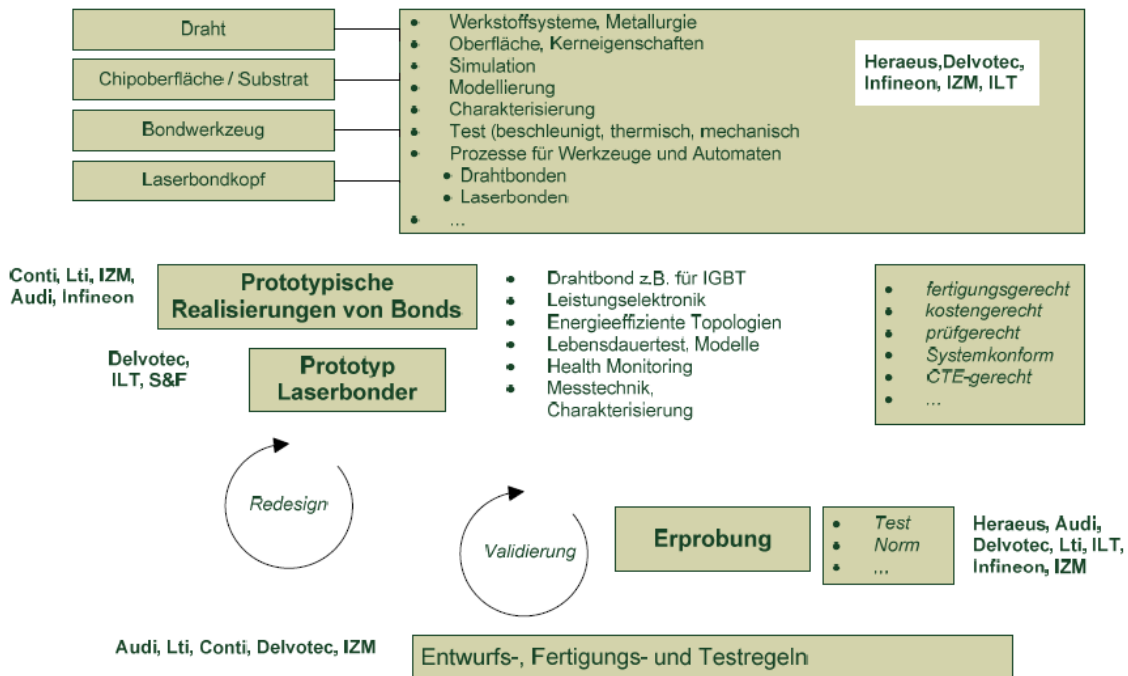


Abb. 1: Arbeitsteilung zwischen den Verbundpartnern im Projekt RoBE

## 1.4. 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 fortschreitenden 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 Veränderungen 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 Strahlquellen 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 Thermokompressionsbonds 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.

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/Infineon 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 wissenschaftliche, 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 zu-

verlässigen Bondprozess mit eindeutigen Lebensdauern und die Etablierung von Konzepten für Health-Monitoring zur Steigerung der Einzel- und Systemzuverlässigkeiten von Fahrzeug, Flotte und Smart Grid.



## 2. Erzielte Ergebnisse

### 2.1. Lösungsansätze

Um die geforderten Anforderungen an eine höhere Robustheit der Bondverbindungen zu erfüllen, wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt:

#### AIX-Draht

Durch intelligente Wahl einer Legierungskomponente wird ein dispersionshärtendes Material erzeugt. Hierbei führen die Einsatztemperaturen oder eventuelle vorhergehende Temperaturbehandlungen zu einer Ausscheidung der Legierungskomponente an den Korngrenzen und somit zu einer Verfestigung des Drahtes. Dadurch erreicht das Material eine Hochtemperaturbeständigkeit, die herkömmliche Aluminiumdrähte nicht erreichen können.

#### CucorAl (Al/Cu-Manteldraht)

Der zweite Ansatz um die Robustheit zu erhöhen, war die Entwicklung eines Verbunddrahtes aus Aluminium und Kupfer. Das Aluminium als Mantel hat hierbei die Aufgabe die gute Bondbarkeit des Materials zu erhalten, die zumindest annähernd gut sein sollte wie bei bisherigen Aluminiumdrähten. Das Kupfer hingegen besitzt eine dreifach höhere Festigkeit als Aluminium. Dadurch würde die geforderte Robustheit des Materials bei Wechselbelastung deutlich gesteigert werden. Da das Kupfer durch seine bessere Strom- und Wärmeleitfähigkeit auch die Stromtragfähigkeit des Drahtes deutlich erhöhen würde, hätte der Anwender hierdurch weitere gravierende Vorteile. Auf Grund dieser positiven zu erwartenden Eigenschaften, entschlossen wir uns diesen Draht zum Schwerpunkt unserer Untersuchungen zu machen.

### 2.2. Konventionelle Bonddrähte

#### 2.2.1. Vergleichende Bonduntersuchungen bisheriger Drähte

Zur Definition des bisherigen Bondprozesses wurde in Bondversuchen das Prozessfenster traditioneller Bonddrähte bestimmt. Hierzu wurde für jeden Draht mittels DoE (Design of Experiment) bestimmt, in welchem Bereich die Bondparameter Bondkraft, Bondenergie und Bondzeit variiert werden können um eine gute Bondverbindung zu erzeugen. Dabei bestätigte sich, dass das Parameterfenster umso größer ist, je weicher und reiner das verwendete Drahtmaterial ist. Diese Ergebnisse lassen erwarten, dass die neuen Drähte, auf Grund höhere Festigkeiten etwas kleinere Parameterfenster abdecken. Außerdem wird erwartet, dass

sich das Bondfenster des CucorAl, auf Grund der hohen Cu-Festigkeit, auf einem höheren Kraft- und Energieniveau bewegen werden.

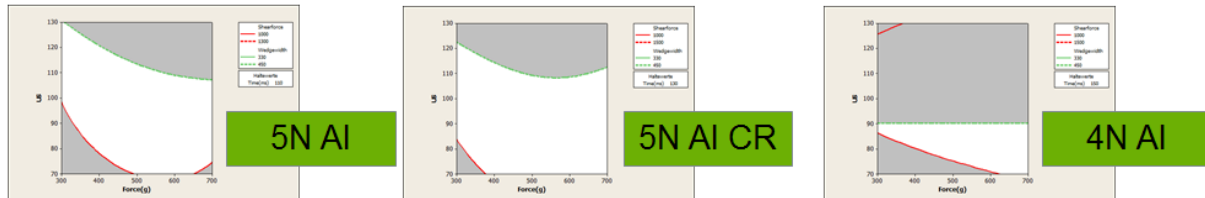


Abb. 2: Bondfenster der konventionellen Bonddrahtqualitäten

### 2.2.2. Einflüsse im Fertigungsprozess

Versuche mit konventionellen Drähten haben gezeigt, dass nicht nur die Wahl der Materialien, sondern sogar der Herstellprozess Einfluß auf die Bondbarkeit haben. Im Rahmen dieser Untersuchung haben wir an einem Draht die Fertigungsabläufe modifiziert und anschließend eine Bond-DoE mit diesem Material durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die modifizierte Variante ein etwas größeres Bondfenster hat. Diese Ergebnisse wurden anschließend auch in die Entwicklung der neuen Materialien mit übernommen.

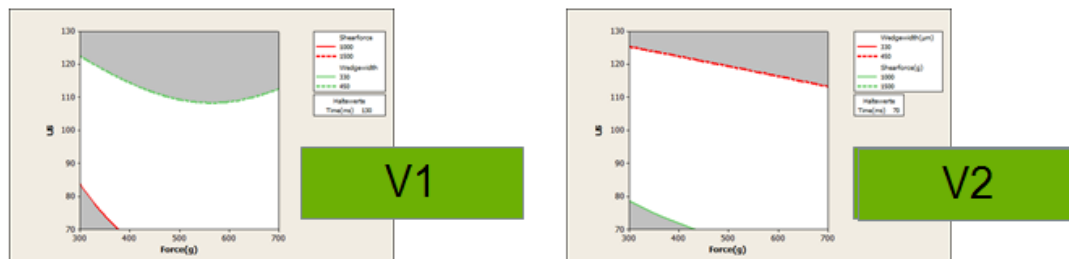


Abb. 3: Bondfenster bei Variation des Fertigungsprozesses

## 2.3. AIX-Untersuchungen

### 2.3.1 Materialherstellung

Bei der Legierungsauswahl wurde auf eine Aluminium-Scandium-Legierung zurückgegriffen. Das Phasendiagramm zeigt eine äußerst geringe Löslichkeit des Sc in Al von max. ca. 0,21 at-% und eine hochtemperaturstabile intermetallische AlSc-Phase. Der peritektische Punkt liegt dabei bei ca. 650°C, so dass erst bei dieser Temperatur eine komplette Löslichkeit möglich ist. Für die Legierungszusammensetzung wurde deshalb eine Konzentration darunter gewählt, um eine bessere Löslichkeit zu gewährleisten. Nach anfänglichen < 0,3 gew.% wurde es weiter auf < 0,2 gew.% reduziert. Nichts desto trotz ist eine Temperatur oberhalb von 600°C notwendig, um eine Homogenisierung zu erreichen.

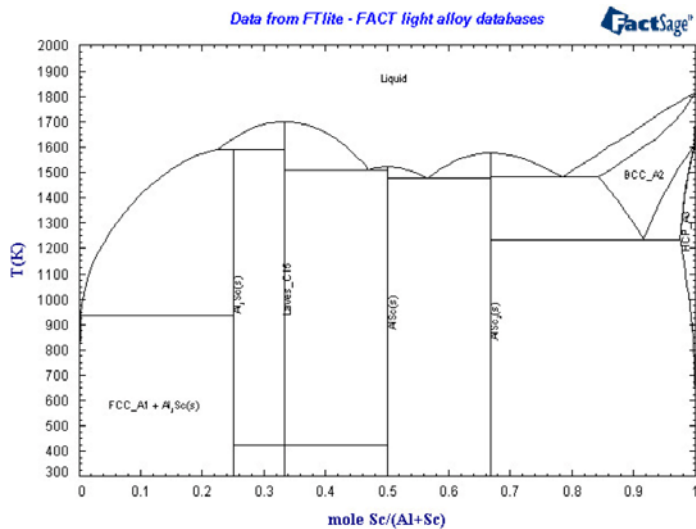


Abb. 4: Phasendiagramm Aluminium - Scandium

Bei der Herstellung des Manteldrahtes wurde betrachtet welche Herstellungsschritte einen Einfluss auf die endgültigen Materialeigenschaften haben können. An Hand dieser Überlegungen wurde eine DoE geplant, mit der die tatsächlichen Einflüsse dieser Parameter auf das Endprodukt untersucht wurden.

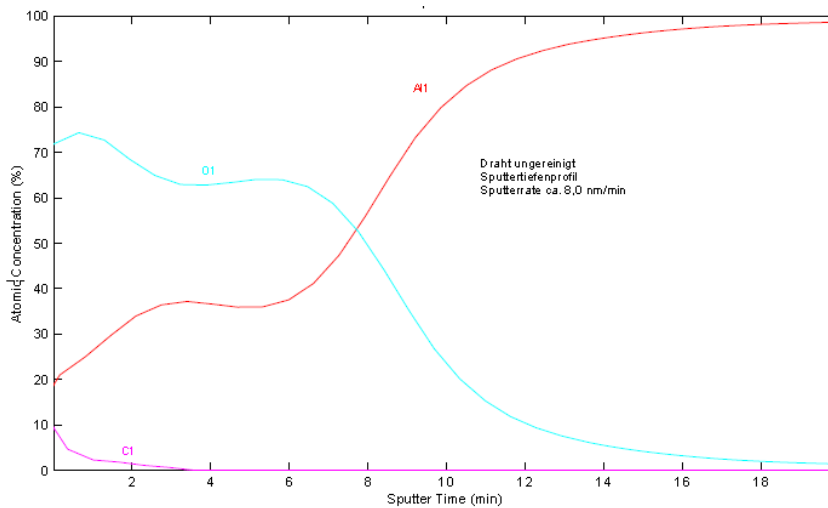


Abb. 5: Auger-Tiefenprofil des AlX Drahts nach Homogenisierung

Der prinzipielle Herstellungsprozess enthält den Schritt des Verpressens des gegossenen Aluminium-Zylinders bei erhöhten Temperaturen. Bei Temperaturen jenseits der 300°C bilden sich im Material Ausscheidungen, die erst bei Temperaturen größer 600°C wieder in der Aluminium Matrix gelöst werden. Für den Verpressvorgang bedeutet dies, dass danach eine

komplette Ausscheidung vorliegt und das Material nicht mehr gezielt eingestellt werden kann. Im weiteren Verlauf wurde das Material deshalb einer Homogenisierungsglühung oberhalb von 600°C unterzogen, wobei sich jedoch trotz der Verwendung von Schutzgas eine Oxidation zeigte. Ein Auger-Tiefenprofil (Abb. 5) zeigt eine Oxidschichtdicke von > 50 nm. Theoretisch erwartet wurde eine Dicke von < 10 nm. Die Oxidation ist wahrscheinlich auf das Vorhandensein von Feuchtigkeit und Sauerstoff zwischen den verschiedenen Wicklungslagen zurück zu führen. Für eine Machbarkeitsstudie konnte auch mit dem oxidierten Draht gearbeitet werden. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Drahts bei Temperaturlagerung ist in Kapitel 2.6.1 beschrieben.

### 2.3.2 Elektrische Kennwerte

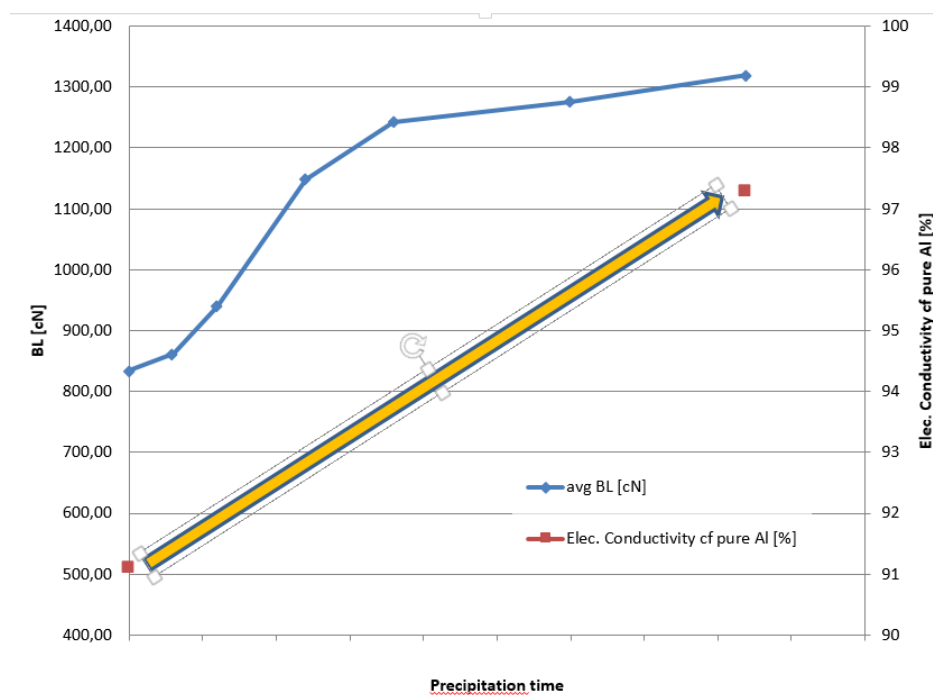


Abb. 6: Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Ausscheidungen

Die elektrische Leitfähigkeit wird durch das Ausscheidungsverhalten stark beeinflusst (Abb. 6). Im homogenisierten Zustand ist die Reißlast (engl. Breaking Load, BL) niedrig und die elektrische Leitfähigkeit liegt bei ca. 91% der Leitfähigkeit von reinem Aluminium (Al-H11 zum Vergleich). Durch die Ausscheidungshärtung verfestigt das Material deutlich und durch die Reduzierung der Sc-Partikel als Störstellen in der Aluminiummatrix steigt die Leitfähigkeit auf mehr als 97% von derjenigen reinen Aluminiums.

### 2.3.3 Bondversuche

Es wurden Bondversuche bei verschiedenen Einstellungen des Materials an 300µm Durchmesser durchgeführt. Es wurde ein weicher Zustand eingestellt, d.h. das Material wurde homogenisiert und anschließend spannungsarm gegläht; es erfolgte jedoch keine Ausscheidungshärtung (AIX soft), als auch mit Ausscheidungshärtung (AIX hard). Im weichen Zustand entsprechen die Bondparameter in etwa dem von reinem Aluminium (Al-H11) und im harten Zustand liegen sie deutlich höher. Beide Bondparametersätze der Materialeinstellungen liegen deutlich unter denen von Cu-Draht. Das Drahtbonden kann dabei von der Drahtoxidation beeinflusst werden, da der Draht nicht an das Bondtool ankoppelt und so die Ultraschalleistung nur reduziert übertragen werden kann.

**Tabelle 1: typische Bondparameter**

	AIX hard	AIX soft	Al-H11	Cu
Bond force	700	550	580	1350
Bond power	90	85	80	180
Bond hold time	100	85	70	110

## 2.4. CucorAl-Untersuchungen

### 2.4.1. Elektrische Kennwerte

Dass die elektrischen Eigenschaften des CucorAl-Drahtes durch die Verwendung des Kupferkerns sich ändern würden, ist beim Vergleich der zugehörigen Materialkenndaten direkt ersichtlich. Um den Effekt auf die tatsächliche Stromtragfähigkeit zu bestimmen, haben wir

im Teststand den Durchbrennstrom in Abhängigkeit des Durchmessers bestimmt. Hierzu wurde der Draht auf einer Testlänge von 20mm eingespannt und der Strom mit 0,2A/s bis zum Durchbrennen gesteigert. Hierbei handelt es sich noch um eine frühe CucorAl-Variante mit einem Aluminiumanteil von 30%.

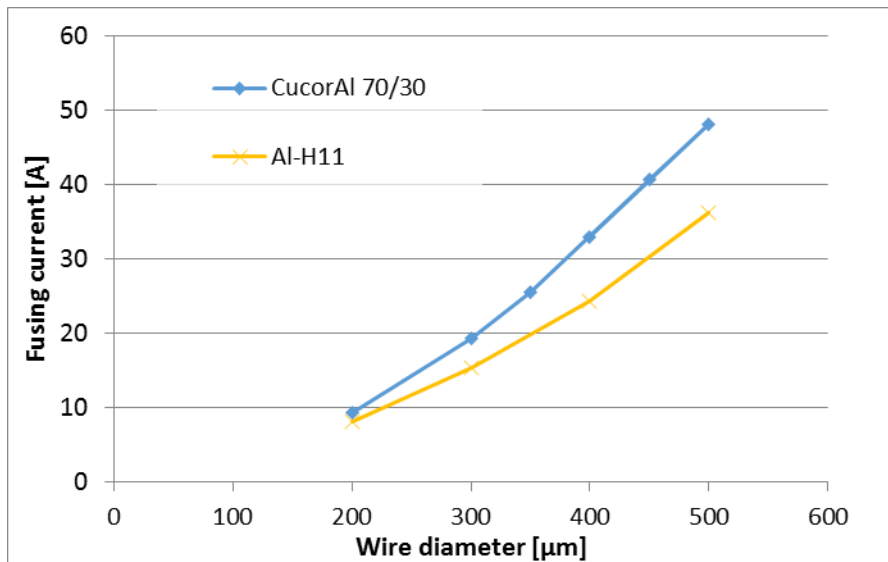


Abb. 7: Durchbrennstrom bei verschiedenen Drahtdurchmessern

#### 2.4.2. Simulation

Um die längere Standfestigkeit des Manteldrahtes beim Thermocycling, die die Versuche der Projektpartner gezeigt hat, besser zu verstehen, wurden Finite-Element-Simulationen durchgeführt. Hierzu wurde auf Basis eines Schliffbildes ein 2D-Gittermodell erstellt. In diesem Modell wurde die unterste Ebene eingeklemmt (keine Freiheitsgrade) und die Temperatur wurde um 100°C erhöht.

Dabei zeigte sich, dass die Spannungsspitzen bei thermischer Wechselbelastung bei Vollmaterial-Aluminiumdrähten eher im Randbereich liegen, wo im Falle von Wechselbelastungen für gewöhnlich auch die Rissinitiierung und das Risswachstum stattfinden. Bei dem Manteldraht liegen die Spannungsspitzen eher im Zentrum der Bondverbindung. Auf Grund dieses Verhaltens lässt sich die bessere Wechselbelastbarkeit dieses Materials begründen.

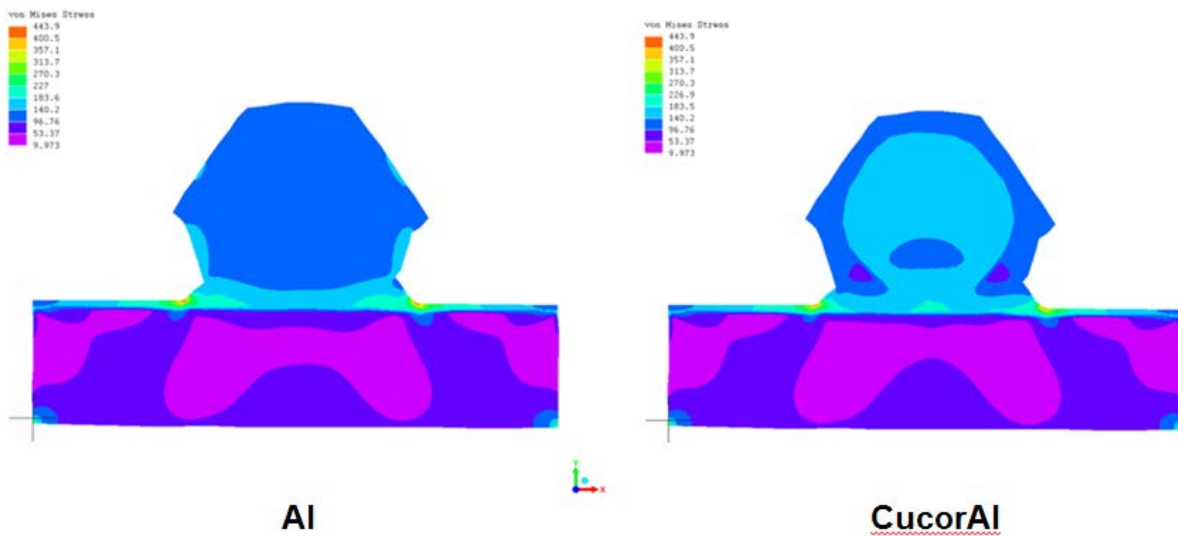


Abb. 8: Simulationsergebnisse Aluminiumdraht und Manteldraht

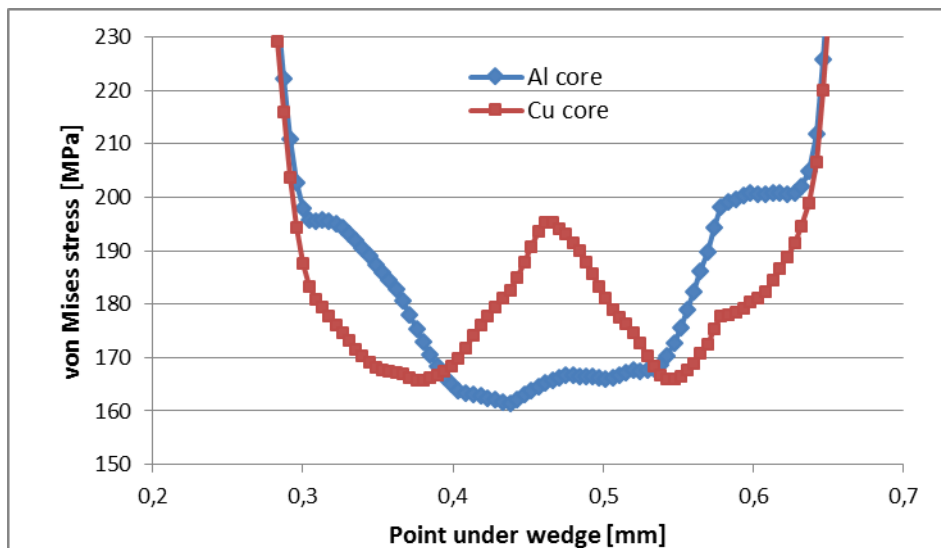


Abb. 9: Von Mises Vergleichsspannung im Bondinterface

### 2.4.3. Messverfahren zur Bestimmung des Materialverhältnisses

Da die Beurteilung des Manteldrahtes bezüglich der Konstanz des Verhältnisses von Aluminium zu Kupfer sehr aufwendig ist, wurden hier verschiedene Methoden als möglicher Schnelltest untersucht. Besonders aussichtsreich erschien uns die Messung von Masse oder elektrischer Leitfähigkeit über eine definierte Teststrecke. Da eine Änderung der Schichtdicke des Aluminiums um 5% die Leitfähigkeit nur um 2% ändern würde, wohingegen die

Masse sich um 4,4% ändert, sollte die Gewichtsmessung die sinnvollste Methode sein um die Konstanz des Materialverhältnisses zu bestätigen.

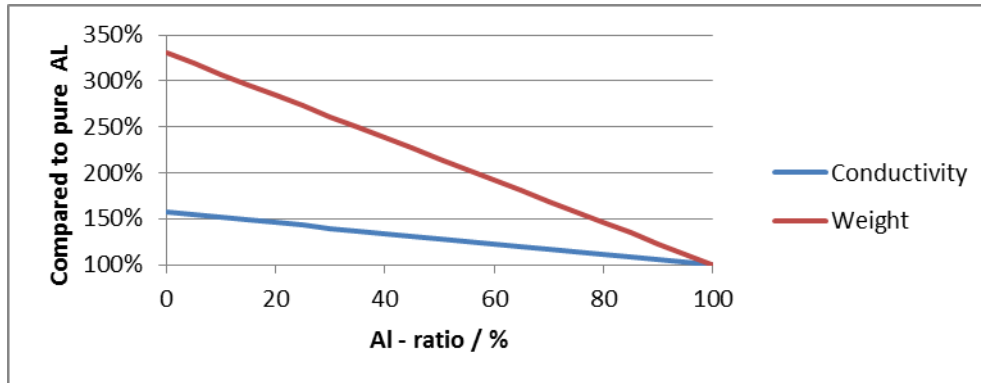


Abb. 10: Änderung von Leitfähigkeit und Gewicht in Abhängigkeit von der Schichtdicke

#### 2.4.4. Messung und Stabilität des Materialverhältnisses

Um zu bestätigen, ob die vorher stehenden Überlegungen richtig sind, wurden verschiedene Analysen gestartet. Dazu gehören Schliffuntersuchungen in Längs- und Querrichtung, elektrische Messungen und Gewichtsmessungen. Bei Längsschliffen besteht die Problematik, dass hier der Messfehler kaum vorhersagbar ist, da dieser von der Schliffebene abhängig ist. Hier ist es erforderlich den Draht genau in der Mitte anzuschleifen. Da dies in der Realität nur selten gelingt, erscheint mit dieser Methode der Aluminiumanteil größer, als er in Realität ist. Diese Methode eignet sich nur um sehr kurzweilige Materialschwankungen zu detektieren, die kleiner als die Schlifflänge sind. Diese Beurteilung wurde über eine Drahtmenge von 4 kg durchgeführt. Hierzu wurden 5 Proben genommen, die gleichmäßig über die gesamte Menge verteilt waren. Dabei konnten die potentiellen Schwankungen nicht in signifikanter Größe beobachtet werden.



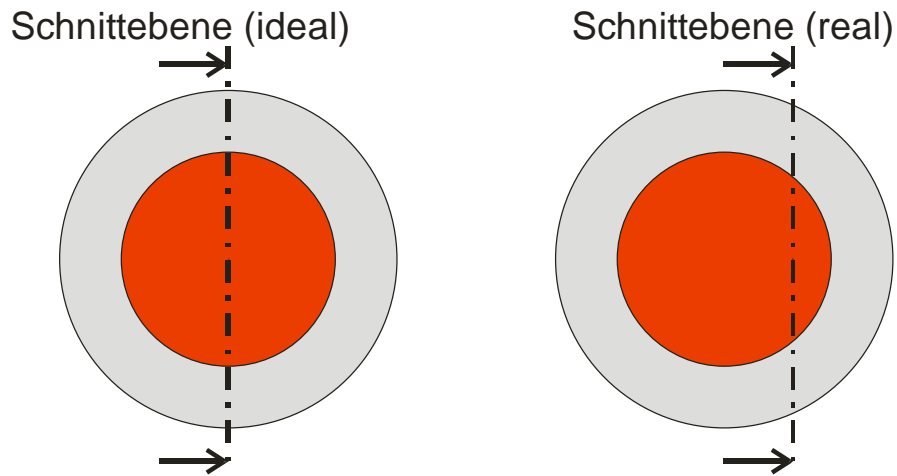


Abb. 11: Verschiebung der Schnittebene im Längsschliff

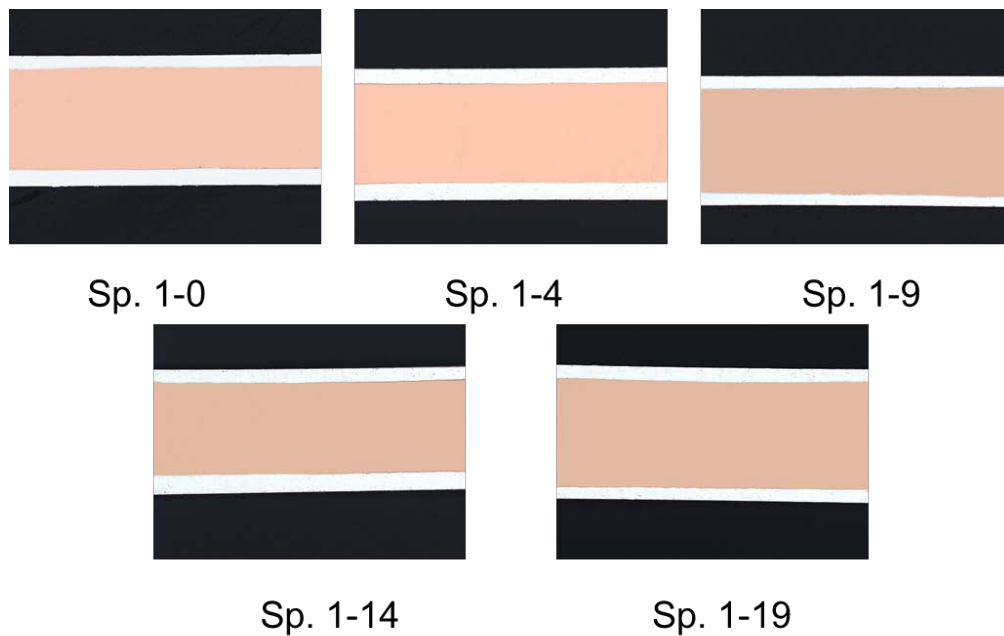


Abb. 12: Längsschliffe verteilt über 4kg einer Charge

Zusätzlich wurde zu jeder Probe auch ein Querschliff angefertigt und in jedem Bild an mehreren definierten Stellen die Schichtdicke des Aluminiummantels gemessen. Auch hier zeigt sich eine sehr homogene Schichtdickenverteilung über die gesamte Probenmenge hinweg.

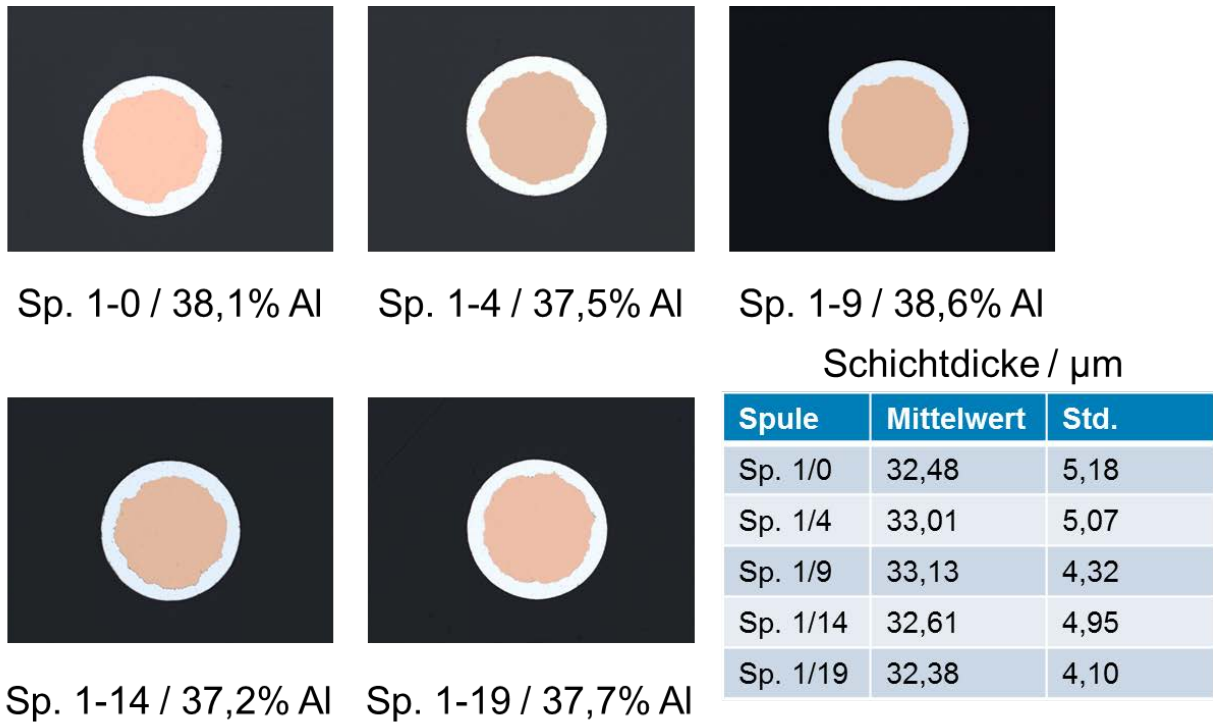


Abb. 13: Querschliffe verteilt über 4kg einer Charge

Proben wurden für die Gewichts- und die Leitwertmessung genommen. Die Probenlänge betrug dabei jeweils 20cm. Im Falle der Gewichtsmessung entspricht, bei der getesteten Variante, eine Gewichtsänderung von 0,9mg etwa einer Verhältnisänderung von einem Prozentpunkt. Bei Betrachten von Abbildung 12 fällt auf, dass die gesamte Grafik nicht mal diesen Bereich abdeckt. Die Streuung des Verhältnisses von Aluminium zu Kupfer ist also minimal.

Die Ergebnisse von Leitwert- und Gewichtsmessung korrelieren sehr gut miteinander. Beide Messungen zeigen einen sehr stabilen Verlauf der Werte. Die scheinbare Schwankung, die im Boxplot der Gewichtsmessung zu sehen ist, basiert auf der maximalen Spreizung dieser Grafik und auf der bereits erwähnten höheren Empfindlichkeit dieser Messmethode.

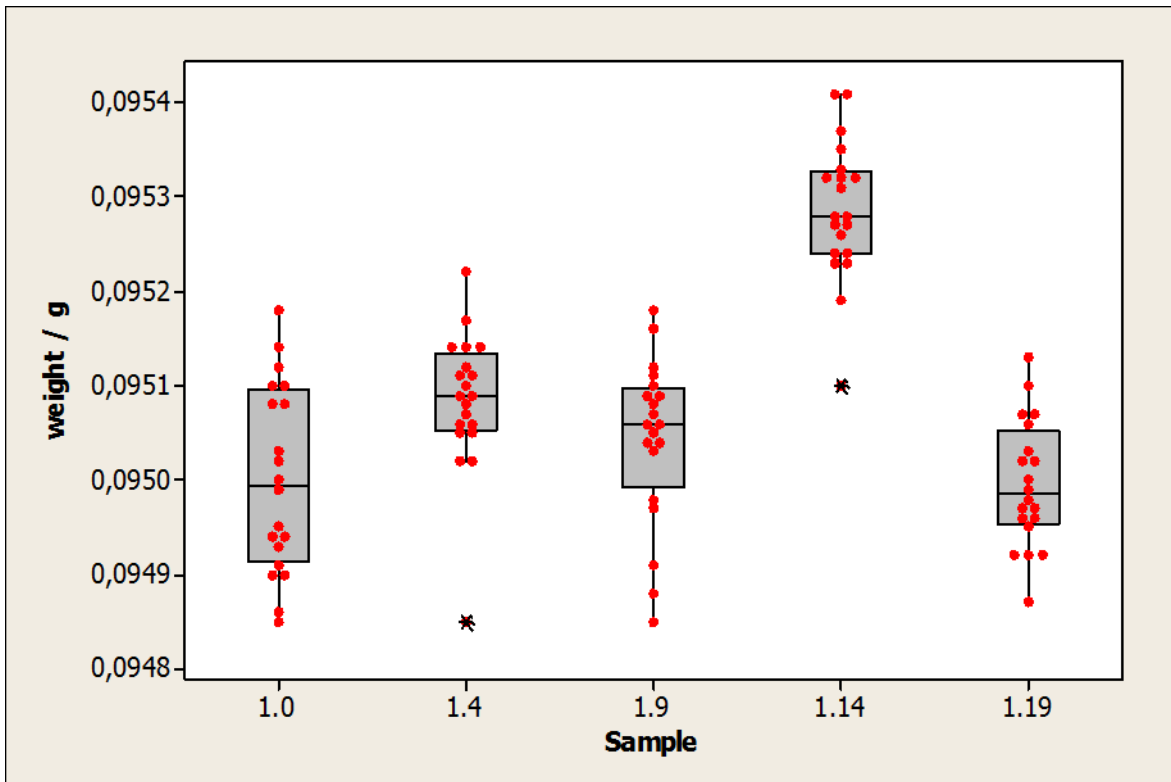


Abb. 14: Gewichtsmessung für Gewichtsanteilsbestimmung

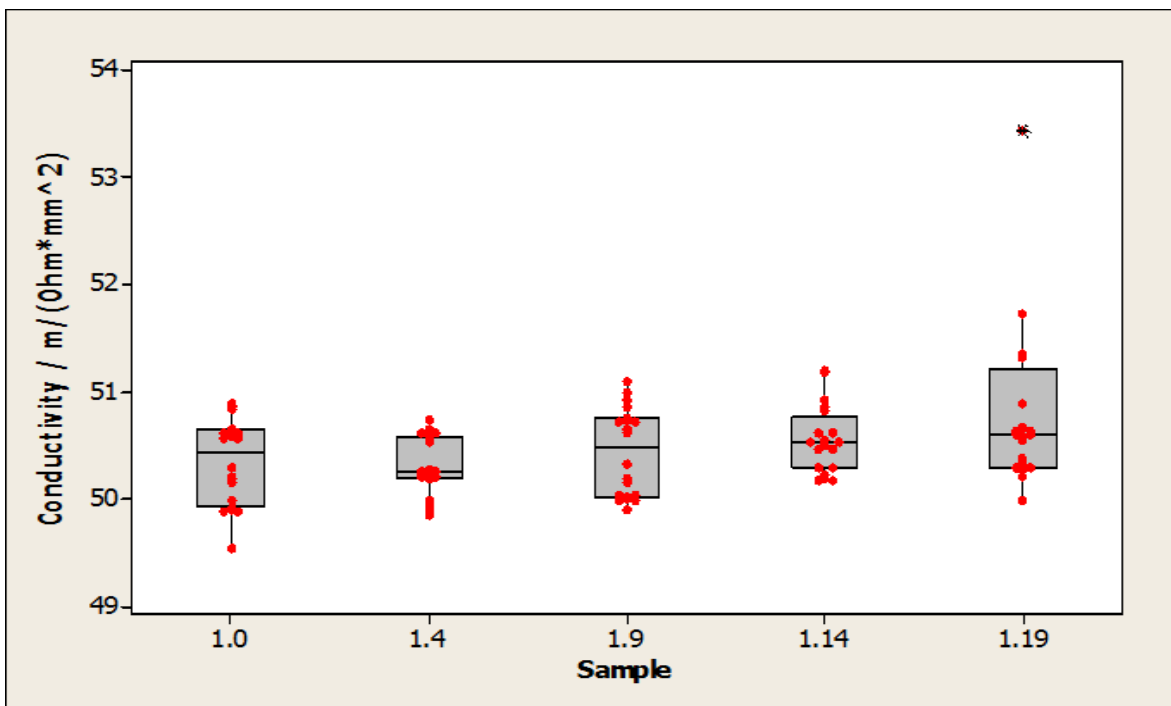


Abb. 15: Leitwertmessung zur Gewichtsanteilsbestimmung

## 2.4.5. Biegeverhalten

Im Bondprozess wird der Draht extremen Biegungen unterzogen. Besonders direkt am Bondtool kann es hierbei zu sehr kleinen Biegeradien kommen. Dies ist für Verbunddrähte eine besondere Herausforderung, da die äußere Schicht hier viel stärkeren Belastungen unterzogen ist. Um das Verhalten unserer Mantelschicht während des Biegeprozesses zu prüfen, haben wir den Draht um definierte Radien ( $r_1 = 0,45 \text{ mm}$ ;  $r_2 = 1 \text{ mm}$ ) gebogen. An diesen Proben haben wir dann im Längsschliff die Schichtdicke bewertet. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Draht auch diese engen Biegeradien unbeschadet übersteht. Zwar nimmt die Schichtdicke im Außenbereich ab, während sie im inneren Teil der Biegung ansteigt. Dies ist aber begründet in der Streckung bzw. Stauchung des Materials, die zu erwarten und unvermeidbar ist. Stets konnte aber eine geschlossene, gleichmäßige Schicht beobachtet werden. Auch wurden keine Trennungen der Materialien voneinander beobachtet. Der Draht ist also auch für die engen Biegeradien beim Bonden geeignet.

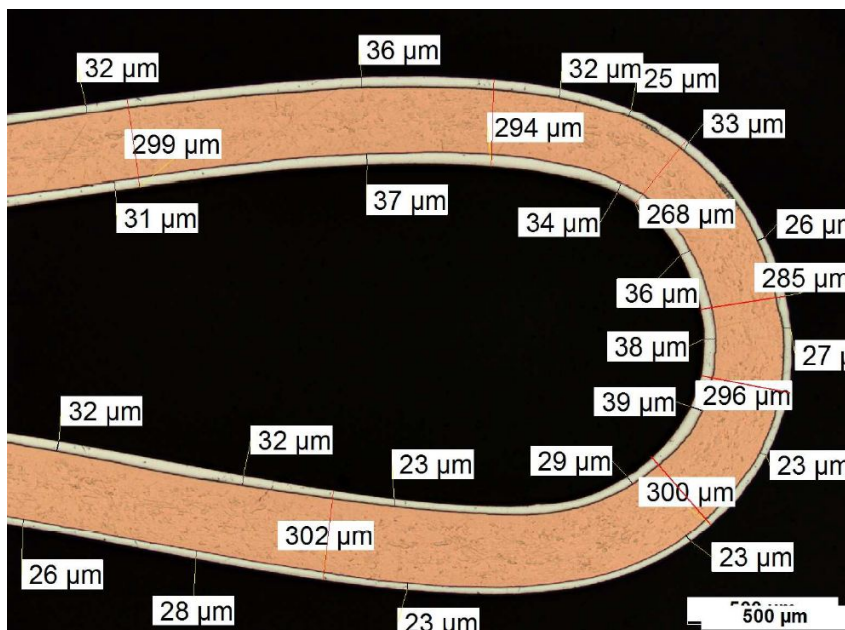


Abb. 16: CucorAl-Draht mit einem Biegeradius von 0,45 mm



che Bewertungskriterien zur Beurteilung von Bondverbindungen für neue Drahtmaterialien einer Prüfung und Aktualisierung unterzogen werden müssen.

Bei Betrachtung des Bondfensters dieser DoE zeigt sich, dass über einen relativ großen Parameterbereich hinweg gute Bondverbindungen möglich sind. Allerdings sind hierzu deutlich höhere Parameter notwendig gegenüber den bisherigen Aluminiumdrähten. Das war aber zu erwarten, da die Festigkeit von Kupfer etwa dreifach höher ist als die von Aluminium und auch der Verbunddraht hierdurch deutlich fester ist.

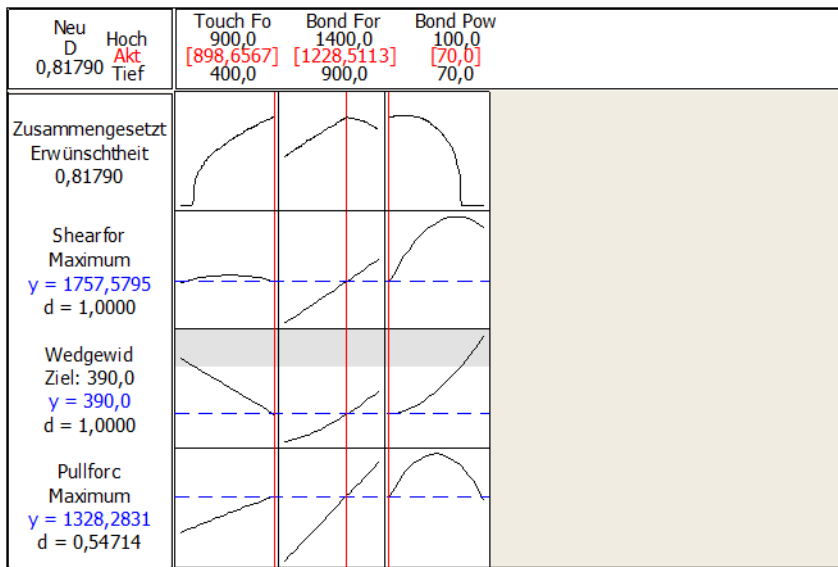


Abb. 18: Optimierungsdiagramm der Bond-DoE CucorAl (300µm) auf AlSi

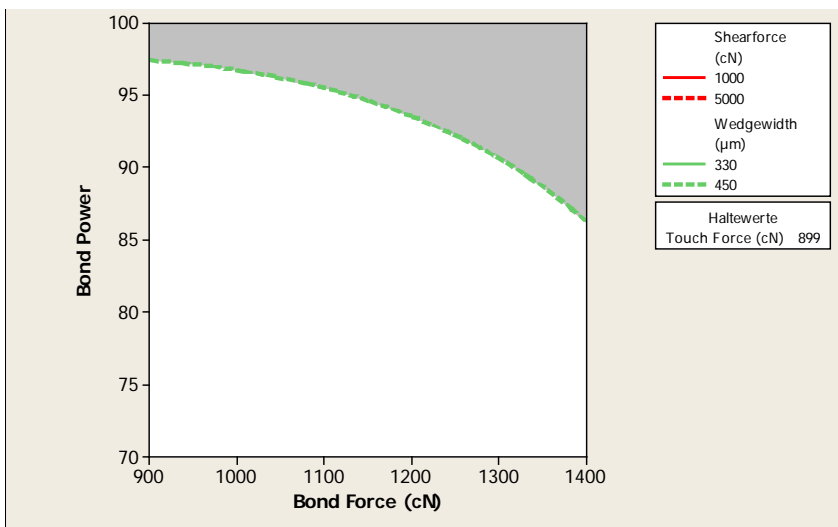


Abb. 19: Bondfenster der Bond-DoE CucorAl (300µm) auf AlSi

### 2.4.7. Vergleich verschiedener Aluminiumschichtdicken

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der CucorAl-Draht in verschiedenen Varianten hergestellt. Ein Unterschied dieser Varianten war beispielsweise die Aluminiumschichtdicke. Diese Varianten wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Delvotec in Bondtests verglichen. Als Substrat dienten walzplattierte Aluminium-Silizium-Schichten. Auf diesen passiven Substraten zeigten beide Drähte gutes Bondverhalten. Dabei zeigt die Scherkraft der Variante mit dickerer Aluminiumschicht deutlich geringere Streuung, was zeigt, dass diese einen stabileren Bondprozess besitzt. An den Schliffbildern dieser Versuche wird auch gut deutlich, dass auch das Loopingverhalten der Materialien unterschiedlich ist. Der Draht mit dem dickeren Kupferkern ist dadurch steifer und zeigt einen flacher steigenden Loop.

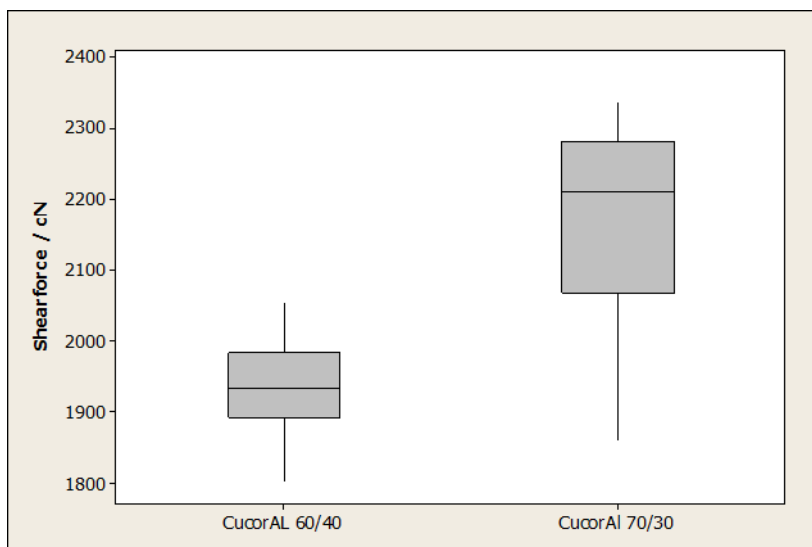


Abb. 20: Schertest am Manteldrahtbonds in Abhängigkeit des Aluminiumanteils

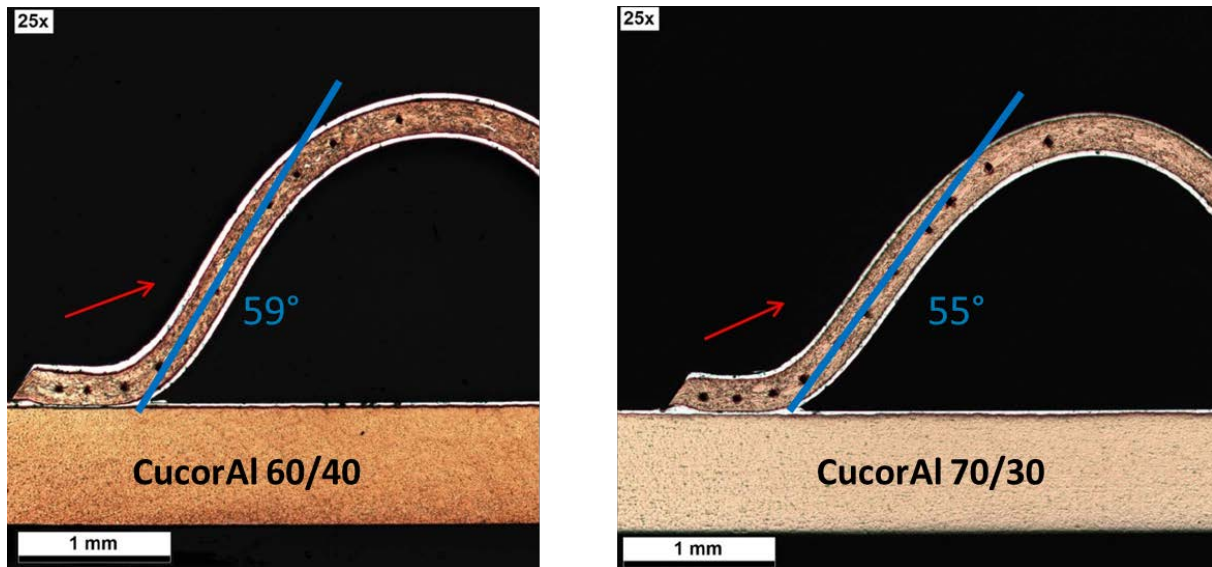


Abb. 21: Loopwinkel in Abhängigkeit des Aluminiumanteils

Auch im EBSD-Bild sehen beide Materialien ähnlich aus. Eine exakte Auswertung der Bilder ist aber leider nicht möglich, da die verwendete Auswertesoftware nicht für die Analyse von Verbundmaterialien geeignet ist.

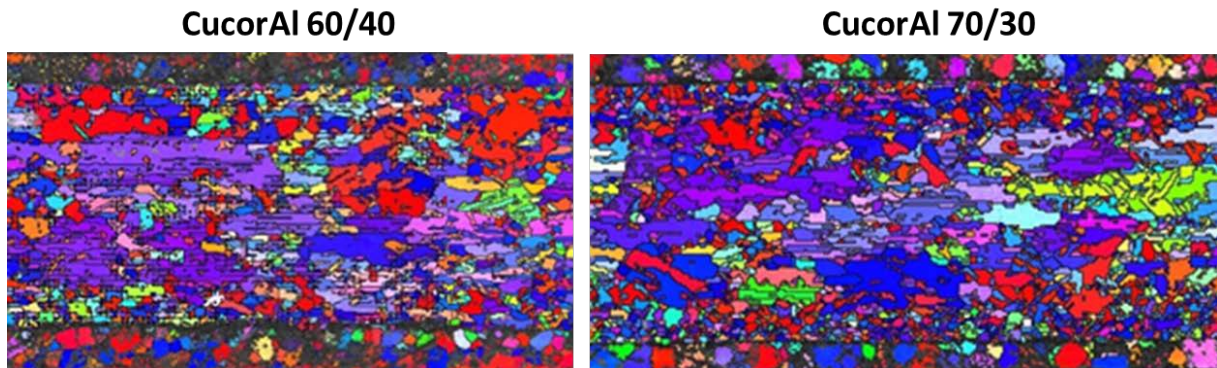


Abb. 22: EBSD-Untersuchung zweier CucorAl-Varianten

## 2.4.8. Lebensdauervergleich

### 2.4.8.1. Temperaturlagerung (HTS)

Zur Beurteilung des Verhaltens der neuartigen Materialien wurden Temperaturlagerungen bei 150°C, 200°C und 300°C durchgeführt. Dabei zeigt sich bei niedrigen Temperaturen (150°C) noch kein Vorteil durch die neuen Materialien, abgesehen von der grundsätzlich höheren Festigkeit der neuen Materialien. Auch bei 200°C zeigen alle Materialien gute Ergebnisse. Unterschiede erkennt man erst bei 300°C. Während konventionelle Aluminium-



drähte hier einen Festigkeitseinbruch zeigen, bleibt die Festigkeit des AIX-Materials hiervon unbeeinflusst. Bei CucorAl kommt es sogar zu einer Festigkeitssteigerung. Diese geht allerdings einher mit einem Abfall der elektrischen Leitfähigkeit. Ursache für beides dürfte ein Anwachsen der intermetallischen Phase bei hoher Temperatur sein. Bis 200°C zeigen beide Drähte sehr gutes Auslagerungsverhalten. Der AIX-Draht hat zusätzlich den Vorteil, dass er auch bis zu 300°C einsatzfähig ist.

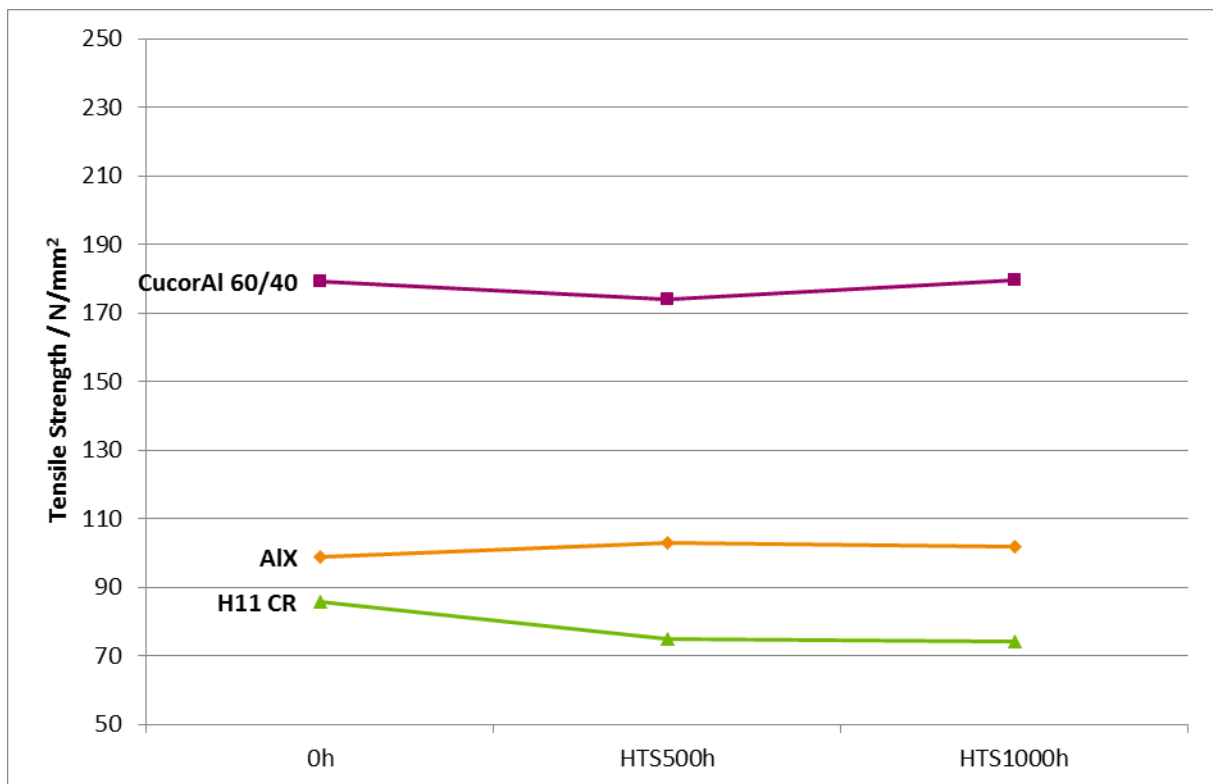


Abb. 23: Zugfestigkeit bei 150°C Auslagerung

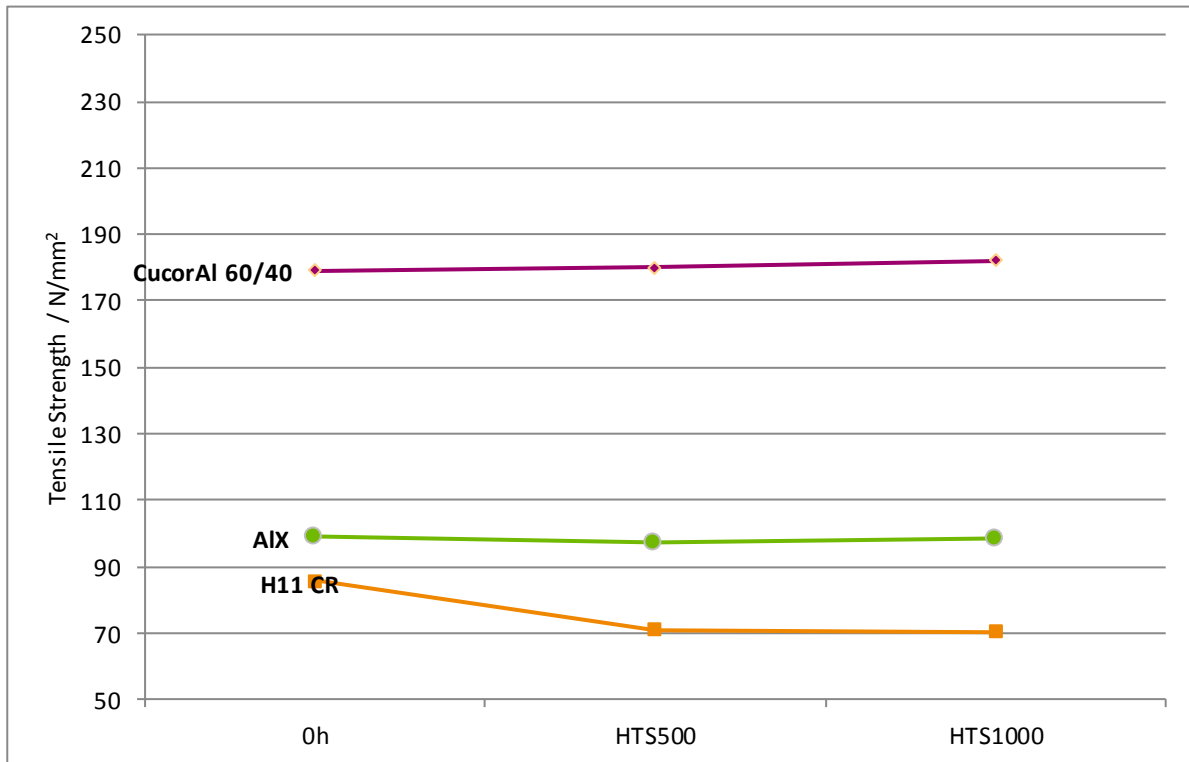


Abb. 24: Zugfestigkeit bei 200°C Auslagerung

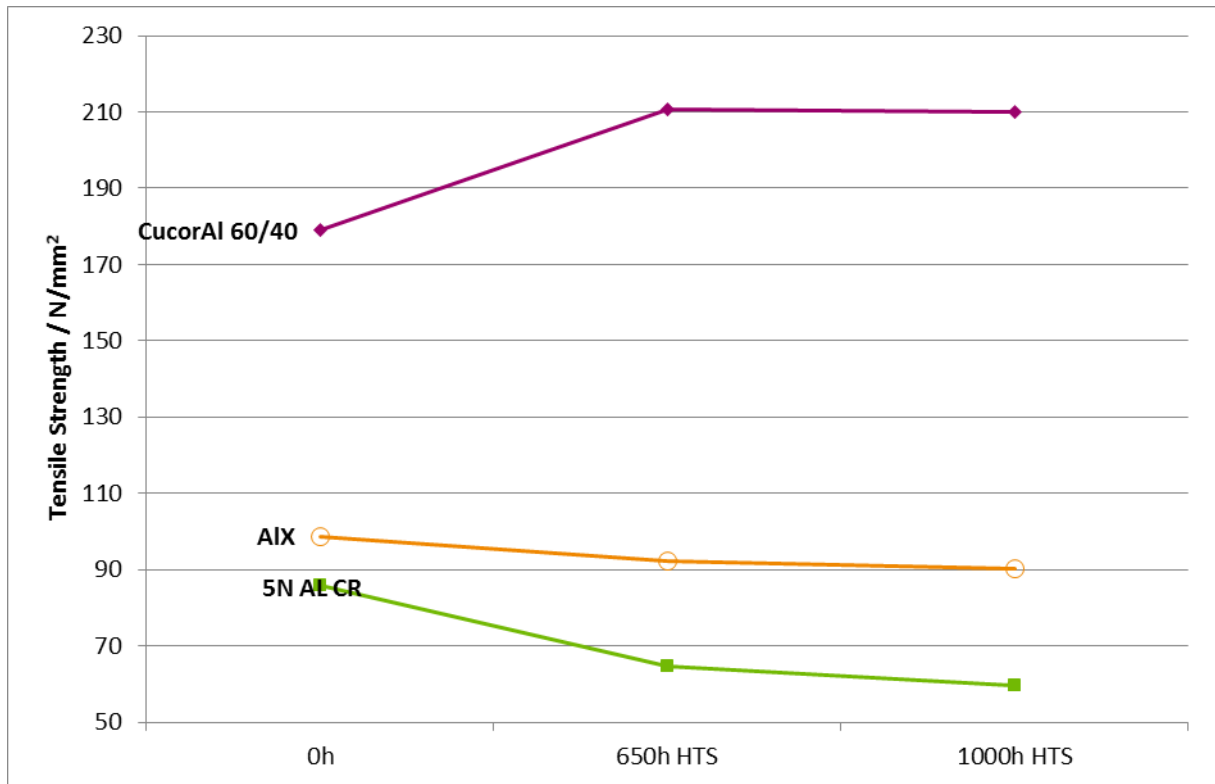


Abb. 25: Zugfestigkeit bei 300°C Auslagerung

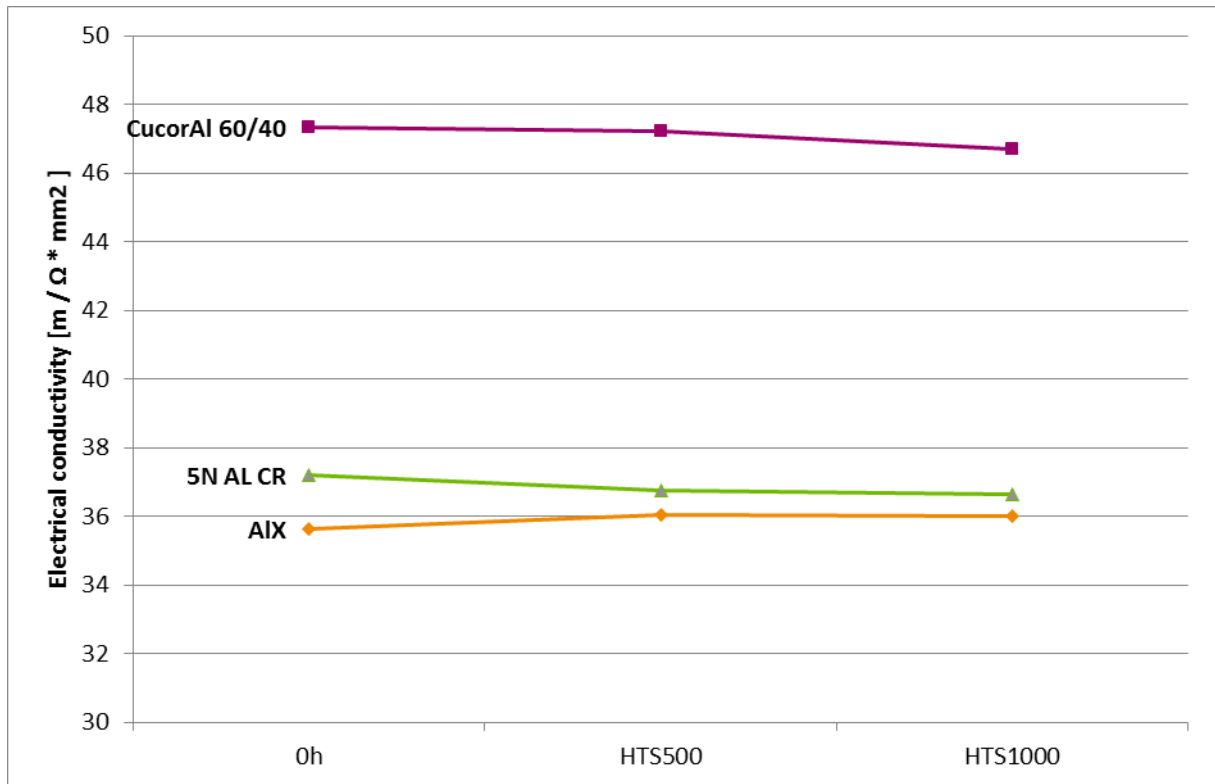


Abb. 26: elek. Leitfähigkeit bei 150°C

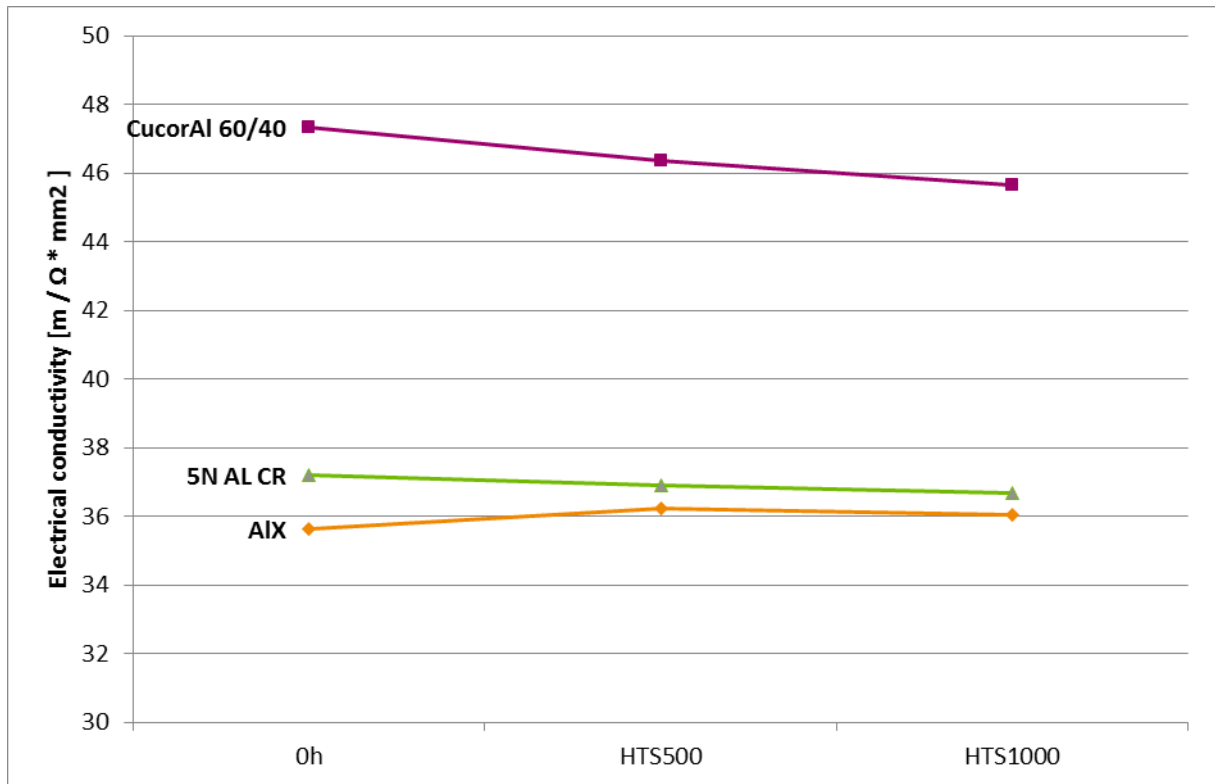


Abb. 27: elek. Leitfähigkeit bei 200°C

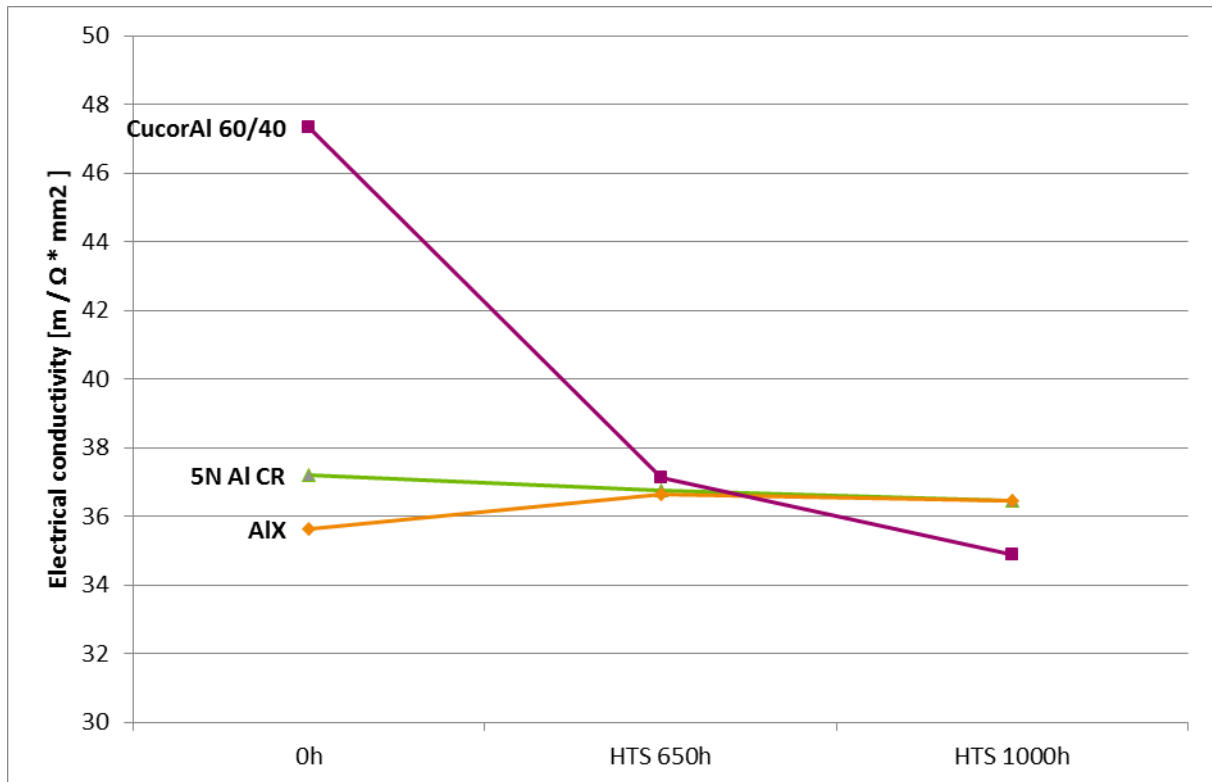


Abb. 28: elek. Leitfähigkeit bei 300°C

### 3. 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

#### **4. 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.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen (RoBE) Teilvorhaben: Modellierung und Charakterisierung von innovativen Bondverbindungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prenosil, Peter Thomas, Dr. Sven	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2014 6. Veröffentlichungsdatum 30.04.2015 7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG Heraeusstraße 12-14 63450 Hanau	9. Ber. Nr. Durchführende Institution - 10. Förderkennzeichen 16N11466 11. Seitenzahl 39
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben - 14. Tabellen 1 15. Abbildungen 28
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Um den gesteigerten Anforderungen der E-Mobilität gerecht zu werden, wurde im Rahmen des Projekts RoBE nach neuen, robusten Bondmaterialien gesucht. Hierbei wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Durch die Wahl intelligenter Legierungszusätze soll herkömmlicher Aluminiumdraht verbessert werden. Durch solche Materialien ließe sich die Einsatztemperatur auf bis zu 300°C erhöhen.</li> <li>2. Zum anderen wurde untersucht, welche Vorteile man durch die Verwendung von Verbundmaterialien gewinnen kann. Hierdurch ist eine höhere Robustheit gegenüber zyklischer Belastung zu erwarten.</li> </ol> Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag hierbei besonders auf dem zweiten Ansatz, der neben einer höheren Robustheit auch noch eine Verbesserung der elektrischen Eigenschaften bewirkt.	
19. Schlagwörter RoBE, Bonddraht, Robust, CucorAl, AIX, Verbundwerkstoff	
20. Verlag -	21. Preis -



## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen (RoBE) Teilvorhaben: Modellierung und Charakterisierung von innovativen Bondverbindungen	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prenosil, Peter	5. end of project 31.10.2014
	6. publication date 30.04.2015
	7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address) Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG Heraeusstraße 12-14 63450 Hanau	9. originator's report no. -
	10. reference no. 16N11466
	11. no. of pages 39
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references -
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 28
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract In order to satisfy the increased requirements of e-mobility a development was started to find new, robust bond materials within the project RoBE. To solve this issues two different approaches were done: 1. Increase the behavior of bond materials by choosing a smart alloying component. High temperature stable intermetallic phases increase the temperature stability to 300 °C. 2. The use of composite materials was assessed. The advantage of good bondability and high reliability could be achieved. The focus of this research was the second approach, because it lead to an improved electrical conductivity beside the increased power cycling performance.	
19. keywords RoBE, bonding wire, robustness, CucorAl, AIX, composite material	
20. publisher -	21. price -