



Abschlussbericht

RoBE – Robustheit für Bonds in E-Fahrzeugen

| | |
|---|---------------------------------------|
| Zuwendungsempfänger: F&K Delvotec Bondtechnik GmbH | Förderkennzeichen: 16N11467 |
| Teilvorhabensbezeichnung: Garantierte Mindestlebensdauer von Drahtbondverbindungen durch verbesserte Technologien auf Basis des heutigen Standes, sowie durch Einführung neuer Technologien | |
| Projektleiter des Teilvorhabens: Dr. Josef Sedlmair | |
| Tel.: 089-62995-142 Email: josef.sedlmair@de.fkdelvotec.com | |
| Laufzeit des Vorhabens (Bewilligungszeitraum): von: 01.08.2011 bis: 31.10.2014 | |

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung des Vorhabens

- 1.1 Aufgabenstellung
- 1.2 Randbedingungen vor und während der Projektlaufzeit
- 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens
- 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde
- 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

2. Erzielte Ergebnisse

- 2.1. Robustheit des Drahtbondprozesses
 - 2.1.1 Einspannung des Bondwerkzeugs
 - 2.1.2 Einspannung des Transducers
 - 2.1.2.1 Unterschiedliche Einspannlängen
 - 2.1.2.2 Unterschiedliche Anzugsdrehmomente
- 2.2. Echtzeit-Prozessdaten und ihr Nutzen zur Prozesscharakterisierung
 - 2.2.1 Charakteristische Verlaufsdaten beim Bonden
 - 2.2.2 Schwingungsamplitude im Leerlauf und bei Dämpfung
 - 2.2.3 Frequenzverlauf und mögliche diagnostische Verwendung
 - 2.2.4 Toolamplitude und Übertragung auf Substrat
 - 2.2.5 Toolabriss und Diagnostik
- 2.3. Resonanzen und dergleichen
 - 2.3.1. Mitschwingen von Substratelementen
 - 2.3.2. Mitschwingen von Bonddrähten
 - 2.3.2.1 Querschwingungen
 - 2.3.2.2 Längsschwingungen
- 2.4. Charakterisierungsverfahren und ihre Verbesserung
- 2.5. Batteriematerialien für E-Fahrzeuge beim Drahtbenden
- 2.6. Laserbender
 - 2.6.1 Hardware: Unabhängiger Betrieb von Laser und Ultraschall
 - 2.6.2 FEM-Modellierung
 - 2.6.3 Hardware: vorgesehene Änderungen
 - 2.6.4 Software-Anbindung: Rezeptmanagement

2.6.5. Bondversuche

3. Voraussichtlicher Nutzen

4. Veröffentlichungen

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Leistungsaufnahme des Bondsystems bei unterschiedlichen Einspannlängen*
- Abb. 2: Resonanzfrequenz bei unterschiedlichen Einspannlängen*
- Abb. 3: Leistungsaufnahme des Bondsystems bei unterschiedlichen Einspannlängen*
- Abb. 4: Frequenz und Impedanzverhalten*
- Abb. 5: Typisches Dickdraht-Bondwerkzeug von 50 mm Länge*
- Abb. 6: Detail Bondwerkzeug*
- Abb. 7: Schwingungsverhalten des Transducers longitudinal und transversal*
- Abb. 8: Bonddaten Deformation, US-Pegel, Impedanz und Frequenz aus dem Bonder*
- Abb. 9: Deformationskurven analysiert auf Abweichung von der Standardkurve*
- Abb. 10: Impedanzkurven analysiert auf Abweichung von der Standardkurve*
- Abb. 11: Abnehmende Wellenlänge durch Dämpfung beim Bonden*
- Abb. 12: Bondverlauf: Strom sinkt ab, Frequenz steigt leicht an*
- Abb. 13: Bondverlauf: Strom sinkt ungleichmäßig ab, Frequenz steigt unkontinuierlich an*
- Abb. 14: Amplitude der Schwingungen von Bondwerkzeug und Chipkante*
- Abb. 15: Verlauf der Strom- und Frequenzkurve mit zeitweisem Verlust der Toolhaftung*
- Abb. 16: übereinandergelegte Verläufe von Mitschwingen des Bondpads (schwarz) und Transducerstrom (rot)*
- Abb. 17: Schwingungsmodi eines einseitig eingespannten Pins*
- Abb. 18: Bauteil mit Dickdrahtbrücken und Messpunkt*
- Abb. 19: Originalsignal des Laservibrometers*
- Abb. 20: Ermittelte Drahtschwingung (schwarz) und Kurvenanpassung (rot)*
- Abb. 21: Schematische Darstellung von Längsschwingungen in der Drahtbrücke*
- Abb. 22: Messpunkt Laservibrometer für Längsschwingung*
- Abb. 23: Längsschwingung, Grundfrequenz*
- Abb. 24: Längsschwingung, erster Oberton*
- Abb. 25: Unterschiedliche Scher-Richtungen*
- Abb. 26: Scherwerte von 200 μ m Aluminiumdraht auf Standardsubstrat*
- Abb. 27: Prismatische Lithium-Zellen*
- Abb. 28: Typische 18650 Batteriezelle*
- Abb. 29: Mit Dickdrahtbonds gebondeter Deckel einer 18650 Zelle*
- Abb. 30: Bondkopf mit angeflanschem Laser-Scanner, Strahlengang rot*
- Abb. 31: Geometrie am Bondkopf*

Abb. 32: Bondkopfgerüst nach FEM mit farblich hervorgehobener Deformation (statisch)

Abb. 33: Laser-Scanner mit angebauten zusätzlichen Überwachungseinrichtungen

Abb. 34: Ansteuerung und Informationsfluss zwischen Bonder, Laser und Scanner

Abb. 35: Versuchsaufbau

Abb. 36: Versuch 2, Bond 1 (Pluspol, Aluminium)

Abb. 37: Versuch 3, Bond 2

Abb. 38: Schliffebene 1 an Versuch 8 (Pluspol) Mikroaufnahme 80%

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Eigenfrequenzen eines einseitig eingespannten Pins

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 bzw. mit Breiten bis zu 2.000 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 Lebensdauernforderungen 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 Pro-

duktion 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 ei-

ner 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 μ 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.

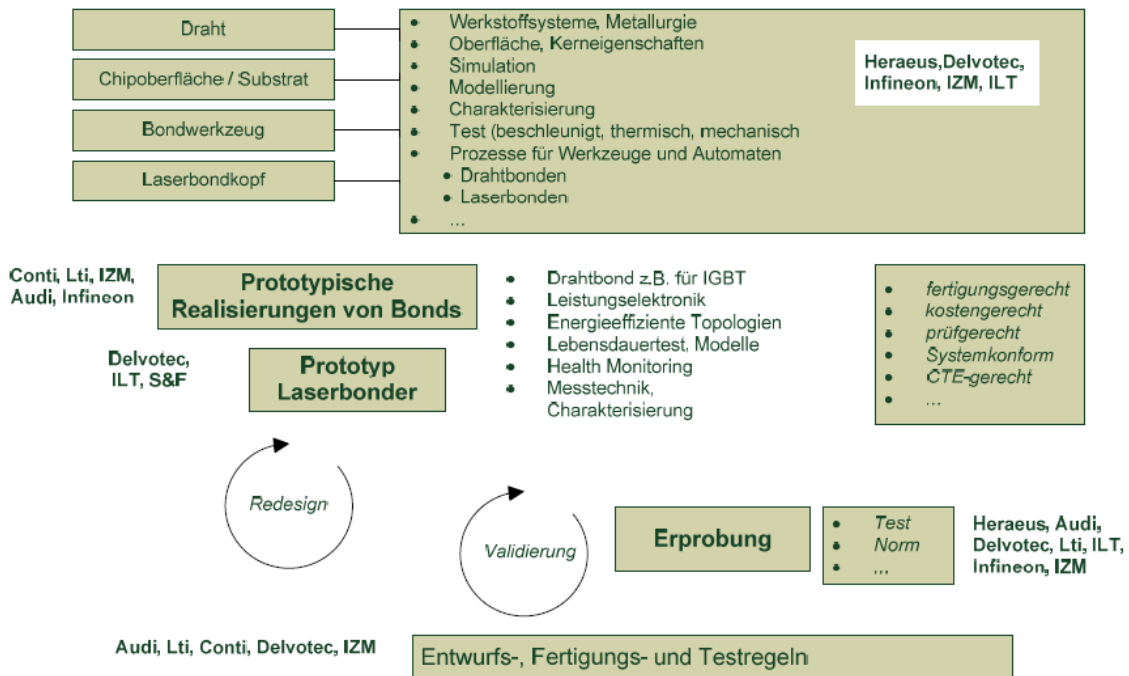


Abbildung 1: Arbeitsteilung zwischen den Verbundpartnern im Projekt RoBE

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.

1.5 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 zukunftssträchtig 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.

2. Erzielte Ergebnisse

Übersicht

Unsere Arbeiten im Verbundprojekt verfolgten diese wesentliche Ansätze:

1. Robustheit:
Welche Faktoren beeinflussen die Robustheit des Drahtbondprozesses? Wie kann der Bondprozess robuster gemacht werden?
2. Online-Prozessdaten:
Welche relevanten Echtzeit-Prozessdaten entstehen bereits im Bonder? Welche sind mit geringem Aufwand zugänglich und können exportiert werden? Wie können sie ausgewertet werden und dazu genutzt werden, den Prozess zu charakterisieren?
3. Resonanzen:
Welche Einflüsse haben Schwingungen, Resonanzen und Mitschwingen von Bonddrähten oder Bauteilen beim Bonden? Können sie bereits am Bonder verfolgt werden?
4. Bondtests:
Wie aussagekräftig sind die heutigen Verfahren, die Bondqualität zu charakterisieren und wie können sie verbessert werden?
5. Andere Materialien:
Das Drahtbonden von unterschiedlichen Materialien speziell bei Batteriesystemen für E-Fahrzeuge wurde näher erforscht und ist inzwischen sehr gut beherrschbar.
6. Laserbonder:
Der stärker zukunftsgerichtete Laserbondprozess konnte mit einem ersten Prototyp in erfreulich kurzer Zeit dargestellt werden. Ein modifiziertes Nachfolgemodell ist bereits im Entstehen.

2.1. Robustheit des Drahtbondprozesses

Um die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Robustheit des Prozesses zu identifizieren und zu quantifizieren, wurde zunächst die unmittelbare Umgebung des Bondwerkzeuges betrachtet. Neben den dynamischen Prozessparametern wie Ultraschallpegel, Bondzeit und Bondkraft sowie einer ganzen Reihe weiterer untergeordneter Parameter (hier sind zu nennen Touchdownkraft, Aufsetzdynamik, Überfahrwege, Bondkrafttrampen u.v.m.) haben erfahrungsgemäß vor allem mechanische Aspekte große Auswirkungen. Dazu gehören die Einspannung des Bondwerkzeuges und des Transducers im Bondkopf.

2.1.1 Einspannung des Bondwerkzeugs

Wie stark hängt die Bondqualität von der Einspannung des Bondwerkzeuges ab? Dazu wurde untersucht, wie stark die Leistungsaufnahme des Bondsystems schwankt, wenn das Bondwerkzeug mit unterschiedlicher freier Länge eingespannt wird, und zwar zunächst im Leerlauf, also bei ungedämpfter Schwingung in der Luft. Die Resultate zeigen sehr deutlich, dass die Einspannlänge große Auswirkungen hat.

Versuch A – Dünndraht-Wedge bei 100 kHz

In der begleitenden Abbildung 1 wird die Leistungsaufnahme des Bondsystems in Abhängigkeit von der Einspannlänge des Bondwedges im Leerlauf aufgetragen. Die Messdurchläufe sind nummeriert; im ersten Durchlauf wurde das Werkzeug mit der korrekten vorgegebenen Länge eingespannt; im zweiten Durchlauf wurde der Wedge höher eingespannt, so dass die freie Länge etwa 10% geringer war; im dritten Durchlauf hingegen war sie um etwa 10% größer und in den folgenden Durchläufen 4 bis 7 wurde das Werkzeug jeweils entfernt und wieder mit korrekter Länge eingespannt, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Alle Einspannungen wurden mit dem korrekten vorgegebenen Anzugsmoment der Transducerschraube durchgeführt.

Die Daten zeigen sehr klar, wie empfindlich das Bondsystem reagiert: bei korrekter Einspannung ist die Leistungsaufnahme recht konstant bei etwa 920 mW. Durchlauf 2 zeigt, dass ein zu kurz eingespannter Wedge etwa ein Drittel weniger Leistung aufnimmt, etwa

580 mW. Zu lange Einspannung ist noch schädlicher und reduziert die Leistungsaufnahme auf weniger als die Hälfte (380 mW).

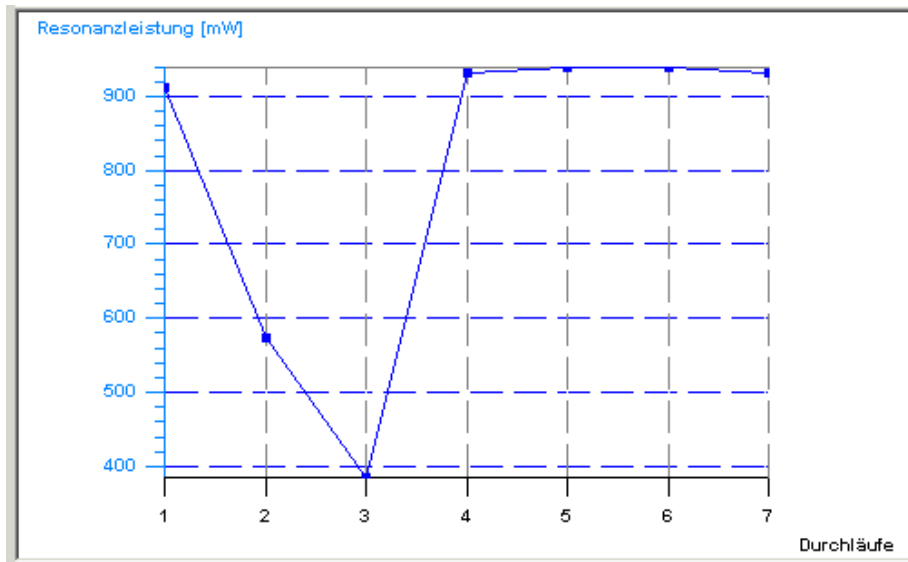


Abb. 1: Leistungsaufnahme des Bondsystems bei unterschiedlichen Einspannlängen

Ob ein Bondwerkzeug zu lang oder zu kurz eingespannt ist, lässt sich aus der Impedanz (die reziprok zur Leistungsaufnahme des Bondsystems verläuft) noch nicht schlüssig ablesen. Jedoch sind im gleichen Messverlauf auch Daten zur Frequenz und zur Phase des Ultraschallsignals verfügbar. Wie in Abb. 2 abzulesen ist, variiert die Resonanzfrequenz mit der Einspannlänge in charakteristischer Weise: wird der Bondwedge kürzer eingespannt, erhöht sie sich um etwa 500 Hz, während sie bei längerer Einspannung um 1500 Hz sinkt. Bei wiederholter Einspannung mit identischer Länge hingegen bleibt sie auf etwa 100 Hz konstant. Zur Erfassung dieser Daten ist ein externes Messinstrument nicht zwingend notwendig, denn der im Bonder eingebaute Ultraschallgenerator kann bei geeigneter Auslegung dieselben Messungen durchführen.

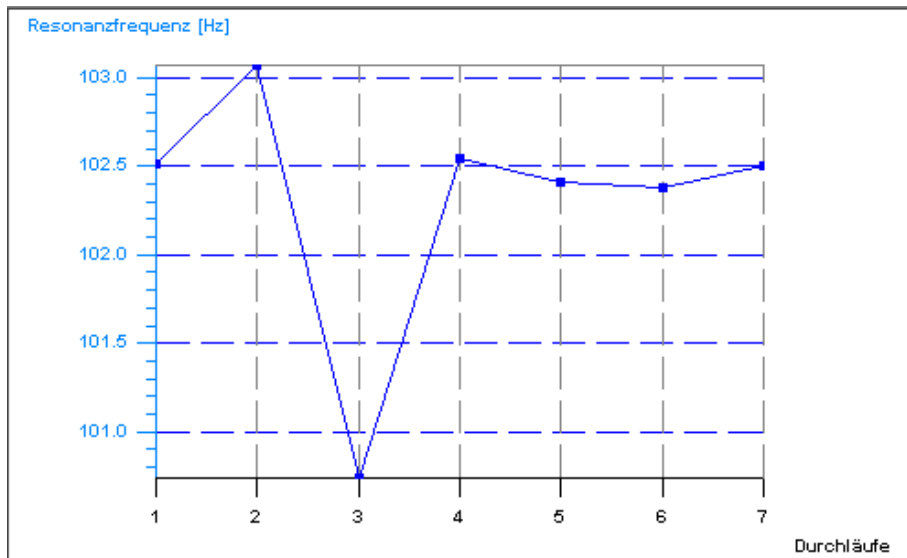


Abb. 2: Resonanzfrequenz bei unterschiedlichen Einspannlängen

Versuch B – Dickdraht-Wedge bei 90 kHz

Analog zu den vorausgehenden Versuchen wurden Leistungsaufnahme und Resonanzfrequenz des Bondsystems auch für ein Dickdraht-Bondwerkzeug untersucht.

Diese Bondwedges sind üblicherweise 50 mm lang und weisen eine freie Länge außerhalb des Transducers von 41,75 mm auf, wenn sie vorschriftsgemäß plan abschließend mit der Oberseite des Transducers, der einen Durchmesser von 8,25 mm hat, eingespannt werden. Bei diesem betrachteten Bondsystem wurde eine nominelle Ultraschallfrequenz von 90 kHz gewählt.

Wiederum frei schwingend, also in Luft, zeigen Abb. 3 und 4, wie die Resonanzfrequenz mit der Einspannlänge variiert. Dabei sind in dem Kasten rechts in Abb. 3 die jeweiligen Einspannlängen farblich gekennzeichnet und korrespondieren mit den jeweiligen Kurven. In der anschließenden Abb. 4 sind die Versuchsnummern von 1 bis 10 als Abszisse gewählt; die linke Skala gibt die Impedanz in Ohm an und bezieht sich auf die blaue Kurve. Die Frequenz in der orangenen Kurve bezieht sich auf die rechte Skala in kHz.

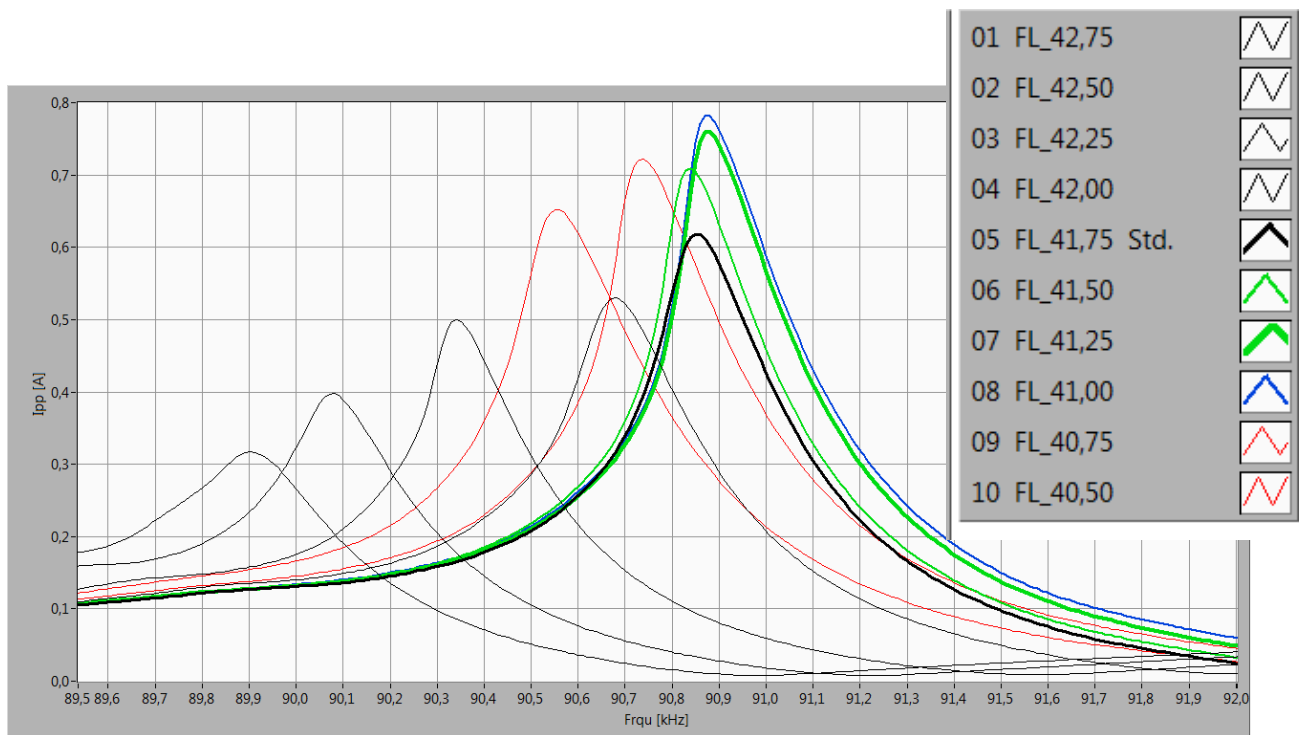


Abb. 3: Leistungsaufnahme des Bondsystems bei unterschiedlichen Einspannlängen

Bereits geringe Variationen in der Einspannposition ziehen deutliche Änderungen in der Leistungsaufnahme des Transducers nach sich: eine um 0,5 mm veränderte Position erhöht die Impedanz bereits um 10 bis 15% und entsprechend also auch die Leistungsaufnahme. Dagegen fällt die Veränderung in der Resonanzfrequenz bei der gleichen Einspannveränderung mit etwa 50 Hz geringer aus, allerdings nur, wenn die freie Länge steigt. Wird sie verringert, der Wedge also kürzer eingespannt, so sinkt sie stärker ab, nämlich um etwa 300 Hz.

In der Praxis wird beobachtet, dass schon Änderungen in der Einspannlänge von 200 µm gravierende Einbrüche in der Bondqualität verursachen können und Ausfälle von mehreren Prozent nach sich ziehen. Das Ausmaß hängt natürlich auch von den Qualitätsanforderungen und dem Schwierigkeitsgrad der jeweiligen Anwendung ab, zeigt aber, dass dieser Aspekt nicht peripher ist.

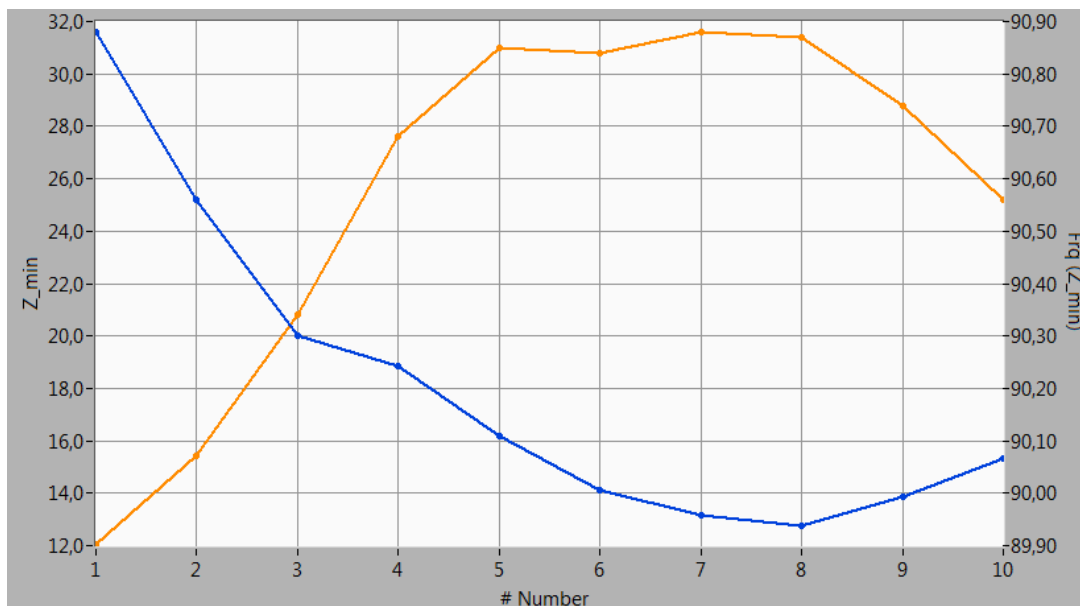


Abb. 4: Frequenz und Impedanzverhalten

Ein weiterer, unerwarteter und hochinteressanter Effekt wurde ebenfalls in diesem Zusammenhang festgestellt: die beste Einspannlänge des Bondwerkzeuges hängt sogar von einem Detail wie der Länge des Bondfußes ab. Der in Abb. 5 gezeigte typische Dickdraht-Bondwedge verjüngt sich zur Spitze hin und läuft, wie in Abb. 6 in der Seitenansicht zu erkennen, in einer Sohle aus, die in Längsrichtung gekerbt ist. Diese Länge dieser Sohle bestimmt die Länge des erzeugten Bondfußes; je länger der Bondfuß, desto größer die Verbundfläche zwischen Draht und Substrat, desto größer aber auch der Flächenbedarf des Bonds. Daher wird die Fußlänge des Bondwerkzeuges meist gezielt ausgewählt, um die optimale Verbindungsgröße zu erreichen. Typisch ist eine Bondfußlänge von etwa dem doppelten Drahtdurchmesser.

Mit dem Laservibrometer ließ sich beobachten, dass die am oberen Ende des Bondwerkzeuges angeregte Schwingung eine stehende Welle entlang dem Schaft des Bondwedges ausbildet; diese Welle endet bei korrekter Einspannung in einem Schwingungsbauch an der Spitze des Wedges. Die Verjüngung des Werkzeugschaftes zur Spitze hin hat nun wegen der veränderten Massenverteilung zur Folge, dass sich die Positionen von Schwingungsknoten und –bäuchen geringfügig ändern, verglichen mit einem konstanten Querschnitt. Wie in Abb. 11 in Abschnitt 2.2. ausführlicher gezeigt, verschieben sich während des Bondvorganges durch die Dämpfung der Schwingung an der

Werkzeugspitze Schwingungsknoten und –bäuche in das Werkzeug hinein. (Wie dort näher erläutert, hat sich im Projekt gezeigt, dass diese Dämpfung am Transducer durch die Stromaufnahme verfolgt werden kann und ein ausgezeichnetes Maß für die an der Werkzeugspitze wirksame Schwingungsamplitude ist.) Ohne die Auswirkung der Verschiebung im Detail zu diskutieren, soll hier darauf hingewiesen sein, dass leichte Änderungen dieser Schwingungsverteilung bereits genügen, die Effizienz der übertragenen Ultraschallschwingung beim Bonden zu beeinflussen und damit die an der Bondstelle eingebrachte Schwingungsenergie zu erhöhen oder zu erniedrigen. Für optimale und vergleichbare Bondergebnisse ist es also ratsam, für jede Bondwerkzeug-Geometrie eine eigene, optimierte Einspannlänge zu ermitteln und für die praktische Verwendung vorzugeben. Dies macht übrigens nicht zwingend notwendig, verschiedene Einspannhilfen wie Lehren o.ä. für die verschiedenen Bondwerkzeuge vorzuhalten, was die Fertigungspraxis unnötig komplizieren würde. Moderne Drahtbonder nutzen in der Regel eine vorprogrammierte Einstellposition des Bondkopfs an einer Stelle des Arbeitsbereiches, so dass der Transducer in einer bekannten und definierten Höhe über einer ebenen und festen Fläche steht, die als Anschlag beim Einbau des Bondwerkzeuges dient.

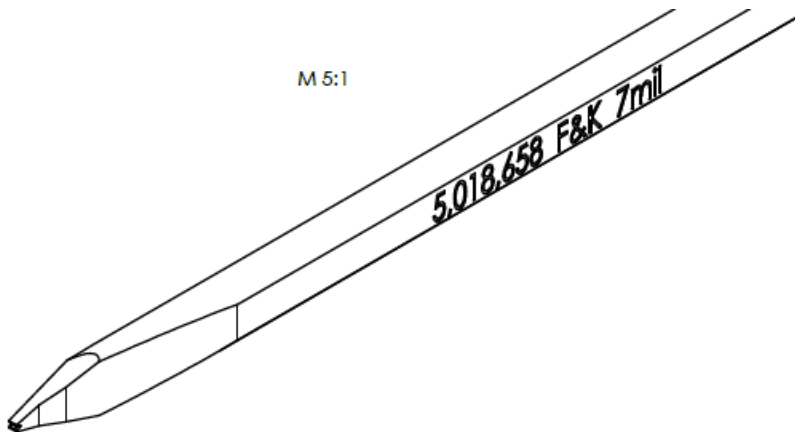


Abb. 5: Typisches Dickdraht-Bondwerkzeug von 50 mm Länge

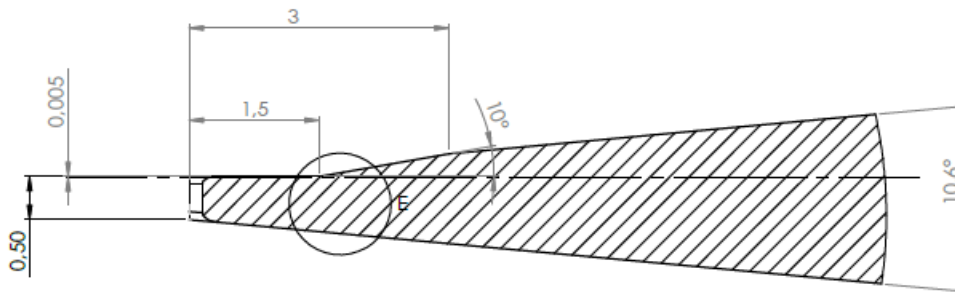


Abb. 6: Detail Bondwerkzeug

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass alle diese Indizien vor allem deshalb von Interesse sind, weil bei falscher Einspannung die niedrigere Resonanzleistung bzw. höhere Transducerimpedanz in einer geringeren Schwingungsamplitude des Tools resultiert und damit die zum Bonden verfügbare Leistung deutlich sinkt. Damit werden alle Bonds schlechter gebildet, was eine gravierende Fehlerquelle darstellt.

2.1.2 Einspannung des Transducers

2.1.2.1 Unterschiedliche Einspannlängen

Gibt es eine ähnliche Abhängigkeit des Bondverhaltens auch bei der Einspannung des Ultraschallwandlers, also des Transducers. Auch diese Frage wurde untersucht und dabei wiederum die Leistungsaufnahme im Leerlauf sowie das Frequenzverhalten aufgenommen, wenn der Transducer korrekt oder aber etwas länger eingespannt wurde, sowie wenn das Anzugsmoment der Befestigungsschelle verringert oder erhöht wurde.

Hierbei zeigt sich eine etwas geringere Auswirkung als bei der Tooleinspannung, sowohl hinsichtlich der Einspannlänge wie auch des Einspann-Anzugsmoments. Vor allem aber ändert sich die Resonanzfrequenz kaum.

2.1.2.2 Unterschiedliche Anzugsdrehmomente

Eine bedeutend stärkere Auswirkung hingegen zeigt sich, wenn man parasitäre, also unerwünschte Schwingungen betrachtet, die der Transducer aufweisen kann, nämlich solche in Y und Z (wenn die gewünschte, longitudinale Schwingung als X-Richtung bezeichnet

wird). Schwingungen in Y und Z laufen dann quer zur Bondrichtung bzw. nach oben und unten. Sie können im Extremfall einen Bond unmöglich machen.

Der Transducer führt eine Longitudinalschwingung aus, weist also eine stehende Welle auf, die längs des Transducers zu abwechselnden Verdickungen und Verdünnungen führt. (Sie entsprechen den Schwingungsknoten und –bäuchen bei einer Transversalschwingung.)

Daher erfolgt die Einspannung des Transducers nach Möglichkeit in einer neutralen Stelle der stehenden Welle, um das Schwingungsverhalten möglichst wenig zu beeinflussen.

Trotzdem hat das Anzugsmoment gewisse Auswirkungen, weil es das Ausmaß der Dämpfung beeinflusst. In Abb. 7 ist dies ersichtlich. Mit einem Laser-Vibrometer konnte gezeigt werden, dass bei ungünstig gewählten Einspannbedingungen zusätzlich zu der erwünschten Längsschwingung auch noch eine nicht erwünschte Biegeschwingung auftreten kann: vermisst man die Bewegung entlang der Transducerlänge von oben und unten getrennt, so erhält man zwei Amplitudenkurven, die im Idealfall einer reinen Längsschwingung identisch sein sollten, weil sich der Transducer auf der Oberseite genauso wie auf der Unterseite verhalten sollte.

In Abb. 7 sind dies die schwarze und die rote Kurve, die sich erwartungsgemäß von der Transducerspitze (bei 0 mm gezeigt) bis zum Piezopaket (bei 33 mm gezeigt) als zwei stehende Wellen darstellen. Sie sind jedoch in ihrem Größenverlauf unterschiedlich und beweisen damit eine überlagernde transversale Schwingung in der Z-Richtung.

Die Differenz der beiden Kurven stellt die (erwartete und gewünschte) Dickenänderung entlang der Transducerachse dar (in grün), dagegen zeigt ihr Durchschnitt (in blau) die unerwünschte Z-Schwingung, die einen Wert bis zu 70 nm erreicht. Das scheint zwar im Verhältnis zur Drahtstärke von (in diesem Fall) etwa 30 µm nicht viel, jedoch führt diese Bewegung Schläge auf die dünne und empfindliche Grenzschicht zwischen den Bondpartnern aus, was einen schädlichen Effekt auf die Ausformung des Drahtbonds wahrscheinlich macht.

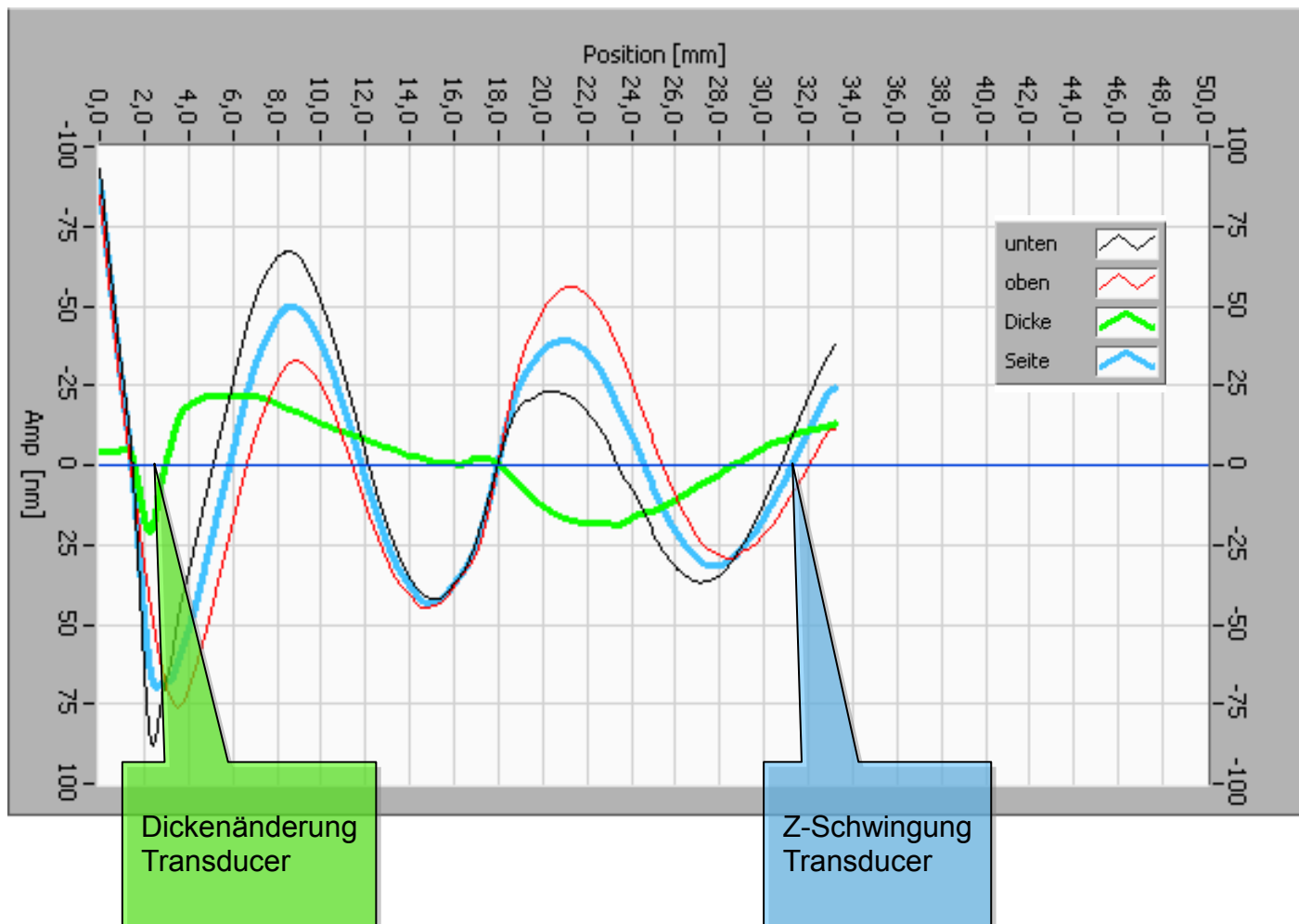


Abb. 7: Schwingungsverhalten des Transducers longitudinal und transversal

2.2. Echtzeit-Prozessdaten und ihr Nutzen zur Prozesscharakterisierung

2.2.1 Charakteristische Verlaufsdaten beim Bonden

Der Bonder erzeugt bereits im normalen Prozessablauf eine Reihe von prozessrelevanten Daten, mit denen sich die Entstehung eines Bonds gut verfolgen und charakterisieren lässt. Solche Daten umfassen u.a. die Impedanz (also Stromaufnahme) des Transducers, die Frequenz und Phase, sowie die Deformation des Drahtes. Diese Daten liegen zeitaufgelöst

in einer Abtastrate von etwa 6 kHz vor und erlauben dadurch eine Echtzeit-Charakterisierung des Bondablaufs.

Die Daten werden ohne Zeitverlust im Bonder gesammelt, bedingen also trotz verbesserter Diagnostik keine Pönale in der Produktivität. Idealerweise können sie aus dem Bonder auch exportiert werden und gestatten so eine externe Auswertung über längere Zeiten, mehrere Produkte und mehrere Maschinen hinweg.

Abb. 8 zeigt exemplarisch die registrierten Daten: Die Deformation ist blau dargestellt, der vorgegebene Ultraschall-Pegel (hier mit einer Absenkung gegen Ende des Bondens) in rot; grün gibt die Leitfähigkeit des Transducers wieder (normalisierter Strom, oder reziproke Impedanz), und die gelbe Kurve stellt die Resonanzfrequenz des Bondsystems dar.

Gestrichelt hinterlegte Kurven sind unmittelbar vorher hergestellte Bonds, so dass sich auch die Historie mehrerer Bonds übereinander ablesen lässt.

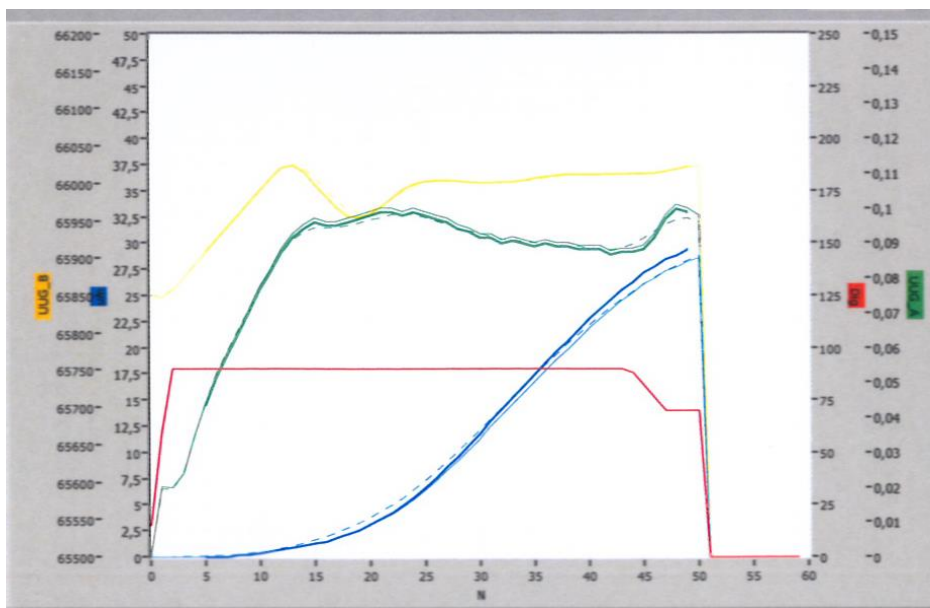


Abb. 8: Bonddaten Deformation, US-Pegel, Impedanz und Frequenz aus dem Bonder

In einer statistischen Auswertung, die derzeit noch außerhalb des Bonders erfolgt, aber zur späteren Integration in den Bonder selbst geplant ist, können diese vier Parameter getrennt analysiert werden. Dazu wird für jeden Parameter ein Durchschnitts-Verlauf berechnet, indem über eine wählbare Anzahl von Kurven gemittelt wird. Diese Durchschnittskurve wird als

Standard vorgegeben. Bei jedem folgenden Bond wird dann der neu aufgezeichnete Parameterverlauf mit der Standardkurve verglichen und nach einer Normierung hinsichtlich der Abweichung eingetragen (als Abweichung wird die Differenz der kleinsten Quadrate dargestellt).

In Abb. 9 sind beispielhaft 200 Deformationskurven analysiert worden. Die schwarzen Daten (obere Datenreihe) zeigen den Normierungsfaktor der Kurven an, die roten Säulen geben die Abweichung von der ermittelten Standardkurve (also der Durchschnittskurve) an.

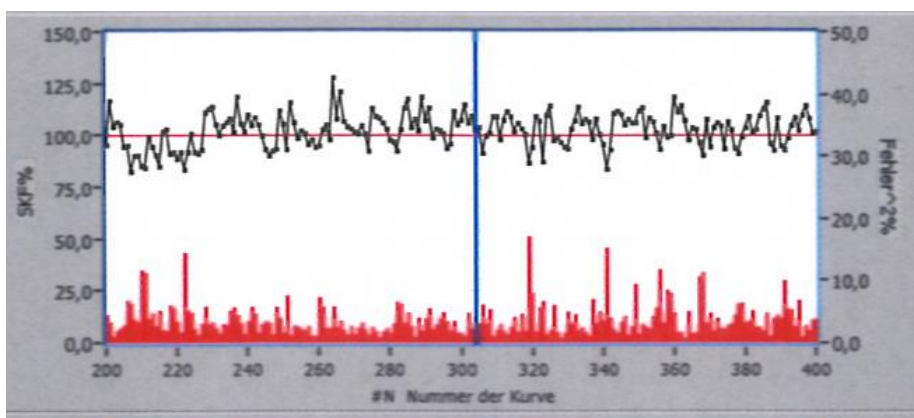


Abb. 9: Deformationskurven analysiert auf Abweichung von der Standardkurve

Das gleiche Vorgehen, angewandt auf den Impedanzverlauf, ergibt deutlich geringere Abweichungen von der Standardkurve, wie in Abb. 10 zu sehen ist. Dieses Verhalten ist so zu interpretieren, dass die Bondbarkeit der Bauteile in geringem Ausmaß schwankt, wie die Variationen im Verlauf der Deformation zeigen. Dagegen ist die Impedanz deutlich konstanter von Bond zu Bond, also gewissermaßen das anfängliche „Ankoppeln“ der Ultraschallbewegung zwischen Bondwerkzeug und Draht. Das wiederum deutet darauf hin, dass keine Kontamination auf den Oberflächen vorhanden ist. Kontaminierte Oberflächen führen nämlich üblicherweise dazu, dass die Ultraschallbewegung später und/oder schwächer auf den Draht übergeht, und folglich die Leerlaufschwingung des Bondtools schwächer gedämpft wird.

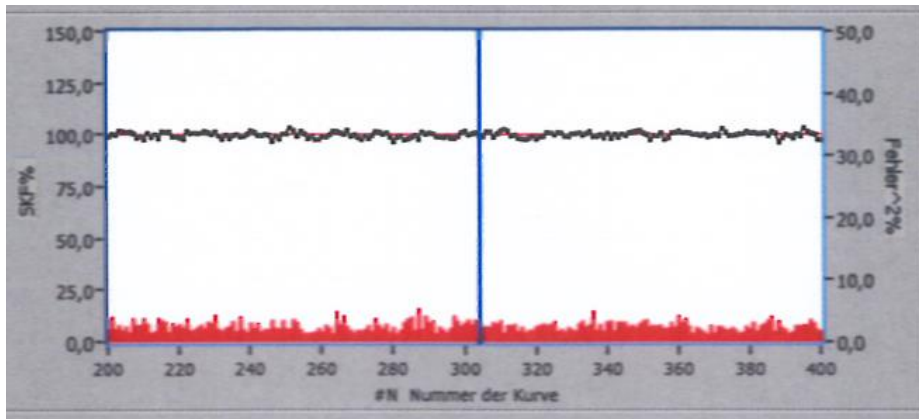


Abb. 10: Impedanzkurven analysiert auf Abweichung von der Standardkurve

2.2.2 Schwingungsamplitude im Leerlauf und bei Dämpfung

Die Untersuchung des Schwingungsverhaltens des Bondtools ergab noch weitere wertvolle Erkenntnisse. So besteht ein häufig genutztes Standardverfahren zur Qualitätssicherung darin, ein frisch eingespanntes Bondtool im Leerlauf mit bekanntem US-Pegel zu beaufschlagen und die resultierende Schwingungsweite an der Werkzeugspitze mit einem Laser vibrometer zu messen. Solange sie einen vorgegebenen Wert erreicht, wird die Einspannung als korrekt akzeptiert und der Bonder zur Produktion freigegeben.

Besonders beim Dickdrahtbonden ist dies aber durchaus keine hinreichende Voraussetzung für qualitätsgerechtes Verhalten des Bondwerkzeuges. Die Schwingungsbäuche der stehenden Welle im Bondwerkzeug verschieben sich während des Bondens nämlich, u.U. auch recht drastisch. Das ist leicht einzusehen, denn die stehende Welle bildet im ungedämpften Zustand einen Schwingungsbauch am Werkzeugende aus. Die entstehende Dämpfung durch die Berührung mit dem Bondssubstrat erzwingt eine geringere Amplitude an der Werkzeugspitze und schiebt damit sozusagen die Welle weiter in das Werkzeug, was in einer abnehmenden Wellenlänge abzulesen ist. Abb. 11 zeigt sehr deutlich anhand einer Vibrometermessung entlang der Werkzeuglänge in Luft und beim Bonden, dass dieser Effekt tatsächlich stattfindet. Je größer die Bondkraft beim Bonden, desto ausgeprägter tritt diese Erscheinung auf.

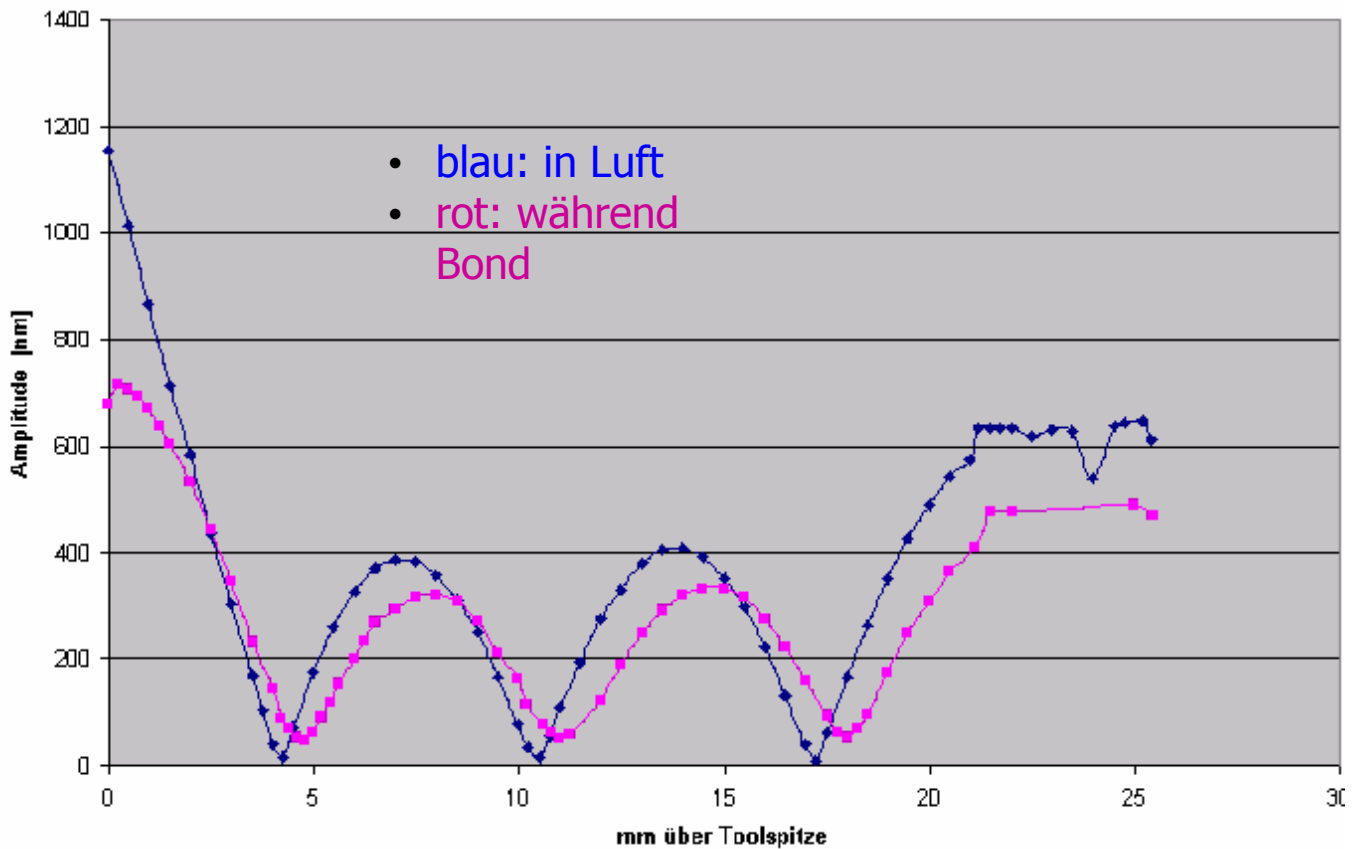


Abb. 11: Abnehmende Wellenlänge durch Dämpfung beim Bonden

Interessant ist hierbei auch die Beobachtung, dass die beim Bonden verringerte Amplitude an der Toolspitze auch an der Transducerspitze sichtbar ist. Die Dämpfung setzt sich quasi bis zum Transducer fort und ist dort fühlbar. Es hat sich gezeigt, dass sie nicht nur mit dem Vibrometer messbar ist, sondern auch in der Transducerimpedanz sichtbar ist, welche während des Bondens abnimmt und somit als Maß für die Schwingungsamplitude am Werkzeugende dienen kann.

2.2.3 Frequenzverlauf und mögliche diagnostische Verwendung

Die verringerte Wellenlänge der stehenden Welle im Bondwerkzeug hat neben der Dämpfung noch eine zweite, unabhängig messbare Konsequenz: die Resonanzfrequenz des Systems steigt leicht an. Dies ist physikalisch unausweichlich, denn das Produkt aus Frequenz und Wellenlänge ist gleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, also der

Schallgeschwindigkeit im Werkzeugmaterial. Da diese Geschwindigkeit eine Materialkonstante ist, ändert sie sich nicht während des Bondens, und somit muss zwingend eine geringere Wellenlänge eine höhere Frequenz nach sich ziehen. Genau dies ist im Verlauf eines normal ablaufenden Bonds zu beobachten, wie in Abb. 12 dargestellt ist.

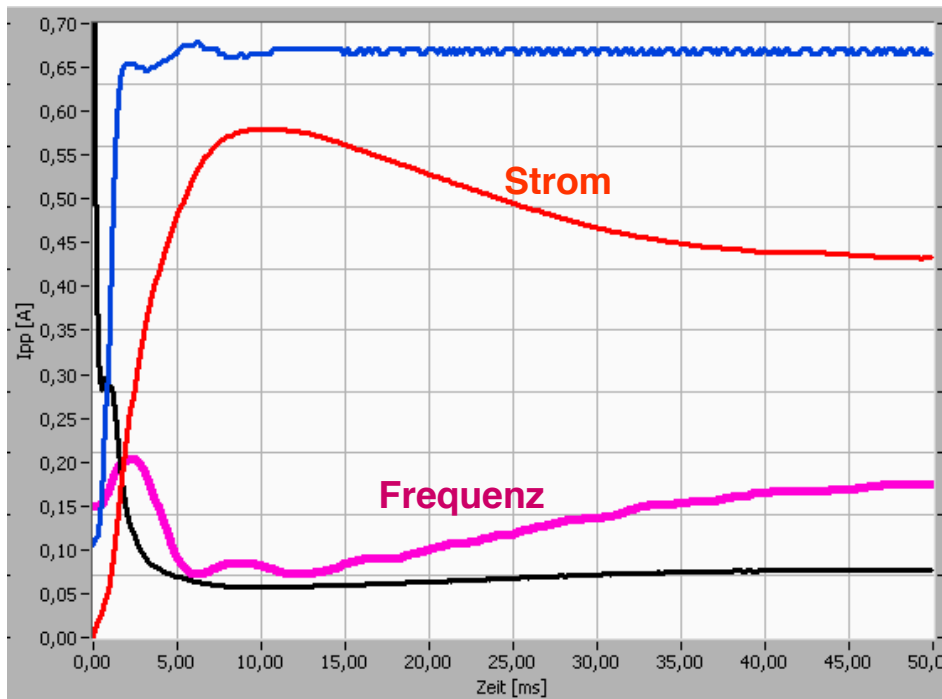


Abb.12: Bondverlauf: Strom sinkt ab, Frequenz steigt leicht an

In der nächsten Projektphase wurde im Detail untersucht, wie sich dieses Verhalten als diagnostisches Instrument nutzen lässt und welche Qualitätsaussagen damit möglich sind, um schwierige Bondoberflächen oder problematische Bonds zu erkennen, bevor sie zu fehlerhaften Bonds und Bauteilausfällen führen. Ein einfaches Beispiel für einen ungünstigen Bondverlauf ist in der folgenden Abb. 13 zu sehen: hier schwanken Strom- und Frequenzverlauf deutlich über die Bondzeit hinweg, was auf Probleme mit der Ankopplung der Toolschwingung an das Substrat hindeutet. Eine Vielzahl von Ursachen kann dieses Verhalten auslösen, so etwa schlechte Fixierung des Bauteils und daher Mitschwingen, oder auch Kontamination an der Oberfläche oder Materialaufbau am Bondwerkzeug. Wichtig ist an dieser Stelle aber der Hinweis, dass der entstandene Bond im Pulltest und bei der visuellen Inspektion durchaus noch akzeptable Werte aufzeigt. Die Signale aus dem Bonder können

also als ausgezeichnetes Frühwarnsystem dienen. Dies war ein zentrales Ziel des gesamten Projektes und die erzielten Ergebnisse sind sehr wertvoll.

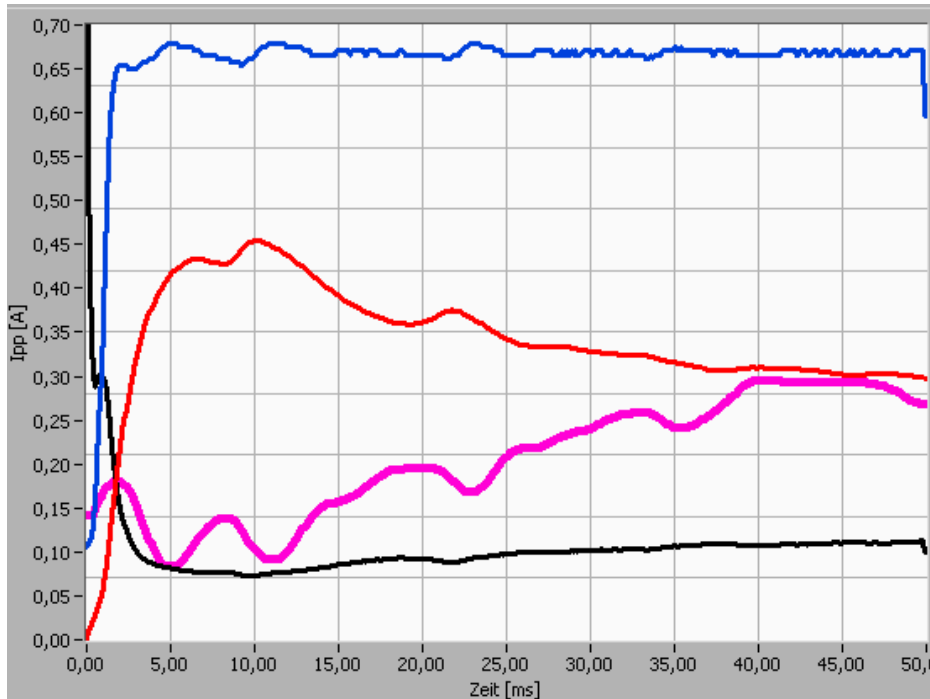


Abb. 13: Bondverlauf: Strom sinkt ungleichmäßig ab, Frequenz steigt unkontinuierlich an

2.2.4 Toolamplitude und Übertragung auf Substrat

Ein Frühwarnsystem soll Veränderungen in den charakteristischen Materialeigenschaften frühzeitig erkennen. Vorausgesetzt, diese Änderungen sind gering und entwickeln sich graduell, bleibt die Qualität der erzeugten Bonds noch innerhalb der Spezifikation. Damit ist das Endresultat des Bondprozesses in Ordnung. Dennoch kann bereits zu diesem Zeitpunkt, falls dies für notwendig erachtet wird, mit Parameteranpassungen in den Bondprozess eingegriffen werden, um den Prozess wieder auf die gewünschten Parameter zu bringen. Ein typisches Beispiel für solche Veränderungen ist etwa eine langsame Verschlechterung der Bondbarkeit einer Oberfläche, wie sie durch Badveränderungen in der Galvanik hervorgerufen werden kann. Man begegnet ihr gezielt, indem man die Ultraschall-Leistung erhöht. Nicht ratsam ist nämlich, von vornherein mit höherer Ultraschall-Leistung zu arbeiten, um etwa die schlechtest bondbaren Oberflächen noch qualitätsgerecht zu bonden: dann

nämlich läuft man das Risiko, die besseren Oberflächen zu „überbenden“, wobei der Heel des Bonddrahtes geschädigt wird und dadurch seine Lebensdauer verkürzt wird.

Spätausfälle im Feld sind aber der schlimmste Fehlerfall, der im Drahtbenden vorkommt, weil ja keinerlei Gegenmaßnahmen ergriffen werden können und möglicherweise große Stückzahlen von Produkten betroffen sind. Rückrufaktionen bei Automobilherstellern sind drastisches Beispiel solcher Probleme.

Eine solche Prozess-Nachregelung ist beim Drahtbenden, das an sich ein robuster Prozess mit recht breiten Parameterkanälen ist, sehr gut einsetzbar. Man profitiert davon, dass der Prozess lange vor dem Erzeugen eines schlechten Produkts deutliche Parameterabweichungen aufweist. Lediglich bei einzelnen drastischen Ausreißern ohne vorausgehende erkennbare Anzeichen einer Parameteränderung wäre dieser Ansatz nicht zielführend. Solche Fälle sind glücklicherweise zum einen sehr selten, zum anderen ist dann auch meist das Bondresultat so sehr verschlechtert, dass der Bond unmittelbar nach dem Benden als schlecht auffällt und ausgesondert oder repariert werden kann. Auch hier ist also das Risiko der verkürzten Lebenszeit von Bonds (um das es im gesamten Projekt ja geht) gering.

Ein zentraler Indikator für die Konstanz des laufenden Bondprozesses und damit für die Qualität, also die Stärke des späteren Bonds ist, wie ebenfalls früher bereits diskutiert, die mechanische Schwingung an der Spitze des Bondwerkzeuges (Bondtools). Sie entwickelt sich über die Bondzeit hinweg in charakteristischer Weise und bleibt von Bond zu Bond reproduzierbar konstant. Ihre Verfolgung erlaubt auch eine zuverlässige Vorhersage der Qualität von erzeugten Bonds: wenn bei 1000 hergestellten Drahtbonds die Toolschwingung den gleichen Verlauf aufweist und eine Stichprobe von z.B. 3% dieser Bonds bei zerstörender Messung der Abrisskraft hinsichtlich Durchschnitt und Standardabweichung beweist, dass die Bonds qualitätsgerecht waren, dann kann man von einer gleich hohen Qualität auch der anderen 97% ausgehen.

Die Toolspitze schwingt je nach eingesetzter Bondfrequenz und Drahtstärke mit einer Amplitude von 0,3 bis etwa 2 μm . Nach einer kurzen Einschwingphase beginnt die Toolschwingung von einem Maximum aus langsam abzusinken, was mit der Bildung des Bonds einhergeht und die Dämpfung widerspiegelt, die von der zunehmenden Verbindungsfläche zwischen Draht und Unterlage der Bewegung von Tool und der synchron mitgenommenen Draht-Oberseite erfahren wird. Als Illustration dieses zeitlichen Verhaltens lässt sich in Abb. 14 sehr deutlich verfolgen, dass bei einer Messung per Laservibrometer, die nicht an der

Toolspitze erfolgt, sondern unmittelbar unter der Bondebene an der Kante des Chips, der Chip durch den entstandenen Bond zum Mitschwingen gezwungen wird. Dieses Mitschwingen baut sich über die Zeit synchron auf und beträgt in der Endphase, je nach den geometrischen Gegebenheiten der Bondstelle, bis etwa zur Hälfte der Amplitude an der Drahtoberseite.

Das Mitschwingen der Chipkante lässt sich, betrachtet man seinen zeitlichen Verlauf, folglich sehr gut als Indiz für das Entstehen der Bondverbindung verwenden, mithin als Qualitätsindikator. Dem entgegen steht natürlich der enorme apparative Aufwand, die Schwingung per Laservibrometer zu verfolgen, und damit ist dieser Ansatz in der Fertigung nicht einsetzbar.

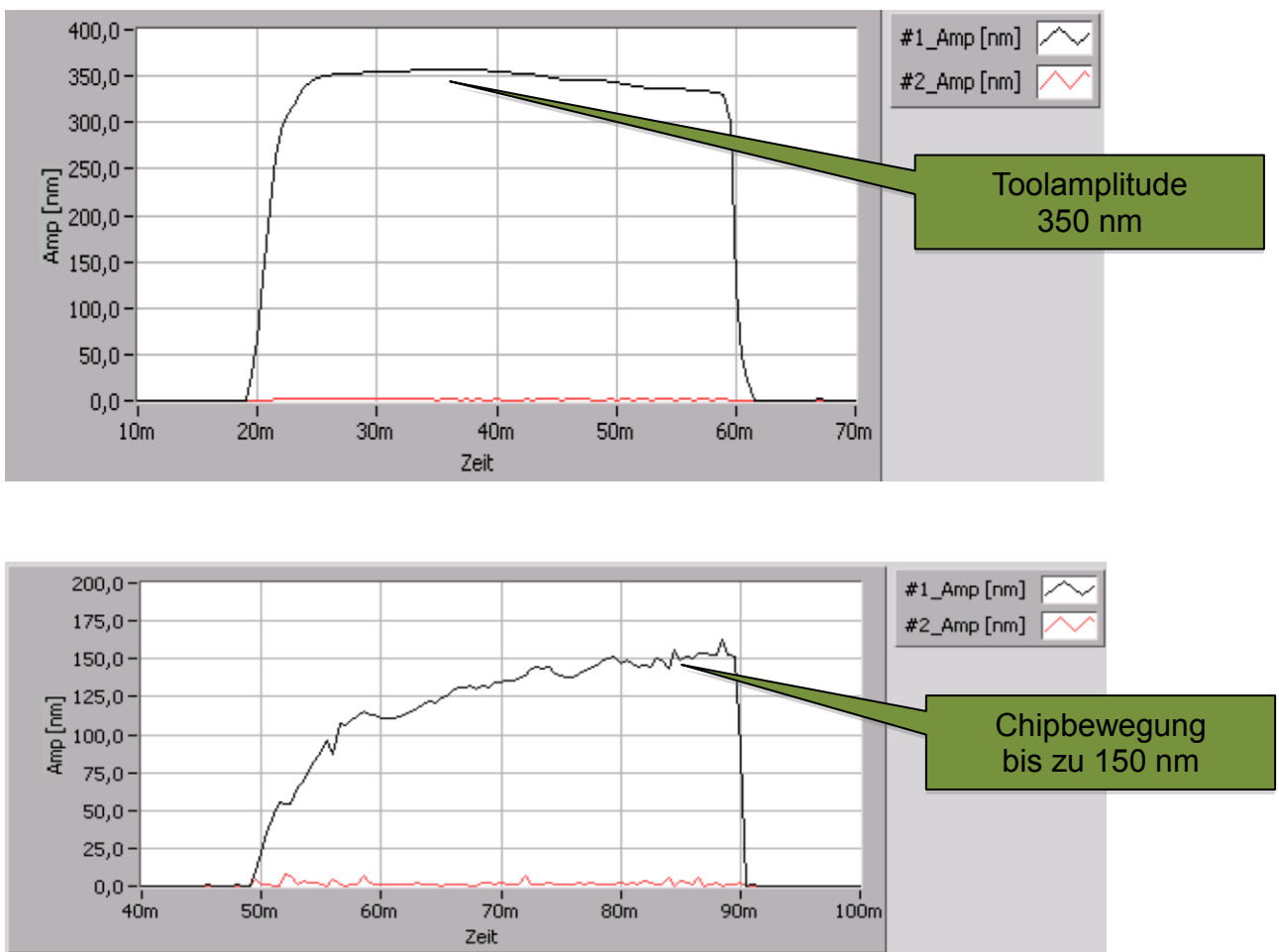


Abb. 14: Amplitude der Schwingungen von Bondwerkzeug und Chipkante

2.2.5 Toolabriss und Diagnostik

Im Rahmen der Projektuntersuchungen konnten diese Mechanismen und ihr diagnostischer Nutzen sehr anschaulich demonstriert werden. Unter bestimmten grenzwertigen Parameterkombinationen traten bei den Ultraschall-Daten ungewöhnliche Stromverläufe auf, wie in Abb. 15 beispielhaft gezeigt: nach dem erwarteten anfänglichen Strompeak, der die maximale Schwingung des Tools nach dem Einschalten des Ultraschalls anzeigt, nimmt der Strom (und damit die Schwingung) mit zunehmender Dämpfung durch den entstehenden Bond erwartungsgemäß ab. Nach etwa 15 ... 16 ms jedoch trat im gezeigten Beispiel ein kurzer Zwischenpeak auf, bevor der Strom wieder weiter abnahm und dann bis zum Ende der Bondzeit von 35 ms allmählich konstant verlief. Weil die Spannung am Transducer in der gewählten Betriebsweise konstant ist, bedeutet dieser Strom-Zwischenpeak eine kurzzeitig niedrigere Impedanz des Transducers, mithin ein klares Anzeichen für eine vorübergehend schwächere Dämpfung der Toolbewegung.

Der unerwartete Zwischenpeak im Strom findet seine Entsprechung in der Frequenz, die zunächst wie erwartet mit wachsender Bondbildung und zunehmender Schwingungsdämpfung ansteigt, aber dann zur gleichen Zeit wie der Strom kurzzeitig den entgegengesetzten Verlauf einschlägt und absinkt, bevor sie wieder leicht ansteigt.

Beide Anzeichen lassen vermuten, dass die Toolschwingung durch den entstehenden Bond nicht kontinuierlich stärker gedämpft wurde, sondern zu einem kurzen Zeitpunkt bei etwa 15 ms ungedämpft (oder schwächer gedämpft) verlief. Die Vermutung lag nahe, dass das Tool in diesem Zeitpunkt die Haftung auf der Drahtoberseite verlor und dadurch über den Draht rieb, anstatt den Draht mitzunehmen und zu verformen, wie dies bei der Herausbildung des Bonds ablaufen soll.

Ein solches Abreißen der Toolhaftung ist wohlbekannt für drastischere Fälle, wo also das Tool die Haftung zum Draht völlig verliert und nur mehr über die Drahtoberfläche reibt. Diese Bewegung führt typischerweise zu sogenannten „verbrannten“ Bonds mit dunkler bis schwarzer Oberfläche, welche vermutlich auch von lokaler Erhitzung mit unspezifischer Oxidation stammt. Das Hauptrisiko für die Bondqualität wird hier darin gesehen, dass der Ultraschalleintrag in den Bond und damit die Ausbildung der Bondgrenzschicht in unkontrolliertem Maß geschwächt werden. Außerdem besteht die zusätzliche Gefahr, dass

die unkontrollierte Toolbewegung auf der Drahtfläche bei relativ großer, da schwach gedämpfter Amplitude den Bond oder auch den Chip darunter schädigt und späteren Ausfall provoziert. Muschelausbrüche (das so genannte „Cratering“) unter dem Bondpad sind typische Ausfallmuster für Spätschäden, die u.a. solchen Einflüssen zugeschrieben werden.

Genau dieses Verhalten der zeitweise verringerten Toolhaftung ließ sich in diesem Fall auch am Laservibrometer zeigen: exakt zum Zeitpunkt des kleinen Strompeaks bricht auch das Mitschwingen des Bondpads ein, das vorher kontinuierlich und mit dem erwarteten Nachlauf der Toolbewegung gefolgt war. Nach diesem kurzen Einbruch wächst das Mitschwingen dann wieder, im Gleichklang mit dem Stromverlauf, auf den erwarteten Wert an, bevor es mit dem Abschalten der Ultraschall-Anregung erwartungsgemäß verschwindet. Dieser Ablauf ist in Abb. 16 durch eine Überlagerung der Laservibrometer-Messung (schwarze Kurve) mit der Stromkurve (rot) dargestellt. Die Amplitude des Mitschwingens beträgt bis zu 105 nm und liegt damit genau im erwarteten Bereich von etwa 30-50% der Amplitude an der Toolspitze.

Dieses Resultat ist in unserer Einschätzung außerordentlich bedeutsam. Es zeigt nämlich eindrücklich, dass das Schwingungsverhalten nicht nur des Bondwerkzeugs, sondern des gesamten Bond-Schichtaufbaus allein durch die mitprotokollierten Daten aus dem Ultraschall-Generator charakterisiert werden kann. Wir sind also in der Lage, nicht nur die Eingangsgrößen (z.B. Ultraschall-Leistung) des Transducers, sondern auch die davon hervorgerufenen Auswirkungen zu verfolgen, nämlich die Mitbewegung des Bondssubstrates unter dem Bonddraht. Das ist ein ausgezeichnetes und völlig neuartiges Diagnostikum für den Verlauf des Bondprozesses, und damit auch für die Qualität der Bondresultate. Besonders wertvoll für die praktische Umsetzung ist, dass diese Daten ohne Zeitverlust anfallen und komplett in einer Datenbank gespeichert werden, so dass sie für spätere statistische Auswertungen immer zur Verfügung stehen, wie auch für Traceability-Zwecke.

Es soll auch hier noch eigens angemerkt werden, dass der gezeigte kurze Ausbruch der Toolbewegung keineswegs einen mangelhaften Drahtbond produziert hat, der durch klassische (wenn auch zerstörende) Testverfahren sichtbar gewesen wäre. Beim zerstörenden Nachmessen der gebildeten Bonds zeigte sich ein Reißwert, der durchaus im Rahmen der zulässigen und gefundenen Werte lag. Das erwünschte Frühwarnsystem ist hier somit dargestellt, und eine patentmäßige Verwertung der erforschten Funktionen wird derzeit geprüft.

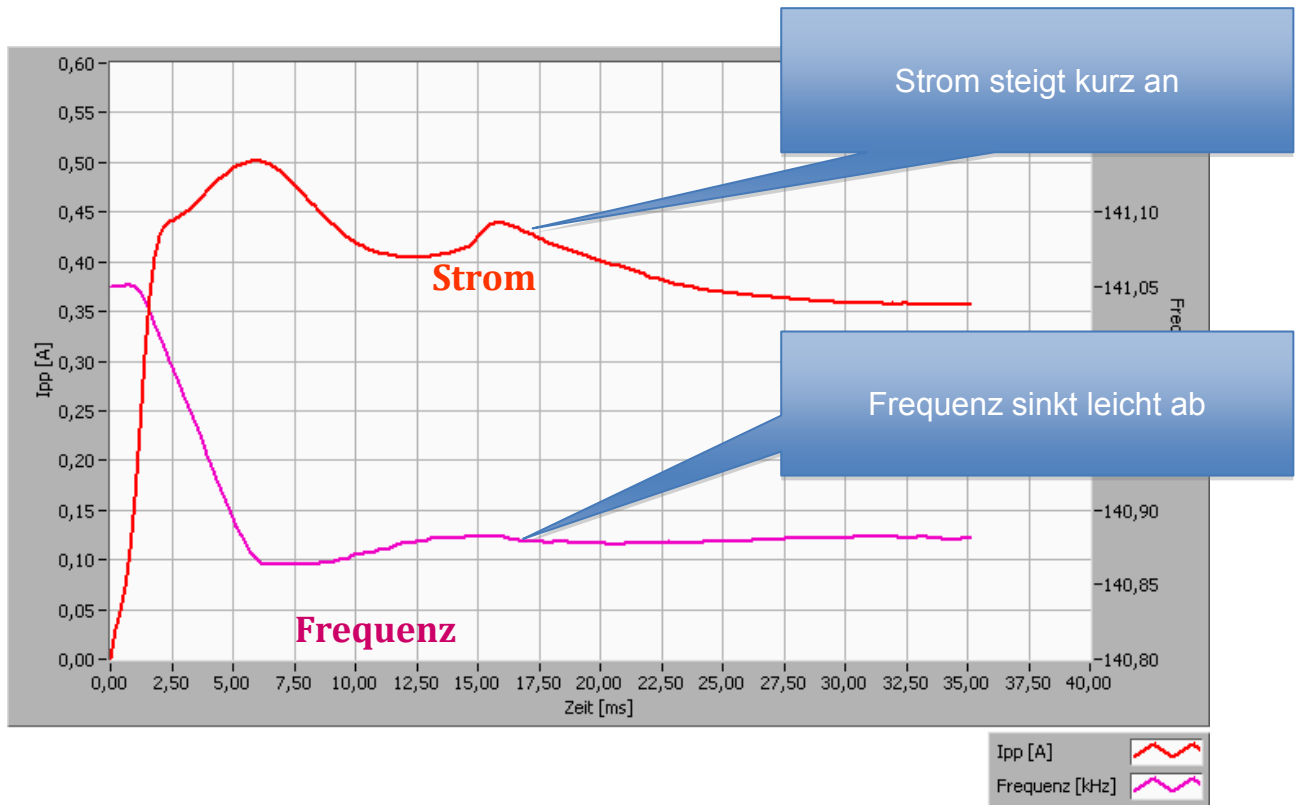


Abb. 15: Verlauf der Strom- und Frequenzkurve mit zeitweisem Verlust der Toolhaftung

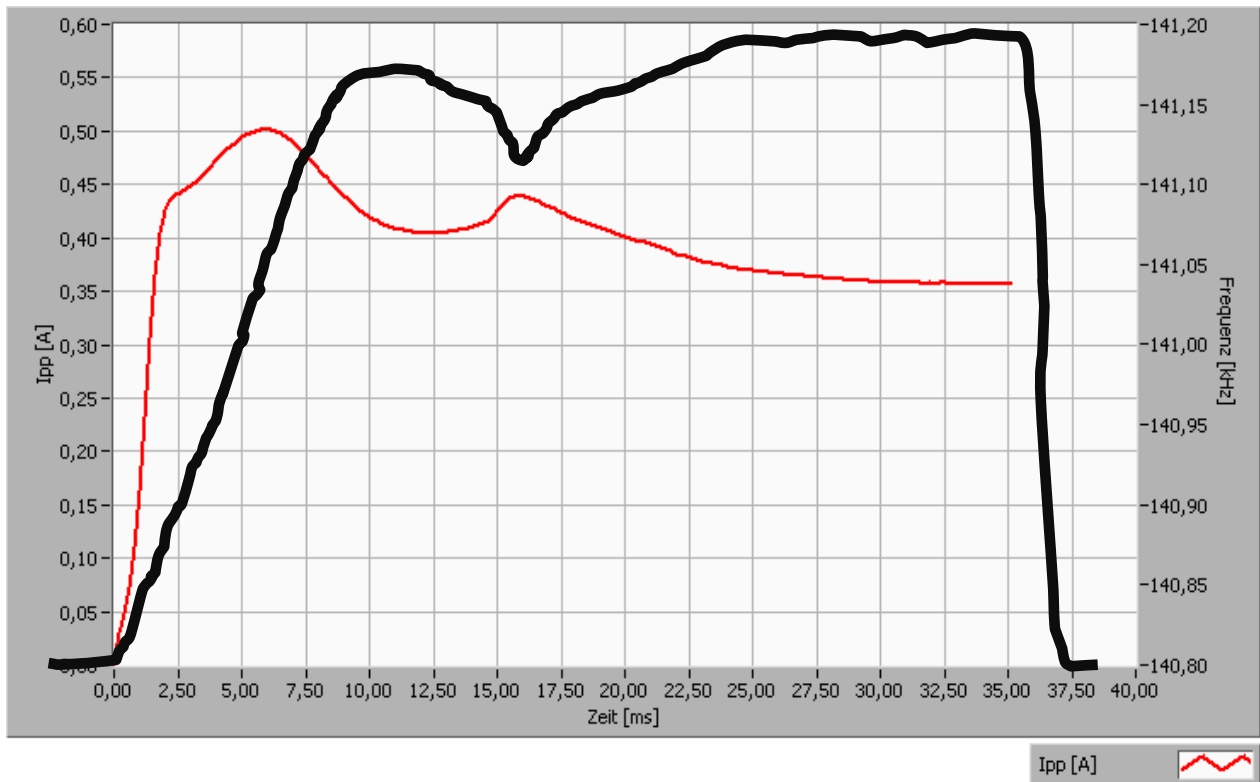


Abb. 16: übereinandergelegte Verläufe von Mitschwingen des Bondpads (schwarz) und Transducerstrom (rot)

2.3. Resonanzen innerhalb der Fügepartner

Im Verlauf des gesamten Projektes zeigte sich immer wieder und an den unterschiedlichsten Anwendungen, dass parasitäre Schwingungen, also das Mitschwingen eines oder mehrerer Fügepartner ein Problem darstellt, das häufiger und schwerwiegender ausfällt als üblicherweise wahrgenommen wird. Zwei Fallgruppen müssen dabei grundsätzlich unterschieden werden:

- Das Mitschwingen von Substratelementen, z.B. Gehäusepins, Stifte oder Kontaktzungen, sowohl auf einer Resonanzschwingung mit einer oder mehreren bestimmten Frequenz(en) als auch als passives Mitschwingen bei jeder anregenden Frequenz

- Unerwünschte Schwingungen des Bonddrahtes selbst, ausgelöst durch das Bonden oder durch andere Vorgänge

Gerade weil die Prozessdaten, die aus dem Ultraschallgenerator und dem Bondsystem verfügbar sind, eine so feinfühligere Diagnose von Mitschwingproblemen erlauben, wie in den vorigen Abschnitten dargestellt wurde, lag eine vertiefte Untersuchung des Phänomens nahe. Dabei werden im folgenden Ergebnisse sowohl aus Dünndraht- wie aus Dickdraht-aufbauten diskutiert.

2.3.1. Mitschwingen von Substratelementen

Eine einfache und einleuchtende Situation liegt bei Gehäusepins oder Kontaktstiften vor, wie sie z.B. in TO-46-Gehäusen eingesetzt werden. Solche Pins bestehen aus Kupfer, Kupferlegierungen oder Kovar, gelegentlich auch aus Stahl; üblicherweise weisen sie Abmessungen von etwa 0,5 mm Dicke und 5 mm freier Länge auf. In Abb. 17 ist das Schwingungsbild gezeigt mit Grundschwingung sowie einem und zwei Schwingungsknoten. Die Grundschwingung selbst liegt, wie in Tab. 1 abzulesen, weit außerhalb der Ultraschallfrequenz beim Bonden, aber der erste Oberton (wegen der nur einseitigen Einspannung nicht doppelt so hoch wie die Grundfrequenz, sondern weit höher) liegt genau im Bereich einer möglichen Ultraschallfrequenz von 140 kHz.

Das Mitschwingen solcher Gehäusepins ist in der Praxis nicht unbekannt, wird aber erstaunlich selten experimentell ausgemessen, auch hinsichtlich der Änderungen in der Frequenz, die durch Fertigungstoleranzen an den Pins verursacht werden. Die einzig mögliche Abhilfe liegt natürlich in einer veränderten Ultraschallfrequenz, was bei vielen Sondermodellen durch Tausch des Transducers und Umstellung des Generators mit vertretbarem Aufwand machbar ist.

$$\omega^2 = \frac{\lambda^4}{L^4} * \frac{EI_y}{\rho A}$$

- ω : Kreisfrequenz
- λ : Wellenzahl
- E: E-Modul
- ρ : Dichte
- I_y : Trägheitsmoment
- L, A: Länge, Querschnitt

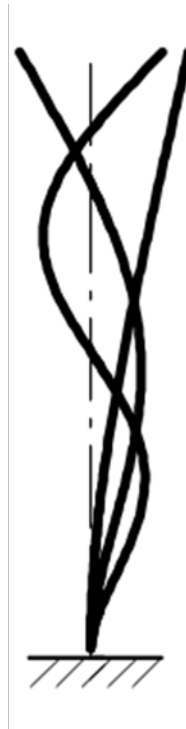


Abb. 17: Schwingungsmodi eines einseitig eingespannten Kontaktstiftes

| Kovar-Pin | 4 mm lang, 0,6 mm Durchmesser |
|------------------|--------------------------------------|
| Grundschiwingung | 22.890 Hz |
| 1. Oberton | 143.461 Hz |
| 2. Oberton | 401.734 Hz |

Tab. 1: Eigenfrequenzen eines einseitig eingespannten Pins

Bei Dickdrahtanwendungen liegen die Verhältnisse komplizierter. Hier wird selten auf freistehende Kontaktstifte gebondet, sondern meist auf Kontaktzungen, die an Stanzgittern gebildet werden. Sie sind manchmal freitragend, meist aber mit dem Gehäusekunststoff unterspritzt. Die freitragenden Varianten sind erwartungsgemäß dem Mitschwingen

unterworfen; dies kann in der Praxis ein großes Problem darstellen, obwohl aufgrund der Bauteilgeometrie die Schwingung in der Z-Richtung liegt, also quer zur Ultraschallschwingung und nicht in der gleichen Ebene. Die nachgebende Substratoberfläche verändert die resultierende Bondkraft und damit die Reibung zwischen Draht und Kontaktfläche. Das Problem ist aber gut bekannt; üblicherweise begegnet man ihm durch Unterstützung der Kontaktzungen mit Unterfüllung oder Unterspritzen mit dem Gehäusematerial, was das Problem manchmal aber nur verlagert, wie weiter unten ausgeführt wird.

Schwieriger sind Bauteile mit langen und schmalen Kontaktzungen: hier sind nur Bonds in Längsrichtung problemfrei herzustellen. Bonden quer oder schräg zur Zungenrichtung dagegen macht häufig Schwierigkeiten durch Mitschwingen. Eine typische Geometrie mit Kontaktzungen aus Aluminium von 6 mm Länge, 2,5 mm Breite und 1 mm Dicke etwa hat eine unterste Eigenfrequenz von 57,11 kHz und liegt damit genau an einer typischen Bondfrequenz für Dickdrahtbonder.

Noch schwieriger liegen die Umstände aber bei unterspritzten Kontaktzungen, die eigentlich durch den Kunststoff fest abgestützt und daher perfekt bondbar sein sollten. Das Unterfließen des Kunststoffes beim Spritzgießen hängt nämlich von einer Reihe von Parametern ab – zunächst natürlich von der Viskosität des Materials an sich, die chargenabhängig sein kann, dann aber auch von geometrischen Verhältnissen, die aus der Bauteilform resultieren. In der Praxis ist sehr wohl bekannt, dass bestimmte einzelne Kontaktzungen häufiger als andere dazu neigen, unvollständig oder gar nicht unterspritzt zu sein, etwa solche, die enger in Ecken des Gehäuses liegen. Eine optische Eingangsprüfung der Bauteile zeigt nur extreme Spritzgußmängel auf, nicht aber Lunker, Fehlstellen oder Teilunterspritzungen, die aber auch zu schlechter Unterstützung der Kontaktzunge und daher zu Bondproblemen führen können. Die im vorigen Abschnitt geschilderte Diagnostik eines Toolabrisses bietet hier gute Chancen darauf, solche problematischen Bonds schon während des Prozesses zu detektieren. Ein zweiter Ansatz ist, mit Hilfe von automatisierten zerstörungsfreien Schertests gezielt die anfälligeren Bondstellen nach dem Bonden zu überprüfen, wie im folgenden Abschnitt näher ausgeführt. Beide Ansätze werden von uns auch nach Projektende noch weiter verfolgt.

2.3.2. Mitschwingen von Bonddrähten

Auch der Bonddraht selbst kann während des Bondens oder nachher mitschwingen und dadurch den Bond schwächen. Dieses Verhalten ist in der Praxis bekannt, aber wenig diskutiert und näher untersucht.

An einem typischen Bauteil aus der Automobil-Elektronik wurde das Schwingverhalten eines Aluminium-Dickdrahts mit Hilfe des Laservibrometers untersucht. Das Bauteil ist in Abb. 18 gezeigt; es enthält 8 Drähte von 250 µm Stärke, welche die Kontaktzungen aus dem umspritzten Gehäuse mit Kontaktblöcken auf der Keramikschaltung verbinden. Im Feld traten gelegentliche Ausfälle dieses Bauteils auf, die auf Drahtbrüche zurückgingen, wobei aber unmittelbar nach dem Bonden keine auffälligen Testresultate der Bonds beobachtet wurden. Die Ausfälle wurden weit überwiegend durch Heelrisse verursacht, woraufhin die Bauteile gezielt auch mit Pulltests geprüft wurden, nicht nur mit den sonst üblichen Schertests, die ja nur die Qualität der Bondstelle selbst erfassen, nicht aber etwaige Schädigungen entlang des Bonddrahts. Auch die Pulltests waren unmittelbar nach dem Bonden ohne Beanstandung.

Dieses Fehlerbild lässt die Vermutung zu, dass die Drahtbonds erst einige Zeit nach dem Bonden geschädigt werden, also bei späteren Verarbeitungsschritten oder sogar erst im Feldeinsatz. Dazu wurden einige Versuchsserien angelegt, um das Mitschwingen und eventuelle Resonanzphänomene der Drahtbonds zu ermitteln. Die erste Gruppe von Versuchen fokussierte auf Querschwingungen des Bonddrahts; dazu wurde das Laservibrometer in die Nähe des Scheitelpunktes eines Bonddrahtes gerichtet und unter einem relativ flachen Winkel von unter 30° gehalten, so dass primär seitliche Schwingungen des Bonddrahts erfasst wurden. Von Interesse ist hier auch, dass sowohl unvergossene Bauteile untersucht wurden wie auch solche, bei denen die Bonddrähte mit weichem Silikonkautschuk eingegossen wurden. Der Silikonverguss ist so weich, dass Drahtschwingungen nicht komplett verhindert, sondern nur leicht gedämpft werden.

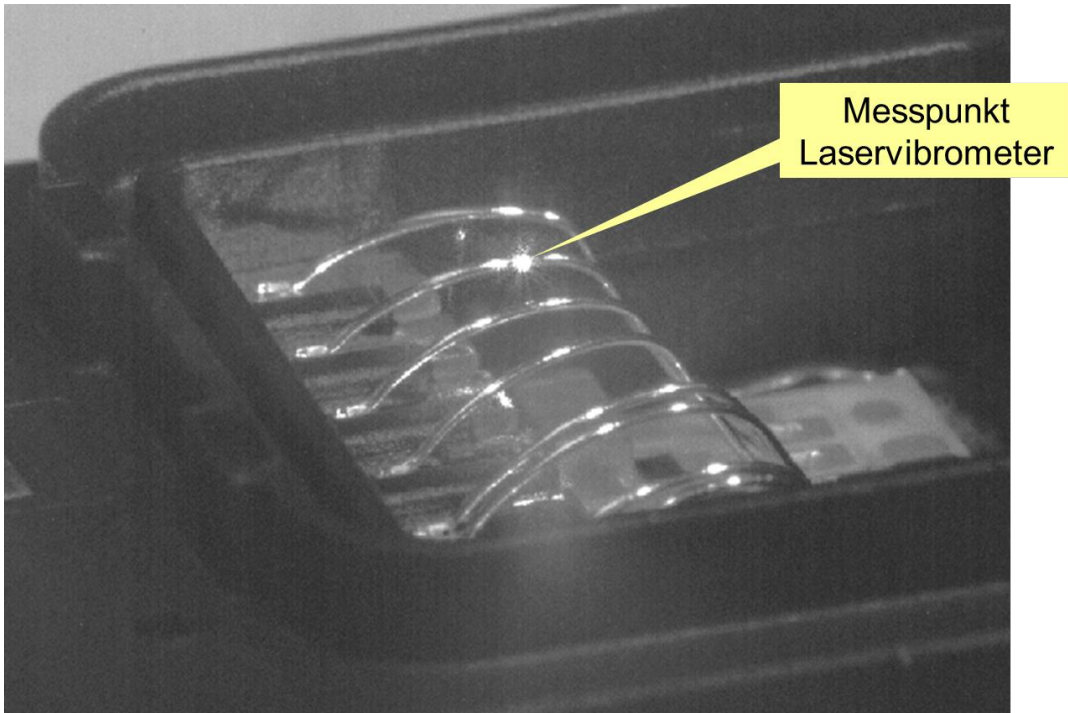


Abb. 18: Bauteil mit Dickdrahtbrücken und Messpunkt

2.3.2.1 Querschwingungen

Die Anregung der Schwingungen im Bonddraht ist ohne Zuhilfenahme eines externen Rüttelgerätes mit einstellbarer Vibrationsfrequenz, welches uns nicht zur Verfügung stand, nicht ganz trivial. Nach einigen Versuchen stellten sich jedoch zwei recht einfache, aber wirkungsvolle Wege hierzu heraus. Der eine Ansatz ist, den Bonddraht mit einem kurzen Druckluftstoß berührungslos anzuregen, das Nachschwingen mit dem Laservibrometer aufzuzeichnen und anschließend hinsichtlich der Frequenzkomponenten zu analysieren. Der zweite Ansatz nutzt den Bonder selbst zur Anregung, indem der Bondkopf mit einem kurzen Drahtrest, der aus dem Bondwerkzeug hervorsticht, knapp über dem Loop quer über die Drahtbrücke fährt. Der kurze Drahtrest reißt dann die Drahtbrücke leicht an und versetzt sie in Schwingungen, ähnlich wie der Federkiel in einem Cembalo die Saite anreißt. Diese „zirpende“ Bewegung ist programmierbar und damit definiert wiederholbar. Beide Verfahren liefern vergleichbare, beispielhaft in den Abb. 19 und 20 gezeigte Ergebnisse. Im Gegensatz zu den Frequenzdaten sind allerdings die Schwingungsamplituden nicht sehr aussagekräftig, weil die Anregung durch Anblasen oder auch Zirpen nur bedingt reproduzierbar ist. Ein halbquantitatives Bild liefern die Daten dennoch.

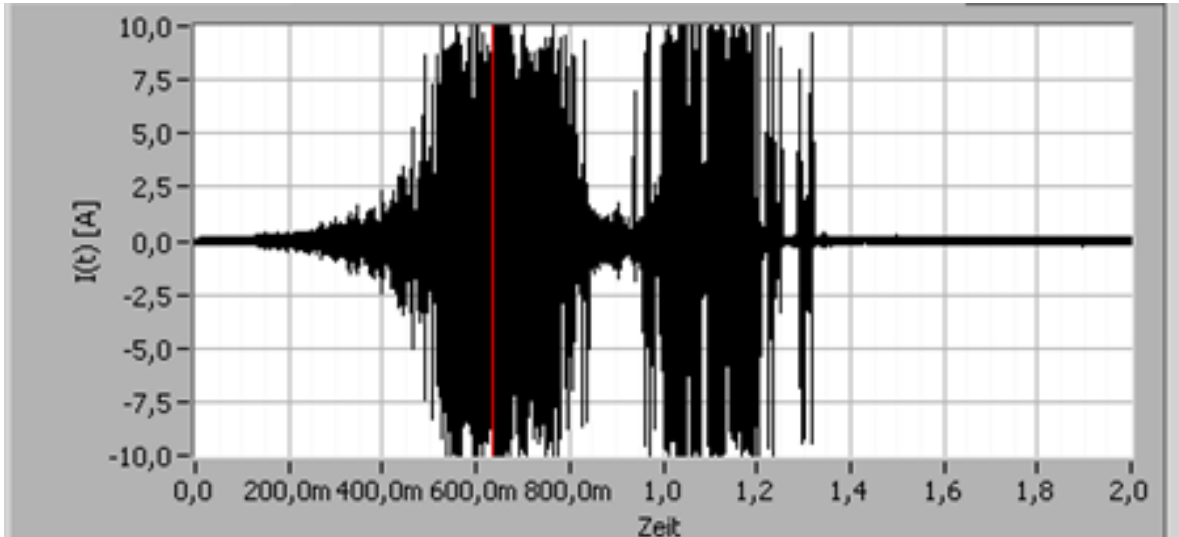


Abb. 19: Originalsignal des Laservibrometers

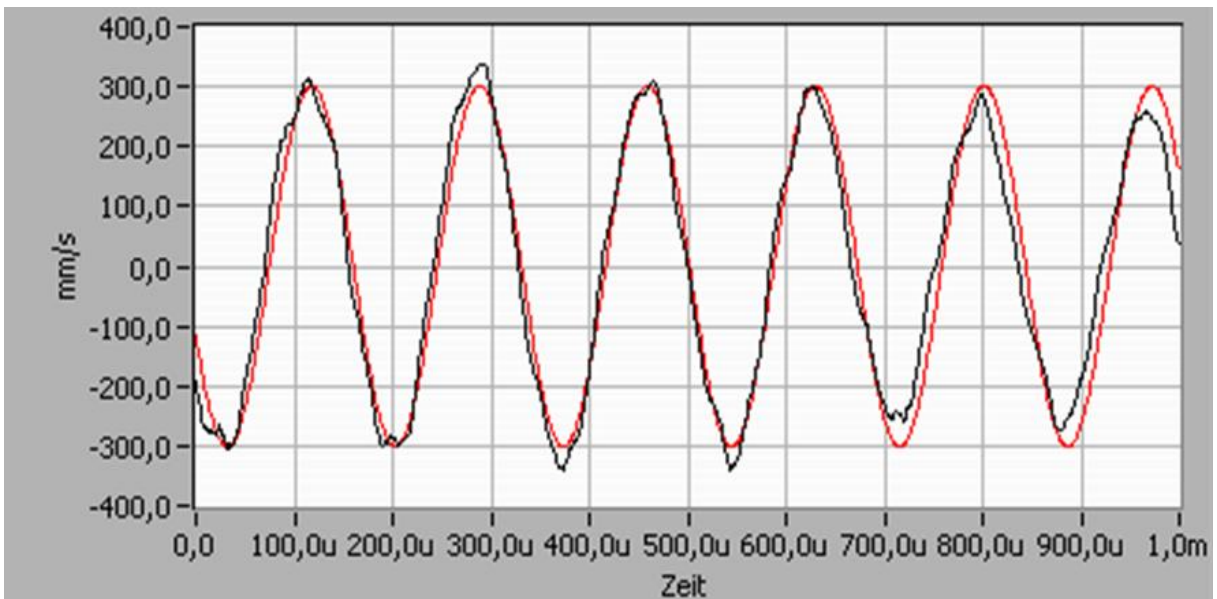


Abb. 20: Ermittelte Drahtschwingung (schwarz) und Kurvenanpassung (rot)

Die Roh-Messwerte werden vom Laservibrometer, wie in Abb. 19 erfasst, als Geschwindigkeitsdaten ausgegeben (Abb. 20) und zeigen eine Resonanzschwingung mit einer Eigenfrequenz von etwa 5,85 kHz. Erläuternd muss hier noch angegeben werden, dass die schwarze Kurve die vom Vibrometer gemessene Schwingung darstellt und die rote Kurve

eine bestmögliche Kurvenanpassung mit (zunächst) einer einzelnen Sinusschwingung, hier eben von 5,85 kHz. Nach der Umrechnung in Ortskoordinaten ergibt sich eine Schwingungsamplitude von 8,2 µm. Damit liegt die Eigenfrequenz weit unterhalb der Bondfrequenz, aber oberhalb der üblichen mechanischen Schwingungen im Bereich des Verbrennungsmotors (bis etwa 1,3 kHz) und dürfte für die Bondschädigungen kaum verantwortlich sein. Auch die geringe Amplitude von etwa 3 bis 4% des Drahtdurchmessers und relativ weit von der Bondstelle selbst entfernt spricht nicht für eine starke Belastung des Bondheels durch die Querschwingung.

Wie bereits erwähnt, wurden Bauteile mit und ohne Einbettung in Weichsilikon ausgemessen, ohne dass nennenswerte Unterschiede zu beobachten waren. Die Resonanzfrequenz schwankt lediglich im Bereich von 5 bis 7 kHz, wobei die nicht vergossenen Bauteile tendenziell etwas niedrigere Frequenzen aufweisen. Dies steht im Einklang mit unseren Erwartungen.

Auch andere Drahtstärken oder Looplängen änderten das Bild nicht wesentlich: kürzere Loops mit 75 µm Draht wiesen Schwingungen bei 7 bis 15 kHz auf, solche mit 150 µm Draht im Bereich von 30 bis 34 kHz. In Summe schließen wir daher, dass Querschwingungen bei allgemein üblichen Geometrien (will hauptsächlich sagen: üblichen Drahtbondlängen) typischerweise

- unterhalb der Bondfrequenz liegen
- Amplituden bis zu etwa 10 µm aufweisen
- und erst bei kürzeren und/oder dickeren Drähten in den riskanteren Bereich der Bondfrequenz kommen.

Wichtiger ist hier wohl der Einfluss von nachgelagerten Fügeverfahren, z.B. das Aufbringen von Gehäusedeckeln mit Ultraschallschweißen. Solche Prozesse laufen standardmäßig bei 25 kHz Ultraschallfrequenz ab; bei ihrem Einsatz muss also ein Schädigungsrisiko der Bonddrähte geprüft werden. Dies gilt besonders bei dünneren Drähten mit per se schwächeren Heels, oder auch bei steileren Loopformen mit größerer Beanspruchung des Drahtheels während des Bondvorgangs.

2.3.2.2 Längsschwingungen

Eine andere Vermutung zielte auf den Einfluss von Längsschwingungen in der Drahtbrücke. Solche Schwingungen, wie in Abb. 21 skizziert, können in einer Vielzahl von Schwingungsmoden ablaufen, wobei die Grundschiwingung, also ohne Schwingungsknoten und mit einem einzelnen Schwingungsbauch, in der bogenförmigen Drahtbrücke nicht zu erwarten ist. Vielmehr sind Schwingungen ab dem ersten Oberton, also mit einem Knoten in der Drahtmitte, und höhere Moden zu erwarten.

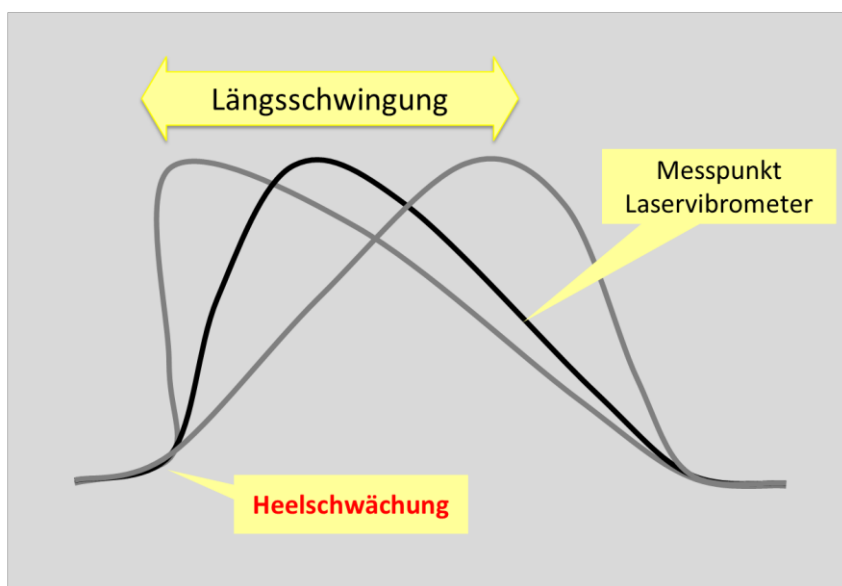


Abb. 21: Schematische Darstellung von Längsschwingungen in der Drahtbrücke

Die Gefahr solcher Schwingungen ist, dass der Bondheel, der ohnehin die schwächste Stelle des gesamten Drahtbonds darstellt, besonders stark in einer scharnierartigen Bewegung beansprucht wird. Dabei reichen auch geringere Amplituden als bei der Querschwingung zu einer deutlichen Schädigung aus, weil über die Drahtlänge hinweg wenig Schwingungsenergie abgebaut wird. Im Gegenteil ist die Knickbewegung am Heel sehr ausgeprägt.

Um solche Schwingungen zu erfassen, muss der Messpunkt des Vibrometers, wie leicht einzusehen ist, nicht am Scheitel des Bonddrahtes liegen, sondern möglichst nah an einer steilen Flanke, damit eine Vor- und Rückwärtsbewegung möglichst gut erfasst wird. Abb. 22 zeigt die gewählte Messposition am Beispiel der schon vorher betrachteten Bauteile.

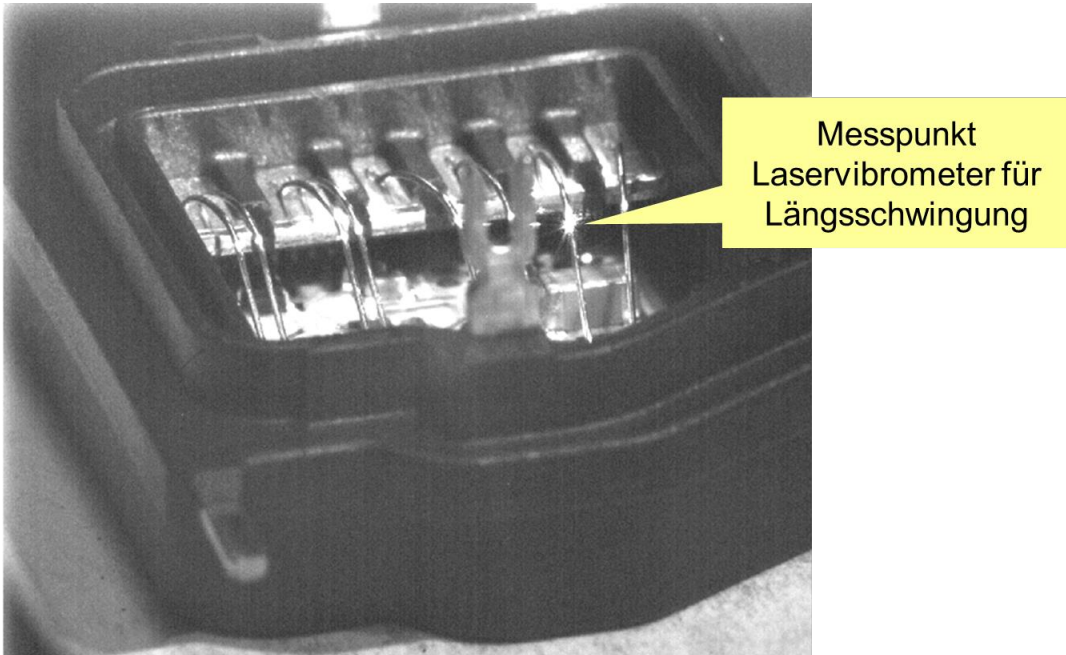


Abb. 22: Messpunkt Laservibrometer für Längsschwingung

Typische Messresultate sind in Abb. 23 dargestellt, wo zunächst die höhere Frequenz der Drahtschwingung von 16,1 kHz auffällt und außerdem die geringere Amplitude von nur etwa 0,2 μm . Auch hier zeigt die schwarze Kurve wieder die Originalmessdaten, die rote Kurve die bestmögliche Anpassung einer Sinusschwingung.

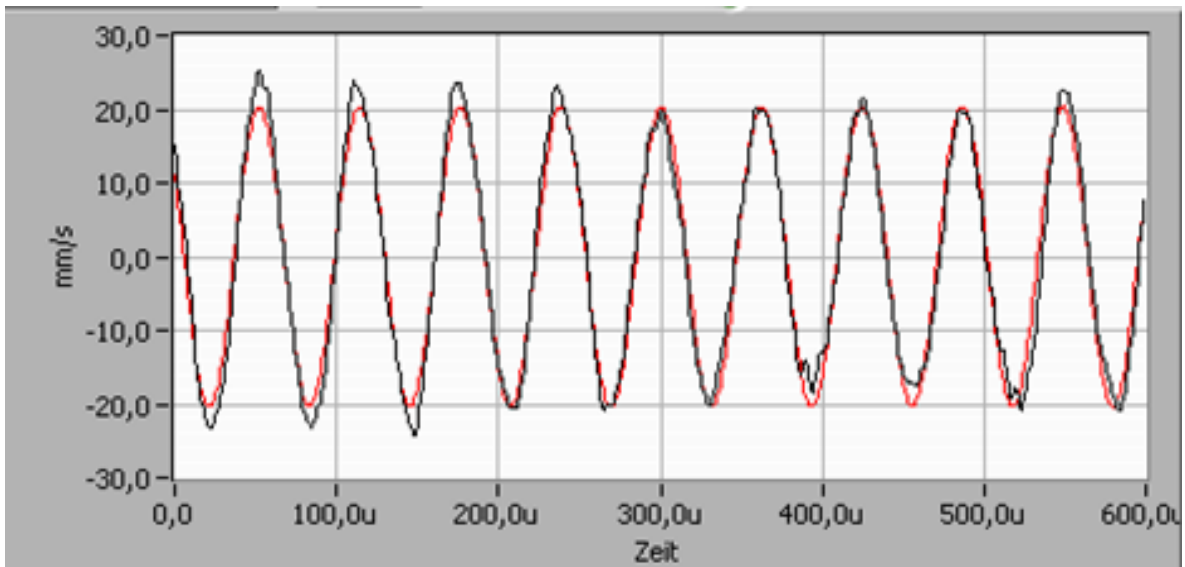


Abb. 23: Längsschwingung 3, Grundfrequenz

Im Gegensatz zu den Oberschwingungen eines einseitig eingespannten Kontaktstiftes, wie oben beschrieben, ist bei den Längsschwingungen des Bonddrahtes der erste Oberton bei der doppelten Frequenz, nämlich 32 kHz zu erkennen (Abb. 24). Die Amplitude liegt mit 0,03 μm allerdings weit tiefer; erkennbar sind auch noch weitere Schwingungseinflüsse, die aber nicht näher analysiert werden konnten.

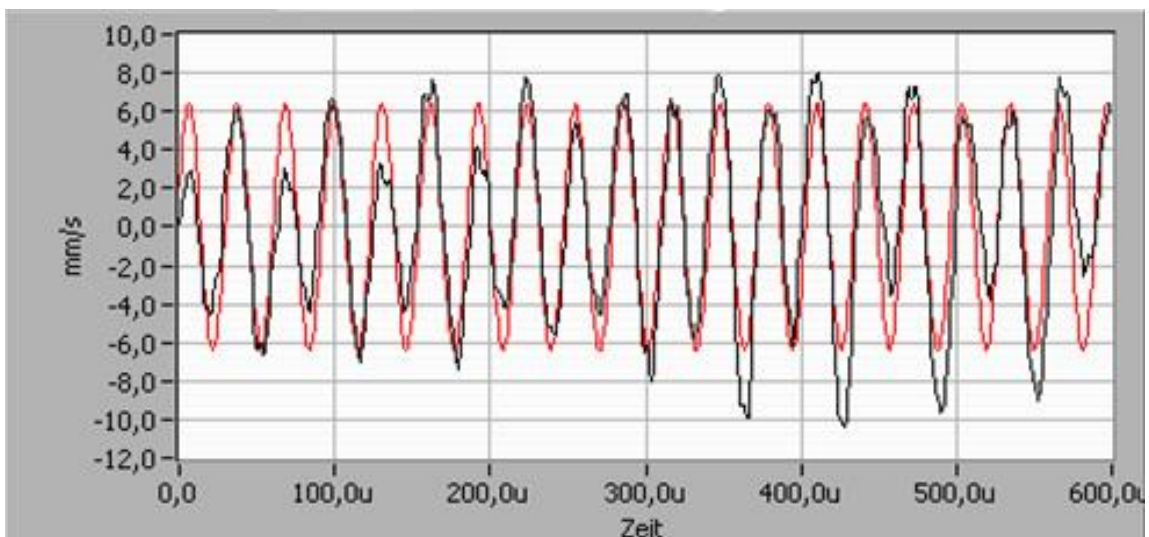


Abb. 24: Längsschwingung, erster Oberton

Messungen an einer Reihe von gleichen Bauteilen mit und ohne Verkapselung durch Weichsilikon zeigten das gleiche Bild wie bei den Querschwingungen, nämlich eine geringe Variation der Resonanzfrequenzen und ähnliche Amplituden. Bei anderen Bauteilen und anderen Drahtstärken trat aber ein breites Spektrum von Resonanzfrequenzen auf, z.B. 54 kHz bei einem 150 µm Draht, die durchaus mit üblichen Bondfrequenzen von z.B. 57 kHz zusammenfallen können. Dies bringt dann mehrere Gefahren mit sich: nicht nur der aktuell gebondete Draht kann bei der Herstellung des zweiten Bonds geschädigt werden, sondern auch alle anderen bereits gebondeten Drähte, sofern sie diese Eigenresonanz aufweisen. Bei Bauteilen mit vielen dicht benachbarten Drähten kann das ein nennenswertes Ausbeuterisiko ergeben, das aber bereits im Fertigungsprozess erkennbar wäre und näher untersucht würde. Tückischer sind Fälle, wo Bonds nur vorgeschädigt werden und dann im Feld ausfallen.

Die Schädigung von Drahtbonds durch später gemachte Bonds ist nicht völlig unbekannt. Powers und Kollegen bei Raytheon, Waltham, USA, berichten in einem Laborbericht von 2010 („Brittle Cracks induced in AISI Wire by US Bonding Process“, Ron Powers, Ray Fitzsimmons, Ken Rispoli; Failure Analysis Findings From the Lab) von Schädigungen eines ersten Drahtbonds bei Dünndraht AISI1 durch eine Schwingung in der Drahtbrücke, die von der Ultraschalleinwirkung während des zweiten Bonds verursacht wurde. Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, die eine große Schwingungsamplitude vom zehnfachen Drahtdurchmesser zeigen sollen, wurden zwar nicht dokumentiert. Wir haben aber ähnliche Versuche nach Abschluss des RoBE-Projektes unternommen und ein ähnliches Verhalten festgestellt, wobei die Drahtbrückenschwingung stark längenabhängig war und ein typisches Resonanzverhalten aufwies. Weitere Untersuchungen hierzu sind in Arbeit und werden laufend publiziert.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass parasitäre Schwingungen in der Drahtbrücke ein großes Zuverlässigkeitsproblem darstellen können und allgemein unterschätzt werden. Ihre besondere Tücke liegt darin, dass sie über einen sehr weiten Frequenzbereich auftreten können und die Schädigung des Drahtbonds während des Bondens oder bei der Qualitätskontrolle unmittelbar danach nicht notwendig auffällt. Weitere Fertigungsschritte oder Belastungen im Feld führen dann aber zu Ausfällen, die zunächst unerklärlich scheinen.

2.4. Charakterisierungsverfahren und ihre Verbesserung

Die Qualität von Dickdrahtbonds wird heute immer noch überwiegend durch visuelle Inspektion, Schertests und in geringerem Umfang durch Pulltests beurteilt. Nachdem für die Durchführung von Schertests noch kein allgemein akzeptierter Standard besteht, sind Daten aus unterschiedlichen Fertigungen nur sehr bedingt vergleichbar. Ebenso besteht kein Konsens darüber, wie stark Messresultate von den verwendeten Messparametern abhängen (zu nennen sind hier Scherhöhe, Schergeschwindigkeit, Meißelgeometrie und andere). Dies ist besonders im Hinblick auf höchste Bondqualität und –lebensdauer ein misslicher Zustand.

Hierzu wurden einige Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wurde ein Standard-Dickdraht aus Aluminium von 200 µm Stärke auf mit Nickel beschichtete Aluminium-Bleche gebondet. Die Bonds wurden mit gleichen Bondparametern in der Walzrichtung (also in Richtung der Riefen) und quer zur Walzrichtung mit einem Standard-Werkzeug von 520 µm Fußlänge gebondet, ohne je Richtung optimiert worden zu sein. Anschließend wurden jeweils 40 Schertests unter drei verschiedenen Winkeln zum Bond durchgeführt: unter 90°, also konventionell quer zur Bondrichtung; unter 45° schräg von vorne und unter 0° direkt stirnseitig, wie in Abb. 25 gezeigt. Es wurde jeweils immer der Destination-Bond getestet.

Zusätzlich wurden noch bei jeder Variante die Scherhöhen variiert, nämlich von 10, 20 und 30 µm über Substrat, und zwei verschiedene Schertools eingesetzt, ein scharfkantiges und ein stumpfes mit einem Schneidenradius von 30 µm, um den Effekt eines schneidenden gegenüber einem lediglich schiebenden Werkzeug zu ermitteln.

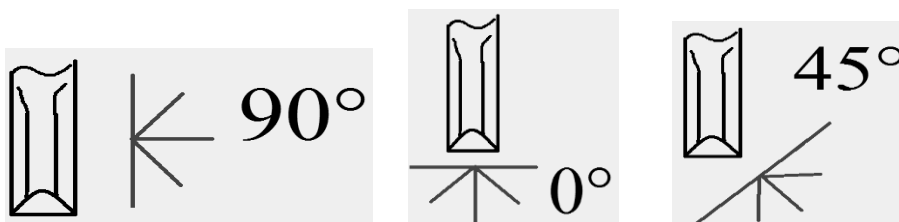


Abb. 25: Unterschiedliche Scher-Richtungen

In Abb. 26 sind die Resultate zum Vergleich aufgetragen. Die roten Balken geben die Scherwerte in cN an, die blauen Balken die Standardabweichung. Letztere wurde aus Darstellungsgründen jeweils 10fach vergrößert.

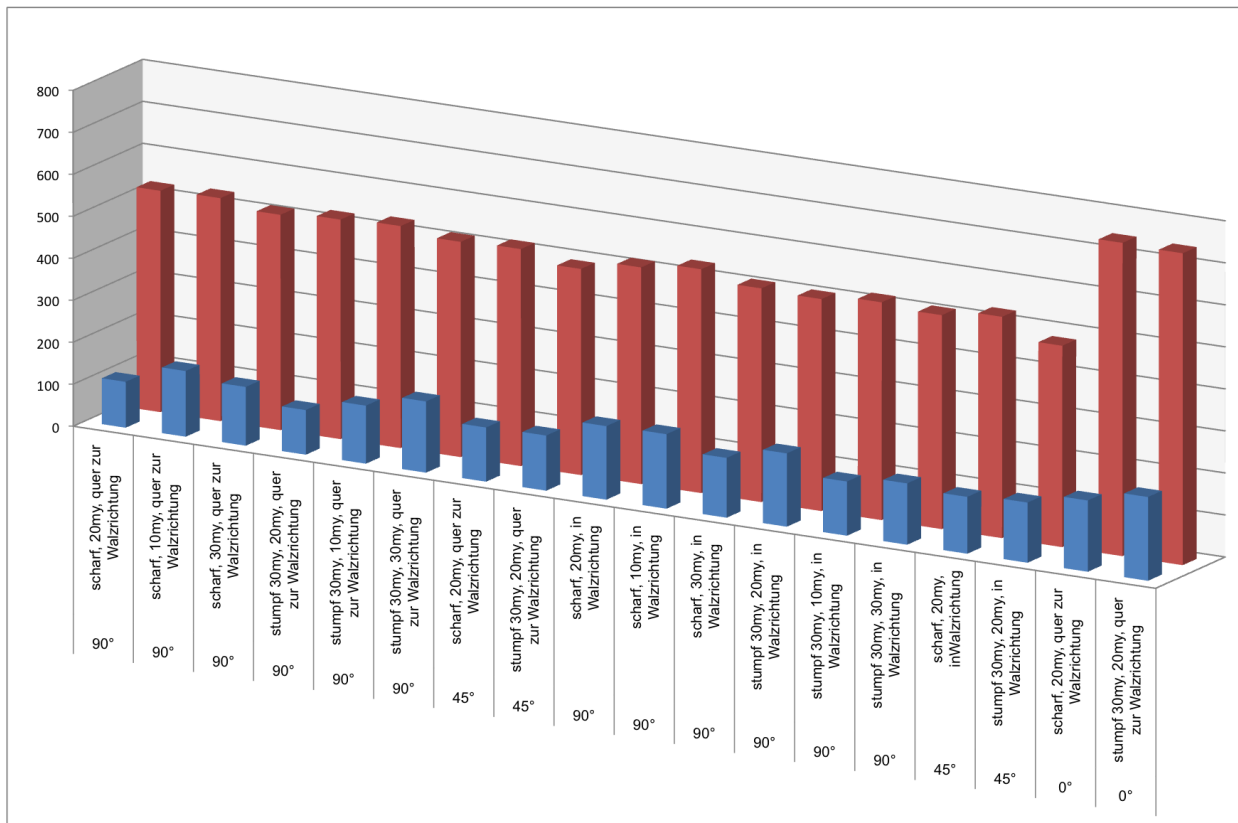


Abb. 26: Scherwerte von 200 µm Aluminiumdraht auf Standardsubstrat

Die Scherwerte zeichnen sich durch sehr geringe Schwankungen innerhalb jeder Gruppe aus – so schwanken die durchgeführten Messungen nur mit einer Standardabweichung von 2 bis 3% um den Mittelwert, was als ausgezeichnet gelten darf.

Auffällig ist, dass weder die Scherhöhe noch die Geometrie des Schermeißels einen nennenswerten Einfluss auszuüben scheint. Einzig die Scherrichtung macht einen Unterschied, wenn die Bonds stirnseitig, also in der Bondrichtung, geschert werden: dies erhöht den Scherwert sehr deutlich um über 40%.

Weitere Untersuchungen sind hier noch empfehlenswert, konnten aber im Rahmen des Projektes nicht mehr abgeschlossen werden. Nicht ohne weiteres zu erklären ist beispielsweise, warum frühere Versuche mit gleicher Drahtstärke keinen nennenswerten Unterschied zwischen den Scherrichtungen aufzeigten. Möglicherweise hat nicht nur der Drahtdurchmesser einen Einfluss, sondern auch die Härte des Drahtes, die beim an sich sehr weichen Aluminium-Dickdraht je nach der thermischen Vorbehandlung des Drahtes einigermaßen schwanken kann.

Darüber hinaus soll auch noch untersucht werden, ob und wie der Schneidenradius des Schertools das Rückstandsbild der gescherten Bonds beeinflusst, nachdem es offenbar den Scherwert kaum ändert. Gelegentliche Beobachtungen im Feld, die das Gegenteil zu zeigen scheinen, müssen noch vertieft nachvollzogen werden,

Weitere Versuchsreihen sind auch wünschenswert, um zu klären, in welchem Umfang nicht-zerstörende Schertests zur Qualitätskontrolle benutzt werden können. Ein automatischer Schertester bietet bekanntlich die Möglichkeit, ohne großen Bedieneraufwand eine nicht-zerstörende 100%-Kontrolle von Dickdrahtbonds durchzuführen.

Dabei ist aber vor allem zu klären, bis zu welcher Scherkraft die Bonds belastet werden können, ohne Schädigungen einzubringen, die die Lebensdauer beeinträchtigen. In ersten Versuchen zeigte sich, dass eine Belastung von bis 50% des Scherwertes einen späteren zerstörenden Test nicht beeinflusst, sofern dazwischen keine thermische Belastung stattfand. Auslagerungstests sollen diese Versuche untermauern; dazu ist es aber noch notwendig, geeignete und aussagefähige Demonstrationen festzulegen, weil ja die Art und Beschaffenheit der Grenzflächen-Metallisierungen einen Einfluss haben dürfte.

Gegen Ende des Projektes zeigte sich mehr und mehr, auch in Entwicklungen bei einigen Kunden mit hohen Anforderungen an die Bondqualität, dass für Dickdrähte nicht mehr nur der Schertest wichtige Resultate liefert. Der Pulltest genießt neuerdings steigende Akzeptanz, obwohl er früher für Dickdrähte kaum genutzt wurde. Der Grund dafür lag darin, dass bei qualitätsgerechten Bonds der Pulltest praktisch immer einen Drahttriss in der Mitte des Drahtes bzw. direkt am Pullhaken zeigte, kaum aber jemals am Drahtheel oder gar an der Bondstelle selbst. Dieses Verhalten ist dem (gegenüber dem bei dünnen Durchmessern verwendeten AISi-Draht) sehr weichen Aluminium-Dickdraht geschuldet: unter dem Pullhaken wird bei langsamer Bewegung, wie sie der Pulltester ausführt, der Draht an der Knick-

stelle so beansprucht, dass er fließt und sich dabei einschnürt. Das verringert den wirksamen Querschnitt des Drahtes und erzeugt folglich eine Schwachstelle, die bei geringeren Kräften reißt als bei Dünndraht, im Verhältnis zur Drahtstärke betrachtet. Damit ist aber auch die Aussagekraft des Pulltests bei qualitätsgerechten Bonds sehr begrenzt.

Inzwischen hat sich aber gezeigt, dass auch der Schertest Schwächen dabei hat, Bondprobleme zu signalisieren. Es ist nämlich sehr wohl möglich, einen hervorragenden Bond zu erzeugen, gleichzeitig aber durch nicht fachgerechte Loopformung oder andere Einflüsse die Drahtbrücke am Heel zu schwächen und damit ein Qualitätsproblem zu verursachen, das sich möglicherweise in einem späteren Ausfall zeigt. Ein Beispiel für solche provozierten Drahtschwächen sind Änderungen in der Loopgeometrie während des Produktionslaufs, die gelegentlich von Einrichtern vorgenommen werden, um bestimmte andere Probleme zu lösen. Dabei wird beispielsweise das Flachliegen eines langen, niedrigen Loops dadurch verhindert, dass nach dem ersten Bond eine deutliche Reversbewegung programmiert wird, die den Draht am ersten Heel aufstellt und dann eine Brückenform erzwingt. Je nach Drastik dieser Reversbewegung wird der Draht schon unmittelbar nach dem Bonden am Heel geschwächt und ein späterer Ausfall wahrscheinlicher gemacht. Im Schertest würde dies nicht auffallen, weil ja die eigentlichen Bondparameter nicht verändert wurden; der Pulltest hingegen würde solche Fehler sofort aufzeigen. Daher werden besonders bei anspruchsvollen Anwendungen Pulltests inzwischen häufig ergänzend zum Schertest eingesetzt.

Wichtig ist aber hier auch der richtige Ablauf: Pulltests sind nur dann aussagekräftig und vor allem über Bauteile hinweg vergleichbar, wenn sie gemäß der Vorschrift ausgeführt werden, besonders was die Normierung auf den 30°-Winkel angeht, den der getestete Draht mit der horizontalen Unterlage bilden soll. Nur dann ist nämlich die angezeigte Kraft identisch mit der am Bond tatsächlich wirkenden. Bei niedrigeren Loops und dadurch geringeren Winkeln ist die angezeigte Kraft geringer als die tatsächliche, während bei hohen Loops eine zu große Kraft und damit scheinbare Reißlast gemessen wird. Völlig identisch gute Bonds würden also, wenn sich ihre Geometrie in Höhe und Länge unterscheidet, unterschiedliche Reißwerte aufweisen und die tatsächliche Qualität schlechter anzeigen.

Für Dickdrähte gibt es derzeit leider noch keinen Standard, der vergleichbar mit der breit eingeführten Vorschrift des DVS-Merkblattes 2811 für Dünndrähte ist. Ein Arbeitsprojekt des Fraunhofer IZM ist angelaufen (Prüfstandards für Drahtbonds) und soll in einiger Zeit diese Lücke schließen.

2.5. Batteriematerialien für E-Fahrzeuge beim Drahtbonden

Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes war die Erforschung der Bondbarkeit von verschiedenen Materialien, aus denen Batteriesysteme für E-Fahrzeuge hergestellt werden. Auf dem Markt für E-Fahrzeuge herrschen zwei Typen von Lithium-Akkuzellen vor: sogenannte prismatische Zellen und kleine zylindrische Zellen vom Typ 18650. Erstere werden in einer Vielzahl von Größen und Formen angeboten, haben aber alle ziemlich große, massive Anschlusskontakte mit Größen von über 10x10 mm, meist aus Aluminium und Kupfer für die beiden Anschlusspole (Abb. 27). Letztere weisen eine Außenhülle aus vernickeltem Stahlblech auf und werden dann üblicherweise mit je einem (oder mehreren) Dickdrahtbonds auf dem Anschlussdeckel oben, also dem Pluspol, und dem Zellenboden unten verdrahtet.

Neben diesen beiden Typen mit festem Gehäuse gibt es eine Reihe von verschiedenen flachen Zellen in flexiblen Beutelverpackungen, die Pouch- oder Coffee-Bag-Zellen. Sie sind stärker bei Consumer-Geräten wie Smartphones und Laptops anzutreffen, wo sie einzeln verbaut werden. Wegen des fehlenden Schutzgehäuses sind sie bei E-Fahrzeugen derzeit kaum vertreten. Für die Drahtbondtechnologie sind sie bislang weniger relevant, denn die elektrischen Verbindungen zwischen den Zellen werden meist durch einfaches Verschweißen der Folien-Tab-Anschlüsse hergestellt. Es gibt inzwischen aber auch hier erste Ansätze zum Drahtbonden zwischen den Kontaktlaschen, auch weil die Bonddrähte möglicherweise eine gute Wärmeableitung anbieten. Diese erfolgt bei Pouch-Zellen nämlich in überraschend großem Ausmaß über die Kontaktlaschen.

Kommerziell sind derzeit die 18650-Zellen auch im Fahrzeugeinsatz weitaus am breitesten vertreten. Das liegt hauptsächlich an ihrem Einsatz in den Fahrzeugen von Tesla Motors, wo diese Zellen mit je einem Draht am Plus- und Minuspol verschaltet werden. Bis zum Abschluss des Projektes kann geschätzt werden, dass bei Tesla Motors weit über 600 Millionen 18650-Zellen verbaut worden sind, was die industrielle Prozessfähigkeit des Drahtbondens zum Batteriekontaktieren schlagend verdeutlicht.



Abb. 27: Prismatische Lithium-Akkuzellen

Der Deckel einer 18650-Rundzelle ist zwar eigentlich eine ausgezeichnete Bondoberfläche, stellt aber zwei besondere Herausforderungen hinsichtlich der Starrheit, die zum Bonden erforderlich ist. Wie in Abb. 28 gut zu sehen ist, ist er nur durch eine (gelb dargestellte) Kunststoffdichtung mechanisch fixiert.

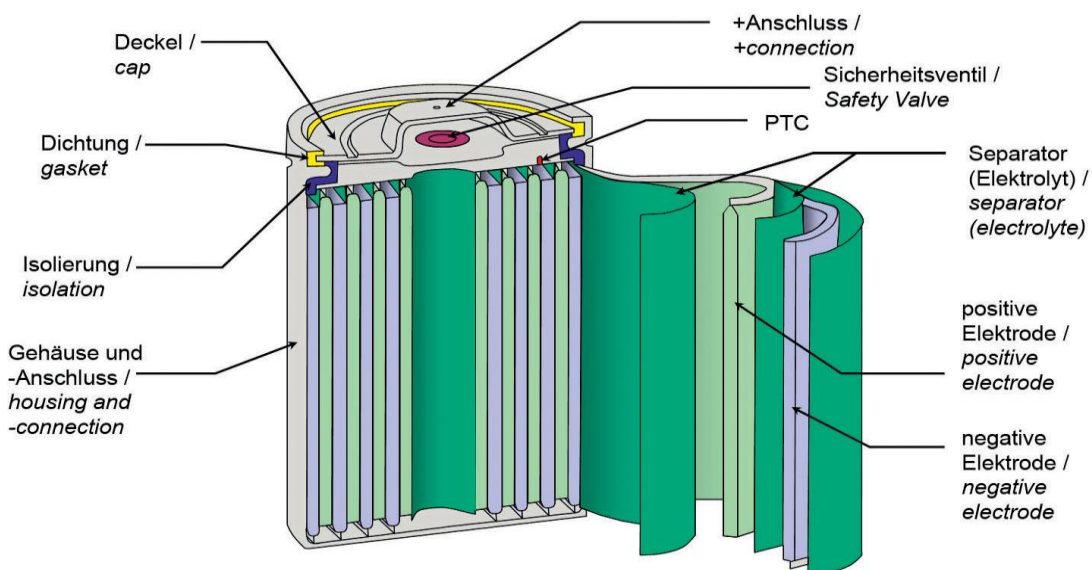


Abb. 28: Typische 18650 Batteriezelle

Zum anderen ist die erhabene Bondfläche nicht eigens unterstützt, sondern liegt hohl. Darüber hinaus ist die Zelle schlecht auf dem Bonder zu fixieren, erst recht wenn sie in einem kundeneigenen Modul montiert ist, das keinen direkten Klemm-Zugriff auf die individuelle Zelle ermöglicht. Häufig wird die Zelle von oben mit einer Metallmaske mit einem oder zwei Drähten kontaktiert, so dass alle Zellen eines Moduls parallel verschaltet werden (Abb. 29).



Abb. 29: Mit Dickdrahtbonds gebondeter Deckel einer 18650 Zelle

Ein zusätzlicher Nutzen liegt bei dieser Schaltungsart darin, dass der Bonddraht bei geeigneter Auslegung auch als Sicherung dient: bei einem sog. thermal Runaway einer einzelnen Zelle erhöht sich ihre Temperatur, was in geringerem Innenwiderstand und höherem abgeleiteten Strom resultiert, welcher wiederum die Temperatur weiter steigen lässt usf. Bei einem definierten Grenzstrom brennt dann der Bonddraht durch und die betroffene Zelle ist aus dem Stromkreislauf entfernt, so dass sie sich nicht weiter aufheizen und durchbrennen kann.

Batteriezellen können aber auch direkt durch Bonddrähte miteinander verbunden werden, ohne einen zusätzlichen Stromleiter einzusetzen. Dieses Verfahren ist attraktiv durch die größere Flexibilität, weil geänderte Modulgeometrien nur geänderte Bondprogramme erfordern, aber keine geänderten Formteile oder Verbinder. Außerdem fällt an Materialkosten

für die Verbindung nur der Bonddraht an, der aber je nach gewünschtem Querschnitt relativ kostspielig werden kann. Hier ist möglicherweise eine Entfeinerung der Spezifikationen möglich, um mit kostengünstigerem Draht zu arbeiten.

Zur Erforschung des Bondverhaltens wurden sowohl Zellen einzeln in einer geeigneten Halterung gebondet, wie auch komplette Module in unterschiedlichsten kundeneigenen Gehäusen, die zwischen 12 und 100 Batteriezellen enthalten können.

Das Bondverhalten wurde auf zwei Arten verfolgt:

- wie oben beschrieben durch Verfolgung der Ultraschalldaten wie Strom, Impedanz und Frequenz
- durch eine Verfolgung des Schwingungsverhaltens am Zellendeckel per Laser-vibrometer

Aufgrund der Einspannung der Zellen im Kundenmodul konnte eine laterale Bewegung des Zelldeckels, wie sie eigentlich primär von Interesse wäre, nicht direkt verfolgt werden. Jedoch ist eine einfache alternative Messung unter einem Einfallswinkel des Laserstrahls von etwa 30° problemlos möglich. Die senkrechten Stützarme oder Speichen des Zelldeckels, die ja eine seitliche Bewegung der Bondfläche am deutlichsten zeigen würden, sind zwar der Messung nicht zugänglich, aber die Kontaktfläche selbst lässt sich ebenso gut verfolgen, wenn ihre Lichtstreuung durch eine geeignete Farbmarkierung entsprechend erhöht wird. Zu beachten ist lediglich noch, dass eine Vibrometermessung unter dem beschriebenen Winkel naturgemäß nicht unterscheiden kann, ob sich der Deckel vertikal, also wie ein Trommelfell, bewegt oder aber lateral, also unter Biegung der tangential verlaufenden Stützarme, oder in einer Kombination aus beiden.

Kurz zusammengefasst zeigten sich folgende Befunde:

- Wie bei den weiter oben beschriebenen Messungen zeigt sich, dass der Zellendeckel im Verlauf der Bondherstellung immer stärker mitschwingt. Dieses Verhalten ist reproduzierbar und erwünscht. Die Amplitude beträgt etwa 0,5 µm und ist damit in der erwarteten Größenordnung von 20-30% der Bondamplitude.
- Sie ist für die einzeln eingespannte Zelle (also bei optimaler Befestigung) genau so groß wie für die Zelle im Kundenmodul. Auch dieser Befund zeigt, dass die Bondausbildung qualitätsgerecht erfolgt.

- Zusätzlich zur erwarteten Deckelschwingung bei der Bondfrequenz tritt ein erster Oberton bei etwa 180 kHz und mit einer Amplitude von etwa 10% der Grundschwingung auf. Dies deutet auf ein echtes angeregtes Resonanz-Mitschwingen des Zelldeckels hin und verläuft vermutlich rein vertikal und nicht lateral (eine Unterscheidung erfordert eine Messung von oben, die mit dem vorhandenen Equipment nicht durchgeführt werden konnte)
- Wenn die Deckelschwingung nicht in Richtung des Drahtbonds, also in Richtung der Toolschwingung erfolgt, sondern schräg dazu, dann ist die Folgebewegung des Zelldeckels auch in dieser Richtung messbar, aber in geringerem Ausmaß. Dieses Verhalten würde man aufgrund der geometrischen Verhältnisse auch erwarten.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Rundzellen vom Typ 18650 ist das Drahtbonds von prismatischen Zellen mehreren Gründen einfacher. Die Zellen können meist weit besser befestigt werden, sie weisen wegen ihrer größeren Masse eine größere Eigenträgeit auf, sind also aus Sicht des Bondprozesses schon von sich aus starrer, und schlussendlich sind die Kontaktflächen groß und eben. Auch die normalerweise große Rauigkeit von gefrästen Aluminium-Kontaktblöcken stellt kein großes Problem dar, so lange sie nicht von Zelle zu Zelle stark variiert. Bei solchen größeren prismatischen Zellen werden üblicherweise mehrere Drahtbonds parallel aufgebracht, um den Leitungswiderstand zu verringern. Das empfiehlt sich zusätzlich deshalb, weil die Drahtbonds durch die größeren Zellgeometrien auch länger sind und somit ihr Leitungswiderstand ins Gewicht fällt.

Perspektivisch liegt es nahe, anstatt von bis zu 20 Dickdrahtbonds pro Kontaktblock auch Aluminium-Bändchen zu verwenden. Heute überwiegt der hohe Preis für Al-Bändchen noch den Produktivitätsvorteil bei den Bonderkosten, aber eine Umstellung ist problemlos und erfordert lediglich angepasste Bondtools und Drahtführungen.

Im Laufe des Projektes und bei späteren Musterbondversuchen mit kommerziell verfügbaren Batteriezellen aller Typen stellte sich zunehmend heraus, dass es bei Drahtstärken ab 400 µm schwierig wird, qualitätsgerecht zu bonden. Besonders der Pluspol bei 18650-Zellen ist problematisch, aber auch die größeren Pole bei prismatischen Zellen, wenn man Aluminium-Bänder mit noch höherem Querschnitt einsetzen möchte. Der Hauptgrund dafür scheint, neben den unvermeidlichen Variationen der Oberflächenqualität und den Schwankungen zwischen den Herstellern der Zellen, die nicht ausreichende mechanische Fixierung der Pluspol-Deckel bzw. der Polblöcke, die ja im Zellengehäuse nur mit einer Kunststoff-

isolierung mehr oder weniger starr geklemmt werden, wie in Abb. 28 diskutiert wurde. Weil die zum Bonden notwendige Ultraschallenergie mit dem Draht- bzw. Bändchenquerschnitt stark ansteigt, muss diese mechanische Bewegung auch durch eine entsprechend robuste und starre Fixierung aufgefangen werden. Nach jetzigem Stand scheint dies die Drahtstärken bei 18650-Zellen auf etwa 300 bis 350 μm für den Pluspol und etwa 400 bis 450 μm zu limitieren. Bei prismatischen Zellen sind Drahtstärken von 500 μm möglich, aber noch stärkere Alu-Bänder können nicht mehr qualitätsgerecht gebondet werden. Wie im letzten Abschnitt deutlich gemacht wird, sehen wir hier eine äußerst attraktive Einsatzmöglichkeit für den Laserbonder, der ohne große mechanische Belastungen auskommt und bedeutend höhere Energien einbringen kann.

2.6. Laserbonder

Der zweite große Projektteil beschäftigte sich mit der Implementierung eines Lasers im Bondkopf eines Ultraschall-Bonders. Bei ersten Überlegungen war geplant worden, einen halbautomatischen Bonder Modell 5650 statt dem vollautomatischen Gerät 66000 einzusetzen, weil dessen einfachere Geometrie und Ansteuerung die Integration des Laserkopfes leichter machen sollte.

Im Verlaufe der detaillierteren Diskussion des Vorhabens stellte sich jedoch heraus, dass es doch vorzuziehen war, bei dem automatischen Bonder 66000 zu bleiben. Sein Arbeitsbereich vor allem in der Z-Achse ist bedeutend größer und erlaubt somit auch die Einbringung eines größeren Laserkopfes, vor allem wenn eine Drehung gefordert wird. Außerdem bietet der Bonder 66000 weitaus mehr Möglichkeiten zur Erfassung und Aufzeichnung von Prozessdaten, wie etwa dem Touchdown-Verhalten, der Bondkraftregelung und der eventuell noch zusätzlich beabsichtigten Deformationsverfolgung. Alle diese Daten können dort in Echtzeit erfasst und exportiert werden, was beim einfacheren Halbautomaten 5650 nur eingeschränkt möglich ist.

Problematisch sind aber auch bei dem Bonder 66000 nach wie vor Gewicht und Größe des Galvanometers, sowie die zusätzliche Belastung durch die einkoppelnde Lichtleitung zwischen stationärem Laser und dem bewegten Galvanometer. Auch bei einem beschränkten Rotationswinkel musste die Drehgeschwindigkeit des Bondkopf-Systems deutlich reduziert werden. Für das Versuchsstadium ist das zwar akzeptabel, gleichzeitig wurde aber bereits im Hinblick auf eine Produktionslösung weitergedacht.

2.6.1 Hardware: Unabhängiger Betrieb von Laser und Ultraschall

Wie in Abb. 30 ersichtlich, ist der Laser-Scanner seitlich am drehbaren Teil des Bondkopfes angeflanscht und führt alle Bewegungen aus, die auch der Bondkopf macht. Der Laserstrahl wird über einen flexiblen Faserschlauch von oben in den Scanner eingeführt und tritt senkrecht nach unten aus. Zwei fest eingestellte Ablenkspiegel bringen den Laserstrahl in die gewünschte Position wenige Millimeter vor dem Bondwerkzeug.

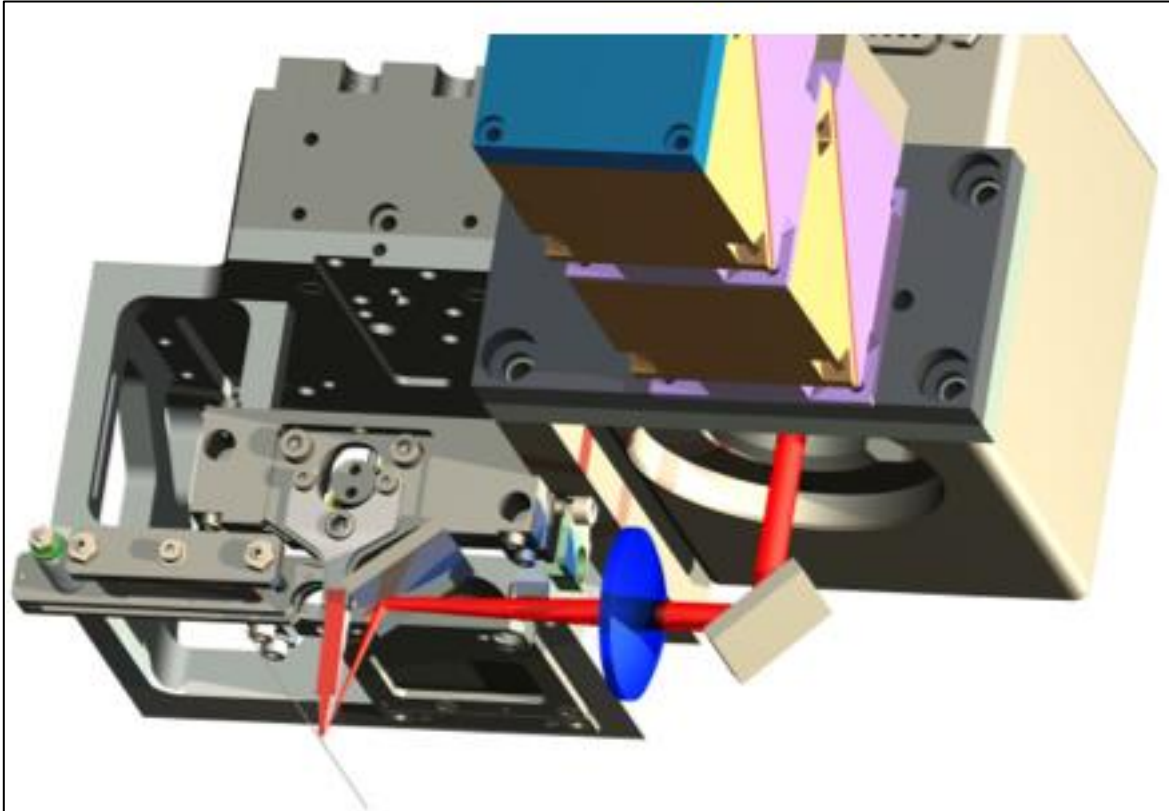


Abb. 30: Bondkopf mit angeflanschem Laser-Scanner, Strahlengang rot

Besonders hervorzuheben ist, dass der Bondkopf ansonsten völlig unverändert ist und alle Komponenten des Standardverfahrens enthält, also Ultraschallgenerator und Transducer sowie Drahtführung und Schneidmesser. Funktional betrachtet könnte der Bonder demnach Ultraschallbonds und Laserbonds alternativ, gleichzeitig, sequenziell oder in jeder beliebigen Kombination durchführen. Diese Fähigkeit ist aus jetziger Sicht für spätere weitere Untersuchungen höchst attraktiv und wird auch in der Anbindung der Software so behandelt, wie weiter unten beschrieben wird.

Der einzige wesentliche Unterschied ergibt sich momentan in der Ausbildung des Bondwerkzeuges. Es muss eine Gabel- oder Ösenform erhalten, um den Draht oder das Bändchen zwar auf die Bondfläche zu drücken, gleichzeitig aber ein Stück der Drahtoberfläche frei zu lassen, damit der Laserstrahl darauf fokussiert werden kann. Das Standard-Bondtool kann diese Aufgabe nicht leisten. Das Bondtool wurde vorläufig in vereinfachter Form erstellt und reicht zunächst für Bondversuche aus; für den Einsatz in der Produktion mit dem geplanten

modifizierten Laserbender wird dann auch ein angepasstes Werkzeug konstruiert, das auch in unterschiedlichen Längen gebaut werden kann und damit die Geometrie nach Wunsch eingestellt werden kann. Heute ist der Freiraum unter dem Bondkopf auf etwa 10 mm begrenzt, wie der schematischen Darstellung Abb. 31 entnommen werden kann.

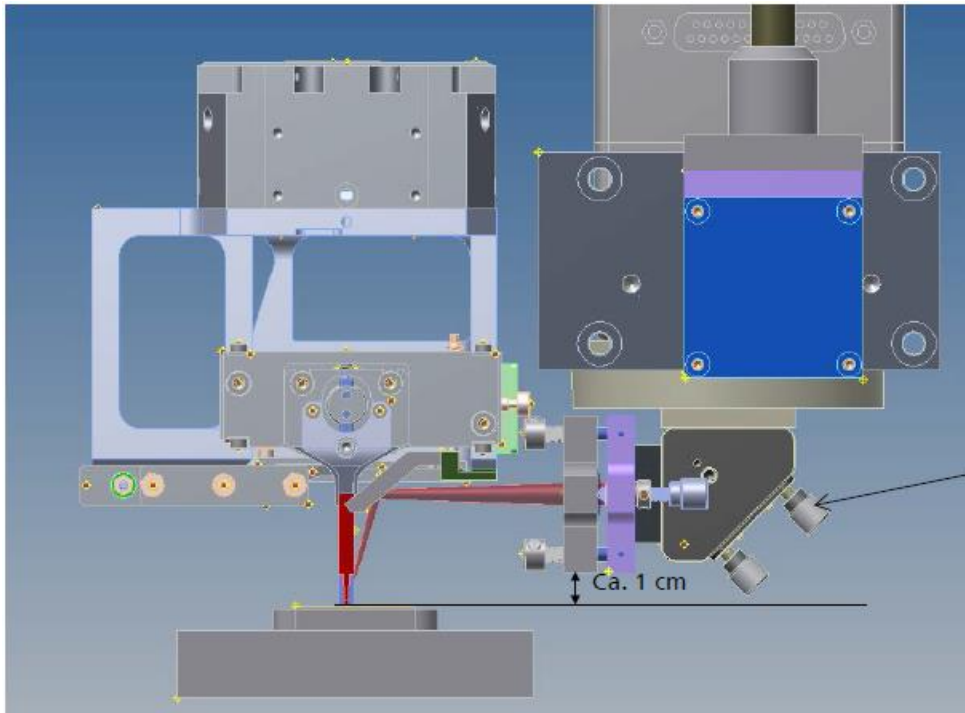


Abb. 31: Geometrie am Bondkopf

2.6.2 FEM-Modellierung

Schon zu Beginn des Projektes wurde deutlich, dass der mitfahrende Laserscanner die mechanischen Eigenschaften und die Dynamik des Bondkopfes ungünstig beeinflusst. Die weit exzentrische Anbindung einer Masse von etwa 2 kg ist vor allem bei Drehbewegungen nicht optimal. Die Auswirkungen dieser Belastung wurden in einer FEM-Studie (Finite Element Modeling) genauer simuliert, um mögliche Optimierungspotenziale auszuloten. Die Modellierung wurde sowohl statisch als auch dynamisch durchgeführt, weil bereits die Deformation des Bondkopfes durch die Masse des Scanners von Interesse ist, vor allem aber das dynamische Verhalten speziell bei einer Drehbewegung des Kopfes ermittelt werden sollte.

Abb. 32 zeigt eine Übersichtsdarstellung in der gleichen Orientierung des Bondkopfs wie in Abb. 30. Der Laserscanner ist nicht eingezeichnet und ist rechts am Bondkopf montiert, wie in Abb. 30 und 31 gezeigt. Die größte Verformung zeigt sich erwartungsgemäß an der rechten Seitenwand, auf die der Laserscanner am stärksten drückt; dagegen ist das Bondkopfgerüst an der Montagestelle, dem Kragen an der Oberseite, kaum beeinflusst. Die maximalen Auslenkungen in statischer Betrachtung betragen etwa 10 µm und sind damit für den Prototyp durchaus akzeptabel.

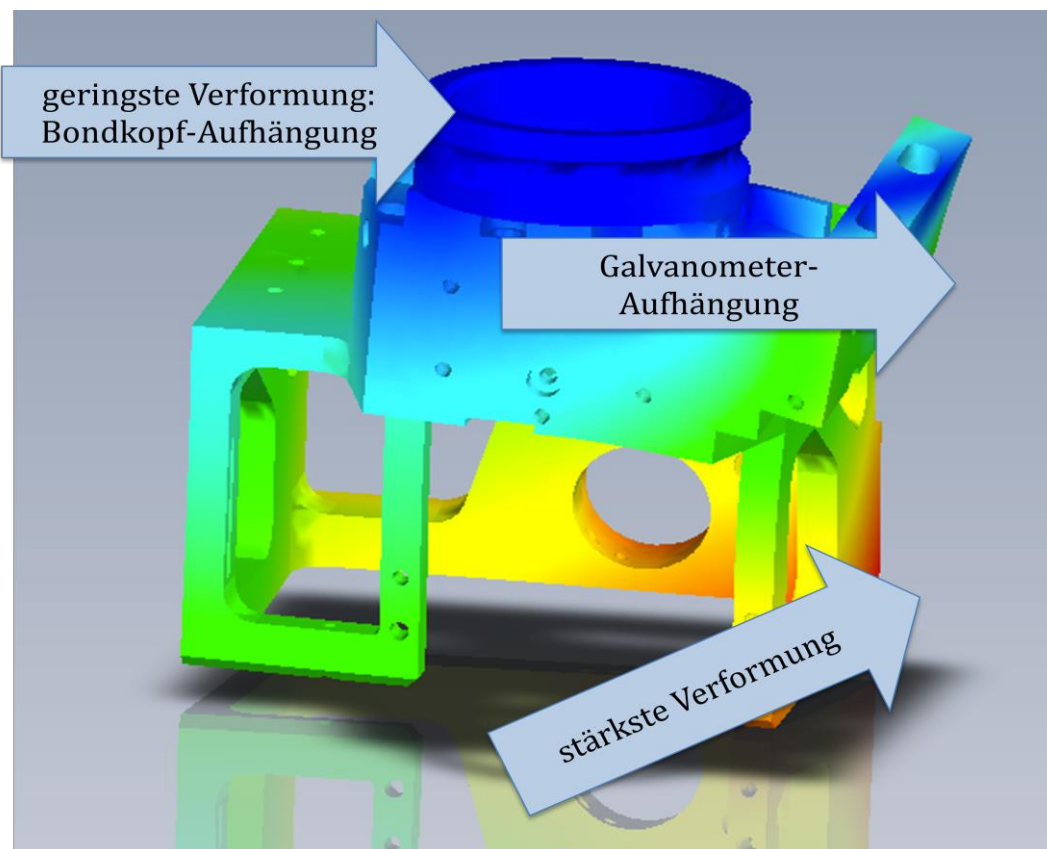


Abb. 32: Bondkopfgerüst nach FEM mit farblich hervorgehobener Deformation (statisch)

Bei der dynamischen Simulation zeigten sich deutlich höhere Auslenkungen von über 100 µm, hauptsächlich wegen der großen exzentrischen Masse des Scanners. Sie wird, wie aus Abb. 32 klar wird, wegen der geplanten zusätzlich angebrachten Monitoreinrichtungen wie Kamera im Strahlengang etc. noch etwas größer und vor allem noch exzentrischer.

Dieser Einfluss würde die dynamische Auslenkung noch weiter erhöhen und zur Abhilfe beispielsweise eine deutlich verringerte Drehgeschwindigkeit des Systems erzwingen. Positiv ist aber anzumerken, dass in der Simulation keine Eigenschwingungsmodi gefunden wurden, die bei den geplanten Betriebsbedingungen unerwünschte Resonanzen auslösen würden und dadurch den stabilen Betrieb gefährden könnten.

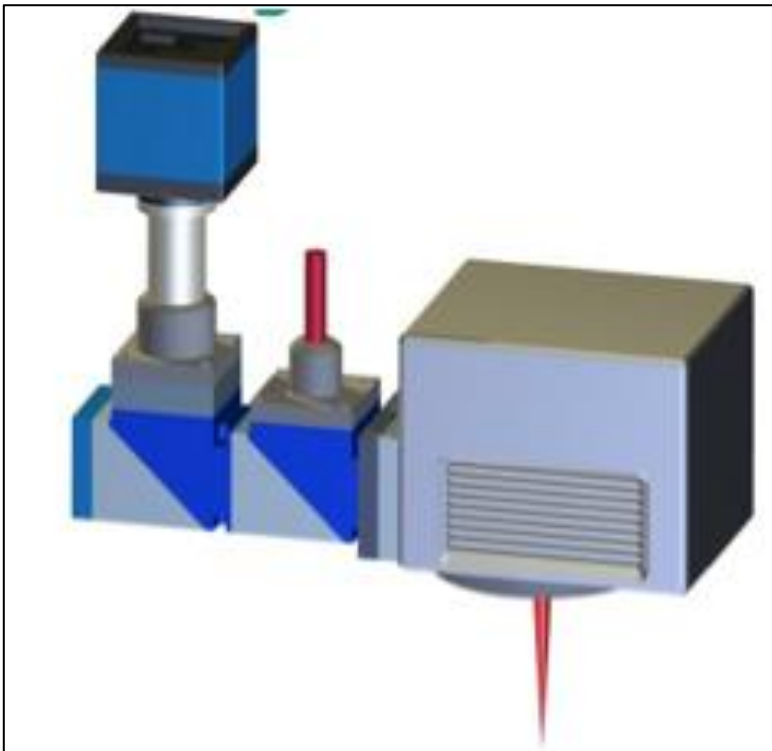


Abb. 33: Laser-Scanner mit angebauten zusätzlichen Überwachungseinrichtungen

2.6.3 Hardware: vorgesehene Änderungen

Nachdem die mögliche Arbeitsgeschwindigkeit des Lasers mit unter 100 ms Bondzeit praktisch identisch mit der des Ultraschallbonders ist, wäre es sehr wünschenswert, auch mit ähnlichen Verfahrgeschwindigkeiten wie beim US-Bonden arbeiten zu können. Daher konzipieren wir inzwischen eine veränderte Bondkopfgeometrie, die es erlaubt, den Laser-scanner nicht seitlich, sondern genau zentrisch über dem Bondkopf zu montieren. Dazu ist vor allem ein deutlich größerer zentraler Durchlass notwendig anstatt der heute eingesetzten Hubspindel mit einem offenen Durchmesser von etwa 9 mm. In diesem zentralen Durchlass

könnte dann eine offene Optik (möglicherweise telezentrisch) den Laserstrahl ohne Spiegelumlenkung direkt vor dem Bondtool fokussieren. Der Laserscanner muss dann nicht mehr mit dem Bondkopf rotieren, sondern könnte lediglich in der Z-Achse bewegt werden, um den Laser in der gewünschten Höhe zu fokussieren. Diese Montageweise hätte den zusätzlichen Vorteil, dass die beiden Umlenkspiegel entfallen könnten und keine optischen Elemente in der Schmauchzone unmittelbar über den Bonds angeordnet wären. Für die Langzeitstabilität der Maschine wäre dies ein großer Vorteil. Besonders beim Einsatz eines stärkeren Lasers als der heutigen Ausführung von 400 W. Für dickere Aluminium- und besonders für Kupfer-Bändchen wären Laser von 1.000 W Leistung sehr vorteilhaft; bei diesen Leistungen belastet aber selbst der noch schwach gebündelte Strahl die beiden Umlenkspiegel so stark, dass ihre Lebensdauer sehr leidet.

2.6.4 Software-Anbindung: Rezeptmanagement

Die Software-Einbindung des Laserscanners wurde bereits in früheren Berichten skizziert und ist detailliert auch in den Berichten von Fraunhofer ILT und S&F beschrieben. Von Seiten des Bonders wurde hierzu auf der Steuerungshardware mit dem Bonding Controller, wie in Abb. 34 schematisch dargestellt, die Möglichkeit geschaffen, den Laser völlig separat von den Ultraschall-Funktionen zu steuern, so dass beide Prozesse ggf. auch getrennt und unabhängig gesteuert werden könnten. Dazu wurden separate Steuerleitungen für das Lasersystem vorgesehen sowie ein Rückkanal, mit dem das Lasersystem dem Bonder das Resultat des Bondprozesses signalisieren kann. Dazu stehen die Meldungstypen „erfolgreich“, „nicht erfolgreich“ oder einige Fehlercodes zur Verfügung, die dann entsprechend ausgewertet werden können. An dieser Stelle ist auch geplant, Einrichtungen zur Prozessüberwachung des Laserbonders anzuschließen, die bereits existieren. Dazu gehört z.B. eine Strahlüberwachung durch eine zusätzliche am Laserscanner angebaute Kamera, die auch den Schweißprozess in Echtzeit und das Resultat verfolgen und dokumentieren kann, so dass der Prozess ähnlich dem Ultraschallprozess wahlweise auch laufend geregelt werden kann.

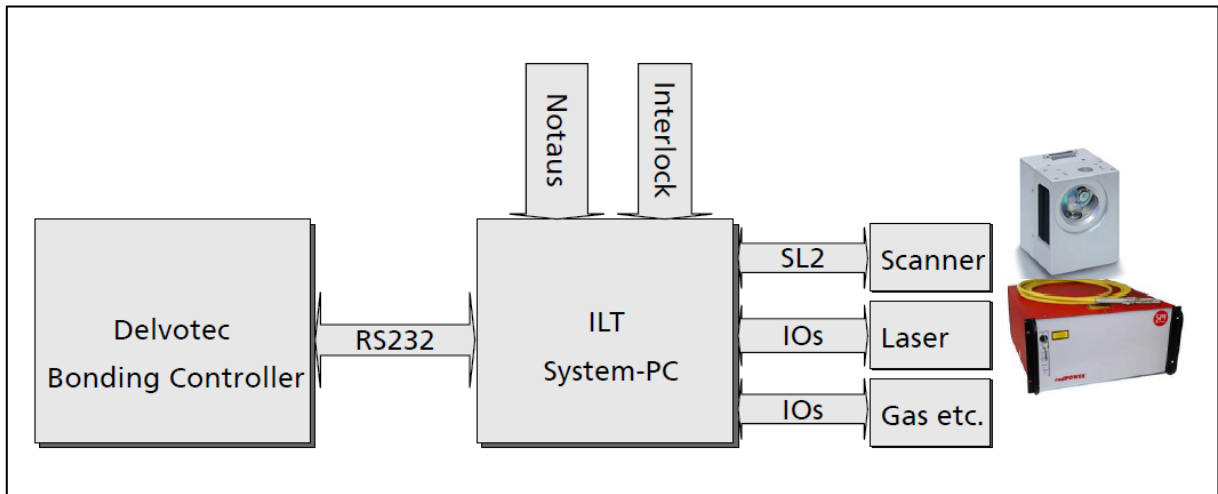


Abb. 34: Ansteuerung und Informationsfluss zwischen Bonder, Laser und Scanner

Zur Steuerung des Lasers wurde das bereits angesprochene „Rezept“-System umgesetzt: der Bonder speichert je geplantem Bond eine vorgegebene Rezeptnummer ab und übergibt diese an die Steuerung des Lasers und des Laserscanners. Dort werden diese Rezepte hinsichtlich Laserstärke, Dauer, Bewegungsmuster und weiterer Parameter vordefiniert und sind dann durch ein einfaches Auswahlsignal abrufbar.

In der oben diskutierten neu geplanten Hardware-Variante mit nicht-drehendem Scanner muss zusätzlich zum Bond-Rezept auch noch die Drehrichtung des gewünschten Bonds übermittelt werden, denn hier muss der Laserscanner die Laserlinie jeweils quer zum Drahtverlauf legen und also entsprechend drehen. Das ist für die Scannersteuerung kein Problem und muss lediglich jeweils, zusammen mit den anderen Schweißparametern aus dem Bondrezept übermittelt werden. Dieser Winkel ist identisch mit dem Drehwinkel des Bondkopfs und daher im Bondprogramm enthalten und vordefiniert.

Nächste Ausbaustufen sehen auf der Softwareseite vor, die Bedienerschnittstelle zu vereinheitlichen. Derzeit gibt es getrennte Bedieneroberflächen für den Bonder und für den Laser bzw. den Laserscanner. Sie sollten nach Möglichkeit zusammengelegt werden, wenn auch die darunter liegende Steuerungs-Hardware getrennt bleiben dürfte. Der Bonder läuft nämlich auf einer Linux-Basis, während Laser und Laserscanner von einem Rechner mit Windows-Betriebssystem gesteuert werden. Zwei Rechner beizubehalten ist voraussichtlich kostengünstiger als sie in den Bonder-Rechner zu integrieren.

2.6.5. Bondversuche

Im Verlauf des Projektes wurde bereits eine Reihe von Bondversuchen mit Aluminiumbändchen bis zu einem Querschnitt von 2.000 x 400 µm durchgeführt, sowie orientierende Versuche mit Kupferbändchen geringerer Querschnitte. Das Hauptinteresse an diesen Verbindungen kommt aus der Batterietechnologie, wo größere Verbindungsquerschnitte sehr erwünscht sind, um mehrere dünnere Einzeldrähte zu ersetzen und so die Produktivität zu erhöhen. Das Ultraschallbonden dieser Bändchen ist, wie oben erläutert, wegen des großen Energieeintrages und der dazu notwendigen steiferen Bauteilklemmung schwierig oder nicht möglich.

Ein typischer Versuchsaufbau ist in Abb. 35 dargestellt. Dabei wurden die Plus- und Minuspolblöcke von prismatischen Batteriezellen durch Aluminium- und Kupferblöcke simuliert.

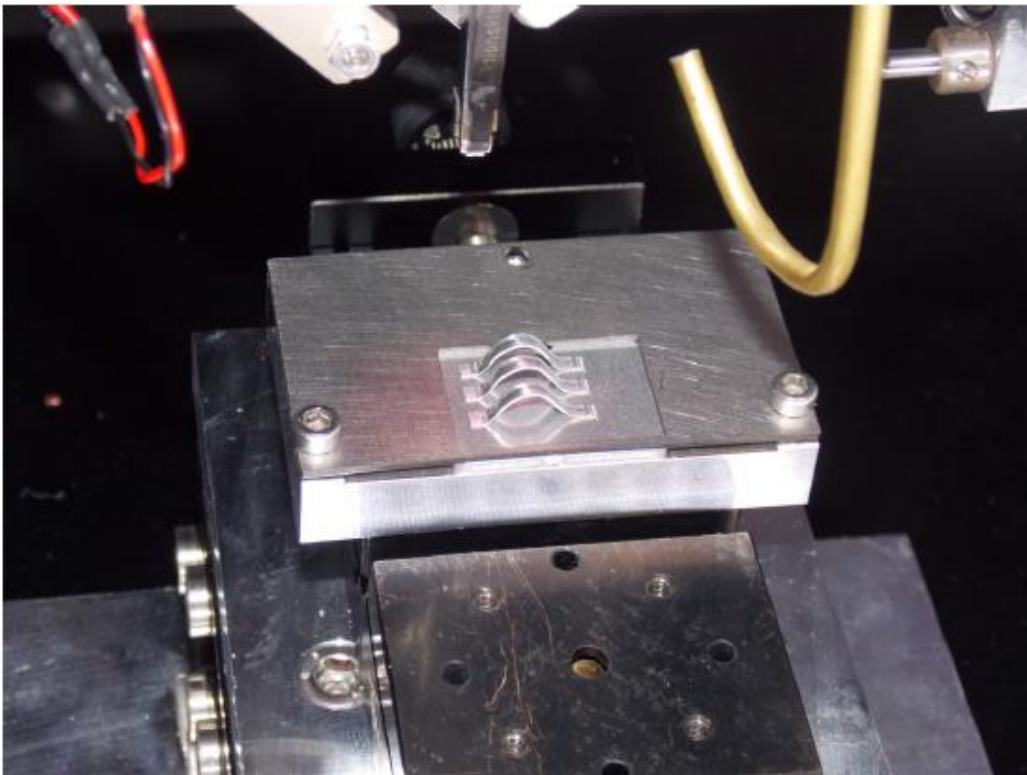


Abb. 35: Versuchsaufbau mit Aluminium-Bändchen

Die Bändchen wurden mit einer Laserleistung von typisch 280 W mit einer oder zwei Schweißlinien gebondet, wie in Abb. 36 für einen Pluspol der Batteriezelle gezeigt ist. Analog ist in Abb. 37 der zweite Bond eines derartigen Aufbaus abgebildet. Deutlich erkennbar ist dort die schräge Kante nach dem Abschneiden mit dem installierten Schneidmesser.

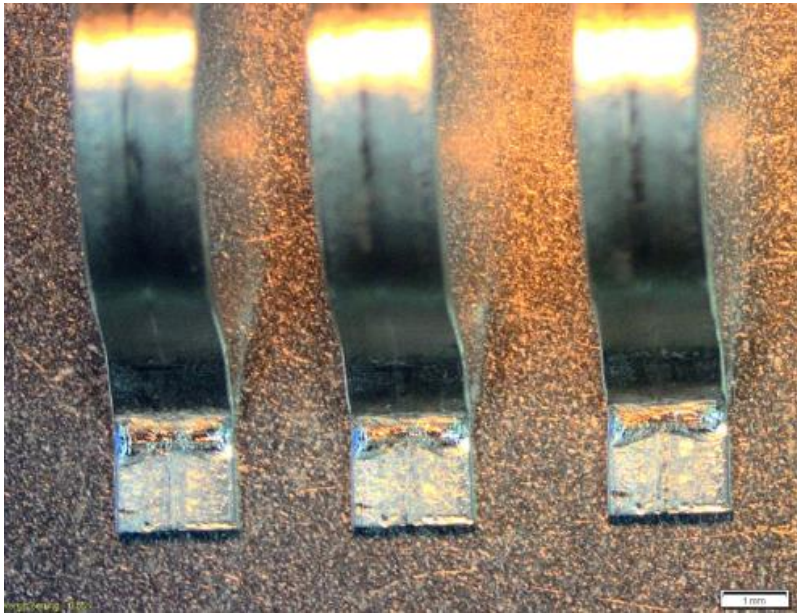


Abb. 36: Versuch 2, Bond 1 (Pluspol, Aluminium)

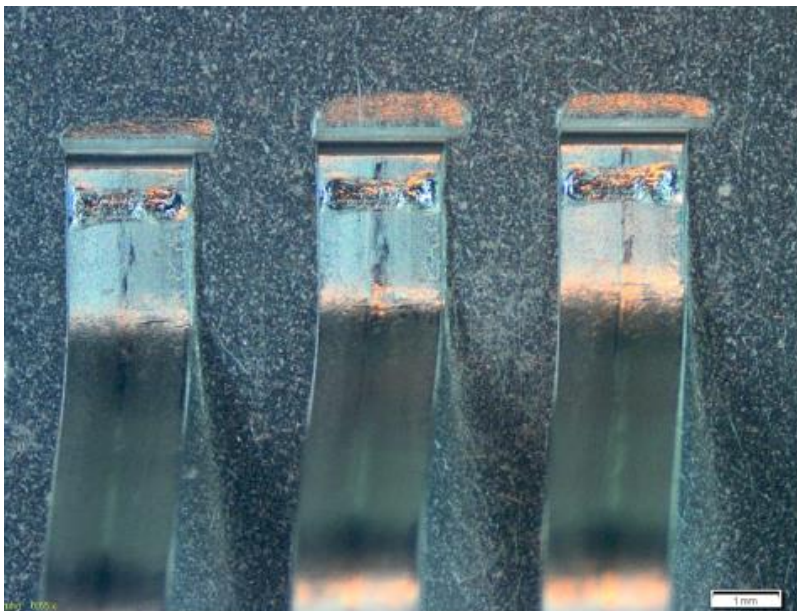


Abb. 37: Versuch 3, Bond 2

Ein typisches Schlibfbild wie in Abb. 38 illustriert die gerichtete Erstarrung der erzeugten Schmelze. Das Schweißbild wird sich noch deutlich verbessern lassen, indem z.B. gegen Ende des Schweißpfades eine geringere Leistung eingebracht wird, während der Laser in den gezeigten Versuchen noch vor Erreichen der Bandkante (links im Bild) abgeschaltet wurde, um ein Ausspritzen des Metalls zu vermeiden.



Abb. 38: Schliffebene 1 an Versuch 8 (Pluspol) Mikraufnahme 80%

Eine eingehende Diskussion der Versuchsergebnisse geht über den Rahmen unseres Berichtes hinaus und ist im Bericht des Fraunhofer ILT enthalten.

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.

Erfreulicherweise sind erste Verwertungsergebnisse, was unser Teilvorhaben betrifft, bereits in greifbarer Nähe: in diesen Tagen verhandeln wir mit einem großen Automobilzulieferer über Kauf und Lieferung eines ersten Laserbonders, der zum Bonden von Batteriepacks eingesetzt werden wird. Aufgrund der Attraktivität der Laserbond-Technologie soll sie kurzfristig bei diesem Kunden aber auch für andere Verbindungsaufgaben eingesetzt werden, die heute anderweitig nicht ausreichend automatisiert werden können. Dies wird allein bei diesem Kunden bereits ein Potenzial von mindestens 3 bis 5 weiteren Laserbondern eröffnen.

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 klassischen Drahtbonden > hohe Flexibilität beim Produktdesign
- Höhere Temperaturfestigkeit > Breiteres Einsatzspektrum
- Größere Verbindungsquerschnitte > höhere Leistungsklassen
- Zusätzliche Verbindungsanwendungen über die klassische Halbleitertechnik hinaus > weitere Marktchancen in heute manuell oder teilautomatisch ablaufenden Verfahren

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 unterschiedlicher 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 geplant | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht |
| 3. Titel Garantierte Mindestlebensdauer von Drahtbondverbindungen durch verbesserte Technologien auf Basis des heutigen Standes, sowie durch Einführung neuer Technologien | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Sedlmair, Josef, Dr. | 5. Abschlussdatum des Vorhabens Oktober 2014 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum geplant |
| | 7. Form der Publikation Fachzeitschriften |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) F&K Delvotec Bondtechnik GmbH Daimlerstraße 5-7 85521 Ottobrunn | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 16N11467 |
| | 11. Seitenzahl 73 |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn | 13. Literaturangaben 1 |
| | 14. Tabellen 1 |
| | 15. Abbildungen 38 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) | |

18. Kurzfassung

1. Stand der Wissenschaft und Technik ist das Ultraschallbonds von dicken Aluminiumdrähten mit im wesentlichen konstanten oder vorgegeben profilierten Schweißparametern. Beim Laserschweißen ist der derzeitige Stand das Verschweißen von zwei vorgelegten Fügepartnern.
2. Zur Erhöhung der Lebensdauer von Bondverbindungen ist neben einem vertieften Verständnis der qualitätsrelevanten Einflussparameter auch wünschenswert, das Fortschreiten der Verbindungsbildung möglichst zeitaufgelöst zu verfolgen, um Prozessabweichungen frühzeitig erkennen zu können und – als weiteres Ziel – Gegenmaßnahmen einleiten zu können, also im Idealfall einen Regelkreis einzurichten. Im Gegensatz dazu ist der heutige Stand der Technik nur in der Lage, nach Abschluss des Bondprozesses das fertige Produkt auf Fehler zu inspizieren und erst im Anschluss daran die Prozessparameter anzupassen.
Beim Laserbonden war die Zielsetzung, die Vorteile des Laserschweißens auf einen Drahtbonds zu übertragen, also einen der Fügepartner, nämlich das Verbindungselement (Draht oder Bändchen) in der Maschine vorzuhalten und alle Vorteile der flexiblen Verbindungsführung, der Positionierung und der kraftsensitiven Aufbringung des Verbindungselements zu nutzen.
3. Für die Bond-Untersuchungen wurden Untersuchungen an Bondern u.a. mit Unterstützung von Hochgeschwindigkeits-Videokamera und Laservibrometer durchgeführt, sowie zahlreiche Software-Anpassungen in den Bondern eingeführt, um Prozessparameter in Echtzeit auslesen und mit den extern gewonnenen Daten über den Bondprozess vergleichen zu können.
Beim Laserbonden wurde ein konventioneller Drahtbonds in Hard- und Software so modifiziert, dass ein Laser-Scanner angebaut und angesteuert werden konnte.
4. Beim Drahtbonds konnte gezeigt werden, dass grundlegende qualitätsrelevante Aussagen über den Bondverlauf sehr gut aus den im Bond abgreifbaren und verarbeitbaren Daten möglich sind. Wie sich überraschenderweise zeigte, spielen neben den eigentlichen Bonddaten vor allem Resonanz- und Mitschwingphänomene eine bedeutend größere Rolle als bisher angenommen. Auch sie sind in weitem Umfang durch die im Bond realisierbaren Überwachungssysteme nutzbar und ermöglichen es, Frühwarnfunktionen einzubauen.
Beim Laserbonds zeigte sich sehr rasch, dass ein gut beherrschbarer Laserbondprozess hervorragend dargestellt werden kann. Besonders attraktiv ist dabei, dass bedeutend größere Verbindungsquerschnitte als beim Ultraschall-Drahtbonds möglich sind. Damit ist das Laserbonden weniger als Konkurrenz zum klassischen Drahtbonds zu sehen denn als Erweiterung und Ergänzung zu größeren Stromstärken.
5. Die Anwendungsmöglichkeiten beim Drahtbonds sind primär in der verbesserten Prozessüberwachung und –regelung zu sehen; sie werden schrittweise auch in die Standardmaschinen übernommen und sollen in einem selbst nachregelnden Bondprozess kulminieren.
Bei den Laserbondern stellen sich die als erstes realisierbaren Einsatzmöglichkeiten das Verbinden von Batteriezellen in Modulen für E-Fahrzeuge dar. Es wird demnächst bereits in der Lieferung eines ersten Gerätes an einen Kunden (der nicht am Projekt teilnahm) umgesetzt.

19. Schlagwörter

Ultraschall-Drahtbonds; Prozessüberwachung; Frühwarnsystem; Laserbonden; Batteriezell-Verbindungen

20. Verlag
Noch offen

21. Preis
Noch offen

Document Control Sheet

| | |
|---|--|
| 1. ISBN or ISSN planned | 2. type of document (e.g. report, publication) Final Report |
| 3. title Guaranteed minimum life time of wire bond connections thanks to improved technologies on the basis of today's status, as well as through introduction of new technologies | |
| 4. author(s) (family name, first name(s)) Sedlmair, Josef, Dr. | 5. end of project October 2014 |
| | 6. publication date planned |
| | 7. form of publication Technical Journals |
| 8. performing organization(s) (name, address) F&K Delvotec Bondtechnik GmbH Daimlerstrasse 5-7 85521 Ottobrunn | 9. originator's report no. |
| | 10. reference no. 16N11467 |
| | 11. no. of pages 73 |
| 12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn | 13. no. of references 1 |
| | 14. no. of tables 1 |
| | 15. no. of figures 38 |
| 16. supplementary notes | |
| 17. presented at (title, place, date) | |

18. abstract

1. Today's state of the art is ultrasonic wire bonding of heavy aluminium wires with welding parameters which are mostly constant or follow a pre-defined profile. For laser welding, the state of the art is welding two separate parts which are presented separately and individually.
2. To increase the lifetime of wire bond connections, a deeper understanding of the main parameters influencing the quality is desirable. Moreover, it would be highly useful to follow the bond formation in a time-resolved fashion so as to enable detection of process deviations at an early point in time, and – as a further goal – to implement corrective action measures. Ideally, a feedback control loop would be implemented. In contrast, today's technology is only capable of inspecting the finished product, well after the bonding process is finished, for defects, and to adapt any process parameters in a further step.
For laser bonding the goal was to transfer the advantages of laser welding to a wire bonder, with a view to presenting one of the bonding partners, i.e. the connection device (wire or ribbon) in the machine itself and to exploit all advantages of a flexible connection path, of automatic positioning and of force-sensitive application of the connection device which are typical of the classical wire bonder.
3. Bond process studies were performed on wire bonders, supported by high-speed video cameras and laser vibrometer. Also a large number of software adaptations were implemented in the wire bonders to permit monitoring and recording process parameters and compare them with externally acquired data about the bond process.
For the laser bonder, a conventional wire bonder was modified in hard- and software so that a laser scanning galvanometer could be built onto the bond head and controlled by the wire bonder.
4. Concerning wire bonding it was shown that fundamental observations about the bond process with relevance to bond quality can very well be extracted from the data which are available and recordable within the wire bonder. Somewhat surprisingly, not only the bond process data are important but also resonance and passive oscillation phenomena are far more influential than previously surmised. Those parasitic oscillation phenomena can be exploited, using the monitoring systems built into the bonder, to realize early-warning systems in the bonder.
For laser bonding it was shown quite rapidly that a well-controlled laser bond process can easily be demonstrated. What is particularly attractive is that much larger connection cross sections can be produced than are possible in ultrasonic wire bonding. This makes laser bonding less of a technological competitor to wire bonding and more of an extension and complementation towards larger currents.
5. The applications for wire bonding are primarily in an improved process monitoring and process control. They will stepwise be realized in standard wire bonders and are expected to culminate in a self-adjusting bond process.
For laser bonders, the first implementations look to be connections of battery cells for power modules in e-vehicles. A first prototype machine is already scheduled for delivery to a customer (who did not participate in the research project).

19. keywords

Ultrasonic wire bonding; process monitoring; early warning system; laser bonding; battery cell connections

20. publisher
TBD

21. price
TBD