Forschungsvereinigung Schweißen
und verwandte Verfahren e. V.

AiF-Mitgliedsbescheinigung (MV)

AiF-Vorhaben-Nr.:
AiF-Antrags-Nr.: /
Blatt-Nr./BA-Nr.: /

Aktenzeichen der MV

(wird von der AiF eingesetzt)

Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben

1. Forschungsthema:

Zuverlässigkeit bleifrei gelöteter Leistungsbaugruppen.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen mit SMD oder Bare-Chip-Leistungsbauelementen wird neben den Drahtbonds in erster Linie vom Ausfallverhalten der Lötstelle bestimmt. Diese werden durch Unterschiede in der thermischen Dehnung zwischen Substrat und Bauteil bei betriebsbedingten Temperaturzyklen hoch belastet. Nach einigen hundert bis tausend Wechseln tritt Low-cycle-Ermüdung der Lötstellen ein, welche zunächst zur Rissbildung und danach zum elektrischen Ausfall führt. Die Einflussgrößen auf die Zuverlässigkeit umfassen die Aufbau- und Verbindungstechnik, die thermische und elektrische Belastung, die Lotlegierung und die Qualität der Lotverbindungen.
Daher ist für Leistungsmodule vom Anwender ein sehr hoher Aufwand für Design-Optimierung und Prozesskontrolle sowie zur Qualifizierung zu treiben, um zuverlässige Produkte zu konstruieren und herzustellen. Methode zur Lebensdauerabschätzung für Leistungsbauelemente und eine Know-how sollen erarbeitet werden, damit hier Design-for-Reliability realisiert werden kann.

3. Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Forschungsziel ist die Darstellung eines robusten Auslegungs- und Designprozesses zur Montage von Leistungsbauelementen mit bleifreien Loten. Folgende Teilziele sollen im Vorhaben bearbeitet werden:

- Identifikation der relevanten Einflussgrößen des Lötprozesses und der Aufbau- und Verbindungstechnik auf die Zuverlässigkeit.
- Versagensmodell für bleifrei gelötete Leistungsbauelemente, auf dessen Basis vom Anwender die Zuverlässigkeit bei anderen Aufbauformen oder Belastungen abgeschätzt werden kann.

Die wirtschaftlichen Ergebnisse umfassen:

- Eliminierung von Blei-Loten aus der Fertigung von Leistungsbaugruppen.
- Robuster Herstellungsprozess für Leistungsmodule für Anwendungen in der Mechatronik oder Kfz-Elektronik, zum Einsatz in rauen Umgebungsbedingungen, bei großen Belastungen und hohen Zuverlässigkeitsanforderungen.

3.1.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Insgesamt werden durch das Vorhaben viele Produkte der Sensorik und der Mechatronik signifikant verbessert. Dies betrifft vor allem die beiden Schlüsselgrößen Kosten und Zuverlässigkeit. Hierdurch können potentiell neue Marksegmente erschlossen und die Marktdurchdringung beschleunigt werden.

3.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Ergebnisse des Untersuchungsprogramms sind quantitative Angaben zur Zuverlässigkeit, angegeben als Anzahl Zyklen bis zum Ausfall sowie Informationen zum Schädigungsverlauf und Ausfallort. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Varianten der Leistungsbauelemente zu gewährleisten, sind aber eine begleitende Untersuchung und insbesondere eine Modellbildung notwendig.

Im Projekt sind folgenden Arbeitsschritte geplant:

- Definition der Testmodule
- Lötversuche
- Charakterisierung der Lötstellen
- Untersuchung der Zuverlässigkeit mittels passiven und aktiven Temperaturwechseltests
- Schadensanalyse an geprüften Bauelementen
- Belastungsanalyse durch Finite-Elemente-Simulationen
- Modellbildung der Zuverlässigkeit von Leistungsbauelementen

3.3 Erzielte Forschungsergebnisse

Daher wurden im Projektjahr 2005 vorwiegend vorbereitende Arbeiten für die eigentlichen Untersuchungen im Projekt geleistet.

3.3.1 Definition der Testmodule/Baugruppen

Die Untersuchung der Zuverlässigkeit von Leistungsbaugruppen soll exemplarisch an repräsentativen Power-Bauformen erfolgen. Als Testmodule für die Baugruppenuntersuchungen sollen:

- Power-SMD-Bauelementen und
- ungehäuste Bauelementen (Bare-Chip-Substraten)

mit Reflowlöten bzw. Vakuumlöten im Vorhaben hergestellt werden. Die Auswahl von Bauelementen, Leiterplatten für SMD-Bauformen, Bare-Chip-Substraten und Lotlegierungen wurden zusammen mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschuss festgelegt. Für die Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Lotverbindungen für Power-SMD Bauformen werden Bauelemente mit DPAK und D2PAK-Gehäusen eingesetzt. Diese beiden Bauformen decken im wesentlichen die gehäusten SMD-Leistungsbauelementen für Leiterplatten, die industriell eingesetzt werden, ab. Als Leistungsbauelemente wurden hierfür:

- IRFR110 HEXFET Power MOSFET, Gehäuse: DPAK (TO 252AA)
- IRF510S HEXFET Power MOSFET, Gehäuse: D2PAK (SMD-220)

ausgewählt. Wichtige Auswahlkriterien wie RoHS-Konformität, Verfügbarkeit, Eignung für Power-Cycling-Tests, maximale zulässige Betriebstemperatur etc. wurden berücksichtigt.

Für Anwendungen bei denen die Temperaturgradienten hauptsächlich von Power-Cycling statt aufgrund rauen Umgebungsbedingungen im Betrieb entstehen können die realen Ausfall-mechanismen der Lotverbindung nur mit dem Prüfverfahren Power-Cycling stimuliert werden. Eine Schaltung, die für Power-Cycling-Tests an SMD-Bauformen geeignet ist, soll deswegen realisiert werden. Die Temperaturstabilität der MOSFETs IRFR110 und IRF510S sind im Power-Cyclingbetrieb untersucht worden. Die Gate-Spannung wird auf einem konstanten Niveau mit einem fest geregelten Verlustleistung beibehalten, während der Temperatur im Bauteil steigt (Abblidung 1). Der gewählte Arbeitspunkt ist somit stabil.

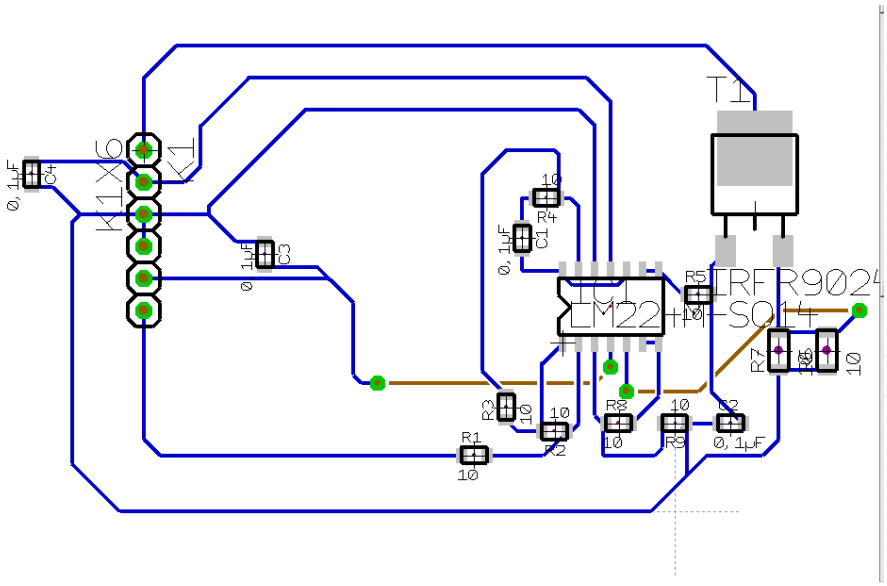

Abbildung 1: Layout einer Schaltung für Power-Cyclingbetrieb.

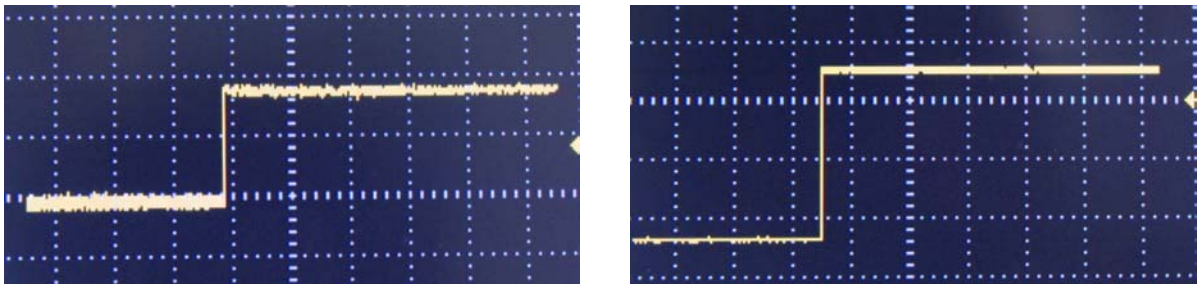

Abbildung 2: Gatespannung eines IRFR110 MOSFET (links) bzw. IRF510S MOSFET (rechts) auf FR4-Leiterplatte während Power-Cycling mit 2,4 W, I_{DS} = 1,2 A.

Bauteil	60 Sek. Aufheizen	120 Sek. Abkühlen
IRFR110	127°C	31°C
IRF510S	86°C	26°C

Tabelle 1: Temperatur nach 60 Sekunden Aufheizen mit 2,4 W Verlustleistung im Bauteil und anschließend 120 Sekunden Abkühlen; Die Temperatur ist an dem Anschlussflansch der DPAK bzw. D2PAK mit einem Pt100-Element gemessen worden.

Außer aktiven Bauelemente werden so genannte „Dummy-Bauteile“ in DPAK und D2PAK-Gehäusen eingesetzt. Als Träger für die Bauelemente sollen FR4-Leiterplatten mit unterschiedlichen Glasgewebe-Harzanteilen sowie Leiterplatten aus halogenfreien Materialien verwendet werden, um dem Einfluss der thermo-mechanischen Eigenschaften der Leiterplatten auf der Lebensdauer der Lotverbindung untersuchen zu können.

Folgende Kriterien sind für die Baugruppen festgelegt worden:

- Leiterplattendicke: von 1,0 mm bis 2,0 mm
- Anzahl Kupferlagern: 4

- LP-Finish (Oberfläche der Lot-Pads): NiAu und Ag
- Layout einer Schaltung für Power-Cycling-Tests.
- Kriterien der Materialauswahl, Layout und Testanforderungen:
  RoHS-Konformität, Richtlinien des Fachverbands Elektronik-Design „FED“ und IPC-Standards.

Von der Fa. Würth Elektronik ist Interesse bekundet worden, uns mit der Fertigung der Leiterplatten zu unterstützen.

Für die Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Lotverbindungen für Bare-Chip-Substrate werden DCB-Keramiksubstraten von der Fa. Curamik eingesetzt. Verschiedene Einflussgrößen wie der Kupferdicke des Substrats, Chip-Größe des aufgelöteten ICs sollen in den Untersuchungen variiert werden. Die Layouts der DCB-Substrate (Abbildung 3) eignen sich für die Montage von Leistungs-Chips, z.B. IGBTs.

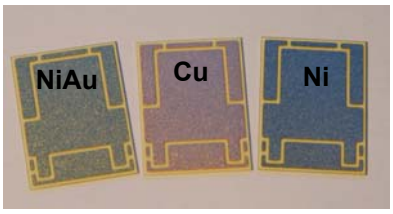

Abbildung 3: Design der DCB-Substrate für die Untersuchungen an Bare-Chip-Substraten.

3.3.2 Belastungsanalyse durch Finite-Elemente-Simulationen

Die anzuwendenden Lebensdauermodelle beschreiben die Risskinetik in Abhängigkeit von mikroskopischen Belastungen im Lot. Da die benötigten Spannungen und Dehnungen experimentell kaum zugänglich sind, werden sie bevorzugt durch Finite-Elemente-Simulation ermittelt.

4. Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für KMU

4.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die Leistungselektronik ist eine wichtige Sparte der deutschen Elektronikindustrie. KMU kombinieren Maschinenbau und Elektronik zu erfolgreichen Produkten wie Leistungsendstufen, etwa zur Ansteuerung von Zündung, ABS oder Lüftermotoren für Kfz. Zu den Produkten der Mechatronik zählen weiter integrierte Antriebe für Elektrofahrzeuge, und Hilfsantriebe für Pkw, Schienenfahrzeuge sowie Industrieanlagen. Die Leistungselektronik wurde früher eher mit Standard-Modulen aus Mikroelektronik, Leistungselektronik und Elektromotoren realisiert. In der Mechatronik setzt sich dagegen aus Gründen von Kosten und Baugröße eine anwendungsspezifische integrierte Aufbautechnik durch.
Die Unternehmen können die Ergebnisse des Vorhabens zur Qualifizierung und Optimierung ihrer Produkte und Prozesse nutzen. Dabei sind die Technologiecharakterisierung und die Prozessqualifikation besonders aufwendige Schritte, da die Untersuchung einer großen Anzahl von Varianten und lang dauernde Zuverlässigkeitstests notwendig sind. Dieser Entwicklungszyklus muss für jede neue Form von Leistungsbauelementen neu durchlaufen werden und stellt einen großen Kostenfaktor dar.
Mit dem Vorhaben sollen nun übertragbare Regeln für die Herstellung zuverlässiger Leistungs-Baugruppen mit bleifreien Loten ermittelt werden, um den Einfluss von Konstruktion und Fertigung auf die Zuverlässigkeit zu modellieren. Durch ein übertragbares Modell des Ausfallverhaltens ist eine drastische Reduzierung des Aufwands für die Qualifizierung sowie die notwendigen experimentellen Untersuchungen zu erreichen.

Die Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse wird in den Fachgebieten „Werkstoffe, Materialien“, „Produktion“ sowie „Elektrotechnik“ und in „Mess-, Regel-, Automatisierungstechnik“ erfolgen. Das Projekt ist dabei besonders für die Wirtschaftszweige „Maschinenbau“, „Elektrotechnik“ und „Fahrzeugbau“ von Relevanz.

4.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit besonders der KMU

Die voraussichtlich zwingend notwendige Umstellung auf bleifreie Lote bedeutet für die Unternehmen, dass sie ihre bisherigen bleibasierten Standardprozesse umstellen müssen. Dazu ist eine neue Technologiequalifizierung, eine Prozessqualifizierung und eine produktspezifische Qualifizierung notwendig. Da kleine Unternehmen auch häufig nur kleine Stückzahlen von Leistungsbaugruppen fertigen, sind die stückbezogenen Entwicklungs- und Qualifizierungskosten bei ihnen besonders hoch. Das Vorhaben kann es ermöglichen, die Zahl der untersuchten Technologie-Varianten im Optimierungsprozess und somit die Qualifizierungskosten zu reduzieren. Bei kleinen Unternehmen und kleinen Baugruppen-Stückzahlen wird dieser Kosteneffekt besonders wirksam. Auch können KMU leichter eine geschlossene F&E-Kette im eigenen Haus aufrecht erhalten, hierdurch Kosten und Entwicklungszeit sparen und weiterhin ihre KMU-typische Flexibilität erhalten.

5. Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Nach erfolgreichem Abschluss des Vorhabens müssen die Ergebnisse an KMU transferiert werden. Der Abschlussbericht soll daher eine Handlungsanleitung zur Auslegung von zuverlässigen Leistungsbaugruppen mit bleifreien Loten und die dazu notwendigen Basisdaten (Risswachstumskurven) enthalten. Die branchenüblich Produktqualifizierung der Baugruppen wird weiter erforderlich sein.
Die im projektbegleitenden Ausschuss mitwirkenden Firmen haben großes Interesse an den Zuverlässigkeitsdaten und übertragbaren Regeln zur Auslegung und Fertigung von Leistungsbaugruppen mit bleifreien Loten. Die Anwender wollen dieses Wissen zur Optimierung und Qualifizierung von Elektronik-Hardware systematisch nutzen. Sie erwarten, dass sie speziell Finite Elemente basierte Methoden wesentlich stärker vorteilhaft einsetzen können.

Im projektbegleitenden Ausschuss sind sowohl Hersteller von Materialien, Bauteilen und Loten als auch Hersteller von Leistungsbaugruppen sowie End-Anwender vertreten:

- Die Teile-Lieferanten werden durch das Vorhaben in die Lage versetzt, ihre Zulieferprodukte besser nach den Spezifikationen der Anwender herzustellen und zu qualifizieren.
- Die Hersteller von Power-Baugruppen können bereits bei der Konstruktion die Zuverlässigkeit abschätzen. Dazu erhalten sie ein Werkzeug, mit dem sie bleifreie Leistungsbaugruppen systematisch in Bezug auf die AVT und die Zuverlässigkeit verbessern können.
- Der dritte Umsetzungs-Aspekt ist die Generierung einer Spezifikation, welche Grenzwerte für zulässige, durch die Herstellung bedingte Eigenschafts-Abweichungen an Leistungsbaugruppen angibt. Dieser ist besonders für die Anwender von Interesse.

Die Forschungsergebnisse werden auch mit Hilfe der gängigen Publikationsmethoden, durch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und auf Tagungen bekannt gemacht. Als spezielle Möglichkeiten können wir Seminare und Anwenderschulung bei der Forschungsstelle zur Auslegung und Lebensdauerprognose anbieten.

6. Durchführende Forschungsstellen

6.1 Forschungsstelle

Universität Freiburg
IMTEK – Institut für Mikrosystemtechnik
Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik
Georges-Köhler-Allee 103
79110 Freiburg im Breisgau
Telefon: 0761-203 - 7291, Telefax: - 7292
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde

Ort, Datum	Unterschrift des Leiters und Stempelabdruck der Forschungsstelle