

Harsche Anwendungsbedingungen und ihr Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Weichlötverbindungen in elektronischen Baugruppen im Einsatz unter der Motorhaube

T. Ahrens*, F. W. Wulff[†], S. Wiese[#], L. Nitopi^x

* Fraunhofer ISIT, Itzehoe; [†]K&S, Singapur; [#]TU Dresden; ^xMagneti Marelli, Italy

1 Kurzfassung

Die Lebensdauer von Motormanagement-Baugruppen im Automobil ist hauptsächlich durch thermomechanische Materialermüdung der Lötstellen begrenzt. Zur Einschätzung der Zuverlässigkeit einer Baugruppe initiierte Magneti Marelli eine Untersuchung mit folgendem Programm:

- Recherche der Temperaturschwankungen an europäischen Orten
- Aufnahme von Temperaturprofilen an Hot Spots (Zonen hoher Wärmedissipation) an einer Einspritz- und Zündzeitpunkts-Steuerlektronik während simulierter und realer Testfahrten
- Beschleunigte Zuverlässigkeitsprüfung mit Temperaturzyklen zur Lebensdauersimulation auf hohem, mittleren und niedrigen Temperaturniveau
- Messung der thermomechanischen Dehnung an Bauelementen und Baugruppen im Verlauf von Temperaturzyklen.

Das Ergebnis zeigt, dass die Schädigung überwiegend oberhalb der Raumtemperatur erfolgt. Metallographische Untersuchungen zeigen Ermüdungsrissbildung in Lötstellen an großen SMD-Widerständen sowie an bedrahteten Leistungsdioden in PTH-Lötverbindungen (PTH: Plated-through hole = durchkontaktierte Bohrung).

2 Einleitung

ECU (Electronic control units = elektronische Motormanagement-Systeme) haben Schlüsselfunktion für Leistung und Verbrauch moderner Benzinmotoren für Automobile. Die meisten Motorfunktionen, wie Brennstoffeinspritzung, Zündung, Lufteinlass, oder Auspuff-Gaszusammensetzung werden von ECU überwacht und/oder geregelt. Die

Standard-Aufbautechnik für ECUs sind Leiterplatten-Baugruppen auf FR4-Laminat, doppelseitig mischbestückt, d. h. sowohl Oberflächen- als auch konventionelle Montagetechnik (SMT und THT), geschützt in einem Metallgehäuse.

Von dieser Einheit wird eine sehr hohe Zuverlässigkeit und Robustheit unter harschen Umgebungsbedingungen erwartet. Während die Prüfbedingungen in Qualifikationstests durch entsprechende Normen beschrieben sind, gibt es reale Betriebsbedingungen mit schwerer wiegenden Effekten als denen, die in Standard-Qualifikationstests vorkommen. Drei Faktoren bestimmen die Temperaturbelastungen der ECU-Lötstellen: die Umgebungstemperatur außerhalb des Automobils, die Motor-Abwärme, und die Wärmedissipation elektronischer Bauelemente während des Betriebs (Verlustwärme). Diese örtlich begrenzten und kurzzeitigen Temperaturzyklen werden in Standard-Qualifikationstests nicht berücksichtigt. Der meiste Aufwand an Untersuchungen zur Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen deckt den Einsatzbereich von Computer-/Telekommunikationseinrichtungen ab [1,6].

Die vorliegende Untersuchung wurde durchgeführt, um das Lötstellenverhalten einer repräsentativen elektronischen Einspritz- und Zündungssteuerung aufzuklären. Diese ECU arbeitet in einer „feindseligen“ Umgebung im Automobil, und zwar in der Enge des Motorraums in einem kompakten Stadtauto, wo nur wenig kühlende Luft strömt. Die ECU besteht aus einer typischen elektronischen Leiterplattenbaugruppe mit Bauelementen wie einem PLCC68-Mikroprozessor, Leistungsdioden, Leistungstransistoren, großen Chipkondensatoren und Chipwiderständen. Ein wichtiger Grund für die Auswahl dieser Baugruppe für die Musteruntersuchung ist ihre hohe Verkaufszahl – mehr als 1 Million Einheiten wurden bis zum Beginn dieses Projekts in Pavia hergestellt.

3 Erstellung des einsatzbedingten Beanspruchungsprofils

3.1 Außentemperatur: Klimadaten

Zur Ermittlung der möglichen Anwendungsbedingungen im Laufe eines Jahres in den verschiedenen Verkaufsregionen wurde eine Recherche durchgeführt. Das folgende Histogramm zeigt die Häufigkeiten der Minimaltemperaturen eines Jahres für Palermo

in Italien und Helsinki in Finnland. Die zwei Städte wurden als Beispiele für extrem unterschiedliche mittlere Temperaturen innerhalb Europas ausgewählt.

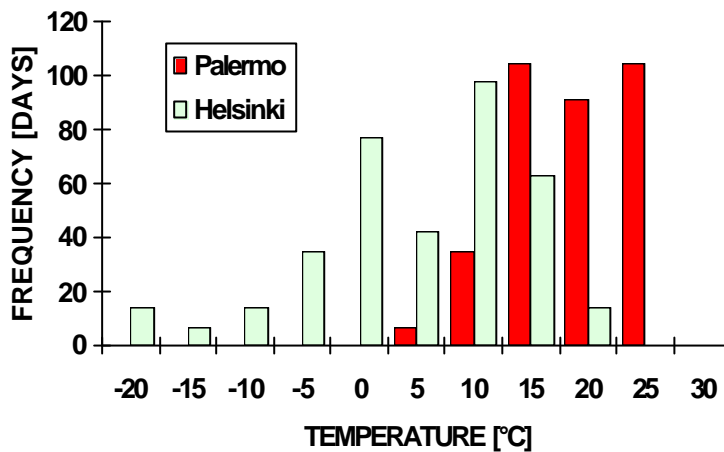


Bild 1:
jährliche Anzahl der Tage
eines Minimum-
Temperaturwertes in einer
südlichen (Palermo) und
einer nördlichen (Helsinki)
europäischen Stadt

Die Temperaturen in Palermo sind im Mittel hoch, dabei liegen sie in einem engen Temperaturbereich. In Helsinki herrschen im Mittel niedrige Temperaturen, aber mit einer breiten Streuung. Andere europäische Städte liegen mit ihren Klimabedingungen zwischen diesen beiden Extremen. Das Kontinentalklima in Moskau wurde aufgrund der geringen Verkaufszahlen nicht in die Untersuchung einbezogen.

3.2 Wärmeverteilung aufgrund in der Elektronik umgesetzten Leistung

Um die „Hot Spots“ der Elektronik zu lokalisieren, wurden während des Betriebs auf einem Motorsimulator Thermographiebilder der Einheit aufgenommen. Bild 2 zeigt die Temperaturverteilung auf der Baugruppe unter Hochtourbedingungen.

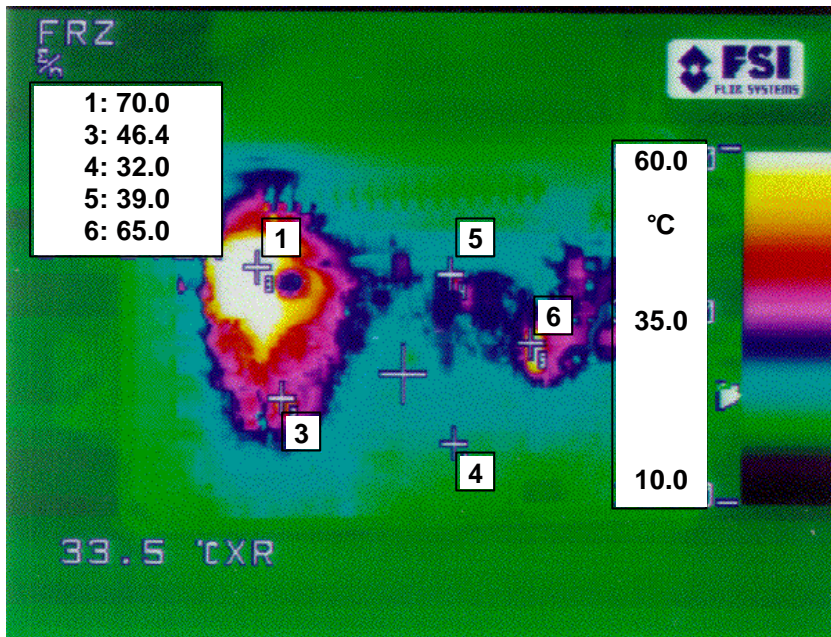


Figure 2:

Thermographiebild einer geöffneten ECU-Leiterplatte in Betrieb auf einem Motorsimulator

1: Zener Schutzdiode

3: Spannungsteiler

4: PLCC68 Mikroprozessor

5: Schutzdiode

6: Schutzwiderstände

Punkt 4 direkt am PLCC68 Mikroprozessor ist kein „hot spot“. Die Temperaturen an den markierten Punkten wurden mittels Thermoelementen überprüft.

3.3 Eigenerwärmung im realen Fahrtest

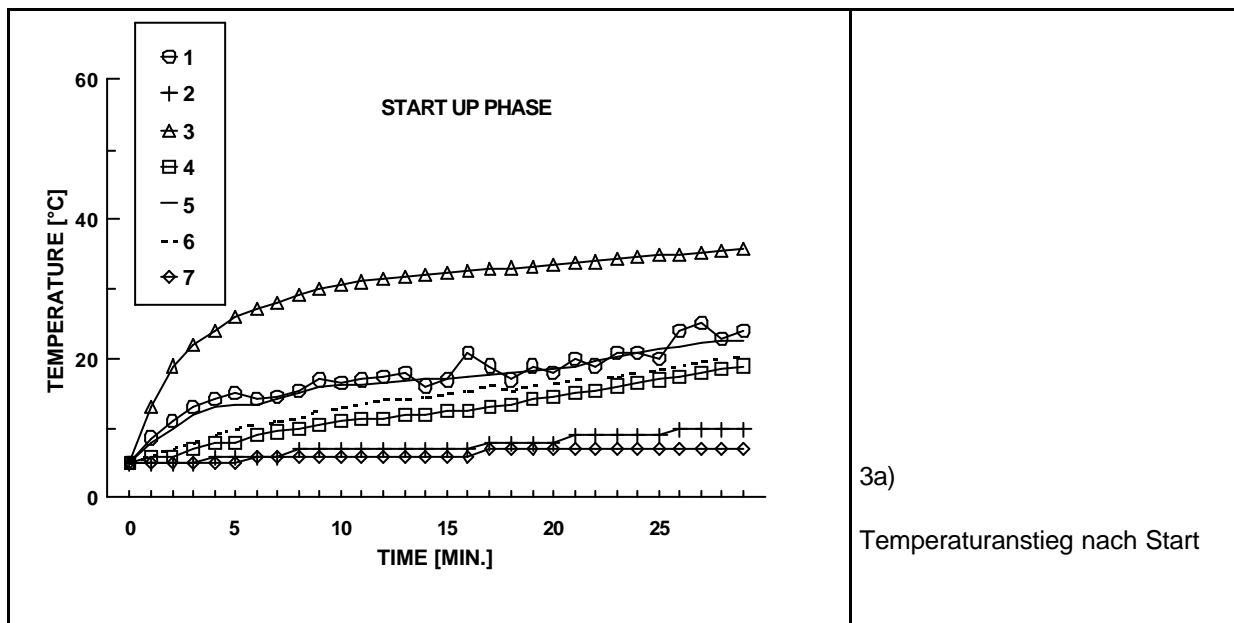
Sieben Thermoelemente wurden an der ECU montiert und diese in einen Testwagen eingebaut. Die Thermoelemente mit den Nummern 1 sowie 3-6 wurden auf die gleichen Stellen wie im Thermografiebild montiert (Bild 2). Das Thermoelement Nr. 2 wurde auf der Unterseite der Leiterplatte gegenüber vom Punkt 1 platziert. Das siebte Thermoelement wurde an der Außenseite der ECU am Aluminiumgehäuse montiert, um den Effekt der Motorabwärme auf die Einheit zu erfassen.

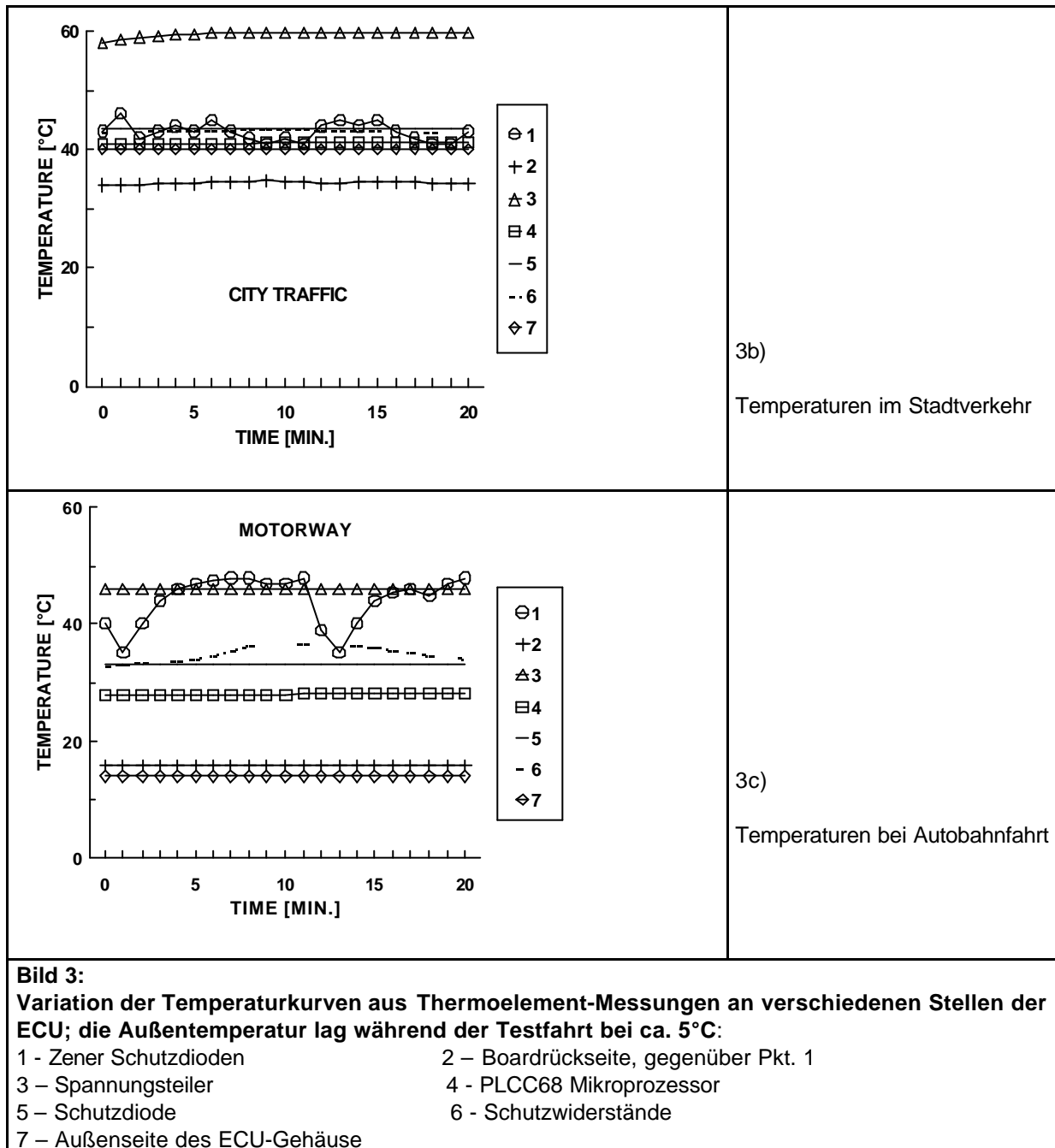
Die Temperaturmessungen wurden unter den folgenden Fahrbedingungen durchgeführt: Kaltstart, Stadtverkehr, Autobahnfahrt, Landstraße, und auf einer engen Bergstraße. Der größte Temperaturanstieg während der Startphase wurde an einem Spannungsteiler gefunden, bei einer Leistungsabgabe von 122 mW (Kurve 3 in Bild 3). Der Spannungsteiler war als Paar von zwei 47 Ω SMD-Widerständen der Baugröße 2010 realisiert. Dioden und Widerstände, die den Schaltkreis vor Spannungsspitzen der Zündspule schützen, zeigten eine Temperaturerhöhung um 15°C in den ersten 5 min., danach stieg die Temperatur langsamer mit einer Rate von ca. 0,25°C/min.. Andere Leistungsbaulemente zeigten einen linearen Temperaturanstieg von ca. 0,3°C/min. Das Metallgehäuse der Einheit erwärmte sich mit einer linearen Rate von ca. 0,1°C/min.

Die höchste Temperatur am Metallgehäuse wurde im Stadtverkehr gemessen, wenn die Luftbewegung unter der Motorhaube aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeit gering ist (Bild 3b). Im Stadtverkehr war die Gehäuse-Temperatur 35°C höher als die Außentemperatur von 5°C zur Zeit der Testfahrt. Bei Autobahnfahrt ist die Kühlwirkung aufgrund der hohen Geschwindigkeit hoch (Bild 3c). Hier war die Gehäusetemperatur mit 10°C über Außentemperatur am geringsten.

Die Temperatur der Bauelemente auf der Leiterplatte ist absolut spezifisch: Die größten Temperaturschwankungen werden an der Zenerdiode und den Widerständen gefunden, die den Schaltkreis vor der Hochspannung der Zündspule schützen. Diese Bauelemente erfahren Temperaturzyklen von 15°C auf der Autobahn, und 5°C im Stadtverkehr. Die Periode dieser Zyklen variiert zwischen 5 und 10 min. Im Gegensatz dazu wurden sehr stabile Temperaturen am Spannungsteiler und an dem großen PLCC68 Mikroprozessor gefunden. Der Spannungsteiler zeigte die höchste Temperatur, mit 30°C über der Gehäusetemperatur, während der Mikroprozessor mit 5°C über der Temperatur des Metallgehäuses die niedrigste Temperatur auf der Leiterplatte zeigte.

Nach dem Abschalten des Motors liefen die Temperaturen aller Messstellen bei einem Wert von 30°C über Außentemperatur zusammen. 15 min. später begann die Abkühlung, und weitere 30 min. darauf war die Außentemperatur erreicht.





4 Simulation der Lebensdauerbeanspruchung auf einem Testboard

4.1 Die Extremwerte der klimatischen Bedingungen

Drei extreme Umgebungen wurden auf Basis der Klimarecherche ausgewählt:

- A) Jahreszeitenwechsel: Langsame Zyklen zwischen -10°C und $+40^{\circ}\text{C}$, 5 Tage pro Zyklus

B) Konstant kalt bei -10°C

C) Konstant warm bei $+40^{\circ}\text{C}$.

Die Prüfbedingungen B und C wurden ausgewählt, um herauszufinden, ob die Schädigung im warmen oder im kalten Bereich der Zyklen entsteht.

4.2 Testboardentwurf und Montage

Die Bauelemente, die in den Thermographie-Beobachtungen auf dem Motorsimulator und auf den Testfahrten als besonders kritisch erkannt worden waren, wurden in großer Zahl in einem Testboard-Entwurf integriert:

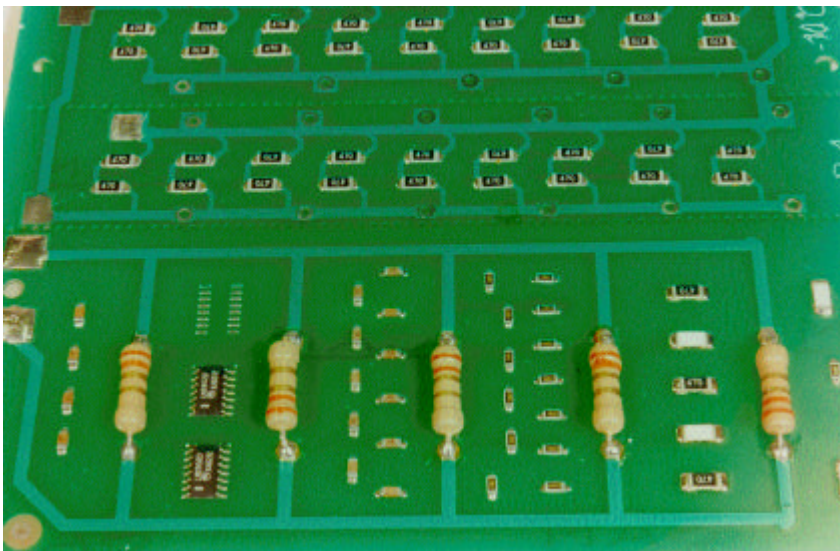


Bild 4: Testboard für Ermüdungs-Experimente

1. Große Anzahl von Spannungsteilern
2. bedrahtete Leistungswiderstände zur lokalen Heizung der Leiterplatte
3. verschiedene Chipkondensatoren, Chipwiderstände, und SO-Bauelemente, beheizt von den Leistungswiderständen

Spannungsteiler und Leistungswiderstände wurden an eine Stromversorgung angeschlossen. Die Widerstands- und Stromwerte in den Leiterbahnen wurden so gewählt, dass eine Temperaturbelastung ähnlich den Verhältnissen entsteht, die in der Steuerelektronik während der Testfahrten beobachtet wurde. Die Lötstellen an den Leistungswiderständen und an den Spannungsteilern dienten als Testobjekte für „aktive“ Prüfzyklen. Die SMT-Bauelemente zwischen den Heizquellen dienten als Proben für „passive Ermüdung“. Das Testboard wurde für den Einbau in ein Standard-Aluminiumgehäuse ausgelegt. Die Lotpaste wurde mit einer $200\ \mu\text{m}$ starken Schablone gedruckt, und eine Anzahl von Testboards wurde im üblichen Reflowlötprozess gefertigt. Ein

Wellenlötprozess wurde nicht durchgeführt – die bedrahteten Leistungswiderstände wurden manuell eingelötet.

4.3 Simulierte Fahrzyklen

Um die realen Betriebsbedingungen zu simulieren, wurde eine zyklische elektrische Belastung („Mikrozyklen“) den „Worst Case Klimabedingungen“ wie in Abschnitt 4.1 beschrieben überlagert. Aus der Auswertung der Testfahrten folgte, dass ein rascher Zyklus von je 400 s an bzw. aus das häufigste, und wahrscheinlich am meisten schädigende Ereignis war. Ähnliche Temperaturwechsel wie im Betrieb beobachtet, wurden an und um die verschiedenen Bauelemente im Test erzeugt.

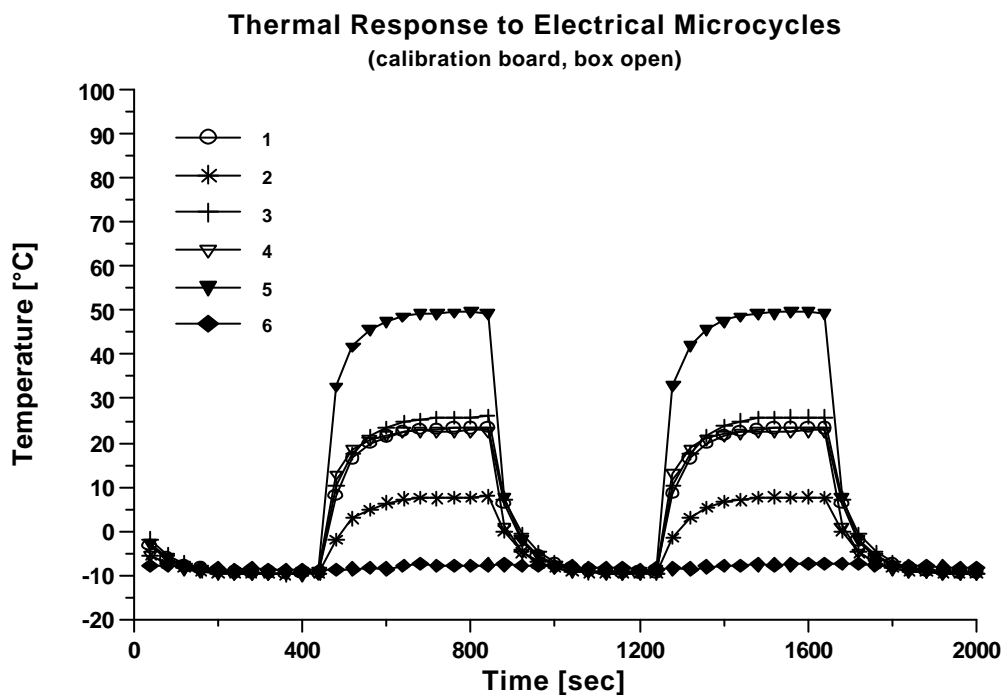


Bild 5:

Active Temperaturzyklen (Mikrozyklen), gemessen am Testboard bei -10°C Umgebungstemperatur. Messorte waren:

- 1: Lötverbindung an der Boardkante am ersten DK-Widerstand
- 2: Lötverbindung am DK-Widerstand in der Mitte des Testboards
- 3: Lötverbindung an einem SMD-Widerstand in der Boardmitte
- 4: Lötverbindung an einem SMD-Widerstand am Testboard-Rand
- 5: Oberseite des DK-Widerstands
- 6: Außenseite des Metallgehäuses

Diese Beanspruchungen wurden für die drei verschiedenen Umgebungsbedingungen für bis zu drei Monate, bzw. 12.000 elektrische Mikrozyklen durchgeführt. Diese

Simulationsdauer entspricht etwa 10 Jahren Lebensdauer des Automobils mit dieser ECU. Nach jeweils 4000 Mikrozyklen wurden Proben für eine Überprüfung der Schädigung entnommen.

5 Schädigung im Werkstoffgefüge

5.1 Standard-Wechselbeanspruchung

Eine ECU wurde 500 Temperatur-Schockzyklen zwischen -40°C und $+125^{\circ}\text{C}$ mit 1 h Haltezeit auf der oberen und der unteren Temperatur. Nach den Zyklen war die Baugruppe elektrisch noch in Ordnung. Eine Sichtprüfung zeigte keine offensichtlichen Ermüdungsrisse an der Außenseite der Lötverbindungen. Querschliffe zeigen dagegen Ermüdungsrisse in den Lötverbindungen an der Leistungsdiode, am IC-Bauelement, und an beiden untersuchten großen SMD-Widerständen (Baugröße 2212). An den J-Anschlüssen des PLCC-Bauelements wurden keine Spuren von Ermüdungseffekten festgestellt.

Visuelle Inspektion zeigt keine Anzeichen von Ermüdung an den Lötverbindungen der Spannungsteiler (Bild 6, kleines Bild). Der Querschliff zeigt an beiden Enden unter dem Bauelement kleine, aber offensichtliche Anrisse (Bild 6).

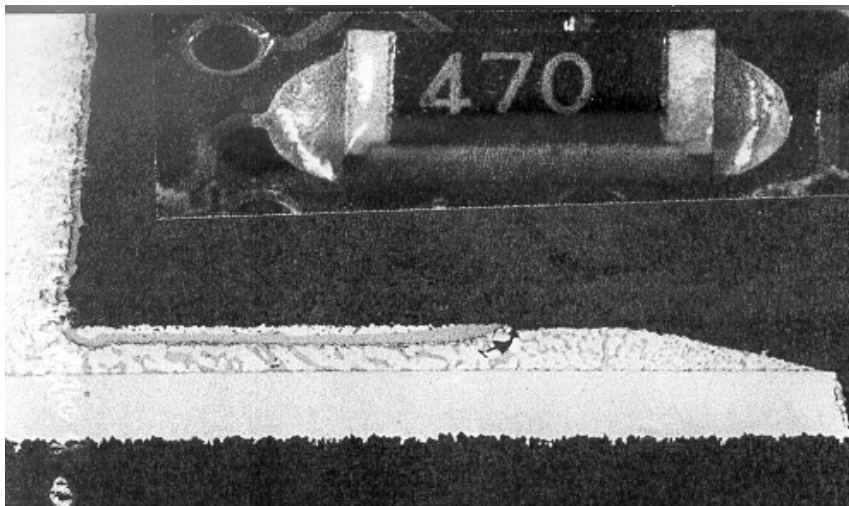


Bild 6:

Kleiner Anriss an einer Lötverbindung unter dem Spannungsteiler-Widerstand nach 500 Zyklen -40°C / $+125^{\circ}\text{C}$

Großes Bild: Querschliff

**Einsatz:
Inspektionsaufnahme**

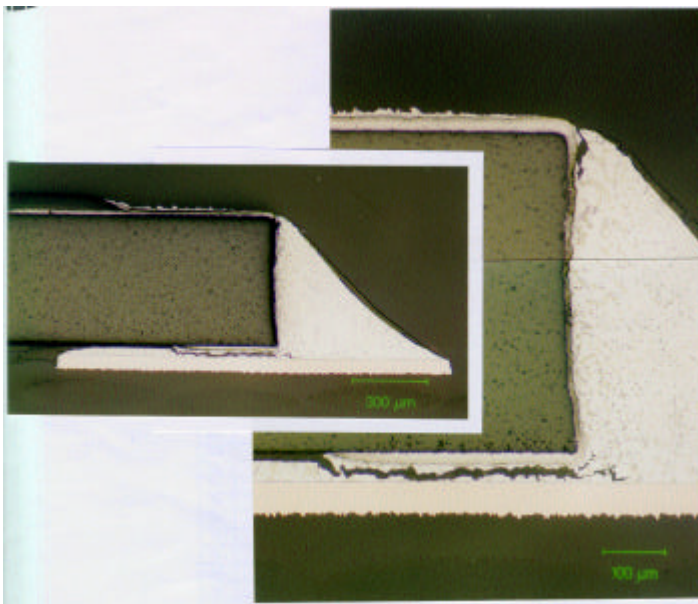
5.2 Lebensdauersimulation, kalt

Nach zwölftausend Mikrozyklen in der „konstant-kalt“-Umgebung war nur eine sehr geringe Schädigung auffindbar. Am SMT-Widerstand wurden Ermüdungs-Anrisse von ca. 30 µm Länge am oberen Benetzungsrand der Lötstelle festgestellt.

5.3 Lebensdauersimulation, warm

In der „konstant warm“ Umgebung (+40°C) erzeugten die elektrischen Mikrozyklen deutliche Schädigung. Nach 8.000 Zyklen waren Anrisse von ca. 30 µm Länge erkennbar, und zwar von oben an der Stirnseite des Bauelementes in die Lötverbindung hinein. Nach 12.000 Zyklen betrug die Risslänge ca. 100 µm. Unter einem Ende des SMT-Widerstandes wurde ein Riss von 500 µm Länge gefunden (Bild 7a). In den Lötstellen der separaten (passiven) SMD auf diesem Testboard wurden hingegen keine Anzeichen von Ermüdungsschädigungen gefunden.

Einen finalen Riss durch eine DK-Lötverbindung zeigt Bild 7b: Das Schlibfbild zeigt eine Ermüdungsrisslänge von mehr als 500 µm. Der Riss führt vom lötseitigen Meniskus nahe der Anschlussoberfläche, aber noch im Lot in die Bohrung hinein. Der elektrische Kontakt ist wohl noch gegeben, aber die Lötverbindung hat mechanisch schon versagt.



a) großer Riss unter dem SMT Spannungsteiler



b) Bruch am DK-Widerstandspin

Bild 7: Ermüdungsrisse in den Lötstellen nach 12,000 Mikrozyklen bei +40°C Umgebungstemperatur

5.4 Simulation der Jahreszeiten-Schwankungen

3 Monate Testdauer entsprachen 23 langsamen Umweltzyklen und 12.000 überlagerten Mikrozyklen. Am aktiven SMD-Widerstand zeigte sich ein ca. 100 µm langer Riss an der Stirnseite von oben in die Lötverbindung hinein. Unter dem Bauelement war kein Riss erkennbar. Die DK-Lötverbindungen an den Heizwiderständen zeigten Ermüdungsrissse kürzer als 400 µm, und diese ausschließlich von der Lötseite aus. Unter diesen Bedingungen wirken die Mikrozyklen teils unter „warmen“, teils unter „kalten“ Bedingungen. Die Risserscheinung entspricht eher der kalten als der warmen Umgebung.

5.5 Thermomechanisches Verhalten des Testboards

Mit Hilfe von DMS (Dehnungsmessstreifen) wurde die thermische Dehnung des gelöteten 2010-Widerstands und der Leiterplatte gemessen, wie in /2/ beschrieben, in Übereinstimmung mit ASTM-Standards /3, 4/. Die Messungen wurden an einem Testboard durchgeführt, welches als „Kalibrierboard“ für die Umwelt-Temperaturzyklen gekennzeichnet wurde.

Bild 8 zeigt die Dehnungsdifferenz zwischen Widerstand und Leiterplatte, auf dem Kalibrierboard gemessen. Die Figur besteht aus mehreren Zyklen. Die Steigungen der Kurvenabschnitte sind in Tabelle 1 für drei verschiedene Temperaturbereiche gezeigt. Je größer die Steigung, desto mehr Kriechverformung hat das Lot erfahren (Kriechen = irreversible zeitabhängige Lotdeformation).

DMS-Messung	α (thermischer Ausdehnungskoeffizient) (ppm/°C)			Tabelle 1: Messwerte der thermischen Dehnung
	I -10 to 35	II 35 to 75	III 75 to 90	
Temperaturbereich [°C]				
„freie“ Leiterplatte	15	16	16	
Gelöteter Widerstand	4.8	4.4	4.4	
Dehnungsdifferenz zwischen Widerstand und Leiterplatte	5.1	8.0	10.7	

Der Schmelzpunkt des eutektischen Lotes liegt bei 183°C. Die homologe Temperatur (Quotient aus Anwendungstemperatur und Schmelztemperatur, gemessen in K) dieser Legierung liegt bei 20°C also schon bei 0,64. Deshalb ist verständlich, dass bei Raumtemperatur ein merkliches Kriechen des Weichlotes stattfindet, d. h. eine zeitabhängige Dehnung praktisch ohne eine Elastizitätsgrenze einsetzt /5/. Die Kriechgeschwindigkeit steigt mit der Temperatur. Die Schädigung nimmt durch Kriechermüdung in der Lötstelle zu, was sich durch das Wachstum von Ermüdungsrissen zeigt. Bild 8 zeigt ferner, dass bei tiefer Temperatur kein spontanes Nachgeben erfolgte, weil die Temperatur-Dehnungskurve hinunter bis -10°C ohne Sprung verläuft. Tabelle 1 zeigt außerdem die Werte für die freie Leiterplatte und die Dehnung des gelöteten Widerstands. Der Wert für den Widerstand erscheint relativ niedrig (der Literaturwert für Aluminiumoxidkeramik ist 7 ppm/°C). Eine mögliche Ursache kann eine lokale Boarddurchbiegung sein.

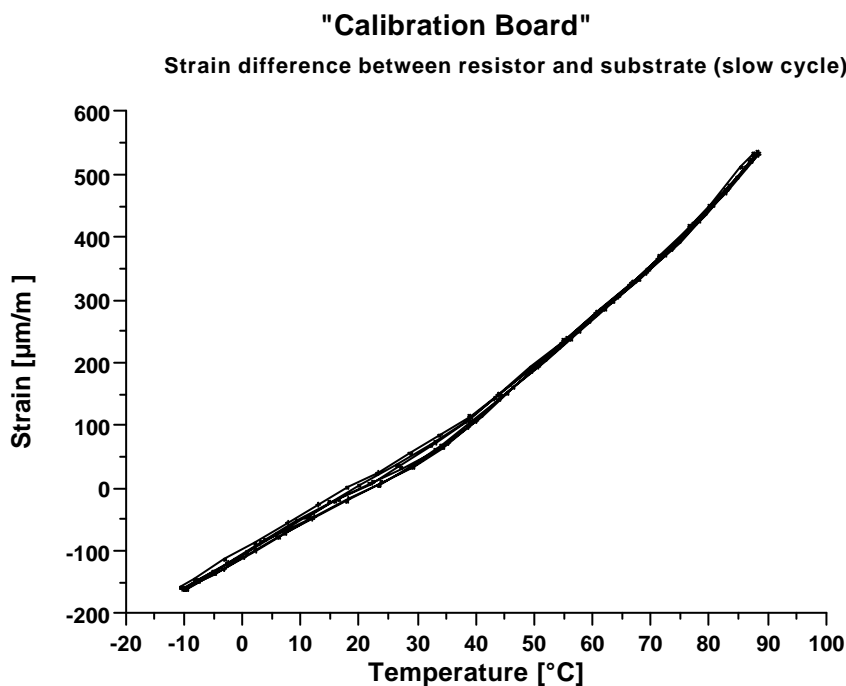


Bild 8: Dehnungsdifferenz zwischen SMT-Widerstand und Leiterplattenoberfläche

6 Schlussfolgerungen

Sowohl für die bedrahteten, als auch für die Oberflächenmontage-Lötstellen erzeugt der simulierte Lebensdauertest andere Beanspruchungsbedingungen als der Standard-Qualifikationstest, erkennbar an den unterschiedlichen Risspfaden durch die Lötstellen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass auch eine Langzeit-Belastung in harscher Umgebung nicht zu einem Versagen dieser elektronischen Steuereinheit führt. Der am meisten schädigende Effekt wird in der Beanspruchungsumgebung „heiße simulierte Lebensdauer“ gesehen, in der elektrische Mikrozyklen einer konstanten Umgebungstemperatur von +40°C überlagert sind.

7 Literatur

- /1/ Lau, J. H. (Ed.): Solder Joint Reliability - Theory and Applications. Van Nostrand Reinhold, New York (1991).
- /2/ Ahrens, T.; Krumm, M.: Deformation Measurements at Components, Printed Wiring Boards and Microelectronic Assemblies to Ensure the Reliability of a System. Proc. 2. Intern. European Packaging Conf. EuPac'96, DVS-Berichte 173 (1996) 108-112.
- /3/ ASTM E 1237-88 Standard Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages.
- /4/ ASTM E251-92 Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages.
- /5/ Hall, P.M.: Creep and Stress Relaxation in Solder Joints. In /1/, 306-332.
- /6/ Danielsson, H.: Lead-Free Soldering Causes Reliability Risks for Systems with Harsh Environments. Advancing Microelectronics, Volume 29, No. 3 May/June (2002)