

Moderne Prüftechniken bei thermomechanischen Fragestellungen an elektronischen Bauelementen und Baugruppen

S. Fischer, D. Pustan, E. Zukowski, J. Wilde, Universität Freiburg – IMTEK, Institut für Mikrosystemtechnik, Lehrstuhl für Aufbau- und Verbindungstechnik, Georges-Köhler-Allee 103, 79110 Freiburg

Kurzfassung

Die thermomechanische Verträglichkeit von Mikrowerkstoffen im Materialverbund zählt zu den wichtigen Fragestellungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Die Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der im Bauelement verwendeten Materialien führt zu thermomechanischen Spannungen. Dies ist eine Ursache für die Ermüdung und letztendlich den Ausfall von Lotverbindungen. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt wie anhand von Messungen der Dehnungen und Verformungen an unterschiedlichen Bauteilen durchgeführte Finite-Elemente-(FE-)Simulationen verifiziert werden können. Dadurch wird die Grundlage zur Erstellung realitätsnaher FE-Modelle dargestellt. Es werden verschiedene Verfahren zur experimentellen Erfassung von mechanischen Spannungen, Dehnungen oder Verschiebungen im Bauteil betrachtet. Techniken wie Laserfeldmessverfahren (ESPI), röntgenographische Verformungsmessung, sowie Testchips und Dehnungsmessstreifen erfassen Verformungen im Mikrometerbereich und dienen als Werkzeuge der Prüfung. Optische Methoden erfassen beispielsweise lokale Verschiebungen in den Verbindungen, Testchips ermöglichen die Messung von Dehnungen in einem Aufbau während thermischer Zyklen.

1. Einleitung

Thermomechanische Simulation mit der FE-Methode ist ein wichtiges Werkzeug zur Abschätzung der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen. Durch simulationsgestützte Optimierung können mechanische Spannungen und Verformungen, die bei thermischer Belastung im Bauteil oder bei seiner Herstellung entstehen, vermindert werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse entscheidend von den verwendeten Eingabeparametern abhängt. Eine realistische Zuverlässigkeitsvorhersage mittels Simulation kann nur unter Nutzung experimenteller Daten zur Beschreibung des Bauteilverhaltens durchgeführt werden. Es ergibt sich die Notwendigkeit, die numerischen Modelle anhand messtechnischer Untersuchungen zu verifizieren. Die Verifizierung kann dabei an zwei Größen geschehen:

- Gemessene Spannungen, Dehnungen oder Verschiebungen im Bauteil.
- Auf Basis von Zuverlässigkeitstests bzw. von Lebensdauertests.

In dieser Arbeit wird der Vergleich zwischen den gemessenen Dehnungen und Verformungen sowie durchgeführten thermomechanischen FE-Simulationen aufgezeigt. Im zweiten Fall müssen umfangreiche Ausfalldaten vorhanden sein, um damit die vorausgesagte Zyklenzahl aus der Simulation zu kalibrieren. Dies erfordert die Durchführung umfangreicher Lebensdaueruntersuchungen.

2. Übersicht von zerstörungsfreien Tests für Verformungsmessungen

Es existieren eine Reihe unterschiedlicher Messverfahren zur Bestimmung der Spannungen, Dehnungen und Verformungen von elektronischen Baugruppen, Tabelle 1. [1, 2].

Messverfahren	Messergebnis
Lebensdaueruntersuchungen Bsp.: Temperaturwechseltests	Lebensdauer
Elektronische-Speckle-Interferometrie (ESPI)	Lokale Verschiebungen und Dehnungen bzw. Dehnungs- und Verschiebungsfelder
Moiré Interferometrie	
Digitale Bildkorrelation	
Röntgen-Verformungsmessung	Biegeradius kristalliner Materialien
Röntgenographische Spannungsmessung	Lokale mechanische Spannungen kristalliner Materialien
Testchip	Lokale Dehnungen bzw. Spannungen

Tabelle 1: Ausgewählte Verfahren zur Verifikation von Simulationsergebnissen

In dieser Arbeit werden ausgewählte Messmethoden theoretisch betrachtet und angewendet.

3. Elektronische-Speckle-Interferometrie (ESPI)

Optische Methoden, die Dehnungs- oder Verformungsmessungen liefern, können als sehr leistungsfähige Werkzeuge der zerstörungsfreien Prüfung betrachtet werden. In den letzten Jahren hat es ein großes Wachstum auf dem Gebiet der optischen Messtechniken gegeben.

Bei dem ESPI-Messverfahren wird der Messbereich mit Laserlicht beleuchtet. Die Aufnahme wird auf dem gesamten Messfeld durchgeführt und ermöglicht somit eine räumliche Erfassung des Objektes. Die von den einzelnen Punkten der Objekt Oberfläche reflektierten Lichtwellen bilden ein sog. Speckle-Muster aus, das von einer hochauflösenden Videokamera aufgenommen wird. Zuerst wird die Intensitätsverteilung im unbelasteten Zustand (Referenzbild) und anschließend im belasteten Bauteilzustand (verformter Zustand) aufgenommen. Durch die Verformung der Probe treten an der Oberfläche Änderungen des Speckle-Musters auf. Aus der Änderung des Speckle-Musters wird mit einem geeigneten Korrelationsalgorithmus die Verformungsinformation gewonnen. Gängige Messsysteme erreichen eine vertikale Auflösung von 30 nm [3].

3.1 Globale Verschiebungen im Chip: Experiment und Simulation

Anhand eines FE-Modell wurde das thermomechanische Verhalten eines LFBGA-49 untersucht. Die Simulation erfolgte in zwei Schritten. Es wurden thermische und thermomechanische Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden jeweils anhand von Messungen verifiziert. Für die Durchführung der Untersuchungen sind zwei Modelle erforderlich:

- FE-Modell für die thermisch-transiente Simulation.
- FE-Modell für die thermomechanische Simulation, welches die Temperaturverteilungen des thermischen Modells berücksichtigt.

3.1.1 Thermische Randbedingungen

Um die korrekte Temperaturverteilung berechnen zu können, wurden zunächst die Konvektionskoeffizienten bestimmt. Dazu wurde eine transiente thermische Simulation durchgeführt, welche durch Messung des Bauelementes mittels Pyrometer angepasst wurde. Das Bauelement wurde an der Unterseite mit einer Heizplatte erhitzt und gleichzeitig die Temperatur an der Oberseite gemessen. Die Temperaturverteilung wurde auch berechnet. Bei der Messung wie auch bei der Simulation wurde die Temperatur zwischen 25 °C und 80 °C mit einer Rate von 5K/min zyklisch verändert. Die Simulation liefert dabei die räumliche Ver-

teilung der Temperatur sowie die Temperaturänderung über der Zeit. Die auf diese Weise ermittelte Temperaturverteilung dient als Last für die sich anschließende thermomechanische Simulation, Bild 1.

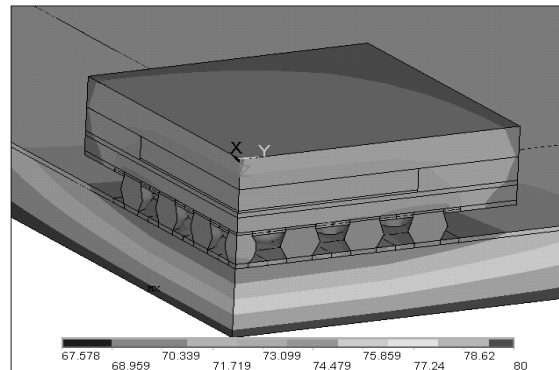


Bild 1: Temperaturverteilung im FE-Modell nach Erreichen von 80 °C, Skala in °C

3.1.2 Thermisches Verhalten

Im zweiten Schritt der Verifikation wurde ein viertel-symmetrisches Modell mit modularer Modellierungsmethode erzeugt. Wegen der im Vergleich zur Glasübergangstemperatur von 160 °C niedrigen maximalen Temperatur von 80 °C wurden die Materialeigenschaften der Pressmasse als linear-elastisch angenommen, die Eigenschaften der Lötstelle wurden viskoplastisch modelliert.

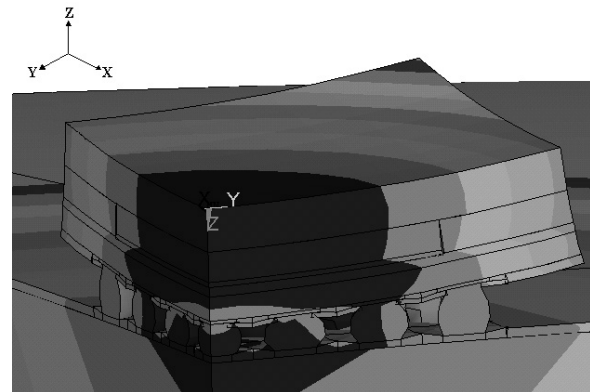


Bild 2: z-Verschiebung des FE-Modells bei 80 °C, zur Veranschaulichung 20-fach skaliert

Die Temperaturverteilung des thermischen Modells dient nun als Last für das mechanische Modell. Auf diese Weise wird die Verformung des Bauelementes aufgrund der Temperaturverteilung berechnet. Bild 2 zeigt die Verformung in z-Richtung des modellierten LFBGA-49 Bauelementes. Es ergibt sich eine konkave Verformung des IC-Gehäuses. Im Vergleich zum Gehäuse wölbt sich die Leiterplatte in Gegenrichtung. Daraus ergibt sich eine hohe Zugbelastung auf die Lötstellen.

3.1.3 Untersuchung der z-Verschiebungen des LFBGA-49 mittels ESPI

Für die Verifikation der Simulationsergebnisse wurden ESPI-Messungen der globalen Verschiebungen der Baugruppe bei zyklischen Temperaturwechseln durchgeführt. Dazu wurde ein LFBGA-49 der Fa. Micronas GmbH auf einer Heiz-Kühlplatte bei verschiedenen Temperaturen vermessen.



Bild 3: Messaufbau mit einem LFBGA-49 auf einer Heiz-Kühlplatte unter einem ESPI-Sensor

Hierbei wurden Simulationsergebnisse und globale Deformationen der Baugruppe verglichen. Ein thermischer Zyklustest wurde durchgeführt, nachdem die Baugruppe auf einem Peltierelement bzw. einer Heizplatte unter dem ESPI-System angebracht war.

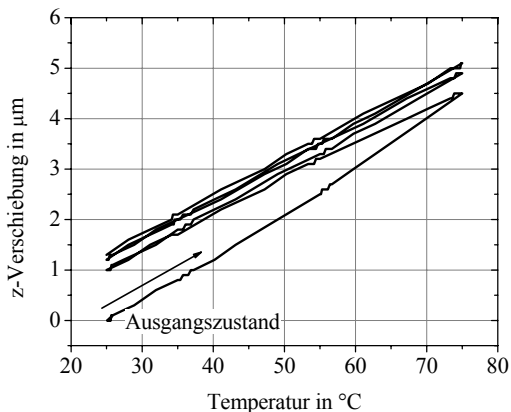


Bild 4: Verschiebung in z-Richtung des LFBGA-49 (Oberfläche, Ecke) während Temperaturzyklen von 25 °C bis 75 °C

Das ESPI Messsystem misst Verschiebungen relativ zu einem Referenzzustand bei 25 °C. Bild 4 zeigt die Verschiebung in z-Richtung einer Ecke des LFBGA-Gehäuses während Temperaturzyklen von 25 °C bis 75 °C. Gut zu erkennen ist die bleibende Verformung beim Wiedererreichen der Ausgangstemperatur, die während der Temperaturzyklen auf etwa 1,5 µm ansteigt. Bild 5 zeigt die Verformung in z-Richtung entlang der Chipdiagonalen nach einer Temperaturerhöhung von 35 °C auf 55 °C. Im vorliegenden Fall stimmt der über der Diagonalen berechnete Verlauf der Deformation des LFBGA-49 gut mit der Messung überein.

Die Abbildung zeigt die z-Verschiebung in µm über die x-Koordinate in mm. Die Simulation (durchgezogene Linie) und das Experiment (gestrichelte Linie mit Quadraten) zeigen eine U-förmige Deformation, die bei x=0 mm am größten ist (ca. -0,1 µm) und bei x=±4 mm am kleinsten ist (ca. 1,4 µm).

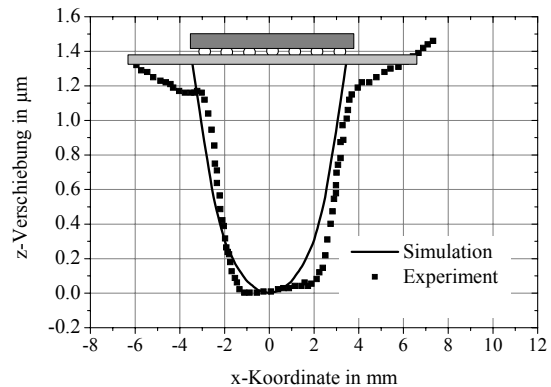


Bild 5: Experimentelle ESPI- und Simulationsergebnisse für die Verformung in z-Richtung des LFBGA-49 beim Temperaturwechsel von 35 °C auf 55 °C

4. Testchip

Testchips befinden sich anstelle oder zusätzlich zu dem eigentlichen Chips im Bauelement und erfassen indirekt, je nach funktioneller Struktur, bestimmte auf die Baugruppe einwirkende Belastungsgrößen [4,5]. In der vorliegenden Arbeit sind diese Strukturen Dehnungsmessstreifen (DMS) aus einer NiCr-Legierung und Thermistoren aus Nickel, die in Dünnschichttechnik auf das Silizium aufgebracht werden, Bild 6.

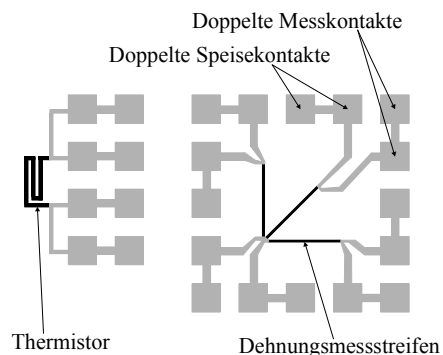


Bild 6: Layout des Thermistors und der Rosette

Die Kontaktpads aus Gold sind für eine Vierleitermessung ausgelegt und jeweils doppelt ausgeführt, um eine Kontaktierung zur Charakterisierung und anschließend eine Kontaktierung zur Messung im Gehäuse zu ermöglichen. Ein Ergebnis der thermischen Charakterisierung ist ein Polynom zwischen Thermistorwiderstand und DMS-Widerstand im unbelasteten Zustand. Das Polynom beschreibt den Temperaturanteil des DMS-Widerstandes und wird bei den Messungen vom DMS-Widerstand abgezogen. Der k-

Faktor der Dehnungsmessstreifen, welcher den Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung und Längsdehnung beschreibt, wird für mehrere Temperaturstufen durch einen Zugversuch in einer Zugprüfmaschine bestimmt.

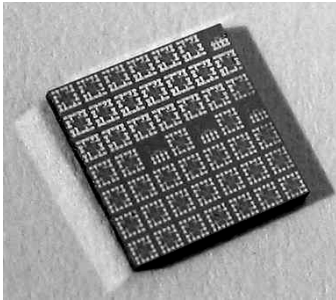


Bild 7: Testchip mit einer Kantenlänge von 5 mm und einem Array aus 7x7 sensitiven Elementen

Um Störgrößen wie Temperaturschwankungen während der Messphase zu kompensieren, werden der Thermistor und der Widerstand des Dehnungsmessstreifen zeitgleich gemessen. Drei Dehnungsmessstreifen, in 0°, 45° und 90° zueinander angeordnet, bilden eine Rosette und erlauben es, den über die Fläche der Rosette gemittelten zweidimensionalen Dehnungstensor in der Chipoberfläche zu berechnen.

4.1 Testchip

Vor dem Verkapselungsprozesses eines Sensors in ein PTO-Gehäuse wird der Sensor auf das Leadframe aufgeklebt, Bild 11 links. Der Aushärtevorgang des Leitklebers und die verbleibende Verspannung des Schichtaufbaus, welcher in Bild 8 schematisch dargestellt ist, sollen mittels Testchip analysiert werden.

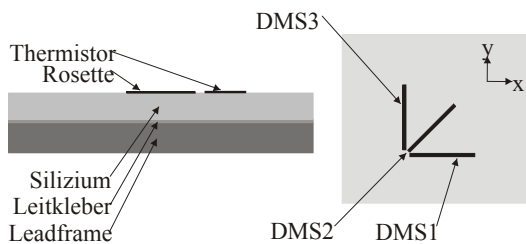


Bild 8: Schematischer Schichtaufbau (links) und Draufsicht (rechts) des Messobjektes

Der Leitkleber hat eine Glasübergangstemperatur von ca. 140 °C. Der Testchip aus einem {100}-Wafer hat die gleichen Abmessungen wie der Hall-Sensor aus Bild 11 und die zur Messung kontaktierte Rosette befindet sich symmetrisch auf der Chipoberfläche.

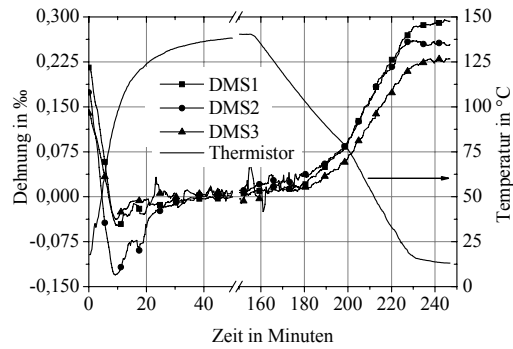


Bild 9: Dehnungen während der Aushärtung

Bild 9 zeigt den Temperaturverlauf sowie die Dehnungen der einzelnen DMS während der Aushärtung des Klebers. Der Klebeprozess fand bei 80 °C statt wobei der Kleber bereits vorhärte. Danach kühlte der Chip auf Raumtemperatur ab und die Messung wurde gestartet, Bild 9 links. Anschließend steigt die Temperatur auf 150 °C, um den Kleber auszuhärten. Aufgrund des höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Leadframes geht die Dehnung der Chipoberfläche mit steigender Temperatur in eine Kompression über. Während des Aushärtevorganges bei 150 °C ist der Schichtverbund frei von mechanischer Spannung da die Temperatur über der Glasübergangstemperatur des Klebstoffes liegt. Bei dem anschließenden Abkühlvorgang koppelt der Kleber beim Unterschreiten der Glasübergangstemperatur den Siliziumchip mit dem Leadframe. Aufgrund des höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Leadframes ist der Siliziumchip konvex gebogen. Der Mohrsche Spannungskreis in der Chipoberfläche wurde aus den Werten der Dehnungsmessstreifen berechnet, Bild 10. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die orthogonal aufeinander stehenden Dehnungsmessstreifen, DMS1 und DMS3, parallel zu $\langle 110 \rangle$-Kristallrichtungen liegen. Nach dem Aushärtevorgang verbleibt eine maximale Zugspannung in Richtung des DMS1 von ungefähr 65 MPa, bzw. eine Dehnung von 0,3 %.

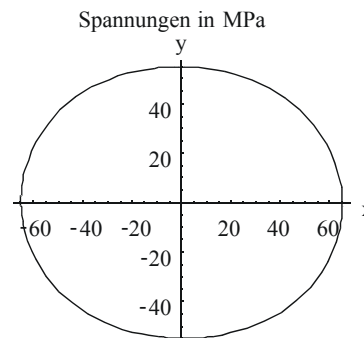


Bild 10: Mohrscher Spannungskreis in der Chipoberfläche nach dem Aushärtevorgang

5. Röntgen-Verformungsmessung

Röntgenographische Verfahren besitzen den Vorteil, dass die Strahlung die Probe durchdringt und somit Eigenschaften im Inneren sichtbar werden. Andererseits wird das Röntgenlicht an periodischen Strukturen wie beispielsweise einem Kristallgitter gebeugt. Bei der Verformungsmessung mittels Röntgenstrahlung wird der Reflex einer Netzebene des Siliziums beobachtet und ausgewertet. Der Reflektionswinkel dieser Netzebene ändert sich mit der Durchbiegung des Siliziumchips. Eine positive Veränderung des Reflektionswinkels korrespondiert mit einer positiven (konvexen) Krümmung des Siliziums an der gemessenen Stelle. Aus der Winkeländerung entlang des Messpfades lässt sich der Krümmungsradius R bestimmen. Handelt es sich bei dem gemessenen Aufbau um eine Schichtstruktur, so ist dieser invers proportional zur mechanischen Spannung σ . Für die Spannung σ gilt dabei in Abhängigkeit von der Höhe z innerhalb jeder einzelnen Schicht [6]:

$$\sigma_i(z_i) = \frac{E_i}{1-\nu_i} \left(\varepsilon_i^0 + \frac{z_i}{R} - \alpha_i \Delta T \right) \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei sind:

- E : Elastizitätsmodul
- ν : Poissonszahl
- ε^0 : Dehnung der Referenzfaser ($z=0$)
- α : thermischer Ausdehnungskoeffizient

Gl. 1 gilt nicht für verpresste Sensoren, da durch die umgebende Pressmasse die Annahme der Balkentheorie nicht mehr gilt. Die komplexe Geometrie kann jedoch in einem FE-Modell berücksichtigt werden.

5.1 Messung der Chipkrümmung

Die Röntgen-Verformungsmessung wurde eingesetzt, um die mit einer FE-Simulation ermittelten Verformungen eines Hallsensors zu verifizieren [7]. Untersucht wurde ein Hallsensor während des Aufbauprozesses. In der Simulation wurden der Prozess des Verklebens des Sensorchips sowie des Verpressens des gesamten Bauelementes berücksichtigt. Für die Simulation wurden die anisotropen, temperaturabhängigen Materialeigenschaften des Siliziums, die viskoelastischen Eigenschaften der Pressmasse und die viskoplastischen Materialeigenschaften des Klebers berücksichtigt. Das Leadframe wurde linear-elastisch modelliert. Zunächst wurde der ungeklebte Siliziumchip mittels Röntgen-Verformungsmessung untersucht. Dabei wurde keine Verformung festgestellt. Im Anschluss wurden Untersuchungen am aufgeklebten Sensorchip sowie am verklebten und vermoldeten Sensorchip durchgeführt, Bild 11.

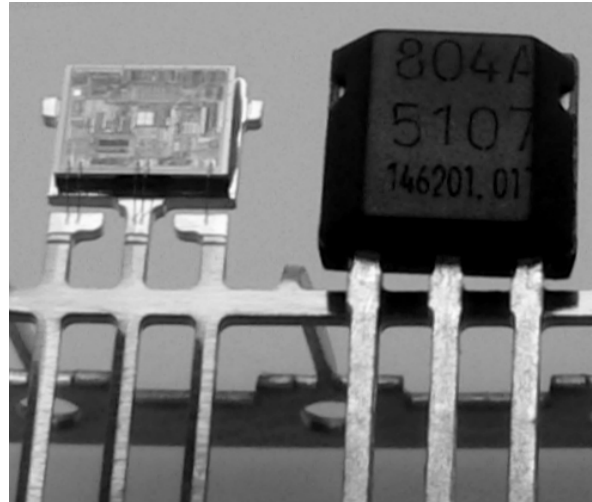


Bild 11: Aufgeklebter Sensorchip (links) sowie Hallsensor-Bauelement (rechts)

Der Klebeprozess wird bei einer Temperatur von 145 °C für 15 min. durchgeführt. Dabei kann der Aufbau aus Leadframe, Kleber und Sensorchip als spannungsfrei angesehen werden.

Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Leadframes und des Siliziums sowie der Härteigenschaften des Klebers kommt es zu einer Durchbiegung des Aufbaus während des Abkühlens.

Die Durchbiegung der Oberfläche des aufgeklebten Sensorchips wurde mittels Röntgen-Verformungstechnik untersucht. Aus der gemessenen Winkeländerung des Röntgenreflexes wurde der inverse Biegeradius berechnet und mit der Simulation verglichen, Bild 12. In der Chipmitte beträgt der inverse Biegeradius etwa 3 m^{-1} . Dies entspricht einer mechanischen Spannung von 76 MPa. In den Randbereichen nehmen der inverse Biegeradius und damit auch die mechanische Spannung ab.

Weiterhin wurde das gesamte Bauelement untersucht. Nach dem Klebeprozess wird das Bauteil auf etwa 180 °C erwärmt und bei dieser Temperatur verpresst. Daran schließt sich ein Aushärteprozess für die Pressmasse von etwa 5 h bei 180 °C an. Bild 13 zeigt den inversen Biegeradius des Sensorchips im gehäuteten Bauelement nach dem Aushärteprozess, gemessen bei Raumtemperatur. Die Pressmasse behindert die Biegung des Chips wodurch sich eine geringere inverse Biegeradius im Vergleich zum nicht verpressten Bauteil ergibt.

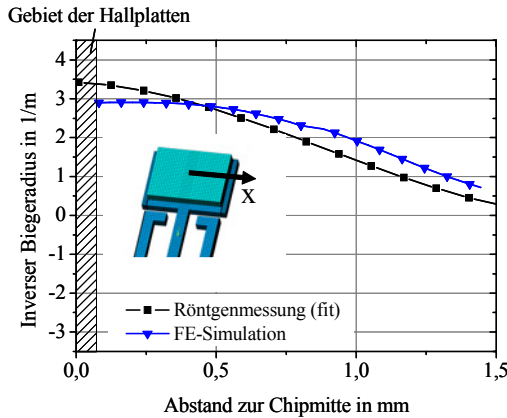


Bild 12: Gemessener und simulierter inverser Biegeradius des aufgeklebten Sensorchips bei $T=25\text{ °C}$ [8]

Auch hier ist der inverse Krümmungsradius in der Chipmitte maximal und liegt bei etwa 1 m^{-1} . An den Chipkanten sinkt der inverse Biegeradius annähernd auf Null.

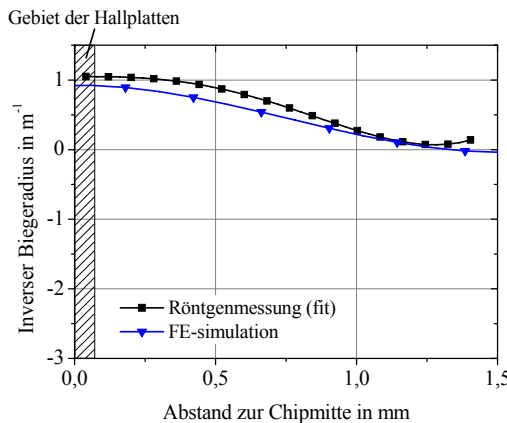


Bild 13: Gemessener und simulierter inverser Biegeradius des Bauelementes bei $T=25\text{ °C}$, nach der Verkapselung [8]

6. Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Messverfahren bieten eine Reihe von Möglichkeiten zur Verifikation von FE-Simulationen. Die Beispiele zeigen, dass die durchgeführten Simulationen gut mit den Messungen übereinstimmen. Die Abweichungen der gemessenen und simulierten Krümmungsradien liegen bei 10 %. Vergleicht man die mit dem Testchip gemessenen mechanischen Spannungen mit den aus der Röntgen-Verformungsmessung gewonnenen Werten, so ergibt sich eine Abweichung von etwa 15 %. Diese Abweichung ist auf prozesstechnische Schwankungen zurückzuführen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die FE-Modelle alle relevanten Eigenschaf-

ten abbilden und somit das Verhalten der jeweils untersuchten Baugruppe realitätsnah widerspiegeln. Besonders bei sehr komplexen Schichtaufbauten mit einer Vielzahl an Materialien ist die beschriebene Vorgehensweise notwendig, um zu richtigen Ergebnissen zu gelangen. Außerdem zeigen die Materialien bei den auftretenden Temperaturen und mechanischen Spannungen ein stark nichtlineares Verhalten. Zur Beschreibung dieses Verhaltens ist eine große Anzahl von Materialparametern nötig. Dies erfordert umfangreiche Verifikationen der Simulationsergebnisse um diese im Anschluss richtig interpretieren zu können.

7. Danksagung

Diese Veröffentlichung enthält Ergebnisse der vom BMBF geförderten Projekte „SIMOD – Modell-Baukasten für die Simulation modularer Mikrosysteme“ und „LIVE – Materialmodifikation für geometrisch und stofflich limitierte Verbindungsstrukturen hochintegrierter Elektronikbaugruppen“ mit den Förderkennzeichen 16SV1675 und 03X4500. Für diese Förderung bedanken sich die Verfasser.

8. Literatur

- [1] Evaluating Reliability and Non-destructive testing, Technology report, TABAI ESPEC CORP., 2000, No. 9
- [2] Sciammarella, C.A., Sciammarella, F.M.: Industrial applications of optical techniques that measure displacements, Journal of Failure Analysis & Prevention, Vol. 5, No. 2, S. 61-72
- [3] <http://www.dantecdynamics.com/>
- [4] J. Bartholomeyczik, S. Brugger, P. Ruther, O. Paul: Multidimensional CMOS in-plane stress sensor, IEEE Sensors Journal, Vol. 5, No. 5, 2005, S. 872-882
- [5] J. C. Suhling, R. C. Jaeger: Silicon piezoresistive stress sensor and their application in electronic Packaging, IEEE Sensors Journal, Vol. 1, June 2001, S. 14-30
- [6] O. T. Iancu: Berechnung von thermischen Eigenspannungsfeldern in Keramik/Metall-Verbunden, VDI Fortschritt Berichte, Reihe 18, Nr. 74, Düsseldorf, VDI Verlag 1989
- [7] S. Fischer, H. Beyer, J. Wilde, R. Janke: Modellierung der Aufbau- und Verbindungstechnik am Beispiel des Backend-Prozesses gemoldeter Hallensoren, 10. GMM Workshop Tagungsband, S. 231 - 238
- [8] S. Fischer, H. Beyer, R. Janke, S. Hartwig, J. Wilde, R. Janke: Comparison of analysis methods for package-induced stresses on moulded Hall sensors, Symp. On Design, Test, Integration of MEMS/MOEMS, Montreux, 2005, S. 239-243