

Licht ins Dunkel der Elektronikverkapselung

Prozessoptimierung. Faseroptische Dehnungssensoren ermöglichen die Belastungsanalyse in zentralen Prozessschritten der Elektronikverkapselung: vom Einspritzen des Polymers über das Auswerfen aus der Werkzeugform bis hin zum Materialschrumpf. Sie ermöglichen in Kombination mit der numerischen Simulation Einblicke in das Verhalten des Polymers bei Zuverlässigkeitstests und im Feldeinsatz.

Thomas Schreier-Alt Frank Ansorge

Die Belastung elektronischer Bauteile während der Polymerverkapselung wird in der Prozess- und Produktentwicklung meist vernachlässigt. Doch selbst für stressarme Verkapselungsprozesse wie Transferpressen, Vakuumguss und Hotmelt belehrt uns die Praxis oftmals eines Besseren.

Durch die Integration von Sensoren und Aktuatoren in elektronische Systeme wird aus der klassischen Ein-Chip-Gehäuseung ein komplexer mikro-mechatronischer Verkapselungsprozess. Dessen Auslegung bestimmt die Zuverlässigkeit des Endproduktes maßgeblich: Vorspannungen aus dem Verkapselungsprozess überlagern sich mit Belastungen im Feldeinsatz, Prozessschwankungen beeinflussen Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Auch ist das Prozessfenster für derart komplexe Systeme deutlich enger als für die klassische Einzelchip-Gehäuseung.

Bedeutendstes Beispiel ist der Einsatz von MEMS-Sensoren und ihre Integration zusammen mit der Steuerelektronik in ein Multi-Chip-Modul (MCM), z.B. zur Messung von

Winkel- und Längsbeschleunigung im Automobil. Die Anforderungen an Signalstabilität, Zuverlässigkeit und Kostenreduktion verlangen hier ein tieferes Prozess- und Materialverständnis, als dies mit konventionellen Methoden erreichbar wäre. Beispielsweise ist die Integration eines Dehnungssensors ein massiver Eingriff in die zu untersuchende Baugruppe: es müssen entweder funktionale Bauteile ersetzt werden oder die Haftung des Polymers wird durch die aufgeklebten Dehnmessstreifen lokal beeinflusst.

Faseroptische Bragg Gitter

Zahlreiche Verkapselungsmaterialien sind mit Glasfasern verstärkt (Spritzguss) oder werden zur Anpassung an die Temperaturdehnung der IC-Chips mit sphärischen Glaspartikeln gefüllt (Transfer Molding). Da sich ein Glasfasersensor thermo-mechanisch kaum vom Füllstoff der meisten Polymere unterscheidet, hat er als „optischer Dehnmessstreifen“ in Fasererbundwerkstoffen (CFK, GFK) große Verbreitung gefunden.

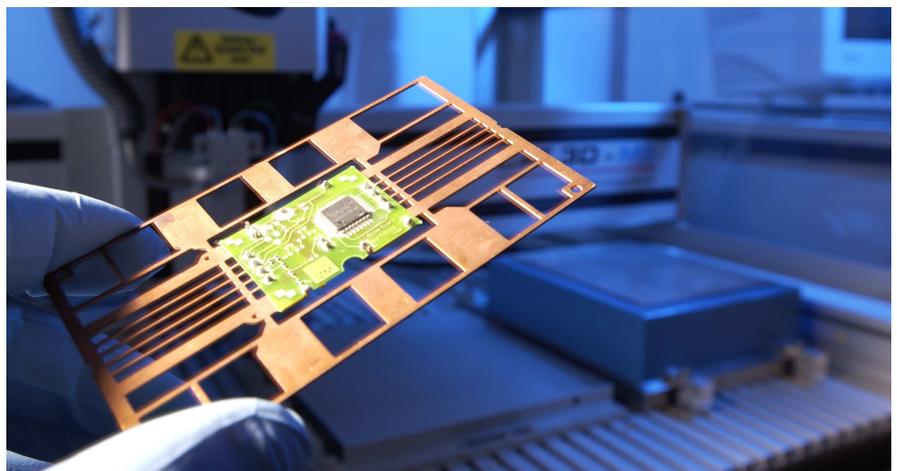


Bild 1: Gemipak: Kombiniertes Leistungs- und Steuergeräte modul für den Fensterheber - Einsatz im Automobil

Die direkt in die Lamine integrierten Fasern werden im Flugzeugbau (z.B. Schadensanalyse in Tragflächen) ebenso eingesetzt wie im Maschinenbau (z.B. Vibrationserfassung in Fräsmaschinen mit hohem CFK-Anteil).

Die Gründe für die Verbreitung der faseroptischen Sensoren liegen in ihren einzigartigen Vorteilen gegenüber elektrischen DMS:

- Die Fasern lassen sich direkt in das Polymer gießen ohne dass Klebungen oder andere Befestigungen benötigt werden.
- Der Faserdurchmesser von 125 µm ermöglicht den Einsatz auch in engen Spalten.
- Das Hintereinanderschalten und Verzweigen von Fasern (Multiplexen) ermöglicht die gleichzeitige Auswertung zahlreicher Sensoren mit einer einzigen Zuleitung ("minimal invasives Sensornetzwerk")
- Die optischen Verluste von 0,16 dB/km lassen große Abstände zwischen Messobjekt und Auswertegerät zu.
- Optische Sensoren werden weder durch externe elektromagnetische Felder gestört, noch erzeugen sie solche (Einsatz in explosionsgeschützter Umgebung)
- Die geringe Masse des Sensors garantiert ein schnelles Ansprechen auf thermische und mechanische Veränderungen.

Wirkungsweise

Bei faseroptischen Bragg Gitter Sensoren wird mit einem UV-Laser in eine kommerziell verfügbare Monomode-Glasfaser ein optisches Gitter eingebrannt. An diesem kommt es zur Totalreflexion, wenn die Wellenlänge des einfallenden Lichts λ mit der Gitterperiode Λ übereinstimmt, gemäß der Bragg-Bedingung $\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda$

Wird der effektive Brechungsindex des Faserkerns n_{eff} oder die Gitterperiode Λ durch äußere Einflüsse gestört, führt dies zu einer Veränderung der reflektierten Wellenlänge. Beispielsweise ist das reflektierte Licht einer komprimierten Glasfaser ins Blaue verschoben. Die Verschiebung $\Delta\lambda$ der reflektierten Wellenlänge durch die Dehnung $\varepsilon = \Delta l/l$ oder eine Temperaturänderung ΔT wird durch

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T + \kappa \cdot \varepsilon$$

Hierbei ist $\alpha_\Lambda = 0,55$ ppm/K der Ausdehnungskoeffizient der Faser, und $\alpha_n = 8,6$ ppm/K die deutlich größere thermo-optische Konstante. Der mechanische Kopplungskoeffizient κ beträgt 1,25 pm pro ppm Dehnung. Es lassen sich Messgeschwindigkeiten bis zu mehreren kHz realisieren. Die Auflösung für Dehnungen liegt bei wenigen µm/m.

Prozesscharakterisierung Reaktivmolden

Die Polymerverkapselung mittels Transfer Molding zeichnet sich im Vergleich zum Spritzguss durch weit geringere Belastungen für die eingebettete Elektronik aus. Die Viskosität der Polymere liegt bei einigen hundert Paskalsekunden, Drücke überschreiten selten 100 bar und die Maximaltemperaturen liegen meist unter 200°C.

Um die im Verkapselungsprozess auftretenden Belastungen zu erfassen, empfiehlt es sich, mehrere Glasfasersensoren in die Kavität zu integrieren (beispielhaft ein mechatronisches Sensormodul in Bild 2a).

Eine Faser (Gitter #1 in Bild 2b) wird vor und nach dem Gitter auf die Leiterplatte und das zu untersuchende Bauteil geklebt. Somit erfasst das dehnungsempfindliche Bragg Gitter alle Relativbewegungen des entlöteten Bauteils gegenüber der Leiterplatte. Über die thermo-mechanischen Parameter der Glasfaser lassen sich durch numerische Simulation die entsprechenden Belastungen der Lotstellen am eingelöteten Bauteil berechnen.

Zur Temperaturkompensation wird eine zweite Faser (Gitter #2 in Bild 2a) durch eine Kanüle vom Polymer mechanisch entkoppelt und dient als reiner Temperatursensor.

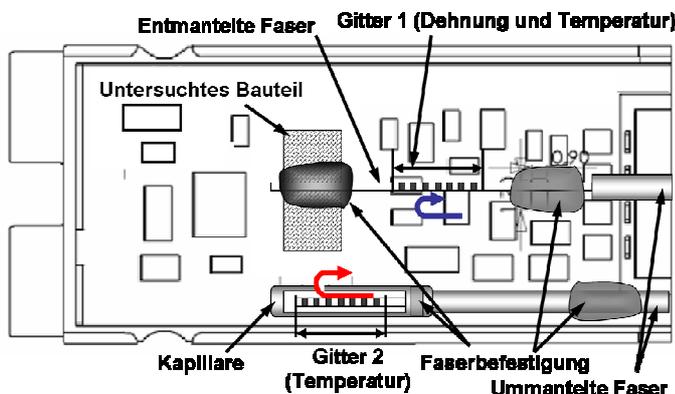


Bild 2a: Integration der optischen Dehnmessstreifen in das zu verkapselnde elektronische System

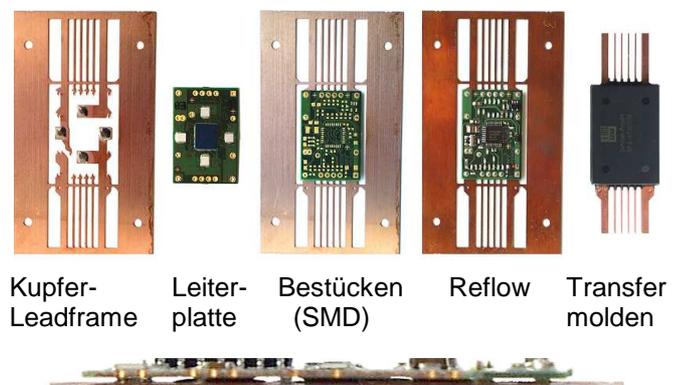


Bild 2b: Herstellungsprozess mechatronischer Fensterheber (unten: Seitenansicht)

Tabelle 1: Mögliche Belastungen beim Verkapseln von elektronischen Bauteilen

Prozessschritt	Mögliche Ursachen für Bauteilbeschädigung
Füllung	Viskosität des Polymers zu hoch. Typische Ursachen sind: a) Vorwärmzeit der Materialtablette zu kurz, Angusskanal unterdimensioniert b) Materialscherung im Einlassbereich zu gering Bauteilpositionierung falsch (direkt im Angussbereich, nicht „ausbalanciert“)
Nachdruck	Maschinensteuerung zu träge beim Umschalten von Vorschub auf Nachdruck Ungenügende Entlüftung (Ausdehnung von Restgas beim Polymerisieren) Exotherme Drucküberhöhung
Auswerfen	Falsche Positionierung der Auswerferstifte Material ungenügend / zu stark geliert, Haftung an Formschrägen zu hoch
Vernetzung (Im Werkzeug und Postcuring)	Thermo-mechanisch ungünstige Kombination aus Geometrie und Materialauswahl (nicht notwendig an einer Bauteilverwölbung zu erkennen) Falsches Aushärteprofil (ungenügende Verweilzeit für Relaxationsprozesse)

In Abb. 3 sind anhand der Wellenlängenverschiebung der am Bauteil befestigten Faser die relevanten Prozessschritte beim Verkapseln zu erkennen:

1. Bauteil wird durch Kontakt zur heißen Werkzeugform erwärmt
2. Polymer trifft auf das Bauteil
3. Die exotherme Reaktion bewirkt eine Erwärmung des Polymers und damit einen Druckanstieg.
4. Materialschrumpf führt zum Ablösen des Polymers von der Werkzeugwand, was eine leichte Entformbarkeit begünstigen sollte.
5. Öffnen der Werkzeugform und Auswerfen des Bauteils ergeben maximale Dehnungen im Sensor.
6. Abkühlung und Schrumpf durch Polymerisation

Es ist auffällig, dass nicht der Einspritzdruck die kritischste

Belastung des Bauteils darstellt, sondern das Entformen. In diesem Fall treten durch die langgezogene Form des Moduls starke Hebelkräfte auf, die zu einer Verbiegung der Platine führen können.

Polymerisation

Während Temperatur und Dehnung durch Differenzenbildung der Reflexionssignale der beiden Gitter separiert werden können, müssen die einhergehenden mechanischen Spannungen im Polymer durch eine veränderte Versuchsanordnung abgeleitet werden. Die zugrundeliegende Idee ist, den ungehinderten Materialschrumpf des Polymers ϵ_{frei} zu messen und mit dem tatsächlichen Schrumpf des mechatronischen Moduls ϵ_{red} zu vergleichen. Für die Bauteilqualität entscheidend ist, welcher Anteil des

unterdrückten Polymerschrumpfs zu mechanischen Spannungen führen wird, und welcher Anteil beim Aushärten wegrelaxieren kann.

Hierzu werden Fasern einerseits in frei komprimierbares Polymer eingegossen, andererseits in das durch Einlegeteile versteifte Modul integriert. Damit sich das Polymer im ersten Fall ungehindert spannungsfrei zusammenziehen kann, muss entweder die Haftung zur Werkzeugform unterbunden werden (z.B. durch Teflonbeschichtung) oder die Werkzeugform wird aus einem nachgiebigen Material hergestellt, in unserem Fall einer Silikonform (Bild 4) mit der auch erste Prototypen im Vakuumguss aufgebaut wurden. Bild 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Faserkomprimierung beim Aushärten des Harzes.

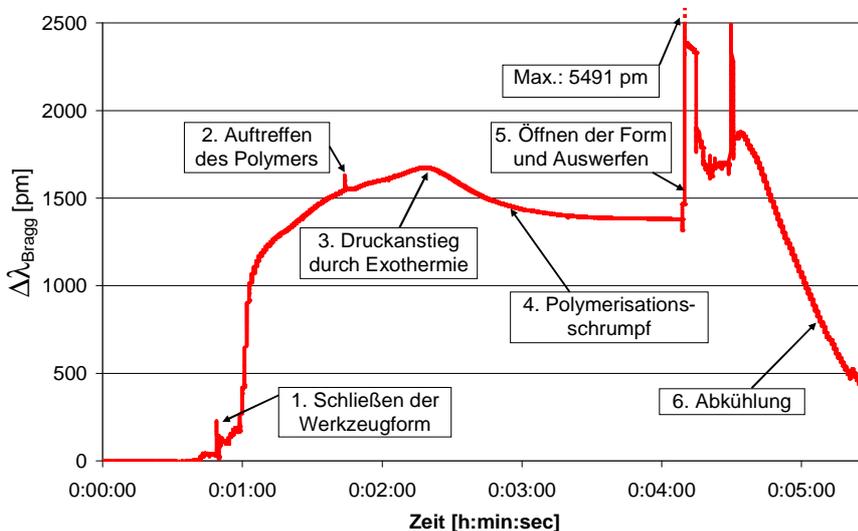


Bild 3: Wellenlängenverschiebung des zwischen IC Bauteil und Leiterplatte befestigten Sensors aufgrund von Temperatur- und Dehnungsbelastungen

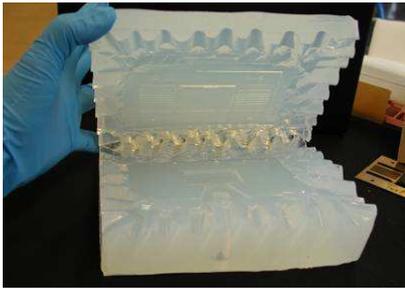


Bild 4: Flexible Silikonform

Wird die Faser dagegen in das reale mechatronische Modul eingebettet, behindert die Ankopplung des Polymers an die Einlegeteile und die Werkzeugwand den Materialschrumpf (Bild 5). Es ist zu erkennen, dass die Glasfaser am Gelpunkt des Polymers an die umgebende Harzmatrix koppelt und durch den Polymerisationsschrumpf ebenfalls komprimiert wird. Zum gleichen Zeitpunkt kommt es zur mechanischen Kopplung zwischen Polymer und den mechatronischen Einlegeteilen: Erst ab diesem Moment bauen sich mechanische Spannungen im System auf!

Während sich das frei komprimierbare Polymer in der Silikonform um $\Delta\varepsilon_{\text{ges}} = 2000 \mu\text{m/m}$ zusammenzieht, sind es in einer Metallform mit Einlegeteilen lediglich $200 \mu\text{m/m}$. In umfangreichen Rechnungen und Experimenten konnte gezeigt werden, dass insbesondere steile Ofenprofile beim Nachhärten den Anteil eingefrorener Spannungen anwachsen lassen. Hier schreitet die Vernetzung zu schnell voran, als dass die Relaxationszeit einen Abbau der Spannungen zuließe. Dies kann soweit gehen, dass das Polymer bereits beim Aushärten von den Einlegeteilen delaminiert oder Spannungsrisse im Polymer auftreten.

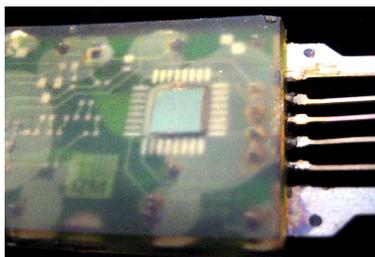


Bild 6: Delamination nach 50 therm. Wechseln -40°C / 100°C

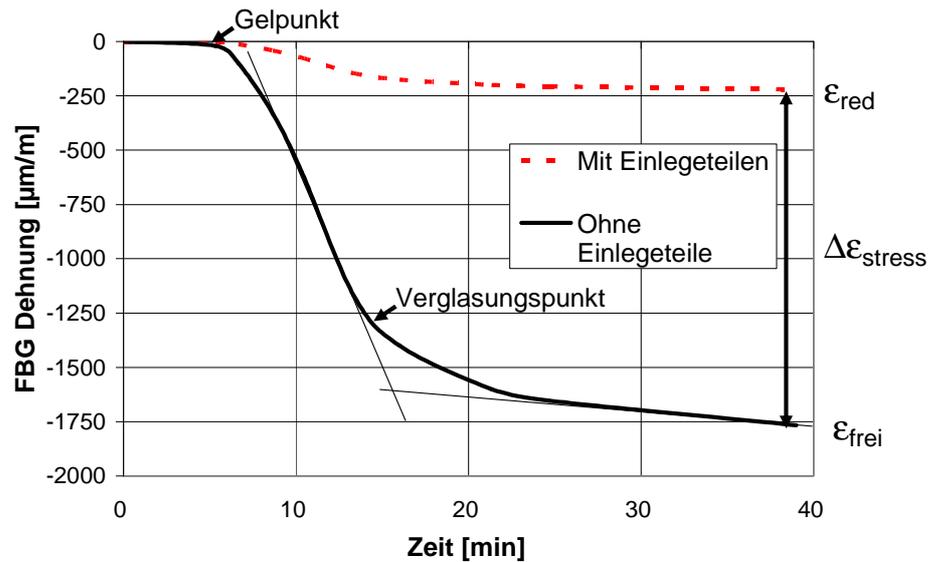


Bild 5: Materialschrumpf im Testmodul mit und ohne Einlegeteile

Zuverlässigkeitsprognose

Die Wahrscheinlichkeit für eine Delamination ist an der Oberfläche der Glasfaser gegenüber anderen Einlegeteilen erhöht. Ursache ist der im Vergleich zu anderen Bauteilen geringere thermische Ausdehnungskoeffizient der Glasfaser von $\alpha_{\Lambda} = 0,55 \text{ ppm/K}$. Der große Unterschied zum Polymer mit $\alpha > 10 \text{ ppm/K}$ führt an der Faser-oberfläche zu erhöhten Scherspannungen, wodurch das Polymer bei vergleichbaren Haftbedingungen zuerst am Fasersensor delaminieren wird. Dies ermöglicht ihren Einsatz zur vorausschauenden Zuverlässigkeitsprognose.

Fazit

Faseroptische Bragg Gitter ermöglichen die Charakterisierung zahlreicher Kunststoffverkapselungsprozesse. Die Sensoren ermöglichen die Belastungsanalyse von ummoldeten Elektronikbauteilen und geben Einblicke in den Verkapselungsprozess, wie sie mit anderen Sensoren nur eingeschränkt möglich sind. Die durchgängige Datenerfassung erweist sich als hilfreiche Ergänzung zu anderen Sensorsystemen. Beispielhaft wurde dies am Transferpressen verdeutlicht.

Die Belastungsmessung direkt im industriellen Verkapselungsprozess

kann Nachteile von idealisierten Laborexperimenten ausgleichen, beispielsweise die Beeinflussung der Polymerisationskinetik durch die Anwesenheit massereicher Einlegeteile. Mit eingebetteten Fasersensoren lassen sich Gel- und Verglasungspunkt am Fertigungsbauteil bestimmen und ermöglichen eine Optimierung der Aushärteprofile hinsichtlich Spannungsarmut und Prozessdauer. Hierbei ist von Vorteil, dass mechanische Spannungen im Polymer auch in engen Zwischenräumen erfasst werden können. Weiterhin bieten Fasersensoren das Potential, Struktur-schäden nicht nur zu erfassen, sondern auch zu prognostizieren.

Danksagung

Dank geht an die Vogt Elektronik GmbH und die Robert Bosch GmbH für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Messungen.

Die Autoren

Dr.-Ing. Thomas SCHREIER-ALT, geb. 1969, ist Projektleiter am Mikro-Mechatronikzentrum MMZ des Fraunhofer Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration; schreieralt@mmz.izm.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Frank ANSORGE geb. 1965, ist Abteilungsleiter des MMZ am Fraunhofer IZM