

Bernd Michel

Zuverlässigkeitsprobleme im Hightech-Bereich – Lösungsansätze und Konzepte

Der Autor berichtet über seine Erfahrungen auf dem Gebiet der Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeits- und Lebensdauerbewertung als Leiter des Fraunhofer Micro Materials Centers Berlin sowie Präsident des European Centers for Micro- and Nanoreliability (EUCEMAN). Im Vordergrund stehen Fragen der mechanischen und thermischen Zuverlässigkeitsanalyse und Bewertung, wobei der Autor die enge Verbindung von Zuverlässigkeitskonzept, Simulation, experimenteller Verifikation und Anwendung vertritt. Auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsforschung gibt es heute noch sehr viele offene Fragen. Die Probleme der Zuverlässigkeit und Lebensdauer erlangen zunehmend eine größere Bedeutung, da von ihrer Lösung zahlreiche Fragen der weiteren Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft abhängen. Die zahlreichen Rückrufaktionen renommierter Firmen im Automobilbau oder die Unfälle im Zusammenhang mit den Space-Shuttle-Flügen der letzten Zeit zeigen nur, dass Forschungen zur Zuverlässigkeit auch künftig von erheblicher Bedeutung sein werden.

1. Neue Zuverlässigkeitsanforderungen im Mikro- und Nanobereich

Die klassischen Methoden der Zuverlässigkeitsbewertung von Komponenten, Bauteilen und Systemen basierend auf Festigkeitshypothesen, klassischer Bruchmechanik, Lebensdauerhypothesen auf der Basis von Manson-Coffin, Wöhlerkurven und zahlreichen verallgemeinerten Ermüdungs-, Kriech- und Schädigungskonzepten erfahren gegenwärtig neue Impulse durch die stärkere Einbeziehung der physikalischen Mechanismen unter Berücksichtigung der realen Mikro- und Nanostrukturen der Werkstoffe. Die Mikrosystemtechnik und die modernen Nanotechnologien haben in letzter Zeit maßgeblich mit dazu beigetragen, dass die Vorgänge in lokalen Werkstoffbereichen genauer untersucht werden und die vorwiegend phänomenologisch-makroskopischen Lebensdauerkonzepte ergänzt und z.T. deutlich erweitert werden konnten.

Dieser Zugang ist als eine Bereicherung der bisherigen Zuverlässigkeits- und Lebensdauerkonzepte anzusehen. Durch die Mikrosystemtechnik haben sich z.B. in Chipumgebung in den letzten Jahren moderne Zuverlässigkeitskonzepte etabliert, die das lokale Bruch- und Rissverhalten sehr viel genauer berücksichtigen als bisher. Im Electronic Packaging setzten sich zunehmend Konzepte und Kriterien eines sogenannten „Microreliability“-Zugangs durch, der nicht nur auf klassischen kontinuumstheoretischen Modellen basiert, sondern die lokalen Verformungsvorgänge einbezieht – inklusive lokale Defektstrukturen und Phänomene wie Diffusion, Delamination, Migration etc.. Die Möglichkeiten moderner, lokaler Feldmesstechniken wie AFM, FIB, AFAM, SPM etc. oder lokale Deformationsanalysen wie microDAC, nanoDAC etc. (DAC: Deformation Analysis by Correlation) tragen maßgeblich dazu bei, die Berechnungsverfahren mit wichtigen Werkstoffdaten zu „füttern“ und so effektiv in Richtung „Design for Reliability“ voranzukommen.

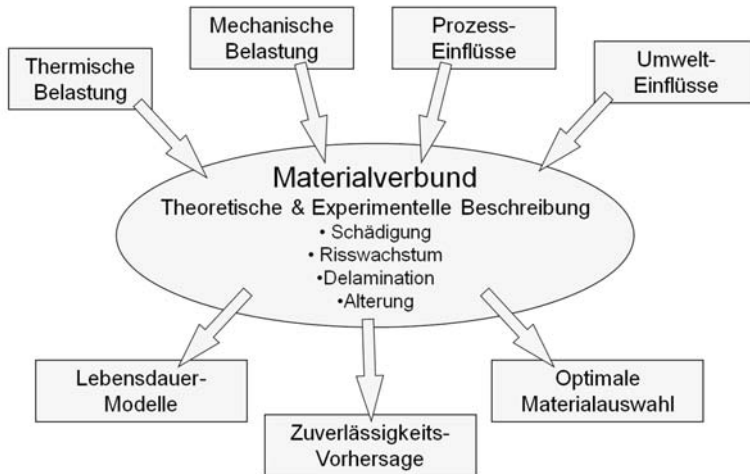


Abb. 1: Genaue Zuverlässigkeitsmodelle erfordern gute Werkstoffmodelle

2. Digitale Bildkorrelationsverfahren – neue Methoden zur experimentellen Verformungsanalyse im Mikro- und Nanobereich

Die Methoden der digitalen Bildkorrelationstechniken erfreuen sich einer ständig wachsenden Bedeutung in vielen Bereichen der modernen Naturwissenschaften und in der Technik. Ihr großer Vorteil ist es, dass sie mit zahlrei-

chen Bilderzeugungstechniken produziert und angewendet werden können. Lasermesstechnik, klassische, optische Methoden, aber auch die Bilderzeugung in sehr kleinen Werkstoffbereichen z.B. mittels Elektronenmikroskopie (SEM, TEM) oder im AFM, AFAM oder im Focus-Ion-Beam-Gerät (FIB) sind nutzbar zur digitalen Grauwertkorrelationsanalyse. Darüber hinaus sind neben den Deformationsmessungen auch andere Feldgrößen wie z.B. Temperatur, Diffusionsfelder, magnetische Strukturen etc. denkbar.

Am Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) wurden die DIC-Techniken (DIC: Digital Image Correlation Techniques) in den letzten Jahren vorwiegend im Bereich der lokalen Verformungsanalyse eingesetzt und weiterentwickelt. Die DAC-Verfahren sind spezielle DIC-Techniken, die z.B. mittels Lasermesstechniken (LaserDAC), im Elektronenmikroskop (microDAC) oder aber auch im Nanobereich z.B. mittels AFM, AFAM oder anderen SPM-Methoden (nanoDAC) zur hochgenauen Ermittlung von Deformationsfeldern bestens geeignet sind. Die direkte Verbindung derartiger Verfahren mit den Konzepten der Zuverlässigkeitsbewertung (Bruch-, Riss- und Schädigungskonzepte, Lebensdauer- und Prognosetools) führt zu einer neuen Qualität dieser Verfahren im Bereich der Mikrosystemtechnik und neuerdings auch der Nanotechnologie/Nanoanalytik („Nanoreliability“).

Neueste Untersuchungen mittels FIB gestatten z.B. die Ermittlung lokaler Eigendehformationen/Eigenstressungen im direkten Chipbereich mit höchsten Präzisionsansprüchen, die mit klassischen Methoden nicht erreichbar sind. Für das neue FIBDAC-Messverfahren, einer Variante von nanoDAC, wurde z.B. der Fraunhofer-Preis 2005 an ein Team des Autors vergeben. Die Methode gestattet es, z.B. die Lebensdauer von Chipverbindungen unter Berücksichtigung lokaler Eigenstressungen sehr viel genauer zu prognostizieren als mit herkömmlichen Methoden.

3. Innovative Messverfahren microDAC, nanoDAC und FIBDAC

Die genannten Verfahren basieren auf dem numerischen Vergleich von Bildern verschiedener Verformungszustände (thermisch, mechanisch u.a.) von Proben- oder Bauteilbereichen, die wesentlich für die Lebensdauer der jeweiligen Komponenten sind. Dieser Bildvergleich erfolgt heute natürlich mittels moderner Computertechnik anhand fortgeschrittener Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Die Bilder selbst können auf optischem Wege z.B. mittels Rasterelektronenmikroskopie oder Atomic Force Microscopy erhalten werden. Auch die Akustomikroskopie und andere bildgebende Verfahren sind

möglich. Eine speziell für die Mikro- und Nanotechnologie geeignete Spezialvariante des microDAC-Verfahrens ist die nanoDAC-Technik, die z.B. im Interface-Bereich um Mikrorisse bzw. den Grenzflächen- und Grenzschichtbereichen Ergebnisse liefern kann.

Worin besteht das Grundprinzip von microDAC und nanoDAC? Die Grundidee des Konzeptes basiert auf der Tatsache, dass Mikroskope der verschiedenen Arten in der Lage sind, lokale, charakteristische Muster aufzuzeichnen – neben der mehr globalen Form und Struktur. Falls diese Muster nun zeitlich stabil bleiben und in digitalisierten Bildern aufgezeichnet werden können, können sie sozusagen als lokale Markierung des Bildes dienen. Diese Muster- („Markierungen“-) Mikrostrukturen bleiben nun sogar oft während nachfolgender thermischer/mechanischer Belastungen der Komponenten und Bauteile relativ stabil und können nach den Belastungen wieder gefunden und aufgezeichnet werden. Es ist nun möglich, mittels Bildverarbeitungsalgorithmen eine Reihe von lokalen Verschiebungsfeldern dieser Muster zwischen zwei oder mehreren verschiedenen Zuständen zu ermitteln. Man geht dabei von der unter bestimmten Voraussetzungen gültigen Hypothese aus, dass das reale Verschiebungsfeld einer Umgebung eines Bildpunktes P, der z.B. durch Verformung zum Bildpunkt P' verschoben wird, durch ein Maximum der Korrelation der Grauwertverteilungen dieser beiden Bildumgebungen P und P' charakterisiert wird. Natürlich sind hier zahlreiche technische Fragen zu beachten und auch einige experimentelle Bedingungen einzuhalten. In der Realität zeigt sich aber, dass man sehr genaue lokale Verschiebungsfelder erhalten kann. Mit geeigneten Bearbeitungsmethoden lassen sich daraus auch die Deformationsfelder hinreichend genau ermitteln. Bei bekanntem Werkstoffverhalten sind dann auch die thermischen bzw. mechanischen (lokalen!) Spannungsfelder bekannt. Interessant ist, dass man auch spezielle abgewandelte Methoden des microDAC-Verfahrens entwickeln konnte, wo Werkstoffkennwerte bestimmt werden können. Das gilt z.B. für die Ermittlung von CTE (thermischen Ausdehnungskoeffizienten), den sonst so schwer zu ermittelnden Poissonschen Zahlen usw., und das direkt im Lotbereich bzw. im Bereich der Grenzschichten zwischen den verschiedenen Werkstoffbereichen von Loten.

4. Zuverlässigkeitsbewertung durch Kopplung von Simulation und DIC-Messtechniken

Einem Team des Autors ist es gelungen, für zahlreiche praktische Anwendungsfälle die DAC-Verfahren mit Finite-Elemente-Simulationen zu koppeln

und unter Nutzung von Schädigungsmodellen (Bruchmechanik, Lebensdauerkonzepte) Lebensdauerprognosen für Lotstellen in Sensoren (z.B. Airbagsensoren, Druck- und Beschleunigungssensoren), MEMS-Lötstellen, Lötstellen in Packaging-Aufbauten (CSP, Flip Chip, BGA etc.) oder Lötstellen von SMD-Aufbauten sowie für zahlreiche weitere Mikro- und Nanobauteile zu erstellen, die sich durch sehr gute Übereinstimmung mit dem realen Schadensverhalten auszeichnen. Der große Vorteil der vorstehend genannten Herangehensweise besteht darin, dass für das Versagen von Mikrokomponenten die lokalen Deformationszustände von erstrangiger Bedeutung sind und nicht makroskopisch über das Bauteil gemittelte Zustände, wie das in vielen Versagensbewertungen der Fall ist.

Die genauere lokale Verformungsbewertung als Feld ermöglicht in der direkten Kombination mit den Feldberechnungen der FEM, für die gemessene Felder als Input dienen, einerseits eine zuverlässige Beurteilung der Schädigungskonzepte und anschließend nach Auswahl geeigneter Konzepte (wie z.B. verbesserte Coffin-Manson-Modelle u.a.m.) eine fundierte Bewertung der Lebensdauer. Selbstverständlich werden bei Bedarf weitere experimentelle Verfahren einbezogen, z.B. wenn zusätzliche Eigenspannungen zu charakterisieren sind (z.B. Röntgen-Mikroskopie), Delaminationen von Werkstoffen in den zu bewertenden Werkstoffverbunden auftreten (Akustomikroskopie). Die Kopplung mehrerer Verfahren erhöht die Sicherheit der Lebensdauer-Abschätzungen weiter und dient außerdem zur weiteren Verbesserung der Bewertungskonzepte selbst.

Das oben beschriebene DAC-Konzept ist gemeinsam mit zahlreichen Anwendern erprobt worden, z.B. in Projekten mit Motorola, Siemens, BMW, Bosch, Delco, British Aerospace, DaimlerChrysler, Temic, Intel u.a.. Dabei hat sich die Anwendbarkeit des Verfahrens insbesondere in Packaging-Aufbauten in Chipumgebung gezeigt, wo z.Z. kaum vergleichbare Methoden zur genaueren Mikroverformungsanalyse von Lotstellen zu Mikroverbindungstechniken zur Verfügung stehen.

5. Zuverlässigkeit und Sicherheit durch Miniaturisierung mittels Mikro- und Nanotechnologien?

Die in der heutigen Zeit vielfach gestellte Frage nach der Sicherheit von Mikro- und Nanotechnologien ist ein weiterer Gesichtspunkt, der sehr eng verbunden ist mit den Fragen der Zuverlässigkeit dieser Technologien. Der Sicherheitsaspekt wird einerseits verbunden mit der Frage: Wie sicher sind

die Mikro- und Nanotechnologien? Dabei denkt man z.B. auch an die Toxizität von Nanopartikeln, an Gefahren von „sich selbst organisierenden“ Nanosystemen etc.. Dieser Aspekt bedarf sicher einer weiterführenden Diskussion nicht nur unter Fachleuten. Letztlich hängt an einer sinnvollen Beantwortung dieser „Sicherheitsfrage“ auch die gesellschaftlich Akzeptanz der Nanotechnologien.

Die angelsächsische Bezeichnung „Safety“ kennzeichnet diesen Punkt recht gut und wird deshalb auch vom klassischen Zuverlässigkeitsbegriff unterschieden (Reliability). Weiterhin haben wir für Sicherheit aber noch den Begriff „Security“. Dieser kennzeichnet dann auch den anderen Aspekt der „Sicherheit“ von Nanotechnologien. Die Sicherheit von Anlagen, Gebäuden, Systemen, Infrastrukturen, Veranstaltungen, Flugplätzen und von was auch immer wird heute ebenfalls sehr eng mit neuen Technologien in Verbindung gebracht.

Der Mensch will sicher leben. Er möchte zu diesem Zweck auch moderne Technologien einsetzen, ggf. auch zur Abwendung von Gefahren (z.B. vor Terroranschlägen etc.). Diese Techniken bergen aber auch Gefahren, die bei Missbrauch auch für den Menschen gefährlich werden können, wie das aus der Nutzung der Kernenergie ja auch bereits gut bekannt ist. Deshalb gibt es die Verbindungen Safety – Reliability – Security. Diese Diskussion wird in den nächsten Jahren noch intensiv zu führen sein. Möglichkeiten, Nutzung und Gefahren von modernen Mikro- und Nanotechnologien sind eng verbunden mit den Fragen von Zuverlässigkeit und Sicherheit dieser modernen Technologien.

Abkürzungen

AFAM	Atomic Force Acoustic Microscopy
AFM	Atomic Force Microscopy
BGA	Ball Grid Array
CSP	Chip Size Package
FEM	Finite-Elemente-Methoden
FIB	Focus Ion Beam
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
SEM	Scanning Electron Microscopy
SMD	Surface Mounted Device
SPM	Scanning Probe Microscopy
TEM	Transmission Electron Microscopy

Literatur

- [1] Michel, B.: Zuverlässigkeitsprobleme im Hightech-Bereich – Lösungsansätze und Konzepte. Von Rückrufaktionen von Autos bis zu Havarien in der Raumfahrt; Vortrag vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät, 12. Oktober 2006.
- [2] Michel, B.: Experimental Mechanics on the Way from Micro to Nano, *Experimental Technique* 29 (2005) 2, 3-5.
- [3] Michel, B.; Winkler, T.: Microsecurity – Sicherheit durch Miniaturisierung mit Sensorik und Mikrosystemtechnik, Proc. 2. Workshop des Bundesministeriums für Forschung und Bildung zur Sicherheitsforschung, Bonn, 2. 6. 2006, S. 48-49.
- [4] Michel, B.; Keller, J.: Nanodeformation Analysis New Small Cracks by Means of nanoDAC Technique, in: G. Wilkening and L. Koenders (Hrsg.), “Nanoscale Calibration Standards and Methods”, Wiley-VCH, Weinheim 2005, S. 481-489.
- [5] Michel, B.: Reliability Research on the Way from Micro to Nano, in: Proc. 1st International Conference on Multi Materials Manufacture (4M), W. Menz und S. Dimor (Hrsg.), Elsevier, Oxford 2005, S. 43-45.
- [6] Michel, B. (Hrsg.): Micromaterials, Nanomaterials for Automotives, Proc. of MicroCar 2005, in: *Micromaterials and Nanomaterials* 4 (2005), Publication Series of Fraunhofer Micro Materials Center, IZM Berlin, Germany, 2005, 107 S.
- [7] Dual, J.; Mazza, E.; Michel, B.: Auf Biegen und Brechen – Zuverlässigkeit von Mikro- und Nanosystemen, *Bulletin der ETH Zürich*, No 292, Febr. 2004, S. 57-60.
- [8] Keller, J.; Vogel, D.; Michel, B.: MicroDAC – ein Messverfahren zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften im Mikro- und Nanobereich, *VDI-Berichte* Nr. 1829 (2004), S. 433-440.
- [9] Michel, B.; Winkler, T.: Microsecurity – Important Capabilities for Homeland Security Challenges, *mst news*, Dec. 2004, S. 2.
- [10] Kühnert, R.; Vogel, D.; Kämpfe, B.; Dost, M.; Michel, B.: Verfahren zur feldmäßigen Bestimmung von Deformationszuständen in mikroskopisch dimensionierten Prüflingsbereichen, *Deutsches Patent* Nr. 14614896, München 2004.
- [11] Michel, B.; Keller, J.; Auersperg, J.: Risse in Packungsaufbauten – von der Mikromechanik zur Nanomechanik, in: K.-J. Wolter u. S. Wiese: *Interdisziplinäre Methoden der Aufbau- und Verbindungstechnik*, Verlag ddp goldenbogen, Dresden, 2003, S. 245-254.
- [12] Michel, B.: Reliability of Micro- and Nanosystems, Proc. 2nd VDE World Microtechnology Congress, VDE-Verlag, Berlin 2003, S. 365-368.
- [13] Badri Ghavifekr, H.; Michel, B.: Generalized Mechanical Integral Concepts J_G and its Application in Microelectronic Packaging Technology, *Sensors and Actuators*, No. A99 (2002), S. 183-187.

- [14]Michel, B.; Vogel, D.: Packaging and Thermomechanical Challenges for High Temperature Electronics, Proc. HITEN '99, European Conference on High Temperature Electronics, Berlin, Germany, 1999, S. 33.
- [15]Michel, B.; Großer, V.; Reichl, H.: Reliability Aspects of Microassembly in Microfactories, Proc. International Workshop on Microfactories IWMF '98, AIST Research Center, Tsukuba, Japan, 1998, S. 13.
- [16]Dudek, R.; Walter, H.; Auersperg, J.; Michel, B.: Numerical Analysis for Thermo-Mechanical Reliability of Polymeric Applications in Electronic Packaging, Proc. Polytronics Conference, Tokyo, Jan. 2007.
- [17]Michel, B.; Winkler, T.; Dost, M.: Security Assisted Systems – Security Support by Integration of Sensorics, Miniaturization and Image Processing, Conference Safety and Security Systems in Europe, Potsdam, Nov. 2006.