



DVS-BERICHTE



Elektronische Baugruppen und Leiterplatten



**Elektronische  
Baugruppen und  
Leiterplatten  
EBL 2014**

**Von Hochstrom bis Hochintegration**



# **Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2014**

## **Von Hochstrom bis Hochintegration**

Vorträge der 7. DVS/GMM-Tagung  
in Fellbach am 11. und 12. Februar 2014

Gemeinschaftsveranstaltung von  
DVS – Deutscher Verband für Schweißen und  
verwandte Verfahren e. V. und  
GMM – VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik,  
Mikrosystem- und Feinwerktechnik

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Titelbild:

Leistungsendstufe eines Hubschrauberumrichters zur Rotorblattansteuerung  
(© Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin)

## **DVS-Berichte Band 301**

ISBN 978-3-87155-573-2

Die Vorträge wurden als Manuskript gedruckt.

Alle Rechte, einschließlich Übersetzungsrecht, vorbehalten. Nachdruck und Vervielfältigung dieses Bandes oder von Teilen desselben nur mit Genehmigung der DVS Media GmbH, Düsseldorf.

© DVS Media GmbH, Düsseldorf · 2014

Herstellung: Griebisch & Rocho! Druck GmbH & Co. KG, Hamm

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

### Substrate und Bauelemente

A. Exarchos, Düren

Innovative Basismaterialien für erhöhte Anforderungen aus dem Bereich des Strommanagements ..... 1

H. Schröder, St. Karaszkiwicz, L. Brusberg, Berlin, E. Krüger, Düren, N. Tolle, Lamspringe, Th. Wiegel, Grünenplan, K. Plat und L. Overmeyer, Hannover

Vollständig dünnglasbasierte, hybride elektro-optische Leiterplatte – Neue Chancen und Herausforderungen, Fertigungstechnik ..... 6

S. Meyer, M. Kyrychenko, H. Wohlrabe, K.-J. Wolter, H. Reuter und M. Keil, Dresden

Untersuchungen zur mechanischen Belastbarkeit von 0402-SMD-Chipbauelementen bei der Bestückung ..... 12

O. Albrecht, Dresden, B. Bellmann, Freiberg, S. Gueldner, G. Noetzold, Mittweida, M. Oppermann und K.-J. Wolter, Dresden

Pin-in-Paste für klein- und großvolumige Aluminium-Elektrolytkondensatoren – Technologieentwicklung und Zuverlässigkeitsuntersuchungen ..... 19

### Analyse I

J. Trodler, Hanau, und M. Nowotnick, Rostock

Neue Anforderungen für die SIR-Messung ..... 25

P. Fischer und M. Eymann, Balve

Lotbadmanagement und Möglichkeiten der Prozessoptimierung für nickel-dotierte bleifreie Lote ..... 29

H. Schweigart und St. Strixner, Ingolstadt

Erfassbarkeit von Reinheitseinflüssen auf die Zuverlässigkeit von Leistungselektroniken ..... 32

A. Schlaht und U. Pape, Wolfsburg

Bewertungsmöglichkeiten für Einpressverbindungen bei einem Automobilhersteller ..... 37

### Aufbau- und Verbindungstechnik I

M. Tondorf, Y. Gan, K. Mouselimis und J. Wilde, Freiburg

Elektrostatisch-fluidische Selbstassemblierung für die hochgenaue Mikro-Montage von MEMS ..... 46

K. Hofmann, F. Hugger und S. Roth, Erlangen

Laserstrahlbasierte Kupfer-Aluminium-Verbindungen für Anwendungen in der Hochstromtechnik .....	52
---	----

A. Fix, T. Herberholz, M. Guyenot, Schwieberdingen, M. Nowotnick, A. Novikov, Rostock, J. Schulze, J. Trodler, Hanau, M. Hutter, Ch. Ehrhardt, Berlin, R. Dudek, Chemnitz, K. Wilke, J. Strogies, Berlin, B. Seiler, K. Kreyßig, Chemnitz, R. Diehm, V. Liedke, Kreuzwertheim, Th. Zerna und A. Klemm, Dresden

Standard-Reflowlötungen für Anwendungen bis 300 °C – ein Widerspruch? Ergebnisse aus dem Verbundprojekt HotPowCon .....	58
---	----

D. Seehase, H. Huth, F. Bremerkamp und M. Nowotnick, Rostock

Bewertung der Qualität und Zuverlässigkeit von mit exotherm reagierenden Pasten hergestellter Lötverbindungen .....	63
---	----

## **Aufbau- und Verbindungstechnik II**

Ch. Ehrhardt, M. Hutter, H. Oppermann und K.-D. Lang, Berlin

Verbindungstechnologien für Baugruppen bei erhöhten Betriebstemperaturen .....	68
--	----

H. Grumm und D. Graupner, Ottobrunn

Schablonendruck mit Sinterpasten .....	75
--	----

M. Novak, Ch. Helpap, K. Beart, Th. Schmidt und B. Schuch, Hannover

Ag-Sintern als alternative Verbindungstechnologie in der Automobilelektronik .....	78
--	----

St. Härter, Nürnberg, C. Läntzsch, Fürstenfeldbruck, und J. Franke, Nürnberg

Gesicherte Verarbeitung von hochminiaturisierten Bauelementen der Baugröße 01005 in der Elektronikproduktion .....	84
--	----

## **Zuverlässigkeit I**

M. Ochs, Regensburg, Ch. Früh, R. Ratchev, Schwieberdingen, und A. Schießl, Regensburg

Leiterplatten- und Lötstellenzuverlässigkeit in Abhängigkeit des Leiterplatten-Basismaterials .....	92
---	----

J. Lutz, P. Steinhorst, T. Poller, B. Wielage, T. Lampke, S. Weis, D. Nickel, A. Yulinova und V. Fedorov, Chemnitz

Mechanische Charakterisierung der Lötverbindungen von Leistungsmodulen als Basis für die Lebensdauerabschätzung mittels FEM .....	99
---	----

T. Herberholz, A. Fix, Schwieberdingen, und M. Nowotnick, Rostock

Alterungsverhalten bleifreier Zinnbasislote im Temperaturbereich bis 200 °C – Weiterentwicklungen .....	104
---	-----

H. Zecha, C. Früh, R. Ratchev, Schwieberdingen, und T. Zerna, Dresden

Einfluss von Aramid als Verstärkungsgewebe in Leiterplatten auf Eigenschaften und Alterungsverhalten von elektronischen Systemen .....	114
--	-----

## Zuverlässigkeit II

F. Fella, K. Beart, Th. Schmidt und B. Schuch, Nürnberg

Einfluss der Parametervariation im Bondprozess auf die Zuverlässigkeit von Al-Dickdrahtbondverbindungen ..... 120

M. Reichenberger, Nürnberg, S. Brown, Woking/GB, M. Holtzer und K. Tellefsen, South Plainfield/USA

Kompatibilität von Lotpasten und Flussmittelrückständen mit Schutzlacken (Conformal Coatings) ..... 126

B. Reichling, A. Fix, R. Ratchev, Schwieberdingen, und J. Wilde, Freiburg

Untersuchung des Verhaltens bleifreier Lötverbindungen unter Vibrationsbelastung ..... 134

A. Hutzler, A. Tokarski und A. Schletz, Nürnberg

Modellierung von Ermüdungsausfällen durch aktive Lastwechseltests ..... 141

## Analyse II

Th. Schreier-Alt, F. Ansorge, Oberpfaffenhofen, G. Chmiel, Dortmund, und K.-D. Lang, Berlin

Prozessoptimierung und Produktprüfung von QFN-Bauteilen mit dem iForce-Stressmesschip ..... 148

Th. Mente, B. Bankel, R. Kohl und B. Schuch, Nürnberg

Anwendung moderner Analyseverfahren zur Sicherstellung der Prozess- und Produktqualität in der Entwicklung von Automobilelektronik ..... 154

M. Steiert, R. Zeiser, M. Berndt, J. Wilde, T. Beckmann und M. Fratz, Freiburg

Verformungsmessung an elektronischen Bauteilen und Baugruppen mit Grauwertkorrelation und Holografie ..... 159

J. Bornemann und Th. Ahrens, Lippstadt

Prüfung der Qualität von Einpressverbindungen ..... 166

## Analyse III

V. Pape, Hannover

3D-Inspektionstechnik, Traceability und automatische Prozesskontrolle im SMT-Prozess – notwendig oder nutzlos? ..... 172

H. Wohlrabe, Dresden

Auswirkungen von Verwindungen und Verwölbungen während des Lötens auf die Qualität von Produkten der Leistungselektronik ..... 179

O. Gropp, Weinheim

Technische Sauberkeit ..... 186

A. Mahr, Lam	
Produktion Leistungselektronik, wie sauber muss es sein? .....	191
 <b>Analyse IV</b>	
M. Suppa, Kempen	
Anforderungen an Beschichtungen bei Hochvoltanwendungen in Kraftfahrzeugen .....	197
M. Broll, H. Walter, A. Kaltwasser, K. Schauer, O. Wittler und K.-D. Lang, Berlin	
Indentation zur Ermittlung elastisch-plastischer Werkstoffeigenschaften von metallischen Mikrostrukturen .....	202
R. Schmidt, M. Zwanzig und M. Schneider-Ramelow, Berlin	
Korrosion in ENIG-Schichtsystemen .....	210
G. L. Tsebo Simo, H. Shirangi, Stuttgart, M. Nowotnick, Rostock, R. Dudek, E. Kaufersch und S. Rzepka, Chemnitz	
FEM-Simulation der Zuverlässigkeit von Ball Grid Array-Bauteilen unter Fallbeanspruchungen .....	215
 <b>Entwicklungstendenzen I</b>	
W. Pohlmann und T. Hendrix, Lippstadt	
Miniaturisierung der Halbleiterlichtquellen – Chancen und Risiken .....	223
R. Peters, Rostock	
Mikrobearbeitung von glasfaserverstärkten, flexiblen und nanobeschichteten Leiterplatten mittels Ultrakurzpuls laser .....	228
W. K. Schomburg, J. Li, C. Gerhardy und J. Sackmann, Aachen	
Neues, preiswertes und umweltfreundliches Fertigungsverfahren für Leiterplatten vermittelt Ultraschall .....	233
A. Schwersenz, St. Salinger, R. Erli, Niedernhall, und J. Ulm, Künzelsau	
Planare Antriebssysteme basierend auf Leiterplattentechnik .....	237
 <b>Entwicklungstendenzen II</b>	
F. Ansorge, Ch. Baar, D. Ifland und K.-D. Lang, Wessling	
Next Generation Substrate – Wie elektronische Systeme maskenlos gedruckt werden .....	241
P. Foerster, E. Simon, Berlin, F. Hänsch, Ettlingen, Ch. Kallmayer, M. Schneider-Ramelow und K.-D. Lang, Berlin	
Textile Leiterplatte – Large-area, wirtschaftlich und umweltschonend .....	245

# Innovative Basismaterialien für erhöhte Anforderungen aus dem Bereich des Strommanagements

A. Exarchos, Düren

Entwicklungen in der Leistungselektronik bringen immer höhere Strombelastungen mit sich, denen die Baugruppen standhalten müssen. Das Management von hohen Strömen und elektrischer Energie gewinnt daneben auch in vielen anderen Bereichen wie der Informationselektronik, der Mess- und Regeltechnik oder der Elektromobilität an Bedeutung. Hohe Wärmebelastungen sind aufgrund der steigenden Verlustleistungen ein wichtiges Thema. Thermische Beständigkeit und hohe Zuverlässigkeit müssen unbedingt über die Konstruktion der gesamten Baugruppe gegeben sein. Bereits die Grundlage, das Basismaterial, muss all diesen Anforderungen entsprechen. Im Fokus stehen dabei die Vermeidung von thermomechanischen Ausfällen und die effiziente Abführung von Wärme. Die Überbelastung des Basismaterials, die mechanische und dielektrische Eigenschaftswerte des Materials beeinflussen kann, muss vermieden werden. Verlängerte Lebensdauererwartungen an die Baugruppe implizieren eine Langzeitstabilität der Basismaterialeigenschaften unter immer extremeren Bedingungen.

Welche Materialeigenschaften sind für diesen Bereich entscheidend und erlauben eine Aussage über die Beständigkeit eines Materials? Wie kann die geforderte Beständigkeit geprüft und nachgewiesen werden? Diese Fragen nach den Kriterien zur Auswahl des Materials, sowie den Prüfmethode und Untersuchungen werden im Vortrag geklärt bzw. vorgestellt. Mögliche Lösungsansätze mit Materialvorschlägen werden aufgeführt. Darunter fallen Material mit hoher Wärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit, sowie Lösungen für die Abführung von Wärme. Diverse Untersuchungen der Beständigkeit und Ergebnisse, die die Eigenschaftswerte belegen, werden aufgezeigt.

Damit wird in diesem Vortrag ein ganzheitlicher Überblick über den Bereich des Basismaterials für den Bereich der Hochstromanwendungen gegeben, der Materialauswahl, Prüfmethode und Materialvorschläge einschließt.

## 1 Herausforderung thermische Belastung

Entwicklungen in der Leistungselektronik bringen immer höhere Strombelastungen mit sich, denen Baugruppen standhalten müssen. Hinzukommen steigende Integrationsdichten, so dass die thermische Belastung durch Verlustleistungen in den Baugruppen immer mehr zunimmt. Dieses ist insoweit kritisch, als dass erhöhte Temperaturen die Hauptursache für Ausfälle in der Elektronik darstellen. Der Stressfaktor Temperatur führt zu einer beschleunigten Alterung von Materialien und damit zu vorzeitigen Ausfällen. Unterschiedliche Fehlerbilder, wie Hülsenrisse, Padlifting, Delaminationen, usw. können auf die thermische Überbelastung von Materialien zurückgeführt werden.

Demzufolge ist es entscheidend Materialien einzusetzen, die hohen Temperaturen standhalten können, um so Ausfälle zu vermeiden.

Neben der thermischen Beständigkeit, die dazu führt dass höhere Temperaturen von Materialien ohne Beschädigung ausgehalten werden, ist besonders im Hinblick auf die Ausbildung von Hot Spots unter einzelnen Bauteilen auch das Spreizen und Abführen von Wärme ein wichtiges Thema.

Im Folgenden wird erklärt, welche Eigenschaftswerte für die Temperaturbeständigkeit eines Basismaterials entscheidend sind und welche Modifikationen eines Harzsystems die Temperaturbeständigkeit erhöhen.

## 2 Thermische Kennwerte von Basismaterialien

Die thermische Beständigkeit von Basismaterialien wird durch mehrere Kennwerte beschrieben. Diese sind:

- die Glasübergangstemperatur  $T_g$
- die Zersetzungstemperatur  $T_d$
- die Zeit bis zur Delamination T266/T288
- der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$ .

Nur die Betrachtung der Gesamtheit dieser Eigenschaftswerte ermöglicht eine Aussage über die Temperaturbeständigkeit eines Materials.

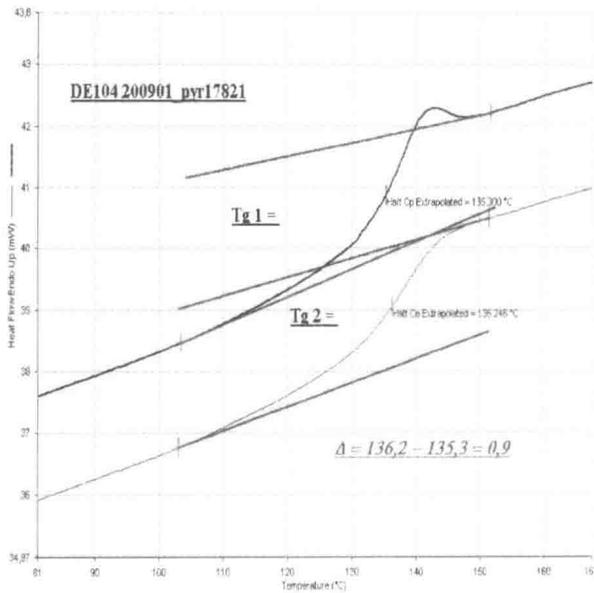
Die Glasübergangstemperatur  $T_g$  zeigt an, bei welcher Temperatur eine duroplastische Harzmatrix vom glasartig, sprödem in einen plastischen, weichen Zustand übergeht. Es handelt sich dabei um einen Temperaturbereich, in dem sich Enthalpien, die Moduln, sowie die thermische Ausdehnung eines Harzes drastisch ändern. Diese Änderungen unterschiedlicher Eigenschaften erlauben eine Messung des  $T_g$ -Bereiches über drei gängige Methoden:

- DSC (Dynamische Differenz Kalorimetrie), bei der eine Enthalpieänderung gemessen wird
- TMA (Thermomechanische Analyse), bei der der thermische Ausdehnungskoeffizient vermessen wird

- DMA (Dynamisch-Mechanische Analyse), bei der die Moduln durch Messung der viskosen und elastischen Eigenschaften bestimmt werden.

Die drei Messmethoden ergeben unterschiedliche Messergebnisse, weshalb bei der Angabe eines  $T_g$ -Wertes immer auch die Messmethode genannt werden sollte. Zudem sind auch die Aufheizrate und Probenpräparation entscheidend, um eine direkte Vergleichbarkeit von Messwerten zu ermöglichen.

Die gängigste Methode ist die DSC.



**Bild 1:** DSC-Messkurve eines Standard- $T_g$ -Materials.

Bei einer DSC-Messung werden jeweils zwei Messläufe durchgeführt (Bild 1). Nach einem ersten Messlauf ( $T_g1$ ) wird 10 min lang eine hohe Temperatur gehalten. Anschließend wird die Probe abgekühlt und ein zweiter Lauf ( $T_g2$ ) vorgenommen. Sind noch reaktive Gruppen im Harzsystem vorhanden, dann erfolgt während des ersten Messlaufs ein Nachhärten des Materials. Bei der zweiten Messung wird in einem solchen Fall ein  $T_g$ -Wert gemessen, der von dem ersten Wert abweicht. Aus der Differenz dieser beiden  $T_g$ -Werte, dem  $\Delta T_g$ , kann also eine Aussage über den Aushärtegrad eines Materials getroffen werden. Zu beachten ist, dass nicht nur der Aushärtegrad den  $\Delta T_g$ -Wert beeinflussen kann. Auch Feuchtigkeit im Material, oder die Degradation des Harzsystems können zu erhöhten  $\Delta T_g$ -Werten führen.

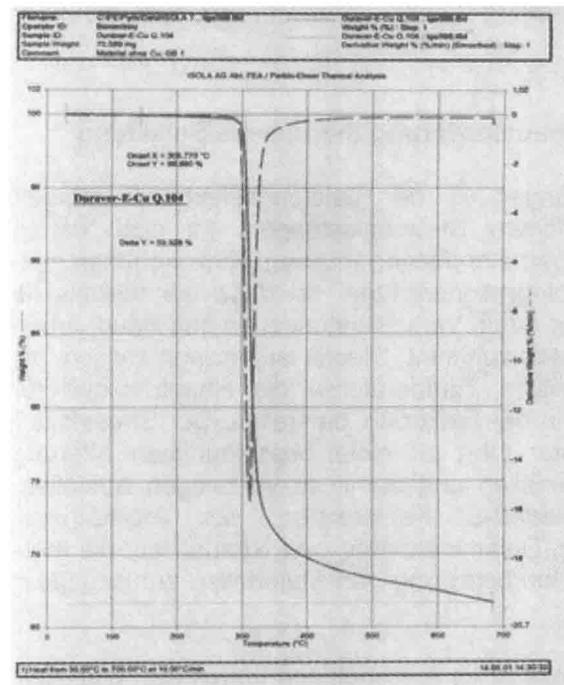
Wie beschrieben kann durch Nachtempern eine unvollständige Aushärtung des Materials abgeschlossen werden. Um zu unterscheiden, ob Feuchtigkeit im Material vorliegt, wird die Probe vor der Messung bei niedrigeren Temperaturen getrocknet (120 °C, 3 h) und erst anschließend vermessen. Wenn eine Degradation des Materials vorliegt, kann dieser Zustand natürlich weder durch Tempern, noch durch Trocknen, geändert werden. Der auffällige  $\Delta T_g$ -Wert wird auch nach Durchführung dieser Maßnahmen weiterhin vorliegen.

Die TMA-Methode ermöglicht es, den  $T_g$ -Wert über die Änderung der Ausdehnung des Materials zu bestimmen. Bei Erreichen des Glasübergangs steigt die z-Achsenausdehnung des Materials stark an, welches den  $T_g$ -Bereich anzeigt.

Bei der Messung mittels DMA wird über eine sinusförmige mechanische Beanspruchung der Probe der Speichermodul ermittelt. Aus dem Maximum der ersten Ableitung dieser Kurve kann der  $T_g$ -Wert ermittelt werden.

Alle Vorgänge, die während des Glasübergangs im Basismaterial auftreten, sind reversibel, sobald die Temperatur wieder unter den  $T_g$ -Wert abgesenkt wird.

Im Gegensatz dazu werden bei Erreichen der Zersetzungstemperatur  $T_d$  irreversible Vorgänge freigesetzt. Es kommt zu einem Gewichtsverlust der Probe, der durch die Zersetzung der Harzmatrix verursacht wird. Die Zersetzungstemperatur wird über Thermogravimetrie (TGA) bestimmt, und wird laut IPC-4101 als 5 % Gewichtsverlust definiert. Das Gewicht der Probe wird dabei in Abhängigkeit der Temperatur aufgenommen (Bild 2).



**Bild 2:** Typische Messkurve der Zersetzungstemperatur mittels TGA.

Zersetzungstemperaturen von Basismaterialien werden bislang annähernd nur während der Lötprozesse bei der Leiterplattenherstellung erreicht. Sie liegen im Bereich von 300 – 360 °C. Sie können vor allem als Vergleichswerte zur Beurteilung der thermischen Stabilität von Materialien herangezogen werden.

Bei der Betrachtung der thermischen Stabilität eines Materials sollte neben dem Faktor Temperatur auch immer die Zeit betrachtet werden. So ist das Vermögen eines Materials, einer bestimmten Temperatur

R. Schwerz, M. Roellig, Dresden, M. Franke, Mittweida, G. Lautenschläger und K.-J. Wolter, Dresden	
Zuverlässigkeitspotential von eingebetteten passiven und aktiven Bauelementen für die sensorische Strukturüberwachung .....	254
J. Haimerl, Zandt, und B. Kärcher, Esslingen	
MIKOA – Miniaturisierte energieautarke Komponenten mit verlässlicher drahtloser Kommunikation für die Automatisierungstechnik .....	262
<b>Aufbau- und Verbindungstechnik III</b>	
G. Hemken, Ch. Walz, Bremen, J. Heyn, P. Blumenthal und K. Dröder, Braunschweig	
Einsatz von reaktiven Multischichten zum Fügen von Elektronikkomponenten .....	271
J. Bräuer, J. Besser, Chemnitz, W. Schneider, Dresden, M. Wiemer und T. Gessnez, Chemnitz	
Fügen mit iRMS: Eine neue Raumtemperatur-Aufbau- und Verbindungstechnologie in der Informationstechnik .....	278
St. Egerer, Regensburg, M. Eisenbarth, Nürnberg, und P. Jobst, Ingolstadt	
Herausforderungen bei der Verarbeitung von miniaturisierten Bauelementen unter Berücksichtigung von Automotive-Qualitätsanforderungen .....	282
S. Wege, R. L. Diehm und V. Liedke, Kreuzwertheim	
Anlagenkonzepte zur Herstellung hochtemperaturfester Flachbaugruppen mittels Diffusionslötens und Sintern .....	286
<b>Zuverlässigkeit III</b>	
S. S. Mattern, L. Henneken, Schwieberdingen, und M. Nowotnick, Rostock	
Einfluss des Lötstopplackes auf die elektrochemische Migration und den Oberflächenwiderstand .....	291
B. E. Abali, P. Lofink und W. H. Müller, Berlin	
Untersuchung der Variation der Materialkennwerte zur Lebensdauerabschätzung für Durchkontaktierungen in Leiterplatten .....	297
J.-H. Klingel, Frielzheim	
Steigende Anforderungen des klimatischen Schutzes elektronischer Baugruppen durch Elektromobilität .....	304
Th. Lauer, Ulm	
Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus dem ZVEI-AK Nacharbeit und Reparatur elektronischer Baugruppen .....	308

standzuhalten, sehr stark abhängig von der Zeit, der das Material dieser Temperatur ausgesetzt wird.

Dieser Einflussfaktor wird in der Ermittlung der Zeit bis zur Delamination T260/T288 untersucht. Die Messung erfolgt mittels TMA (Thermomechanische Analyse). Dabei wird die Probe einer Temperatur von 260 °C, bzw. 288 °C, ausgesetzt und die Zeit bis zur Delamination des Materials gemessen. Standard Harzsysteme erreichen bei der T260-Messung Zeiten von 5 – 15 min. Der T288-Messung halten solche Systeme nicht Stand. Dagegen können mit thermisch Beständigen Harzen über 60 min im T260 und 15 – 60 min beim T288-Test erhalten werden.

Auch der thermische Ausdehnungskoeffizient ist für die thermische Beständigkeit eines Systems entscheidend. Es wird generell zwischen der Ausdehnung in x/y- und in z-Richtung unterschieden. Während in x/y-Richtung die Ausdehnung des Materials vom eingesetzten Glasgewebe stark beeinflusst wird, wirkt sich in z-Richtung alleine die Ausdehnung des Harzes aus.

Wie bereits ausgeführt, ändert sich die thermische Ausdehnung des Basismaterials beim Glasübergang drastisch. Über dem  $T_g$ -Bereich zeigt das Harz eine viel höhere Ausdehnung, als unter dem  $T_g$ -Bereich. Die Zugkraft, die auf Bohrhülsen ausgeübt wird, steigt damit um ein vielfaches im Temperaturbereich über  $T_g$ .

Ein geringerer thermischer Ausdehnungskoeffizient in z-Richtung kann also die Zuverlässigkeit eines Systems unter thermischer Belastung erhöhen.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient CTE wird in der TMA bestimmt. Aufgenommen wird hierbei die Änderung des Volumens einer Probe in Abhängigkeit von der Temperatur (Bild 3).

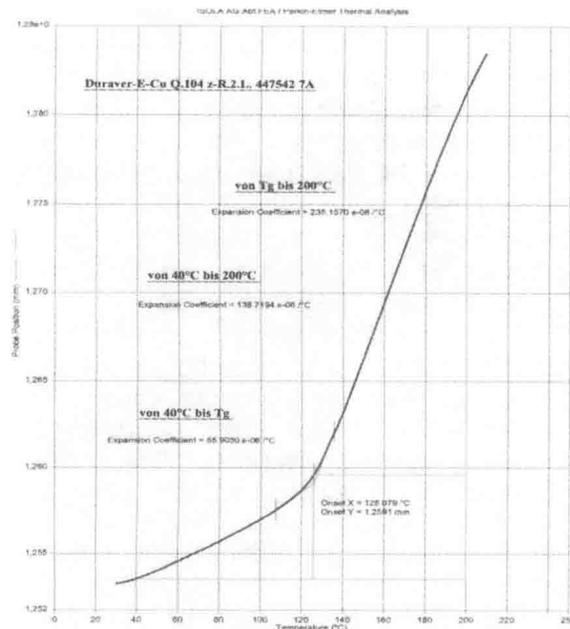


Bild 3: Typische Messkurve der Ausdehnung in z-Richtung.

Da der CTE in direkter Abhängigkeit vom  $T_g$ -Wert steht, ist es logisch, dass ein höherer  $T_g$ -Wert beim Vergleich absoluter Temperaturwerte niedrigere  $CTE_z$ -Werte zur Folge hat (Bild 4).

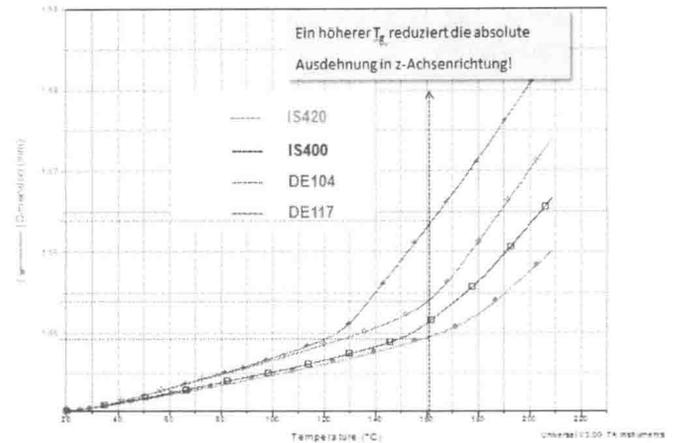


Bild 4: Vergleich der thermischen Ausdehnung unterschiedlicher Materialien bei einer absoluten Temperatur. DE104: Standard- $T_g$ /ungefüllt; DE117: Hoch- $T_g$ /ungefüllt; IS400: Mittel- $T_g$ /gefüllt; IS420: Hoch- $T_g$ /gefüllt.

Demnach kann zunächst durch den Einsatz von Materialien mit höheren  $T_g$ -Werten die thermische Ausdehnung in z-Richtung bei einer absoluten Temperatur im Vergleich zu einem Standard- $T_g$ -Material erniedrigt werden.

### 3 Thermisch beständige Harzsysteme

Obwohl wir seit den Anfängen des Basismaterials in den 1950er Jahren immer noch von FR-4 Harzsystemen auf Epoxidharzbasis sprechen, gibt es neben den Standard-Materialien mittlerweile ein großes Spektrum an temperaturbeständigen Materialien, die immer noch in dieser Kategorisierung erfasst werden. Diese Erweiterung des Basismaterialspektrums wird grundsätzlich durch zwei Variationen des Harzsystems ermöglicht. Zum einen ist es das Härterssystem und zum anderen der Einsatz von Füllstoffen.

Die Harzchemie des Basismaterials beruht auf dem Aufbau von langen Molekülketten, die über kleinere Moleküle, die sogenannten Härter, untereinander zu einer Art von Netz verbunden werden. Es gibt grundsätzlich zwei Härterssysteme, die unter den Bezeichnungen „dicy“ und „Novolak“ bzw. „phenolischer“ Härter bekannt sind.

Standard-FR-4-Materialien enthalten den dicy-Härter. Sie weisen eine geringere thermische Beständigkeit und relativ hohe  $CTE_z$ -Werte auf. Bei Einsatz des Novolak-/phenolischen Härters erhöht sich die thermische Stabilität des Harzes. Die Bindung zwischen Polymerketten und Härter erfolgt im Falle von dicy über Amine, während beim Novolak Etherbrücken ausgebildet werden. Die Bindungsenergie der Etherbrücken ist höher als die eines Amins. Somit liegen beim Einsatz von Novolak im Vergleich zum dicy-Härter stärkere Bindungen zwischen Härter und Polymerketten vor. Zudem verfügt der phenolische

## **Zuverlässigkeit IV**

R. Metasch, M. Roellig, K.-J. Wolter und N. Meyendorf, Dresden

Zuverlässigkeitsbewertung von elektrischen und mechanischen Verbindungen mit dem iQPro-Demonstrator ..... 316

K. Meier, G. Lautenschläger, M. Röllig, Dresden, A. Schießl, Regensburg, und K.-J. Wolter, Dresden

Lebensdauerbestimmung für Lotkontakte von SMD-Bauelementen unter Vibrations- und Temperaturbelastung ..... 322

R. Dudek, M. Hildebrandt, W. Faust, Chemnitz, H. Trageser, R. Kohl und B. Schuch, Nürnberg

Analytische und numerische Beschleunigungsmodelle für Lötverbindungen und Verifizierung mit Feldtestergebnissen ..... 329

H.-P. Klein, Bassersdorf/CH

Zuverlässigkeit von Leiterplatten für medizinische Anwendungen ..... 337

## **Leiterplatten**

M. Schmied, R. Fiehler und G. Georgiev, Gornsdorf

Kupferleitpasten – Eine alternative Durchkontaktierungstechnologie für flexible Schaltungsträger? ..... 341

R. Fiehler, St. Schädlich, L. Lange und D. Werner, Gornsdorf

Aluminium vs. Kupfer – Chancen und Herausforderung zum Einsatz von Aluminium für eine neue Leiterplattentechnologie ..... 347

A. Schreivogel, Rot am See

Moderne Spulentechnologien in der Leiterplattentechnik ..... 354

C. Lehnberger, Berlin

Technologie-Dschungel bei Power-Leiterplatten ..... 359

**Autorenverzeichnis** ..... 363

Härter über mehr Bindungsstellen am einzelnen Härtermolekül, wodurch es, bildlich gesprochen, zur Ausbildung eines engeren Netzes kommt, das wiederum beständiger ist. Daraus ergibt sich also die höhere thermische Beständigkeit von phenolisch gehärteten Systemen, die sich vor allem in höheren Zersetzungstemperaturen  $T_d$  und längeren Zeit zur Delamination T260/T288 widerspiegelt (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Vergleich von Kennwerten bei Einsatz von dicy- und Novolak-Härtern.**

Kennwert	Dicy	Novolak
$T_g$ [°C]	130 – 170	130 – >170
$T_d$ [°C]	300 – 315	340 – 370
T260 [min]	10 – 15	≥60
T288 [min]	-	> 15

Der Zusatz von speziellen Füllstoffen zum Harzsystem führt zu einer Erniedrigung der thermischen Ausdehnung in z-Richtung. Diese Füllstoffe sind mineralische, chemisch inerte, unlösliche und elektrisch nicht leitende Salze, die die mechanischen Eigenschaften des Harzes verändern. Neben dem positiven Aspekt der Verminderung der Ausdehnung kommt es auch zur Absenkung der Kupferhaftung und einer Verschlechterung der Bohrbarkeit des Materials. Aus diesen Gründen kann keine beliebige Menge an Füllstoffen zugesetzt werden. Vielmehr muss ein optimales Verhältnis der Füllstoffkonzentration gefunden werden, bei der die Ausdehnung gemindert wird und sich die negativen Aspekte nicht zu stark auswirken.

#### 4 Thermisch beständige Materialien

Es wurde ausführlich diskutiert, welche Kennwerte für eine hohe thermische Beständigkeit entscheidend sind, und wie ein Harzsystem modifiziert werden kann, um diese hohe Resistenz gegen den Stressfaktor Temperatur zu erreichen.

Neben den genannten Kennwerten, die zunächst nur das Basismaterial charakterisieren, können auch weiterführende Tests durchgeführt werden, um die Beständigkeit und Zuverlässigkeit von Materialien nachzuweisen. So können Materialien in Reflow-Tests, bei der Untersuchung der Lötbadbeständigkeit, in Temperaturlagerungstests und den Temperaturwechseltests unter extremen Bedingungen gestresst und geprüft werden. Beachtet werden sollte, dass die Prüfung des Basismaterials und die erhaltenen Ergebnisse nicht direkt auf einen Multilayeraufbau übertragen werden können. So kann das Basismaterial an sich bestimmte Prüfungen bestehen, bei denen dann ein Multilayer, der aus diesem Basismaterial aufgebaut wird, unter den gleichen Prüfbedingungen ausfällt. Hierbei spielen der Lagenaufbau, die Lagenzahl sowie Kupfer-

stärke- und belegung eine entscheidende Rolle. Die thermische Belastung in einem Multilayer kann aufgrund der genannten Faktoren viel höher sein, als im Basismaterial.

Als Beispiel für ein solches temperaturbeständiges Basismaterial, das speziell für die Hochleistungselektronik entwickelt wurde, wird die 185HR der Isola vorgestellt. Neben den thermischen Kennwerten, die den Anforderungen eines temperaturbeständigen Materials entsprechen, wurden unterschiedliche Multilayer-Aufbauten den genannten Tests unterzogen (Bild 5).

Dieses Material hat sich dabei als sehr geeignet erwiesen, um hohen Temperaturen, die durch Verlustleistungen auf der Leiterplatte generiert werden, standzuhalten.

Isola Type	Härter	Füllstoff	$T_g$	$T_d$	CTE <sub>z</sub>	T260	T288
			[°C]	[°C]	[ppm/K]	[min]	[min]
185HR	phenolisch	Jt	170	340	40	60	15

<b>Reflowtest</b> 10 Lagen Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 x Reflow @ 180 °C</li> <li>1 x Reflow @ 200 °C</li> <li>5 x Reflow @ 260 °C (nach Simulierung 40/52/72)</li> </ul>
<b>Lötbadbeständigkeit</b> 6 Lagen Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>30 min @ 260 °C</li> <li>(nach Simulierung 40/52/72)</li> </ul>
<b>Temperaturlagerung</b> 6 Lagen Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>100 °C / 1000 h (nach Simulierung 40/52/72)</li> <li>150 °C / 1000 h (nach Simulierung 40/52/72)</li> </ul>
<b>Temperaturwechseltest</b> 6 Lagen Prüfmuster	<ul style="list-style-type: none"> <li>100 / 100 (1000 h) (TK1, Klasse 0 / 100)</li> <li>100 / 250 (1000 h) (TK2)</li> <li>100 / 100 / 500 h (1000 h bestanden) (Release E)</li> </ul>

**Bild 5: 185HR: Kennwerte der unterschiedliche Prüfungen.**

#### 5 Wärmemanagement aus Sicht des Basismaterialherstellers

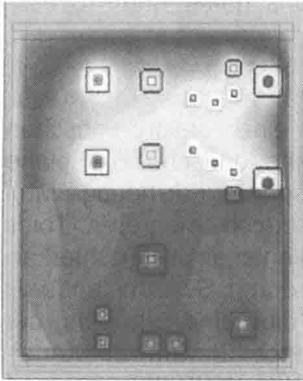
Neben dem Einsatz von thermisch beständigen Materialien, die hohen Temperaturen standhalten können, gibt es auch die Möglichkeit auf der Leiterplatte durch Eigenerwärmung entstehende Wärme abzuführen, und so die thermische Belastung zu vermindern. Es gibt unterschiedliche Technologien zur Umsetzung von Wärmemanagement auf der Leiterplatte. So werden u.a. Kupferdrähte, Kupferprofile oder Einlegeteile sowie Dickkupferkaschierungen verwendet.

Der Basismaterialhersteller kann hierbei einen Beitrag durch den Einsatz von Materialien mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit leisten. Dieser Lösungsweg ist eine Herausforderung, da das klassische FR-4-Dielektrikum mit einer Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,25 W/m·K, z. B. im Vergleich zum Kupfer, ein sehr schlechter Wärmeleiter ist. Eben diese schlechte Wärmeleitfähigkeit führt im Standardaufbau einer Leiterplatte zu einem Wärmestau, der eine Erwärmung des Bauteils bewirkt und damit die Eigenerwärmung noch verstärkt. Um eine erhöhte Wärmeleit-



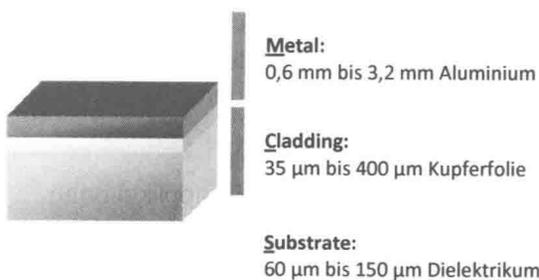
fähigkeit von Basismaterialien zu erreichen, werden Harzsystemen z. B. keramische Füllstoffe beigefügt, die über eine höhere Wärmeleitfähigkeit verfügen als das Harzsystem an sich.

Das Material IS450 verfügt über ein Harzsystem, das durch den Zusatz von wärmeleitfähigen Füllstoffen eine Vervielfachung der Wärmeleitfähigkeit auf 1,0 W/m·K erreicht und somit zu einer aktiven Wärmespreizung unter Bauteilen beitragen kann (Bild 6).



**Bild 6:** Vergleich der Wärmeentwicklung unter Bauteilen auf Standard-FR-4- (oben) und IS450-Basismaterial (unten); Quelle: Siemens.

Um die Wärmeleitfähigkeit des Basismaterials weiter zu erhöhen kann die MCS-Konstruktion (Metal Clad Substrate) gewählt werden. MCS-Laminare basieren auf einem einseitig kupferkaschierten, isolierten Metallkern. Als Trägermaterial dient Aluminium. Ausgenutzt wird bei dieser Konstruktion die sehr gute Wärmeleitfähigkeit von Metallen, weshalb eine relativ dicke Metallkaschierung mit einer möglichst dünnen Dielektrikumsschicht kombiniert wird (Bild 7). Eine Auswahl unterschiedlicher Prepreg-Systeme bildet das Baukastensystem der Isola „Lambda-Familie“, das je nach Anforderung unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des MCS-Aufbaus ermöglicht.



**Bild 7:** Schematischer Aufbau der MCS-Materialien.

Für eine Vergleichbarkeit von Werten der Wärmeleitfähigkeit sind die gleiche Messmethode und der gleiche Aufbau des Prüfkörpers notwendig, da unterschiedliche Messmethoden und Aufbauten variierende Wärmeleitfähigkeitswerte ergeben können. Neben der thermischen Leitfähigkeit des Dielektrikums sollte auch der gesamte Verbund aus Isolierschicht und Metallkaschierung betrachtet werden, da letztendlich dieser Gesamtverbund zur Wärmeabführung unter einem Bauteil genutzt wird. Mit der Kombination aus sehr hohen Metallstärken und dünnen Isolierschichten

können hohe Wärmeleitfähigkeitswerte erreicht werden, auch wenn Standardmaterialien eingesetzt werden.

So sollte bei der Überlegung von Wärmespreizung und -Abführung aus einem System neben den Wärmeleitfähigkeitseigenschaften der Materialien auch die Konstruktion der Baugruppe bedacht werden.

Somit gilt sowohl für die Betrachtung der Wärmeabführung wie auch der Beständigkeit eines Systems gegenüber thermischer Belastung, dass sich über Kennwerte des Basismaterials eine erste Einschätzung der Eigenschaften erfassen lässt, die aber immer auch eine Betrachtung der fertigen Baugruppe notwendig macht. Das Basismaterial als Grundlage der Leiterplatte, bzw. der bestückten Baugruppe muss gewisse Eigenschaften besitzen, diese können jedoch nicht einfach auf die Baugruppe übertragen werden. Die Konstruktion der Baugruppe und das Leiterplattendesign haben besonders in den Bereichen der Leistungselektronik einen enormen Einfluss.

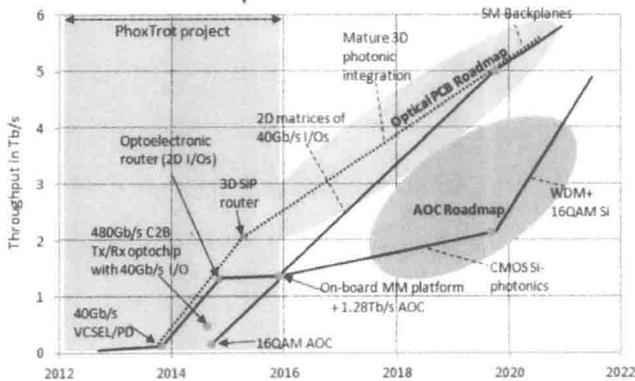
# Vollständig dünn glasbasierte, hybride elektro-optische Leiterplatte – Neue Chancen und Herausforderungen, Fertigungstechnik

H. Schröder, St. Karaszkiwicz, L. Brusberg, Berlin, E. Krüger, Düren, N. Tolle, Lamspringe, Th. Wiegel, Grünenplan, K. Plat und L. Overmeyer, Hannover

Kern des neuen Ansatzes ist die Realisierung von mehrlagigen, elektrisch-optischen Leiterplatten (EOCB) mit Hilfe von in der Displaytechnik genutztem Dünn glas. Eine solche Technologie ermöglicht Produkte mit deutlich verbesserter Performance, Zuverlässigkeit, geringeren Kosten sowie höherer Energieeffizienz herzustellen. Das Dünn glas substituiert das sonst gebräuchliche FR4 als Basismaterial. Anforderungen, Eigenschaften und Prozesstechnologie werden vorgestellt und diskutiert.

## 1 Einleitung

Seit mehr als einer Dekade werden Entwicklungen zur Integration von Dünn glas als neuartiges Basismaterial für Leiterplatten durchgeführt. Ausgangspunkt war die Verfügbarkeit von preisgünstigem Displayglas und die Aussichten auf Baugruppenträger mit herausragender Zuverlässigkeit, HF-Tauglichkeit und der Möglichkeit, optische Wellenleiter planar direkt in die Baugruppenträger zu integrieren. Anhaltender Treiber für letzteren Trend ist der steigende Bedarf an zu übertragender Bandbreite auch innerhalb der Systeme aufgrund der steigenden Prozessortakraten (Bild 1).



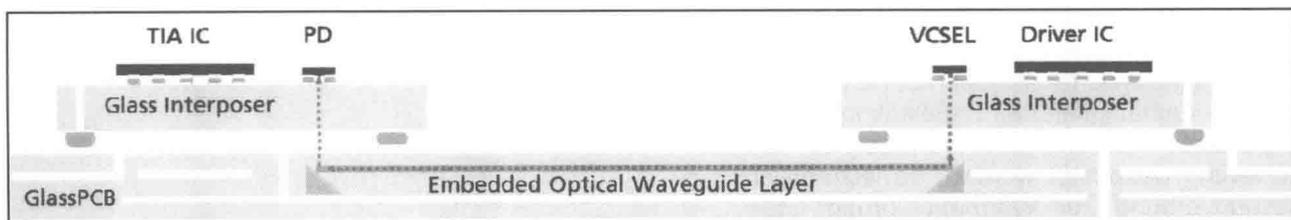
**Bild 1:** Im EU-Projekt „PhoxTrot“ erarbeitete Roadmap der aggregierten Bandbreite für Datenkommunikationssystem bis 2022 [1]

Hohe Störsicherheit, geringe Verlustleistung, Zuverlässigkeit, Skalierbarkeit, Leistungseffizienz bei geringem Platzbedarf sind dabei – neben dem hohen Bandbreite-Längen-Produkt – wesentliche Argumente für optische Verbindungstechnik auf Baugruppenträgern in Systemen. Um beispielsweise High-End-Serveranwendungen mit symmetrischen Multiprozessorssystemen zu realisieren werden komplexe Architekturen benötigt. Die elektro-optisch gewandelten

Signale von einer CPU auf einer elektro-optischen Tochterkarte werden über eine optische Backplane auf weitere Tochterkarten gesendet. Für heutige Multiprozessorkapazitäten im Bereich mehrerer Tbit/s wären hunderte optische Wellenleiter pro Tochterkarte notwendig. Aufgrund des durch Systemstandards begrenzten Platzes erfordert dies eine Erhöhung der Packungsdichte der Wellenleiter [2]. Um die Kanaldichte zu erhöhen, könnte der Wellenleiterabstand verringert werden oder aber weitere optische Signal-lagen übereinander angeordnet werden [3,4,5].

So wie die Leistung der Prozessoren und der optoelektrischen Chips (VCSEL, PD, Verstärker, Treiber) steigt, werden auch die Anforderungen an das Basismaterial für den Baugruppenträger höher. Die Innovation des hier gezeigten neuen Ansatzes ist die ausschließliche Nutzung von Dünn glas als Basismaterial, auf epoxidglasfaserverstärkte, klassische Basismaterialien wird vollständig verzichtet. Das Resultat ist eine „gläserne Mehrlagenleiterplatte“, deren Lagen mit polymeren Klebers verklebt sind. Die Vorteile des Dünn glases werden dadurch konsequent genutzt:

- hohe optische Transparenz/geringe optische Dämpfung der Wellenleiter
- gestapelte optische Lagen möglich
- geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient
- exzellente dielektrische Eigenschaften für Hochfrequenzanwendungen
- kommerzielle Verfügbarkeit
- geeignet für Hochtemperaturapplikationen
- Kombinierbarkeit mit Polymerleiterplatten
- Übertragbarkeit von Technologien aus der Halbleiterfertigung
- höhere Alterungsbeständigkeit



**Bild 2:** Schematische Darstellung eines dünn glasbasierten Schaltungsträgers mit elektrischen Lagen und optischen Wellenleitern sowie assemblierten Komponenten auf gläsernen Interposern

## Vorwort

Die Verknüpfung von Multifunktionssensorik, Informationsverarbeitung und Systemen zur Beeinflussung der Anwendungsumgebung durchdringt schon fast alle Lebensbereiche. So sind z. B. Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie derzeit einem grundlegenden Wandel unterworfen, der nicht nur im Bereich der Leistungselektronik, sondern auch von der Mess- und Regel- sowie der Informationstechnik innovative Lösungen erfordert. Infolge des unregelmäßigen, nicht planbaren Anfalls an elektrischer Energie aus regenerativen Energiequellen muss im Netz zukünftig ein permanenter Abgleich von Angebot und Nachfrage erfolgen. Das Prinzip zentraler (Energie-) Produktionsanlagen zur Netzstabilisierung wird einer aktiven Regelung größerer Verbraucher, Energiespeicher oder dezentraler Erzeugungsanlagen weichen müssen.

Ungeachtet der Diskussionen um die Bereitstellung der benötigten Energie zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort wird auf der Verbrauchsseite der effiziente Umgang mit elektrischer Energie in der Antriebs-, der Rechen- sowie der Mess- und Regelungstechnik von Maschinen und Anlagen erheblich an Bedeutung gewinnen. Hier sind durch den Einsatz intelligenter Elektronik Einsparpotenziale von durchschnittlich 30 %, bei Einführung intelligenter Stand-by-Lösungen von 90 % zu erreichen. Auch wird der Bereich „e-mobility“ weiter voranschreiten. Zwar stockt der Absatz von E-Autos, jedoch sind die Zuwächse bei E-Bikes ungebrochen: In Deutschland wird 2018 ein Absatz von 600.000 E-Bikes erwartet.

Übersetzt in Anforderungen für zukünftige elektronische Baugruppen führt das zu einer langen Liste mit Entwicklungsschwerpunkten wie etwa hohe Schaltströme, hohe Spannungen, höchste Schaltfrequenzen, steigende Betriebstemperaturen, hohe Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität sowie die Einhaltung strenger Richtlinien zur elektromagnetischen Verträglichkeit und zur Umweltschonung. Eine weitere wichtige Herausforderung ist die Integration von Sensorik und Logik, angepasst und optimiert hinsichtlich Funktionalität und Einsatzbelastung.

Die in diesem Sinne steigenden Anforderungen sind nur zu erfüllen, wenn zukünftige Aufbau-, Packaging- und Baugruppentechologien, z. B.:

- die Leistungsfähigkeit konventioneller Materialien verbessern und neue Materialien gezielt etablieren,
- Si-Logik- und Si-Leistungselektronik verschmelzen lassen,
- kostengünstige Konzepte zur Integration von SiC- oder GaAs-Halbleitern bereitstellen,
- Konzepte zur Vermeidung thermomechanischer Ausfälle von Interconnects, Leiterbahnen oder Substraten vorhalten,
- höchste thermische Leitfähigkeit zur Wärmeableitung bereitstellen,
- fortschrittliche Integrationstechniken (z. B. 3D oder Embedding) vorantreiben.

Entsprechende Lösungen werden anlässlich der Konferenz und Fachausstellung „EBL 2014 – Elektronische Baugruppen und Leiterplatten“ in Fellbach gezeigt. Damit wird sich die Tagung einmal mehr auf dem Gebiet elektronischer Aufbau- und Baugruppentechologie als die führende Präsentations- und Diskussionsplattform für die Fachwelt im deutschsprachigen Raum darstellen. Aktuelle Entwicklungstrends, Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen werden durch Vorträge aus Industrie und Wissenschaft umfassend nutzbar vorgestellt und die Kongressteilnehmer in die Diskussion eingebunden. Die begleitende Ausstellung mit neuesten Material-, Geräte- und Prozessentwicklungen ermöglicht eine Einschätzung der Anwendbarkeit fortschrittlicher Verfahren im eigenen Umfeld und unterstützt zusätzlich den vertieften Erfahrungsaustausch.

Unser Dank gilt den Vortragenden, die es durch rechtzeitiges Einreichen ihrer Vortragsmanuskripte ermöglichten, den Teilnehmern den Tagungsband zur Veranstaltung zur Verfügung zu stellen.

*Prof. Dr. Udo Bechtloff*  
*Vorsitzender der Programmkommission*

*Prof. Dr. Klaus-Dieter Lang*  
*Wissenschaftlicher Tagungsleiter*