

Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt

## **”Integration modular aufgebauter Antriebssysteme in Maschinen und Anlagen auf der Basis des MST-Baukastens - IMODAS“**

Teilvorhaben

### **Analyse und Bewertung der thermomechanischen Verträglichkeit modularer Antriebssysteme mittels parametrisierbarer numerischer Modelle**

Projektpartner: <b>Angewandte Micro-Messtechnik GmbH</b>	Projektträger: <b>VDI/VDE-IT GmbH Teltow</b>
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.01.2001 – 30.09.2004</b>	Förderkennzeichen: <b>16 SV 1302</b>
Berichtszeitraum: <b>01.01.2001 – 30.09.2004</b>	Berichtsnummer: <b>imodas-ab-041221</b>

Bearbeiter:

Dr. J. Auersperg, Dr. E. Kaulfersch, Dipl.-Ing. (FH) K. Kreyßig, Dipl.-Ing. O. Michel,  
C. Rocks, Dr. J. Vogel, Dr. H. Walter

Berlin, 21.12.2004

.....  
Dr. Jürgen Vogel

**Anschrift:**

AMIC Angewandte Micro-Messtechnik GmbH  
Volmerstraße 9 B  
12489 Berlin

Tel.: 030-6392-2540  
Fax.: 030-6392-2541  
Email: amic.berlin@t-online.de

## 1. Analyse und Bewertung der thermomechanischen Verträglichkeit von modularen Antriebssystemen mittels parametrisierter numerischer Modelle

### 1.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung

Das Ziel des Verbundprojektes IMODAS besteht in der Nutzung des modularen MST-Baukastens MATCH-X zur Entwicklung und Anwendung neuer Produkte mit verbesserten Gebrauchseigenschaften und Marktchancen entlang der Wertschöpfungskette.

Entsprechend der Spezifikation im Konsortium und dem Modularisierungsgedanken folgend konzentrierten sich die Aufgaben der AMIC auf die Entwicklung, Implementierung, Testung und Anwendung einer parametrisierbaren Finite-Element-(FE)-Modellbibliothek für MATCH-X-Bausteine der Elektrischen Schnittstelle. Diese MATCH-X-FE-Bibliothek umfasst alle im VDMA-Einheitsblatt 66305 standardisierten Bausteine /1-2/. Sie gestattet unter Einsatz modularer Modellkomponenten die Erstellung anwenderspezifischer Bausteinstacks, wobei alle Bausteingrößen beliebig miteinander kombinierbar sind. Die Integration variabler Materialbereiche ermöglicht die Beschreibung unterschiedlicher Werkstoffe (hier: FR4 und LTCC). Durch Parametrierung variabel vereinbarter Abmessungen, z.B. Rahmenhöhe, können in kurzer Zeit virtuelle Bausteine im Rechner generiert werden. Parallel zum elektrischen Layout können mittels dieser rechnergestützten Entwurfwerkzeuge Bausteinstacks schon in der Phase ihrer Entwicklung auf ihre thermische und/oder mechanische Beanspruchbarkeit untersucht und ausgelegt werden. Schwachstellen im Design lassen sich ohne die Fertigung teurer Prototypen frühzeitig erkennen und in Sensitivitätsanalysen Vorschläge zu deren Optimierung erarbeiten.

Der Aufbau von Testmodulen ermöglichte in interdisziplinärer Zusammenarbeit, die Güte der numerischen Modelle unter Einbeziehung realer Geometriedaten zu testen und Details in der Vernetzung zu verifizieren. Darauf aufbauend wurden verschiedene im Vorhaben entwickelte Bausteinstacks vorzugsweise thermisch untersucht, da durch die hohe Integrationsdichte in der dritten Dimension die Entwärmung der Bausteine, insbesondere unter dem Aspekt einfacher und kostengünstiger Lösungen, überproportional an Bedeutung gewinnt. Im Ergebnis der FE-Analysen (FEA) wurden im Konsortium neue Lösungsansätze für die funktionsgruppenbasierte Bausteinanordnung auf einer Basisleiterplatte entwickelt.

Als besonders wertvoll erwies sich die Kombination der FEA mit der experimentellen Werkstoffcharakterisierung. Durch diese Vorgehensweise konnten bei den Herstellern von LTCC nicht verfügbare thermisch/mechanische Werkstoffdaten sowohl für Simulationen zur thermomechanischen Verträglichkeit (TMV) bestimmt als auch für die Überprüfung der Stabilität bzw. für die Qualifizierung des technologischen Prozesses bereitgestellt werden.

Dem modularen Charakter der Modellbibliothek entsprechend lassen sich neue Ansätze aus MATCH-X wie die Nutzung von Mehrlagenbausteinen mit beidseitig bestückten Mittellagen problemlos in die Basisbibliothek integrieren. Durch die systematische Modifikation bzw. Erweiterung der vorhandenen Bibliothek wird die MATCH-X-Community in die Lage versetzt, die thermische Schnittstelle aber auch das thermomechanische Beanspruchungsverhalten für ein breites Spektrum von Applikationen frühzeitig in der Phase der Produktentwicklung untersuchen und kostengünstig optimieren zu können. Im Vorhaben entwickelte Design Rules haben deshalb Eingang in die MATCH-X-Einheitsblätter /1/ gefunden und bilden wesentliche Randbedingungen für neue Applikationen in der modularen MST.

## 1.2 FE-Simulation zur Analyse und Bewertung der thermomechanischen Verträglichkeit

Die numerische Simulation modularer Mikrosysteme ist auf die Analyse der thermischen und/oder thermomechanischen Beanspruchbarkeit und von Verlustleistungsgrenzen, die Entwicklung von Kühlkonzepten für MATCH-X-Bausteine und die Evaluierung von deren Aufbauregeln gerichtet, um einen zuverlässigen Einsatz unter gegebenen Umgebungsbedingungen zu garantieren.

Zur Beurteilung der thermomechanischen Zuverlässigkeit auf numerischem Wege wurden dem Modularisierungsgedanken folgend von AMIC parametrisierbare FE-Modelle auf Basis von VDMA-Einheitsblatt 66305 entwickelt, getestet und eingesetzt /1-2/. Die implementierten Modelle für alle elektrischen Bausteine C108 (25 mm x 25 mm) bis U15 (5 mm x 5 mm) gestatten eine Kombination beliebiger Bausteine untereinander. Die Berücksichtigung relevanter Belastungen, Randbedingungen und Schnittstellen zu benachbarten Modulen ermöglichen eine gekoppelte thermische und mechanische Beanspruchungsanalyse unter Einbeziehung wesentlicher Wärmequellen bzw. Wärmepfade. Mit diesem modularen Simulationstool können unter dem Aspekt Virtual Prototyping applikationsspezifische Bausteinkombinationen evaluiert und Sensitivitätsanalysen an Stapelaufbauten von bis zu acht Bausteinen, unter der Voraussetzung ¼-Modell, durchgeführt werden.

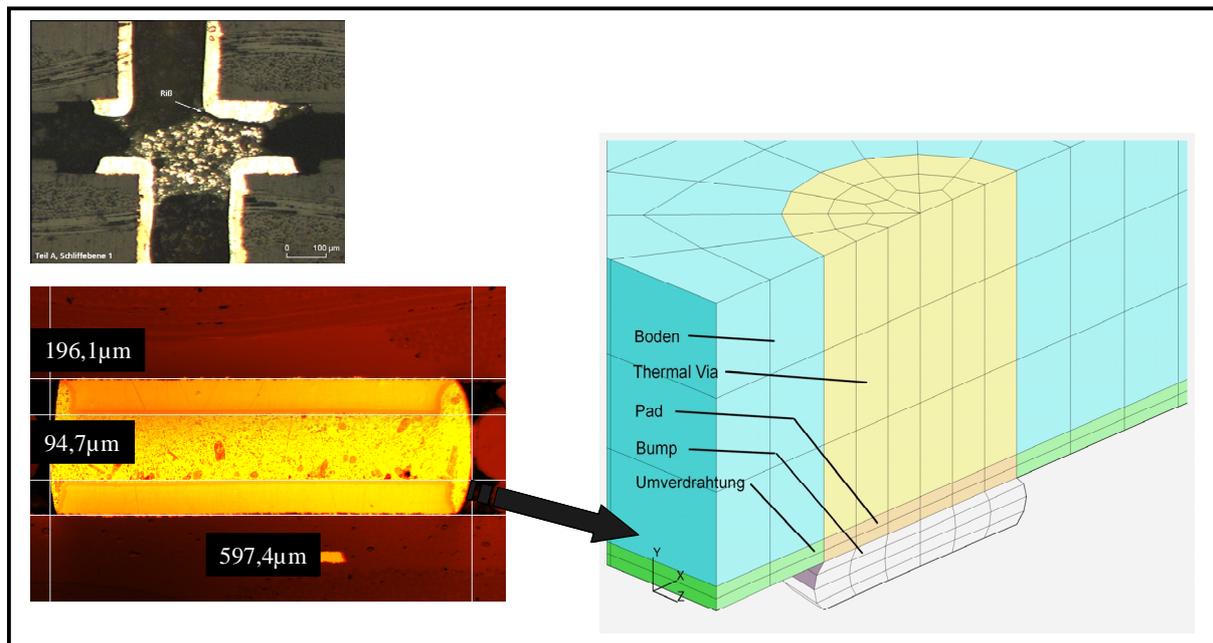
Entsprechend der im Einheitsblatt definierten Geometrie der elektrischen Schnittstelle des Baukastens (Blatt 3) wurden wesentliche Abmessungen wie die Kantenlängen für Deckel und Boden, die Rahmenbreite, die Via-Geometrie im Rahmen oder der Pitch der Land-Pads auf Boden und Deckel als fix definiert. Dagegen sind die Dimensionen in Dickenrichtung wie Rahmenhöhe, Deckeldicke in Abhängigkeit von der Anzahl der erforderlichen Umverdrahtungslagen oder die Ballgeometrie zwischen den Bausteinen variabel gestaltet. Entsprechend des aktuellen Entwicklungsstandes konzentrierten sich die nachfolgenden Untersuchungen auf die Materialien FR4 und LTCC für die Bausteingröße I79 (17,5 mm x 17,5 mm).

### 1.2.1 MATCH-X-FE-Bausteinbibliothek

Auf Grund der Modellgröße von ca. 50000 Knoten für einen Baustein und der zur Verfügung stehenden Rechnerperformance wurden ¼ FE-Modelle als Basisunits generiert. Beim Viertelmodell wird davon ausgegangen, dass eine annähernde Symmetrie der aktiven Elemente in den Bausteinen vorliegt. Stark asymmetrische Wärmequellen können in der Simulation somit nicht berücksichtigt werden. Dem Modularisierungsgedanken folgend können diese Basismodelle effizient zu einem Halb- bzw. Vollmodell unter Beachtung kundenspezifischer Applikationen zusammengefügt werden.

Die zur Bestückung vorgesehenen Böden, Deckel und Mittellagen für Mehrlagenbausteine können über spezielle Kontaktformulierungen den unterschiedlichen Einsatzfällen flexibel angepasst werden. Separate Schichten für die Umverdrahtungslagen ermöglichen durch Variation der Dicke und der Anpassung der Wärmeleitfähigkeit eine hinreichend realitätsnahe Beschreibung mit vertretbarem Aufwand. In Bausteinen wiederkehrende Abmessungen wurden metallografischen Schliffen entnommen und in abstrahierter Form in die FE-Vernetzung integriert, Bild 1. Entsprechend der von der MATCH-X Community freigegebenen Dimensionen sind u.a. die Ballgeometrie und die Rahmenhöhe parametrisiert gestaltet, so dass diese Bausteinabmessungen sehr schnell den anwendungsspezifischen Randbedingungen ohne aufwendige Neumodellierung angepasst werden können /3-7/.

Trotz einer möglichst realitätsnahen Beschreibung der Bausteine musste die rechen-technische Handhabbarkeit erhalten bleiben. Daher wurden im Falle der Vias mit einem gefüllten Zylinder statt der Kupfermetallisierung für die elektrische Signalübertragung gearbeitet. Durch Veränderung der Wärmeleiteigenschaften dieses Materialbereichs ist es beispielsweise möglich, das Einlaufen des Lotes oder Klebers in die Vias zu erfassen bzw. die bei der LTCC-Technologie mit Lotpaste gefüllten Vias hinreichend genau nachzubilden. Die Land-Pads sind ein separater Materialbereich. Die Spalte zwischen Rahmen und Deckel bzw. Boden können um die Pads herum wahlweise mit einem elektrisch isolierenden bzw. einem thermischen Leitkleber gefüllt aber auch als Luftspalt betrachtet werden. Die Materialbereiche im Boden zeigt Bild 1 durch farbige Zuordnung. Ausgewählte Werkstoffdaten enthält Tabelle 1.

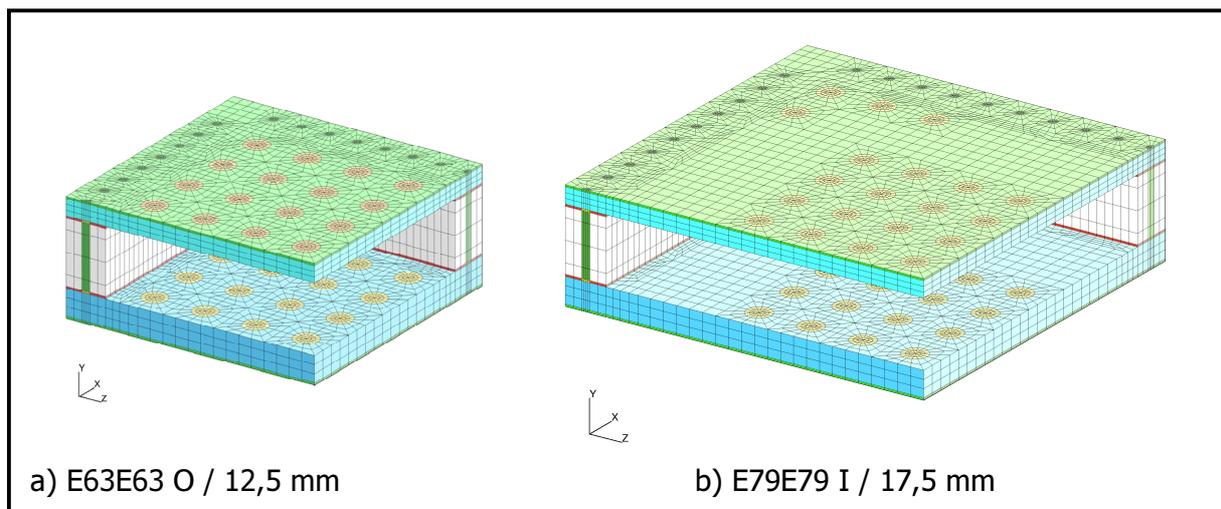


**Bild 1** Modellierung des Bausteinbodens auf Basis von mikroskopischen Details

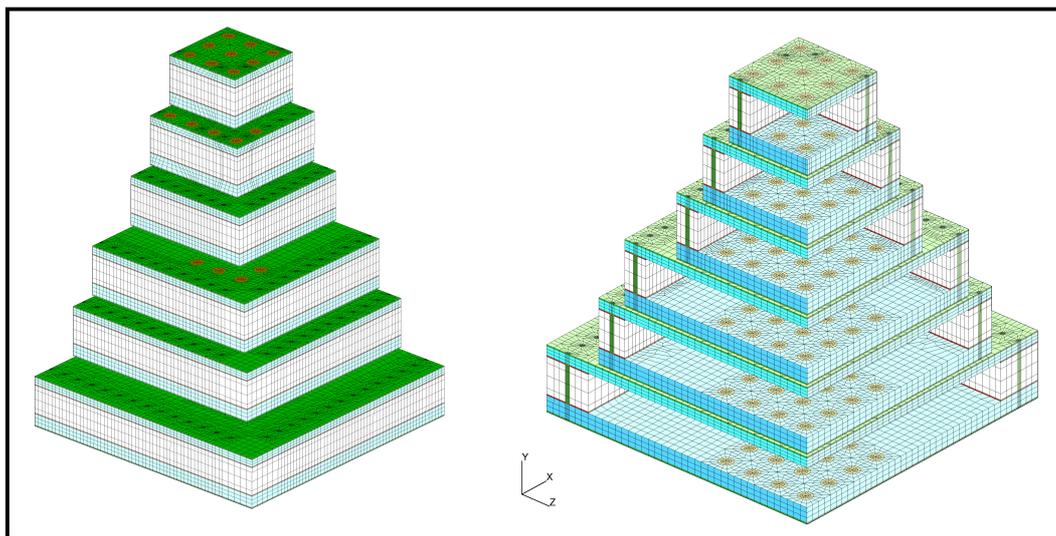
**Tabelle 1** Ausgewählte Materialdaten von FR4- bzw. LTCC-Bausteinen

Komponente	Material	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]
Bump	Pb63Sn37	44	8.41	150
Rahmen	FR4	0.23	1.2	1750
	LTCC	3	3.16	729
Pads, Bus (FR4)	Cu	384	8.94	382
Pads, Bus (LTCC)	Ag-Paste	215		
Deckel, Boden	FR4 + Cu	5	1.8	1500
	LTCC + Ag-Paste	12	4.0	700
Kleber Bauelemente	Elecolit	1.04	1.9	1200
Bauelemente	Si	149	2.33	708

Für jeden der neun Bausteine der Elektrischen Schnittstelle /1/ - dies ist der im MATCH-X-Baukasten der Mikrotechnik infolge seines vielfältigen Anwendungsspektrums der zur Zeit am weitesten entwickelte Modul - wurde innerhalb der MATCH-X-FE-Modellbibliothek ein numerischer Basisbaustein generiert. Diese werden Bestandteil des in Überarbeitung befindlichen Blatt 7 Thermische Schnittstellen im VDMA-Einheitsblatt 66305. Diese Bausteinmodelle können modular kombiniert, an applikationsspezifische Anforderungen adaptiert und mit Systemspezifika modifiziert werden. Bild 2 zeigt exemplarisch die beiden zur Zeit am weitesten verbreiteten Bausteintypen, wobei Typ E79E79 I / 17,5 mm auf Grund der zu integrierenden elektrischen Funktionalitäten in IMODAS eingesetzt wurde.

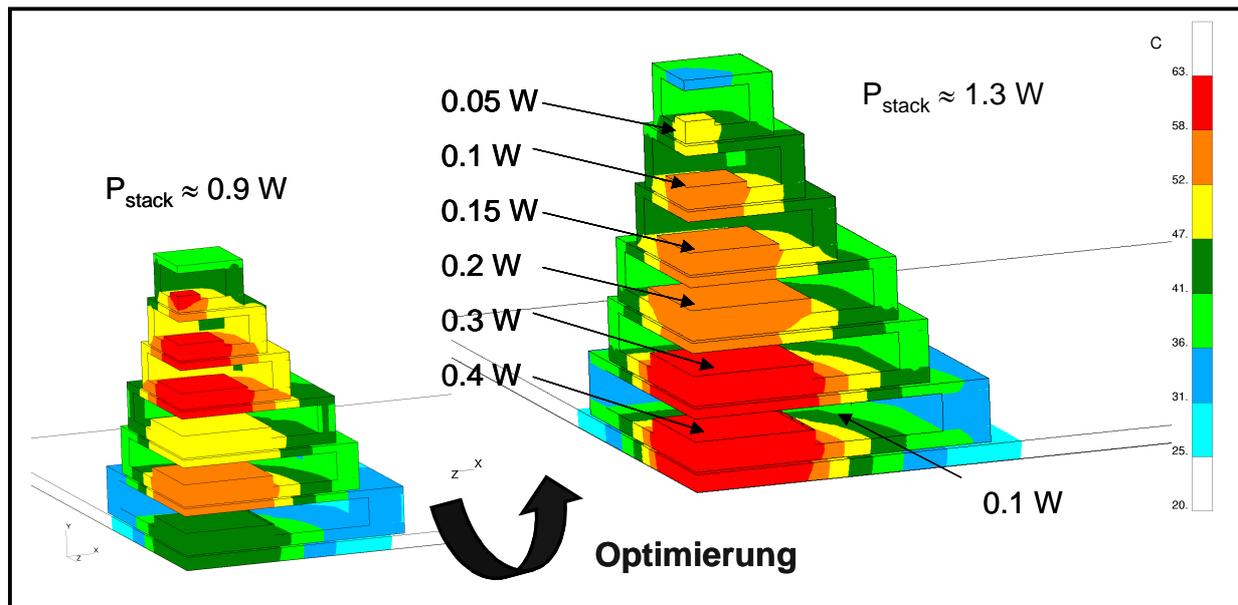


**Bild 2** FE-Basismodelle für MATCH-X-Bausteine der elektrischen Schnittstelle



**Bild 3** Teststack aus den Bausteinen der Größe E108E108 C / 25 mm; E83E83 G / 20 mm; E79E79 I / 17,5 mm; E63E63 O / 12,5 mm; E44E44 Q / 10 mm und E32E32 S / 7,5 mm aus FR4 (elektrische Bauelemente noch nicht appliziert)

Die entwickelten Modelltools wurden unter verschiedenen Randbedingungen getestet. Die MATCH-X-Pyramide in Bild 3 besteht aus sechs Bausteinen unterschiedlicher Größe. Die Bausteine bis E83E83 G / 20 mm wurden mittig mit je einem Bauelement bestückt. In Baustein E108E108 C / 25 mm wurde noch ein zusätzliches kleines Bauelement mit geringerer Verlustleistung platziert. Unter der Voraussetzung eines durchgängigen FR4-Stapels war die Leistungsverteilung für einen Temperaturhub von 40 K an stehender Luft ( $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) zu optimieren.



**Bild 4** Optimierung der Verlustleistungsgrenzen in der MATCH-X-Pyramide

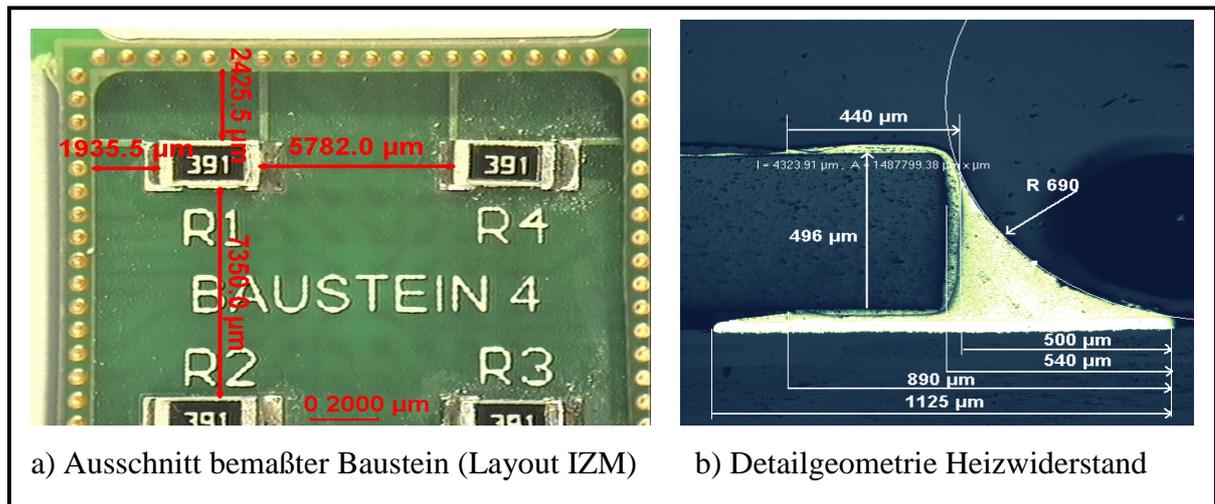
Die Ausgangsleistungsverteilung von  $P_{\text{stack}} \approx 0,9 \text{ W}$  im Stack zeigt Bild 4 links. Erkennbar ist eine ungleichmäßige Ausnutzung des Erwärmungspotenzials, was auf Leistungsreserven insbesondere in den unteren drei Bausteinen schließen lässt. Durch die Erhöhung der Gesamtleistung auf  $\approx 1,3 \text{ W}$  wird zwar die avisierte Zieltemperatur von  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  geringfügig überschritten, aber eine für praktische Belange hinreichend gleichmäßige Leistungsverteilung erreicht [8].

## 1.2.2 Abgleich experimentell gemessener und numerisch berechneter Temperaturverteilungen

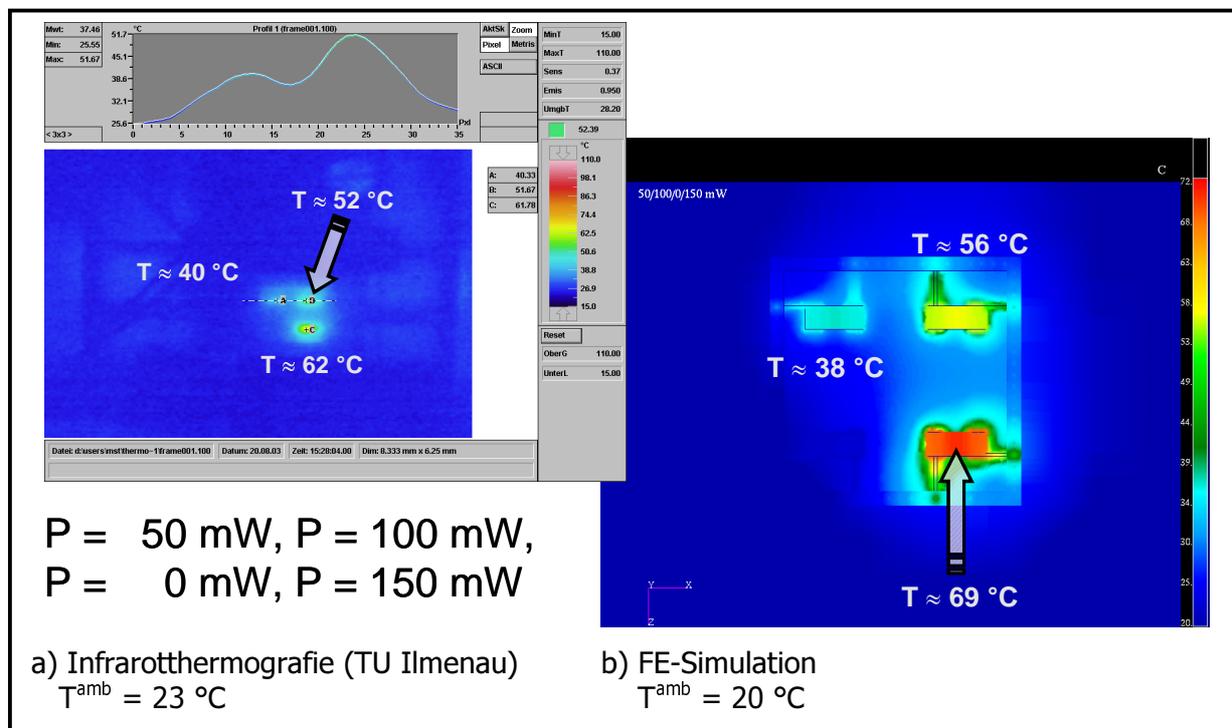
Zur Evaluierung der FE-Modelle wurde vom Fraunhofer IZM ein Testbaustein vom Typ E79E79 I / 17,5 mm entwickelt und in FR4-Technologie gefertigt, (Bild 5a). Dieser ist mit vier separat beschaltbaren Widerständen 319 in doppelsymmetrischer Anordnung bestückt. Die zugehörige Ansteuerung und die Bausteinbeschaltung auf FR4-Board wurde von der TU Ilmenau beigebracht.

Auf Basis der parametrisierten FE-Modellbibliothek wurde ein Vollmodell generiert, um eine differenzierte Bestromung der Widerstände numerisch nachbilden zu können. Zur Gewährleistung einer hohen Detailtreue im FE-Modell wurden wesentliche Abmessungen des Bausteins metallografischen Schliffen entnommen, (Bild 5b). Die Anbindung der Widerstände an den Boden erfolgte über Kontaktflächen.

Parallel zu den thermischen FE-Simulationen wurden an der TU Ilmenau Temperaturmessungen mittels bildgebender Infrarotthermografie durchgeführt. Das Auftragen einer dünnen Schicht Emissionsgradlack sichert einen gleichmäßigen Emissionskoeffizienten. Untersucht wurde eine Reihe von Lastverteilungen, wobei die Widerstände sowohl mit gleichen als auch unterschiedlichen Leistungen beaufschlagt wurden. Die zugehörigen Temperaturfelder wurden im stationären Zustand aufgezeichnet.

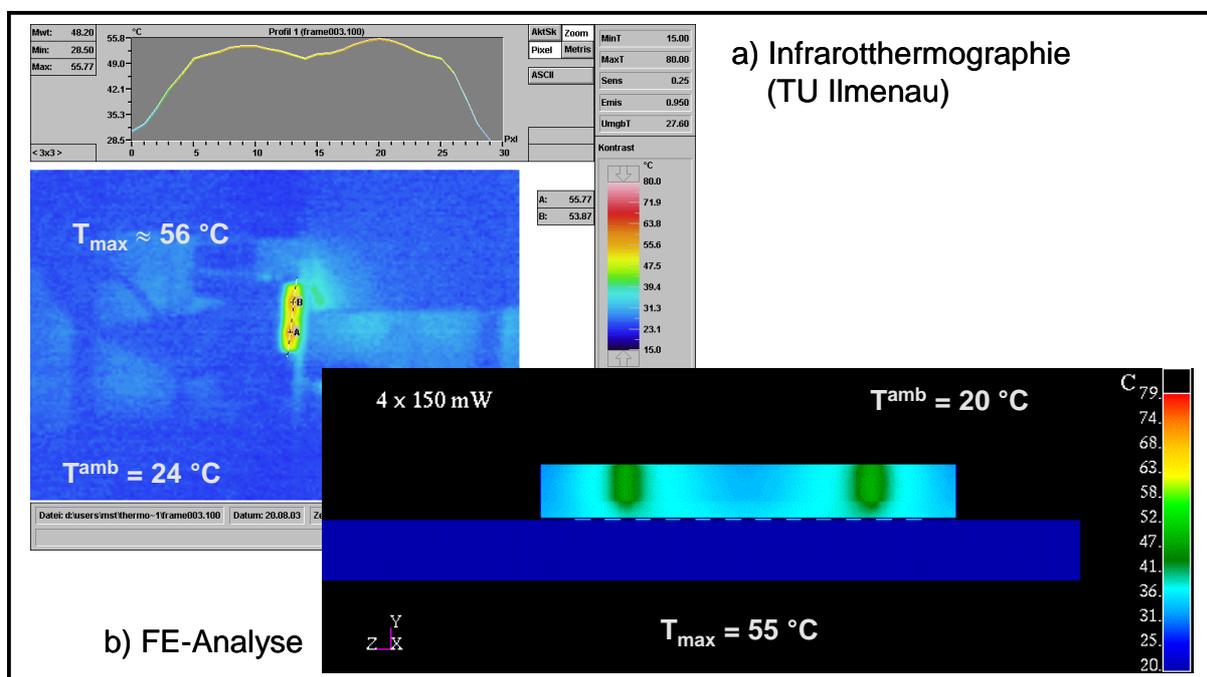


**Bild 5:** Offener Testbaustein FR4 E79 I / 17,5 mm mit Heizwiderständen



**Bild 6:** Vergleich der Temperaturfelder bezogen auf Umgebungstemperatur bei ungleichmäßiger Leistungsverteilung

Im Fall einer ungleichmäßigen Leistungsverteilung auf die vier Widerstände stellen sich lokal dominierte Temperaturfelder im stationären Zustand ein, Bild 6. Die Temperatur in den Hot Spots an der Oberfläche der Widerstände weisen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation auf /8-9/. Der Wärmetransport von den Bauelementen über die Anschlussleitungen zu den Bausteinrahmen wird durch das numerische Modell mit einer höheren Auflösung besser beschrieben. Die lokale Erwärmung der entsprechenden Wandbereiche können, hinreichende Temperaturgradienten vorausgesetzt, auch von außen ebenfalls thermographisch erfasst werden, Bild 7. Dies eröffnet die Möglichkeit eines indirekten Abgleichs unter Betriebsbedingungen, indem durch Kombination von thermografischen Messungen an den Außenwänden von Bausteinrasten mit numerischen FE-Analysen auf zu erwartende Temperaturen an den Wärmequellen im Baustein rückgeschlossen werden kann. Analoge Abgleiche gestattet die Integration von diskreten Bauelementen, wie Pt 100, für Überwachungsaufgaben in mikrotechnischen Systemen /10/.



**Bild 7:** Vergleich der Temperaturfelder bezogen am Bausteinrahmen

Ursachen für die Unterschiede zwischen Experiment und Numerik können u.a. durch

- idealisierte Annahmen im Modell (stehende Luft, ...),
- nicht exakte Widerstände (technische Genauigkeit) oder
- Erwärmung der Luft im Experiment in unmittelbarer Umgebung des Bausteins mit Ausbildung eines Temperaturgradienten

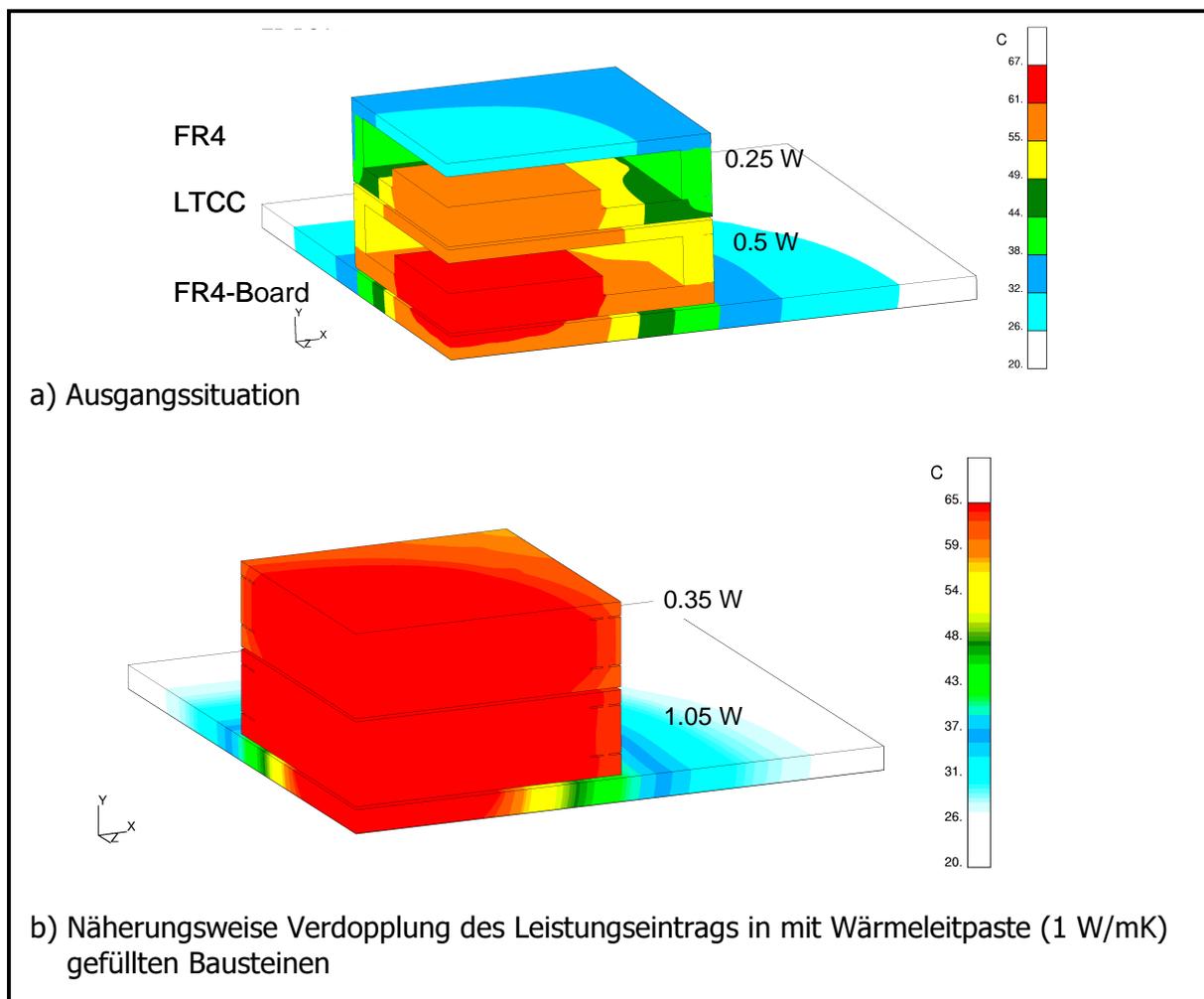
verursacht werden.

In allen Versuchsreihen /9/ wurde eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation erhalten. Damit liegt der Schluss nahe, dass die generierten FE-Modelle den physikalischen Sachverhalt einerseits mit hoher Präzision erfassen. Andererseits bildet eine hinreichend detailgetreue Modellierung gepaart mit präzisen Materialdaten eine wesentliche Voraussetzung für qualitativ hochwertige FE-Analysen. Beide Voraussetzungen erfüllen die Bausteine der modularen FE-Modellbibliothek für MATCH-X.

## 1.2.3 Screening von Kühlkonzepten

Bevor Kühlkonzepte in Fertigungslösungen überführt werden, empfiehlt es sich, diese vorab auf ihre Eignung mittels numerischer Simulation zu überprüfen. Nachfolgend werden an einem 2-er Mischstack aus einem FR4- und einem LTCC-Baustein auf FR4-Board und für einen 5-er Stack Kühlmöglichkeiten evaluiert, um höhere Verlustleistungen in die Stacks integrieren zu können /3, 11, 12/.

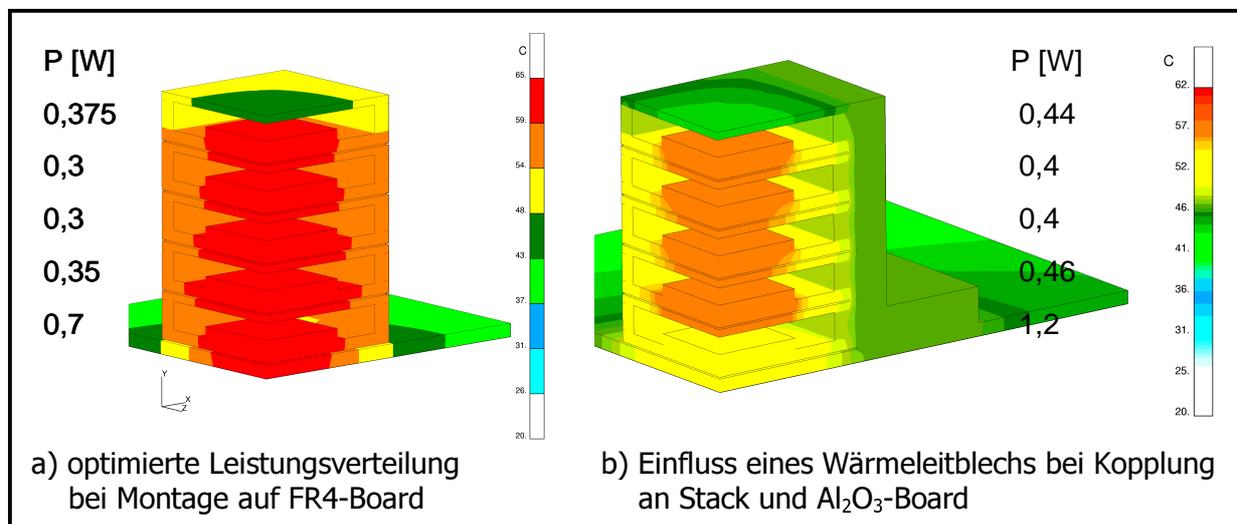
Unter der Prämisse eines zulässigen Temperaturhubs von 45 K können ohne zusätzliche Maßnahmen in einem auf FR4-Board platzierten E79 I-Baustein aus LTCC ca. 0,5 W und in einem darüber angeordneten FR4- Baustein des gleichen Typs ca. 0,25 W Leistung verbraucht werden. Eine Möglichkeit die Wärme elegant zu spreizen und gleichzeitig höhere Leistungsdichten zu realisieren, ist das Füllen der Bausteine mit einer Wärmeleitpaste. Dadurch wird die Wärme einerseits besser gespreizt. Andererseits lässt sich durch eine derartige Maßnahme die nutzbare Leistung annähernd verdoppeln, Bild 8. Zur Vermeidung von unerwünschten Wärmespannungen wird aber empfohlen, die Bausteine nicht komplett zu vergießen.



**Bild 8:** Temperaturverteilung im 2-er Mischstack E79E9 I auf FR4-Board bei unterschiedlichen Randbedingungen für einen avisierten Temperaturhub von 45 K

Zur besseren Entwärmung eignet sich die thermische Erdung von gestackten Modulen (z. B. an der Wandung von Aluminiumprofilen), wie sie oft für Sensor- und Aktuatorssysteme als Gehäuse zum Einsatz kommen /3, 10-14/.

Nachfolgend wird der Einfluss der einfach symmetrischen Anbindung des Stacks an ein Ableitblech aus 2 mm dicken Aluminiumblech abgeschätzt, Bild 9. Die Verbindung Stack – Blech erfolgt über 0,5 mm dicke Schicht Wärmeleitpaste mit einer thermischen Leitfähigkeit von 1 W/mK. Durch diese einfache Maßnahme lässt sich die einkoppelbare Verlustleistung um über ein 1 W erhöhen. Insbesondere der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -boardseitige Baustein verfügt noch über Leistungsreserven. Als kritischer thermischer Pfad erweist sich damit der bestückte Bausteinboden, dessen thermische Leitfähigkeit den Wärmetransport aus dem Baustein heraus limitiert. Zusätzliche thermische Grundlagen bilden in diesem Kontext mit dem vorab behandelten Beispiel des Moldens der Bausteine effektive Lösungsansätze zur Erweiterung und Optimierung des thermischen Verhaltens.



**Bild 9:** Temperaturverteilung in einem 5-er LTCC-Stack für einen zulässigen Temperaturhub von 45K

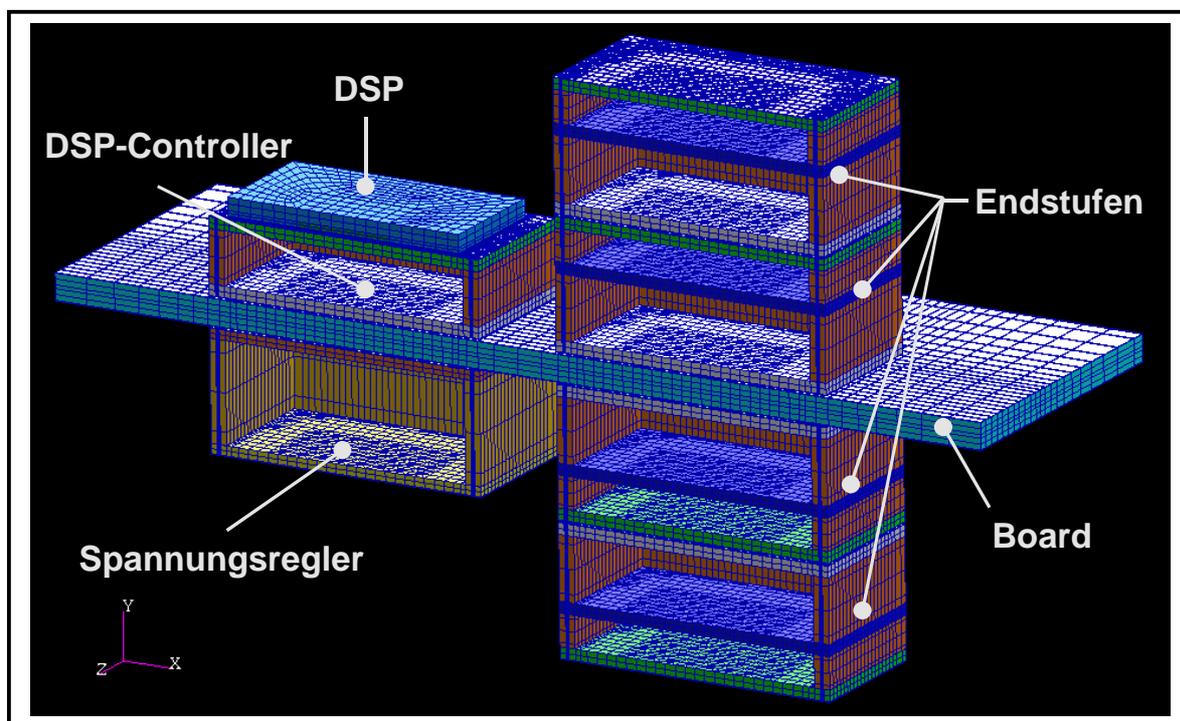
## 1.2.4 Anwendung der Bausteinbibliothek für IMODAS-Steuerlektronik

Auf Grundlage der Bausteinbibliothek und in Erweiterung des MATCH-X-Baukastens durch Mehrlagenbausteine wurde die IMODAS-Steuerplatine mit sechs Bausteinen E79 I bestehend aus einer Controllerunit mit extern angeordnetem DSP, einem Spannungsreglerbaustein und vier Endstufenbausteinen bestückt. Die den funktionellen Erfordernissen angepasste Leistungsverteilung ermöglichte nur eine einfache Symmetrie im FE-Modell. Als überaus positiv erwies sich der im Vorhaben entwickelte modulare Ansatz speziell für Erweiterung der Basisbausteine in Richtung Mehrlagenbausteine sowie die variablen Schnittstellen für das Anfitzen konkreter Einbaubedingungen.

Es wurden sowohl thermische als auch thermomechanische FE-Simulationen für die IMODAS-Steuerplatine durchgeführt. Dabei wurde die Auswirkung unterschiedlicher Wärmequellen, das Potenzial verschiedener Kühlkonzepte sowie das thermisch induzierte Verformungs- und Spannungsverhalten, insbesondere des thermisch hoch belasteten DSP-Bausteins evaluiert.

## 1.2.4.1 Thermisches Screening

Bild 10 zeigt das  $\frac{1}{2}$ -FE-Modell bestehend aus dem Basisboard bestückt mit DSP-, Spannungsregler- und vier im 2-er Stapel zur Leiterplatte symmetrisch angeordneten Endstufenbausteinen. Unter Annahme zur Längsmittlebene symmetrischer Wärmequellen wurde ein  $\frac{1}{2}$ -Modell generiert, das es in jedem Einzelbaustein gestattet, relevante thermische Belastungen und Randbedingungen einschließlich wesentlicher Wärmequellen und Wärmepfade nachzubilden [16-19]. Die im Modell realisierte Rahmenhöhe, Deckel- und Bodendicke sowie die Integration von Zwischenlagen basiert auf dem Layout vom IZM. Die feine Vernetzung der Böden, Mittellagen und Deckel ermöglicht in Kombination mit thermischen Kontaktformulierungen eine detaillierte und vor allem variable Anordnung der leistungsverbrauchenden Komponenten entsprechend den Erfordernissen der Partner. Diese Komponenten sind als Flächenquellen modelliert.

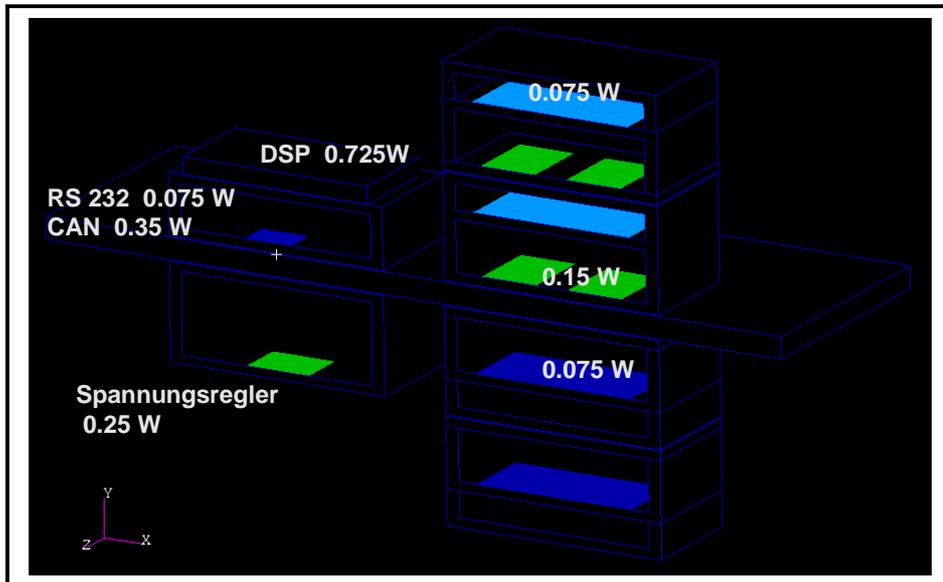


**Bild 10:**  $\frac{1}{2}$ -FE-Modell der Steuerplatine für thermische Simulation

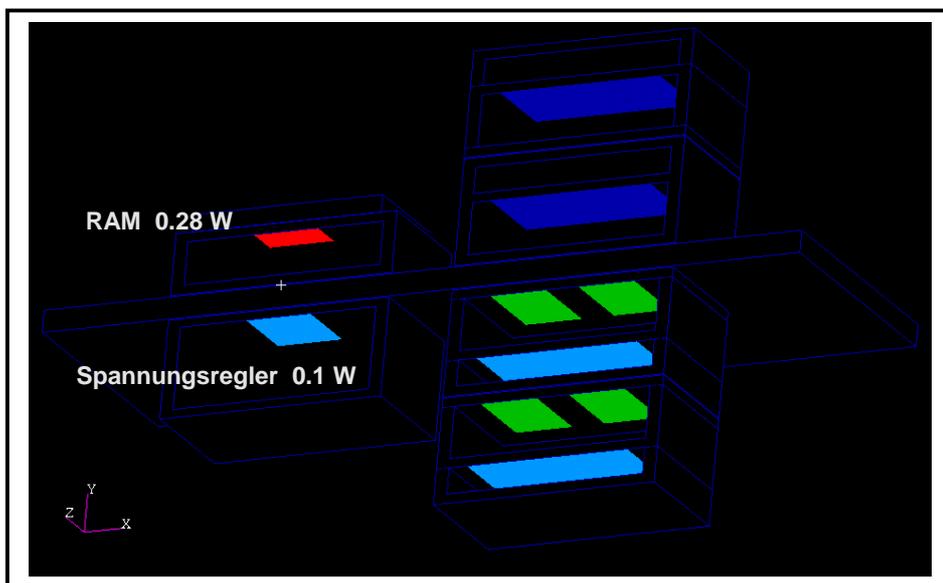
Einander entsprechenden Materialbereichen wurden die gleichen Farben zugeordnet, Bild 10. Ausgewählte Materialdaten enthält Tabelle 1. Das FR4 und die Verdrahtungslagen der Leiterplatte wurden zu einer Schicht mit gemittelter Wärmeleitfähigkeit  $\lambda \approx 5 \text{ W/mK}$  und das LTCC mit Ag-Paste zu einer Schicht mit  $\lambda \approx 12 \text{ W/mK}$  zusammengefasst. Die gesamte Oberfläche des Modells ist mit einer konstanten Randbedingung belegt, die der Konvektion an stehender Luft bei  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$  entspricht.

Entsprechend des Standes der Elektronikentwicklung bei den Partnern FESTO, IZM, LEVITEC und TUI wurde ein Spektrum von Leistungsverteilungen simuliert und deren Auswirkung auf das Gesamtpackage abgeschätzt. Stellvertretend für diese Untersuchungsserie zeigt Bild 11 eine typische Leistungsverteilung, die zu erwartenden Einsatzbedingungen bei FESTO entspricht. Zur Berechnung der Temperaturen in den einzelnen Bausteinen wurde davon ausgegangen, dass alle Verbraucher simultan aktiv sind. Im Endstufenbaustein werden sowohl in Mittellage als auch Boden ca.  $0.15 \text{ W}$  eingetragen. Lokal große Leistungseinträge treten mit

0,25 W im FR4-Spannungsreglerbaustein in Umgebung des SO8 gehäuseten Spannungsreglers MC33269 und mit 0,725 W im externen DSP 56F807 von Motorola des Controllerbausteins auf.



a) Ansicht von oben

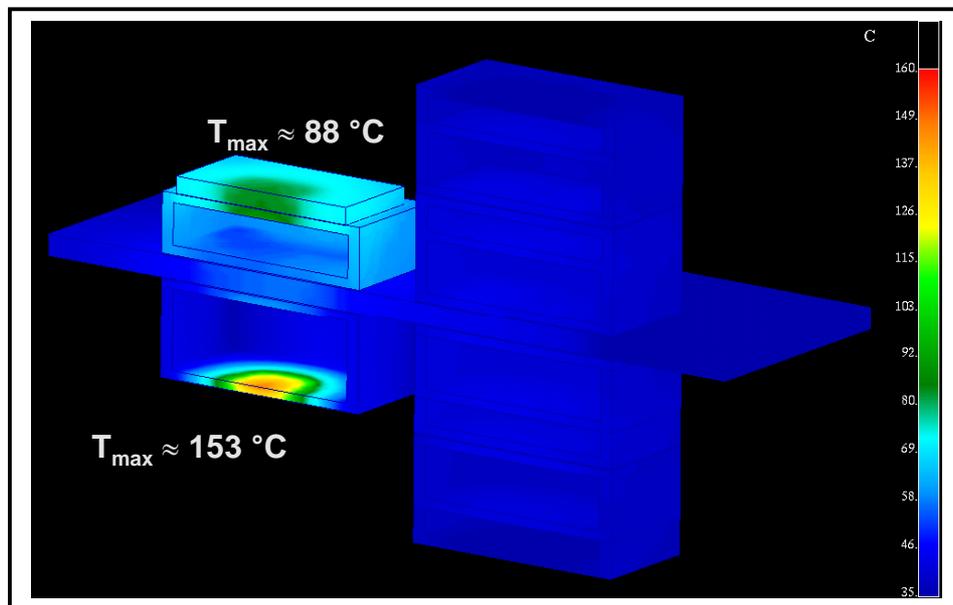


b) Ansicht von unten

**Bild 11:** Leistungseintrag unter Einsatzbedingungen

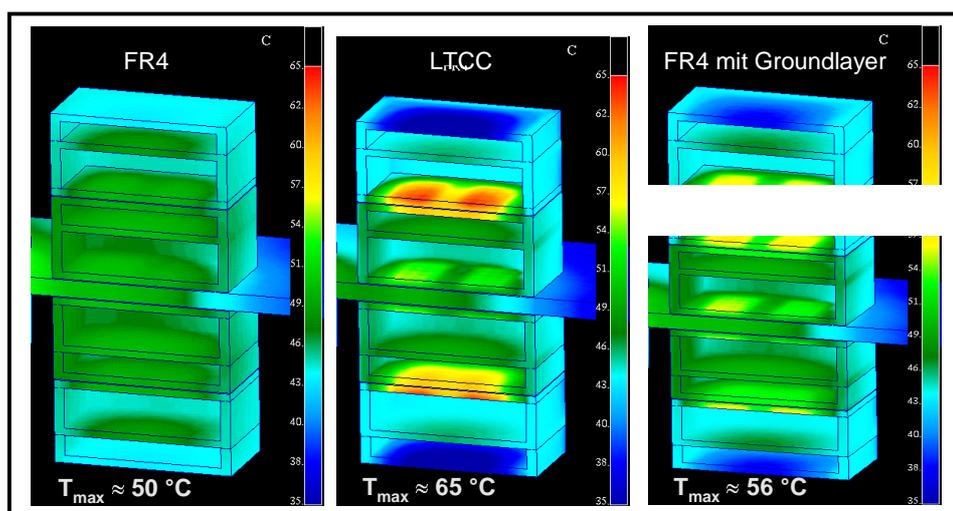
Die Temperaturverteilung für das Gesamtpackage in Bild 12 belegt, dass in Umgebung des DSP und des Spannungsreglers im Deckel Hot Spots verbunden mit entsprechenden Temperaturgradienten auftreten. Insbesondere die im Deckel des Spannungsreglerbausteins verbrauchte Leistung, vgl. VDMA-Einheitsblatt, erweist sich mit einer Temperaturerhöhung von ca. 130 K als zu hoch für einen zuverlässigen Einsatz in industrieller Umgebung. Infolge des

hohen thermischen Widerstands im FR4-Deckel im Vergleich zum LTCC kann nicht genügend Wärme abgeführt werden. Es wird deshalb empfohlen, zu prüfen, inwieweit durch ein thermisch optimiertes Redesign dieses elektronische Bauelement dem Modularisierungsgedanken folgend auf dem Boden des Spannungsreglerbausteins platziert werden kann.



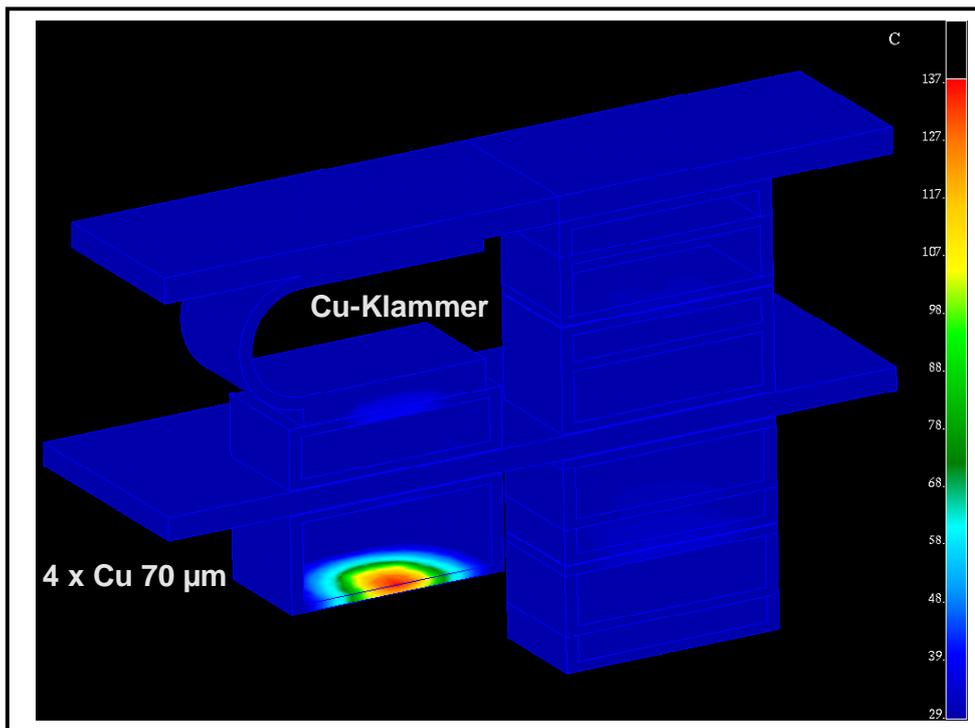
**Bild 12:** Temperaturverteilung im Package auf Basis der Leistungsverteilung in Bild 11

Durch Verwendung von LTCC für die Endstufen sind in diesen unter Betriebsbedingungen keine kritischen Wärmeentwicklungen zu erwarten. Wie Bild 13 veranschaulicht, können FR4-Bausteine mit einer integrierten thermischen Groundlayer in den flächigen Baueinheitsparts von 35  $\mu\text{m}$  Kupfer zu einer preiswerteren Alternative bei einer für technische Belange akzeptablen Temperaturerhöhung um ca. 6 K (20 %) führen, ohne dass eine Überschreitung des für viele VDMA-Applikationen zulässigen Temperaturhubs von 40 bis 50 K zu erwarten ist.



**Bild 13:** Vergleich der Temperaturverteilung in den Endstufen für unterschiedliche Baueinheitsmaterialien (Board aus FR4)

Wie am Beispiel der Integration einer thermischen Groundlayer demonstriert, ist es naheliegend, den DSP gegen das Aluminiumstrangpressprofil des Linearstellers /15/ thermisch zu erden. Dies kann z.B. durch ein Cu-Leitblech in U-Form erfolgen, welches über Wärmeleitpaste sowohl mit dem Metallgehäuse als auch dem DSP verbunden ist. Dadurch gelingt ein sehr guter Wärmetransport aus dem DSP, so dass kritische Temperaturen infolge Eigenerwärmung a priori vermieden werden können, Bild 14. Weiterhin wird ein Füllen des Aluminiumprofils mit Wärmeleitpaste zur Gewährleistung einer stetigen Entwärmung empfohlen.

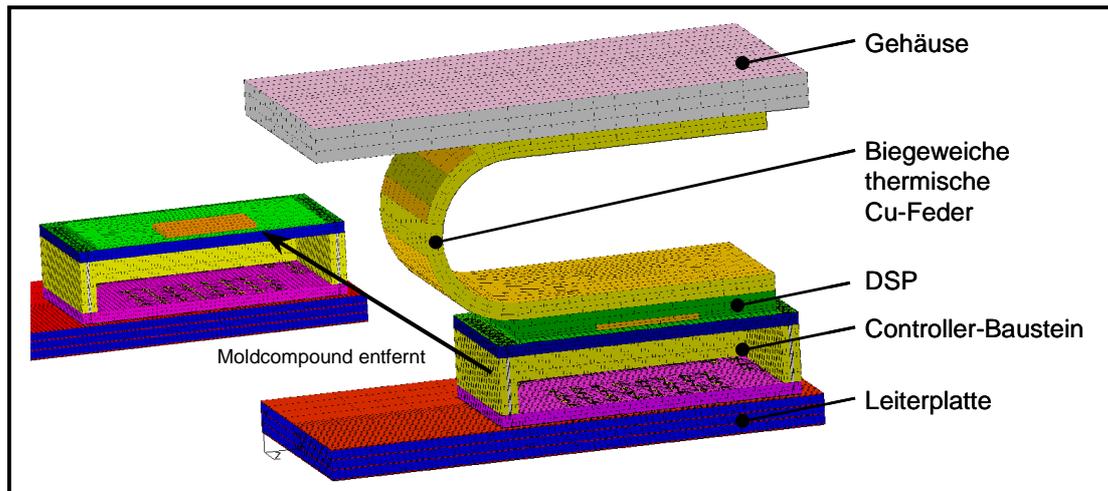


**Bild 14:** Thermische Erdung des DSP gegen das Aluminiumgehäuse

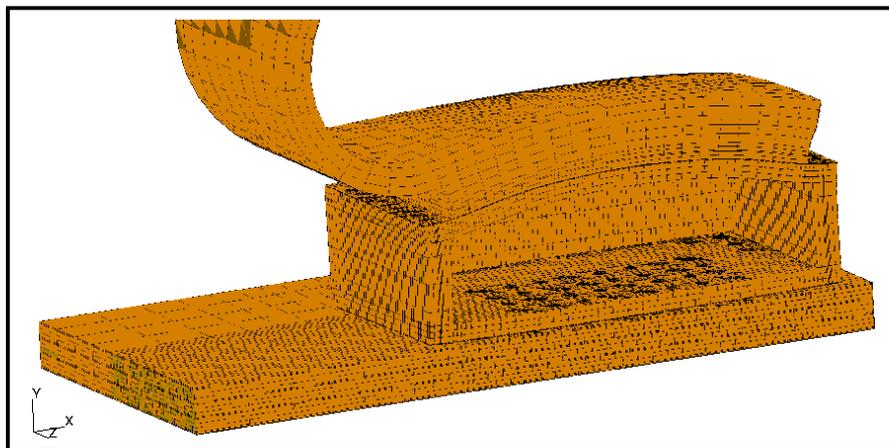
## 1.2.4.2 Thermomechanische Analyse

Zur Ermittlung der mechanischen Beanspruchungen bei thermischer Wechsellast wurde mit einem modifizierten  $\frac{1}{2}$ -FE-Modell im Bereich des Controllerbausteins gearbeitet, Bild 15. Dies gestattet die Verwendung einer hochauflösenden Vernetzung mit quadratischen Elementen, wodurch sich das Verformungs- und Spannungsverhalten insbesondere der Lotballs erfassen lässt. Als ein VDMA-typisches Lastprofil wurde ein Temperaturzyklus  $0\text{ °C} \leq T \leq 85\text{ °C}$  mit 10 min Haltezeit je Temperaturlevel nachgebildet. Es wurden die für das Vorhaben relevanten Materialkombinationen LTCC-Baustein auf FR4- bzw.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Basisleiterplatte untersucht, wobei letztere Kombination nachfolgend betrachtet wird.

Beim Aufheizung auf  $85\text{ °C}$  kommt es infolge des thermischen Mis-Matches und der für die Simulation gewählten vergleichsweise harten Anbindung des Blechs an den DSP zu einer thermisch bedingten Wölbung im Bereich des Controller-Deckels inklusive DSP und Cu-Feder, Bild 16. Diese Deformation lässt sich reduzieren, wenn die in der Rechnung gewählte steife Verbindung zur Klammer alternativ durch eine dicke Paste oder durch ein Füllen des Volumens mit niedrig viskoser Wärmeleitpaste ersetzt wird.



**Bild 15:** FE-Modell des Controller-Bausteins mit DSP und biegeweichen Entwärmungspfad

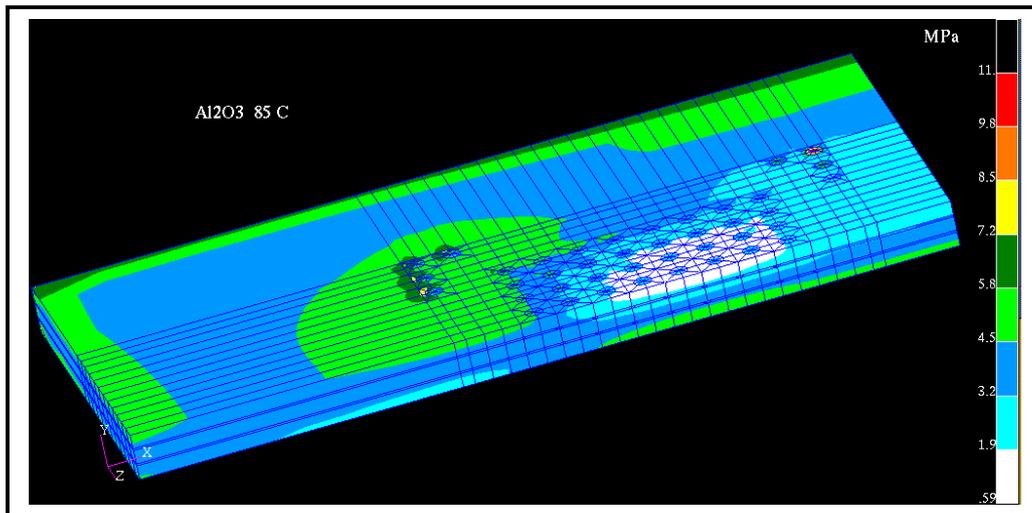


**Bild 16:** Packageverformung des DSP-Moduls und des Controller-Bausteins auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Board nach Aufheizen auf  $85\text{ }^\circ\text{C}$  (Verformung 100-fach überhöht dargestellt)

Bei Erwärmung von RT auf  $85\text{ }^\circ\text{C}$  werden Spannungen im LTCC-Bausteinboden bzw. in der Leiterplatte induziert, deren Maximalwerte in der Umgebung der diagonal am weitesten außen liegenden Balls erreicht werden. Die von-MISESSche Vergleichspannung auf dem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Board belegt diese Aussage, Bild 17. Die mittleren Spannungen von ca.  $4\text{--}6\text{ MPa}$  sind unkritisch. Die Spannungen in den Lotpads sind etwa doppelt so groß. Beim Übergang zu den Balls ist deren Höhe ein entscheidender Parameter. Höhere Balls ermöglichen einen besseren Ausgleich des thermischen Mis-Matches zwischen Leiterplatte und Baustein als flachere. Die auf den Diagonalen außen liegenden Lotballs größerer Bausteine erfahren infolge des thermischen Mis-Matches eine größere Beanspruchungen im Vergleich zu den Balls kleinerer Bausteine.

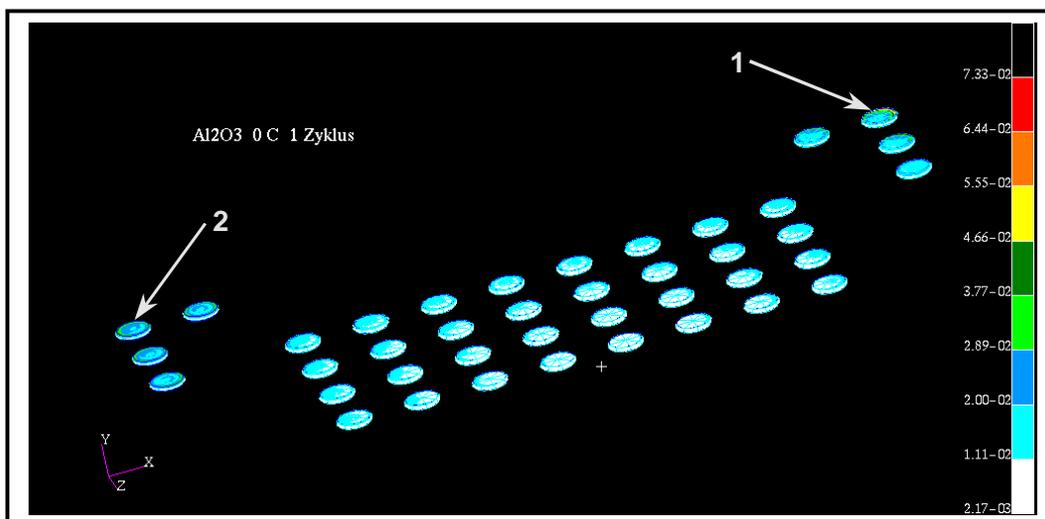
Für die Schädigung der Lotballs bei thermischer Wechsellast ist die während dieser Wechselbelastung angesammelte Kriechdeformation eine maßgebende Bewertungsgröße. Bei Platzierung der E79I-Bausteine auf dem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Board ergibt sich unter Einbeziehung des in diesem Temperaturbereich für LTCC mit Silberpaste gemessenen thermischen Ausdehnungskoeffi-

zienten von ca.  $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ein Ausdehnungsunterschied von rund  $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Im Vergleich zu FR4 mit  $\alpha_{\text{in-plane}} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ein sehr moderater Wert.



**Bild 17:** Spannungsverteilung auf dem Mainboard

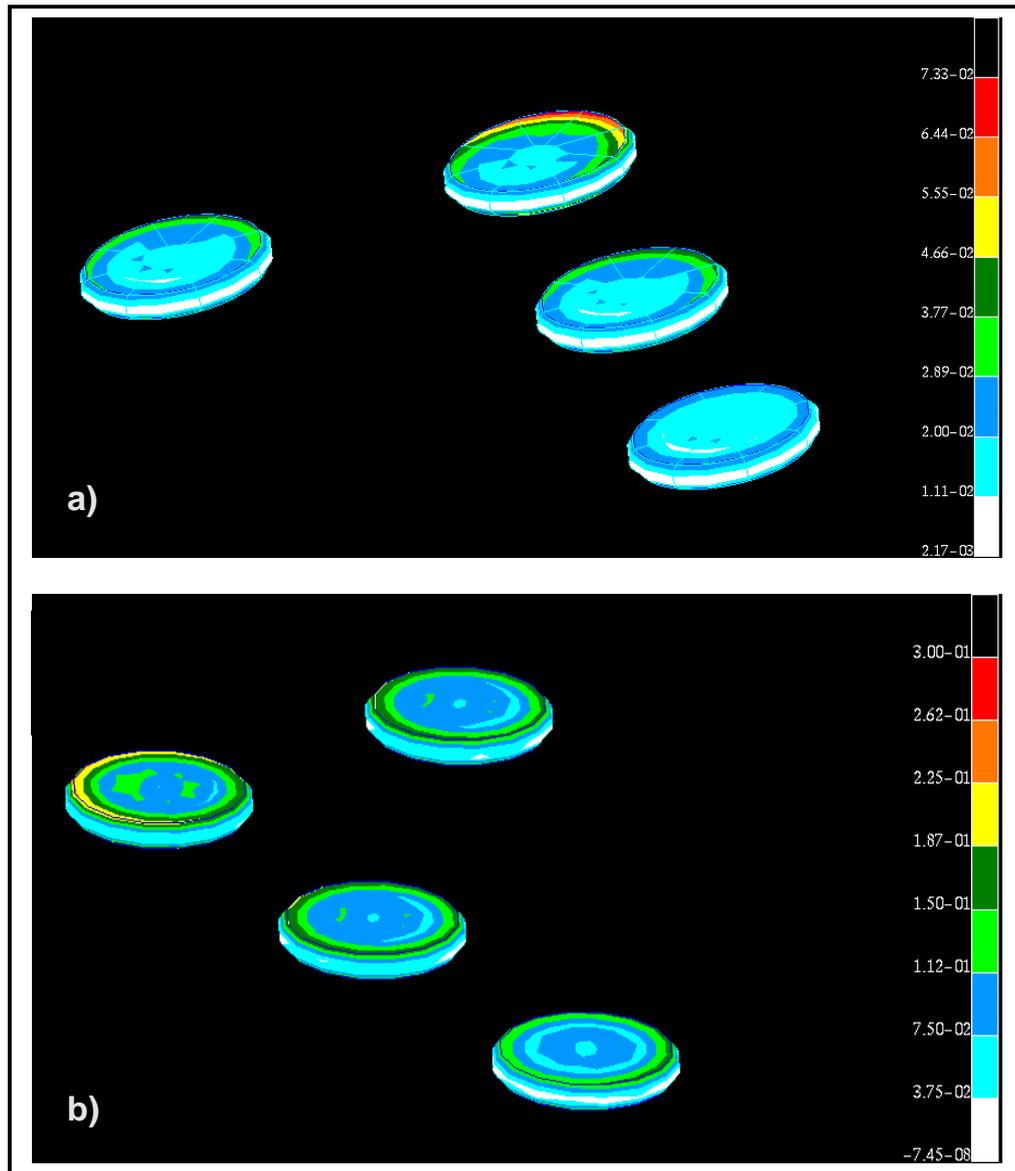
Bei einer Ballhöhe von  $90 \mu\text{m}$  im Interface Board/LTCC-Baustein treten am rechten äußeren Ball, in Bild 18 mit 1 gekennzeichnet, lokale Dehnungsmaxima auf. Am äußeren Rand ergeben sich akkumulierte Kriechdeformationen von über 7%. Mittels der empirischen Beziehung nach Coffin/Manson für eutektisches Blei-Zinn-Lot können lokale Schädigungen in diesem Bereich beginnend ab ca. 70 thermischen Wechsellastzyklen auftreten, die jedoch noch zu keiner Beeinträchtigung der elektrischen Funktionalität führen werden. Unter Berücksichtigung der Tragreserven in den deutlich geringer belasteten Bereichen lässt sich eine Lebensdauer von ca. 1800 bis 2400 Zyklen bis zum Ausfall des ersten Balls prognostizieren.



**Bild 18:** Akkumulierte Kriechdeformation in den Lotballs nach einem thermischen Zyklus bei  $0 \text{ }^\circ\text{C}$

Wesentlich kritischer gestaltet sich die Situation bei der Kombination von LTCC-Bausteinen mit FR4-Board. Durch das ausgeprägte thermische Mis-Match von größer  $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  und den

großen Abstand über die Balldiagonale entstehen in den äußeren Balls extrem hohe Spannungen und Kriechdeformationen von bis zu 30 %, die zu sehr frühzeitigen Schädigungen der Lotverbindungen nach wenigen Temperaturzyklen und letztlich zu einer stark reduzierten Lebensdauer der Bauteile führen können, Bild 19b). Um einen Frühausfall für MATCH-X-Bausteine mit Kantenlängen  $\geq 17,5$  mm zu vermeiden, wird deshalb empfohlen, diese Materialkombination, wenn überhaupt, nur für Testzwecke zu verwenden. Für Bausteine  $\leq 12,5$  mm verbessert sich das Beanspruchungsverhalten beträchtlich, ohne aber die guten Werte des Mischkeramikverbundes zu erreichen. Maßnahmen zur Reduktion der Beanspruchung, wie die Verwendung von Underfill waren nicht Gegenstand des Vorhabens.

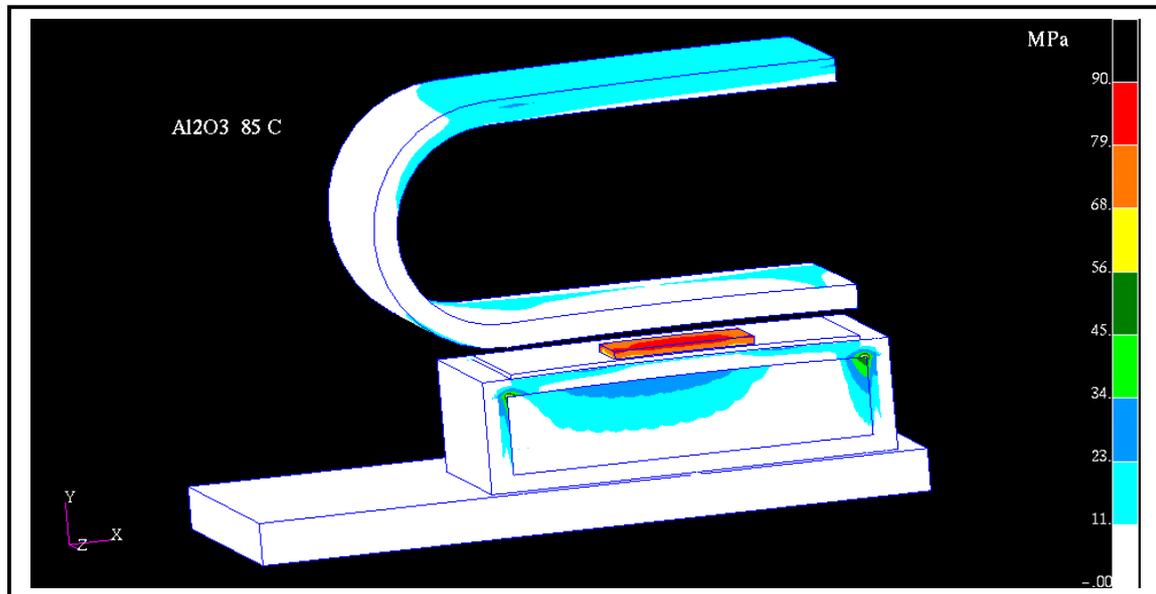


a) LTCC-Modul auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Board,  $\varepsilon_{creep}^{\max} \approx 7\%$

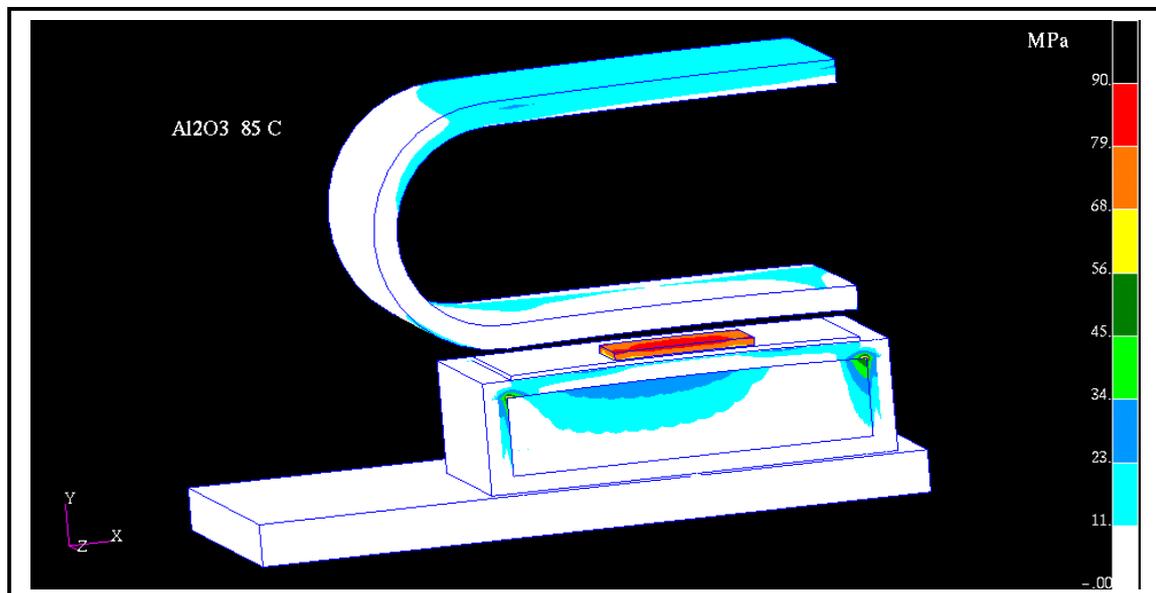
b) LTCC-Modul auf FR4-Board,  $\varepsilon_{creep}^{\max} \approx 30\%$

**Bild 19:** Maximale Kriechdeformation  $\varepsilon_{creep}^{\max}$  im äußeren Ball auf der Diagonalen

Infolge der gewählten Randbedingungen ist eine vergleichsweise homogene Spannungsverteilung mit Ausnahme der Kanten am Übergang Rahmen Deckel und den Spannungskonzentrationen im DSP-Chip zu verzeichnen, Bild 20. Diese Situation wird sich bei der Verwendung von Wärmeleitpaste (Grease) zur thermischen Kopplung der MATCH-X-Komponenten an das Aluminiumgehäuse weiter verbessern.



**Bild 20:** Spannungsverteilung bei Erwärmung auf 85 °C (Mold um DSP entfernt)



**Bild 20:** Spannungsverteilung bei Erwärmung auf 85 °C (Mold um DSP entfernt)

## 1.3 Werkstoffcharakterisierung von LTCC-Materialien

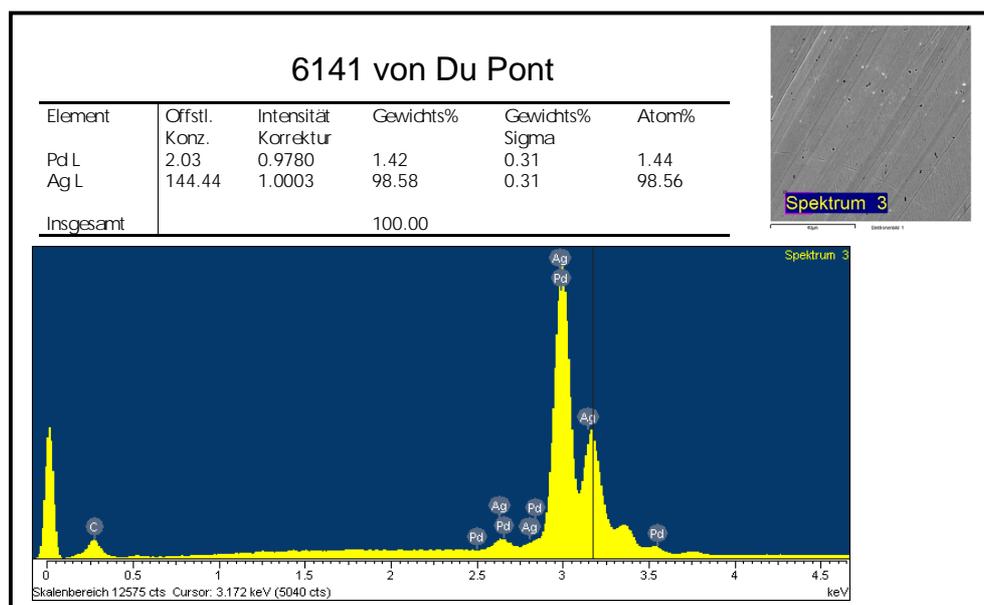
Im Ergebnis einer Bestandsrecherche mit VIA Hermsdorf, TU Ilmenau und IZM Berlin musste festgestellt werden, dass sowohl bei den Projektpartnern als auch den Herstellern der LTCC-Basismaterialien nur in begrenztem Umfang, wenn überhaupt, mechanische und thermische Werkstoffdaten verfügbar waren. Deren Kenntnis ist aber eine wesentliche Voraussetzung zur Qualifizierung der Bauteilfunktionalität, zur Optimierung technologischer Prozessparameter und zur Beschreibung des thermomechanischen Werkstoffverhaltens in der FE-Simulation. Zur Bestimmung ausgewählter Werkstoffeigenschaften von Via-fill Pasten und LTCC-Keramiken wurde deshalb in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern VIA und TU Ilmenau ein Versuchsplan konzipiert. Der Fokus lag auf nachfolgende werkstoffanalytische Untersuchungen

- Metallografische Analysen verfügbarer, in LTCC-Technologie hergestellter MATCH-X-Bausteine
- Analyse temperaturabhängiger Elastizitätsmoduln durch geeignete Messtechniken
- Mikrohärteprüfung
- Bestimmung des E-Moduls bei Raumtemperatur mittels Universalhärteprüfung
- Messung thermischer Ausdehnungskoeffizienten mittels TMA
- EDX-Analysen zur Bestimmung der chemischen Elemente,

die in Zusammenarbeit mit der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH als Nachauftragnehmer bearbeitet wurden. Die Bereitstellung der in Dickschichttechnologie hergestellten Halbzeuge erfolgte sowohl durch VIA als auch durch die TUI. Im weiteren werden beispielhaft ausgewählte Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

### 1.3.1 Via-fill

Es wurden runde und quaderförmige Via-fill Proben von VIA electronic untersucht /20-21/.

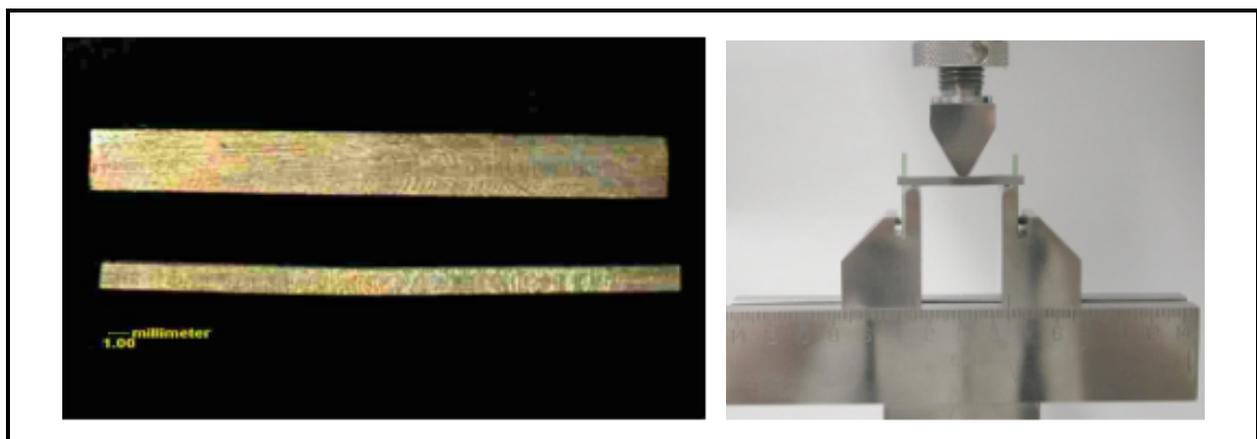


**Bild 21:** EDX-Spektrum von Via-fill 6141

Coinförmigen Rundproben verschiedener Typen wurden mittels EDX-Messung sowie Mikro- und Universalhärteprüfung analysiert [3]. Während bei der Mikrohärteprüfung keine signifikanten Unterschiede zu beobachten waren, variierte der mittels Universalhärte gemessene E-Modul  $E_{HU}$  zum Teil beträchtlich. Dieser liegt im Vergleich um den Faktor 2,5 bis 3,5 über dem von eutektischen PbSn-Lot. EDX-Analysen belegen, dass Silber und Palladium die Hauptbestandteile der Pasten sind. Bild 21 zeigt das Analyseergebnis für Via-fill 6141 von DuPont. Charakteristisch ist ein Masse-%-Anteil von 1,4 ... 2,2 Pd an den als reine Silberpasten ausgewiesenen Via-fills. Weiter Elemente liegen unter der Nachweisgrenze des Verfahrens.

Weiterhin wurden aus verschiedenen Pasten von VIA massive Biegeproben hergestellt. Zur Gewährleistung reproduzierbarer Versuche wurden diese auf 22 mm x 4 mm x 2 mm bei einer Toleranz von kleiner  $\pm 0.1$  mm abgefräst.

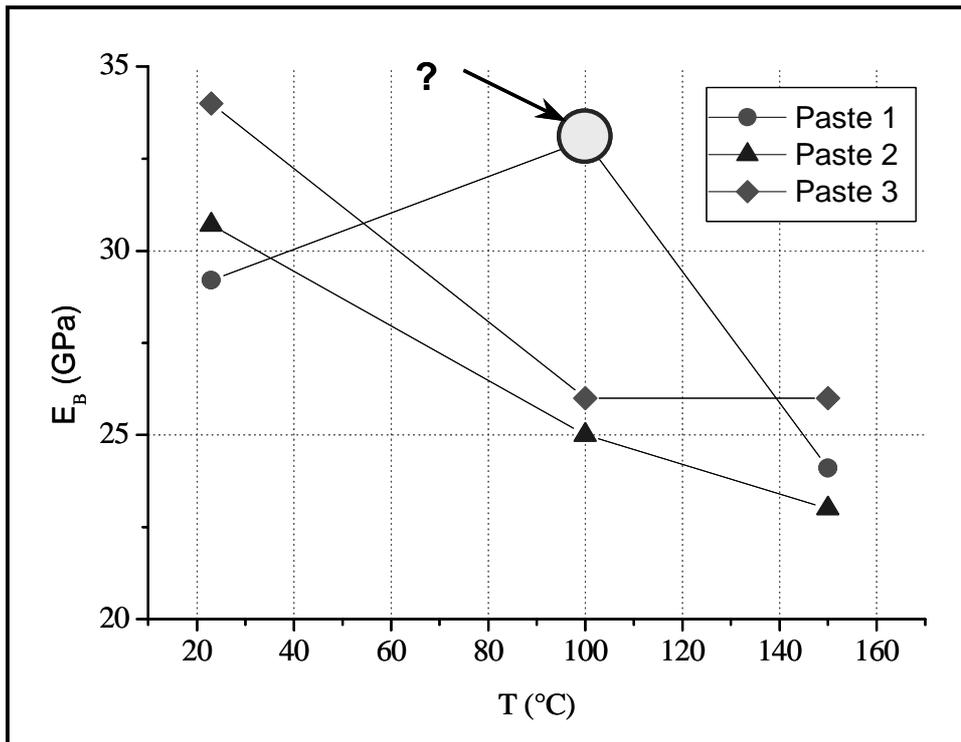
Die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten erfolgte mittels Thermisch-Mechanischer Analyse (TMA) und des Elastizitätsmoduls aus Dreipunktbiegeversuchen, da sich die verfügbare Probengeometrie für die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) als zu steif erwies. Es wurde in einem INSTRON MicroTester 5848, Bild 22, auf drei Temperaturlevel 20 °C, 100 °C und 150°C geprüft.



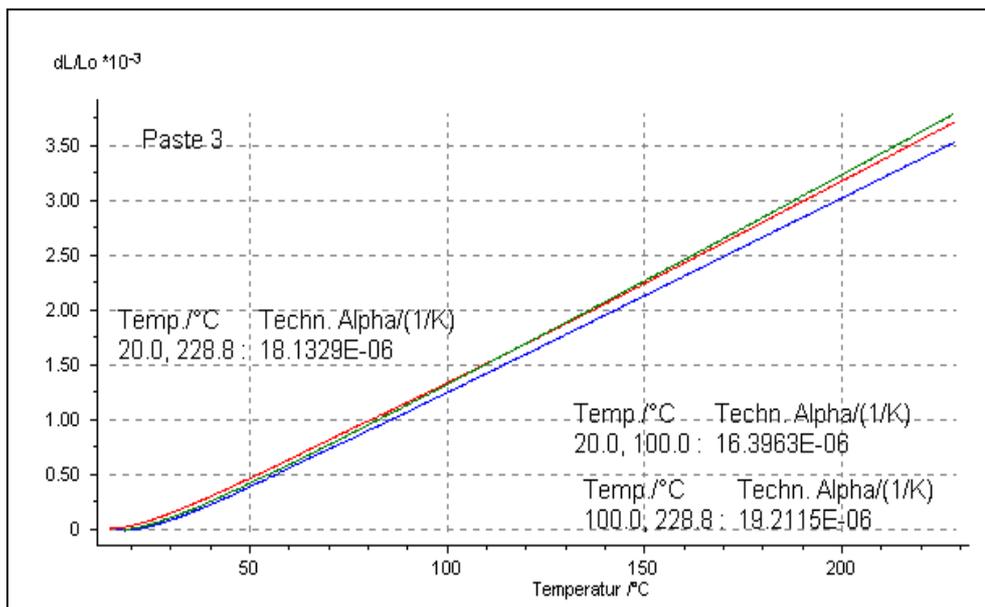
**Bild 22:** Gebogene Via-fill Probe und Versuchsanordnung für Dreipunktbiegung (Abstand der Auflager 20 mm)

Der E-Modul liegt in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich  $23 \text{ GPa} < E < 34 \text{ GPa}$ . Diese Werte betragen ca. 1/4 des E-Moduls von LTCC. Mit steigender Temperatur war eine Abnahme des E-Moduls zu verzeichnen, Bild 23. Eine Ausnahme bildete Paste 1 bei 100 °C, bei der ein gegenüber Raumtemperatur größerer E-Modul gemessen wurde. Diese Abweichung kann u.a. durch Anomalien im Werkstoffgefüge verursacht werden. Auf Grund der verfügbaren Proben konnte dieses Phänomen leider nicht umfassend aufgeklärt werden. Weiterhin wurde eine vergleichsweise hohe Sprödigkeit bei Biegedehnungen von kleiner 1 % beobachtet.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  wurde mittels Thermisch-Mechanischen Analysator TMA 202 Temperaturintervall  $20 \text{ °C} < \Delta T < 230 \text{ °C}$  ermittelt. Die Messungen erfolgten nach IPC TM 650. Zur Sicherung einer homogenen Durchwärmung der Probe wurde mit einer Heizrate von 5 K/min gearbeitet.



**Bild 23:** Temperaturabhängiger Elastizitätsmodul verschiedener Via-fill Pasten



**Bild 24:** Probenverlängerung in Abhängigkeit von der Temperatur zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$

In Auswertung der Probenverlängerung in Abhängigkeit der Temperatur, Bild 24, lassen sich die thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  ermitteln, Tabelle 2. Die rote Kurve in Bild 24 ist die erste Kurve, bei der sich das Spiel in der Messeinrichtung ausgleicht. Die weiteren Kurven (grün und blau) weisen eine sehr gute Reproduzierbarkeit auf. Die im Temperatur-

intervall 20 °C ... 100 °C gemessenen  $\alpha$  sind erwartungsgemäß etwas kleiner als die für das Intervall von 100 °C ... 220 °C. Im Intervall 100 °C – 220 °C steigen diese für die Ag-Paste um knapp 20 % und für die AgPd-Paste (Paste 2) um ca. 12 %.

**Tabelle 2:** Thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  von Viafill

Paste	$\alpha(\Delta T)$ in $10^{-6} \text{ K}^{-1}$		
	RT – 220 °C	RT – 100 °C	100 °C – 220 °C
1	18,5	16,5	19,8
2	17,9	16,6	18,8
3	18,1	16,4	19,2

### 1.3.2 LTCC

Zur Analyse des Einflusses verschiedener Sinterprofile auf die thermomechanischen Eigenschaften der LTCC-Materialien wurden mehrere Versuchsreihen konzipiert und untersucht /21-25/. Ausgewählte Ergebnisse werden nachfolgend für die Untersuchung der Chargen

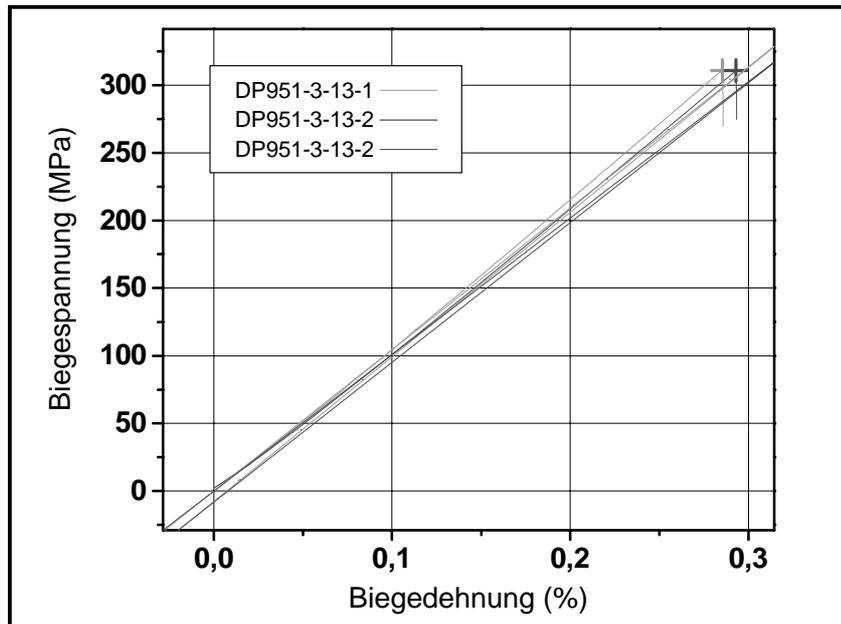
- DP951- ohne Metallisierung – Profil 11
- DP951- ohne Metallisierung – Profil 12
- DP951- ohne Metallisierung – Profil 13
- DP951- 5 Lagen Ag – Profil 13
- Hera CT 800 – Profil 685

von VIA dargestellt und diskutiert.

Entsprechend der Probengeometrie 30 mm x 4 mm x 1mm und den zu erwartenden Festigkeiten wurde das Spannungs-Biegedehnungs-Verhalten mit einem INSTRON Micro Tester 5848 analysiert. Es wurden 3-Punkt-Biegeversuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Der Auflagerabstand betrug 20 mm.

Bild 25 zeigt stellvertretend für Charge DP951 mit Profil 13 die gemessenen Spannungs-Biegedehnungs-Kurven. Diese sind erwartungsgemäß durch ein ausgeprägt linearelastisches Werkstoffverhalten und einen sehr kleinen Dehnungsbereich verbunden mit klassischem Spröbruchverhalten charakterisiert. Schwankungen treten vorzugsweise in der Bruchspannung und der Bruchdehnung auf, den Materialparametern bei denen sich lokale Imperfektionen besonders stark bemerkbar machen, Tabelle 3. Unabhängig vom gewählten Sinterprofil sind die Elastizitätsmoduln für DuPont 951 – Profil 11 bis 13 praktisch konstant. Mit rund 110 MPa sind die Messwerte jedoch kleiner als der in der Literatur oft wiederkehrende Wert von  $E = 150 \text{ GPa}$ . Dieses Verhalten kann u.a. in unterschiedlichen Ausgangsmaterialien bzw. technologischen Parametern begründet liegen.

Durch die Einlagerung von Verdrahtungsebenen wie in den Proben DP951 mit 5 Lagen Silber ist eine ca. 12%-ige Reduktion im E-Modul und eine etwa 25 % geringere Bruchspannung bei einer größeren Streuung der Materialdaten zu verzeichnen. Diese Werte liegen dann in der Größenordnung von der monolithischen Charge Hera CT 800.



**Bild 25:** Biegespannungs-Dehnungs-Verlauf für DP 951 – Profil 13

**Tabelle 3:** Materialdaten für LTCC, Mittelwert aus mehreren Messungen

Charge	E in GPa	$\sigma_{\max}$ in MPa	$\varepsilon_B$ in %
DP 951 – Profil 11	113	310	0,31
DP 951 – Profil 12	111	290	0,27
DP 951 – Profil 13	109	310	0,29
DP 951 – Profil 13 mit 5 Lagen Ag	94	225	0,25
Hera CT 800 - Profil 685	101	230	0,24

$\sigma_{\max}$  ... maximal ertragbare Spannung bei Bruch,  
 $\varepsilon_B$  ... Bruchdehnung

Die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  erfolgte gleichfalls in einem Thermisch- Mechanischen Analysator TMA 202 nach IPC TM 650. Die Proben wurden im Temperaturintervall  $20\text{ °C} < T < 230\text{ °C}$  mit einem Temperaturinkrement von 5 K/min im Expansionsmodus beaufschlagt.

Die  $\alpha$ -Werte für DP 951 sind für die verschiedenen technologischen Profile praktisch identisch, Tabelle 4. Sie liegen in der Größenordnung der Literaturwerte. Erwartungsgemäß ist das mittlere  $\alpha$  bei Charge DP 951 mit 5 Silberlagen geringfügig größer. Der thermische Ausdehnungskoeffizient für das Temperaturintervall 20 - 100 °C ist rund  $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  kleiner als für den Bereich 100 °C bis 230 °C, d.h. bei Anwendungen von LTCC-Modulen in höheren Temperaturbereichen wird empfohlen, diese Abhängigkeit zu berücksichtigen.

**Tabelle 4:** Thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  in  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$  für verschiedene Chargen

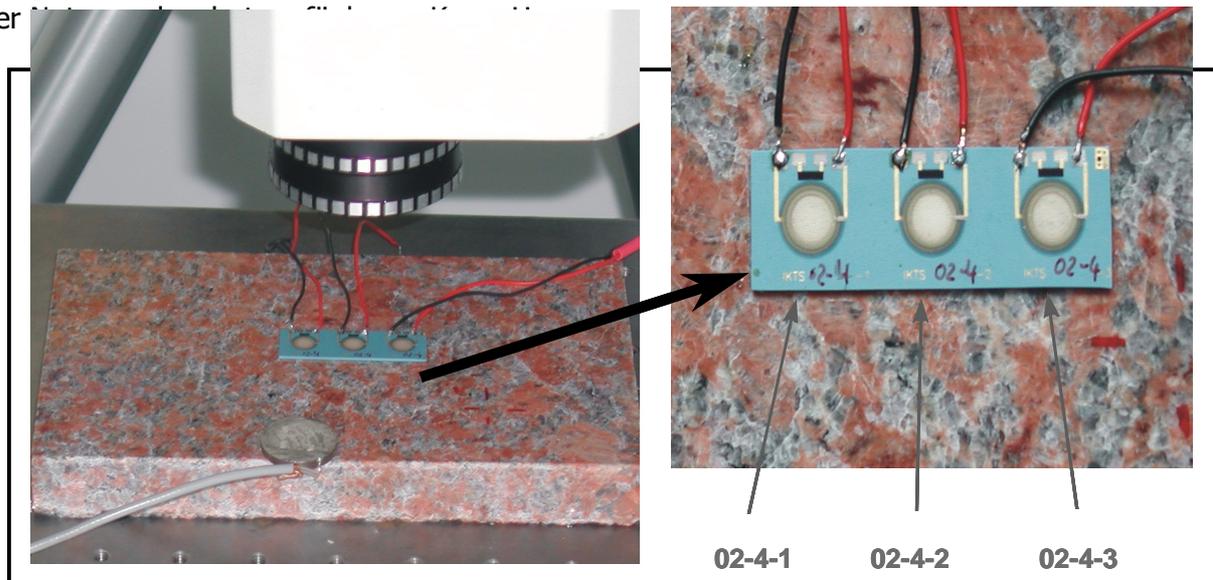
Charge	RT bis 230 °C	RT bis 100 °C	100 °C bis 230 °C
DP 951 – Profil 11	5,4	4,8	5,8
DP 951 – Profil 12	5,2	4,7	5,5
DP 951 – Profil 13	5,3	4,6	5,7
DP 951 – Profil 13 mit 5 Lagen Ag	5,6	4,9	6,1
HERA CT 800 – Profil 685	5,0	4,3	5,5

### 1.3.3 Diskussion

Der bei VIA electronic nutzbare technologische Prozess zeichnet sich durch eine hohe Robustheit und gute Reproduzierbarkeit sowohl für das LTCC als auch die Via-fill Pasten aus. Im Rahmen der Entwicklung im Vorhaben konnten speziell für LTCC-Aufbauten ca. 20 % bessere mechanische Eigenschaften erreicht werden /25/. Zwischen den Via-fill Pasten treten materialtypische Unterschiede in den thermischen und mechanischen Eigenschaften auf. Diese scheinen sich aber nach bisherigen Erkenntnissen auf die Zuverlässigkeit der Bauteile unter Einsatzbedingungen nicht gravierend auszuwirken. Eine Untersuchung der Materialverbunde war jedoch nicht Gegenstand des Vorhabens.

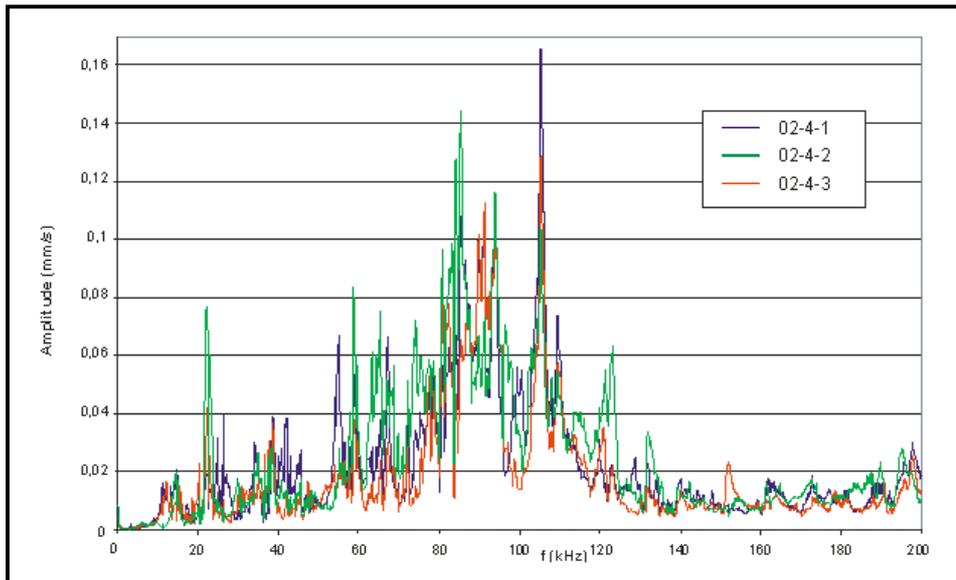
## 1.4 Analyse des Schwingungsverhaltens von Piezopumpen mittels Laservibrometrie

Seitens der TU Ilmenau wurden in LTCC-Technologie aufgebaute Piezopumpen bereitgestellt, an denen die Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen zu analysieren waren. Diese Messungen erfolgten mittels scannendem Laservibrometer bei der Amitronics GmbH Seefeld unter

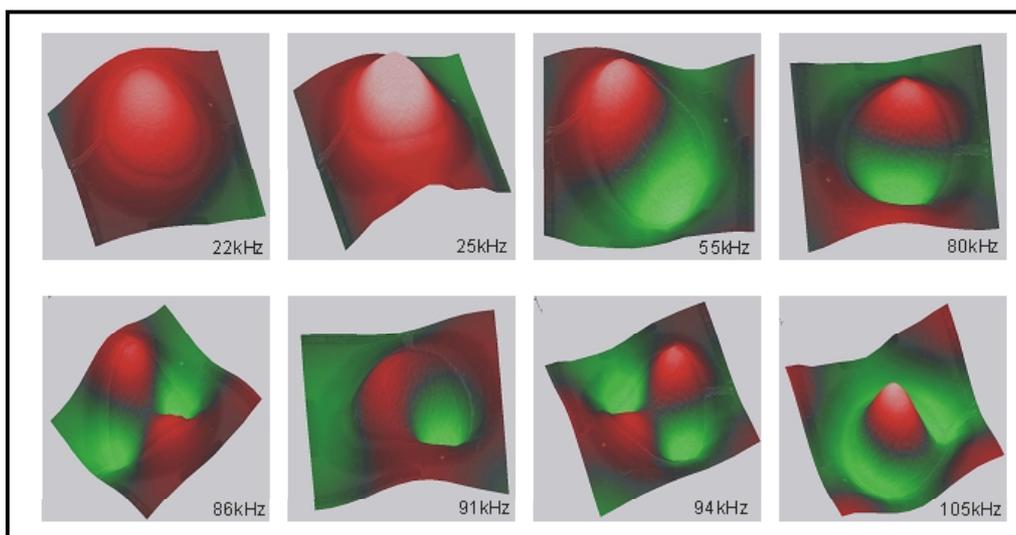


**Bild 26:** Vibrometermesskopf mit drei LTCC-Piezopumpen (Membran hellgrau) und Piezoshaker im Vordergrund

Bild 25 zeigt den Vibrometermesskopf mit Miniaturmessvorsatz und Nahlinsen zur Schwingungsanalyse an Membran von LTCC-Piezopumpen bei Fremd- und Eigenerregung. Die Positionierung auf einem schwingungs isolierten Tisch in Kombination mit einer großen Masse, hier planparallele Granitplatte, schafft ideale Auflagebedingungen. Zur Fremderregung wird der Pumpenmodul mit einem Spezialklebstoff auf den Piezoshaker fixiert und mittels Sinusschwingung angeregt. Im Vergleich zu einer starren Verbindung ist eine Klebverbindung weicher. Es sind folglich tiefere Eigenfrequenzen zu erwarten. Anschließend wurden die Membranen der einzelnen Piezopumpen elektrisch mit einer Spannung von 4,54 V (Maximalspannung des Piezoverstärkers) und einem Offset von 10 V angeregt.



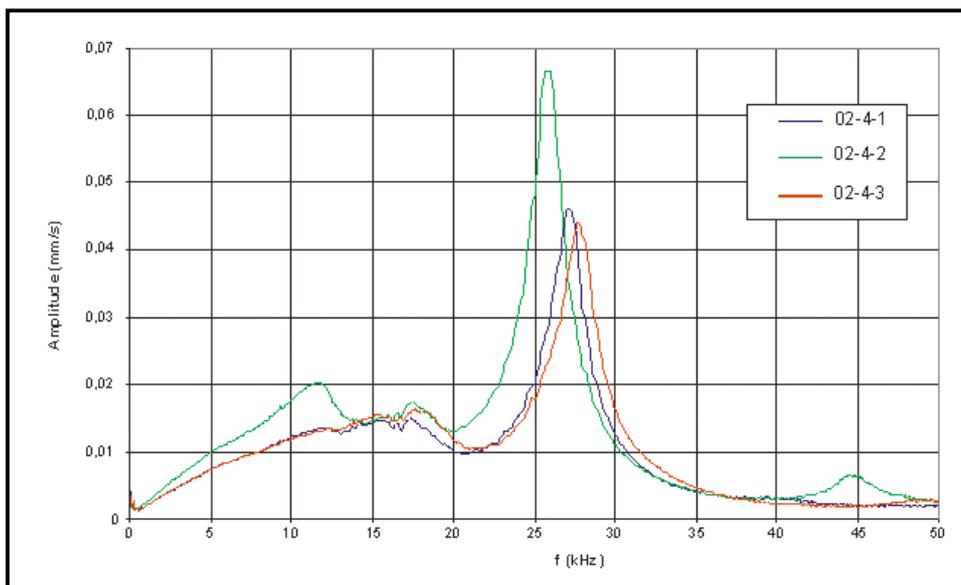
**Bild 27:** Schwingungsgeschwindigkeitsspektren der drei Piezopumpen bei Fremderregung mittels Piezoshaker



**Bild 28:** Ausgewählte Schwingformen der Piezopumpe 02-4-3 im Frequenzband 0 – 200 kHz bei Fremderregung

Die Eigenfrequenz und –schwingformen werden durch laseroptische Messung der Schwinggeschwindigkeit senkrecht zur Bauteiloberfläche bei stationärer dynamischer Belastung bestimmt. Dazu wird das Bauteil diskret abgerastert. Aus diesen Messwerten wird u.a. die Eigenschwingform berechnet, wobei die Amplitude zur besseren Visualisierung um ein Vielfaches überhöht dargestellt wird.

Bild 27 zeigt den Frequenzgang der out-off-plane Schwingung für die drei Piezomembranen. Die erste Eigenschwingform (Durchbiegung der Membran) bildet sich bei ca. 22 kHz aus. Die in den Bildern 28 dargestellten höheren Eigenschwingformen sollten im Betrieb vermieden werden, da sie infolge der gegenläufigen Amplitudengeometrien für den effektiven Transport von Fluiden nur bedingt bzw. überhaupt nicht geeignet erscheinen.



**Bild 29:** Ermittlung der ersten Eigenfrequenz bei Eigenregung durch Anlegen einer elektrischen Betriebsspannung

Bei Anregung mit einer Betriebsspannung tritt eine Frequenzverschiebung zu höheren Frequenzen zwischen 26 und 28 kHz für die erste globale Biegeschwingform auf, Bild 29. Die gemessene Amplitude ist bei der mittleren Membran am höchsten. Die Unterschiede in der ersten Eigenfrequenz werden vermutlich durch vorhandene Bauteiltoleranzen und technologische Randbedingungen verursacht.

## 1.5 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Dem Modularisierungsgedanken von MATCH-X folgend hat die AMIC GmbH im Vorhaben eine parametrisierbare FE-Modellbibliothek für alle Bausteine der Elektrischen Schnittstelle des VDMA-Einheitsblatts 66305 entwickelt, getestet und für verschiedene Applikationen erfolgreich eingesetzt. Metallografische Schliffe an verfügbaren Bausteinen ermöglichten, einerseits geometrische Details bei der FE-Netzgenerierung zu berücksichtigen und andererseits dringend benötigte Aussagen zur Optimierung technologischer Prozesse bei Projektpartnern wie IZM, VIA oder TU Ilmenau bereitzustellen. Durch die Parametrierung variabler Größen, wie Rahmenhöhe oder Boden- bzw. Deckeldicke, können sehr effizient applikationsspezifische Bausteinestapel einschließlich Mehrlagenbausteine modelliert werden.

An speziellen mit Heizwiderständen bestückten Evaluierungsbausteinen wurde in interdisziplinärem Teamwork mit IZM, TUI, Levitec und FESTO die Qualität der numerischen Modelle durch Abgleich mit experimentellen Befunden projektübergreifend getestet und qualifiziert. Durch Kombination von hochauflösender FE-Vernetzungen und infraroptischer Feldmesstechnik konnte nachgewiesen werden, dass sich mittels Simulation das thermische Bausteinverhalten mit einer Genauigkeit besser 10 % virtuell nachbilden lässt.

Parallel zum elektrischen Layout gestatten diese rechnergestützten Entwurfwerkzeuge, Bausteinstacks schon in der Phase ihrer Entwicklung auf ihre thermische und/oder mechanische Beanspruchbarkeit zu untersuchen und auszulegen. Schwachstellen im Design lassen sich so ohne die Fertigung teurer Prototypen frühzeitig erkennen und in Sensitivitätsanalysen Vorschläge zu deren Optimierung schon während der Entwicklung erarbeiten.

Entsprechend der vom Konsortium favorisierten Layoutvarianten und Belastungsprofile wurde eine Vielzahl verschiedener Stackkonfigurationen generiert. Das Virtual Prototyping ermöglicht, kritische Temperaturverteilungen zu erkennen, die Wirksamkeit potenzieller Kühlkonzepte zu evaluieren und funktionale Bausteinanordnungen zu optimieren. Diese Vorgehensweise sichert einen wesentlichen Zeitgewinn, die Reduktion der oft großen Anzahl technologischer Varianten sowie frühzeitige Aussagen zur thermischen Integrität und thermomechanischen Zuverlässigkeit der Komponenten und Systeme.

Als thermomechanisch sehr kritisch erweist sich die Kombination von FR4- und Keramikbausteinen, z.B. LTCC. Infolge des thermischen Mis-Matches werden im Lot bei Temperaturbelastung Spannungen und vor allem große Kriechdehnungen akkumuliert, die zu lokalen Schädigungen schon nach wenigen Lastwechseln bis hin zum frühzeitigen Ausfall der Baugruppen führen können. Aus diesem Grunde wird empfohlen, „sortenreine“ MATCH-X-Stacks vor allem für die flächenmäßig großen Bausteine einzusetzen.

Parallel zur FE-Simulation wurden speziell ausgewählte Werkstoffe der LTCC-Technologie, hier LTCC-Material und Via-fill Pasten, in enger Zusammenarbeit mit VIA und TUI umfassend charakterisiert. Die Bestimmung bisher nicht verfügbarer thermomechanischer Werkstoffparameter ermöglicht eine Ein- bzw. Zuordnung der Materialien in etablierte Klassen von Konstruktions- und Funktionswerkstoffen. Die Konstanz und Reproduzierbarkeit der Werkstoffdaten bildet ein Maß für die Güte des technologischen Prozesses beim Produzenten. Dies konnte speziell für die LTCC-Proben nachgewiesen werden. Weiterhin sind diese Werkstoffdaten wesentliche Eingangsgrößen für die FE-Beanspruchungsanalyse und zeichnen maßgeblich für die Qualität der Simulationsergebnisse verantwortlich.

Weiterhin wurden LTCC-basierte Piezopumpen der TU Ilmenau mittels Laservibrometrie dynamisch analysiert. Aus den gemessenen Eigenfrequenzen und –schwingformen wurden Aussagen zum Pumpverhalten und dem Einfluss von technologischen Parametern abgeleitet.

## 1.6 Verwertung der Ergebnisse

Auf Grund der aktuellen Konjunktur finden MATCH-X Produkte nur einen begrenzten Zugang zum Markt. Infolgedessen gestaltet sich die Nachfrage nach Leistungen zur thermischen und mechanischen Beanspruchungsanalyse als ausgesprochen zögerlich.

Die im Vorhaben erarbeitete wissenschaftlich-technische Kompetenz auf dem Gebiet des thermomechanischen Screenings von mikrotechnischen Komponenten und Systemen konzentriert sich u. a. auf die variable Netzgenerierung, die intelligente Integration parametrierbarer Größen in modulare Modelle und der Qualität der Simulationsergebnisse, die von Kunden und Auftraggebern sehr wohl verfolgt und registriert werden. Dieses Know How lässt

sich für ähnliche Aufgabenstellungen effizient aufbereiten und in modifizierter Form nutzen, eine Vorgehensweise die von unseren Kunden und Auftraggebern akzeptiert und geschätzt wird. Das im Vorhaben erworbene Wissen wirkt als Multiplikator, denn es ist für AMIC eine anerkannte Referenz bei der Akquisition neuer Industrieaufträge und ihre Einbindung in strategische Entwicklungsallianzen.

Eine schnelle, variable Netzgenerierung bei möglichst verbesserter Vorhersagegenauigkeit bildet eine wichtige Voraussetzung für eine verbreiterte Anwendungsplattform des Virtual Prototyping mittels FE-Analyse zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer innovativer Produkte. Diese hoch spezialisierte Entwicklungsdienstleistung wird zunehmend nicht nur von Systemhäusern der Automobilindustrie oder Telekommunikation sondern auch von deren Zulieferern, mittelständischen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, der Medizintechnik oder der Sensorikbranche, wenn auch noch sporadisch, abgefordert und in die Produktentwicklung integriert. Dazu werden die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse in die Technischen Informationen eingearbeitet und somit einem breiteren Kundenkreis zugänglich gemacht.

### 1.7 Veröffentlichungen und Berichte

- /1/ VDMA Einheitsblatt 66305: Bausteine und Schnittstellen der Mikrotechnik, Deutscher Maschinen und Anlagenbau VDMA, August 2002, 185 S.
- /2/ VDMA Einheitsblatt 66305: Bausteine und Schnittstellen der Mikrotechnik, Blatt 1: Definitionen, Freigabeversion September 2004, 6 S.  
Blatt 2: Geometrische Schnittstelle, Freigabeversion September 2004, 5 S.  
Blatt 3: Elektrische Schnittstelle, Freigabeversion September 2004, 16 S.
- /3/ Zwischenbericht imodas-zbII/2002, 23.02.2003, 19 S.
- /4/ VOGEL, J.; KAULFERSCH, E.; AUERSPERG, J.; KREYBIG, K.: FE-Analysen zum thermischen Strukturverhalten von Match-X-Systemen. 47. Int. Wiss. Kolloquium der TU Ilmenau, 20-26.09.2002, 2 S.
- /5/ Vogel, J.; Heinrich, D., Kaulfersch, E., Amiri Jam, K.; Großer, V.: Screening der thermischen Integrität von MATCH-X-Bausteinen mittels FE-Simulation und IR-Thermografie. Proc. 10. Workshop Thermoemissionsanalyse, Braunschweig, 19.09.2002, 41 S.
- /6/ VOGEL, J.; KAULFERSCH, E.; KREYSSIG, K.; MICHEL, O.; AUERSPERG, J.: Development and application of a parameterised MATCH-X-model library for FE-analysis of the thermo-mechanical situation. Proc. 2<sup>nd</sup> VDE World Microtechnologies Congress München - MICRO.tec 2003, 14-15 October 2003, Statusseminare BMBF-Vorhaben, 281-289
- /7/ VOGEL, J.: Thermo-mechanical optimisation of current sensor design by finite-element-simulation and materials characterisation. EUROPRACTICE Workshop, Sliema (Malta), 17-18 November 2003, 31 S.
- /8/ Zwischenbericht imodas-zbI/2003, 31.07.2003, 22 S.
- /9/ Arbeitsbericht: Qualifizierung der numerischen Modelle durch Abgleich der berechneten Temperaturverteilung mit thermografischen Messungen, imo-ab-031107, 05.11.2003, 30 S.
- /10/ VOGEL, J.; KAULFERSCH, E.; KREYSSIG, K.: Thermomanagement im Technologievergleich, Tutorial 3D-Stacking Technologien, SMT Nürnberg, 17.06.2004, 18 S.

- /11/ Ergebnispräsentation auf internem Statusseminar. Bürkert GmbH & Co. KG Ingelfingen, 23.04.2002, 23 S.
- /12/ VOGEL, J.; KAULFERSCH, E.; KREYBIG, K.; AUERSPERG, J: FE-Analyse zur thermomechanischen Verträglichkeit von modularen Antriebssystemen. Statusseminar zum BMBF-Vorhaben IMODAS auf dem 47. Int. Wiss. Kolloquium der TU Ilmenau, 20.-26.09.2002, 27 S.
- /13/ VOGEL, J.; KAULFERSCH, E.; AUERSPERG, J.; KREYBIG, K.: Virtual Prototyping mittels Finite-Elemente-StrukturAnalyse (FEA) und Werkstoffcharakterisierung in der MST, insbesondere für MATCH-X. Workshop: Materials Valley Workshop, Hereaus Kulzer GmbH Co. KG Hanau, 14.02.2003, 30 S.
- /14/ Ergebnispräsentation auf internem Statusseminar. FESTO AG & Co. Esslingen, 22.05.2003, 32 S.
- /15/ Megatrend Miniaturisierung - Modulbauweise bringt Antriebstechnik auf Touren. VDI-Nachrichten Nr. 47, 19.11.2004, 36
- /16/ Arbeitsbericht: Thermische FE-Analyse MATCH-X-Elektronikboard, , imo-ab-031231, 31.12.2003, 12 S.
- /17/ Ergebnispräsentation auf Projekttreffen. VIA electronic GmbH Hermsdorf, 31.03.2004, 32 S.
- /18/ Arbeitsbericht: FE-Analyse zur Optimierung der thermischen Situation in der MATCH-X-Elektronik, imo-ab-040604, 2004
- /19/ Ergebnispräsentation auf internem Abschlusssseminar. FESTO AG & Co. Esslingen, 21.09.2004, 16 S.
- /20/ Arbeitsbericht: Grundlegende Untersuchungen zur Charakterisierung von Via-fill Pasten in variablen Coin-Format, imo-ab-021115, 18.11.2002, 21
- /21/ Arbeitsbericht: Werkstoffanalytische Charakterisierung von LTCC und Via-fill unter dem Aspekt der technologischen Prozessstabilität, imo-ab-030710, 07.07.2003, 14 S.
- /22/ Arbeitsbericht: Grundlegende Charakterisierung von LTCC-Keramik, imo-ab-021115, 17 S.
- /23/ Arbeitsbericht: Charakterisierung von LTCC-Keramik, imo-ab-030304, 04.03.2003, 7 S.
- /24/ Arbeitsbericht: Metallografische Strukturanalyse an LTCC-Bausteinen, imo-ab-031107, 07.11.2003, 12 S.
- /25/ Arbeitsbericht: Ermittlung von Werkstoffkennwerten an LTCC-Proben, imo-ab-040311, 08.03.2004, 9 S.

## Messeteilnahmen:

- /a/ Teilnahme Hannover Messe Industrie, Partner des VDMA-Gemeinschaftsstandes der MATCH-X Community, 07.-12.04.2003
- /b/ Teilnahme TechTextil, Partner des Gemeinschaftsstandes des VDI/VDE-IT Teltow, 08.-10.04.2003
- /c/ Teilnahme Messe SENSOR 2003 in Nürnberg, 13.-15.05.2003  
Teilnahme Hannover Messe Industrie, Partner des VDMA-Gemeinschaftsstandes der MATCH-X Community, 18.-24.04.2004