

# Abschlussbericht

BMBF-Verbundprojekt **TRACE**:

Technology Readiness Process for Consumer Electronics

Teilvorhaben der Berliner Nanotest und Design GmbH



## Thermische Charakterisierung, Bewertung und Optimierung als Teil eines neuen Übertragungs- und Qualifizierungsprozesses in der Automobilelektronik

Zuwendungsempfänger: Berliner Nanotest und Design GmbH	
Vorhabenbezeichnung:	TRACE
Förderkennzeichen:	16ES0489
Projektlaufzeit:	11.04.2016 bis 10.10.2019
Berichtszeitraum:	11.04.2016 bis 10.10.2019
Fälligkeit:	10.04.2020
Erstelldatum:	31.01.2020
Autor:	Dr. Eberhard Kaulfersch (Berliner Nanotest und Design GmbH)
Ansprechpartner:	Dr. Eberhard Kaulfersch fon: +49 30 6392 3880 E-Mail: kaulfersch@nanotest.eu

## Inhaltsverzeichnis

Abschlussbericht .....	1
BMBF-Verbundprojekt <b>TRACE</b> : .....	1
Technology Readiness Process for Consumer Electronics.....	1
1 Aufgabenstellung, Ausgangssituation, Voraussetzungen und Projektplanung .....	2
1.1 Aufgabenstellung .....	2
1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens .....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zum Projektstart .....	3
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	4
2 Die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse ....	5
2.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	5
2.1.1 AP 4 Components .....	5
2.1.2 AP 6 Modelling and Simulation.....	9
2.1.3 AP 7 Test and Validation .....	13
2.2 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen .....	18
3 Bekannt gewordene F&E-Ergebnisse Dritter .....	19
4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses .....	19

# **1 Aufgabenstellung, Ausgangssituation, Voraussetzungen und Projektplanung**

## **1.1 Aufgabenstellung**

Ziel des Projektvorhabens TRACE war es, eine allgemein gültige Methode auf Basis von Prototypen und Demonstratoren zu entwickeln und zu validieren, die der deutschen Automobil- und Automatisierungsindustrie als Leitfaden für die Qualifikation von CE-Komponenten und darauf aufbauenden Systemen dient. Die Methode dient dazu, Modifikationen, Anpassungen und Qualifikationsanforderungen zu identifizieren, die erforderlich sind, um den sicheren und zuverlässigen Einsatz von CE-Komponenten, CE Technologien und den daraus resultierenden integrierten Systemen in teilweise sicherheitskritischen Anwendungen zu ermöglichen.

Um neue Funktionen, welche mit Hilfe von ursprünglich für CE-Anwendungen entwickelten Komponenten realisiert wurden, auch validieren zu können, waren geeignete Verifikations- und Validierungsprozesse über alle Produktebenen hinweg von der Komponentenentwicklung bis hin zur finalen Freigabe nötig. Für die jeweiligen Produktebenen waren geeignete und effiziente Maßnahmen zur Risikominimierung zu implementieren. Dazu gehörten neue und validierte Hilfsmittel zur Modellbildung und Simulation, mit deren Hilfe sich dann mögliche Schwachstellen der CE-Technologien und Komponenten in ihrer neuen, harscheren Umgebung und die Effektivität von geplanten Maßnahmen zur Schwachstellenbeseitigung vorhersagen lassen.

Auch neue Test- und Validierungsmethoden wurden benötigt, um eventuelle Schwachstellen der CE-Technologien und Komponenten und auch der umgesetzten Maßnahmen identifizieren und um letztendlich die Eignung der implementierten Maßnahmen verifizieren und validieren zu können. Für die BNT ergab sich daraus die Aufgabenstellung, die thermische Auslegung mit Simulation und dediziert zu entwickelnder Messtechnik für thermische Analysen zu unterstützen.

## **1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens**

Die Berliner Nanotest und Design GmbH (BNT) startete in TRACE auf der Basis einer 10jährigen Historie vor allem ingenieurtechnischer Dienstleistungen auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsbewertung und des zuverlässigkeitsorientierten Entwerfens und Testens mit Entwicklung und Einsatz spezieller Messtechniken. Sie verfügte über zahlreiche Referenzen als F&E-Dienstleister und Messgerätehersteller für spezielle Märkte, z.B. Infineon, Bosch, EPCOS, Continental, Temic, DuPont, Dow Corning, STMicro etc. und konnte auf F&E-Partnerschaften in nationalen Projekten zusammen mit EPCOS, Fraunhofer, Philips, etc. und in europäischen Projekten mit Thales, IBM, VTT, Schneider Electric verweisen. Speziell das EU-Projekt SmartPower (2011-2015 - Integration von GaN- und SiC-basierter Hochleistungselektronik in industrielle und RF-Applikationen) bildete eine sehr gute Voraussetzung für die Durchführung des Verbundvorhabens, da dabei erhebliche Probleme beim thermischen Management und den Packaging-Technologien zu lösen waren.

Know-How im Bereich der (Entwicklung von Methoden und Gerätelösungen zur) thermisch induzierten Bauteilzuverlässigkeit generierten auch die BMBF-Projekte RESTLES (2007-2011) und CharTIM (2011-2014) und die FP7-Projekte Smart-LIC (2011-2015), COSIVU (2012-2015) und NanoPack (GA no. 318117, 2007-2011). BNT erarbeitete neue Ansätze zur thermischen Charakterisierung ausgerichtet auf die in den Projekten entstandenen technologischen Prozesse und Werkstoffe und entwickelte in diesem Zusammenhang transiente und statische optische Methoden für die thermische Analyse von hochleitfähigen Dünnschichten, bei der zum einen Laser- und zum anderen Infrarot-Technik zum Einsatz kommen.

## **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Planung und Ablauf des BNT-Teilvorhabens orientierten sich an den Arbeitspaketen des TRACE-Projekts mit BNT-Beteiligung in den Arbeitspaketen AP4, AP6, AP7 und AP10 (Abbildung 1). In Arbeitspaket 4 lag der Fokus auf CE-Halbleiterkomponenten (Sensoren, integrierte Schaltungen), die durch Verbesserung der jeweiligen Halbleitertechnologien, Sensor- und Schaltungsdesigns und Packages für automobiler und industrieller Anwendungen zu qualifizieren waren, wobei BNT im Bereich der Packages mitarbeitete.

Für die zielgerichtete Unterstützung bei der Definition und Durchführung von Verbesserungsmaßnahmen wurden Modellierungs- und Simulationsverfahren herangezogen, die in Arbeitspaket 6 erforscht und entwickelt wurden. Diese virtuellen Methoden der theoretischen Modellierung und der numerischen Simulation legten die Grundlage dafür, dass in weit kürzerer Zeit als durch experimentelle Tests die Schwachstellen in den CE-Komponenten ermittelt und Gestaltungsvorschläge für das vollständige Erfüllen der Automobil-Anforderungen entwickelt werden konnten.

Sowohl für die Schwachstellenanalyse, als auch die Verifikation und Validierung der umgesetzten Verbesserungsmaßnahmen wurden neuartige, in Arbeitspaket 7 konzipierte Testverfahren hinsichtlich Funktionalität, Zuverlässigkeit, Robustheit und funktionaler Sicherheit angewandt. Die Tests in Arbeitspaket 7 erzeugten die nötigen experimentellen Ergebnisse zur Validierung der Simulationsrechnungen.

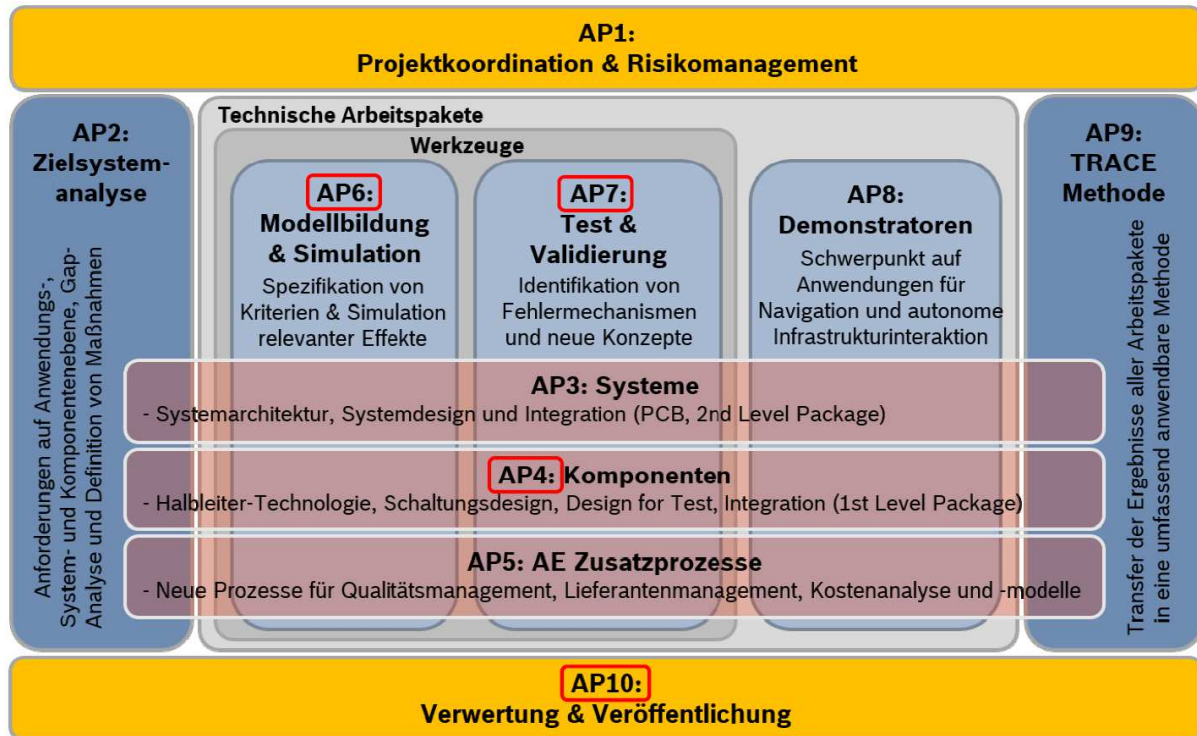


Abbildung 1: Übersicht der TRACE Arbeitspakete (hervorgehoben: BNT-Beteiligung)

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zum Projektstart

Im Teilvorhaben der BNT im Rahmen der Methodikentwicklung in TRACE, elektronische Komponenten und Subsysteme zu analysieren und für den Einsatz in KfZ zu qualifizieren, stellte BNT sich insbesondere die Aufgabe der thermischen Charakterisierung und Optimierung basierend auf experimentellen Ergebnissen im Vergleich mit thermischen Modellen und Simulation. Ein systematischer Ansatz zum Redesign ursprünglich nicht für den Automobilbereich gedachter Elektronik war nicht verfügbar, der zu Projektbeginn vorhandene Stand der Technik war eher von einer Bewertung von Fall zu Fall ohne ein generelles Schema gekennzeichnet. Thermisches Management war jedoch Bestandteil der meisten Packageentwicklungen, etabliert sowohl bei den hauseigenen Entwicklungsabteilungen als auch bei Universitäten und Forschungsinstituten. Die Ausgangssituation war jedoch dadurch gekennzeichnet, dass Elektronik für den Konsumerbereich aus Preisgründen auch nur den dort geltenden thermischen Erfordernissen genügte. Insbesondere infolge der höheren Umgebungstemperaturen und demzufolge reduzierten Margen zwischen Kühlmittel und maximaler Junctiontemperatur erforderten elektronische Aufbauten mit passiver Kühlung für den Automobilbereich einen deutlich höheren Aufwand an thermischer Optimierung. Die Layouts basierten überwiegend auf statischen Junction-to-case und -to-ambient-Kalkulationen.

Aus der Integration unterschiedlicher Funktionen unter Nutzung verschiedener Technologien erwachsen neue Herausforderungen für das Packaging in Bezug auf Komplexität, thermische Integrität, Zuverlässigkeit und Kosten. Dazu wurden auf Grund wachsender Ansprüche an Performance, Kosten

und Sicherheit FE-Methoden zur Effektivierung des Designprozesses bereits in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Immer mehr Bauteile, Packages und ganze Strukturen wurden mit numerischen Methoden optimiert, die Herstellung von Prototypen zur experimentellen Qualifizierung von Bauteilen immer weiter reduziert und durch Methoden des Virtual Prototyping ersetzt. Der volle Umfang thermischer, elektrischer, mechanischer und mglw. chemischer, die Zuverlässigkeit und Funktion beeinflussender Effekte wurde für die Mehrheit der Konsumerelektronik jedoch nicht berücksichtigt.

Ein Pool leistungsfähiger Programmsysteme, mit dem zunehmend auf die Herausforderungen bezüglich struktureller Komplexität, Diversität im Materialeinsatz und den Belastungsregimes sowie Miniaturisierung und multiskalige Effekte eingegangen werden konnte, war insbesondere für das MEMS-Design bereits vorhanden.

Virtuelle Techniken umfassten bereits weite Bereiche des Designs mikroelektronischer Aufbauten und adressieren teilweise EMV, Zuverlässigkeit, Robustheit und funktionale Sicherheitsaspekte des Packagedesigns. Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung, Metallographie und Deformationsanalysen deckten bereits Fehlerursachen auf und lieferten Eingangsdaten für die Simulation. Tests zur beschleunigten Alterung unter nieder- und hochzyklischer Belastung wie Temperaturwechseltests bzw. Vibrationstests, auch in Kombination untereinander und mit Feuchteinflüssen, wurden zur Ermittlung des Ausfallverhaltens als Basis für die Lebensdauerprognose und zur Baugruppenqualifizierung eingesetzt. Ein konsequenter Physics-of-Failure-Ansatz zur numerischen Beschreibung wesentlicher Ausfallmechanismen war jedoch keineswegs durchgängig zu verzeichnen. Schutzrechte Dritter, die durch die Arbeiten von BNT im Vorhaben verletzt hätten werden können, waren BNT keine bekannt. Als Background standen BNT zwar in die Projektbearbeitung eingebrachtes bestehendes Wissen, entwickelte Verfahren, Geräte und Software zur Verfügung, jedoch keine eigenen Schutzrechte, deren Entwicklung im Vorhaben durch BNT allein auch nicht vorgesehen war.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das TRACE Konsortium bestand aus repräsentativen Partnern der europäischen Forschungs- und Entwicklungslandschaft und signifikanten namhaften europäischen Automobilherstellern: **VW, BMW, Daimler, Volvo** sowie Systemlieferanten repräsentiert durch die zu den im Weltmarkt führenden Lieferanten für Systeme der Automobil- und Automatisierungsindustrie zählenden Firmen **Bosch, Continental** und **Siemens** sowie ferner **AKKA** und **Vedecom**. Die Europäische Elektronik- und Halbleiterindustrie wurde durch die Firmen **AMS, Bosch, NXP** und **STMicroelectronic** vertreten, welche ihre jeweiligen Kompetenzen in den Bereichen MEMS, Sensorik, Sicherheit, Vernetzung und Kommunikation, sowie Prozessoren und Mikrokontrollern für Datenverarbeitung ins Projekt einbrachten. Zusätzlich beteiligte sich auch eine Vielzahl von europäischen klein- und mittelständischen Unternehmen am Projekt, neben **BNT** auch **Catena, Coventor, Chemnitzer Werkstoffmechanik, Fries, Göpel, HELIOX, iMAR, IMSYS, Open Wide, QRTech, SILKAN, TRONICS, und TWT**. Das Konsortium wurde komplettiert durch eine Reihe prominenter Forschungsinstitute und Universitäten: **CEA, Fraunhofer Gesellschaft, FH Joanneum, KTH Royal Institute of Technology, Swerea IVF, TU Delft, Universität Bremen, Université de Bordeaux und Universität Siegen**.

Eine enge Zusammenarbeit wurde in TRACE mit Robert Bosch GmbH, CWM und Fraunhofer ENAS gepflegt. Hervorzuheben ist die Zusammenarbeit mit RB bei ihrem ASIC TSV WLP, der für die thermische und thermomechanische AE-Konvertierung ausgewählt wurde. Hauptthema war die thermomechanische Stabilität der TSV-Strukturen im WLP.

## 2 Die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

### 2.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

#### 2.1.1 AP 4 Components

Innerhalb des Arbeitspakets 4 hatte das Teil-AP4.3 Package upgrade (IC, sensor) die Beiträge zu liefern, die Modifikationen der elektronischen Packages zum Erreichen der AE-Konformität betrafen. Dazu kam insbesondere Input aus den AP6 und 7:

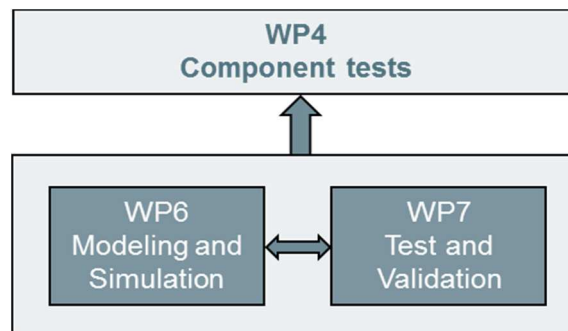


Abbildung 2: Prozessablauf für die Analyse von Packages in TRACE

BNT arbeitete im Arbeitspaket 4.3, wobei die Arbeit im Rahmen der Taskgruppe "CE Package Use for AE - Solder Fatigue for AE conditions / acceleration" stattfand, wo die möglichen Auswirkungen des Packagings auf große, flache Komponenten wie QFN und BGA untersucht wurden. Zusammen mit WP 6 und 7 wurde herausgestellt, dass das Packaging einen besonders großen Einfluss auf Sensor-Komponenten bezüglich Kosten, Zuverlässigkeit, Robustheit und Qualität der Komponenten hat. Das Packageupgrade sollte dabei mit dem der Komponententests Hand in Hand gehen. Das Ziel des Test-Upgrades ist es, sicherzustellen, dass die notwendigen Testverfahren zur Sicherstellung der Funktionalität und Zuverlässigkeit auch unter AE-Bedingungen anwendbar sind. Gegebenenfalls sind die Testprozeduren anzupassen. Der Hauptschwerpunkt von BNT bestand darin, reale Prozesse und applikationsäquivalente Testbedingungen, z.B. Temperatur, Druck und andere Umgebungsparametern einschließlich der Wechselbeziehungen zwischen diesen Parametern bereitzustellen. Der zweite Schwerpunkt waren thermische Messungen mit Bewertung von geeigneten Charakteristika und Mess-techniken, die Anpassung/Entwicklung von dedizierten Testeinrichtungen und die Durchführung von thermischen Zykeltests im Zusammenhang mit Charakterisierung und Degradations-/Fehleranalyse. Die Definition der Anforderungen für die Anpassung von Messsystemen bzw. Entwicklung von dedizierten Geräten sowie für reale Prozess- und zu Applikationen äquivalenten Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, ...) war Bestandteil von AP7. BNT hat im AP 4.3 zunächst die Definitionsphase des Package-Upgrades hinsichtlich ihrer experimentellen Ausrüstung für die Charakterisierung des thermischen Verhaltens auf Package- und Subsystemebene unterstützt. Dabei wurden zunächst konzeptionelle Arbeiten zur Bereitstellung von speziellen thermischen und elektrischen Belastungsumgebungen (Power Cycling) durchgeführt, die den Nachweis der Konformität mit den AE-Anforderungen für Lösungen zur Packageoptimierung zu erbringen. In diesem Zusammenhang wurden der Powerzykelprüfstand (Abbildung 3) und die dazugehörigen Beobachtungsmethoden bezüglich ihrer Eignung für die thermische Charakterisierung und die Degradations-/Fehleranalyse zur Detektion und zum Nachweis von thermischen Schädigungs- und Versagensmechanismen sowie der Ableitung von Maßnahmen zur Risikominderung bewertet. Zusammen mit den Partnern FhG und CWM wurde das experimentelle Setup für die Überwachung/Untersuchung der Degradation im thermischen Verhalten und die Untersuchung von thermisch induzierten Schädigungen festgelegt. Im Beitrag von BNT zum Deliverable D-4.2 "Description of package and package technologies in the focus of enhancement" wurden erforderliche Untersuchungsmethoden zur thermischen Dissipation von Packages definiert:

- Charakterisierung des thermischen Verhaltens auf Packageebene
- Bewertung der thermischen Degradation und thermisch bedingter Ausfallmechanismen
- Bestimmung thermischer Materialeigenschaften
- Verifikation der thermischen Modelle und Designbewertung/-optimierung

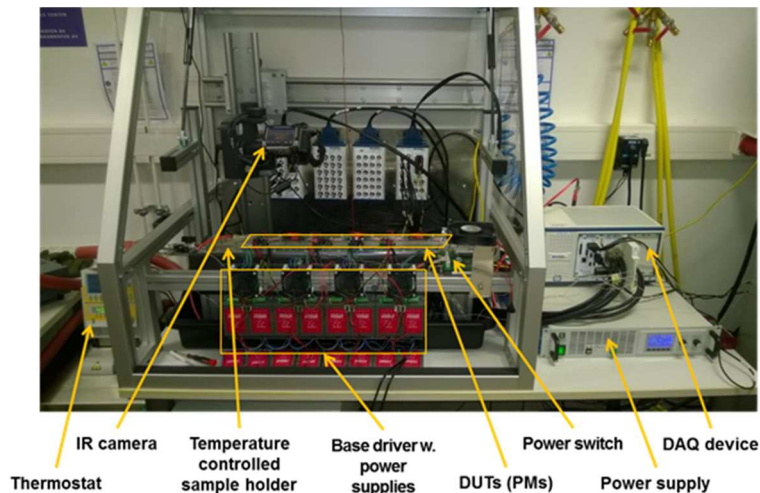


Abbildung 3: Belastungsprüfstand für überlagerte aktive und passive thermische Zykelprüfungen bei FHG ENAS

Zusammen mit Robert Bosch GmbH (RB) wurden für die Packageuntersuchungen in Verbraucheranwendungen weit verbreitete Sensoren für potenzielle Automobilanwendungen ausgewählt.

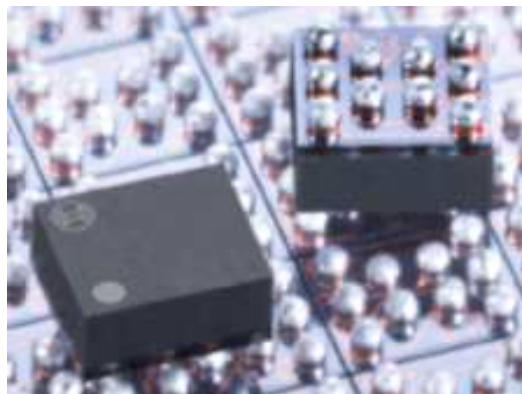


Abbildung 4: Bosh Inertialsensoren als Samples für die thermischen Untersuchungen

Für ein Sensor-Stack-Package von RB wurden thermische Untersuchungen an dem 3D-Stack durchgeführt, um Transferkonzepte hinsichtlich thermischer Probleme für das Package zu unterstützen. Proben des Packages wurden von RB bereitgestellt (Abbildung 4). Zunächst wurde Input für thermische Ersatzschaltbilder und Finite-Elemente-Modelle der ungeschädigten Packagestrukturen (synthetische Strukturfunktionen) erstellt, um Aussagen über die thermische Degradation und das Versagen sowie die Ableitung von Maßnahmen zur deren Vermeidung zu liefern. Die Arbeit war eng mit dem AP6 verbunden, um die Simulationen zur Quantifizierung der Degradation zu verifizieren. Dort hat BNT die 3D-Modellierung für die thermische Simulation durchgeführt.

Zur Kooperation bezüglich der Evaluierung der 3D-Sensoren und der Integration von TSV (Through Silicon Via) unter AE-Bedingungen ist BNT der Fokusgruppe zur 3D-Integration innerhalb des TRACE-Projekts beigetreten (RB, FhG ENAS, CWM, BNT). Innerhalb dieser erfolgte die enge AP-übergreifende Zusammenarbeit beim RB ASIC TSV WLP, wozu u.a. Infrarot (IR)-Analysen am 3D-Stack hinsichtlich der TSV-Zuverlässigkeit bei BNT durchgeführt wurden. Die Identifikation von Abweichungen des Temperaturfeldmusters aufgrund von TSV-Versagen wurde durch Simulation weiterverfolgt. Diese Arbeit stand in enger Verbindung mit AP6, der Verifizierung der Simulation und damit der Quantifizierung von Degradation und Versagen. Darüber hinaus wurde der Charakterisierungsbedarf hinsichtlich des thermischen Verhaltens der beteiligten Materialien, Grenzflächen und Systemen identifiziert und priorisiert sowie thermische Charakterisierungen durchgeführt, um die thermischen Leitfähigkeiten von Komponenten für das thermische Management und im Hinblick auf Infrarot (IR)-Analysen am 3D-Stack hinsichtlich der TSV-Zuverlässigkeit zu bestimmen. Für die thermische Charakteri-

sierung von Polymeren mit der Messtechnik der BNT für den Projektpartner RB wurden weiterhin Präparationstools entwickelt um Probenmaterial in verschiedenen Dicken herstellen zu können und diese schließlich mit dem Messsystem TIMA zu messen (Abbildung 5):

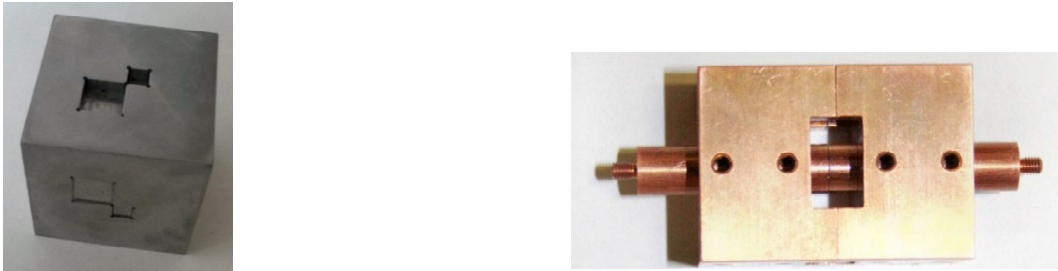


Abbildung 5: Preparationstools für ausgehärtete Polymere (li.) und Kleber (re.)

Die Erforschung und Entwicklung von Methoden zur thermo-graphischen Zustandsüberwachung und Fehlererkennung zur Verifizierung von Lösungen für das Package-Upgrade zum Nachweis der Konformität mit den AE-Anforderungen betrafen zum einen die thermische Simulation der TSV im WLP und zum anderen die von BNT betriebene IR-Thermografie als Teil der Entwicklung eines geeigneten Konzepts zur TSV-Fehleranalyse. In Zusammenarbeit mit den Paketanbietern RB, FhG und CWM wurden thermische und Deformationsanalysen des WLP mit ASIC-TSVs zur Überprüfung der thermomechanischen Zuverlässigkeit und der AE-Konformität durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden Tests mit Pulsthermographie zur (thermischen) Zustandsüberwachung und Fehlererkennung in Kombination mit Wirbelstromanregung kleiner WLP-Proben durchgeführt. An diesen Beispielpackages sollte die Fehleranalyse mit IR-Thermografie bewertet werden, um Musterabweichungen aufgrund von Schadenseinflüssen zu identifizieren. Dazu wurden verschiedene Anregungsarten wie z.B. Laserblitze auf die Proben ausprobiert, mit dem Ergebnis, dass der Laser diese selbst bei Pulslängen von nur 9 ns, jedoch bei Flächenleistungsdichten von etwa  $2\text{MJ}/\text{mm}^2$  mit der verfügbaren Ausrüstung stark beanspruchen würde. Folglich wurde die kontaktlose thermische Bauelementanregung durch Wirbelströme untersucht, wobei hochfrequente Magnetfelder von 500 kHz und eine modulierte Erwärmung bei  $< 1\text{ Hz}$  zur Lock-in-Verstärkung verwendet wurden. Für die Gehäuse-Charakterisierung in TRACE konnte zumindest eine Lötballinspektion realisiert werden. Bei entferntem Lot war eine TSV-Inspektion vorgesehen, die jedoch aufgrund der sehr kleinen Stichprobe und der noch kleineren TSV-Größe leider nicht erfolgreich war.

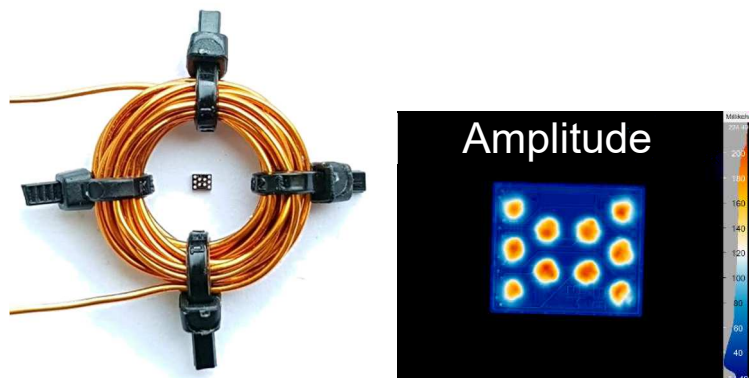


Abbildung 6: Thermische Anregung der RB Inertialsensoren durch hochfrequente Wirbelströme (500 kHz) und Moduation (li.) und IR-Amplituden der Lotballs im Versuch

Als wesentliche Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Thermographieverfahren (Puls-Phase, Lock-in-Thermografie) wurden die Lock-in-Thermografie mit Wirbelstromanregung als die Methode der Wahl für die Fehleranalyse identifiziert sowie eine berührungslose thermische Anregung durch Wirbelströme mit hochfrequentem Magnetfeld (500 kHz) getestet (Abbildung 6). Die TSVs innerhalb des RB-Gehäuses waren jedoch schwer zugänglich und mit Lötägeln bedeckt, nackte Proben nicht verfügbar und die Versuche nicht erfolgreich, die Balls zu entfernen, ohne das Gehäuse zu beschädigen. Aufgrund der sehr kleinen Proben und der noch kleineren Merkmalgröße störten Schwingungseffekte im Lock-in-IR-Mikroskop die Untersuchungen und konnten nicht eliminiert werden. Bilder von TSVs, die mittels Lock-in-Thermographie ohne jegliche thermische Anregung untersucht wurden, zeigten bis zu

25 mK Scheinamplitude, die allein durch Kameravibrationen erzeugt wurden, und bis zu 600 mK Scheinamplitude durch Vibration des Messtisches (Abbildung 7).

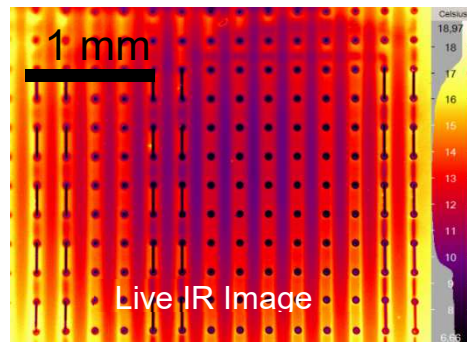


Abbildung 7: Störeffekte durch Vibrationen während der Lock-in IR Mikroskopaufnahmen: bis zu 25 mK Amplitudenfehler durch Kameravibrationen und 600 mK Scheinamplitude durch Vibration des Messtisches

Für die Fehlererkennung ist eine hohe Genauigkeit unerlässlich, da nicht nur die absoluten Temperaturwerte gemessen werden müssen, sondern auch die Abweichungen der thermischen Reaktion vom ungeschädigten Zustand im Falle eines Versagens. Im Gegensatz zum derzeitigen Aufbau, bei dem keine direkte mechanische Verbindung zwischen Kamera und Probenpult besteht und der Stirling-Kühler Vibrationen der IR-Kamera verursacht, erzeugen Vibrationen vor allem bei Lock-In-Techniken falsche Signale und starke Randeckeffekte. Ein neuer Aufbau mit einem mitschwingenden Probenhalter (Abbildung 8) ist erforderlich, bei dem der Probenhalter direkt am Kameraobjektiv montiert ist und so eine mechanische Verbindung erzeugt, um eine synchrone Schwingung von Kamera und Probe zu gewährleisten.

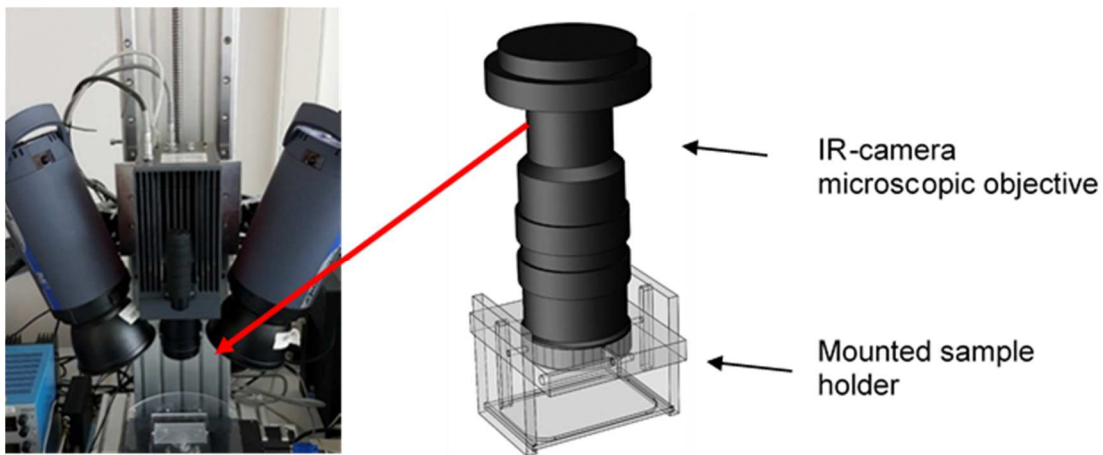


Abbildung 8: IR-Messaufbau mit mitschwingendem Probenhalter

Der erforderliche neue Aufbau mit mitschwingendem Probenhalter konnte für die Fortsetzung der Untersuchungen während der Projektlaufzeit nicht realisiert werden, so dass aufgrund der Hindernisse bei der Etablierung der IR-Inspektionsmethode ein lokaler und globaler Vergleich der Simulations- und thermischen Messergebnisse noch aussteht.

Für die Charakterisierung auf Packageebene wurden Fortschritte bei der Anpassung von Messsystemen für Temperaturen und Spannungen im Bauteilinneren mit integrierten Temperatur- und Stresssensoren sowie der Anpassung spezieller Geräte für die thermischen Tests erzielt. Zur thermischen und thermo-mechanischen Packagecharakterisierung wurde die Weiterentwicklung des Prototyps einer Sensorknoten-Plattform als Integrationskonzept für das hochempfindliche und hochfrequente Matrix-Spannungssensorelement von BNT verfolgt. Der Stress-Sensor-ASIC ermöglicht mit nur 4 IOs die Erfassung der Spannungs- und Temperaturverteilung über die gesamte In-Plane Oberfläche des Chips mit Hilfe des Arrays aus 6x6 Zellen, das 36 Messpunkte liefert. Bis zu acht Sensorchips, deren



gesamte Chipfläche regelmäßig von Sensorzellen-Arrays bedeckt wird, bilden ein Messcluster, das mit Hilfe der Chip-on-Board-Technologie (CoB) auf einem Substrat montiert und vor der Einbettung mit Globtop verkapselt wurde. Ein organisches Substrat dient als Interposer, der die elektrischen Verbindungen und eine gute mechanische Fixierung während der nachfolgenden Integrationsprozesse gewährleistet. Die Chips wurden zunächst auf den Interposer montiert und drahtgebondet. Um verschiedene Anwendungen zu untersuchen, wurden 4 ASIC-Varianten realisiert, die sich in der Chipgröße und der Anzahl der Sensorzellen unterscheiden. Ihre Chipgröße variiert von 1 bis 7 mm<sup>2</sup> und dementsprechend auch ihre Zellenzahl von 12 bis 67. Dies ermöglicht Anwendungen mit sehr lokalen Spannungs- und Temperaturverteilungen. Das Gesamtsystem mit der Sensormatrix, die in der Lage ist, in-Plane- und Scherspannungen innerhalb von Polymerstrukturen sehr empfindlich zu bestimmen, erlaubt eine in-situ-Bestimmung der Spannungszustände vor, während und nach den Schritten der Pagemontage, d.h. während der Herstellung und des Testens. Die Spannungsmessung ermöglicht die Verfolgung aller Belastungen während der Verarbeitung sowie die Analyse und Bewertung thermisch induzierter Schädigungs- und Versagensmechanismen und trägt so zur Ableitung von Maßnahmen zur Reduzierung des AE-Risikos bei.

Der Stressmesschip (SMC) auf Interposer als Komponente eines Sensorknotens (Abbildung 9) hat sich für die Prozessüberwachung während der Fertigungsphase bewährt. Die Messungen zeigten zufriedenstellende Ergebnisse, die eine Grundlage für die Verkapselung, die Einbettung in Strukturen und die Verwendung in SHM-Systemen von SMC-Sensorknoten bilden. Die SMC-Ergebnisse für mechanische Spannungen und Temperaturen wurden auf der Oberseite des Silizium-Chips simuliert und gemessen, wodurch induzierte Spannungen an den Sensoren für die gesamte Verarbeitungszeit gezeigt werden konnten.

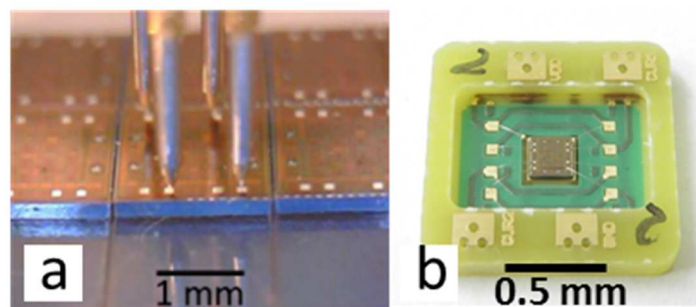


Abbildung 9: SMC Herstellungsschritte: a) Bare SMC Readout, b) Chip auf organisches Substrat gebondet (Interposer)

Schließlich wurde die Experimentalumgebung für das Matrix-Stress-Sensorelement (SMC) von BNT in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer ENAS für einen weiteren Gehäusotyp (DIL) eingesetzt. Das SMC wurde gepacked, um aktive Komponenten auf dem Leadframe sowohl in Single- als auch in Dual-Die-Gehäusen zu ersetzen, wobei die umgebende Moldmasse sowohl auf Chip(s) als auch Bonddrähte einwirkt. Zur Untersuchung des Einflusses von Stress und Temperatur auf die Elektronik während der thermischen Zyklen wurde ein in-situ Messsystem aufgebaut. Die Messungen dienen der Bestimmung lokaler Verteilungen von in-plane- und Scherspannungen sowie Temperaturen innerhalb des Gehäuses, was eine sehr empfindliche in-situ-Bestimmung der Spannungszustände auch während der TC-Tests ermöglicht. Als Mittel zur Fehlererkennung und als Beitrag zur Ableitung von Maßnahmen zur Reduzierung des AE-Risikos verfolgen derartige Spannungsmessungen alle Belastungen während des Packings und der thermischen Zyklen. Die Messungen tragen zur Bewertung von thermisch induzierten Schädigungen und Versagensmechanismen bei, insbesondere der Delamination an der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Leadframe. Das System wurde im Beitrag von BNT zu D-4.4 „Zwischenbericht über angewandte Strategien und Erfolge bei Packages, Teststrategien, Prozesstechnologien und Komponentenentwicklung“ detailliert beschrieben.

### 2.1.2 AP 6 Modelling and Simulation

Um die Risiken eines thermo-mechanisch induzierten Versagens in elektronischen Systemen zu bewerten sind theoretische Modellierungen weit verbreitet. Unter anderem werden physikalische Konzepte für versagensbezogene Herangehensweisen entwickelt, um die Herausforderungen der thermo-mechanischen Zuverlässigkeit in der Automobilelektronik anzugehen. Die Messung von Verformungen

unter thermischer Belastung ist eine bewährte Methode zur Verifizierung von numerischen Simulationen und zur Bestimmung des thermomechanischen Verhaltens auf Komponenten- und Systemebene. Sowohl für Messungen in der Ebene (in plane) als auch für Profilmessungen (out of plane) stehen zwar ausgefeilte Messmethoden zur Verfügung, die Kombination beider Methoden ist aber aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien schwierig. Die CWM, Fraunhofer ENAS und FRT haben in TRACE eine optische Multisensor-Metrologie-Methodik für präzise 3D-Verformungsanalyse entwickelt und ein Multisensor-Messverfahren entwickelt, das einen chromatischen Sensor für die Topographie- und Verwölbungsanalyse mit einem optischen Sensor für die Verformungs- und Dehnungsfeldanalyse in der Ebene kombiniert. Durch diese Kombination kann für alle drei Komponenten von Verschiebungsvektoren eine Auflösung erreicht werden, die mit einer einzigen Sensorlösung nicht erreichbar ist. Dabei ist der flexible Einsatz für lokale und globale Bereiche von Interesse mit höchster Auflösung in allen Verformungsrichtungen ein großer Vorteil des Systems, wobei eine Auflösung bis hinunter zu einigen Nanometern in vertikal und einem Mikrometer in plane erreicht wird.

Um das gemeinsame System zur 3D-Verformungsmessung in Zusammenarbeit mit CWM, FRT und Fraunhofer bereitzustellen, verfolgte BNT in WP7 den Entwurf und die Realisierung einer Heiz- und Kühlkammer für die thermische Belastung während der in- und out-of-Plane-Verformungsmessung. Diese Messung unter Hinzunahme des Gehäuses oder zumindest Teilen davon ist sehr realistisch, da dann sowohl der Einbauzustand als auch die Belastung (Temperaturbereiche bis 125°C) die tatsächlichen Belastungen sehr gut widerspiegeln. Der Lastzustand eines QFN wird durch die Verformungen bestimmt, wobei sowohl die in-plane als auch die out-of-plane Komponenten berücksichtigt werden. Mit der Vergrößerung der Messfläche in der Temperaturkammer wächst jedoch die Gefahr von Temperaturgradienten insbesondere zwischen Ober- und Unterseite des Messobjekts. In AP 6.3 Thermo-mechanical effects wurden dazu die Folgen von Temperaturgradienten in Heiz-/Kühlapparaturen für große Prüfkörper unter Verwendung von Heizplatten simuliert, um die Versuchsaufbauten der Deformationsmesstechnik im Ausgangszustand hinsichtlich damit verbundener Nachteile zu evaluieren. Inhomogene Temperaturverteilungen, wie sie in der Abbildung dargestellt sind, wurden so visualisiert und quantifiziert:

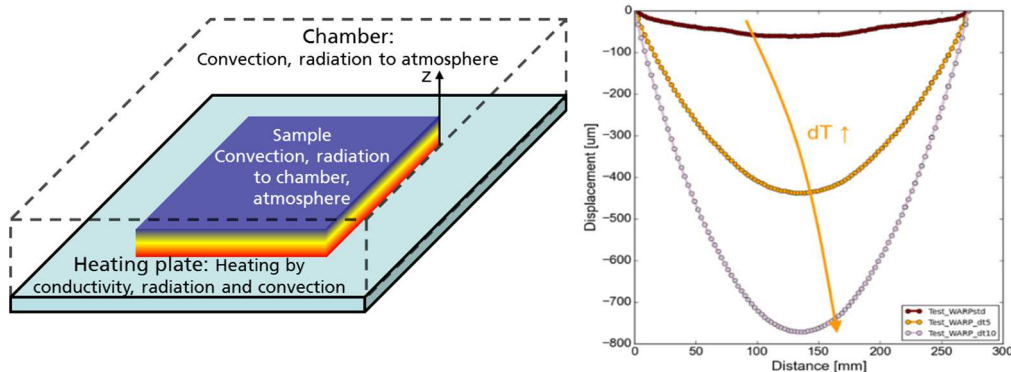


Abbildung 10: Simulation der Auswirkungen von Temperaturgradienten in Heiz-/Kühlkammern für große Prüfkörper

BNT hat Simulationsarbeiten (Abbildung 10) diesbezüglich durchgeführt sowie thermische und Verformungsanalysen zur Bewertung des thermo-mechanischen Verhaltens von Prüfkörpern unter thermischer Last in bestehenden Messeinrichtungen unternommen, mit denen konstruktive Beiträge zur Material- und Interfaceoptimierungen geliefert werden können.

Um den vorhandenen Temperaturgradienten in der ursprünglich verwendeten INSTEC-Kammer des MicroProf-Messsystems von FRT, ENAS und CWM entgegenzuwirken, wurden spezielle Simulationen bezüglich Differenzmessungen durchgeführt. Die out-of-Plane-Verformung verschiedener Aufbauten wurde als die Änderung des Leiterplattenprofils aufgrund der thermischen Einwirkung aus der Differenz zwischen dem Hochtemperaturzustand bei 155 °C und dem Referenzzustand bei 30 °C berechnet. Unterschiede in den Messungen von beiden Seiten zeigten, dass die Beiträge zur Gesamtverbiegung durch strukturelle Anteile aufgrund von CTE-Mismatches und zum anderen durch die inhomogene Temperaturverteilung (z.B. Temperaturgradient über die Dicke) entstehen. Da nur der Strukturteil von Interesse ist, wurde die Trennung des Strukturteils vom Gesamtwarpage nach dem Superpositionsprinzip angewendet (Abbildung 11). Zu diesem Zweck wurden die Messungen von beiden Seiten der Platte unter der Annahme durchgeführt, dass der Anteil aufgrund der thermischen Auswirkungen der Durchbiegung und des entgegengesetzten Verhaltens des Strukturteils in beiden Fällen gleich ist. Der Vergleich mit den FEM-Simulationen unter der Annahme einer homogenen Temperaturverteilung

zeigt schließlich eine wesentlich bessere Übereinstimmung der gemessenen Profile mit den numerischen Ergebnissen.

Mit dem neuen Design der von BNT entwickelten neuen Thermokammer (siehe AP 7.3) mit konvektiver Heizung und -kühlung ist die Temperaturverteilung von vornherein wesentlich besser ausbalanciert, wie das Diagramm zur mit Lüfter forcierten Heizung in Abbildung 12 zeigt.

Die Verformungsmessmethode und die Ergebnisverbesserung wurden in ein TRACE-Verfahren zur Qualifizierung von elektronischen Array-Bauteilen (QFN, BGAs) integriert. Aus früheren Studien ging hervor, dass das QFN-Package, ein in der CE häufig verwendetes Package, am empfindlichsten auf Verformung und CTE-Fehlanpassung der Platine reagiert. Aus diesem Grund wurden dieser Komponententyp und andere Flat-Array-Komponenten (z.B. BGAs) als ein Schwerpunkt im Projekt behandelt. Der Projektpartner Continental hat dedizierte Testplatinen entwickelt, die mit diesen potenziell kritischen Komponenten ausgestattet sind. Diese wurden von Fraunhofer ENAS in der BNT-Heiz- und Kühlkammer (HCC – Heating and cooling chamber)) mit Hilfe einer speziell entwickelten Vorrichtung belastet und diese Belastungen mittels numerischer Simulation nachgebildet.

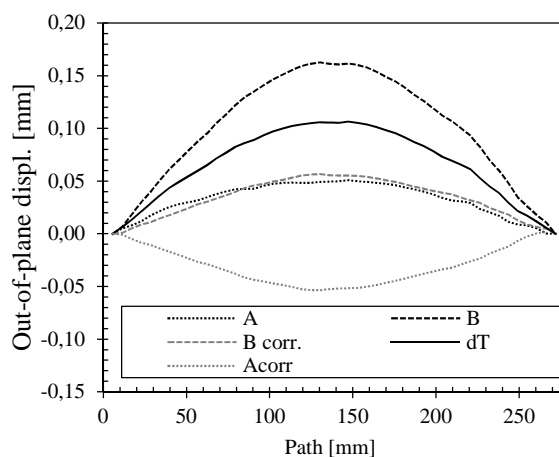


Abbildung 11: Thermische Verwölbung entlang des Pfades mit und ohne Korrektur (Plattenheizung)

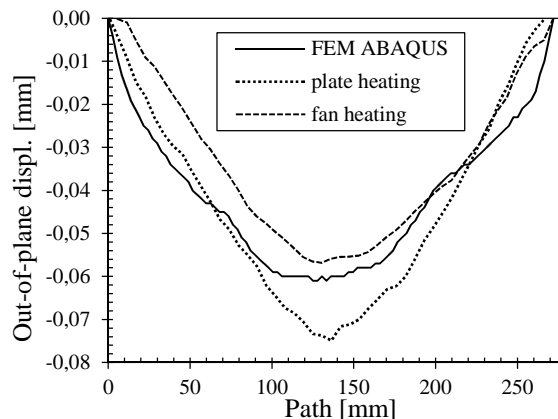


Abbildung 12: Vergleich zwischen experimentellen Ergebnissen (Lüfter- und Plattenheizung) und berechneten Ergebnissen (FEM ABAQUS 21-Lagen-Leiterplatte)

Als wesentliches Ergebnis hat sich gezeigt, dass diese Messmethode prinzipiell sehr gut für die thermomechanische Bewertung auf Komponenten- und Systemebene geeignet ist, wenn mögliche Temperaturgradienten in der Auswertung berücksichtigt werden.

BNT war verantwortlich für die Erforschung und Entwicklung thermografischer Methoden zu (thermischem) Health-Monitoring und Fehlererkennung. Die im AP 6.3 Thermo-mechanical effects durchgeführten Simulationsaktivitäten dazu umfassten thermische und Deformationsanalysen zur Bewertung der thermomechanischen Zuverlässigkeit und AE-Stabilität für 3D-Sensor/ASIC-Packaging mit TSVs.

Die Ausfallanalyse mit IR-Thermografie wurde an Beispielpackages bezüglich möglicher Umgebungseinflüsse betrieben. Als Basis für Array-Modelle für die thermische Simulation wurde eine parametrische Modellierung einzelner TSVs durchgeführt. Ein thermisches Modell der TSV-Konfiguration wurde von BNT erstellt und die Erfassung relevanter thermischer Materialdaten durchgeführt. Neben der Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Si inkl. TSVs wurden an weiteren Charakterisierungsaufgaben einschließlich der Messung von elektrischen und thermischen Widerständen von TSVs, der Detektion von Widerstandsänderungen aufgrund von thermischen Zyklen, Temperaturlagerung und Feuchtigkeit sowie der thermischen Charakterisierung von Moldmassen hinsichtlich ihrer Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur gearbeitet.

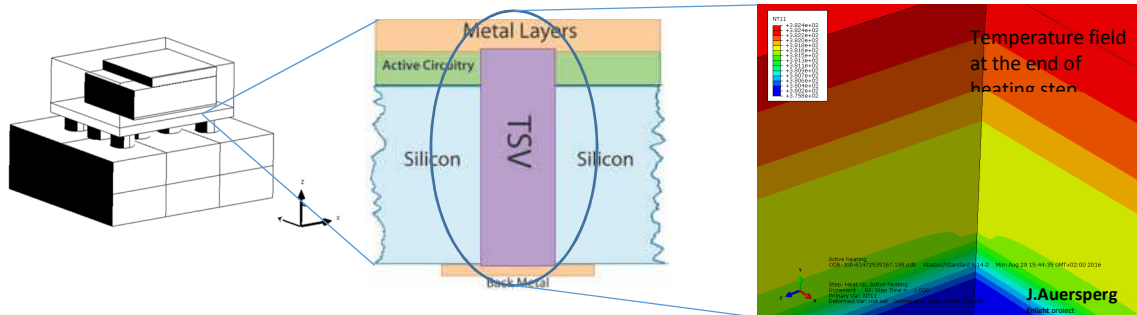


Abbildung 13: Thermische Simulation eines einzelnen TSVs

Die thermische Simulation von TSV in WLP zielte auf die Entwicklung eines geeigneten Konzepts für die Fehleranalyse von TSV mittels IR-Thermografie ab, das von BNT in AP 4 verfolgt wurde. Die generierten Ergebnisse eines simulierten Laserflashes als thermischer Anregung für intakte und, dem gegenüber, beschädigte TSV wurden im Rahmen der engen Zusammenarbeit hinsichtlich der thermomechanischen Stabilität von TSV-Strukturen in WLP unter automobilen Erfordernissen eingebracht.

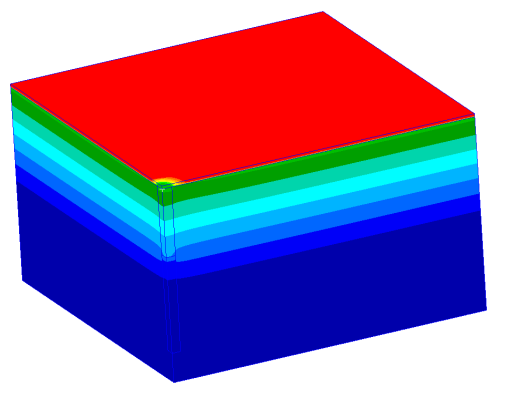


Abbildung 14: Simulation der Temperaturfeldstörung durch unterbrochenes Einzel-TSV

Als wesentliches Ergebnis konnte durch die Simulation dargestellt werden, dass Laserflash als Anregungsmethode für die Lock-in-Thermographie auf Grund der geringen Abmaße der Sensorbausteine nicht anwendbar war und daher auf die induktive Methode re-orientiert werden musste.

Zusammen mit dem Fraunhofer ENAS wurden darüber hinaus Untersuchungen von Grenzflächen in TSV durch Finite-Elemente-Simulation bezüglich der zuverlässigen Nutzung von Via-Technologien in AE-Anwendungsszenarien durchgeführt. Damit wurde das Anwendungsfeld insbesondere auf Mikrosysteme erweitert, die direkt mit Logik-Chips verbundene Sensoren enthalten und eine direkte Datenverarbeitung ermöglichen. Diese häufig in CE eingesetzten MEMS/ASIC-Produkte wurden für den Transfer identifiziert und diesbezügliche kritische thermomechanische Zuverlässigkeitsfragen untersucht. Im Gegensatz zu den ursprünglich modellierten Stacks mit organischen Zwischenschichten verwenden diese Mikrosysteme keine Standard-TSV-Durchmesser und unterscheiden sich in der Schichtgeometrie insbesondere durch Verwendung von Oxid/Nitrid-Schichten zur Isolierung und dünne metallische Schichten für die Umverdrahtungen. An verschiedenen Designvarianten von Interfaces wurden thermomechanische Finite-Elemente-Analysen durchgeführt, um den Einfluss von Designmodifikationen auf die Beanspruchung und Zuverlässigkeit der TSV-Strukturen zu ermitteln. Die definierten und entwickelten Simulationsmethoden und experimentellen Techniken wurden erfolgreich implementiert.

Ebenfalls in AP4 wurde ein Sensorsystem zur Überwachung von Deformationen, Spannungen und Schädigungen auf Basis von Einzelchip-Stresssensoren zur Einbettung in Polymerstrukturen und/oder Klebeflächen entwickelt, das in der Lage ist, Fertigungs- und Betriebsspannungen sowie Abweichungen vom regulären Spannungsverlauf zu ermitteln. Die in polymere Strukturen eingebettete Sensormatrix erwies sich als sehr empfindlich für die Bestimmung von in-plane- und Scherspannungen während der in-situ-Messungen. Für den Vergleich zwischen beiden wurden mehrere numerische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Vorhersagegenauigkeit und das Ausmaß des Einflusses des Prozesses auf die SMCs zu überprüfen. Folglich wurden die induzierten Spannungen, die durch den Montageprozess bei der Verkapselung hervorgerufen werden, verglichen:

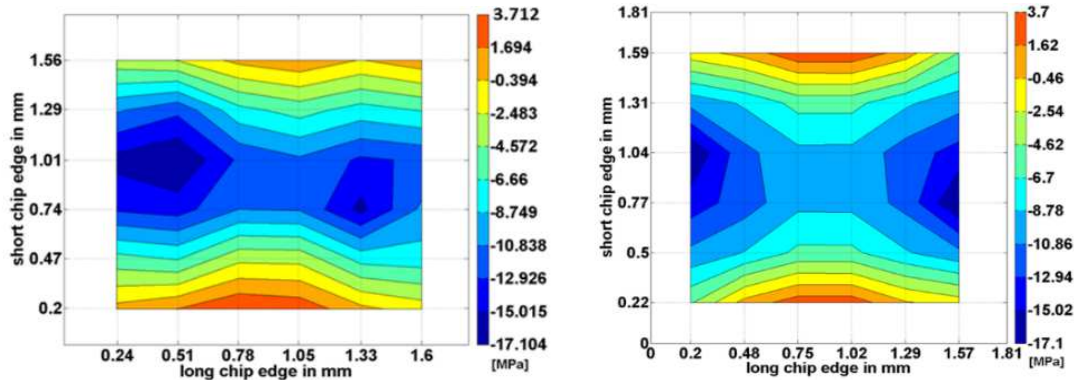


Abbildung 15: Simulierte und gemessene Spannungsverteilungen beim Packaging von SMCs

Wesentliches Ergebnis der Forschung in AP6 war die Untersuchung, Festlegung und Implementierung verschiedener Methoden zur Simulation und zum Entwurf von Sensorkomponenten. Das Vorgehen wurde dabei durch wiederholte Messungen der Sensoren bei den Partnern überprüft. Darüber hinaus wurden in Zusammenarbeit mit anderen APs Fehlermechanismen identifiziert und in einem White Paper festgehalten. Damit ist es möglich, die Simulationsmethoden und Messungen für weitere Projekte an die ermittelten Fehlermechanismen anzupassen. Darüber hinaus wurden neu etablierte Kollaborationen konsolidiert, um weiterhin gemeinsam Fortschritte auf dem Gebiet der Verbindung von Simulation und Experiment zu erreichen.

Im Rahmen der Fokusgruppe "3D-Integration" (RB mit FHG ENAS, CWM und BNT) wurde eine vielversprechende Verbindungstechnologie, die bereits in Sensorikkomponenten für den Konsumbereich, aber noch nicht in Automobilkomponenten existiert, untersucht. Bei dieser ASIC-TSV-Struktur ist aufgrund der CTE-Fehlanpassung der in der TSV-Struktur verwendeten Materialien und der umgebenden Strukturen die Grenzflächenablösung unter thermo-mechanischer Belastung eine entscheidende Herausforderung für die Zuverlässigkeit. Die durchgeführte Parameterstudie mittels thermo-mechanischer Simulationen erlaubte es, ein tieferes Verständnis der Degradationsmechanismen unter automobilen Umgebungsbedingungen zu erlangen.

### 2.1.3 AP 7 Test and Validation

In AP 7.3 gelang BNT die Anpassung und Entwicklung spezieller Testgeräte und die Durchführung von Tests zur Unterstützung der Charakterisierung und der Degradations-/Fehleranalyse.

Die Anpassung spezieller Geräte für thermische Tests wurde durch die Erweiterung der Charakterisierungsmöglichkeiten thermischer Materialparameter auf die Bestimmung der Eigenschaften dünner Schichten mit der Inbetriebnahme der LATIMA-Testanlage bei BNT verwirklicht. Zusätzlich ermöglicht das LaTima-System die Charakterisierung von hoch wärmeleitenden Materialien (Abbildung 16).

Im Rahmen der TRACE-Methodik konzentrierten sich die Arbeiten im AP 7.3 Concepts for improved and/or increased validation coverage zum einen auf die Anpassung und Qualifizierung bestehender Messverfahren zur Analyse des thermo-mechanischen Verhaltens von Materialien/Materialkombinationen, Komponenten und Aufbauten für die TRACE-Qualifizierung und zum anderen auf die Erforschung und Bereitstellung neuartiger Kombinationen von Messverfahren zu diesem Zweck. Dies ging einher mit umfangreichen 3D-Simulations- und Modellierungsarbeiten in AP 6, um die experimentellen Ergebnisse der thermomechanischen Zustandsüberwachung und der Fehlererkennungsmethoden zu untermauern. Insbesondere wurde eine Messmethodik zur vollständigen 3D-Charakterisierung von thermomechanischen Belastungsvorgängen und Ausfallrisiken entwickelt, die durch Sensorfusion die Zusammenhänge zwischen globaler Beanspruchung auf Baugruppenebene und lokalen Auswirkun-

gen auf das Bauteil und die Werkstoffverbindung umfasst. Zur Entwicklung dieser Methodik wurde innerhalb des Projektes eine Arbeitsgruppe "Systemeffekte - Methodikentwicklung Verformungsmessung mittels Multisensormesstechnik" zusammen mit Fraunhofer ENAS, der FRT GmbH und der Robert Bosch GmbH eingerichtet. BNT war darin verantwortlich für die Bereitstellung von Design-Input für Heiz- und Kühllösungen und deren Optimierung.

I

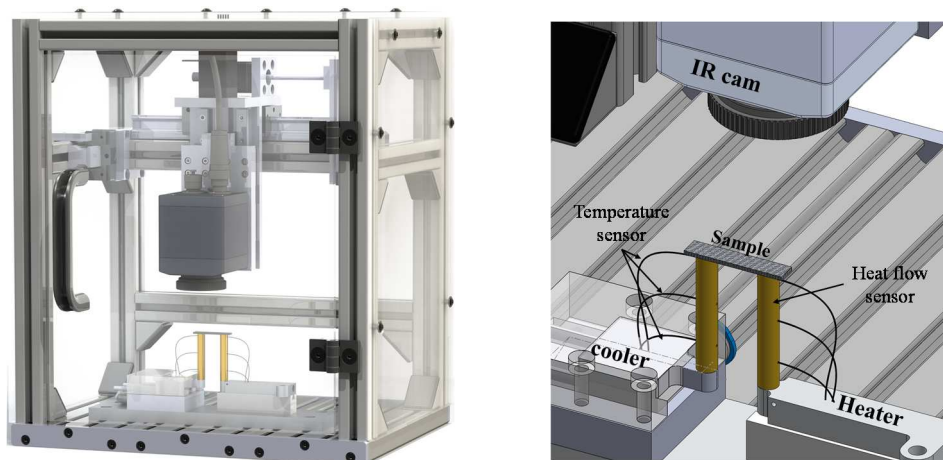


Abbildung 16: LaTima\_System für die thermische Charakterisierung dünner Schichten und von hoch wärmeleitenden Materialien

Der Beitrag von BNT zur Validierung betraf vor allem die Bereitstellung eines Systems zur 3D-Verformungsmessung in Zusammenarbeit mit CWM, FRT und Fraunhofer. In diesem Zusammenhang verfolgte BNT die Entwicklung und Realisierung einer Heiz- und Kühlkammer zur Messung der in- und out-of-Plane-Verformung. Durch die neue Ausrüstung wurden einige Nachteile aktueller Versuchsaufbauten wie z.B. eine inhomogene Temperaturverteilung bei Verwendung von Heizplatten, Gefrieren der Oberflächen beim Kühlen mit Stickstoffgas und niedrige Heiz-/Kühlraten von 1K/min behoben. Die zu langsame Temperaturänderung sollte überwunden werden, um die Temperaturbereiche für AE-Untersuchungen bei akzeptablen Scanzeiten bewältigen zu können. Im Rahmen einer Kooperation mit FhG ENAS wurden in AP 6 die CWM- und FRT-Folgen von Temperaturgradienten in Heiz-/Kühlanlagen für große Prüfkörper wie komplette PCBs simuliert. So wurde ein Verfahren vorgeschlagen, um den Einfluss der Temperaturgradienten in der INSTEC-Anlage zumindest abzuschwächen.

Aus verschiedenen vorgeschlagen Konstruktionen der Kammer zur Erzeugung einer homogene Luftverteilung innerhalb der Kammer wurde das endgültige Design für den zu fertigenden Prototyp abgeleitet (Abbildung 17):

MicroProf 300 (FRT/CWM)

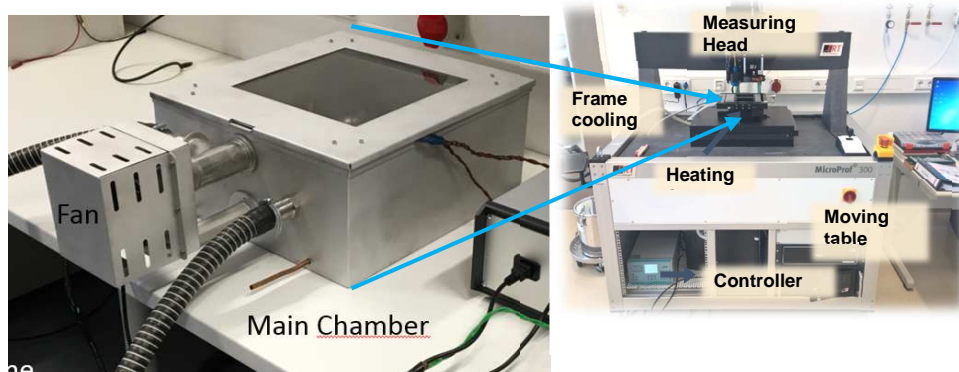


Abbildung 17: Hauptkammer der BNT Heiz-/Kühlkammer

Alle mechanischen und elektronischen Komponenten des Systems - Leistungsbaulemente zur Steuerung der Leistung von Heizspulen und Lüfter, Relaisplatine zur Steuerung der Ventile, analoge und digitale I/O-Geräte, Temperaturmessmodul - wurden erworben und montiert, um die Bereitschaft für

Funktionstests herzustellen. Für die erforderliche Heiz-/Kühlleistung wurde ein mineralisolierter Mantelheizleiter als einstellbare Heizquelle gewählt. Das Problem, das Kühlmittel hohen Temperaturen auszusetzen, wurde von einer extern angeschlossenen Kompressionskältemaschine als Kühlquelle umgangen. Die Kammer beinhaltet nun ein Rohr für einen geschlossenen Luftstrom und die Zwangskonvektion wird durch einen Lüfter erzeugt (Abbildung 18). Durch den turbulenten Strom ermöglicht eine verbesserte Wärmeübertragung beschleunigte Temperaturänderungen der Probe.

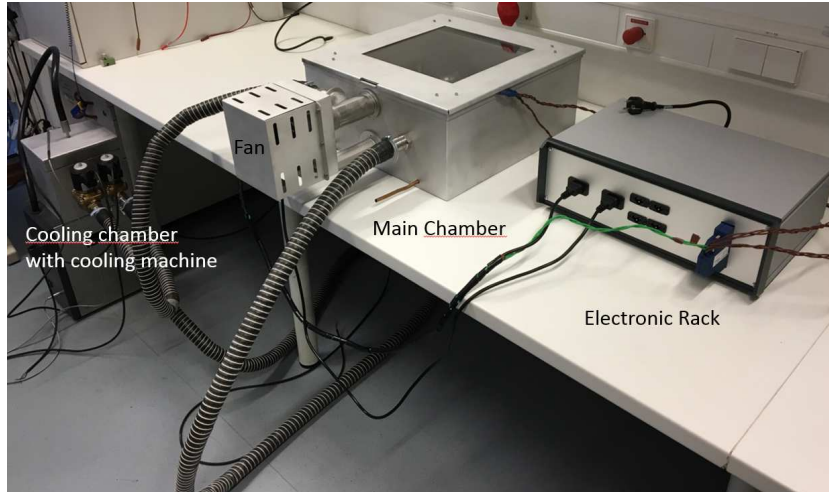


Abbildung 18: Heiz-/Kühlkammer bereit für Funktionstests

Im Zuge der Inbetriebnahme des Systems wurde eine eigene Software zur Temperaturregelung inklusive der Benutzeroberfläche erstellt. In den ersten Tests zum Heizen und Kühlen ergaben sich einige Herausforderungen, da der Verlust an Wärmeenergie größer als erwartet war, da Lüfterrohre und Glasabdeckung wie Kühlkörper wirken. Die Aufheizrate war nicht zufriedenstellend und erforderte eine bessere Isolierung von Rohren und Deckel sowie eine bessere Abdichtung der Abdeckung und Ausrichtung der Durchströmung. Daher wurde eine Optimierung an den Rohren durchgeführt, die jetzt mit einer Isolierung ummantelt sind, die den Wärmeverlust während der Luftzirkulation reduziert. Zusätzlich wurde das Gehäuse durch einen abgedichteten und hochtemperaturbeständigen, silikonisierten Deckel sowie einen Luftspalt als Wärmedämmung verstärkt. Im Inneren tragen Bleche, die als Leitbleche verwendet werden, dazu bei, dass nur geringe Strömungsstörungen auftreten und eine turbulente Strömung entsteht.

Weitere Ergebnisse der Messungen der Lufttemperatur in der Nähe der Probe aus Tests mit auf 260°C erwärmten Proben konnten Gesamterwärmungsraten von 7,22 K/min bei einem durchschnittlichen  $\Delta T$  von 1,82 K und maximalem  $\Delta T$  von 3,3 K ergeben. Das IR-Bild zeigt eine homogene Temperaturverteilung innerhalb der Probe bei Erwärmung auf  $T = 160^\circ\text{C}$ .

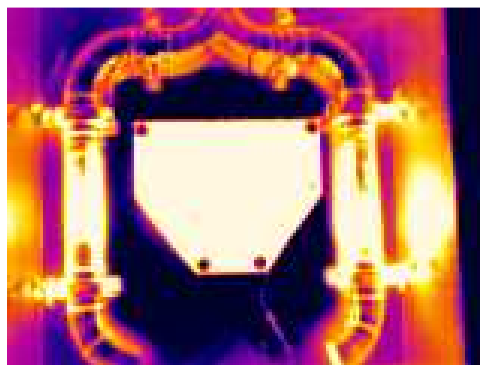


Abbildung 19: Homogene Temperaturverteilung innerhalb der Probe beim Erwärmen auf  $T = 160^\circ\text{C}$

Die Herausforderungen bei der Kühlung waren noch größer. Ein erster Kühlbetrieb mit Umgebungsluft ergab eine Gesamtkühlrate von 1,36 K/min, was viel zu niedrig ist. Die Luft wurde nicht gut in die Kammer transportiert und der Strömungswiderstand war durch lange Wege und engen Querschnitt immer noch zu groß. Die Kühlschlange in der Kühlkammer war überlastet und froh beim Abkühlen feuchter Luft ein. Daher musste der Lüfter unterstützt werden, d. h. es wurden mehr Ventilatoren benötigt, um den gesamten Strömungswiderstand zu senken. Das Kühlsystem musste rekonstruiert werden, wobei die Kühlschlange in frostgeschützter Flüssigkeit platziert und die Luft durch einen Wärmetauscher angesaugt wurde.

Das neue Design hat letztlich homogene Temperaturänderungen innerhalb der geplanten Heiz-/Kühlkammer im Bereich von - 40°C bis 250°C erreicht und die Temperaturänderung des Prüfkörpers durch turbulente Strömung von Heiß-/Kaltluft und eine erzwungene Wärmekonvektion auf dem Prüfkörper auf bis zu 5K/min beschleunigt. Für die Erwärmung konnte eine relativ homogene Lufttemperatur in der Nähe der Probe innerhalb kleiner Toleranzen erreicht werden. Der Kühlprozess muss jedoch noch durch den Einsatz zusätzlicher Lüfter zur Verringerung des Strömungswiderstands und den Bau eines Wärmetauschers innerhalb der mit frostsicherer Flüssigkeit gefüllten Kühlkammer weiter optimiert werden, um ein frühzeitiges Einfrieren der Kühlschlange zu verhindern. Darüber hinaus benötigt das Innere der Hauptkammer ein zusätzliches Gehäuse, das als zusätzliche Isolierung dient. Die Probe kann dann auf unterschiedliche Höhen (je nach Probe) gestellt werden, das Luftvolumen wird kleiner und die Luftverteilung verbessert.

Nach dem Absolvieren der ersten Betriebstests wurde die Kammer in das out-of-Plane-Messsystem von ENAS, CWM und FRT integriert. In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus AP 6 und 7.1. und auf Basis von Vereinbarungen mit den Projektpartnern hat sich die weitere Arbeit unter Leitung des Partners FHG auf die Entwicklung neuer Zuverlässigkeitsprüfschemata konzentriert, bei denen mehrere Lasten gleichzeitig aufgebracht werden, um die realen Betriebsbedingungen besser abzudecken und die Testeffizienz zu erhöhen. Die kombinierten Zuverlässigkeitstests basierten auf einem häufig angewandten automobilen Szenario, das für Steuergeräte zum Schutz vor Umwelteinflüssen und aus Gründen der Wärmeabfuhr benötigt wird: in einem Gehäuse aus Aluminiumlegierung montierte Elektronikplatinen. Den Ausfallrisiken auf Komponenten- und Halbleiterebene auf Systemebene wurde durch die Entwicklung einer optischen Messtechnik begegnet, die es erlaubt, kritische Belastungen in der Praxis zu ermitteln. Die Entwicklung war eine gemeinsame Anstrengung der Partner FhG ENAS, FRT, CWM und BNT aus der Geräte- und Methodenperspektive und mit CON, RB, NXPERIA auf der Anwenderseite.

Wie bereits im Bericht D6.3 beschrieben sind die Auswirkungen der montageinduzierten in-plane und out-of-plane (Warpage) Belastungen jedoch für jede Komponente unterschiedlich, einige davon sind sehr empfindlich, andere sehr unempfindlich. Um die Auswirkungen der Montage zu untersuchen, wurden neue Testaufbauten bei ENAS zunächst virtuell entworfen. Eine Vier-Punkt-Biegebelastungsstufe mit Befestigungspunkten für acht oder vier Schrauben ergab sich aus verschiedenen Simulationen. Gemeinsame Aufgabe war es anschließend, die Simulationen des FhG ENAS experimentell zu verifizieren. Dazu wurden die Testplatinen in verschiedenen Einspannbedingungen einer Temperaturbelastung gemäß Abbildung 20 in der BNT-Heiz- und Kühlkammer ausgesetzt:

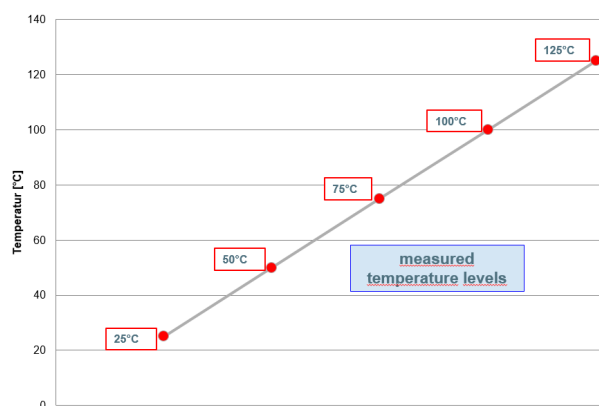


Abbildung 20: Temperaturprofil für die in-plane-Messungen

Das neue Testequipment wurde bei Messung angelehnt an das Regime bei thermischen Zyklustests verwendet, um das durch niederzyklische Ermüdung bedingte Verschleißversagen, insbesondere von Lötverbindungen, zu bestimmen. Für die Tests, die auf die Entwicklung der Methodik abzielten, wur-



den gemäß 4.3 "Systems in QFN-Package" (MEMS+ASIC) in verschiedenen Größen für die Übertragung von CE auf AE ausgewählt. Die Simulationsergebnisse wurden in D6.3 und D6.4 berichtet, Messungen und erste T-Zyklus-Ergebnisse in D7.3.

Zusätzlich wurden Montageeffekte auf Ebene der im Rahmen der Fokusgruppe "Lötermüdung" zusammen mit vielen Projektpartnern, speziell CON und RB, entworfenen Testplatinen untersucht. Partner CON führte das elektrische Design der Testplatine durch und produzierte Testplatinen nach Serienstandards. RB lieferte kritische Systeme vom Typ CE (Sensor/ASIC) in QFN-Packages.

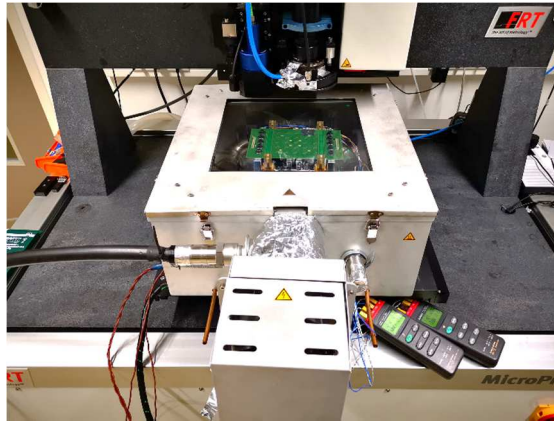


Abbildung 21: BNT-HCC im Messsystem für die in-plane-Messungen

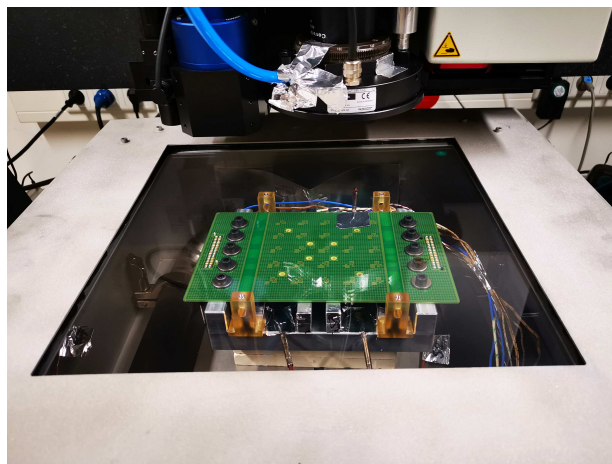


Abbildung 22: Testboard für QFN-Packages on board unter thermischer Belastung in der BNT-HCC

Als wesentliches Ergebnis wurde ein Prototyp der ersten Generation für die Heiz- und Kühlkammer bereitgestellt, mit dem an Testboards für die Lotermüdung an QFN-Packages die thermische Belastung realisiert werden und der eingestellte Temperaturverlauf durch die Kammer reproduziert werden konnte:

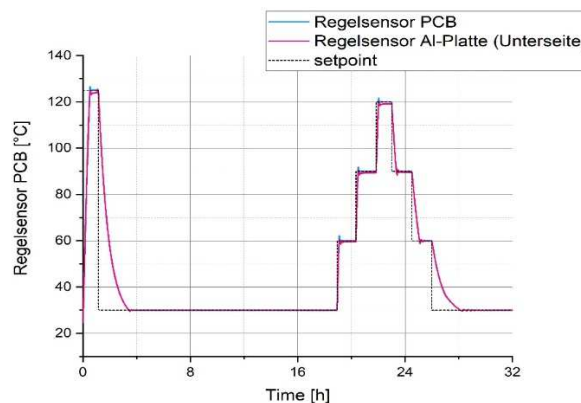


Abbildung 23: Regelsensorik versus Setpoint in der Heiz- und Kühlkammer

Aufbau	Heizplatte	Heizplatte + Heißluftfön	Konvektion
Wärmepfad			
Merkmal	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <u>Wärmegradient <math>\Delta T</math> über Höhe = 50%</u></li> <li>■ <u>Wärmegradient verursacht gezwungenes Verformungsverhalten</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Experiment <math>\neq</math> Simulation</li> </ul> </li> <li>■ <u>Probengröße limitiert durch Kammergröße</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <u>Wärmegradient wird durch Probe verursacht (Strömungsbeeinflussung)</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Experiment <math>\neq</math> Simulation</li> </ul> </li> <li>■ <u>Durch die Vergrößerung des Kammervolumens sind externe Wärmequellen erforderlich</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <u>Wärmegradient <math>\Delta T</math> über Höhe = 1%</u></li> <li>■ <u>Kein Wärmegradient</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Experiment = Simulation</li> </ul> </li> <li>■ <u>Großes Probenspektrum möglich</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ SMD, PCB, Wafer, Baugruppen</li> </ul> </li> </ul>

Abbildung 24: Vergleich der ursprünglichen thermischen Belastungsvorrichtungen mit der Heiz- und Kühlkammer der BNT

Abbildung 24 fasst die wesentlichen Charakteristika der ursprünglichen thermischen Belastungsvorrichtungen und der Heiz- und Kühlkammer der BNT zusammen. Mit der konvektiven Heizung/Kühlung wurden sehr homogene Temperaturfelder in der Kammer bei deutlich erhöhten Temperaturänderungsraten erreicht.

## 2.2 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Auf der Grundlage der Messungen und Simulationen zum Deformationsverhalten von Baugruppen in automobilen Steuergeräten konnte eine allgemeine Methodik vorgeschlagen werden, um die Auswirkungen des Systems auf die Zuverlässigkeit der Komponenten zu berücksichtigen. Sie umfasst Wechselwirkungen von Verformungsmessungen von der Komponenten- bis zur Systemebene zur Verifizierung und Anpassung von Simulationen, die ihrerseits durch thermische Ermüdungstests verifiziert werden können. TRACE führte mit der Verknüpfung von Messungen und Tests letztlich zur Entwicklung einer kombinierten experimentellen und simulationsbasierten Methodik für die Bewertung der induzierten Belastung inklusive der Realisierung eines Demonstrators.

Durch die in TRACE erweiterte Methodenkompetenz sowie die installierten Kooperationen der BNT mit den o.g. Partnern gewährleistet, dass die Projektergebnisse innerhalb eines Zeitraums von 2-3 Jahren nach Abschluss von TRACE in das Portfolio von Dienstleistungen und Gerätesystemen von BNT einfließen. Ziel war und ist, sich mit neuer Expertise aus dem Projekt heraus zu einem Full-Scale-Engineering-Provider im Thermischen Management zu entwickeln. Die im Projekt entwickelten und in Laborprüfständen implementierten innovativen Methoden sollen nicht nur in Form von Dienstleistungen verwendet, sondern auch zu kommerziell anbietbaren Prüfeinrichtungen weiterentwickelt werden. Die Zusammenarbeit mit den am Vorhaben beteiligten KMU und Forschungseinrichtungen bei der Untersuchung von Multi-Domain-Wechselwirkungen und thermischer Belastungstechnik hinsichtlich einer „gegenseitigen“ modularen Erweiterung der jeweiligen Mess- und Prüfeinrichtungen wird dazu über das Projekt hinaus fortgeführt. Auf dem Gebiet der 3D-Deformationsmessung ist es gegenüber herkömmlichen Geräten bereits gelungen, in der thermischen Belastungsvorrichtung von BNT deutlich höhere Heizraten bei verbesserter Homogenität der Temperaturverteilung insbesondere

bei großen Proben zu erreichen. Die weltweit aufgestellten Vertriebsorganisationen der Industriepartner im Projekt ermöglichen dabei die Vermarktung entsprechender Produkte im globalen Maßstab. BNT wird dann den Projektpartnern für eine weitere Zusammenarbeit, nun auf wirtschaftlicher Basis, zur Verfügung stehen. Die in TRACE unter Mitwirkung der BNT erarbeiteten Messmethoden zur thermomechanischen Zuverlässigkeitsbewertung werden bei den Projektpartnern dringend gebraucht und schrittweise einer Kommerzialisierung zugeführt.

Bezüglich der FE-Methodik wird trotz neuer Herausforderungen von einer weitgehenden Anwendbarkeit für die Evaluierung thermischer und thermomechanischer Faktoren ausgegangen. Durch einen intensiven Austausch mit den Technologieträgern im Projekt wurden technische Machbarkeit und Variationsmöglichkeiten schnellstmöglich als Basis für die Modellbildung geklärt und parametrisiert. Somit ist basierend auf den Erfahrungen aus dem Projekt einzuschätzen, dass eine enge Kombination der im Projekt durchgeführten Simulationen mit den bei BNT etablierten experimentellen Techniken eine erfolgreiche Fortführung einschlägiger Untersuchungen erwarten lässt. Die im Projekt entstandenen und fortgeführten Kooperationen zu den Industrie- und Forschungspartnern gestatten darüber hinaus eine bedarfsgerechte Weiterentwicklung der von BNT hergestellten Messeinrichtungen und deren Abstimmung auf die Anforderungen der vollständigen Wertschöpfungskette der Automobilbranche.

BNT konzentriert sich auf die thermische Charakterisierung und Optimierung auf Material-, Komponenten- und Systemebene und wird die Projektergebnisse vor allem in zwei wesentlichen Punkten nutzen und weiterführen:

- a) BNT zielt darauf ab, sich zu einem Full-Scale-Engineering-Provider im Thermischen Management zu entwickeln. Neue Expertise wurde dazu aus dem Projekt heraus bei der Untersuchung von Multi-Domain-Wechselwirkungen hinsichtlich der Thermik und bei der transienten thermischen Charakterisierung und Modellierung gewonnen.
- b) Spezielle innovative Methoden zur thermischen Charakterisierung, die im Projekt entwickelt und im Labormaßstab in Prüfständen implementiert wurden, sollen nicht nur in Form von Dienstleistungen verwertet, sondern auch zu kommerziell anbietbaren Prüfeinrichtungen weiterentwickelt werden.

Die entwickelten Methoden lassen sich auch für verwandte Gebiete mit hohen Umweltbelastungen, z.B. im Bereich des Elektroenergiemanagements, der Windkraft oder der Lichttechnik anwenden, wo sich aufgrund der ständig steigenden Anforderungen an die Kosteneffizienz sehr ähnliche Anforderungen wie im Automobilbereich stellen. Eine direkte Verwertung ergibt sich durch die Möglichkeit, die Methodik einer simulationsbasierten Bewertung sowie die Wichtung hinsichtlich einzelner Einflüsse, z.B. einer kombinierten thermischen und mechanischen Belastung, zur Entwicklung neuer Generationen von Produkten analog zu den Projektdemonstratoren zu nutzen.

### 3 Bekannt gewordene F&E-Ergebnisse Dritter

Im Projektverlauf sind keine relevanten F&E-Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die in die Projektarbeiten hätten einfließen müssen oder eine Adaption der Zielsetzungen erfordert hätten.

### 4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Vortrag auf Vortragsveranstaltung und Beitrag zu Publikation des TRACE-Projekts

- EDA Workshop Dresden (BNT als Beitragender)
- White paper des TRACE-Projekts (BNT als Beitragender)

Vorträge auf Workshops (ohne Abdruck)

Mohamad Abo Ras	New measurement and characterization equipment for thermal and thermo-mechanical effects	Chemnitzer Seminar "Zuverlässigkeit und funktionale Sicherheit"	Chemnitz, 14.11.2018
-----------------	--	---	----------------------

Mohamad Abo Ras	Innovative test stands for thermal characterization at material and package levels	7th EuWoRel Workshop	Berlin, 01.10.2018
Mohamad Abo Ras	Messtechnik für thermische Charakterisierung auf Material-, Komponenten- und Package-Ebene	63. Treffen des AK Systemzuverlässigkeit von AVT	Nürnberg, 04.06.2018

Es wurden im Berichtszeitraum keine Erfindungen gemacht und Schutzrechte weder angemeldet noch erteilt.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Thermische Charakterisierung, Bewertung und Optimierung als Teil eines neuen Übertragungs- und Qualifizierungsprozesses in der Automobilelektronik.	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kaufersch, Eberhard	5. Abschlussdatum des Vorhabens 10.10.2019
	6. Veröffentlichungsdatum -
	7. Form der Publikation Report
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Berliner Nanotest und Design GmbH Volmerstr. 9B, 12489 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16ES0489
	11. Seitenzahl 20
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 4
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 24
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) VDI/VDE IT	
18. Kurzfassung Ziel des Projektvorhabens TRACE war es, eine allgemein gültige Methode auf Basis von Prototypen und Demonstratoren zu entwickeln und zu validieren, die der deutschen Automobil- und Automatisierungsindustrie als Leitfaden für die Qualifikation von CE-Komponenten und darauf aufbauenden Systemen dient. Die Methode dient dazu, Modifikationen, Anpassungen und Qualifikationsanforderungen zu identifizieren, die erforderlich sind, um den sicheren und zuverlässigen Einsatz von CE-Komponenten, CE Technologien und den daraus resultierenden integrierten Systemen in teilweise sicherheits-kritischen Anwendungen zu ermöglichen. Um neue Funktionen, welche mit Hilfe von ursprünglich für CE-Anwendungen entwickelten Komponenten realisiert wurden, auch validieren zu können, wurden geeignete Verifikations- und Validierungsprozesse über alle Produktebenen hinweg von der Komponentenentwicklung bis hin zur finalen Freigabe entwickelt. Dazu gehörten neue und validierte Hilfsmittel zur Modellbildung und Simulation, mit deren Hilfe sich dann mögliche Schwachstellen der CE-Technologien und Komponenten in ihrer neuen, harscheren Umgebung und die Effektivität von geplanten Maßnahmen zur Schwachstellenbeseitigung vorhersagen lassen. BNT stellte applikationsäquivalente Testbedingungen bereit und führte thermische Untersuchungen an 3D-Sensorstacks mit TSV sowohl experimentell als auch mittels FE-Simulation durch. BNT führte weiterhin Anpassungen und Qualifizierung ihrer bestehenden Messverfahren zur Analyse des thermo-mechanischen Verhaltens von Materialien und Materialkombinationen und Aufbauten für die TRACE-Qualifizierung durch. In Kooperation mit CWM, ENAS und FRT hat BNT in TRACE eine optische Multisensor-Metrologie-Methodik für präzise 3D-Verformungsanalyse entwickelt. In diesem Messsystem entwickelte BNT eine thermische Belastungstechnik, mit der unerwünschte lokale Temperaturdifferenzen weitgehend vermieden werden konnten. Für herkömmliche Belastungstechnik konnten diesbezüglich simulativ unterstützte Verfahren vorgeschlagen werden. Als wesentliches Ergebnis wurde ein Prototyp für eine Heiz- und Kühlkammer hergestellt, mit dem eingestellte Temperaturverläufe gut reproduziert werden können.	
19. Schlagwörter Automobilelektronik, Sensor-Stack, Package-Upgrade, Zuverlässigkeit, thermische Analyse, FE-Simulation, thermische Belastungstechnik, IR-Inspektion	
20. Verlag -	21. Preis -

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title Thermal characterization, evaluation and optimization as part of a new transfer and qualification process in automotive electronics.	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kaulfersch, Eberhard	5. end of project 10.10.2019
	6. publication date -
	7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no.
	10. reference no. 16ES0489
	11. no. of pages 20
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 4
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 24
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) VDI/VDE IT	
18. abstract The aim of the TRACE project was to develop and validate a generally applicable method based on prototypes and demonstrators, which serves the German automotive and automation industry as a guideline for the qualification of CE components and systems based on them. The method serves to identify modifications, adaptations and qualification requirements that are necessary to enable the safe and reliable use of CE components, CE technologies and the resulting integrated systems in partially safety-critical applications. In order to be able to validate new functions, which were realized with the help of components originally developed for CE applications, suitable verification and validation processes were established across all product levels from component development to final release. These included new and validated tools for modelling and simulation, which could then be used to predict possible weaknesses of CE technologies and components in their new, harsher environment and the effectiveness of planned measures to eliminate weaknesses. BNT provided application equivalent test conditions and performed thermal investigations on 3D sensor stacks with TSV both experimentally and by means of FE simulation. BNT also carried out adaptations and qualification of its existing measurement procedures for the analysis of the thermo-mechanical behaviour of materials and material combinations and structures for TRACE qualification. In cooperation with CWM, ENAS, and FRT, BNT has developed an optical multi-sensor metrology methodology for precise 3D deformation analysis in TRACE. In this measurement system BNT provided the thermal loading stage, whereby undesirable local temperature differences could be compensated to a large extent. For conventional thermal loading technology, simulative supported methods could be proposed. The main result was a prototype for the heating and cooling chamber, with which set temperature curves could be well reproduced.	
19. keywords Automotive electronics, sensor stack, package upgrade, reliability, thermal analysis, FE-simulation, thermal stress engineering, IR-inspection	
20. publisher -	21. price -