



# Abschlussbericht

(Muster nach NKBF 98, Anlage 1)

**Zuwendungsempfänger (ZE):**  
Robert Bosch GmbH

**Förderkennzeichen:**  
16ES0832K

**Vorhabenbezeichnung:**

Selbsttestende Elektroniksysteme für raue Betriebsbedingungen -SmartSTAR-;  
Teilvorhaben: Innovatives smart ASIC-Konzept und Methodik zur in-situ  
Zustandsüberwachung von Steuergeräten für autonomes Fahren

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.09.2018 – 31.08.2021  
(kostenneutral Projektverlängerung bis 31.12.2021 beantragt)

**Berichtszeitraum:**

01.09.2018-31.12.2021



## 1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.

Das Ziel des Vorhabens 'smartSTAR' besteht im Schaffen und ersten Erproben eines umfassenden **Systems zum prognostischen Zustandsmanagements** (Prognostic Health Management, PHM) für elektronische Komponenten und Systeme, mit dem die neuen umwälzenden Konzepte wie das automatische Fahren die Testphase verlassen und zu realen Produkten werden können. Durch massiv verbesserte Sensor- und Integrationstechnologien, kognitive Fähigkeiten zum selbständigen Prüfen, Diagnostizieren und Entscheiden sowie durch das Beherrschen der dazu nötigen Systemkomplexität sollen die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und funktionale Sicherheit der wichtigsten Elektroniksysteme, beispielsweise die Servolenkung (Power Steering), so weit erhöht werden, dass damit automatisierte Fahrzeuge betrieben werden können. Und das, auch wenn darin das Überwachen der Fahrfunktion durch einen Fahrer und somit auch das frühzeitige Erkennen eventueller Abweichungen wegfällt. Die 'smartSTAR' PHM-Methodik soll das kontinuierliche Bewerten des Zustands der Elektronik übernehmen und falls nötig alle erforderlichen Maßnahmen auslösen, die deren ausfallfreie Funktion sichern. Dabei soll sie in Zukunft sogar den Bedarf an teurer Systemredundanz und häufigen externen Diagnosen senken.

Das Projekt 'smartSTAR' ist in Abb. 1 visualisiert. Es gliedert sich in folgende drei Säulen:

- 1) **Sensor-Miniaturisierung:** Schaffung einer neuen Sensortechnologie auf Basis von Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon-Nano-Tubes, CNT). Damit werden Nanomesszellen für mechanische Spannung und Dehnung aufgebaut und in regulären funktionalen Schaltkreisen, z.B. ASICs, implementiert. Zusammen mit anderen intelligenten Sensoren in SiP (SiP ... System-in-Package) und den speziellen Versagensdetektoren, den sog. Canary-Elementen, können mit den CNT-Sensoren bereits dann wesentliche Hauptausfallursachen, wie z.B. Delaminationen und Brüche innerhalb der Bauelemente, in den Anschlüssen und in Klebverbindungen sicherheitsrelevanter Schaltgeräte in-situ und in Echtzeit kontinuierlich überwacht werden.
- 2) **Integration:** Entwicklung der benötigten Integrationstechnologien und Methoden zur in-situ Diagnose und Prognose des Funktionszustandes. Dazu sind intelligente Sensoren auch auf und in den Verdrahtungsträgern zu integrieren sowie neue Frühwarnstrategien (z.B. auf Basis der Canary-Elemente) zu erforschen.
- 3) **Selbstdiagnose / PHM-System:** Basierend auf den neu geschaffenen Sensoren und Detektoren wird eine umfassende PHM-Technologie entwickelt und ihre Funktionalität unter realen Betriebsbedingungen gezeigt. Mit diesen Hardware-Verbesserungen werden die Anforderungen für automatische Fahrzeuge erfüllt. Durch neuartige Tests, das Erforschen der Ausfallentstehung mit physischer

Diagnostik, durch Finite-Element-Simulation und Meta-Modellierung sowie durch datenbasierte Analysemethoden wird letztlich ein integraler Gesamtindikator entwickelt. Hierdurch lässt sich der Zustand aller sicherheitsrelevanten Elektroniksysteme im Fahrzeug verlässlich genug beschreiben, um auf bei Bedarf alle nötigen Wartungs- und Reparaturmaßnahmen rechtzeitig auslösen zu können.

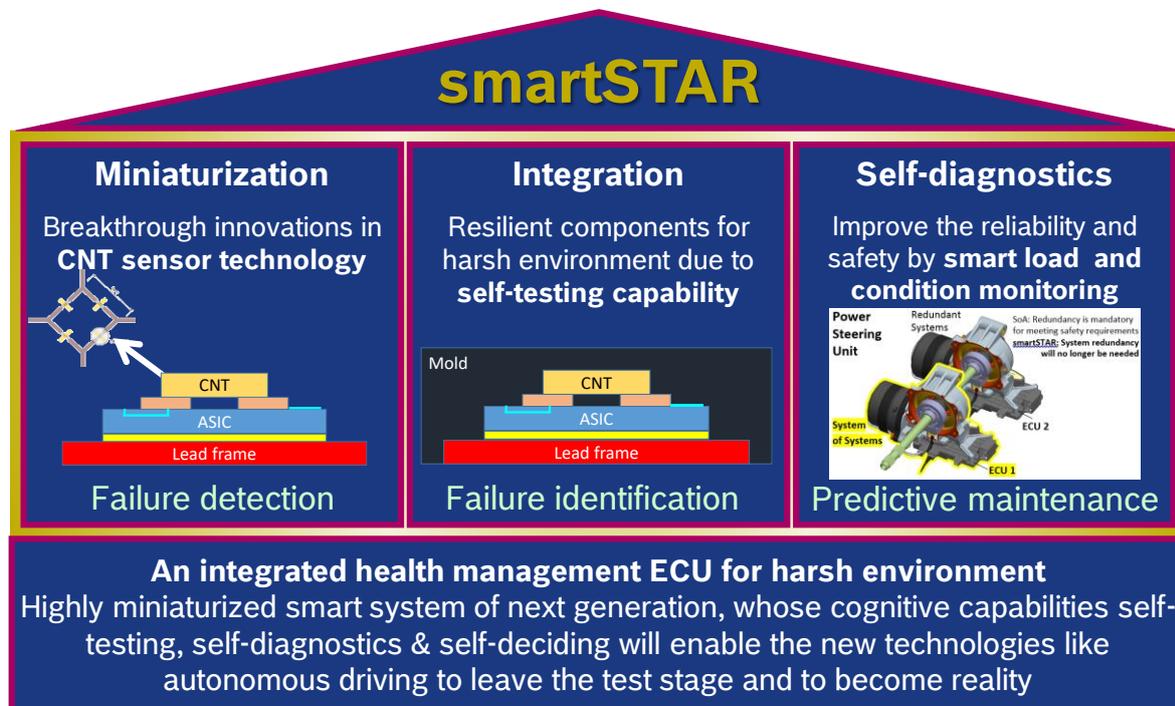


Abbildung 1: Drei Säulen des Projektes 'smartSTAR' zur Miniaturisierung, Integration und Selbstdiagnose mit dem Ziel der integrierten Zustandsüberwachung von Elektronik für sicherheitsrelevante Anwendungen

RB hat zusammen mit dem Konsortialpartner ab 09.2018 zusammengearbeitet. Während des Projekts wurden wir mit den unerwarteten Umständen im Zusammenhang mit der Covid-19-Pandemie konfrontiert. Wir mussten dieser äußerst dynamischen Entwicklung berücksichtigen und reagierten kurzfristig mit Maßnahmen, die weitreichende betriebliche Einschränkungen, wie z.B. den Zugang zum Labor, mit sich brachten. Darüber hinaus wurden wir mit weiteren Maßnahmen wie Betriebseinschränkungen (Kurzarbeit, Arbeitszeitverkürzung, kein Überstundenaufbau) konfrontiert. Die Koordination zwischen den Partnern wurde auch durch den zeitweiligen Ausfall einzelner Mitarbeiter erschwert. Für den Rest der Projektlaufzeit war es nicht möglich, ein persönliches Treffen zu organisieren, was sich zusätzlich auf die Effizienz der Zusammenarbeit auswirkte.

Trotz dieser Schwierigkeiten konnten wir die meisten unserer Aufgaben erfüllen und sogar einen neuen Demonstrator einführen, der zu Beginn des Projekts nicht geplant war. Einige davon haben sich jedoch verzögert, was dazu führte, dass wir eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um vier Monate beantragt haben.



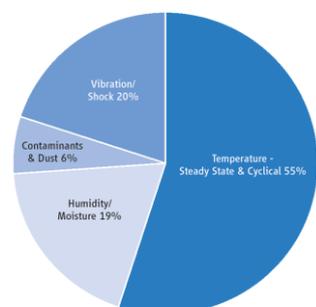
## 1.1 AP1: Lastenheft und design

Ziele des AP1:

- Präzise Spezifikation von Design- und Erprobungsanforderungen sämtlicher PHM-Sicherheitssysteme (Sensoren, Canary Sensor, Analysemethoden);
- CNT-Sensordesign entsprechend der Anforderungen definiert durch den Herstellprozess und Randbedingungen im ASIC-Layout;
- Entwicklung des Technologiekonzepts für die Integration der CNT und andere Sensoren in den ASIC, SiPs and PCB: Designrichtlinien, Erprobungsmuster, Prozessanforderungen;
- Strategie zur Komplexitätssteuerung für die neu zu entwickelnden Algorithmen der hybriden PHM-Methodik für die Rechenkapazität im Fahrzeug
- Definition der Simulations- und Erprobungsplänen für die Entwicklung und Demonstration des Ansatzes zur Ableitung des lokalen/globalen "Gesamt-Zustandsindikator" jeweils auf Komponenten/Fahrzeugebene

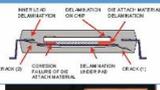
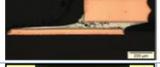
### 1.1.1 Produktspezifische Anforderungen und Spezifikationen

Im ersten Schritt wurden Belastungsfaktoren („stressors“), die relevant für ein Automobilelektronikprodukt sind, bewertet. Es gilt, die externen Belastungen zu identifizieren, die die Produktlebensdauer beeinflussen. Dies können Temperatur, elektrische Spannung, Feuchtigkeit, Vibration umfassen. Der Hauptanteil von zuverlässigkeitsrelevanten Belastungsfaktoren besteht aus thermo-mechanischer Wechselbelastung, Vibration, Feuchte. Um die Auswirkung der Belastungsfaktoren auf die Produktzuverlässigkeit zu quantifizieren wird die sog. beschleunigte Erprobung (accelerated testing) als standard Werkzeug in der Produktentwicklung und Freigabe im Bereich herangezogen. Durch beschleunigte Erprobung werden die im Feld erwarteten Degradationsprozesse in kürzerer Erprobungsdauer provoziert und analysiert. Im Rahmen von AP1.1 wurden entsprechend der betrachteten Fehlermechanismen die Erprobungsmuster und Erprobungsplan definiert. Weiterhin, wurden die Simulationsaktivitäten, sowie Analysemethoden zur Charakterisierung der lokalen Beanspruchung, wie Mikrostruktur- und thermische Deformationsanalysen, geplant.



The percentages vary for different applications and packaging locations.  
(ref. "The handbook of electronic package design" 1.4.2).

a)

Degradationsprozess	Belastung	Ort / BE	Bild	Ref.
<b>Delamination</b>	<u>Reflowprozess</u>	<b>QFP</b>		Komori et al. Materials for Advanced Packaging Springer 2009
<b>Lötstellen-schädigung</b>	Temperatur-schock (TS): -40/125°C, 1000 Zyklen	<b>QFN</b>		BMBF-Projekt „Live“-Ch. 5.6.8, 2008
<b>Pad-Cratering</b>	Temperatur-wechsel (TW): -40°C/125°C	<b>CTBGA208</b>		Loebberg et al., EuroSimE 2019
<b>Oxidation Mold-Compound</b>	HTS Test bei 250°C	<b>EMC</b>		Gotboll et al. Microelectronics Reliability 52 2289-2293 2012

b)

Abbildung 2: a) Quellen von Lebensdauerrelevanten Belastungsfaktoren und ihren relativen Beitrag [Ref: „The handbook of electronic package design“]. b) Zusammenstellung der relevanten (erwarteten) Degradationsprozesse

### 1.1.2 Spannungssensor-Designkonzept und Strategie für die Integration sämtlicher Sensoren

Im Rahmen von AP1.2 wurden die Designkonzepte und Technologien zur Integration der Spannungssensoren definiert. Es wurden CNT-basierte einerseits, und Si-basierte Sensoren, andererseits betrachtet. Unter der Leitung von TUC und Mitwirkung von Bosch wurde das Technologiekonzept für die Entwicklung und Integration der CNT-Sensoren auf Si-basierten ASIC-Sensoren entwickelt. Dies umfasst u.a. industrierelevante Si-wafertechnologie, Layout- und Verdrahtungsspezifikationen, sowie den Transferansatz und Passivierung von CVD-gewachsenen CNTs auf wafer-Ebene. Die Technologiekonzepte für die Silizium-basierte Spannungs- und Degradationssensoren (smartASIC) wurden von RB entwickelt. Dazu wurden, im ersten Schritt, die notwendigen silizium-integrierten piezo-Messbrücken und Layouts, sowie degradations-Multiplexer Ansätze für die Realisierung Sensor-Matrix Anordnung definiert. Im zweiten Schritt wurde das komplette smartASIC Konzept inklusive Steuer- und Datenerfassungseinheiten entwickelt. Im Rahmen von AP1.2 wurde schließlich die Sensorkalibrrierungsstrategie, die mechanische Materialtests auf wafer-Ebene, begleitet mit FEM-Simulationen, geplant.

### 1.1.3 Designkonzept für PHM Erprobungsmuster und PHM-Roadmap

Ziel des PHM im Allgemeinen ist die Erfassung des Gesundheitszustandes eines gesamten Fahrzeugs, jedes Fahrzeug setzt sich dabei aus einer Vielzahl zu überwachenden Platinen und Bauelementen. Der Gesamtgesundheitszustand setzt sich dabei aus dem Zustand der einzelnen Platinen und bei diesem wiederum aus den einzelnen Bauelementen zusammen. Im Rahmen des AP1.3 wurde das Zielsystem spezifiziert, indem Bestandteile (z.B. SMD-Widerstände, QFN-package) gewählt werden, da diese die elementare Voraussetzung für die Gesamtbetrachtung ist. Die notwendigen kontinuierlich zu erfassenden Messwerte wurden definiert, damit ausgehend von diesen dann der Gesundheitszustand des Fahrzeugs ermittelt werden kann. Zentraler Bestandteil dieser Analysen sind Meta- oder auch Zusammenhangsmodelle, die erlauben die Abbildung von Verhalten bzw. Zusammenhängen, von relevanten Zuständen. Zur Anwendung der Metamodelle bedarf es aber Experimente die den Datenraum bilden müssen. Im Rahmen dieser experimentellen Untersuchungen sollten dann Temperaturwechseltests genutzt werden, da aktuell erwartet wird (s. AP1.1), dass die thermo-mechanische Belastung hauptsächlich für das Versagen verantwortlich sein wird. Neben den Experimenten können auch Simulationen für die Bereitstellung der Datenbasis genutzt werden, es muss jedoch davonausgegangen werden, dass diese eine schlechtere Qualität als die Experimente haben wird. Jedoch können diese für die Erstellung von Datenauswertungsmethoden und zum Test der Metamodelle genutzt werden. Auch können an diesen die Anzahl an Experimenten abgeschätzt werden.

## 1.2AP2: Komponenten-Entwicklung

Ziele des AP2:

- Design und Fabrikation von CNT Sensoren / Sensorplattformen und Aufbereitung von CNT Rohmaterial und der Entwicklung von vorgespannten CNT Transistoren.
- Charakterisierung und Modellierung der CNT Sensoren und der Canary-Element und Benchmarking der CNT Sensoren an Silizium-basierten Sensoren
- Tests/Simulationen für die Entwicklung & Charakterisierung der Sensoren und Canary-Elementen

### 1.2.1 Entwicklung einer Fertigungstechnologie für CNT Sensoren

Bosch integrierte Anschlussmöglichkeiten für den CNT in zwei unterschiedlichen ASICs (Abb. 3). Dabei wurden sowohl einzelne CNTs als auch als Wheatstone-Brücke verschaltete CNTs vorgesehen.

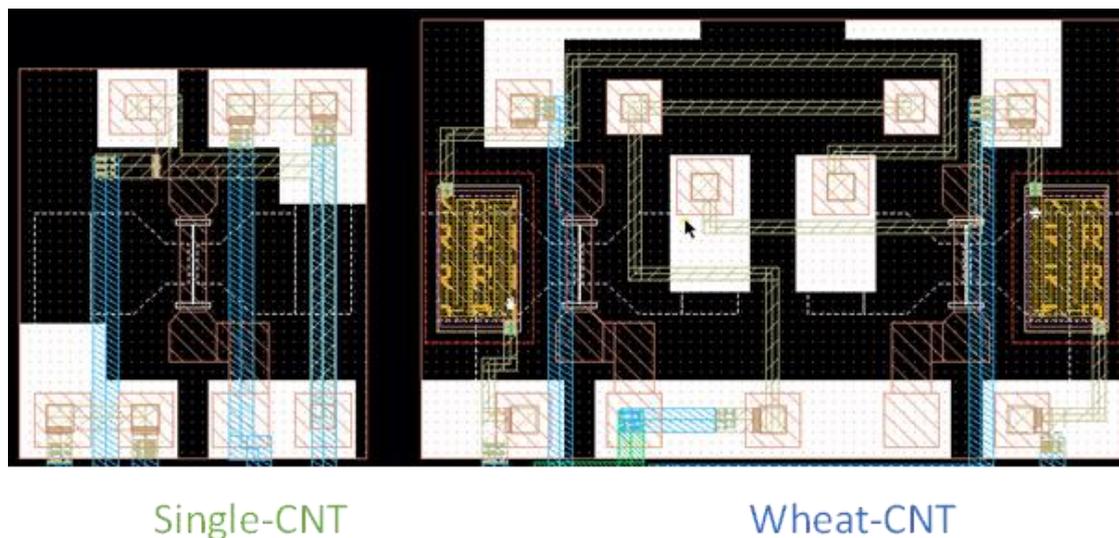


Abbildung 3: Bosch integrierte Anschlussmöglichkeiten für den CNT

Die Anschlussstellen wurden über den Chip verteilt, so dass eine Stresserfassung über die kompletten ICs möglich wurde.

Für die Erfassung der mechanischen Spannungen wurden neben den CNT-Sensoren an der Chipoberfläche ebenfalls piezoresistive Komponenten im Silizium integriert.

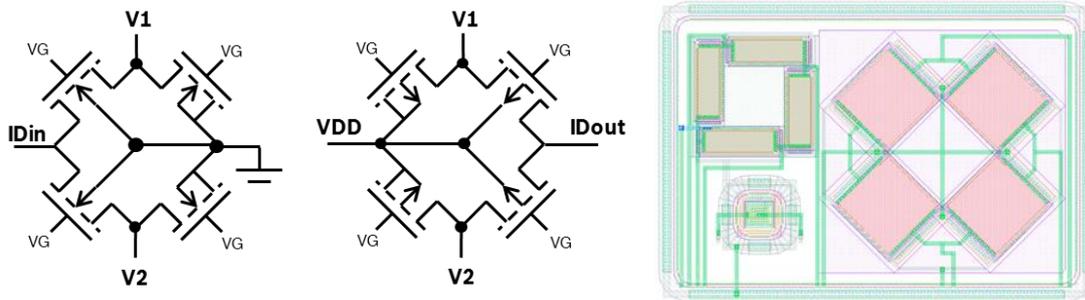


Abbildung 4: Schematische Darstellung der silizium-integrierten piezo-Messbrücken für NMOS (links), PMOS (mittig) und als Layout-Ansicht (rechts)

Da Feldausfälle nicht allein durch mechanische Belastung auftreten, werden darüber hinaus noch weitere Degradationsmechanismen erfasst, die Rückschlüsse auf das Alter der integrierten Bauelemente und den Zustand des smartASICs ermöglichen. Insgesamt sind 255 Sensoren in einer Sensor-Matrix vorgesehen.

In dem Konzept des smartASIC wurden Sensoren für Device-Degradation (integrierte Transistoren und Widerstände), Silizium-integrierte, mechanische Spannungssensoren mit T-Dioden, Canary-Elemente und CNT Sensoren (einzeln oder als Wheatstone-Brücke) integriert.

Diese Sensor-Matrix wird dabei durch einen Degradations-Multiplexer elektrisch adressiert. Dieser stresst gleichzeitig alle Sensoren bzw. mehrere Degradationsmechanismen mit vordefinierten elektrischen Signalen. Der elektrische Stress kann dabei ein Strom oder eine Spannung sein. Wird keine elektrische Degradation erwünscht, zum Beispiel bei Referenz-Elementen oder mechanischen Sensoren, werden die Stress-Signale aller Sensor-Terminals auf Masse gelegt.

Nur der durch einen Digital-Code ausgewählte Sensor wird in ein Test-Modus geschaltet. In diesem Modus werden vordefinierte elektrische Signale an den Sensor angelegt. Diese generieren Spannungssignale an Out-VS bzw. Out-VD, bzw. als Differenz dieser Signale einen Spannungsabfall  $V_{DS\_out}$  an dem Sensor (Abb. 4). Der Sensor ist so konzipiert, dass  $V_{DS\_out}$  stark korreliert zur Umgebungsbedingung (T/rH) oder zum Alterungs- bzw. Stresszustand wird.

$V_{DS\_out}$  wird in der Folge durch einen Analog-Digitalconverter digitalisiert und dem System als Sensor-Information zur Verfügung gestellt.

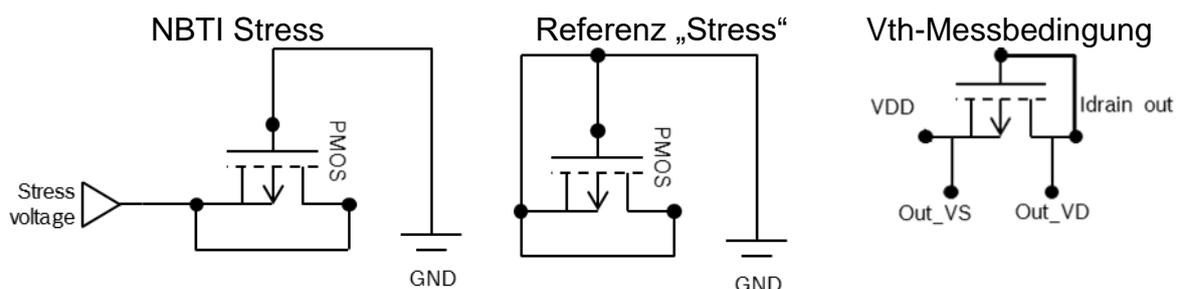


Abbildung 5: Stress- und Messbedingungen von PMOS-Sensoren. Das NBTI-gestresste Element (links) liegt mit Source/Drain und Wanne auf einem Stress-Potential, während das

Referenzelement (Mitte) komplett geerdet ist. Beide Elemente werden mit derselben Messbedingung (rechts) über Sense/Force Messtechnik ausgewertet.

Tatsächlich war zu erwarten, dass über die Lebensdauer die integrierten Schalter des Multiplexers altern und ggf. hochohmiger werden. Um Verfälschung des Sensor-Signals durch solche Effekte auszuschließen, werden die Signale per Sense-Force Messtechnik über möglichst stromlose Signalpfade dem ADC zur Verfügung gestellt.

### 1.2.2 Entwicklung eines smarten ASIC Sensors und eines Canary Element

Bei der Entwicklung des degradationsüberwachenden ASICs (smartASIC) zeigte sich, dass eine vollständig integrierte Variante (Abb. 5) prinzipiell möglich ist, aber einen sehr hohen Design- und später Testaufwand darstellt, und die Flexibilität stark einschränkt.

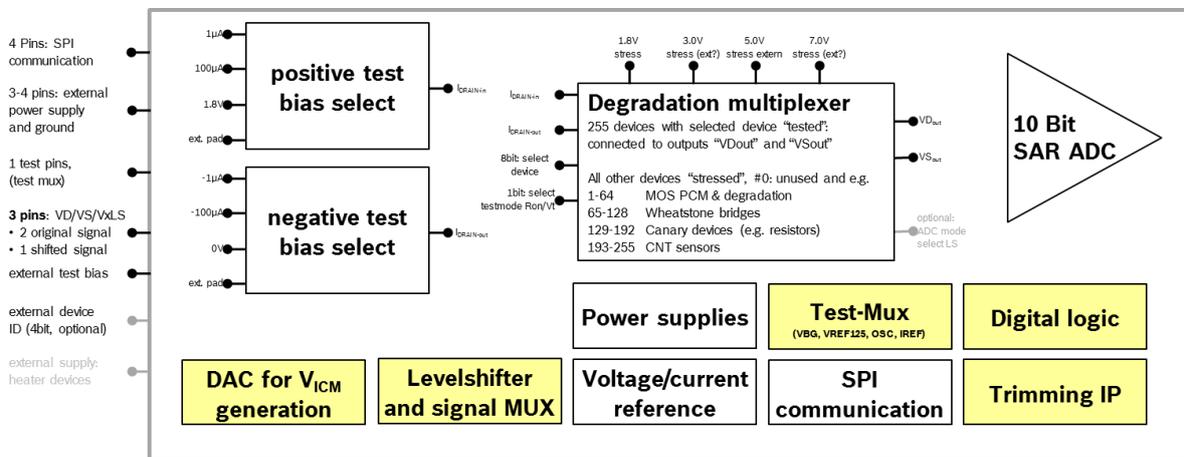


Abbildung 6: Darstellung der vollständig integrierten smartASIC-Designvariante

Der Vorteil einer externen Lösung ist dabei die erhöhte Flexibilität und Genauigkeit, erzeugt aber kein vollintegriertes System und erfordert in komplexen Versuchsaufbauten die Übertragung analoger Sensorsignale. Die final favorisierte Lösung war ein hybrider Ansatz (Abb. 6), in welchem interne Schaltungen die Aufbereitung der Sensor-Daten übernehmen, aber die Originalsignale redundant an externe Pins zur Verfügung gestellt werden. Die Konfiguration des smartASIC (zum Beispiel Selektion der Sensoren), läuft dabei über eine von außen angesteuerte digitale SPI Schnittstelle, ebenso wie der Messablauf durch einen externen  $\mu\text{C}$  gesteuert wird.

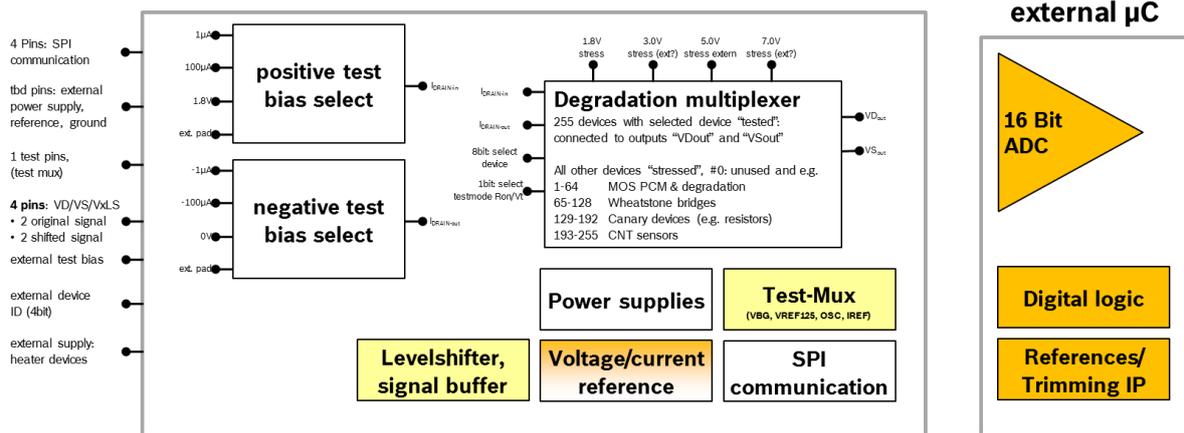


Abbildung 7: Darstellung der smartASIC-Designvariante mit externen ADC bzw. Microcontroller ( $\mu C$ )

Für eine präzisere Messung des mechanischen Stresses wurde das Konzept der Wheatstonebrücke optimiert. Bei vergleichbarer Linearität konnte die Sensitivität signifikant erhöht werden (Abb. 8). Das neue Schaltungskonzept ist dabei konfigurierbar, so dass die Sensitivität der Schaltung auf Kosten der Linearität weiter gesteigert werden könnte.

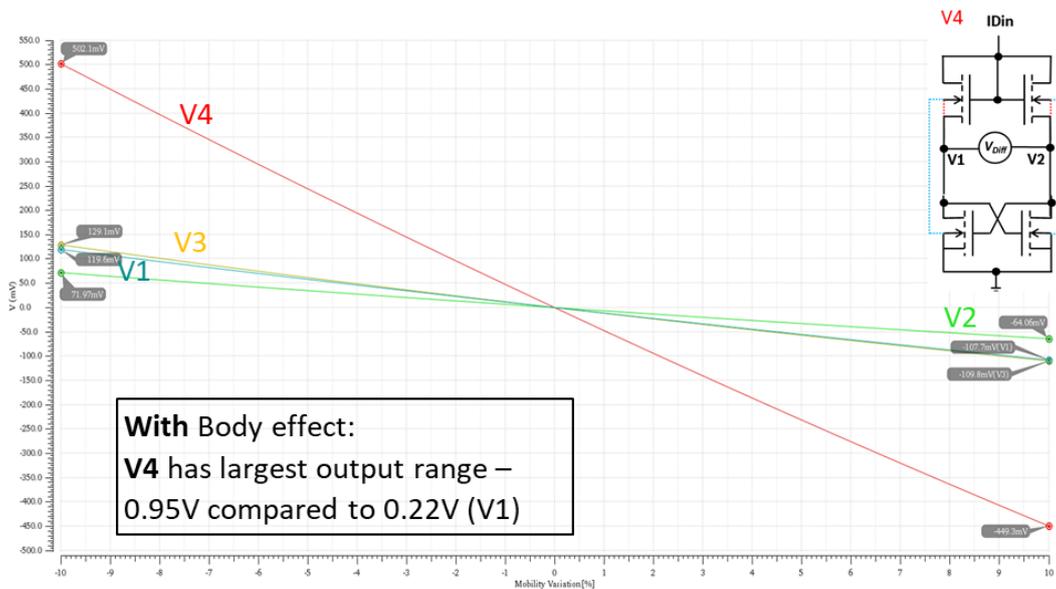


Abbildung 8: Ausgangssignal verschiedener Wheatstonekonzepte für eine durch mechanischen Stress verursachte Mobilitätsänderung. Variante „V4“ erreicht eine etwa Faktor 5 höheres Ausgangssignal gegenüber aus der Literatur bekannten Ansätzen.

Die neuen Wheatstonebrücken wurden integriert, ebenso wie Heizerstrukturen zur Nachbildung von Multiprozessor-Kernen in einem Package. Design, Layout und Verifikation wurden abgeschlossen (Abb. 9).

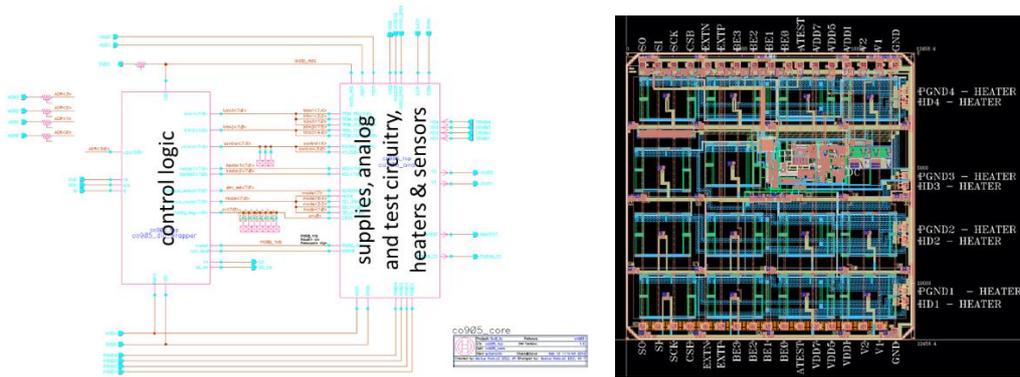


Abbildung 9: Top-Schematic (links) und finales smartASIC-Layout (Rechts)

### 1.2.3 Herstellung der vollintegrierten ASIC Sensoren

Mit den finalen Layoutdaten wurden ein Maskensatz für einen 0.18µm smartpower-Technologie erstellt. In diesen Maskensatz wurden beide ASICs mit der CNT-Integrationsmöglichkeit integriert (Abb. 10).

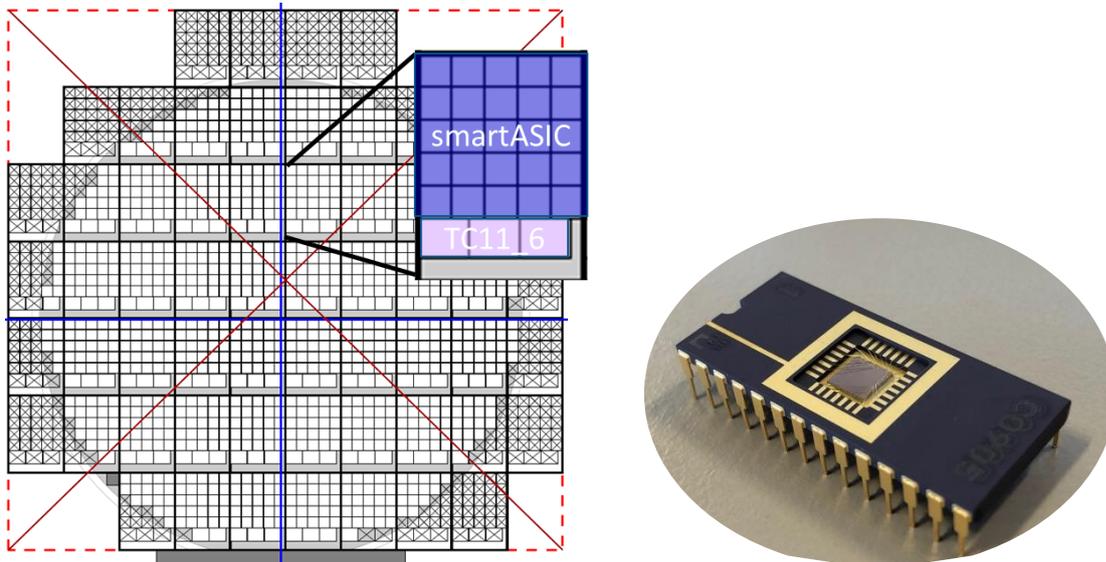


Abbildung 10: Links - Reticle-Shot Wafermap. Sowohl der smartASIC als auch der erste Testchip für den CNT (TC11\_6) wurden integriert. Rechts: erster aufgebauter Prototyp des smartASIC.

Der Siliziumdurchlauf wurde durchgeführt. Das Silizium und das Layout waren bereits im ersten Durchlauf funktional, Korrekturen waren nicht notwendig.

### 1.2.4 Modellbildung und Charakterisierung

Essentieller Bestandteil einer effizienten PHM Methode ist die gezielte Überwachung von lokalen Schädigungsmechanismen, die ausfallrelevant sind und den Gesundheitszustand bestimmen. Um die lokale Beanspruchung unter den vorgegebenen äußeren Belastungsfaktoren zu ermitteln wurden FEM-Simulationen eingesetzt (Abb. 11). Es wurde ein automatisierter Simulationsworkflow entwickelt, mit dem QFN-packages generiert werden konnten unter der Berücksichtigung von experimentell beobachteten geometrischen Toleranzen. Damit wurden virtuelle DoE's durchgeführt, womit der Einfluß von Material- als auch Prozessstreuung rechnerisch

ermittelt werden konnte. Somit, wird die Streuung der Sensorsignalen und ihre Auswirkung auf die lokale Beanspruchung erfasst und berücksichtigt.

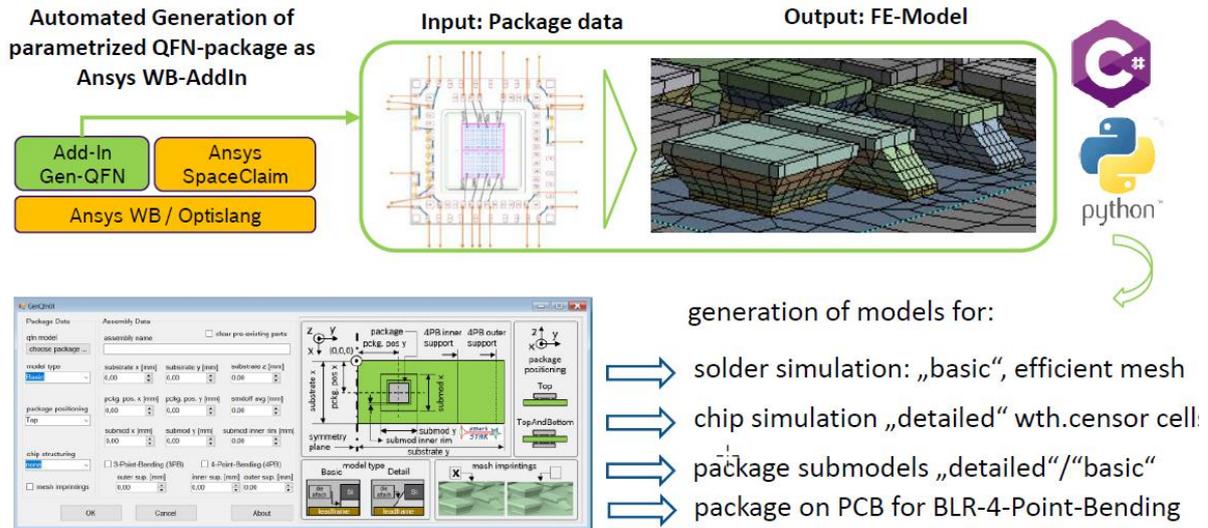


Abbildung 11: Simulationsworkflow-Implementierung in kommerziellem FEM-Softwarepackage zur automatisierten Generierung von QFN-package Modellen auf Leiterplatte unter Berücksichtigung geometrischer Prozesstoleranzen sowie variabler 4-Punkt-Biegebelastung überlagert mit thermischer Zyklierung.

Um die richtige Stressverteilung (auf der ASIC-Oberfläche) zu beschreiben, die Bestimmung von Piezo-Resistive Koeffizienten (PRC) ist notwendig, wenn die Stressverteilung mit elektrischen Messungen (mit der Hilfe von Wheatstone Bridge) ausgewertet wurde. Für diesen Zweck wurde der PRC Workflow entwickelt (Abb. 12).

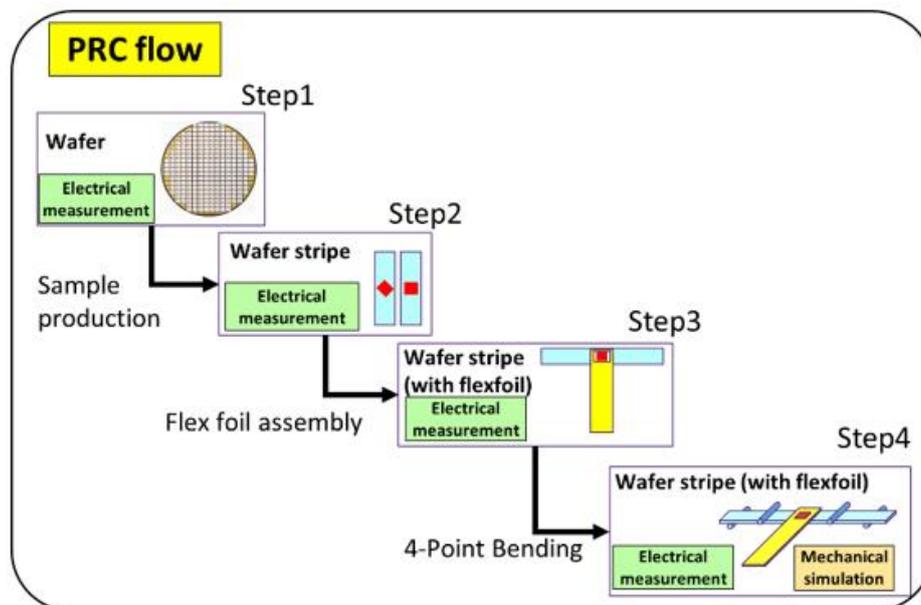


Abbildung 12: PRC Flow.

Die 4-Punkt Biege sollte mechanischer Stress im Stresssensoren verursachen und damit die elektrischen Signale entsprechend ändern. Mit dieser gezielten Änderung ist die Bestimmung von dem Piezo-Resistive Koeffizient ermöglicht. Da der smartASIC für den 4-Punkt-Biege-Versuch geometrisch nicht geeignet ist, wurde die Waferstreife

mit dem smartASIC in der Mitte als eine Probe verwendet (Abb. 13). Um die elektrische Signale während dem Biege-Versuch zu messen, wurde eine Flexfolie designed und hergestellt. Die Flexfolie wurde auf der Waferstreife geklebt und mit den Bonddrähte elektrisch verbunden (gebondet).

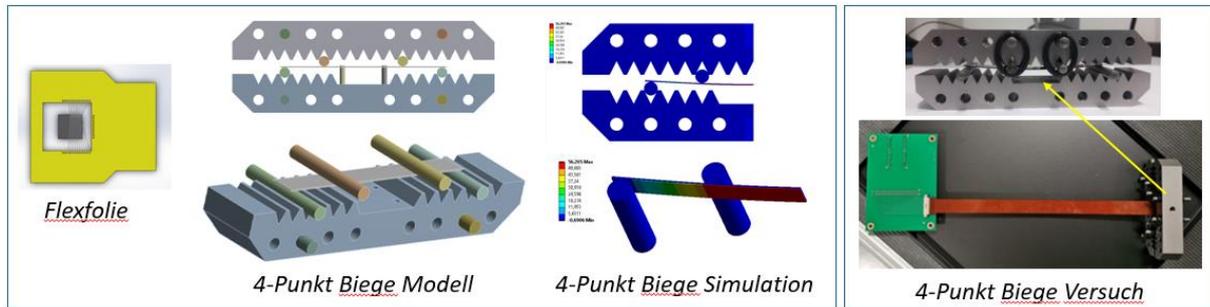


Abbildung 13: 4-Punkt Biege: Simulation und Versuch

Mit der Hilfe von einer mechanischen Simulation sind die folgende PRC Werte für die smartASIC-Technologie ausgerechnet:

$$\pi_{44}^p = 1257 \pm 16 \text{ (TPa}^{-1}\text{)}, \quad \pi_D^n = -876 \pm 11 \text{ (TPa}^{-1}\text{)}.$$

### 1.3AP3: Module Integration

Ziele des AP3:

- Fertigung der smarten PHM-Objekten mit den verfügbaren siliziumbasierten Spannungssensoren und Durchführung der Stresstests auf Leiterplattenebene zur Charakterisierung des Verhaltens der IC-Gehäuse mit vollintegrierten smarten ASICs.
- Herstellung einer Testplatine mit Canary-Sensoren und iForce-Sensor-ASIC integriert in eine Leiterplatte
- Integration & Kapselung des degradationsüberwachenden ASICs und vollintegrierten ASICs mit CNT in PHM-Smart-Objekten
- Entwicklung und Kalibrierung der physikalischen Versagensmodelle (z. B. Lötstellenschäden, Delamination), basierend auf den Ergebnissen der Zuverlässigkeitstests auf Leiterplattenebene der vorbereiteten Daisy Chain Test Leiterplatten und den Ergebnissen kalibrierter und verifizierter FEM-Simulationen

#### 1.3.1 Kapselung des Smart Sensing ASICs in ein Smart Objekt

Wir haben das smartSTAR-Projekt mit der Verkapselung des iForce-Sensors in zwei Gehäusetypen begonnen: TQFP (Thin Quad Flat Pack) (Abb. 14), das als Standard in der Automobilbranche verwendet wird, und das Gehäuse der nächsten Generation QFN (Quad Flat NoLead) 12x12. Dies ermöglichte uns die Entwicklung einer PHM-Methode für den bekannten RB-Spannungssensor und die Übertragung dieser Technologie auf die nächste Generation von smartASIC, die im Rahmen des smartSTAR-Projekts entwickelt werden soll.

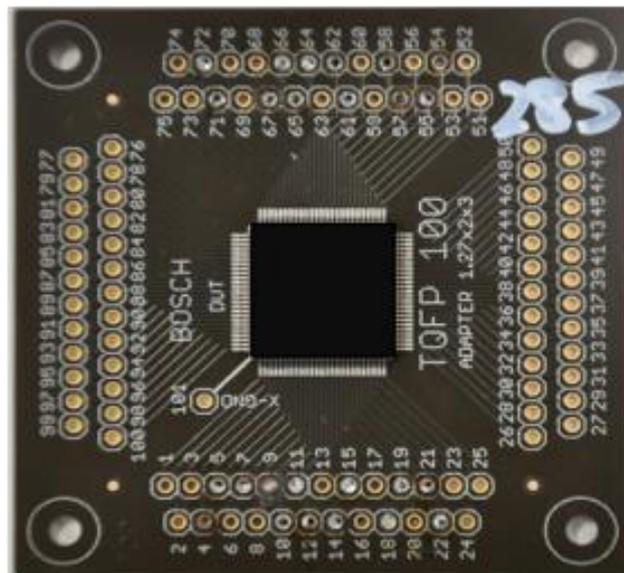


Abbildung 14: iForce-Sensor im TQFP-Gehäuse

Im weiteren Teil des Projekts haben wir den iForce-Sensor als auch smartASIC in einem QFN MR 10x10 verpackt (Abb. 15), um die Zuverlässigkeit des neuartigen Smart Systems zu untersuchen. Das Bonddiagramm ist in dem linken Bild gezeigt, das rechte Bild zeigt das QFNmr 10x10 Gehäuse (mit dem iForce Sensor). Die blauen

Linien im linken Bild zwischen einzelnen Pads zeigen die Daisy Chain im Gehäuse, schwarze Linien die Bondverbindungen für den iForce Sensor (Abb. 15).

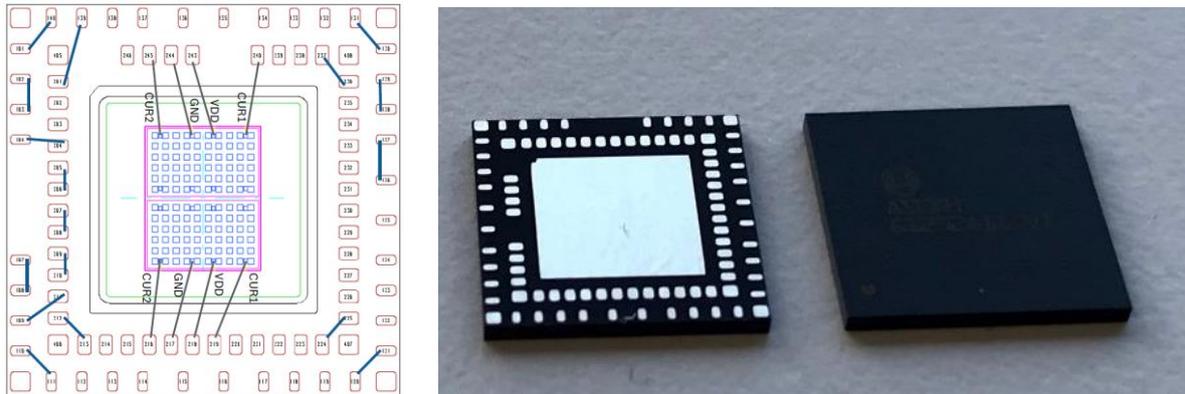


Abbildung 15: QFN MR 10x10 in welche iForce sensor und smartASIC gekapselt waren

### 1.3.2 Kapselung des CNT-basierten Spannungssensors in ein Smart Objekt

Die Validierungsmethodik (Abb. 16) wurde auf ein Keramikgehäuse basiert, wobei eine ähnliche Technologie als Proof-of-Concept für die Studie verwendet wurde. Die CNT-basierten Spannungssensoren würden in einer separaten Studie (anderes AP) analysiert. Mehrere Verpackungsmöglichkeiten wurden geplant aber, wegen der Komplexität und der Covid Situation, war es zeitlich nicht möglich, die CNTs in einem Smart-Objekt oder Keramikgehäuse zu verpacken und messen.

Die schrittweise Analyse auf einem Keramikgehäuse ist im Bild unten beschrieben.

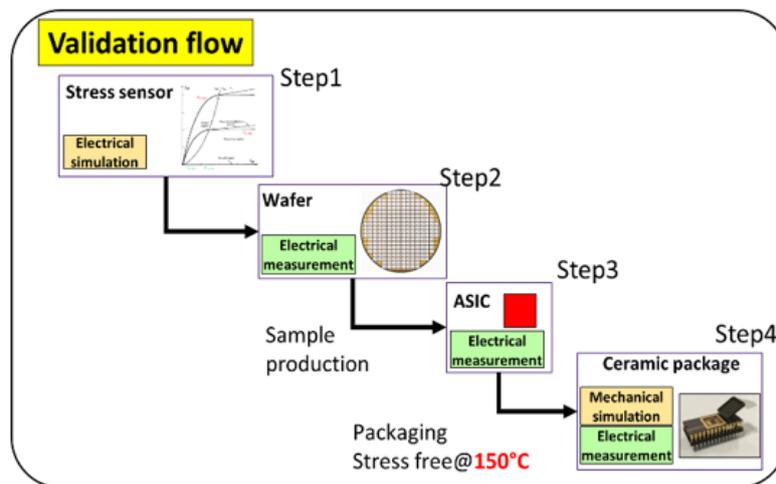


Abbildung 16: Validation Flow.

Der ASIC mit einer ähnlichen Technologie wurde auf ein Keramikgehäuse (Abb. 17) geklebt und gebondet. Solches Gehäuse wurde via Sockel elektrisch verbunden und danach mit einem vereinfachten thermomechanischen Modell verglichen.

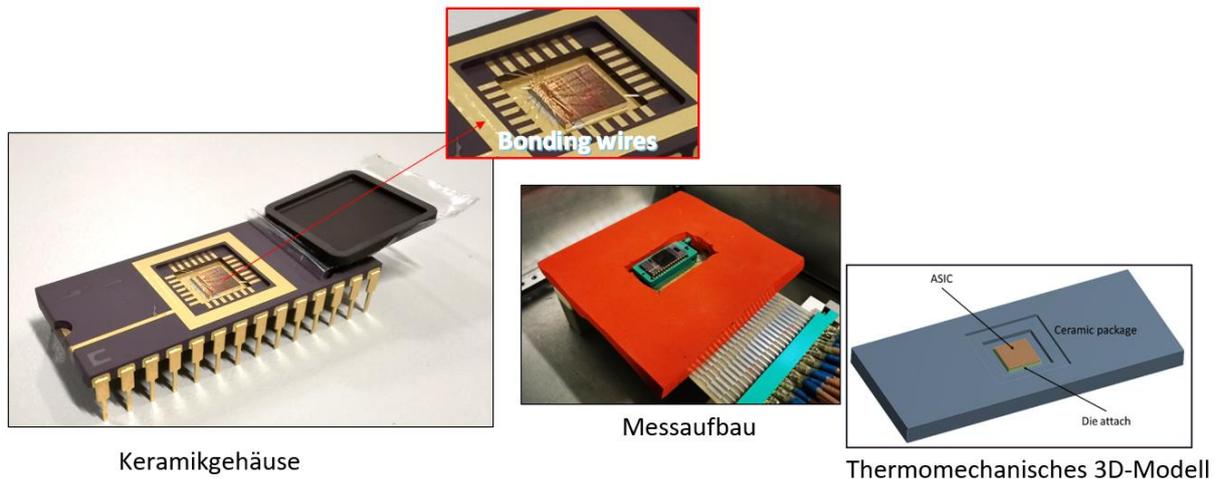


Abbildung 17: Messaufbau für die Keramikgehäuse und das 3D Modell verwendet in der Simulation.

Die Validierungsanalyse hat gezeigt, dass die PRC Werte realistisch sind und dass der ganze Validierungsprozess zuverlässig ist. Zusätzlich wurden thermomechanische Simulationen durchgeführt, um die elektrischen Messungen zu validieren (Abb. 18).

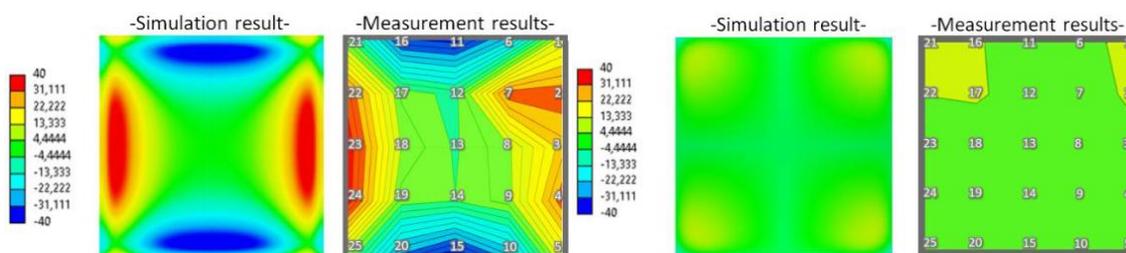


Abbildung 18: Differenz der Normalspannungen; b) Scherspannung.

### Integration von Canary Sensoren und iForce-Sensor in Smart Objekt

Zur Realisierung eines PHM-Ansatzes wird eine Sensorik benötigt, deren Signale Aufschluss über Belastung oder Degradation geben. Ein Beispiel ist das Messen der Profiltiefe beim Reifen, welche mit der Degradation des Reifens korreliert und anhand derer eine Entscheidung über den Zeitpunkt des Reifenwechsels getroffen werden kann. Die Alterungsprozesse elektronischer Komponenten finden auf mikroskopischer Ebene und im verbauten Zustand statt, weshalb eine visuelle Inspektion ohne Zerstörung oft nicht möglich ist. Des Weiteren kann zwischen einer in-situ Fehlermessung, wie es beim Autoreifen der Fall ist, und einer Labormessung unterschieden werden. Eine Labormessung wird in der Regel als physikalische Fehleranalyse im Rahmen der Physik der Fehler durchgeführt und ist nicht für Feldanwendungen und den PHM-Ansatz geeignet, wird aber zur Korrelation zwischen Signal und Fehler in der Entwicklungsphase benötigt. Methoden und Messungen werden im Kapitel physikalische Fehleranalyse genauer vorgestellt. Für die in-situ Abschätzung der Restlebensdauer kommen so nur indirekte Messprinzipien in Frage. Stand der Technik sind Temperatursensoren auf Leiterplatten oder auf dem Silizium, die es ermöglichen den zeitlichen Temperaturverlauf zu erfassen, anhand dessen auf die thermo-mechanische Belastungshistorie geschlossen werden kann. Diese Art des Zyklenzählens kann in einem physik-basierten Modell Anwendung finden. Im Rahmen dieser Arbeit setzen wir auf Stresssensoren, die im Chip integriert sind. Abb. 19 zeigt

einen Musterchip aus dem Projekt „iForceSens“, bei dem die gesamte Chipoberfläche mit einer Matrix aus 120 identischen Stressmesszellen bedeckt ist, was eine Ortsauflösung von 260 µm und eine Positionsgenauigkeit von 50 µm erlaubt. Jede Zelle beinhaltet mehrere Messfunktionen. Relevant für diese Arbeit sind die NMOS und PMOS Stromspiegel, die im Detailschema von Abbildung 4 vereinfacht dargestellt sind. Die beiden Äste des Stromspiegels sind in einer Schaltung parallel zueinander orientiert, was zu gleichen Strömen in beiden Ästen, auch unter thermischer oder mechanischer Belastung führt. In einer anderen Schaltung haben die beiden baugleichen MOSFETs eine gegenseitige Verdrehung von 90° zueinander. Uniaxiale mechanische Spannungskomponenten wirken sich somit in unterschiedlicher Weise auf die Mobilität der Elektronen der beiden MOSFETs aus, dieser Effekt ist auch unter dem Begriff „gestrecktes Silizium“ bekannt. Das sich die Mobilität der Elektronen auf den durch den MOSFET fließenden Strom auswirkt, kann eine Stromdifferenz zwischen beiden Ästen detektiert werden, welche proportional zum Unterschied der ebenen mechanischen Spannungszustände am Silizium ist.

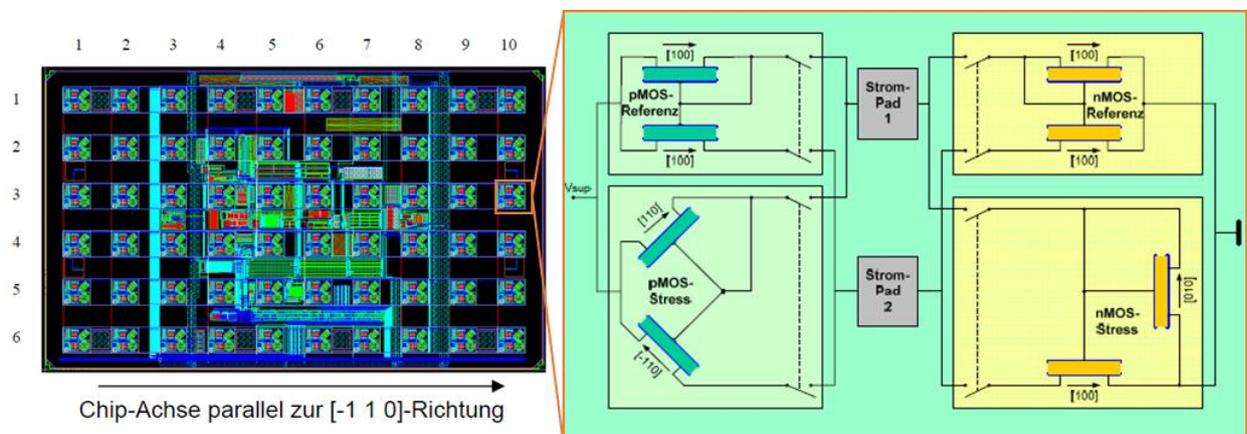


Abbildung 19: Stresssensor-Variante V01 mit 2,83 x 1,71 mm<sup>2</sup> Chipfläche und 6 x 10 Messzellen. Die Chips für das von uns verwendete QFN Package sind so ausgeschnitten, dass sich jeweils 2 Sensoren auf einem Chip befinden.

Durch eine geeignete Kalibrierung, wie sie im Abschlussbericht des Projektes „iForceSens“ dargestellt wird, können die piezo-resistiven Koeffizienten bestimmt werden, welche die Umrechnung von Stromdifferenzen in mechanische Belastungszustände erlauben. Die Transistoren werden im Bereich starker Inversion und Abschnürung betrieben ( $U_{GS} = U_{DS}$ ) was bedeutet, dass die Änderung der Mobilität der Leitungsträger (Widerstand) direkt auf die Zweigströme nach Formel (1) übertragen lässt:

$$\frac{\Delta I}{I} \approx -\frac{\Delta R}{R} \quad (1)$$

Der Zusammenhang zwischen Widerstandstensor R, Stresstensor  $\sigma$  und dem Tensor der piezoresistiven Koeffizienten  $\pi$  ist in Formel (2) gegeben. Unter Berücksichtigung der kubischen Symmetrie des Siliziumkristalls ergeben sich folgende Korrelationen zwischen dem orientierungsabhängigen Spannungszustand und der Änderung der Zweigströme:

$$R_{ij}(\sigma) = R_0 * \left( 1 + \sum_{k,l} \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta I}{I} \Big|_{[100]} = -(\pi_{11} \sigma_{11} + \pi_{12} \sigma_{22} + \pi_{12} \sigma_{33}) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta I}{I} \Big|_{[010]} = -(\pi_{12} \sigma_{11} + \pi_{11} \sigma_{22} + \pi_{12} \sigma_{33}) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta I}{I} \Big|_{[110]} = -\left( \frac{\pi_{11} + \pi_{12}}{2} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{12} \sigma_{33} + \pi_{44} \sigma_{12} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta I}{I} \Big|_{[-110]} = -\left( \frac{\pi_{11} + \pi_{12}}{2} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{12} \sigma_{33} - \pi_{44} \sigma_{12} \right) \quad (6)$$

Aus der relativen Differenz der orthogonalen Zweigströme kann somit die Differenz der Normalspannungen in der Ebene  $\sigma_{11} - \sigma_{22}$  und der ebene Scherspannungszustand  $\sigma_{12}$  nach Gleichungen (7) und (8) bestimmt werden. Relevant für die Arbeit im Rahmen des Projektes ist die Differenz der Normalspannungen in der Ebene, im weiteren Verlauf als  $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$  bezeichnet, und insbesondere deren Differenz zwischen zwei verschiedenen Belastungszuständen, wie es in Formel (9) dargestellt wird. Dabei beschreiben EZ und AZ jeweils den Endzustand und den Ausgangszustand bei der Differenzbildung.

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \frac{2}{\pi_{44}} \frac{I_{[110]} - I_{[-110]}}{I_{[110]} + I_{[-110]}} \quad (7)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{\pi_{11} - \pi_{12}} \frac{I_{[100]} - I_{[010]}}{I_{[100]} + I_{[010]}} \quad (8)$$

$$[\sigma_{xx} - \sigma_{yy}]_{AZ}^{EZ} \approx \frac{2}{\pi_{44}} \frac{I_{[110]}^{EZ} - I_{[-110]}^{EZ}}{I_{[110]}^{EZ} + I_{[-110]}^{EZ}} - \frac{2}{\pi_{44}} \frac{I_{[110]}^{AZ} - I_{[-110]}^{AZ}}{I_{[110]}^{AZ} + I_{[-110]}^{AZ}} \quad (9)$$

Um eine Korrelation zwischen den gemessenen mechanischen Spannungen und der Degradation im Package herzustellen, postulieren wir, dass die Differenz nach Formel (9) zwischen äquivalenten Belastungszuständen Null ist. Jegliche Abweichungen der Differenz deuten somit auf eine Veränderung im Spannungs-Dehnungsverhalten des Aufbaus hin. Im folgenden Stellen wir die Methodik der beschleunigten Alterung vor, deren zyklischer Ablauf den Vergleich äquivalenter Belastungen und deren Spannungsantwort auf der Sensoroberfläche über die Lebensdauer hinweg ermöglicht.

### 1.3.3 Untersuchung der Zuverlässigkeit auf Leiterplattenebene

Die angestrebte Lebensdauer von Fahrzeugen im Feld beträgt ca. 15 bis 20 Jahre. Bisher konnten elektronische Systeme wie Steuergeräte und der Komponenten so ausgelegt werden, dass die ersten Ausfälle nicht vor der angestrebten Lebensdauer des Fahrzeugs ausfielen. Da die Entwicklungszeit wesentlich kürzer ist, haben sich beschleunigte Alterungsversuche etabliert, welche durch höhere Belastungen als im Feld eine „Raffung“ der Lebensdauer schaffen. Je nach Raffungsfaktor, können so 20

Jahre z.B. in 2 Monaten Testzeit abgebildet werden. Damit eine Übertragbarkeit von Testzeit auf reale Lebenszeit erfolgen, ist es essentiell bei der Versuchsauslegung darauf zu achten, dass nicht nur gleiche Fehlermodi (Risse im Lot, Delamination), sondern auch gleiche Fehlermechanismen (thermo-mechanisch bedingte Ermüdung) durch die überhöhten Belastungen erzeugt werden. Traditionell werden hierfür Temperaturzyklen zwischen -40 und 125 °C bevorzugt. Eine Kombination aus thermischer Belastung und Biegung soll das den Test etwas realitätsnäher gestalten. Deshalb werden die Komponenten in der Temperaturkammer auch noch einer Vierpunktbiegung unterworfen.

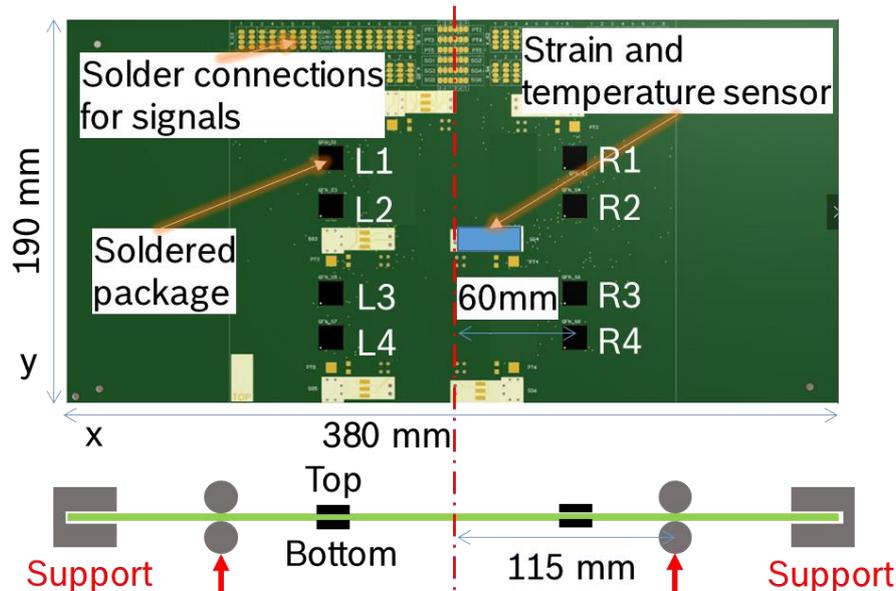


Abbildung 20: Testvehikel mit 16 Komponenten für beschleunigte Alterungsversuche. Die Komponenten sind symmetrisch links und rechts sowie auf der Vorder- und Rückseite der Leiterplatte. Neben den Komponenten befinden sich noch Dehnungsmessstreifen und Temperatursensoren auf der Leiterplatte

Im Rahmen der Arbeit werden zwei Zuverlässigkeitstests auf Leiterplattebene durchgeführt. Als Testvehikel kommt jeweils eine Leiterplatte mit Abmessungen von 380 x 190 mm zum Einsatz, welche Abbildung 5 dargestellt ist. Zunächst stellen wir die Charakteristika des ersten Versuchs dar. Die Leiterplatte hat eine Dicke von 1,6 mm. Es befinden sich je 8 Komponenten mit 100%-Überdeckung auf Vorder- und Rückseite der Leiterplatte. Die Anordnung ist weiterhin bzgl. linker und rechter Seite symmetrisch. Zur Kalibrierung und Steuerung der Versuche sind ein Dehnungsmessstreifen und ein Temperatursensor auf der Leiterplatte angebracht. Das in Abb. 20 dargestellte Biegevehikel wird über die laterale Auslenkung in mm gesteuert. In einem initialen Versuch werden Auslenkung und gemessene Dehnung auf der Leiterplatte über den Zyklustemperaturverlauf kalibriert. Die Auslenkung des Vehikels bei 125 °C wird so eingestellt, dass eine Dehnung -800  $\mu\text{m}/\text{m}$  auf der Vorderseite der Leiterplatte herrscht, was einer Auslenkung von 11.2 mm entspricht. Bei -40 °C soll eine Dehnung 800  $\mu\text{m}/\text{m}$  vorliegen, was einer Auslenkung von -9.3 mm entspricht. Der synchronisierte Temperatur- und Dehnungsverlauf für das beschleunigte Alterungsexperiment sind exemplarisch in Abb. 21 dargestellt.

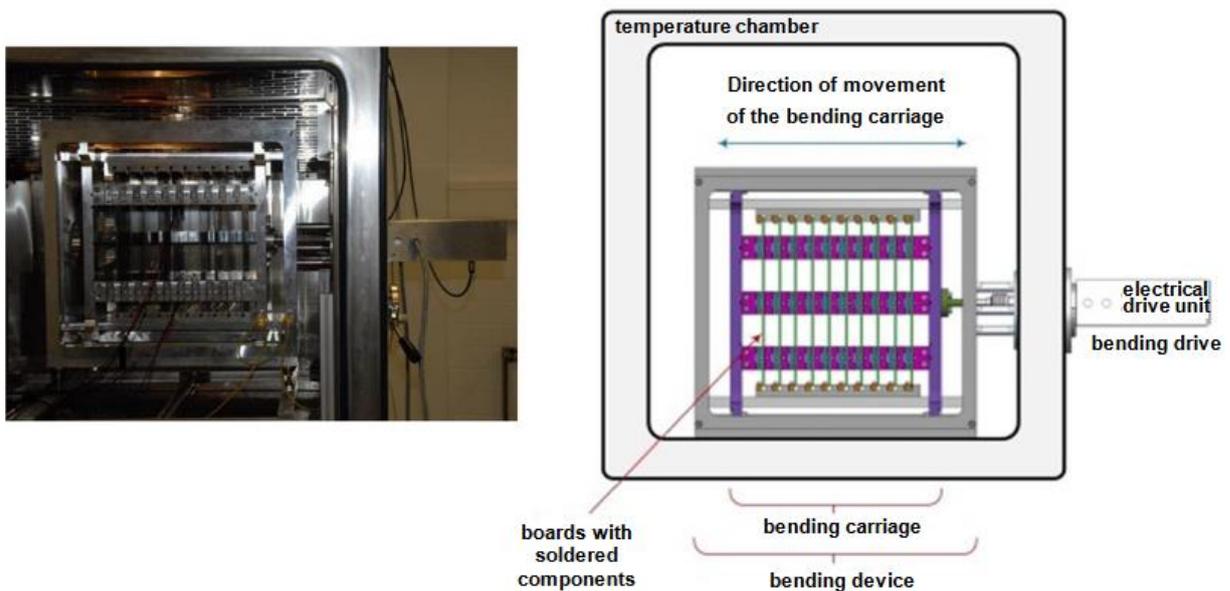


Abbildung 21: Vierpunktbiegevehikel in der Temperaturkammer, bietet Platz für 10 Leiterplatten, die gleichzeitig gebogen werden können.

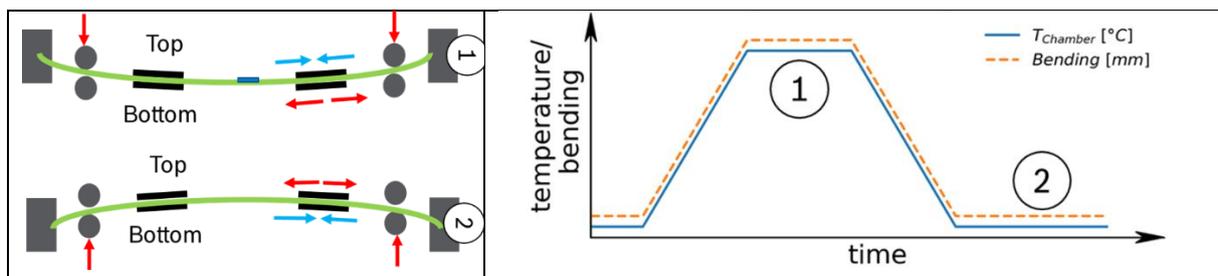


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf von Temperaturzyklus und Biegung im beschleunigten Alterungsexperiment

Im zweiten Versuch haben wir das Layout der Leiterplatte aufgrund der „lessons learned“ nach dem ersten Versuch, welche im Kapitel „Fehleranalyse“ dargestellt werden, modifiziert. Das in Abb. 22 dargestellt Board hat nur noch auf der Vorderseite Komponenten, ist aber weiterhin symmetrisch bzgl. der vertikalen Achse. Um wie im ersten Versuch sowohl Dehnung als auch Kompression bei hoher bzw. niedriger Temperatur untersuchen zu können, werden 4 Testleiterplatten mit „in-phase“-Orientierung und 4 mit „out-of-phase“-Orientierung in das Vehikel eingeschoben, wie es in Abbildung 9 dargestellt ist. Zusätzlich werden 2 Leiterplatten so eingeschoben, dass keine zusätzliche mechanische Biegung während der Temperaturzyklen anliegt. Beim ersten Versuch wurde ebenfalls eine Leiterplatte nur temperiert aber nicht gebogen.

Im zweiten Versuch kommt zu dem eine Daisy-Chain-Messung zum Einsatz, welche den Ausfallzeitpunkt bestimmter Lötstellen erkennt (Abb. 23).

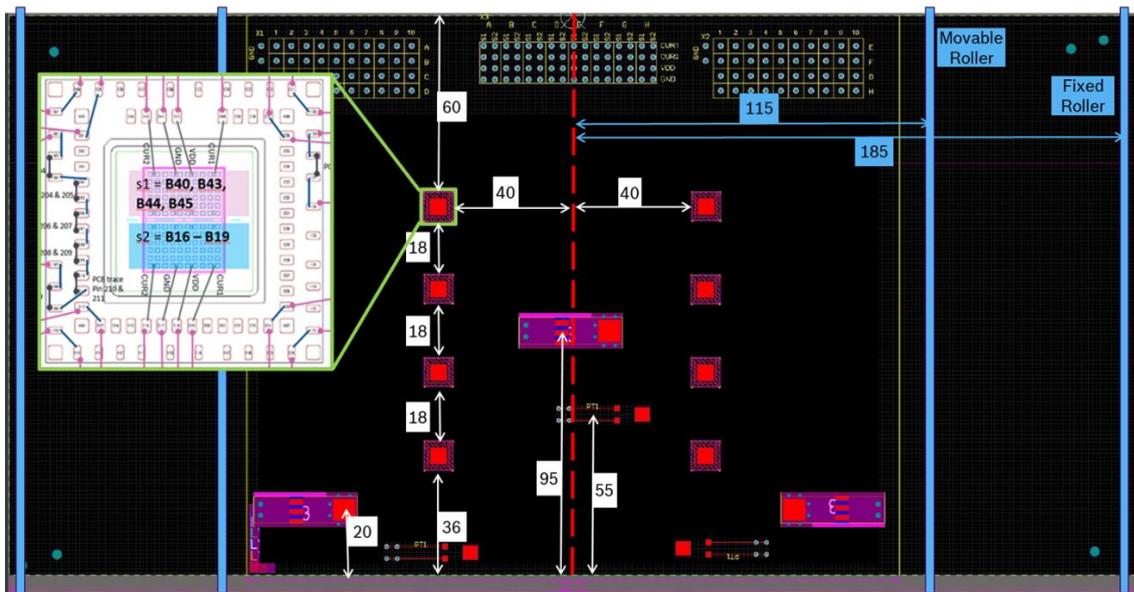


Abbildung 23: Leiterplattenlayout für den zweiten Zuverlässigkeitstest auf Leiterplattebene. Komponenten sind aufgrund der „lessons learned“ nur noch auf der Vorderseite montiert

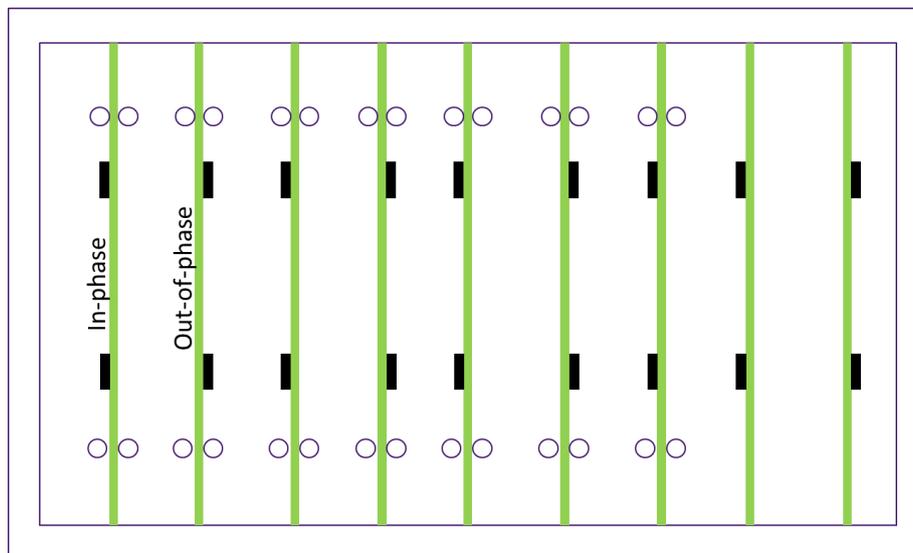
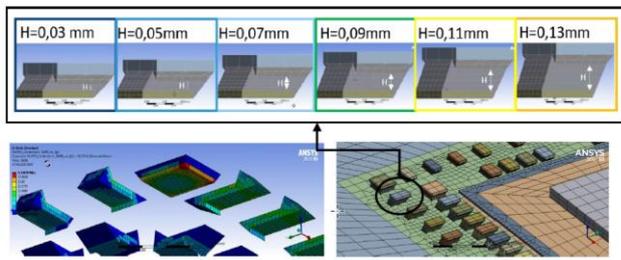
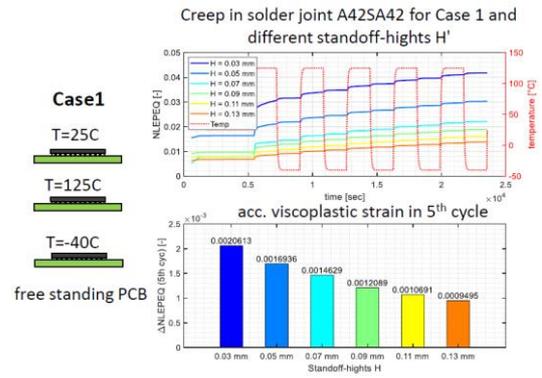


Abbildung 24: Anordnung der Leiterplatten im 2. Zuverlässigkeitstest. 4 bestückte Leiterplatten werden In-phase eingeschoben, 4 out-of-phase und 2 Leiterplatten so, dass keine Biegung im Verlauf der Temperaturzyklen anliegt.

Einer der hochrelevanten Degradationsmechanismen in der Elektronik betrifft Lötstellenschädigung, die unter thermomechanischer Belastung aktiviert werden kann. Mit Hilfe von FEM-simulationen wurde die lokale Beanspruchung sämtlicher Lötstellen des QFN-packages unter der thermomechanischen Last der board-level-reliability (BLR) tests ermittelt (Abb. 25). Die aus der Simulation resultierende Größen von akkumulierter Kriechdehnung in den Lötstellenvolumina dienen anschließend in Kombination mit Lebensdauergesetzen (Coffin-Manson) der simulativen Lötstellenzuverlässigkeitsmodellierung und Lebensdauerprognose. Weiterhin, wurde eine FE-basierte virtual DoE Lötstellenvolumenvariation realisiert und damit den Einfluß von Prozesstoleranzen auf Lötstellenschädigung und chip-mold-Grenzflächen ermittelt.



a



b

Abbildung 25: Virtuelle DoE zur Bewertung der Lötstellenbeanspruchung in Abhängigkeit von Lötstellenvolumenvariation. a) Lötstellengeometrien des QFN-packages mit variierender Standoff-Höhe und resultierende Verteilung der akkumulierten Kriechdehnung. b) Akkumulierte Kriechdehnungen in den simulierten 5 thermischen Zyklen für die Lötstelle markiert in a)

## 1.4 AP4: Demonstrator-Herstellung

Ziele des AP4:

- Integration des CNT-Sensors im ASIC in den integrierten PHM-Steuergerätdemonstrator;
- Integration aller Smart-Objekte (Canary-Element, Canary-Sensor, Sensoren) in den PHM-Steuergerätdemonstrator.
- Prüfungen unter rauen Umgebungsbedingungen (z. B. durch Temperaturwechselprüfung), gleichzeitige Messungen durch CNT und andere Sensoren
- Detaillierte FEM-Analyse des integrierten PHM-Steuergerätdemonstrators um Metamodellierung zu ermöglichen
- Entwicklung eines Metamodells und datengetriebenen PHM Algorithmus, basierend auf den Daten der Sensoren und Canary-Elementen und Sensoren.
- Die Integration des PoF-Modells (Physics of Failure), des Metamodells und des datengetriebenen PHM-Ansatzes in einen hybriden PHM-Ansatz, auf dessen Grundlage eine Reihe lokaler und globaler Gesundheitsindikatoren extrahiert werden sollen. Die Metamodell- und datengetriebenen Algorithmen, der hybride PHM-Ansatz sowie die Gesundheitsindikatoren werden iterativ verfeinert.

### 1.4.1 Design und Herstellung der lokalen integrierten PHM-Steuergerätdemonstratoren

RB hat zwei Demonstratoren vorbereitet:

**Integrated Power Brake** - wir haben ein Layout des derzeit in Produktion befindlichen ABS-Systems (für hochautomatisiertes Fahren) modifiziert und mit iForce-Sensor in der neuen Bauform QFNmr 10x10 (und Feuchtigkeitssensoren) adaptiert (Abb. 26). Die Integrated Power Brake (IPB) ist eine vakuumunabhängige, elektrohydraulische Bremsanlage, die die Funktionen der Bremskraftverstärkung und des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) in einem einzigen Gerät vereint. Sie besteht aus einem elektronischen Steuergerät (ECU), einer Hydraulikeinheit und einem Elektromotor und ist im Motorraum an der Stirnwand des Fahrzeugs montiert. Die Hauptfunktion der IPB besteht darin, das Fahrzeug durch Druckaufbau in den Radbremszylindern zu verzögern. Bei Betätigung des Bremspedals berechnet das Steuergerät mit Hilfe integrierter Sensoren den Bremswunsch des Fahrers. Die Integrated Power Brake entkoppelt die beiden Bremskreise vom Bremspedal und stellt die Verbindung zum Pedalgefühlssimulator her. Gleichzeitig errechnet das Steuergerät die Steuersignale für den Elektromotor. Der Elektromotor erzeugt über ein Getriebe die Bewegung des Hydraulikkolbens. Der dabei entstehende Hydraulikdruck wird über die Bremsleitungen auf die Radbremsen übertragen. Neben den standardmäßigen Teilbremsmanövern kann das System auch fortschrittliche und hochdynamische Anti-Blockier-Regelungsmanöver (ALC) durchführen.

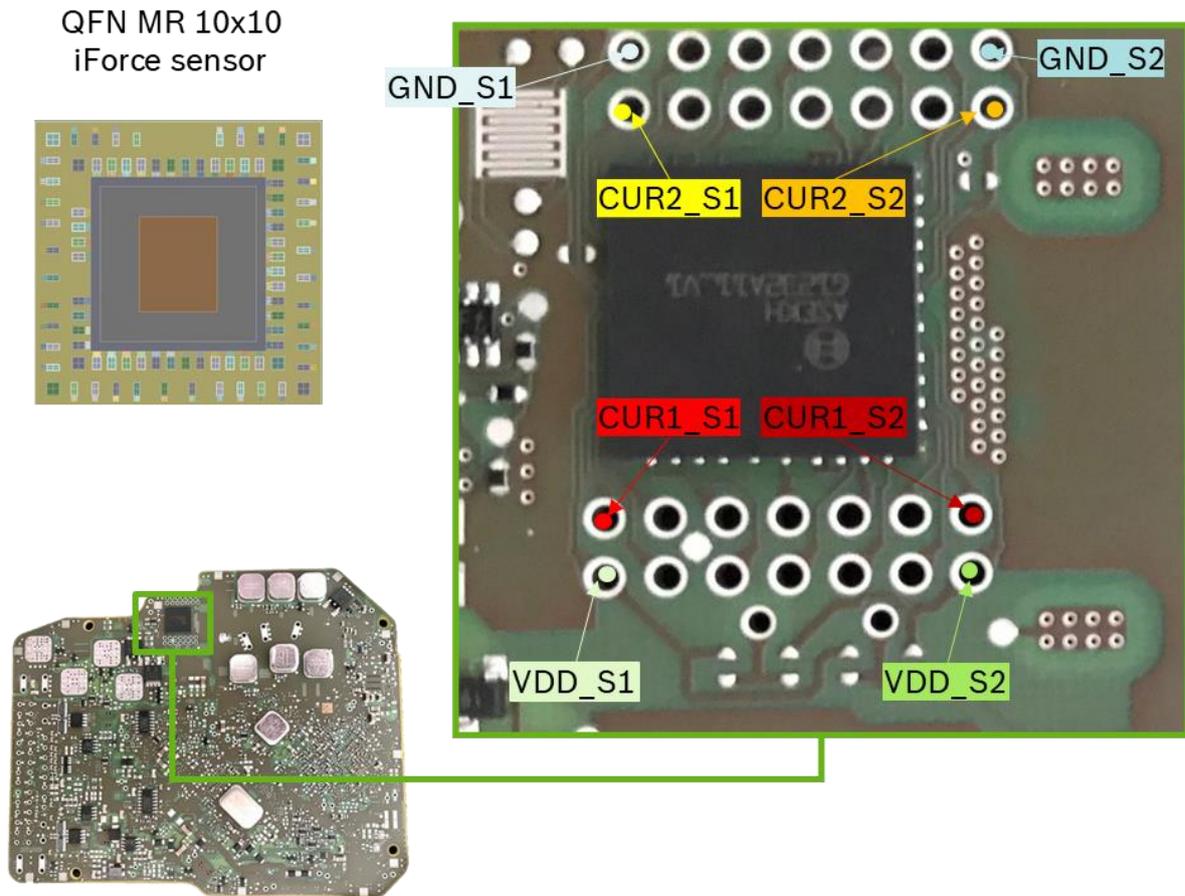


Abbildung 26: Layout des IPB mit dem iForce sensor in QFN MR 10x10

- Der zweite Demonstrator, der in der smartSTAR entwickelt wurde, ist das **Kameramodul** (Abb. 27). Unsere Untersuchung konzentrierte sich darauf, den optimalen Standort für die ASICs zu finden. Zu diesem Zweck haben wir einen smartASIC mit iForce-Sensor verwendet, der in einem QFN MR 10x10 gekapselt ist. Wir waren in der Lage, den Spannungszustand im Bauteil während des Zuverlässigkeitstests zu überwachen. In dem Modul hatten wir fünf Komponenten an verschiedenen Stellen platziert. Ziel war es, die optimale Position zu finden.

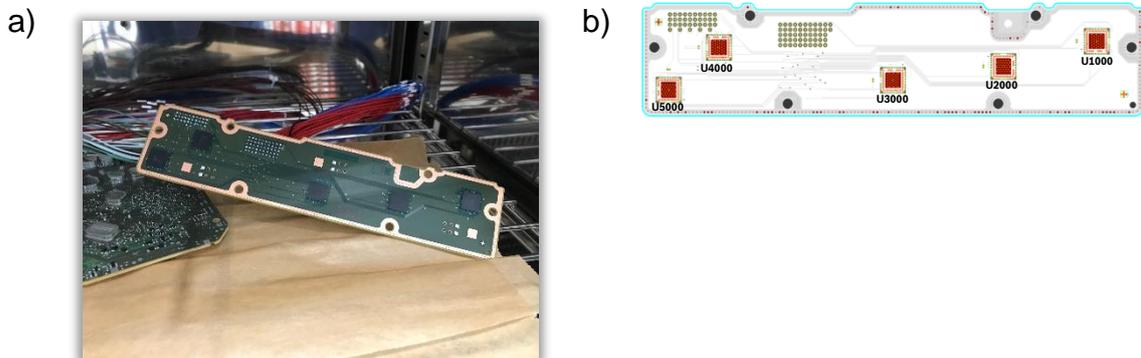


Abbildung 27: Kamera Demonstrator

Die Lötstellen wurden während des beschleunigten Tests unter Verwendung von Daisy Chains (Abb. 28) in-situ überwacht (10 channels). So konnten wir feststellen, welche Lötstellen bei allen untersuchten Geräten zuerst versagten.

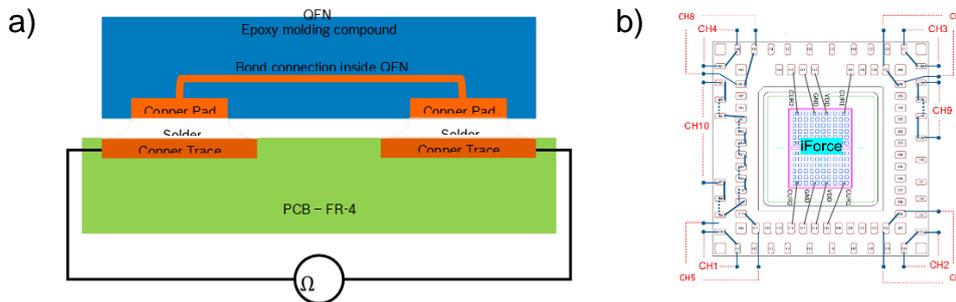


Abbildung 28: Konzept der Daisy-Chain-Überwachung

#### 1.4.2 Demonstratoren unter rauen Umgebungsbedingungen

Um die Beanspruchung des QFN-Gehäuses in der Endanwendung zu verstehen, haben wir eine Reihe von Experimenten in verschiedenen Montagephasen durchgeführt. In der Regel kann die Zuverlässigkeitsbewertung auf Komponenten-, Leiterplatten- und Systemebene unterteilt werden. Jeder dieser Tests hat einen etwas anderen Schwerpunkt. Die Zuverlässigkeitsprüfung auf Komponentenebene konzentriert sich in der Regel auf die Zuverlässigkeit der integrierten Schaltkreise und das Zusammenspiel der Chipgehäuse. Auf Platinen-Ebene liegt der Schwerpunkt typischerweise auf der Verbindungstechnologie wie Lötstellen. Auf Systemebene konzentrieren wir uns auf die Funktionalität der gesamten Baugruppe mit mehreren verschiedenen elektronischen Komponenten. Soweit wir wissen, wurde bisher noch nicht über eine Untersuchung des Verlaufs des Spannungszustands in elektronischen Komponenten über die gesamte Baugruppe in Kombination mit einer Zuverlässigkeitsbewertung berichtet. Dies ist die Hauptmotivation für unsere Arbeit.

Wir haben den piezoresistiven Stresssensor im QFN-Gehäuse in ein voll funktionsfähiges elektronisches Steuergerät integriert (Abb. 29a). Wir haben den Spannungszustand während verschiedener Zuverlässigkeitstests überwacht und diese miteinander verglichen. Unsere Untersuchung beginnt mit der nackten Leiterplatte (Abb. 3a). Wir haben den Belastungszustand für fünf verschiedene Proben aufgezeichnet. In der nächsten Phase wurden 3 elektronische Steuereinheiten (Abb. 29b) in einem Kunststoffgehäuse mit dünnem Metalldeckel montiert. Die dritte Stufe unseres Experiments war die Untersuchung des Spannungszustands während der Zuverlässigkeitsprüfung der kompletten mechatronischen Baugruppe (Abb. 29c). Zu diesem Zweck verwendeten wir eine der drei elektronischen Einheiten, die im vorherigen Schritt getestet wurden. Wir schlossen unsere Messungen ab, indem wir die Spannungen im QFN-Gehäuse einer IPB im Auto aufzeichneten (Abb. 29d).

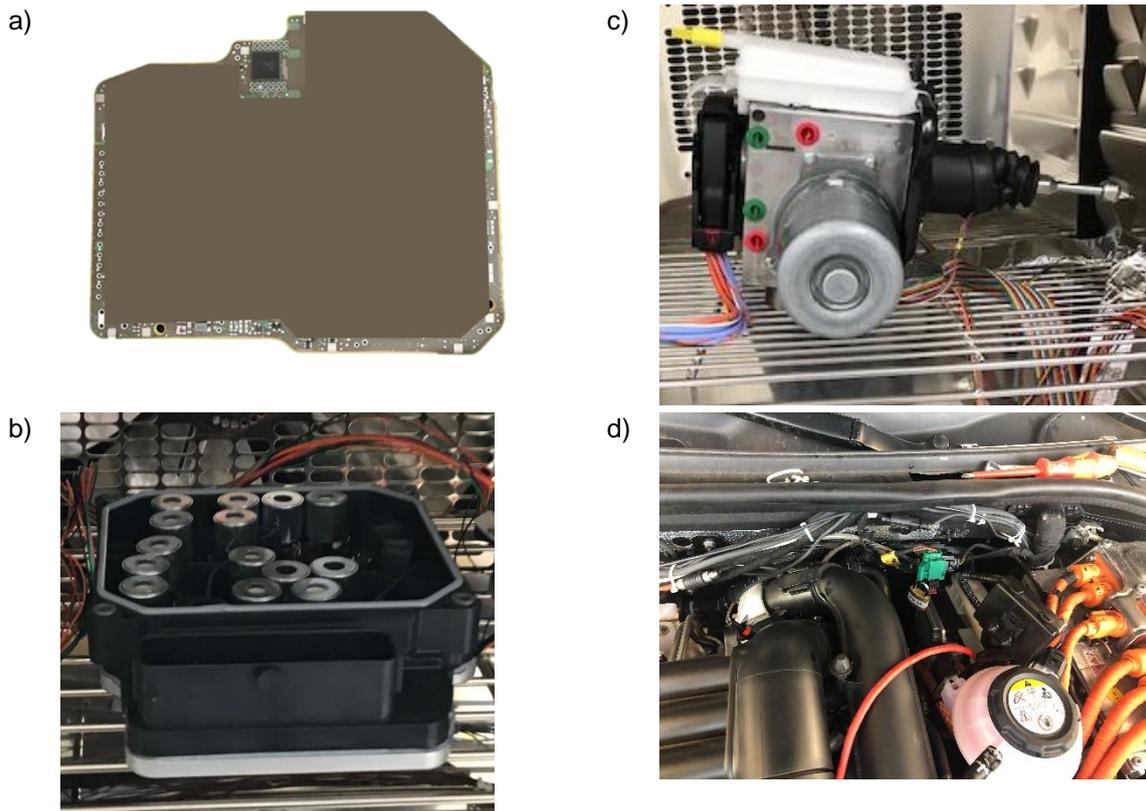


Abbildung 29: Untersuchtes Testobjekt a) Platine, b) ECU, c) mechatronisches System, d) im Fahrzeug installierter IPB

Unsere Untersuchungen gliedern sich in zwei Teile. Im ersten Teil haben wir den Spannungszustand im QFN während passiver Temperaturzyklen untersucht. Wir haben Standard-Temperaturzyklen zwischen  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit einer Rampenrate von  $10\text{ K/min}$  und einer Verweildauer von 30 Minuten bei niedriger ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und hoher ( $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) Temperatur durchgeführt (Abb. 4). Wir haben für alle Tests denselben Temperaturhub verwendet. Ziel dieser Untersuchung ist es, zu prüfen, wie sich die Beanspruchung unter Berücksichtigung des Effekts der Leiterplatteneinschränkung durch das Gehäuse und des Effekts der thermischen Masse der untersuchten Testfahrzeuge verändert. Die Signale der Sensoren wurden mit der in Abb. 30 dargestellten Erfassungseinheit aufgezeichnet.

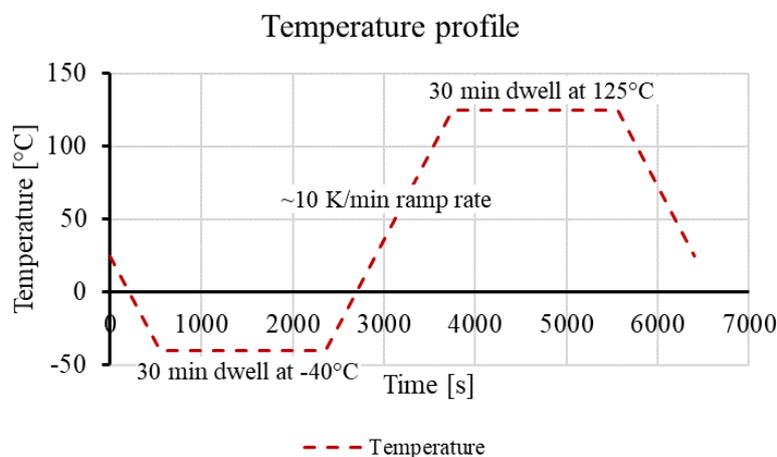
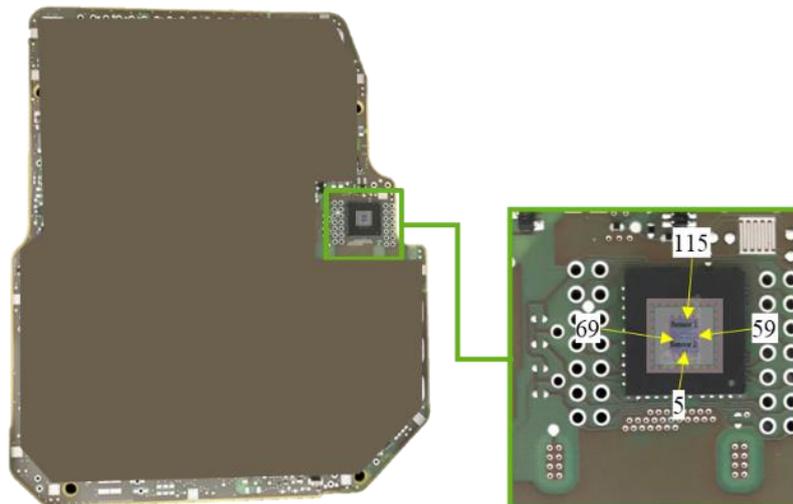


Abbildung 30: Untersuchtes Temperaturprofil

Im letzten Schritt wurde das funktionsfähige IPB-Prüfsteuergerät mit dem QFN-Gehäuse in unser angeschlossenes Bremssystem-Anwendungsfahrzeug eingebaut, wie in Abb. 3d dargestellt. Die Datenerfassungseinheit für die iForce-Sensorsignale ist über CAN-Kommunikation mit der Connectivity Unit verbunden. Nach der Vorverarbeitung werden die Daten an die vollständig verwaltete IoT-Cloud übertragen. Die Datenerfassung kann auf eine Abtastrate von bis zu 10 ms eingestellt werden. Für unseren Anwendungsfall haben wir die Abtastrate auf 10 Sekunden eingestellt. Für die Analyse werden die Daten in einer NoSQL- oder MongoDB-Datenbank abgefragt. Die Analyseergebnisse werden über Dashboards und automatische Berichte visualisiert. Auf diese Weise können wir wertvolle Erkenntnisse über die thermischen Spannungen im QFN-Gehäuse sammeln.

In Abb. 31 sind die Stellen der Belastungszellen 5, 59, 69 und 115 dargestellt, an denen wir die Ergebnisse für einen Temperaturzyklus extrahiert und zur Veranschaulichung der Unterschiede zwischen den verschiedenen untersuchten Testvehikeln verwendet haben.



*Abbildung 31: Lage der Stresssensorzellen*

Abb. 32 bis Abb. 36 zeigen die typische Verteilung der Spannungsdifferenz auf der Oberseite des Siliziumwürfels. Die Skala der Spannung ist für alle Abbildungen (Abb. 32 bis Abb. 36) gleich. Typischerweise befindet sich der Höchst- oder Mindestwert der Spannung am Rand des Siliziumchips, wo sich die Zellen 5, 59, 69 und 115 befinden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass an diesen Stellen in der Regel der Unterschied zwischen der in der Ebene wirkenden Komponente der Spannung in X- und Y-Richtung am größten ist. In den Ecken des Siliziums sind die Spannungen in X- und Y-Richtung fast gleich, theoretisch sollten die Spannungen nahe bei 0 liegen. In unserer Untersuchung ist der von uns verwendete Siliziumwürfel rechteckig, was dazu führt, dass die Spannungen entlang der X-Achse des Siliziums gegenüber der Y-Achse der Spannungen überwiegen. Wir können feststellen, dass in allen untersuchten Fällen die Spannung bei allen Temperaturen ihren Höchstwert entlang der Kante erreicht, wo sich die Zellen 59 und 69 befinden. Bei  $-40^{\circ}\text{C}$  erreicht die Spannung bei PCB nur bei niedriger Temperatur (Abb. 32a) ihren Höchstwert entlang der Kante, an der sich die



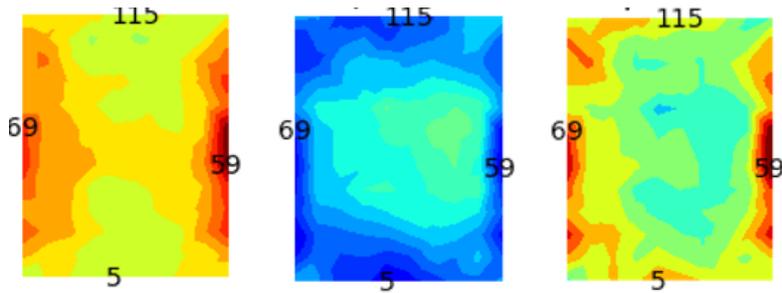


Abbildung 33: Stressverteilung auf dem Silizium-Die in ECU  
a) @-40°C, b) @125°C, c)  $DT=(125-(-40))$  °C

In Abb. 34 ist die Stressverteilung für das Mechatroniksystem dargestellt. Abb. 34a Stress bei -40°C, Abb. 34b Stress bei 125°C, Abb. 34c Stressdifferenz zwischen hoher und niedriger Temperatur. Wir sehen, dass die Spannungsverteilung anders ist als in den beiden vorherigen Fällen. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass wir eine andere Einheit als die zuvor gezeigte verwendet haben, und die Änderungen könnten durch die unterschiedlichen Prozesstoleranzen verursacht sein. Nichtsdestotrotz sind die Haupteffekte ähnlich, der maximale Spannungsunterschied besteht an den Kanten des Chips. In der Mitte des Chips ist der Stressunterschied etwas geringer.

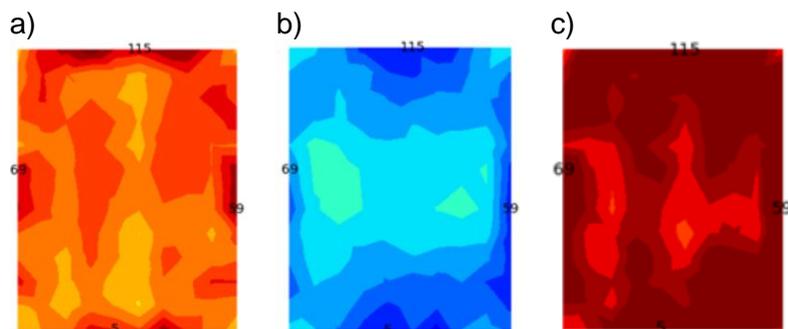
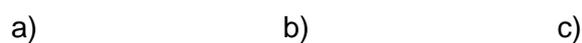


Abbildung 34: Stressverteilung auf dem Siliziumchip in einer mechatronischen Baugruppe  
a) @-40°C, b) @125°C, c)  $DT=(125-(-40))$  °C

Schließlich bauten wir eine IPB-Einheit in das Fahrzeug ein und untersuchten die Stressverteilung im Feldbetrieb. Abb. 35 zeigt die Stressverteilung für den im Auto montierten IPB. Abb. 35a zeigt die Stress bei der gemessenen Mindesttemperatur, Abb. 35b die Stress bei der gemessenen Höchsttemperatur und Abb. 35c die Stressdifferenz zwischen hoher und niedriger Temperatur. Im Feldbetrieb ist die Stressdifferenz deutlich geringer. Dies ist auf die geringeren Temperaturschwankungen zurückzuführen, die zu einem geringeren Anstieg der Stresswerte führen.



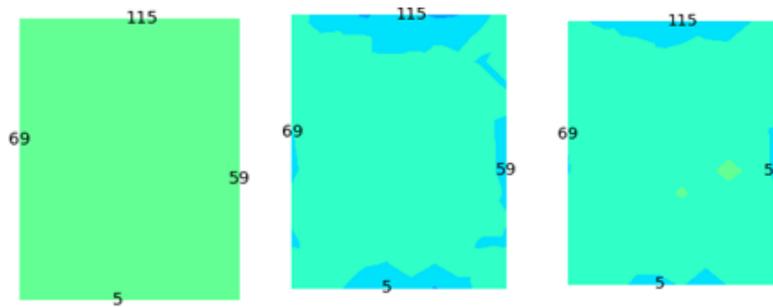


Abbildung 35: Stressverteilung auf dem Siliziumchip im Auto a) @ $T_{min}$  °C, b) @ $T_{max}$  °C, c)  $DT=(T_{max}-T_{min})$  °C

Abb. 36 zeigt die Stress über die Zeit, die für vier Stressmesszellen aufgezeichnet wurde: 5, 59, 69, 115. Die Experimente beginnen bei Raumtemperatur. Während des Experiments auf Platinebene (Abb. 36a) sind die gemessenen Spannungen relativ gering. Die Spannung erreicht relativ schnell einen Maximal- oder Minimalwert.

Wenn die Leiterplatte in das Gehäuse eingebaut wird (Abb. 36b), steigt die Stressbelastung leicht an, wie in den obigen Abbildungen zu sehen ist. Es ist zu erkennen, dass das Erreichen der Maximal- bzw. Minimaltemperatur für das Steuergerät etwas mehr Zeit in Anspruch nimmt, allerdings gibt es eine deutliche Verweilzeit bei der hohen Temperatur.

Abb. 36c zeigt die für vier untersuchte Zellen aufgezeichnete Stress für das gesamte mechatronische System. Auch hier sind die Stresswerte recht vergleichbar. Aufgrund der großen thermischen Masse des mechatronischen Systems wird jedoch für das Erreichen der Mindest- oder Höchsttemperatur deutlich mehr Zeit benötigt.

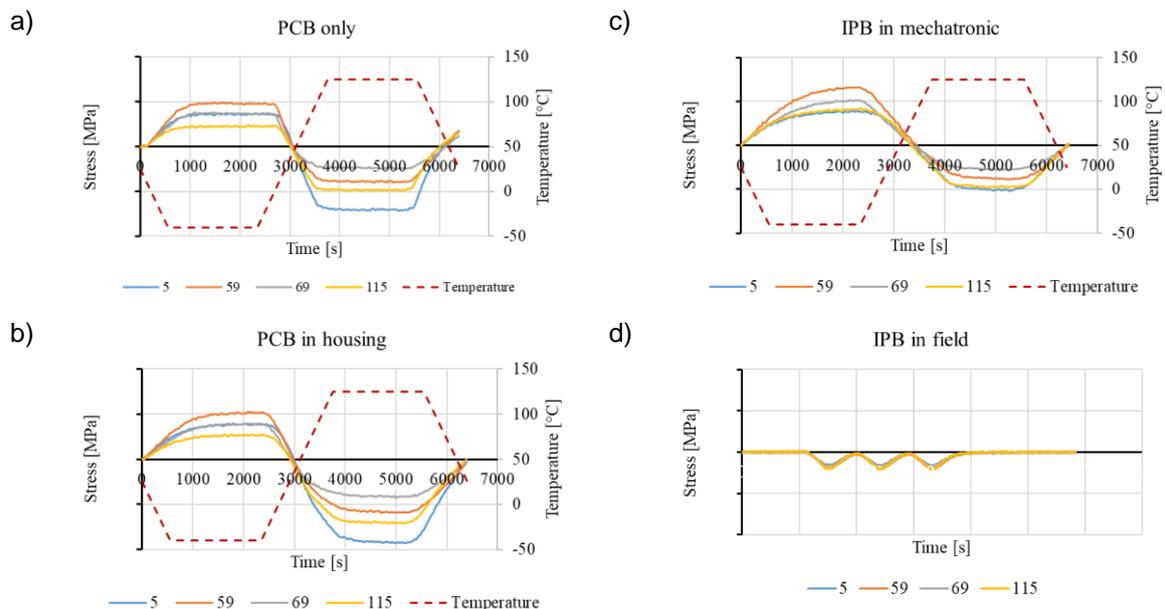


Abbildung 36: Aufgezeichnete Stresswerte während fünf Temperaturzyklen a) Platine allein, b) Steuergeräteebene, c) in mechatronischer Baugruppe, d) im Fahrzeug (im Feldeinsatz)

Aus Sicht der Zuverlässigkeit können wir zwei Haupteffekte erkennen:

- Bei exakt gleichem Temperaturprofil erhöht sich die Stressdifferenz auf dem Stress-Chip nur geringfügig, wenn wir verschiedene Baugruppen vergleichen.
- Fügt man dem Steuergeräte- oder Mechatronik-Gehäuse Designelemente, wie z.B. Lötstellen, hinzu, so wird die Schädigung in Designelementen wie z.B. Lötstellen eher durch Ermüdung (im Fall von Mechatronik) als durch Kriechen (im Fall von PCB) dominiert. Bei freistehenden Leiterplatten kann das Kriechen des Lötmittels aufgrund der höheren Temperaturen während der Verweilzeit verstärkt werden. Wenn das komplette mechatronische System getestet wird, gibt es weniger Zeit für das Kriechen, aber etwas höhere Stresswerte zwischen Minimal- und Maximaltemperatur → die inelastische Verformung in der Lötstelle wird durch Stressspitzen angetrieben.

### 1.4.3 Adaptation und Fertigung des zentralen PHM-Steuergeräts

Für die Ansteuerung des smartASIC wurde ein Mother-/Daughter-Board Konzept entwickelt. Ziel war es, unterschiedliche Stress-Sensor Applikationen mit derselben Hardware (Raspberry-PI 4, AD-Board + Motherboard) zu adressieren, aber unterschiedliche Anschlussmöglichkeiten und Sockel (Daughter-Board) nutzen zu können.

Sowohl Prototypen als auch finale Platinen wurden erstellt, designed und gefertigt (Abb. 37).

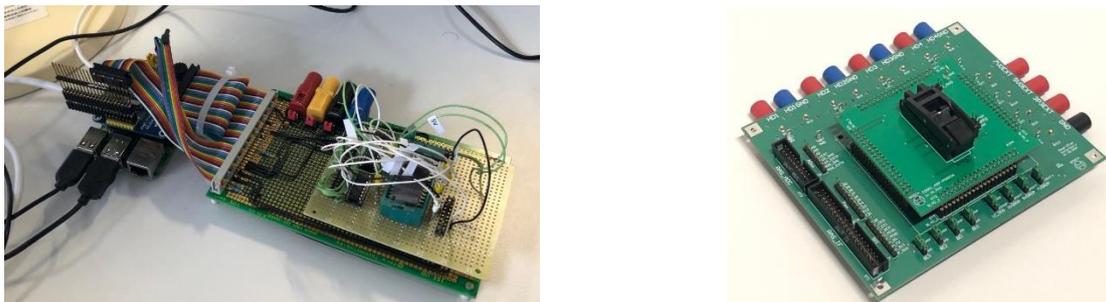


Abbildung 37: Links Prototyp und rechts finale Platine der Acquisition-Unit

Die entwickelte Software ermöglicht es, eine große Anzahl von Sensoren seriell zu messen (Abb. 38).

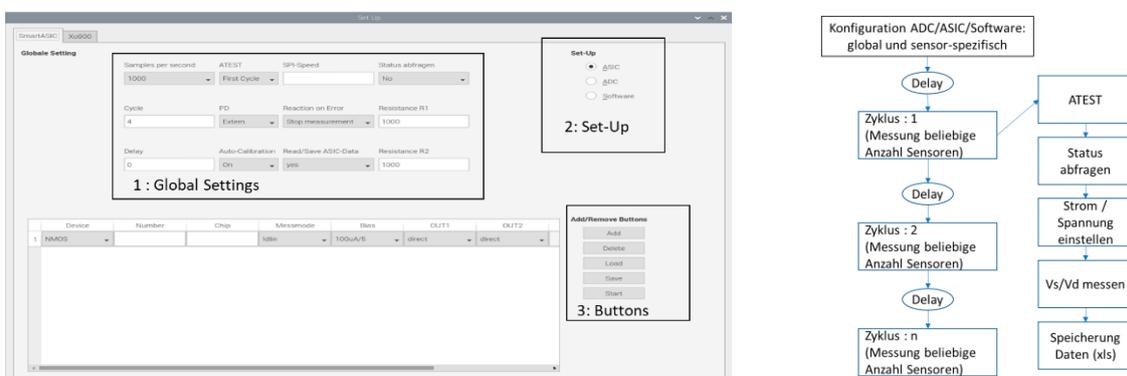


Abbildung 38: GUI der Acquisition-Unit (links) und Darstellung des Messablaufs (rechts)

Bei der intern als „Acquisition-Unit“ bezeichneten Messlösung war die Bewertung der Datenqualität bzw. der Genauigkeit der Messdaten von zentraler Bedeutung.

Hierzu war eine Erweiterung der Acquisition-Unit auf andere Testchips notwendig, welche mit kalibrierten Referenzmessgeräten gemessen werden können. Diese anderen Testchips verfügen beispielsweise nicht über Referenz-Stromquellen. Das verwendete AD/DA-Messboard hingegen erlaubt nur eine Spannungs-, nicht eine Stromregelung.

Diese Stromregelung wurde über variabel definierbare Shunt-Widerstände und Newton-Approximationsmethodik realisiert (Abb. 39).

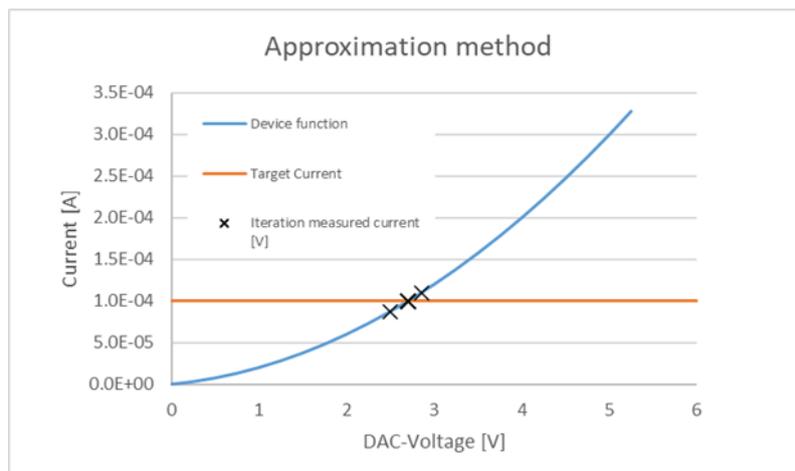


Abbildung 39: Stromregelung per Newtonscher Approximationsmethode

Außerdem sind beide internen DA-Spannungsversorgungen direkt an die USB-Stromversorgung des Raspberry gekoppelt, welche unzureichende Präzision hat. Diese Fehler wurden durch Gegenmessung der Versorgungsspannung mittels des präziseren ADCs korrigiert.

Der Vergleich zwischen Messergebnissen von Acquisition-Unit und Referenzmessgerät verlief positiv. Alle für die Messung von mechanischem Stress notwendigen Parametern zeigten eine gute Korrelation bzw. ausreichende Genauigkeit (Abb. 40).

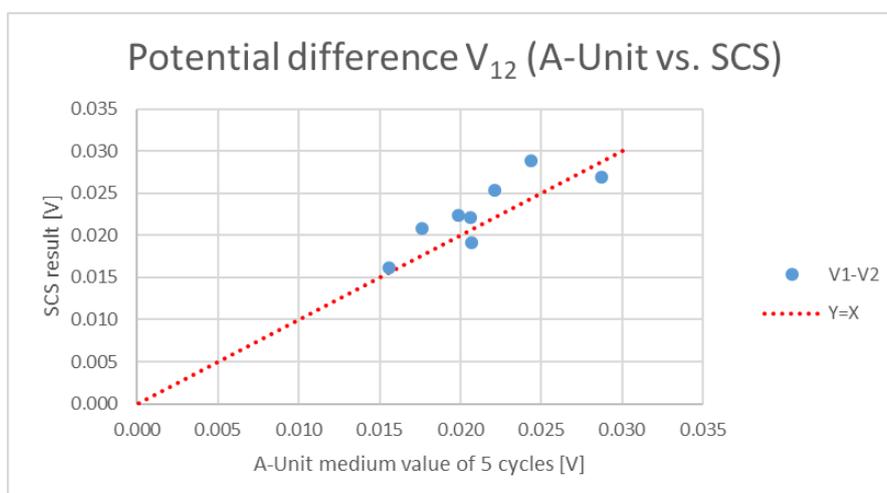


Abbildung 40: Korrelation zwischen hochpräzisen Halbleiter-Analyzer zur Ergebnissen der Acquisition-Unit, am Beispiel einer Spannungsdifferenz einer Wheatstonebrücke

Stressabhängige N- bzw. PMOS-Messbrücken können mit einer Genauigkeit von  $<4.5\text{mV}$  gemessen werden, was einer Genauigkeit bei einer Stressmessung von etwa  $1\text{MPa}$  entspricht. Diese Unterschiede sind dabei sogar noch überlagert von leichten Stress-Unterschieden, da zwischen den Systemen unterschiedliche Sockel verwendet werden mussten.

- Temperaturdioden erreichten eine Reproduzierbarkeit von  $<1\text{mV}$ , wodurch Temperaturunterschiede von  $<0.5\text{K}$  aufgelöst werden können.

Die Messung von CNTs mittels der Acquisition-Unit war bis zum Projektende mangels Verfügbarkeit entsprechenden Materials nicht möglich. Jedoch wurden Mess-Setups für den SCS4200 Halbleiter-Analyzer und Dokumentationen für die Ansteuerung der ASICs an die TU-Chemnitz zur Verfügung gestellt.

#### 1.4.4 Entwicklung eines Metamodell-Algorithmus für PHM auf Systemebene

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten BLR-Tests wurden in der FEM-Simulation abgebildet. Dabei, ermöglichen die thermomechanischen Simulationen Einblick in die Größenordnung und Verteilung lokaler Spannungszustände an der Chip-Oberfläche, bzw. Sensorpositionen sowie gleichzeitiger Beanspruchung in Lötstellen des QFN-Sensorpackages. Dies ermöglicht die simulative Datengenerierung, die erweitert mit Simulationen variierender geometrischer Toleranzen, eine umfassende Datenbasis für die Erstellung von Metamodellen und virtuelle DoEs darstellt (Abb. 41).

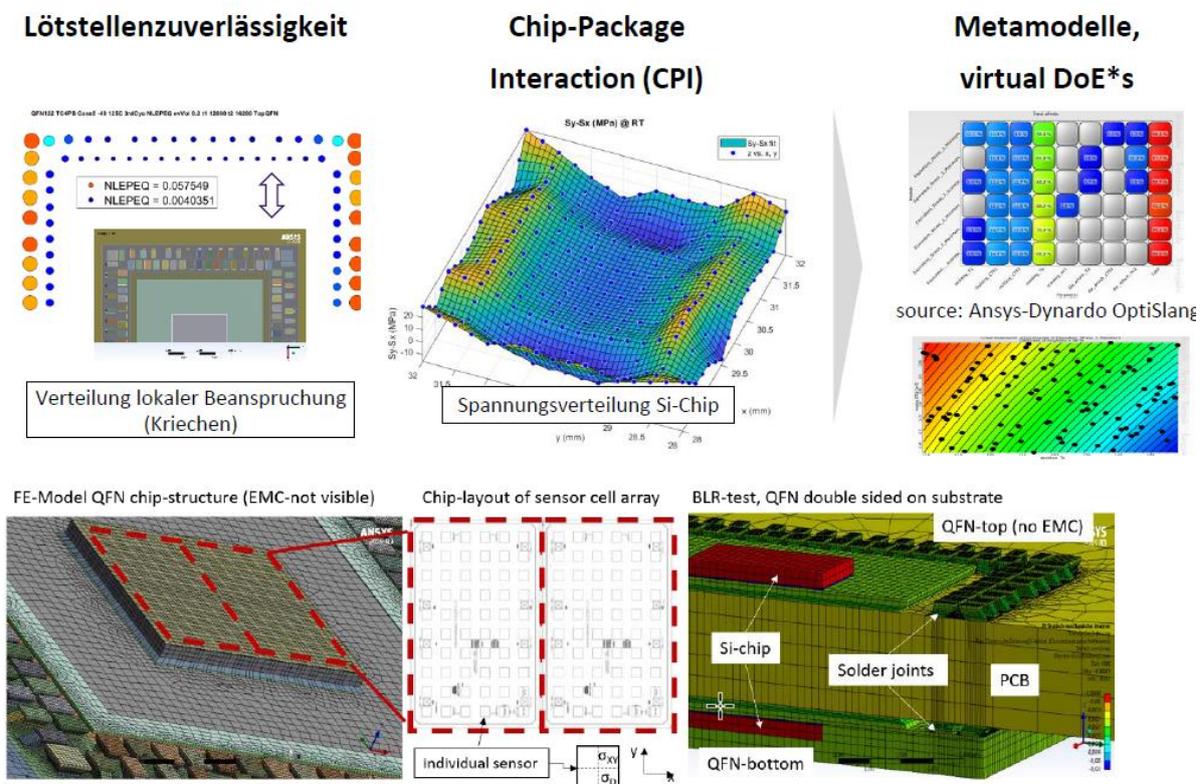


Abbildung 41: FEM-Simulationsmodell (unten) des multirow-QFN packages, die den Spannungssensorchip enthalten mit doppelter Bestückung auf Leiterplatte als Erprobungsmuster für den BLR-Experiment. Simulative Ermittlung der

*Lötstellenbeanspruchung und Spannungsverteilung an der Chip-Oberfläche. Simulationsergebnisse genutzt zur Metamodellierung und virtuelle DoEs.*

Die verwendeten BLR-Testmuster bestehen aus bestückten PCB-Boards, die in einer Biegevorrichtung eingebaut und im Thermowechselschrank thermisch und mechanisch zyklert wurden (s. Abb 42). Dabei werden gezielt unterschiedliche Kombinationen des lokalen Biegezustands des QFN-Packages in Abhängigkeit der Temperatur realisiert („freie Leiterplatte“, „In-Phase“ und „Out-of-Phase“).

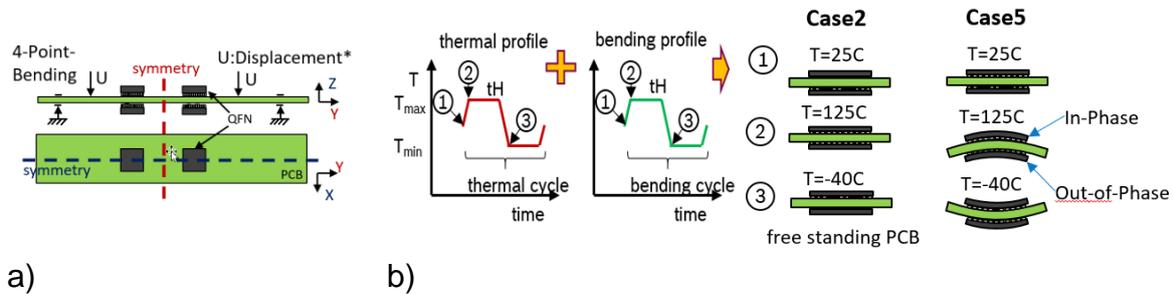


Abbildung 42: a) Randbedingungen der thermomechanischen Simulationen, die der überlagerten 4-Punkt-Biegung und thermischer Zyklierung in den BLR-tests abbilden. b) Variantenkonfigurationen einer thermischen Zyklierung (freie Leiterplatte „Case2“) und überlagerter Biegung mit dazugehörigen lokalen Temperatur-Biegekonfigurationen einzelner QFN-packages definiert als jeweils „In-Phase“ bzw. „Out-of-Phase“ Varianten.

Im Folgenden werden einzelne Ergebnisse zur Lötstellenbeanspruchung erläutert. Die in der FEM gewonnenen Resultate zeigen eine starke Abhängigkeit der Lötstellenbeanspruchung von der jeweiligen Position der Lötstelle im QFN-Package sowie jeweiliger Biegezustand (Abb. 43).

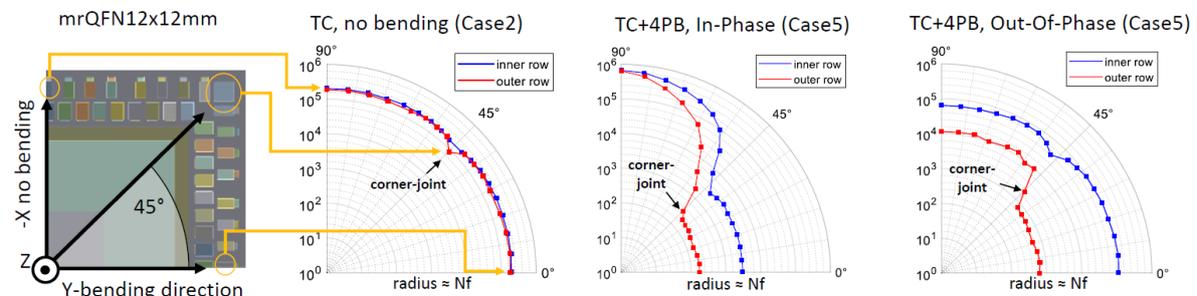


Abbildung 43: Simulativ ermittelte Lötstellenbeanspruchung und dazugehörige Coffin-Manson-Plots für die qualitativen Visualisierung der Positionsabhängigkeit einzelner Lötstellen, die unter drei BLR-Testkonfigurationen (skizziert in der oberen Abbildung) ermittelt wurden. Die Simulation umfasst 5 thermo-mechanische Zyklen. Die Auswertung der akkumulierten Kriechdehnung wurde im letzten Zyklus für das gesamte Volumen der jeweiligen Lötstelle durchgeführt.

Die höchste Beanspruchung im Fall einer reinen thermischen Belastung („Case2“ – freie Leiterplatte) wird an den Ecklötstellen beobachtet. Im Gegensatz dazu, im Fall einer überlagerten Biegung, werden die Lötstellen der äußeren Reihe quer zu der Biegerichtung stärker beansprucht, was einen früheren Ausfall erwarten lässt (Verschiebung in Richtung des Ursprungs des Polarplots). Die stärkste thermomechanische Belastung ist im Fall des „In-Phase“-Tests („Case5“) zu verzeichnen, was auf die spezielle Biegung-Temperatur Konfiguration von lateralem Zug des Packages bei hoher Temperatur zurückgeführt werden kann.

### 1.4.5 Entwicklung eines datengetriebenen PHM-Ansatzes

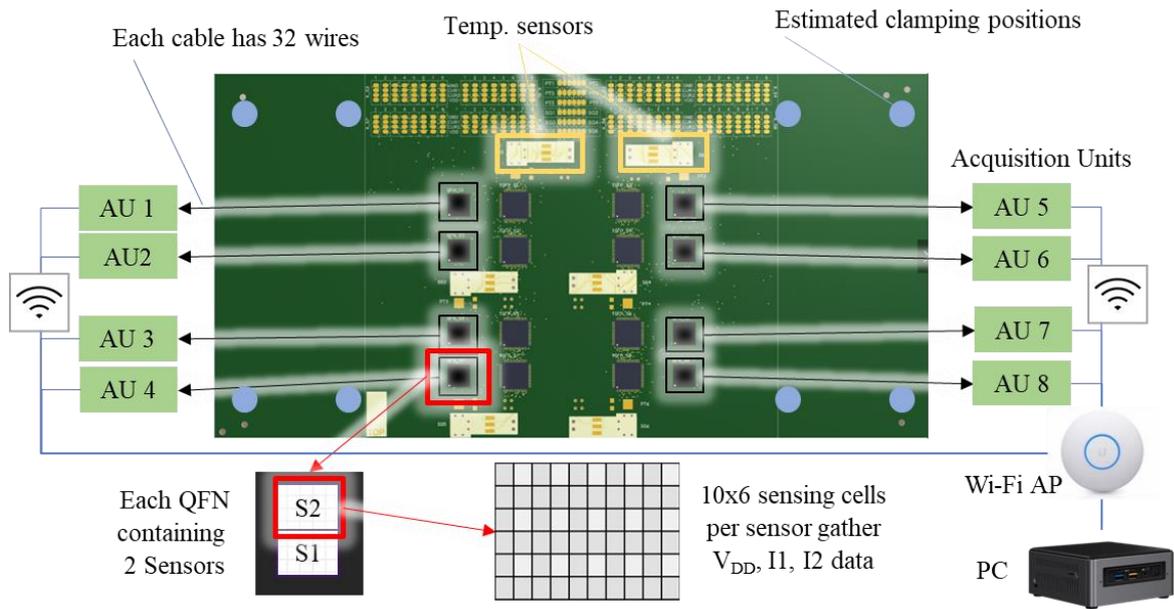


Abbildung 44: Data Acquisition Setup für datengetriebenen PHM-Ansatz

Dieser Punkt fand im Rahmen der Dissertation von Daniel Riegel statt. Die Acquisition Units, die u.a. aus einem Microcontroller und einem ADC bestehen, rufen analoge Signale von den Sensoren auf den QFN Komponenten ab und wandeln diese in digitale Signale um. Die digitalisierten Signale werden über Wi-Fi an eine zentrale PHM-Einheit gesendet. Die Netzwerkinfrastruktur besteht aus einem Wi-Fi Router zusammen mit einem Wi-Fi Access Point, der benötigt wird, um mit >100 Acquisition Units gleichzeitig zu kommunizieren. Die zentrale PHM-Einheit wird als PC implementiert, welcher einen MQTT-Broker hostet. Es wird sowohl eine Software in C++ für Arduino entwickelt, die das Senden der Daten mittels MQTT-Protokoll erlaubt, als auch ein Python-Skript für den PC, der das Empfangen und verarbeiten der Sensordaten ermöglicht. Die prozessierten Rohdaten werden zunächst in einer SQLite-Datenbank gespeichert, die täglich mittels Backup gesichert wird. Auf die gesicherten Datenbanken wird mit weiteren Skripten zugegriffen, um die Rohdaten Lastzyklen aus den Experimenten zuzuordnen. Anschließend werden die pro Zyklus extrahierten Daten nach Zyklusnummer in eine weitere Datenbank gespeichert.

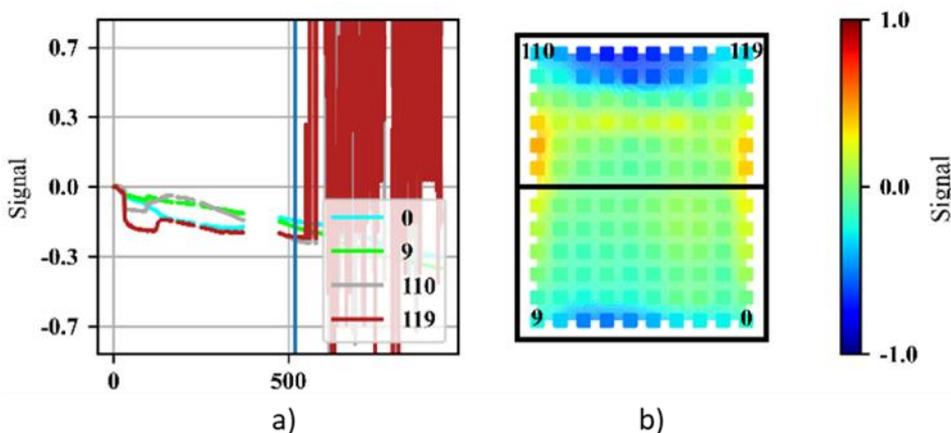


Abbildung 45: Zeitliches und räumliches Mapping von Sensordaten

Es wurde eine Python-App entwickelt, die Zyklusdaten sowohl im Zeitverlauf als auch räumlich (2D über die Sensoroberfläche verteilt) visualisiert. Abbildung 45 zeigt in a) den zeitlichen Verlauf von vier Stresssensorzellen mit der horizontalen Einheit in Zyklen. Die horizontale blaue Linie indexiert den Zyklus, dessen Signal in b) räumlich über die gesamte Sensoroberfläche dargestellt wird. In b) lassen sich vier beliebige Zellen selektieren, die dann in a) wiederum zeitlich dargestellt werden. Die App erlaubt eine dynamische Visualisierung der 2D-Daten über die Zyklen hinweg. Die gewonnenen Daten erlauben es den Stresssignalverlauf zu charakterisieren und Simulationsmodelle zu validieren.

#### 1.4.6 Entwicklung des hybriden PHM-Ansatzes und Extraktion von Gesundheitsindikatoren

Dieser Punkt entstand im Rahmen der Dissertation von Daniel Riegel. Ein hybrider PHM-Ansatz besteht aus datengetriebenen Elementen in Kombination mit PoF. Die Grundlagen für den datengetriebenen Teil wurden in AP 4.5 durch die Aufzeichnung der Sensorsignale in einem beschleunigten Lebensdauertest geschaffen. Der PoF Teil wird durch Fehleranalyse und Simulation realisiert.

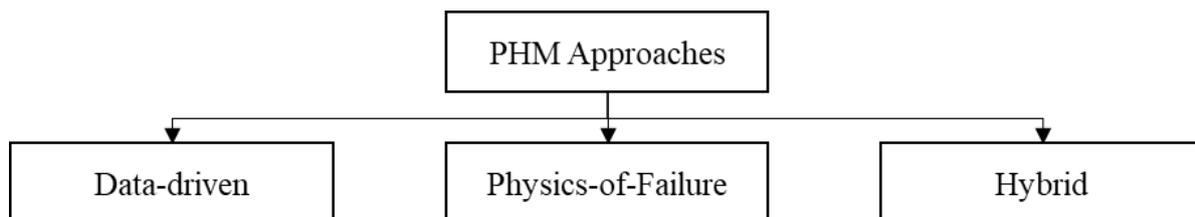


Abbildung 46: Hybrid-PHM Approach

Als Methoden in der Fehleranalyse kamen Röntgenaufnahmen, Ultraschallmikroskopie (SAM), Querschliffe und Dye-n-Pry zum Einsatz. Abbildung 47 vergleicht den Fehlermodus Delamination aufgenommen mittels SAM mit den Ergebnissen aus dem Dye-n-Pry-Test. Der Dye-n-Pry Test dient als gute Validierung für die SAM-Aufnahmen und belegt, dass Delamination sowohl zwischen Leadframe und Moldmasse, als auch zwischen Leadframe und Chip auftritt. Desweiteren erlaubt Dye-n-Pry die Evaluierung der Lötstellenschädigung unter dem Lichtmikroskop.

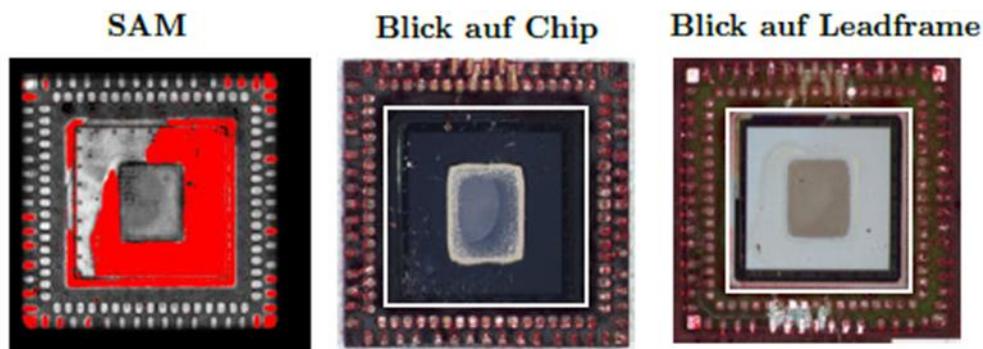


Abbildung 47: SAM Analyse verglichen mit Dye-n-Pry Ergebnissen.

Der Einfluss der Delamination auf das Stresssignal auf der Chipoberfläche wurde bereits in der Veröffentlichung auf der SSI-Konferenz gezeigt. Ebenso zeigen die Fehleranalysen, dass Lötstellen von Komponenten mit Delamination eine deutlich

höhere Schädigung aufweisen als Lötstellen von Komponenten ohne Delamination. Somit beschleunigt die Delamination das Versagen der Lötstellen im Lebensdauertest. Die Delamination bzw. das von ihr beeinflusste Sensorsignal wird daher im Rahmen der Dissertation von Riegel als Fehlerindikator festgelegt. Da sich die Sensorsignale unter gleichen Lastbedingungen nur ändern, wenn eine Schädigung eintritt erlauben sie die Bestimmung des Gesundheitszustandes.

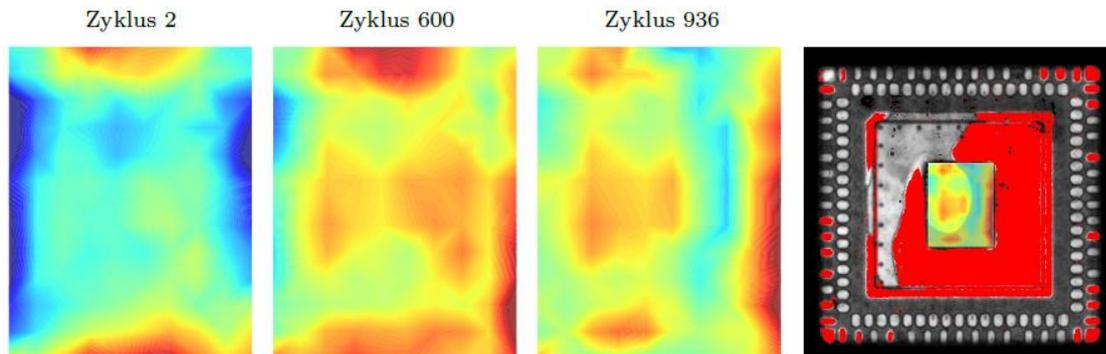


Abbildung 48: Einfluss von Delamination auf das Stresssignal

## 1.5 AP5: Technologie Validierung

Ziele des AP5:

- Ein Selbst-Test-fähiges System mit (stresserfassendem) iForce-ASIC-Sensor und in der finalen Phase ist ein integrierter ASIC mit „selbst-Test“-Funktionalität verfügbar
- Die Selbstdiagnose wird vollumfänglich den Vorteil der smarten Elektronik beweisen sowie ein Durchbruch hinsichtlich der Haltbarkeitstest im Rahmen des integrierten Gesundheitsmanagement ECU sein.
- Ableitung eines realistischen Validierungsszenarios, im welchem der Gesundheitsstatus durch die integrierte ECU mithilfe von Metamodellen und Gesundheitsindikatoren erfasst wird.
- Validierung des PHM-Ansatzes (bestehend aus Hardware und dem theoretischen Grundgerüst) basierend auf unabhängigen Messungen (neuartige Testergebnisse) sowie der Abschätzung der Genauigkeit der RUL
- Demonstration von Nutzungsszenarien für Metamodelle zur Abschätzung des Gesundheitsstatus an definierten Positionen des ECU sowie eine Adaptation der Lebensdauermodelle basierend auf den aktuellen Gesundheitsstatus und die Finalisierung der Gesundheitszustandsdefinition (durch Kombination von Sensor und „Frühausfall-Element“-Ergebnissen)

### 1.5.1 Validierung der Verhaltensmodellalgorithmen für PHM

Die Signale der iForce-ASIC-Sensoren werden mit dem in WP4.5 vorgestellten Setup erhoben und prozessiert. Ein Simulationsmodell der Leiterplatte wird angefertigt. Abbildung 49 zeigt das Viertelmodell, welches durch die Ausnutzung von Symmetrien deutlich weniger Rechenzeit benötigt. Das Simulationsmodell wird mit den gleichen Belastungen wie in den Experimenten beaufschlagt und liefert die zugehörigen Spannungen auf der ASIC-Oberfläche. Abbildung 50 zeigt die beiden Lastfälle der kombinierten Temperatur- und Biegezyklen, die in WP3.4 beschrieben wurden. Die Masterarbeit von Rapp, welche im Rahmen der Dissertation von Riegel entstand, beschäftigte sich mit der Implementierung von den in der Fehleranalyse gefundenen Schädigungen in das Simulationsmodell. Zur weiteren Reduktion der Rechenzeit wird hierbei auf die Submodellierung gesetzt (Siehe Abb. 51 und 52).

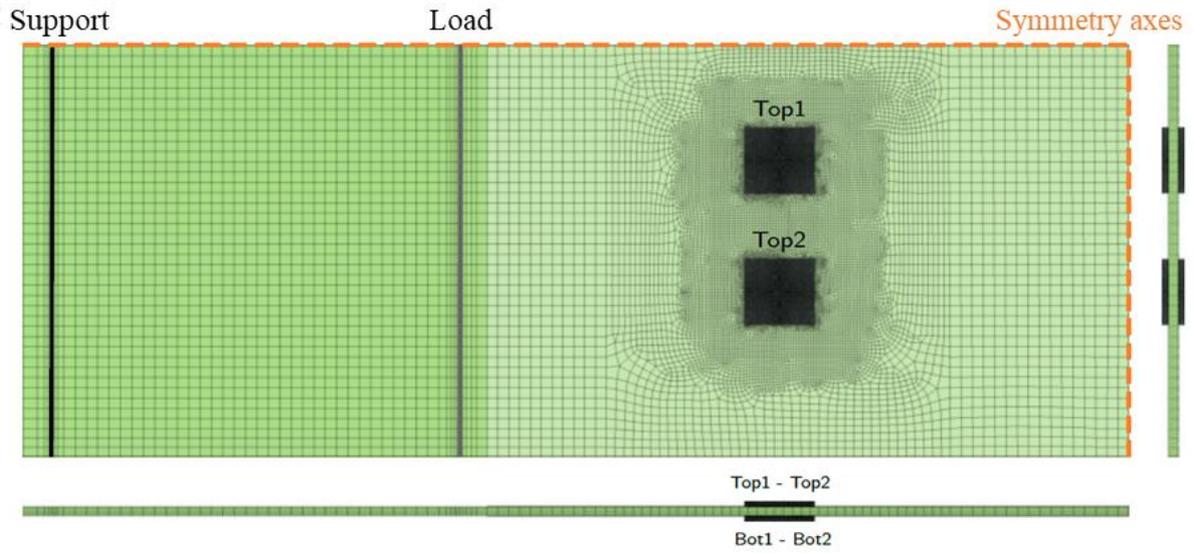


Abbildung 49: Simulationsmodell für den Lebensdauertest

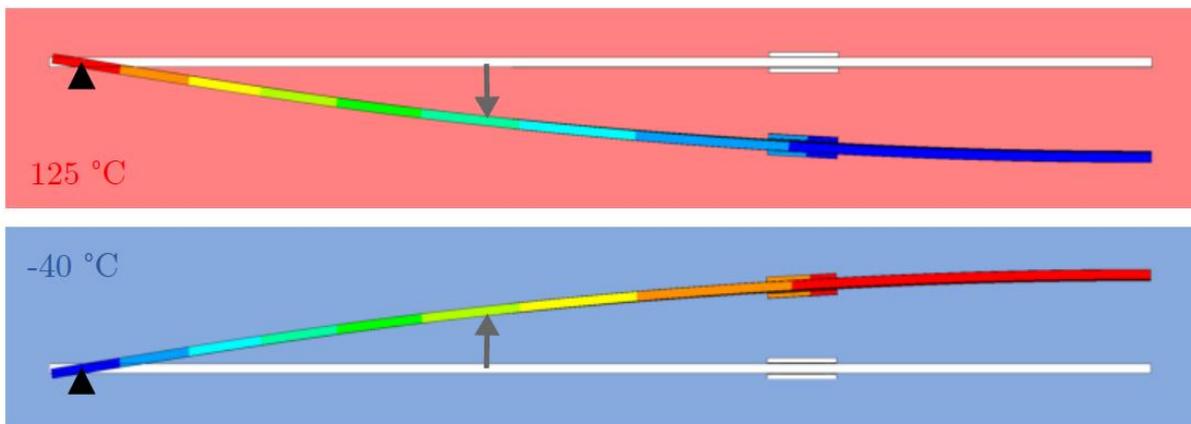


Abbildung 50: Simulierte Belastungen aus dem Temperatur- und Biegetest

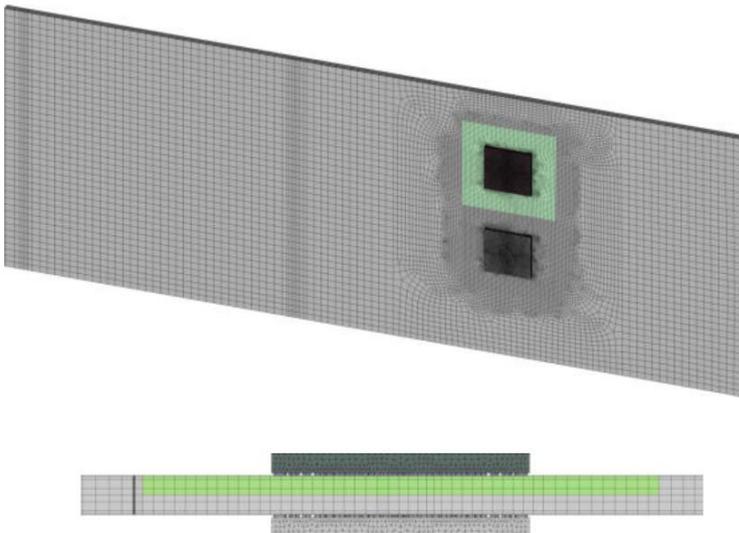


Abbildung 51: Definition eines Submodells

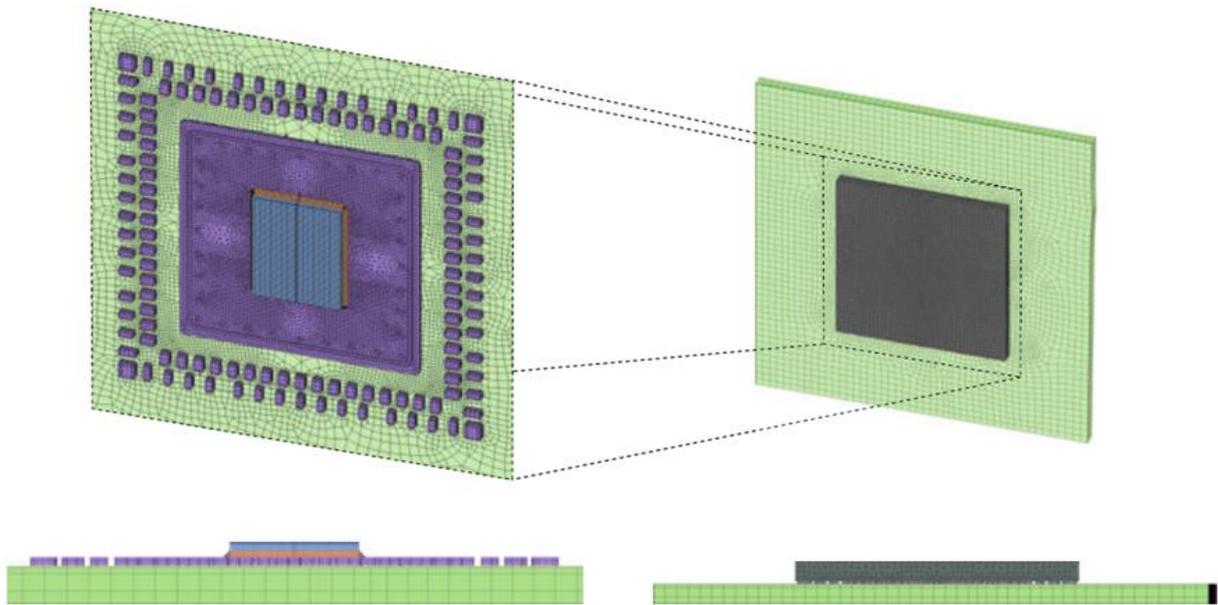


Abbildung 52: Submodell einer QFN Komponente auf der Leiterplatte

Abbildung 53 zeigt wie die im Submodell berechneten Spannungen prozessiert werden, um mit den Sensorwerten verglichen werden zu können. Jede Stressmesszelle des ASIC wird durch vier finite Elemente beschrieben. Der Mittelwert dieser vier Elemente wird herangezogen und als "Signal" interpretiert. Zusammen mit den 2D Ortskoordinaten werden die Daten als Stresskarten analog zu WP4.5 interpoliert.

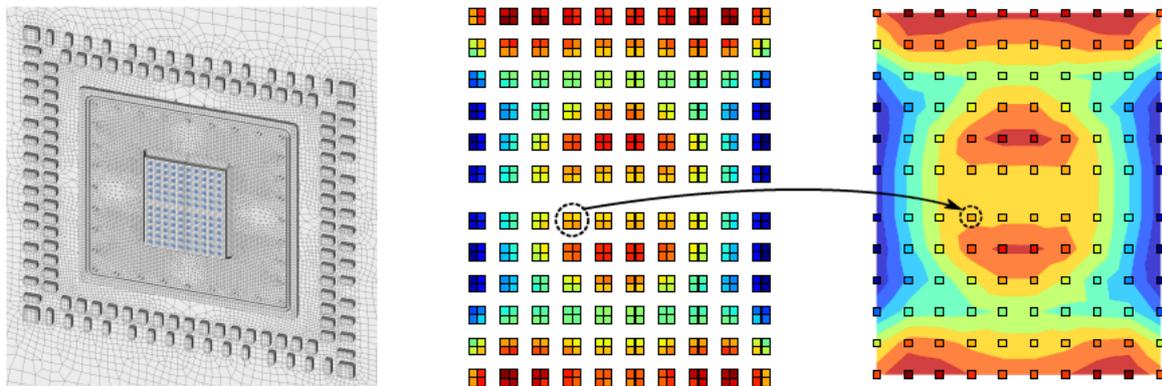


Abbildung 53: Extraktion von Stresswerten aus dem Simulationmodell

Die Ergebnisse von Submodell sind beinahe identisch mit dem globalen Modell für beide Lastfälle (Abb. 54).

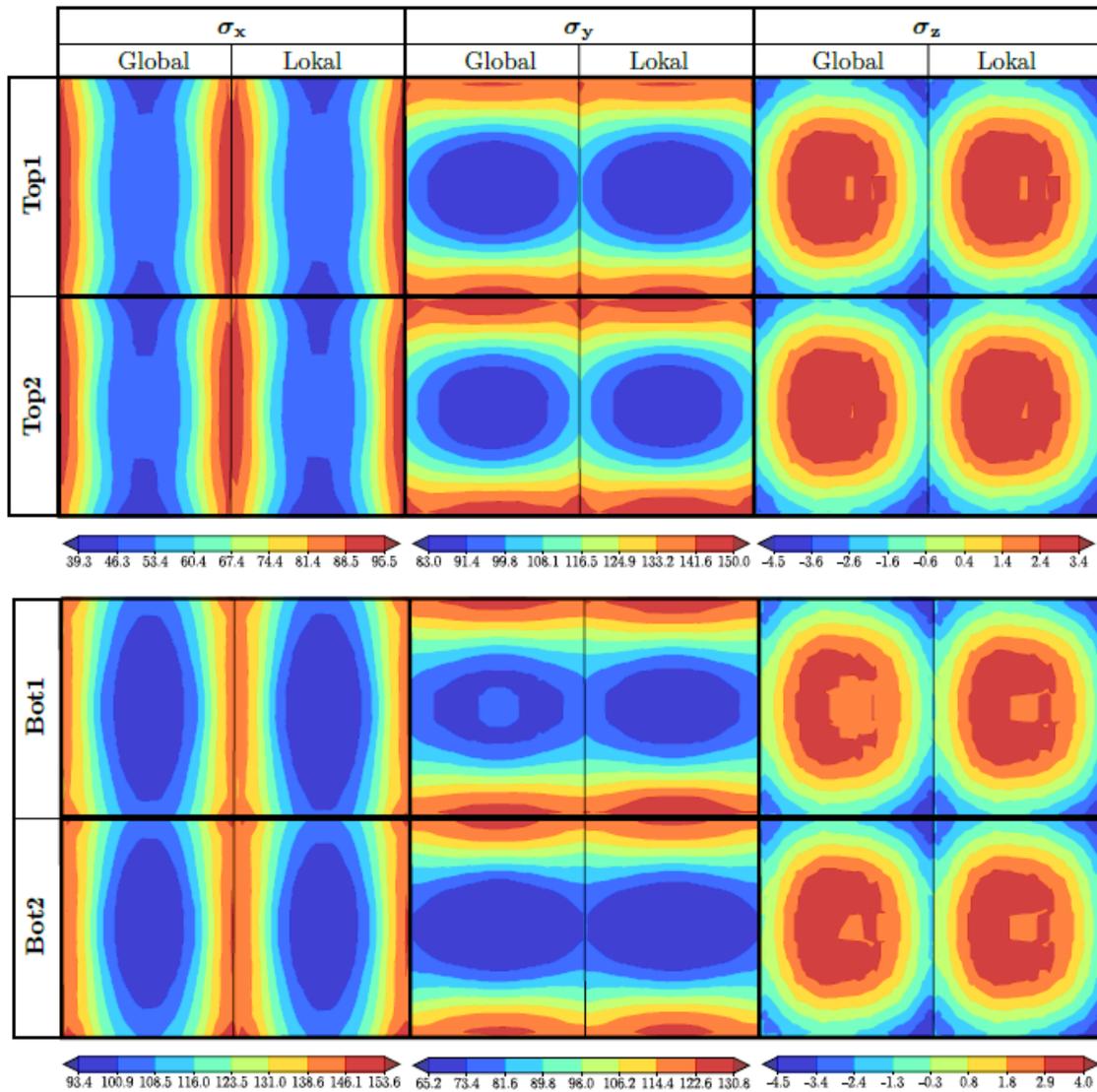


Abbildung 54: Vergleich der Spannungen auf dem Chip von globalem Modell und Submodell

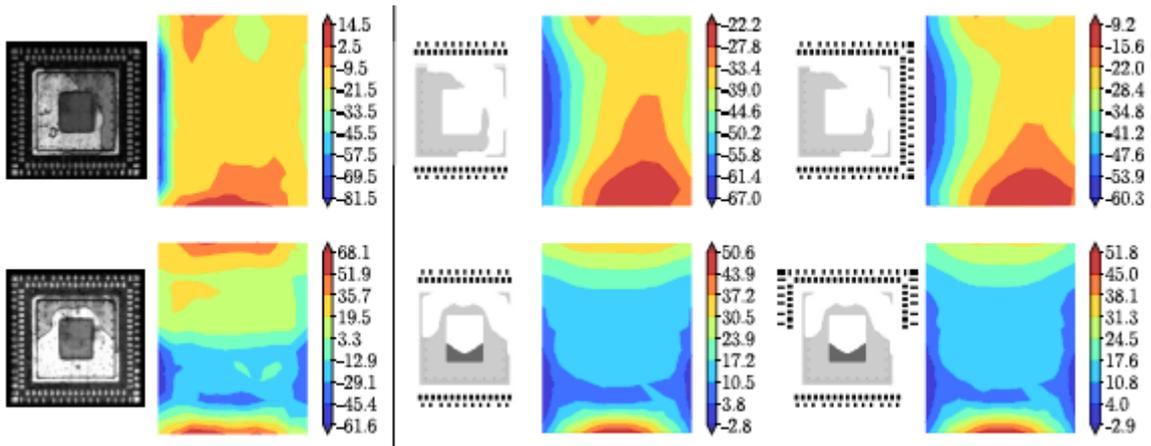


Abbildung 55: Vergleich der Spannungen auf dem Chip von globalem Modell und Submodell

### 1.5.2 Validierung des Potenzials des Daten-getriebenen PHM-Ansatzes

Nach Abschluss des Zuverlässigkeitstests auf Leiterplattebene (vgl.: 4.6) wird eine Fehleranalyse durchgeführt, die aus Röntgenaufnahmen, Ultraschallmikroskopie und Querschliffen besteht. Ein Vergleich von Röntgenaufnahmen vor und nach dem

Lebensdauerexperiment zeigt, dass sich die Form und die Größe der Fehlstellen im Lot nicht verändert haben. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die Verteilung und Größe der Fehlstellen im Lot Einfluss auf die ermittelten Stresssignale haben können.

Die Ultraschallmikroskopie wurde nur am Ende des Versuches durchgeführt und zeigt, dass eine der untersuchten Moldmassen, nämlich genau die, von der bekannt war, dass Sie zu Frühausfällen und Delamination führt (Abb. 56), starke Delaminationen aufweist. Die Delamination ist zum einen zwischen der Moldmasse und dem Leadframe zu finden, zum anderen zwischen Silizium-Chip und Klebmasse. Es wird eine simulative Methodik entwickelt, um den Einfluss der Delamination zu studieren, um dann reziprok mittels künstlicher Intelligenz vom Stress-Signal auf das Ausmaß der Delamination schließen zu können. Zur Validierung der Methode stehen die Fehlerbilder und gemessene Signale zur Verfügung.

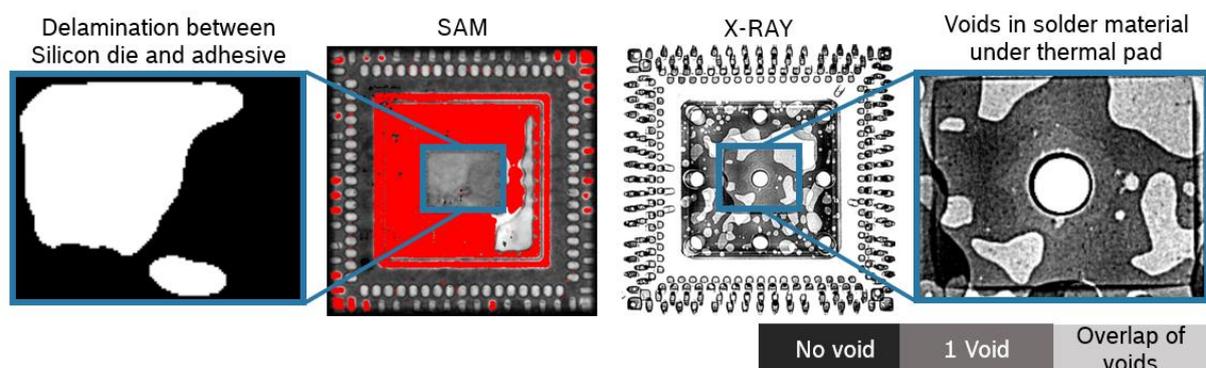


Abbildung 56: Ergebnisse der Ultraschall-Analyse

### 1.5.3 Demonstration des hybriden PHM-Ansatzes

Um den Gesundheitszustand des Steuergeräts abschätzen zu können, ist eine Information über die Alterung der Komponenten erforderlich. Diese Untersuchungen sind zeitaufwendig und sehr teuer. Wir haben ein erstes Konzept des integrierten Gesundheitsmanagement Steuergerätes basierend auf unserem Demonstrator (Abb 57), dem Raspberry Pi, entwickelt. Es erlaubte uns, ein Überwachungskonzept zu implementieren, das auf dem Temperatursensor basiert, der in der CPU vorhanden ist, sowie auf zusätzlichen virtuellen Sensoren an den Orten der kritischen Komponenten. Das allgemeine Konzept ist unten visualisiert. Dieses Konzept wurde im Rahmen des HiPer-Projekts weiterentwickelt.

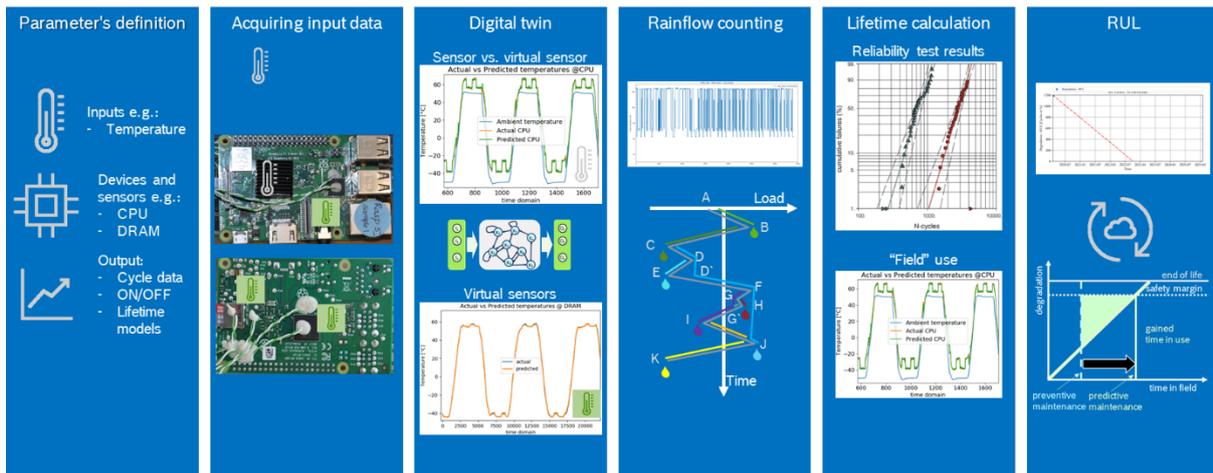


Abbildung 57: Konzept eines hybriden PHM-Ansatzes für die Ermüdung von Lötmitteln

Wir haben eine skalierbare und wiederverwendbare SW-Lösung für die Abschätzung des Gesundheitszustandes von Steuergeräten vorbereitet (Abb. 58). Der in smartSTAR entwickelte Algorithmus wurde in zwei weiteren öffentlichen Projekten eingesetzt: ZuLeSELF und HiPer.

- ▶ Scalable code architecture
  - ▶ **Parameter's definition:** collect all parameters used in all the scripts
  - ▶ **Acquiring inputs:** collect information from device under test and prepare it for further evaluation in required format
  - ▶ **Digital twin:** this is a block in which numerical model is calculated (can be based on FEM, regression analysis or AI/ML – black box)
  - ▶ **Rainflow counting:** determine the number of fatigue cycles present in a load-time history
  - ▶ **Lifetime modeling:** implementation available lifetime models for DUT
  - ▶ **RUL:** time the DUT is likely to operate

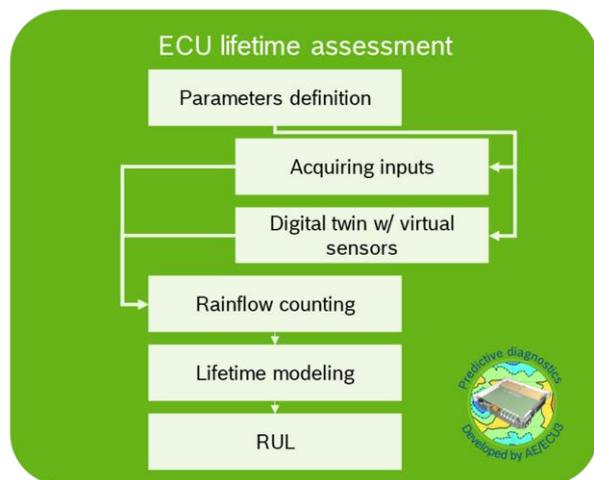


Abbildung 58: skalierbare PHM-Architektur, entwickelt in smartSTAR

Um nun die Lebensdauer für Komponenten anhand bestehender Daten zu bestimmen, werden im Folgenden mehrere Ansätze vorgestellt und bewertet. Dafür werden zunächst die Widerstandswerte periodisch bei derselben Temperatur (z. B. 125 °C) ausgelesen (Abb. 59), um eine Veränderung über die Zeit besser feststellen zu können. Anschließend werden über die zuvor erwähnten Schwellenwerte alle Kanäle (Lötverbindungen) aussortiert, bei denen es zu keinem Ausfall gekommen ist. Abb. 59 zeigt beispielhaft einen von insgesamt 138 ausgefallenen Kanälen, wobei nur der Verlauf der roten Kurve von Interesse ist. Neben den nicht-ausgefallenen Kanälen werden außerdem noch Kanäle, die direkt zu Beginn ausgefallen sind und Kanäle, die denselben Verlauf aufweisen, entfernt. Damit bleiben 82 Kanäle übrig, wobei 57 (~70 %) für das Trainingsset und 25 (~30 %) für das Testset verwendet werden.

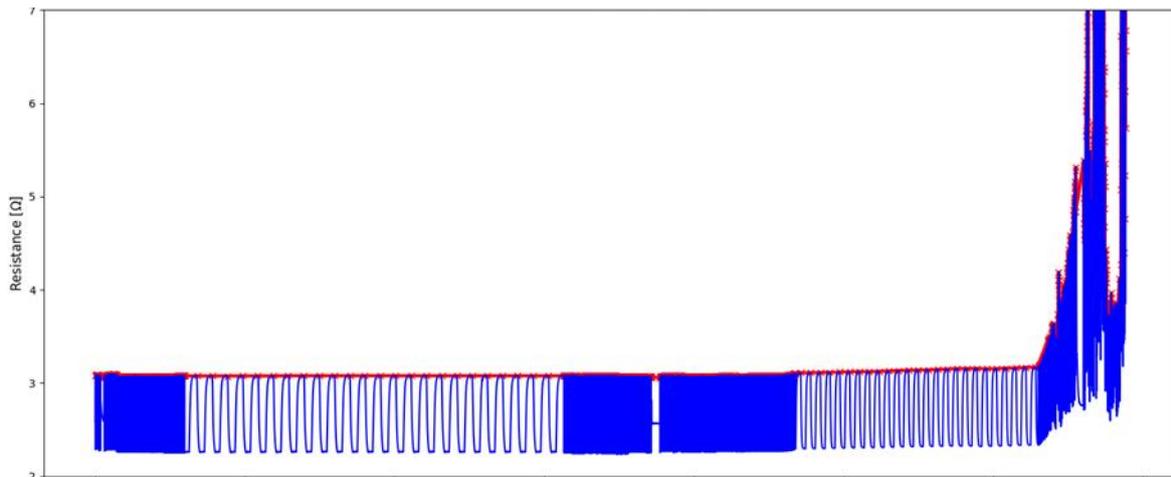


Abbildung 59: Beispielverlauf der Widerstandswerte für einen ausgefallenen Kanal

Ein mögliches Konzept besteht in der Vorhersage der Lebenszeit auf Basis des Verlaufs zwischen dem ersten Schwellwert (Indikator für Ausfall) und dem zweiten Schwellwert (Grenzwert). Dazu wird zunächst die komplette vorhandene Zeitserie auf den Bereich zwischen T1 und T2 zugeschnitten und anschließend jedem Wert eine verbleibende Nutzungsdauer linear zugeordnet. Dem Widerstandswert zum Zeitpunkt T1 wird somit der Maximalwert (z. B. 100 % RUL) und dem Widerstandswert zum Zeitpunkt T2 der Minimalwert (z. B. 0 % RUL) zugeordnet. Anschließend werden zu Testzwecken verschiedene Regressoren der Python-Bibliothek Scikit-learn mit dem Widerstand als Eingangsvariable und der verbleibenden Nutzungsdauer als Ausgangsvariable trainiert. Die Auswertung erfolgt mit dem Testset, wobei hier auf Basis des Widerstandsverlauf versucht wird, die Lebenszeit vorherzusagen. Bei diesem Ansatz ergeben sich jedoch mehrere Probleme, so wird unter anderem nicht die komplette Zeitserie betrachtet, die Wertebereiche unterscheiden stark zwischen den verschiedenen Komponenten, die Eingangsdaten sind stark mit Rauschen belastet und es existiert eine breite Streuung der verbleibenden Nutzungsdauer. Mögliche Verbesserungen bestehen in der Skalierung der Ein- und Ausgangsdaten, einer nicht-linearen Zuordnung der verbleibenden Nutzungsdauer während der Trainingsphase und der Betrachtung der kompletten Zeitserie, wobei es sich weiterhin um einen Abgleich zwischen Widerstandsverlauf und verbleibenden Nutzungsdauer handelt.

Ein weiteres Konzept nutzt den von Mueen et al. vorgestellten MASS-Algorithmus zur Ähnlichkeitssuche in Zeitserien. Die Idee dabei ist, die Restnutzungsdauer einer Komponente durch Abgleich des zeitlichen Verlaufs mit den bereits ausgefallenen Sequenzen zu bestimmen. Abb. 60 zeigt hierbei einen Teil der Ausfallprofile, wobei viele Komponenten ähnliche zeitliche Verläufe aufweisen, sich jedoch in der Höhe des Widerstands unterscheiden. Es wird also versucht, den Widerstandsverlauf einem bereits bekannten Widerstandsverlauf zuzuordnen und anschließend dessen verbleibende Nutzungsdauer zu bestimmen. Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Restnutzungsdauer schwankt dabei extrem, je nachdem, welche Sequenzen als historische Daten (zum Abgleich mit neuen Signalen) verwendet werden und je nach der Verwendung von Duplikaten. Außerdem ist dieser Ansatz sehr spezifisch und kann nur für Komponenten, die einen ähnlichen zeitlichen Verlauf aufweisen, verwendet werden. Des Weiteren müssen viele Vergleichsverläufe bekannt sein, da sonst keine Zuordnung möglich ist.

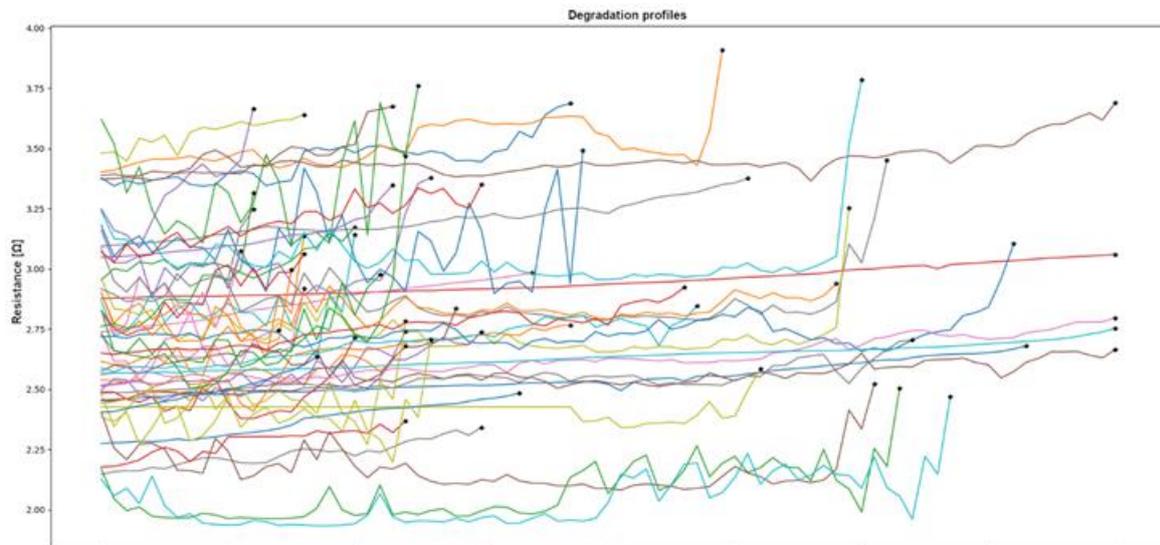


Abbildung 60: Verlauf der vorhandenen Ausfallprofile

Die meisten Machine-Learning-Modelle verwenden als Eingangswerte Beobachtungen, die keine zeitliche Dimension aufweisen. Zeitreihenvorhersagemodelle sind Machine-Learning-Modelle, die in der Lage sind, zukünftige Werte auf Grundlage von zuvor beobachteten Werten zu bestimmen. Die Eingangsdaten sind dabei nicht-stationäre Daten, deren statistische Eigenschaften, z. B. der Mittelwert und die Standardabweichung, im Laufe der Zeit variieren. Da es sich bei dem Widerstandsverlauf über die Zeit auch um nicht-stationäre Daten handelt, können Zeitreihenvorhersagemodelle wie ARIMA-Modelle, RNNs (wie LSTM) oder DNNs für die Entwicklung und somit die Bestimmung der verbleibende Nutzungsdauer eingesetzt werden. Inwieweit mit dieser Methode tatsächlich zufriedenstellende Ergebnisse in der Praxis erzeugt werden können, muss noch genauer evaluiert werden.

Anstelle einer direkten Vorhersage der verbleibenden Nutzungsdauer wird bei dieser Methode ein Machine-Learning-Modell trainiert, um einen impliziten Faktor vorherzusagen. Dabei handelt es sich um den Gesundheitszustand der Komponente (Health Index; HI), der Werte zwischen 1 (Komponente hat keine Probleme) und 0 (Komponente ist ausgefallen) annehmen kann und allgemein nicht bekannt ist. Abb. 61 zeigt den grundsätzlichen Ansatz, wobei zunächst vom Modell die Gesundheitswerte in jedem Punkt vorhergesagt werden und im Anschluss ein Polynom n-ter Ordnung durch diese Punkte gelegt wird. Über den Schnittpunkt des Polynoms mit der Zyklusachse und dem letzten vorhergesagten Wert errechnet sich die verbleibende Nutzungsdauer.

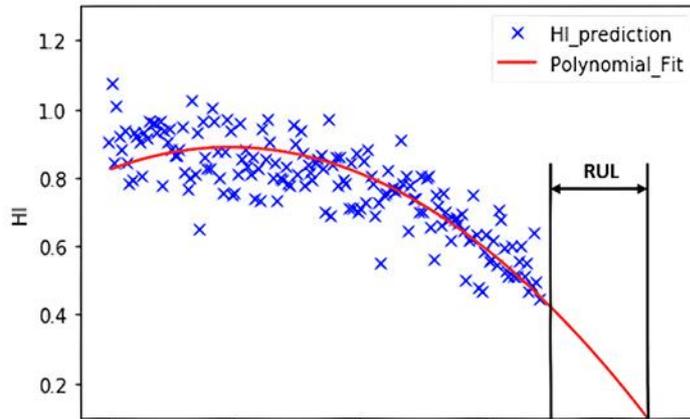


Abbildung 61: Verlauf der vorhandenen Ausfallprofile

Zur Bestimmung des Gesundheitsindex für die Testdaten wird dabei der Widerstand von Beginn der Messungen bis zum Zeitpunkt  $T_2$  auf einen Bereich von 1 bis 0 skaliert. Das Modell wird mit dem laufenden Mittelwert und der Standardabweichung  $\sigma$ , die für Zyklenfenster der Größe 50 (1...50, 2...51 usw.) berechnet wird, als Eingangsdaten trainiert. Der zuvor berechnete Gesundheitsindex ist dabei der Zielwert für das Modell. Dabei bietet es sich an, die Daten des laufenden Mittelwerts wiederum zu skalieren, da der Widerstand sich für die einzelnen Komponenten stark unterscheiden kann. Problematisch ist dabei, dass bei der Skalierung des Mittelwerts Informationen über die gesamte Zeitreihe verwendet werden. Um dieses Problem zu umgehen, werden die Kurven ausgehend vom Ausgangswert auf dessen Nullpunkt verschoben, wodurch jeder Widerstandsverlauf bei 0 beginnt. Bei den eingesetzten Modellen handelt es sich um verschiedene Regressoren von Scikit-learn.

## 2. Veröffentlichung des Ergebnisses:

Im Rahmen des smartSTAR-Projekts haben wir folgende Beiträge geleistet, entweder durch die Teilnahme an internationalen Konferenzen, die Veröffentlichung unserer Arbeit in Journalen oder in Fachbüchern:

### Konferenzen:

- [1] A. Prisacaru, P. J. Gromala, Aging of the Molding Compound Identification using Piezoresistive Silicon Based Stress Sensor, 2021 22th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE).
- [2] A. Prisacaru, E. O. Guerrero, P. J. Gromala, B. Han, G. Q. Zhang, Degradation Prediction of Electronic Packages using Machine Learning, 2019 20th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE).
- [3] A. Prisacaru, Y. Sun, P. J. Gromala, B. Han, G. Q. Zhang, Internal stress state of TQFP subjected to liquid thermal shock using piezoresistive silicon stress sensor, 2018 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE).
- [4] A. Prisacaru, J.M. Bagetti, P. J. Gromala, B. Han, G. Q. Zhang, Prognostics and health monitoring of electronic system: A review, 2017 18th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE).
- [5] A. Prisacaru, A. Palczynska, P. J. Gromala, B. Han, G. Q. Zhang, Condition monitoring algorithm for piezoresistive silicon-based stress sensor data obtained from electronic control units, 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC).
- [6] M. Majd, P. Meszmer, A. Prisacaru, P. J. Gromala, B. Wunderle, Stress Prognostics for Encapsulated Standard Packages by Neural Networks Using Data from in-situ Condition Monitoring during Thermal Shock Tests, 2020 21st International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE).
- [7] Riegel, D., Gromala, P. J., & Rzepka, S. (2021, April). Data-Driven Prediction of the Remaining useful Life of QFN Components Mounted on Printed Circuit Boards. In *2021 Smart Systems Integration (SSI)* (pp. 1-4). IEEE.
- [8] Riegel, D., Gromala, P. J., & Rzepka, S. (2021, April). Analysis of the stress state in QFN package during four bending experiment utilizing piezoresistive stress sensor. In *2021 22nd International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)* (pp. 1-5). IEEE.
- [9] Riegel, D., Gromala, P. J., Han, B., & Rzepka, S. (2021, June). Data-Driven Remaining Useful Life Prediction of QFN Packages on Board Level with On-Chip Stress Sensors. In *2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (pp. 904-909). IEEE.

- [10] Riegel, D., Gromala, P. J., Han, B., & Rzepka, S. (2021, June). Machine learning based meta-models for sensorless thermal load prediction. In 2021 20th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm) (pp. 1045-1051). IEEE.

#### Fachzeitschriften:

- [1] J. Sun, D. Gabani, C. Silber, F. Dietz, A. Kabakchiev, P. Gromala, R. Thewes, G. Pećanac, Evaluation of Chip-Package Interaction by Means of Stress Sensors, *IEEE Sensors Journal*, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3175576
- [2] A. Prisacaru, E. O. Guerrero, B. Chimmineni, P. Gromala, Y.H. Yang, B. Han, G. Q. Zhang, Towards Virtual Twin for Electronic Packages in Automotive Applications, *Microelectronics Reliability*, (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114134>
- [3] A. Prisacaru, P. Gromala, B. Han, G. Zhang, Degradation Estimation and Prediction of Electronic Packages using Data Driven Approach, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (2021). DOI: 10.1109/TIE.2021.3068681
- [4] A. Inamdar, Y.H. Yang, A. Prisacaru, P. Gromala, B. Han, High temperature aging of epoxy based molding compound and its effect on mechanical behavior of molded electronic package, *Polymer Degradation and Stability* (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109572>

#### Buchkapitel:

- [1] P. Gromala, A. Prisacaru, M. Dressler, A. Kabakchiev, Degradation and remaining useful life prediction of automotive electronics, *Reliability of organic compounds in microelectronics and optoelectronics*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81576-9>
- [2] A. Inamdar, P. Gromala, A. Prisacaru, A. Kabakchiev, Y. Yang, B. Han, EMC oxidation under high temperature aging, *Reliability of organic compounds in microelectronics and optoelectronics*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81576-9>

### **3. Patente**

Im Rahmen von smartSTAR entstanden mehrere Erfindungsmeldungen bzw. Patentanmeldungen, die aus Datenschutzgründen hier nicht dargestellt werden können.

Die Veröffentlichung erfolgt(e) über den Weg der Patentanmeldung.

#### 4. Studentische Arbeit

Im Rahmen von smartSTAR hatte RB die Möglichkeit, eine signifikante Anzahl von Studenten auszubilden. Nachstehend finden Sie eine Liste ihrer Beiträge zum Erfolg des smartSTAR-Projekts. Die Unterstützung der Studenten wird sehr geschätzt.

[1] Adwait Inamdar:

- a. **Praktikum:** Thermal aging of molding compound
- b. **Masterarbeit:** Validation of QFN model

[2] Vandan Ravanur

- a. **Praktikum:** Concept of the new acquisition unit for smartASIC

[3] Aishwarya Prakash:

- a. **Praktikum:** methodology to measure piezoresistive coefficient, GUI SW for 4point bending experiment (piezoresistive coefficients), digital twin for electronic systems based on Raspberry Pi

[4] Lena Rapp

- a. **Masterarbeit:** Schädigungsanalyse von QFN-Komponenten mittels neuronaler Netze unter Verwendung von In-situ-Sensordaten aus Lebensdauer tests

[5] Nico Makowe

- a. **Praxiseinsatz:** Blasenerkennung in Lötstellen mittels Bildverarbeitung

[6] Mario Tadashi Kosokabe

- a. **Praktikum:** Canary devices for CPI effects, e.g. corrosion and dendrite formation
- b. **Bachelor Arbeit:** reliability monitoring of semiconductor technologies with a degradation multiplexer

[7] Gustavo De Camargo Goncalves

- a. **Praktikum:** Development and optimization of an acquisition unit for both smartASIC and other CPI testchips

[8] Dhruvit Gabani:

- a. **Praktikum:** FEM simulations for the stress-sensor evaluation

[9] Jingyao Sun:

- a. **Praktikum:** Effects influencing stress-sensors in an ASIC package
- b. **Masterarbeit:** Stress-sensors for Chip-Package Interaction