Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

BOSCH

SesiM

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Robert Bosch GmbH Postfach 10 60 50 70049 Stuttgart
Förderkennzeichen:	19I21018B
Gesamtvorhabenbezeichnung:	Selbstvalidierung komplexer elektronischer Systeme in sicherheitskritischen Mobilitätsanwendungen auf Basis von Greybox-Modellen (SesiM)
Teilvorhaben des Projektpartners:	Lebensdaueruntersuchungen auf Basis von automotive Demonstrationsmustern zur Ermittlung und Verifikation von KI-Modellen
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2021 – 31.12.2024
Berichtszeitraum:	01.07.2021 – 31.12.2024

Inhalt

1 Kurze Darstellung 3

1.1 Aufgabenstellung 3

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens 3

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 5

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5

2 Eingehende Darstellung 5

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 5

2.1.1 Arbeitspaket 1: Systemdefinition und Anforderungsprofile für den Built-In-Self-Test (BIST) bei komplexen elektronischen Systemen mit sehr hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit 5

2.1.2 Arbeitspaket 2: Identifikation von Systemparametern, erfassbaren Sensordaten und potenziellen Sensorerweiterungen für automatisierten BIST 10

2.1.3 Arbeitspaket 3: Konzept zur eindeutigen Systemcharakterisierung während der Nutzungsphase 12

2.1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung von mehrstufigen Musteranwendungen zur Erfassung von Merkmalsänderungen und Datengenerierung 13

2.1.5 Arbeitspaket 5: Hybride Modellierung der Musteranwendungen 17

2.1.6 Arbeitspaket 6: Übergeordnete Software- und Kommunikationsarchitektur 21

2.1.7 Arbeitspaket 7: Analyse der Musteranwendungen – Bildgebende Analyseverfahren und Datenkonditionierung 21

2.1.8 Arbeitspaket 8: Systemcharakterisierung in kombinierten Belastungstests 24

2.1.9 Arbeitspaket 9: Integration der Lösungsansätze in Demonstrator und Funktionsnachweis der Zustandsüberwachung (BIST) 31

2.1.10 Arbeitspaket 10: Konzept zur Überführung in die industrielle Praxis 33

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 35

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten 35

2.4 Voraussichtlicher Nutzen: Verwertbarkeit des Ergebnisses 36

2.5 FE-Ergebnisse Dritter während der Laufzeit des Vorhabens 36

2.6 Veröffentlichungen 36

3 Anlage 37

3.1 Erfolgskontrollbericht 37

3.2 Kurzfassung (Berichtsblatt und Document Control Sheet) 37

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Bei sicherheitskritischen elektronischen Systemen werden aktuell Überauslegung oder redundante Aufbauten zur Vermeidung von Ausfällen genutzt. Zentraler Aspekt von SesiM ist die Entwicklung einer KI-basierten Zustandsüberwachung für den optimierten Betrieb von Mobilitätselektronik. Durch die Entwicklung dieser hybriden KI-Modellierung von elektronischen Komponenten für die Bereiche Bahntechnik und Automotive, soll es zukünftig möglich sein auf alterungsbedingten Verschleiß und sicherheitskritische Änderungen proaktiv reagieren zu können. Sich ändernde Einflüsse von Fertigungsprozessen und Materialqualitäten sowie Belastungen in der Nutzungsphase werden erfasst, bewertet und innerhalb einer innovativen, KI-basierten Modellbildung genutzt. Der Fokus von Bosch lag in SesiM auf der Ermittlung und Bewertung von Prozessdaten aus der optischen Inspektion (Automatische Optische Inspektion (AOI), Lotpasteninspektion (SPI), Automatische Röntgeninspektion (AXI)) sowie auf der Erfassung und Bewertung von online Lebensdauerdaten für eine KI-basierte Lebensdauerprognose von automotive Elektronik.

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Das Konsortium deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab, wodurch es möglich war die Projektziele zu erreichen. Es sind Unternehmen aus den Bereichen Inspektionsanlagen, Durchführung von Lebensdauertests, Dateninfrastruktur bis hin zu zwei großen Komponentenherstellern und Anwendern aus den Bereichen Bahn und Automotive, einschließlich führender wissenschaftlicher Institute beteiligt. Die Rolle und die Kernkompetenzen der einzelnen Partner werden im Folgenden zusammenfassend erläutert.

Göpel electronic GmbH hat Kompetenzen im Bereich Analyse und Einsatz von Technologien für die Generierung und Bereitstellung von Bildinformationen elektronischer Baugruppen aus Inspektionssystemen in der Baugruppenfertigung.

Die Aucoteam GmbH hat Expertise im Bereich von Lebensdauertests, der Entwicklung von Prüfstrategien und -methoden.

Die Siemens AG bringt umfangreiche Erfahrungen u.a. aus den folgenden den Bereichen mit: Aufbau- und Verbindungstechnik elektronischer Baugruppen, sowie deren Zuverlässigkeit; Domänenwissen der Wertschöpfungskette für Elektronikprodukte; Erfassung von Daten der Elektronikfertigung.

Die Robert Bosch GmbH bringt fundierte Erfahrungen aus den Bereichen Ableitung von Belastungsprofilen aus Feldlasten, Lebensdauerermittlung von Elektroniksystemen, Zuverlässigkeit und Fehlermechanismen elektronischer Aufbau- und Verbindungstechnik mit.

Im Projekt bringt die Gestalt Robotics GmbH Kompetenzen zur Entwicklung von Datenstrukturen ein und entwickelt KI-Methoden zur visuellen Erfassung von Merkmalen elektronischer Komponenten.

Das Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) hat Expertise insbesondere bei der Bewertung des Zustands elektronischer Systeme durch entwickelte Algorithmen und physikalische Modellierung. Außerdem im Bereich der Zuverlässigkeit, Alterungs- und Ausfallanalysen.

Die Universität Stuttgart hat Kompetenz im Bereich der Analyse und dem Management von großen Datenmengen und deren Modellierung mittels verschiedener KI-Methoden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt SesiM wurde in 10 Arbeitspakete strukturiert. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Arbeitspakete in ihrer Wechselwirkung zueinander. Die Projektergebnisse sind, gegliedert nach den Arbeitspaketen, in Kapitel 2 dargestellt. Bosch ist an den Arbeitspaketen 1 bis 10 beteiligt und leitet die Arbeitspakete 4 „Entwicklung mehrstufiger Musteranwendungen“ sowie 8 „Systemcharakterisierung in kombinierten Belastungstests“.

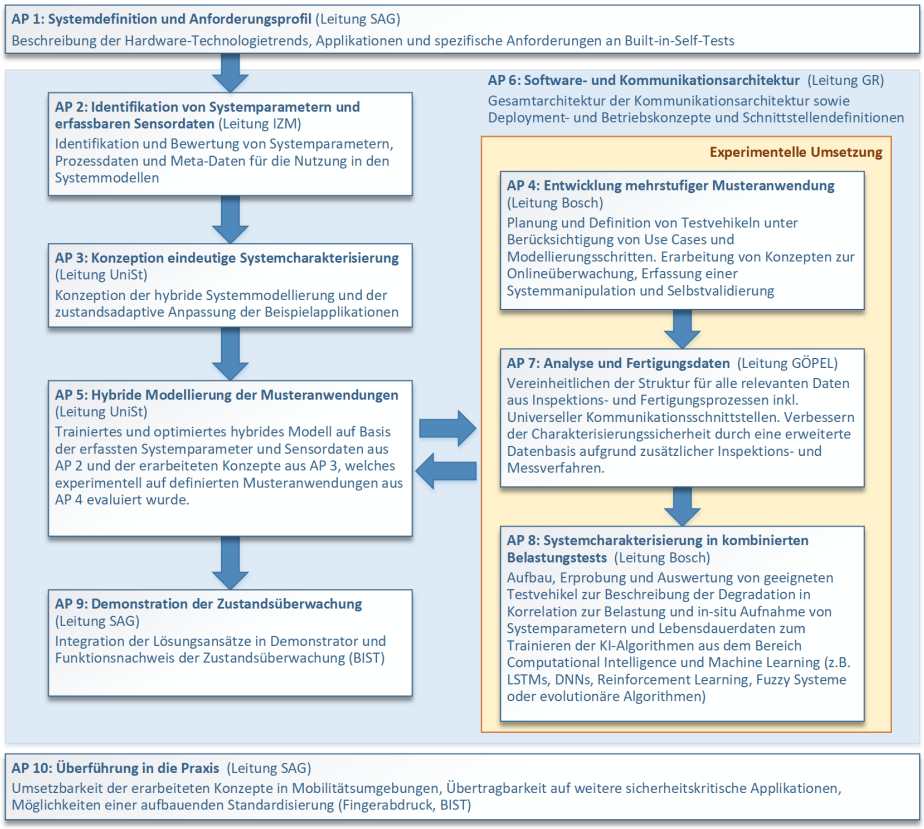


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur SesiM

Der nachfolgende Balkenplan (Tabelle 1) zeigt die zeitliche Planung der einzelnen Arbeitspakete sowie die Meilensteinplanung. Dieser diente der Verfolgung der Arbeiten eines jeden Teilprojektes inkl. der definierten Meilensteine.

Tabelle 1: Zeitliche Arbeitspaketplanung und Meilensteine SesiM

	Arbeitspakete	Projektmonat (M1 / M2 / M3)																																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	Systemdefinition und Anforderungsprofile für Built-in-Self-Tests																																				
2	Identifikation von Systemparametern, erfassbaren Sensordaten, -erweiterungen																																				
3	Konzept zur eindeutigen Systemcharakterisierung																																				
4	Entwicklung von mehrstufigen Musteranwendungen																																				
6	Übergeordnete Software- und Kommunikationsarchitektur																																				
7	Analyse der Musteranwendungen - Bildgebende Analyseverfahren und Datenkonditionierung																																				
8	Systemcharakterisierung unter Betriebs- und Umweltbelastungen																																				
9	Integration der Lösungsansätze in Demonstrator																																				
10	Konzept zur Überführung in die industrielle Praxis																																				

M1: Definitions- und Konzeptphase beendet
M2: Konzeptrealisierung evaluiert
M3: Modellbildung abgeschlossen

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Zustandsüberwachung von mechanischen Komponenten war bereits vor den Aktivitäten von SesiM Stand der Technik, während die von elektronischen Komponenten Forschungsgegenstand war und ist. In Veröffentlichungen wurden bereits Methoden und Ansätze beschrieben, mit denen der Zustand einzelner Technologien, wie beispielsweise Lötverbindungen, anhand von Parameteränderungen abgeschätzt werden kann. Bei den üblichen Ansätzen ist es jedoch schwer die Komplexität elektronischer Systeme und Komponenten sowie deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Die Ermittlung der Fehlermechanismen erfolgt durch die systematische Identifikation der relevanten Fehlerorte, -modi, -ursachen und Fehlermechanismen unter Berücksichtigung des Belastungsprofils aus der Anwendung. Alterungsmodelle beschreiben die physikalische Degradation während des Einwirkens einer Last bis zum Ausfall. Für die Erstellung der Alterungsmodelle sind deshalb zeit- und kostenintensive beschleunigte Lebensdauertests sowie FEM-Simulationen nötig. Die Kombination von physikalischen Modellansätzen mit KI-Methoden, um die Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer elektronischer Baugruppen prognostizieren zu können, ist der Ansatz von SesiM. Die KI-Methoden scheitern jedoch in der industriellen Praxis meist an der großen Menge an Trainingsdaten, welche nicht zur Verfügung stehen. Der Einsatz von datengetriebenen Modellen in sicherheitskritischen Anwendungen ist ein offenes Forschungsthema. Ansätze wie Hybrid Machine Learning können durch den Einsatz von Grey-Box Modellen helfen, Entscheidungen der Modelle nachvollziehbarer zu machen, da bekannte, nachvollziehbare physikalische Modelle in die Entscheidungsfindung einfließen. Dieser Ansatz kann ebenfalls die notwendige Anzahl an Trainingsdaten reduzieren, da das Modell z.B. mithilfe der physikalischen Modelle vortrainiert werden kann.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Partner des SesiM Konsortiums sind in Kapitel 1.2 und die Zusammenarbeit in Kapitel 1.3 beschrieben. Zusätzlich erwähnt sei hier noch die Zusammenarbeit von Bosch mit der EKS Elektronikservice GmbH im Rahmen eines Unterauftrags für die Bereitstellung von Messtechnik.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 Arbeitspaket 1: Systemdefinition und Anforderungsprofile für den Built-In-Self-Test (BIST) bei komplexen elektronischen Systemen mit sehr hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit

Im Rahmen des AP 1 wird der Stand der Technik zum Condition Monitoring komplexer elektronischer Systeme mit dem Fokus auf die bahn- sowie die Automotive Anwendung recherchiert und beschrieben. Des Weiteren werden die elektronischen Systeme definiert, anhand welcher die Partner im weiteren Projektverlauf Daten generieren und mittels KI-Modellen eine Lebensdauerprognose erarbeiten. Das Konzept und die Methode für die Herangehensweise werden ausgearbeitet. Außerdem werden die Anforderungen der definierten Systeme wie beispielsweise Belastungsprofile erarbeitet.

AP 1.1 Identifikation aktueller Trends und ständige Marktbeobachtung für Built-In-Self-Tests

Im Rahmen der Literaturrecherche und der ersten Schritte wurde ersichtlich, dass es für die Zielsetzung im Projekt SesiM weniger um einen Built-In-Self-Test, dafür mehr um Condition Monitoring geht. Um eine Zustandsüberwachung durchführen zu können, ist es erforderlich, dass kontinuierlich Zustände

erfasst, übertragen und ausgewertet werden. Durch die ständige Aufnahme von Messgrößen kann so beispielsweise der Bedarf der Wartung von Maschinen und Anlagen überwacht werden. Es kann zum Beispiel festgestellt werden, ob die regelmäßige Wartung schon erforderlich ist oder ob sich über die Betriebsdauer schleichende Änderungen der Messgrößen zeigen. So kann die Effizienz aber auch Sicherheit der Maschinen und Prozesse gesteigert werden.

Grundlage für solch eine Zustandsüberwachung ist es, die richtigen Messdaten zu ermitteln. Es müssen geeignete Messgrößen überwacht und mit geeigneten Messsystemen wie Sensoren gemessen werden. Die dadurch entstehende, große Datenmenge muss verarbeitet werden können. Nach der Messung und Dokumentation der Messgrößen müssen diese mit dem Referenzzustand abgeglichen werden.

Im Bereich Automotive gibt es bisher einige Anwendungen, bei denen eine Zustandsüberwachung gemacht wird oder wo mittels einer in ein elektronisches Bauelement integrierten Testschaltung (BIST Built-In-Self-Test) geprüft wird. In der Literatur wird Condition Monitoring zum Beispiel bei der Überwachung von Motoröl geschildert. Hierdurch sollen Informationen über dessen Alterung und damit eine Möglichkeit zur Vorhersage von Wartungen ermittelt werden. Mit Hilfe von Sensoren wird beispielsweise überprüft, ob beim Einschalten des Fahrzeugs Komponenten in Ordnung und betriebsbereit sind. Dieser BIST erfolgt jedoch nur einmalig, nicht online. Es gibt Veröffentlichungen, die sich mit Built-In-Self-Tests für ICs beschäftigen. Dabei geht es meist um die Überprüfung der Halbleiter und dadurch die Vorhersage eines Ausfalls aufgrund ihrer starken Beanspruchung im Automobil. Eine tatsächliche online Überwachung (Condition Monitoring) von Halbleitern im Betrieb ist bisher kaum zu finden. Eine Veröffentlichung aus dem Jahr 2021 beschreibt das Onlinemessen von elektrischen Kenngrößen eines Leistungshalbleiters und versucht auf das Alterungsverhalten dessen während Zuverlässigkeitstests zu schließen.

Insgesamt ist zu beobachten, dass zum Thema Condition Monitoring im Automotive Umfeld erst in den letzten Jahren vermehrt Veröffentlichungen zu finden sind. Für Leistungselektronische Systeme bestehend aus Leistungshalbleiter – Aufbau- und Verbindungstechnik – Substrat gibt es bisher kaum Aktivitäten in Richtung einer online Zustandsüberwachung. Ganz zu schweigen von einer Verknüpfung dieser mit KI-Modellen.

AP 1.2 Definition von sicherheitsrelevanten elektronischen Systemen und deren Produktions- sowie Qualitätsprozessen

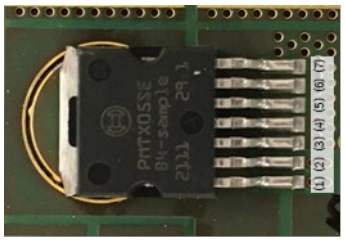
Seitens Bosch wurde der DC/DC-Wandler (siehe Abbildung 2) als sicherheitsrelevantes, leistungselektronisches System aus dem Bereich Automotive ausgewählt. Der Gleichspannungswandler wird in Leiterplattentechnik realisiert. D.h. alle Komponenten des DC/DC-Wandler befinden sich auf einer Leiterplatte. Sowohl der Leistungsteil als auch der Logikteil bzw. die Ansteuerung. Dadurch werden weniger Verbindungselemente benötigt und die Robustheit erhöht.

Abbildung 2: Bosch DC/DC-Wandler

Der lebensdauerkritische Bereich ist der hoch belastete Leistungsteil. Im Hochvoltbereich (HV High Voltage) herrschen große Spannungen, im Niedervoltbereich (LV Low Voltage) große Ströme vor. In diesen Bereichen entstehen große Verlustleistungen der dort eingesetzten Leistungsbauelemente. Diese wiederum resultieren in Verlustwärme, welche durch das Substrat Leiterplatte abgeführt werden muss. Das System Leistungsbauelement – Lötstelle – Hochstromleiterplatte ist aufgrund der hohen Temperaturwechselbelastung stark belastet und bestimmt die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des gesamten DC/DC-Wandlers.

Die im DC/DC-Wandler eingesetzten Leistungsbauelemente sind im HV-Bereich der D2Pak und im LV-Bereich der TOLL (TO Leadless). In aktuellen und auch zukünftigen leistungselektronischen Systemen wird das D2Pak-Package bevorzugt eingesetzt. Auch weil es zum jetzigen Zeitpunkt kaum ein anderes Package auf dem Markt gibt, welches einen Siliziumkarbidhalbleiter beinhaltet. Denn diese versprechen niedrigere Schalt- und Leitungsverluste, wodurch kleinere Kondensatoren und Induktivitäten eingesetzt werden können. Aufgrund des höheren on-Widerstands von Siliziumkarbid (SiC) im Vergleich zu Silizium (Si) und des Schaltverhaltens ist die thermische Belastung des D2Pak als kritisch und für den DC/DC-Wandler zuverlässigkeitsbestimmend anzusehen.

Auf Grundlage der Untersuchung und Bewertung der lebensdauerkritischen Komponenten des DC/DC-Wandlers, wurde seitens Bosch das folgende System für das Projekt SesiM ausgewählt und definiert: Ein Siliziumkarbid (SiC) D2Pak gelötet auf Leiterplatte (siehe Abbildung 3).



Pin	Description (Symbol)
1	Gate (G)
2	Driver Source (S)
3	Power Source (S)
4	Power Source (S)
5	Power Source (S)
6	Power Source (S)
7	Power Source (S)
c	Drain /die paddle (D)

Abbildung 3: Bosch SiC D2Pak gelötet auf Leiterplatte

Das D2Pak ist ein Halbleiterpackage welches mittels Oberflächenmontage auf Leiterplatten aufgebracht wird. Es beinhaltet Silizium oder Siliziumkarbidchips, welche typischerweise auf ein Kupfer-Leadframe gelötet und mittels Drahtbonds gebondet sind.

AP 1.3 Gap-Analyse und Gegenüberstellung existierender Methoden für Built-In-Self-Tests

Ziel des Projekts SesiM ist es, zum einen die Prozessdaten aus der Baugruppenfertigung, zum anderen die Onlinemesswerte während der Zuverlässigkeitsuntersuchungen und End of Life Daten aufzunehmen, um damit KI-Modelle zu speisen und zu trainieren. Dadurch soll es möglich sein, später eine Zustandsüberwachung von elektronischen Automotive Anwendungen auf Systemebene durchzuführen. Bosch konzentriert sich auf Grundlage langjähriger Erfahrungen und Erkenntnisse der die Lebensdauer beeinflussenden Faktoren auf die Lötstellen des gewählten D2Pak-Systems.

Nach Bosch Expertenschätzung spielen die Geometrieparameter von Bauelement und Lötstellen eine Rolle für die Systemzuverlässigkeit. Die aus Sicht von Bosch relevanten Geometrieparameter wurden erarbeitet (siehe Tabelle 2). Für die KI-Modellierung sollen Inputdaten wie Bauelementgeometrie, Lotvolumina, Lotdicken, Voiding, usw. mittels optischer Inspektionsmessungen gemessen werden.

Tabelle 2: Seitens Bosch aufgestellte Liste an zuverlässigkeitsrelevanten Geometrieparametern

	Parameter	Mögl. Messmethode
1	Lotvolumen	SPI
2	Geometrie BE (Breite, Länge, Höhe)	2D vs. 3D AOI Ggf. Verifikation mit Laserscanning
3	Geometrie Gullwings (Breite, Länge, Höhe)	
4	Standoff-Höhe Drain	
5	Lotspaltdicke Gullwings	
6	Meniskusform Gullwings	
7	Verkippung BE	
8	Verdrehung BE	
9	Voiding Drain Lötstelle	AXI
10	Voiding Gullwing Lötstellen	

Vor bzw. nach dem Bestück- und Lötprozess von Bauelementen werden in den Bosch Fertigungslinien standardmäßig SPI (Solder Paste Inspection), AOI (Automatische Optische Inspektion) und AXI (Automatische Röntgeninspektion) Daten aufgenommen. Stand heute werden diese Daten jedoch nur für die Bewertung der Lötstellen im Ausgangszustand verwendet. D.h. mittels hinterlegter Kriterien (nach Norm, IPC) wird entschieden, ob die Lötstellen in Ordnung oder fehlerhaft sind. Eine Ableitung oder Prognose der Lebensdauer aufgrund der Messdaten der Lötstellen im Ausgangszustand gibt es bisher nicht. Außerdem erfolgt Stand heute typischerweise keine Ausgabe der Mess- und Prozessdaten der Bosch Fertigungslinien. Die Identifikation von Lebensdauer relevanten Systemparametern, deren Erfassung und Bewertung erfolgte detailliert im Rahmen des AP 2. Hier wurde gemeinsam mit Göpel und Gestalt Robotics die seitens Bosch aufgestellte Liste an Geometrieparametern hinsichtlich Messbarkeit / Auswertung anhand der beschriebenen optischen Inspektionsmethoden bearbeitet.

Um mit den Prozessdaten eine Lebensdauer korrelieren zu können, sollten die D2Pak Bauelemente in Zuverlässigkeitstests online überwacht und bis zu deren End of Life getestet werden. Die Onlineüberwachung von Mosfets wurde hierfür entwickelt (siehe AP 8).

AP 1.4 Ableiten relevanter Use-Cases für Built-In-Self-Tests auf Basis der identifizierten Gaps und Trends in Mobilitätskonzepten

In AP 1.3 wurde die Erforderlichkeit der Prozessdaten sowie der Daten aus der Onlineüberwachung von Lebensdauertests für die Erstellung von KI-Modellen für das Testvehikel aus dem Bereich Automotive dargestellt. Hier wurde die Herangehensweise von Bosch für die Ermittlung dieser Daten für das D2Pak-System geschildert. AP 1.3 und AP 1.4 gehen direkt ineinander über. Deshalb werden die in AP 1.4 geplanten Aktivitäten bereits unter AP 1.3 mit beschrieben.

AP 1.5 Konzepterstellung (für den zu erstellenden Built-In-Self-Test) auf Basis der Use-Cases

Das seitens Bosch erarbeitete Konzept zur Herangehensweise für das Condition Monitoring ist im folgenden Schaubild (siehe Abb. 4) dargestellt. Es wird zwischen der Komponentenebene, auf welcher die Methode erarbeitet wird, und der Systemebene für das Condition Monitoring, unterschieden. Anhand der ausgewählten Applikation wurden die kritischen Belastungszustände bewertet. Es wurden geeignete Testvehikel designt und aufgebaut. Im Falle von Bosch der SiC D2Pak gelötet auf Leiterplatte. Die beim Aufbau aufgenommenen Prozessdaten und -bilder wurden weiterverarbeitet bzw. vorbereitet, um die relevanten Inputdaten für das Training der KI-Modelle zu bekommen. Die aufgebauten Testvehikel wurden unter verschiedenen beschleunigten Belastungen erprobt und die

dabei online aufgenommenen Lebensdauerdaten flossen ebenfalls in die KI-Modellierung. Der Output des KI-Modells ist eine prognostizierte Lebensdauerklasse des untersuchten Designelements.

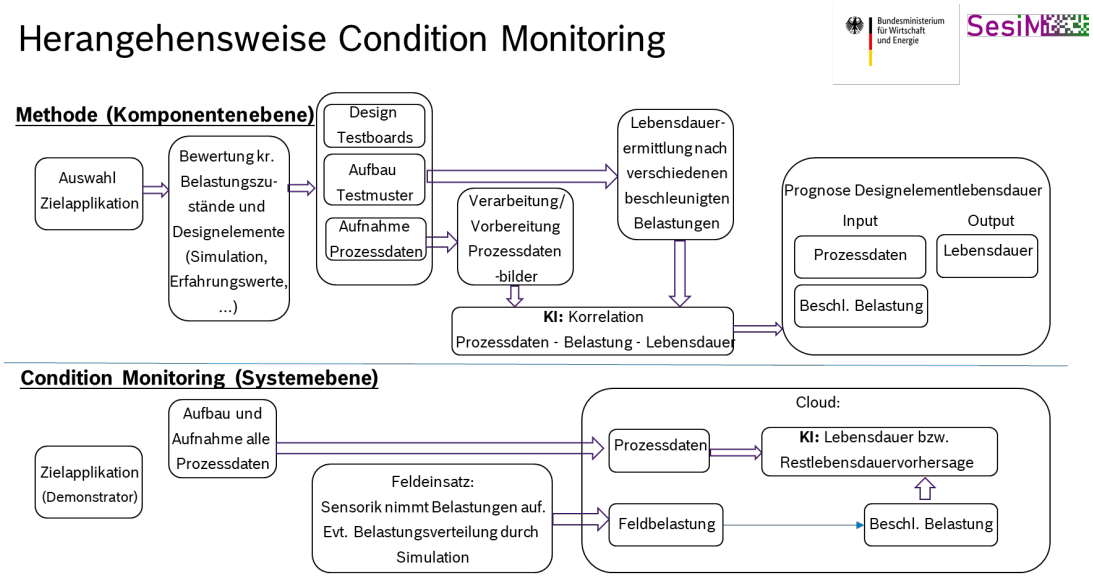


Abbildung 4: Bosch Schema Herangehensweise Condition Monitoring

Das Condition Monitoring, die Zustandsüberwachung, spielt auf Systemebene eine Rolle. D.h. in einem größeren System, in welchem das für die Erarbeitung der Methode genutzte Designelement, enthalten ist. Auch hier fließen zwei Arten von Daten in eine KI: die Prozessdaten und die im Feld über Sensoren gewonnen Belastungsdaten. Da die KI bei der Methodenentwicklung auf eine beschleunigte Belastung trainiert wurde, müssen die Daten der Feldbelastung in Daten der beschleunigten Belastung übertragen werden. Aus diesen und den Prozessdaten soll eine Vorhersage der Restlebensdauer möglich sein.

AP 1.6 Erarbeitung der Anforderungen an die Komponenten zur Umsetzung der priorisierten Konzepte (Einbauumgebung, Belastungsprofile, Nutzungsszenarien, Fehlermechanismen)

Als leistungselektronische Komponente im Kraftfahrzeug ist die Automotive Anwendung DC/DC-Wandler vor allem klimatischen Belastungen sowie Belastungen aufgrund des aktiven Betriebs ausgesetzt. Diese Belastungen treten aufgrund von gefahrenen Stromprofilen, aber auch aufgrund der Umgebungstemperaturen auf. Für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen werden die im Feld auftretenden Belastungen in Laborbelastungen übertragen. Um die Dauer der Testzeiten zu reduzieren, werden die Feldbelastungen in beschleunigte Testbelastungen übertragen. Dabei muss jedoch sichergestellt sein, dass sich der Schädigungsmechanismus aufgrund der Überhöhung nicht verändert. Nur bei gleichem, Ausfallort und -mechanismus ist eine Beschleunigung der Zuverlässigkeits- und Lebensdauertests legitim. Bei einer Automotive Temperaturwechselerprobung des Systems Bauelement – Lötstelle – Leiterplatte stellt typischerweise die Lötstelle das schwächste Glied dar. Hier erfolgt durch die thermozyklische Belastung eine Alterung der Lötstelle, bis hin zum Ausfall.

Für die Lebensdauererprobung des DC/DC-Wandlers werden aus dessen Feldkollektiven beschleunigte, geraffte Stromprofile über eine gewisse Zeit abgeleitet. Aufgrund der Strompulse während des definierten Fahrzyklus, entsteht wegen der Verlustleistung der Leistungsbauelemente Wärme. Aus den maximal auftretenden Temperaturen wiederum werden passive Temperaturprofile

(Temperaturwechsel) abgeleitet. Für die Freigabe des DC/DC-Wandlers wird eine bestimmte Anzahl an passiven Temperaturwechselzyklen für eine bestimmtes Temperaturwechselprofil ohne Ausfall gefordert. Abgeleitet aus den die Lebensdauer bestimmenden Temperaturbelastungen der Anwendung DC/DC-Wandler führte Bosch im Rahmen des Projekts SesiM mit Unterstützung von Aucoteam verschiedene Temperaturwechseltests mit den Testvehikeln. Dazu zählten passive Temperaturwechseltests: Die Testmuster werden in einer Temperaturkammer aufgeheizt und abgekühlt. Die Wechselzeit zwischen der Minimaltemperatur und der Maximaltemperatur soll zwischen wenigen Sekunden (Schock) und einer langsameren Temperaturrampe variiert werden. Die genaue Planung und Ausgestaltung der Lebensdauertests hinsichtlich Maximaltemperaturen, Temperaturhub, Messdatenerfassung usw. erfolgte auf Grundlage der Feldbelastung des DC/DC-Wandlers im Rahmen des AP 8.

2.1.2 Arbeitspaket 2: Identifikation von Systemparametern, erfassbaren Sensordaten und potenziellen Sensorerweiterungen für automatisierten BIST

Inhalt des Arbeitspaket 2 ist die Erfassung und Bewertung von Parametern für die KI-Modellierung. Dabei handelt es sich um Systemparameter für die Bahn- und Automotive Anwendung sowie Daten, welche aus den Aufbau- und Qualitätsprozessen gewonnen werden können. Dafür werden in Abhängigkeit der Anwendung zunächst die systembeschreibenden Parameter erfasst, danach bewertet und abschließend die für die KI-Modelle relevanten Daten ausgewählt. Diese Vorgehensweise ist in den Unterarbeitspaketen AP 2.1 bis AP 2.3 abgebildet.

AP 2.1 Identifizierung von systembeschreibenden Parametern und Meta-Daten

Zunächst wurden seitens der Partner IZM, Siemens und Bosch die Anwendungen, welche im Projekt betrachtet werden sollen, weiter detailliert und beschrieben. Abgeleitet aus der Automotive Anwendung, dem DC/DC-Wandler wurde seitens Bosch die aufgrund Temperaturbelastung lebensdauerkritische Komponente SiC D2Pak-7L gelötet auf Leiterplatte ausgewählt (siehe Abbildung 5). Damit soll ein möglichst kleines, gut zu verstehendes, gut mess- und testbares System untersucht werden, um die KI-Modelle später nachvollziehen zu können.

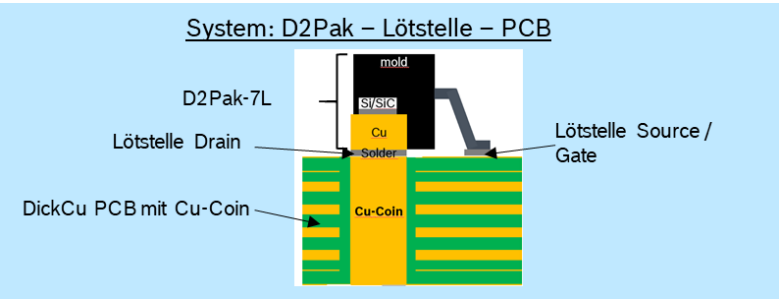


Abbildung 5: Schema D2Pak – Aufbau- und Verbindungstechnik (Lötstelle) – Leiterplatte

Gemeinsam wurden für die IZM Testanwendung, für die Bahnanwendung (Siemens) und für die automotive Anwendung (Bosch) die systembeschreibenden Parameter erarbeitet. Bosch unterteilte die systembeschreibenden Parameter für die D2Pak-Anwendung in drei Kategorien:

- Geometrieparameter
- Lastparameter
- Ermüdungsparameter

Zu den Geometrieparametern zählen Lotvolumen, Lotdepotabmessungen, Bauelemente-abmessungen und Voiding. Diese wurden während bzw. nach dem Fertigungsprozess mittels optischer Inspektionsmethoden aufgenommen und beschreiben die Lötstellen sowie den D2Pak selbst. Die Zuverlässigkeitstests passiver Temperaturwechsel zählt zur Kategorie Last. Zur Gruppe der Ermüdungsparameter zählen die Messgrößen während der Tests wie Spannung_Drain-Source, Spannung_Gate-Source und die Junction Temperatur gemessen über die im Package interne Diode. Außerdem zählen der aus diesen Messgrößen berechenbare Rth (Thermische Widerstand) und End of Life (EoL) zu den Ermüdungsgrößen dazu.

AP 2.2 Unterscheidung von alterungs- und manipulationssensitiven Systemparametern

Für die Geometrieparameter wurden die Möglichkeiten und Grenzen deren Messung bzw. Auswertung erarbeitet. Dabei wurde die Genauigkeit der optischen Inspektionsmethoden für die Aufnahme der für den D2Pak definierten Messgrößen, gemeinsam mit Göpel untersucht. Des Weiteren wurden die Möglichkeit der Datengewinnung aus Bilddaten gemeinsam mit Gestalt Robotics und Göpel ausgearbeitet. Seitens Bosch wurde eine detailliertere Auflistung aller möglicher Geometrieparameter des D2Pak Systems erstellt, welche einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und damit Lebensdauer haben können. Anschließend erfolgt auf Basis einer Bosch Expertenschätzung eine Priorisierung, um sich auf die relevantesten Systemparameter zu fokussieren.

Die in der Kategorie „Geometrie“ in Tabelle 2 gelisteten Geometrieparameter unterliegen zwar Prozessschwankungen, jedoch keiner Alterung. Sie werden ausschließlich während bzw. nach dem Herstellprozess aufgenommen. Die detaillierte Ausarbeitung sowie Priorisierung der zuverlässigkeitsrelevanten Geometrieparameter erfolgten in AP 4 und AP 7.

Die Lastparameter sind die von außen anliegenden Temperaturen bzw. Temperaturprofile aufgrund des Fahrzyklus. Diese Systemparameter unterliegen keiner Alterung.

Die „funktionellen“ Parameter sind alterungssensitive Systemparameter. Dies umfasst gemessene Spannungen und Temperaturen während der Lebensdauererprobungen an den D2Pak-Testvehikeln. Außerdem die daraus resultierende Änderung im thermischen Widerstand sowie das End of Life. Aufgrund der angelegten Last über die Zeit ist eine Veränderung der genannten Größen durch eine Alterung des Aufbaus zu erwarten.

AP 2.3 Auswahl und Bestimmung relevanter Parameter und Daten für die Systemmodellierung

Die Parameter und Daten der automotive Anwendung D2Pak-Testvehikel, welche für die KI-Modellierung relevant sein können, unterteilen sich in verschiedene Kategorien. Zu den Inputgrößen zählen zum einen Lastgrößen. Aus den Lastprofilen für einen DC/DC-Wandler im Feld (siehe AP 1.6), welche sich aufgrund der Fahrzyklen ergeben, werden Temperaturprofile für die Zuverlässigkeitserprobungen abgeleitet. Die gemessenen Temperaturen im passiven Temperaturhub sind eine Inputgröße. Weitere Eingangsgrößen für die KI-Modelle sind Onlinemessdaten, welche während der Lebensdauertests aufgezeichnet werden. Dazu zählen die Messgrößen Junctiontemperatur und die Spannungen U_DS sowie U_GS. Das aus diesen Messgrößen ermittelbare Zwischenergebnis, der thermische Widerstand, soll ebenfalls in die KI-Modellierung einfließen. Außerdem geht das Testergebnis, die End of Life Daten, mit ein.

Weitere Inputgrößen für die Systemmodellierung werden die laut Bosch Expertenschätzung zuverlässigkeitsrelevanten Geometrieparameter für die gewählte D2Pak-Anwendung sein. Diese

wurden mittels optischer Inspektionsmethoden (SPI, AOI, AXI) gemessen. Zu den relevanten Parametern zählt das Lotpastenvolumen, Abmessungen des D2Pak, Verdrehung, Verkippung, Standoffhöhe und Voiding. Die detaillierte Darstellung der Messgrößen aus den optischen Inspektionsverfahren wird in AP 4 und AP 7 sowie im Bericht von Göpel beschrieben.

2.1.3 Arbeitspaket 3: Konzept zur eindeutigen Systemcharakterisierung während der Nutzungsphase

Im Arbeitspaket 3 wurde ein Konzept für eine KI-Modellierung zur Systemcharakterisierung erarbeitet. Dafür flossen die verfügbaren Daten und Anforderungsprofile aus AP 1 und AP 2 in die Modellerstellung mit ein. Des Weiteren wurde ein Konzept für die zustandsadaptive Anpassung und für die Klassifizierung der Vertrauenswürdigkeit der Modelle erstellt.

AP 3.1 Identifizierung und Konzeption relevanter Modelle für die Erkennung möglicher Manipulationen und Degradationen im System unter Einsatz von hybriden Modellen: Kombination von physikalischen und datengetriebenen (z.B. LSTMs) Modellen

Im Rahmen des AP 1 sowie des AP 3.1 wurde in Zusammenarbeit mit Siemens und dem Fraunhofer IZM ein einfaches Testvehikel TV01 konzeptioniert. Mit Hilfe dieses TV01 konnten erste Daten optische Inspektionsdaten erarbeitet werden. Außerdem wurde daran die Herangehensweise für die weiteren Testmuster erarbeitet.

Das TV01 besteht aus drei Teilen (siehe Abbildung 6). Ein Teil beschreibt die Bahnanwendung: TV01-Oszillator (Federführung: Siemens). Ein weiterer Teil beschreibt die Testanwendung des IZM: TV01-DC/DC. Der dritte Teil des TV01 wurde seitens Bosch von der Automotive Anwendung abgeleitet: TV01-D2Pak. Bosch hat das Design des TV01-D2Pak entworfen sowie das Layout dafür erstellt. Alle Teillayouts wurden von Siemens zusammengefügt.

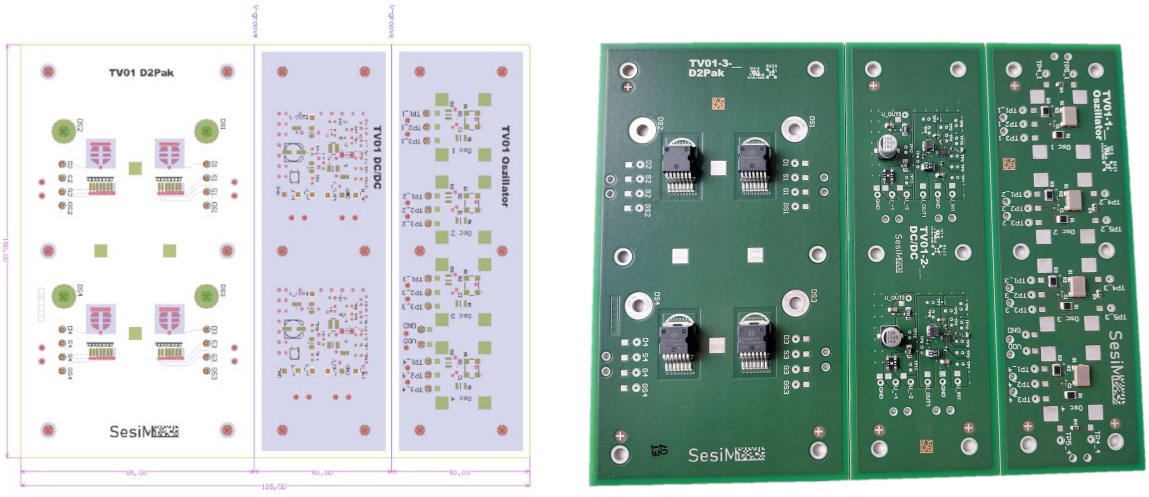


Abbildung 6: TV01 mit den Teilen Oszillator (Siemens), DC/DC (IZM) und D2Pak (Bosch). Links: Layout; rechts: bestückter TV01 Nutzen

Der Bosch-Teil des Testvehikels, das sog. TV01-D2Pak, besteht aus einer Testschaltung mit vier Siliziumkarbid Mosfetpackages, dem SiC D2Pak. In leistungselektronischen Anwendungen, in welchen diese Bauteile eingesetzt werden, ist eine Dickkupferleiterplatte zur Stromleitung erforderlich. Folglich wurde dies auch im TV01 umgesetzt und es wurde eine 6-lagige Leiterplatte mit 2 x 105 µm Dickkupferlagen definiert.

Der Fokus des TV01-D2Pak lag auf der Ermittlung von Prozessdaten mittels optischer Inspektionsmethoden. Geometrieabhängige Prozessdaten welche mittels SPI (solder paste inspection), AOI (Automatische optische Inspektion) und AXI (Automatische Röntgen Inspektion) vom D2Pak ermittelt werden können, stellten einen großen Inputparameter für die KI-Modelle dar. Des Weiteren wurde TV01-D2Pak auch für die Entwicklung der Messtechnik genutzt. Die Erkenntnisse wurden auf das von Bosch designte Testboard TV02-D2Pak im späteren Projektverlauf angewendet. Mit diesem größeren Testboard wurden die Prozess-, Zuverlässigkeits- und Lebensdauerdaten in größerer Stückzahl für die KI-Modelle ermittelt.

Die physikalischen und datengetriebenen Modelle für die automotive Anwendung wurden auf Basis der in AP 3 erarbeiteten Inhalte ausgewählt (siehe AP 5). Bosch lieferte hierfür die Art und Zusammensetzung der Inputdaten, wie beispielsweise die Informationen, ob es sich um Zeitreihen oder einmalige Daten handelt. Außerdem gab Bosch vor welche Outputdaten die KI-Modellierung ausgeben soll.

AP 3.4 Konzepte zur zustandsadaptiven Anpassung der Systemperformance und zur Abstufung bzw. Klassifizierung der Vertrauenswürdigkeit

Auf Grundlage der in AP 3.1 definierten Input und Outputparameter für die KI-Modelle wurden mögliche Systemanpassungen für die automotive Anwendung dargestellt. Die tiefergehende Erarbeitung dessen erfolgt ebenso wie die detaillierte Definition der Ein- und Ausgangsgrößen für die D2Pak-Anwendung im Rahmen eines Workshops von AP 3 / AP 5.

2.1.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung von mehrstufigen Musteranwendungen zur Erfassung von Merkmalsänderungen und Datengenerierung

Im Rahmen des AP 4 werden Testmuster definiert und geplant. Die Anforderungen an die Testmuster sowie die Messdatengenerierung werden erstellt und es erfolgt deren Entwicklung. Die in AP 1 ermittelten Feldbelastungen werden in geeignete beschleunigte Testmethoden überführt. Des Weiteren wird festgelegt, welche Parameter aus AP 2 überwacht werden, um damit Daten für KI-Modelle bereit zu stellen.

AP 4.1 Anforderungen an Testmuster und Messdatengenerierung

Ausgehend vom seitens Bosch gewählten Demonstrator, dem DC/DC-Wandler, wurden die zuverlässigkeitsrelevanten Designelemente festgelegt. Es wurde ein Testvehikel gewählt, welches ein D2Pak-Bauelement gelötet auf einer Dickkupferleiterplatte beinhaltet. Aufgrund der Verlustleistung dieser leistungselektronischen Komponente entsteht eine große thermische Verlustleistung. In AP 1 wird die Auswahl des D2Paks für die Arbeiten in SesiM geschildert. Für das TV01, welches in AP 3.1 beschrieben wird, wurden bereits die Anforderungen daran sowie an die Generierung der Messdaten ermittelt. Bosch war hierfür insbesondere in Diskussion mit Göpel für die Ermittlung der optischen Inspektionsdaten (SPI, AOI, AXI) (detaillierte Beschreibung in AP 7) und mit Aucoteam für die Generierung von Onlinemessdaten (detaillierte Beschreibung in AP 8). Bosch stellte beiden Partnern Vorabtestmuster zur Verfügung, um noch vor dem TV01 erste Machbarkeitstests durchzuführen. Die kleinen Muster beinhalten ein einzelnes SiC D2Pak-Bauelement, gelötet auf eine Dickkupferleiterplatte. Sie sollten erste Eindrücke und Erfahrungen ermöglichen, um diese bereits am TV01 umsetzten zu können.

Für die bei Bosch, Siemens und dem IZM geplanten Testmuster TV02-1 D2Pak, TV02-2 Oszillator und TV02-3 DC-Wandler wurde gemeinsam ein Lastenheft erstellt. Hierfür flossen die Erkenntnisse aus den vorangegangenen TV01 sowie aus den von Bosch zusätzlich zur Verfügung gestellten Testmustern mit ein. Es wurden verschiedene Punkte aus den Kategorien Material/Design, Prüfungsabsicht, optische Inspektionsfähigkeit und noch aus einigen anderen Bereichen im Lastenheft aufgenommen. Dadurch erfolgte beispielsweise die Definition der Leiterplatte mit der jeweiligen Lagenanzahl, Kupferdicken, Leiterplattenmaterial usw. oder z.B. Festlegungen im Layout für die AOI-Fähigkeit.

AP 4.2 Entwicklung von Testmustern und Messdatengenerierung

Messdatengenerierung

Für das TV01 erfolgte die Entwicklung und das Layout für den D2Pak-Teil seitens Bosch (Beschreibung in AP 3.1). Neben Design und Layout wurden Messgrößen festgelegt und die dazu gehörige Messtechnik in Zusammenarbeit mit Aucoteam definiert. Des Weiteren erfolgte die Definition der aufzunehmenden Messdaten der optischen Inspektionsmethoden gemeinsam mit Göpel sowie Bosch intern. Die von Bosch erstellte Liste der zuverlässigkeitsrelevanten Parameter wurde mit den SPI, AOI und AXI-Experten diskutiert. Die Randbedingungen wurden geklärt, die Ausgabe der Daten (Art, Format, usw.), Möglichkeiten und Grenzen der Inspektionsmesstechnik wurden erarbeitet. Das Ergebnis der ausführlichen Diskussionen ist in Tabelle 3 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 3: Zuverlässigkeitsrelevante Parameter für den D2Pak und die Möglichkeiten für deren Messung mittels optischer Inspektionsmethoden

Nr.	Prio	Parameter	SPI	2D AOI	3D AOI	2D AXI	3D AXI	Verifikationsmethode	Kommentar
1	A	Lotvolumen	√ ✓ BOSCH	-	-	-	-	SPI: 3D-Messung Lotpaste	AXI: zu hohe Absorption + VIA(s)
2a	A	Geometrie BE (Breite, Länge)	-	(√) Ggf. über 3D-Modell im Nachgang mögl.	√ – BOSCH	-	-	AOI: 3D-Messung	AXI: nicht implementiert
2b	A	Geometrie BE (Höhe Mold)	-	-	√ – BOSCH	-	-	AOI: 3D-Messung	
2c	A	Geometrie BE (Höhe Leadframe)	-	-	√ – BOSCH	-	-	AOI: 3D-Messung	
3a	B	Geometrie Gullwings (Höhe)	-	-	√ ✓ BOSCH	-	-	AOI: 3D-Messung	AXI: nicht implementiert
3b	B	Geometrie Gullwings (Breite, Länge)	-	-	-	-	-		AXI: nicht implementiert
4	A	Standoff-Höhe Drain	-	-	- – BOSCH	-	-		AXI: zu hohe Absorption + VIA(s)
5	B	Lotspaltdicke Gullwings	√	-	-	-	-	SPI: 3D-Messung Lotpaste	AXI: nicht implementiert
6	B	Meniskusform Gullwings	-	√	√	-	√	AXI: CT-Recon Querschnitt	
7	A	Verkippung BE	-	-	√ ✓ BOSCH	-	√	AXI: MC-Laser	
8	B	Verdrehung BE	-	-	√	√	√	AXI: 2D Edge-Detection Clip	
9	A	Voiding Drain Lötstelle	-	-	-	-	√ ✓ BOSCH	AXI: CT-Recon Schnittebene	
9	A	Voiding CU-Coin Lötstelle	-	-	-	-	-		AXI: zu hohe Absorption — Cu-Coin nicht relevant!
10	B	Voiding Gullwing Lötstellen	-	-	-	-	√	AXI: CT-Recon Schnittebene	

Neben den Parametern, die mittels optischer Inspektionsmethoden aufgenommen wurden, wurden die Messgrößen und die Messtechnik für die Onlinemessdatenüberwachung zwischen Bosch und Aucoteam diskutiert. Bosch definierte die für die Onlinemessdatenüberwachung des D2Pak relevanten Messgrößen für das D2Pak-Testvehikel. Dazu zählen:

- Widerstände von Daisy Chains
- Temperaturen
- End of Life (Ausfallkriterium)

Die im Test und während der Messung geforderten maximalen Temperaturen, Widerstände, Messraten und Anzahl an Messkanälen wurden festgelegt. Von Bosch wurden die Möglichkeiten zur Onlineüberwachung erarbeitet (siehe AP 8).

Testmuster TV02-D2Pak

Die im Rahmen der Aktivitäten zum TV01-D2Pak gewonnen Ergebnisse und Erkenntnisse fließen in das Layout des TV02-D2Pak mit ein. So wird beispielsweise auf Referenzflächen rund um ein jedes Bauelement sowie eine ausreichend groß freigestellte Fläche unterhalb des Bauelements für Messungen des Standoff geachtet (siehe blaue Fläche in Abb. 10).

Für die Überwachung des D2Pak wurde eine online messbare Größe definiert: der Widerstandsanstieg aufgrund degradierender Lötstellen. Ein möglicher Anstieg des Widerstands wird anhand von vier ausgewählten Lotdepot-Paaren mittels einer Daisy Chain überwacht. Um dies realisieren zu können, wurde der Footprint, d.h. das Layout unterhalb des Bauelements, angepasst. Als Grundlage hierfür dienten Abschätzungen mittels thermomechanischer Simulation und CT-Aufnahmen von Testmustern nach passiver Temperaturwechselbelastung (Abb. 7).

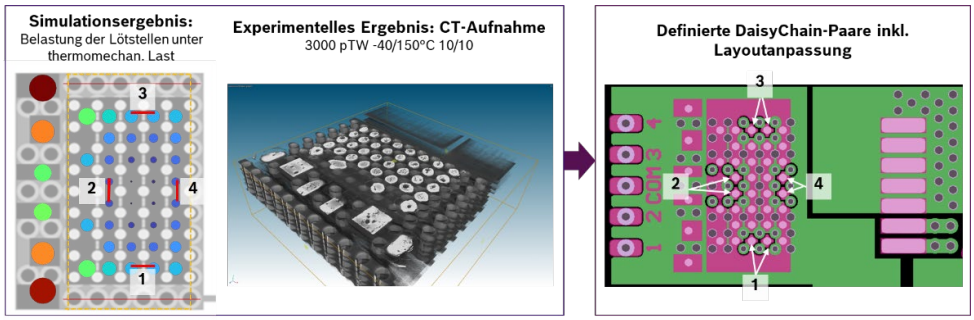


Abbildung 7: Footprint thermische Vias inkl. Daisy Chain für die Lötstellenpaare 1 - 4

Der Einfluss dieser Layoutänderungen auf die Ausbildung der Lötstellen sowie die Messbarkeit der Daisy Chains wurde vor endgültiger Fertigstellung des Layouts von TV02-D2Pak in einem Vorversuch untersucht. Nach Abschluss dieser Machbarkeitsuntersuchung und der positiven Bewertung seitens Bosch, wurde das Layout für die Daisy Chain Messung für das TV02-D2Pak übernommen.

Auf TV02-D2Pak wurden in sechs Spalten jeweils drei D2Paks in Reihe geschaltet, so dass pro PCB insgesamt 18 D2Paks besstückt werden konnten (Abb. 8). Die Bauelemente sind mit möglichst großem Abstand positioniert, dass sie, so weit möglich, thermisch entkoppelt voneinander sind. Entlang der oberen Kante der PCB befinden sich die Anschlüsse für die Ansteuerung. Entlang der unteren Kante der PCB befinden sich die Anschlüsse für die Daisy Chain Messung. Für die Überwachung der Temperatur auf der Leiterplatte wurden 5 Messstellen für PT100 Thermoelemente vorgesehen. Rund um das Bauelement wurde eine von Lötstopplack freigestellte Cu-Fläche „U“ als Referenzfläche für AOI vorgesehen. Die Cu-Fläche unterhalb des Bauelements wurde verbreitert, um für die Messung des Standoff einen besseren Kontrast zu erreichen.

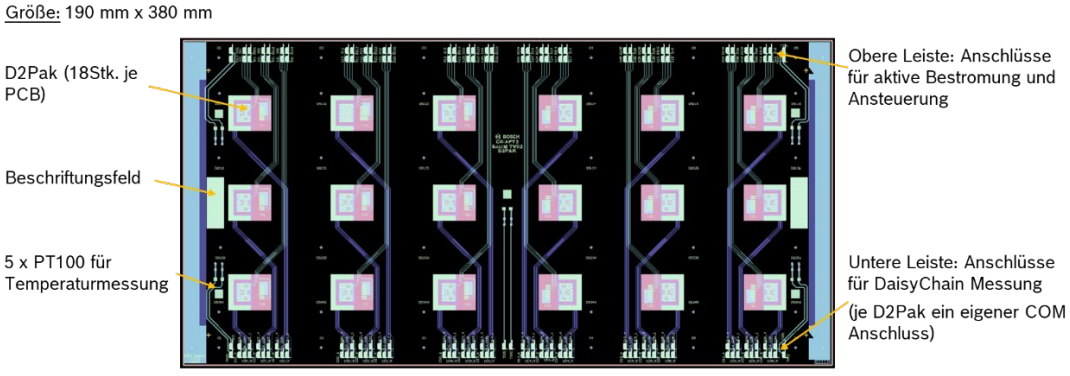


Abbildung 8: Layout der top- und bottom-Lage des TV02-D2Pak

AP 4.3 Erarbeitung von Konzepten zur Erfassung von Systemmanipulationen

Im Rahmen der Diskussionen in AP 5 erarbeitete Bosch eine Herangehensweise für die Datengenerierung für das TV02-D2Pak. Da für eine ordentliche KI-Modellierung möglichst viele Daten vorliegen sollten, konzentrierte sich Bosch auf die mittlere Geometrie der Lötstellen. Die mittlere Geometrie der Lötstelle bringt eine typische Prozessstreuung mit. Durch eine gezielte Manipulation von beispielsweise der applizierten Lotmenge, würde diese Gruppe überrepräsentiert werden. Es ist keine ausreichend gute Prognose über die Lebensdauer einer mittleren Geometrie möglich.

Das Ziel von Bosch ist die Korrelation zwischen Prozessdaten aus SPI, AOI und AXI mit unterschiedlichen Lastprofilen, um eine Lebensdauervorhersage der Lötstellen in Abhängigkeit der Belastung machen zu können. Eine Optimierung des Prozesses, und damit Variation von Prozessparametern, zählt nicht dazu. Eine Systemmanipulation kann in nachfolgenden Projekten betrachtet werden.

AP 4.4 Überführung der in- und extrinsischen Feldbelastungen aus AP1 in geeignete beschleunigte, kombinierte Testmethoden

Auf Basis der Feldbelastungen des DC/DC-Wandlers müssen für beschleunigte Erprobungen Temperaturprofile abgeleitet werden. Nur so kann in angemessener Zeit eine Zuverlässigkeitsuntersuchung der relevanten Designelemente erfolgen. Das Feldtemperaturprofil des DC/DC-Wandlers besteht zum einen aus einem passiven Temperaturprofil, zum anderen aus einer überlagerten aktiven Last. Daraus wurden Temperaturprofile für die Zuverlässigkeitstests abgeleitet. Der Fokus lag hier auf passiven Temperaturwechseltests. Eine Übersicht der bei Bosch und Aucoteam durchgeführten Zuverlässigkeitstests mit dem TV02-D2Pak ist in Tabelle 4 dargestellt:

Tabelle 4: Übersicht über durchgeführte Zuverlässigkeitstests

	Run	T_min / T_max	Wechselzeit / Haltezeit	
Passive TW	**pTW_1**	-40°C / 150°C	10 s / 30 min	@ Bosch
	pTW_2	-40°C / 65°C / 150°C	10 s / 30 min	@ Bosch
	pTW_3	-40°C / 125°C	10 s / 30 min	@ Aucoteam

AP 4.5 Definition der zu überwachenden Parameter aus AP2

Um für die KI-Modelle Daten zu erlangen, wurden während der Lebensdauertests online Messdaten bis zum End of Life aufgenommen. Es wurden Daisy-Chain Messungen an einigen Lötstellen durchgeführt. Sobald eine Lötstelle gerissen war, konnte eine Widerstandserhöhung gemessen werden und dadurch der End of Life bestimmt werden. Das Daisy Chain Layout für die Onlinemessung einer Widerstandserhöhung in vier definierten Lötstellenpaaren ist unter AP 4.2 dargestellt. Des Weiteren erfolgte pro TV02-D2Pak an fünf Messstellen (jeweils an den Ecken und in der Mitte der Leiterplatte) eine Online-Temperaturmessung. Die Zeitreihen dieser, bis zum End of Life der Lötstellen, überwachten Parameter flossen als Inputgrößen in die KI-Modellierung.

2.1.5 Arbeitspaket 5: Hybride Modellierung der Musteranwendungen

Auf Basis der erfassten Systemparameter aus AP 2 und der in AP 3 erarbeiteten Konzepte wurden hybride Modelle für die Automotive Anwendung und Bahnanwendung aufgebaut, trainiert und optimiert. Es wurden physikalische Modelle und datenbasierte Modelle entwickelt und optimiert. Anschließend wurden diese beiden zu einem hybriden Modell kombiniert und auf dieser Basis eine Selbstvalidierungsmethode entwickelt.

Hybrider Modellierungsansatz

Die grundsätzliche Idee für die Herangehensweise und das Zusammenspiel von physikalischem, datengetriebenen und hybriden Modell wurde von Bosch erarbeitet und mit den Partnern diskutiert. In Abb. 9 ist der Modellansatz für die hybride Modellierung dargestellt. Dies vereint alle Arbeitsinhalte des AP 5.

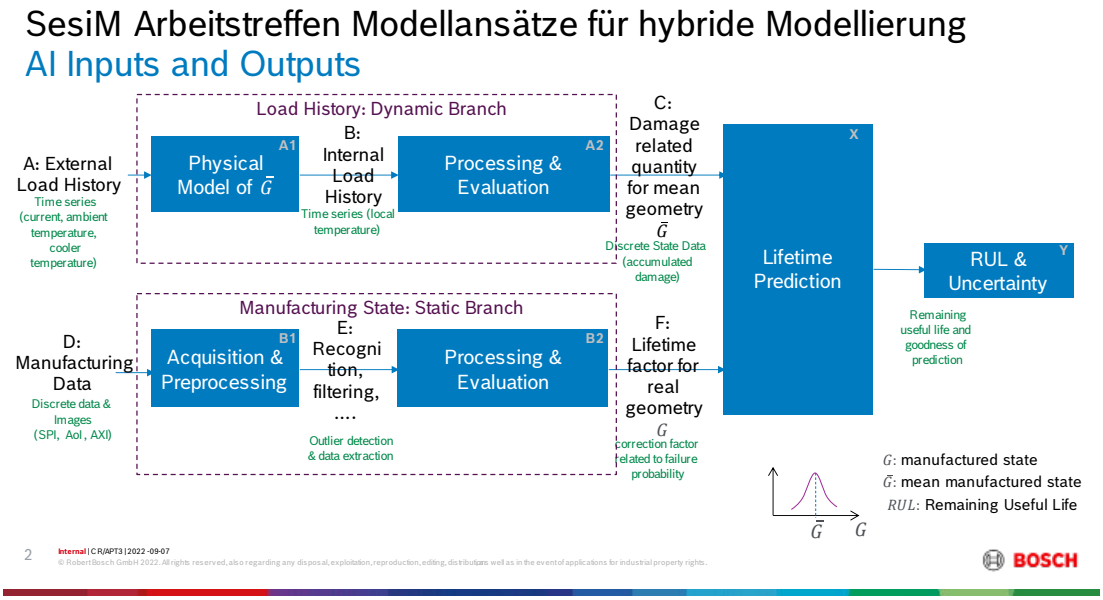


Abbildung 9: Modellansatz für hybride Modellierung mit dynamischem und statischem Datenpfad

Im dynamische Datenpfad erfolgt auf Basis einer mittleren Geometrie eine akkumulierte Schädigung. Durch die Eingangsgrößen aus einer externen Lasthistorie, wie beispielsweise Zeitserien von Strom, Temperatur, usw., wird mit Hilfe von physikalischen Modellen auf die interne Last in der Lötstelle geschlossen. Diese lokalen Lastprofile werden verarbeitet und nach Zuständen aufgeschlüsselt, so dass eine akkumulierte Schädigung für eine mittlere Geometrie daraus resultiert. Diese ist Input für die Lebensdauermodellierung einschließlich Vorhersage der Restlebensdauer und deren Unsicherheit.

Der Input des statischen Datenpfads erfolgt einmalig – statisch – und erfolgt nicht kontinuierlich wie beim dynamischen Datenpfad. Bei den Inputgrößen handelt es sich um Prozessdaten aus den optischen Inspektionssystemen. Aus Bilddaten werden definierte geometrische Größen, welche als zuverlässigkeitsrelevant ausgewählt wurden, ermittelt. Durch einen nachgelagerten Bearbeitungs- und Evaluierungsschritt soll eine Lebensdauerklassifizierung für reale Geometrien ausgegeben werden können. Dieser Klassifizierungsfaktor für eine reale Geometrie unter Berücksichtigung der Fehlerhäufigkeit fließt als Korrekturfaktor für den Output des dynamischen Datenpfads ebenso in die Lebensdauermodellierung.

Inputdaten für hybride Modellierung

Die in AP 7 ermittelten Inputdaten für den statischen Datenpfad (SPI, AOI und AXI-Daten) wurden seitens Bosch für die Modellierung zunächst aufbereitet. Dazu wurden die Component und Pin IDs von SPI, AOI und AXI-Daten vereinheitlicht, ebenso die Orientierungen, Rotation und der Ursprung des Koordinatensystems (siehe Abb. 10). Für jede Inspektion wurden die gemessenen Parameter im gleichen Datenformat in einer csv. Datei gespeichert. Dadurch wurde ein einheitliches Format für alle drei Inspektionsarten erreicht, mit welchem die Uni Stuttgart ohne weitere Bearbeitung anfangen konnte, die Daten einzulesen und auszuwerten. Zusätzlich zu den Messdaten, wurden für AOI und AXI auch die Bilddaten entsprechend benannt und mit abgespeichert.

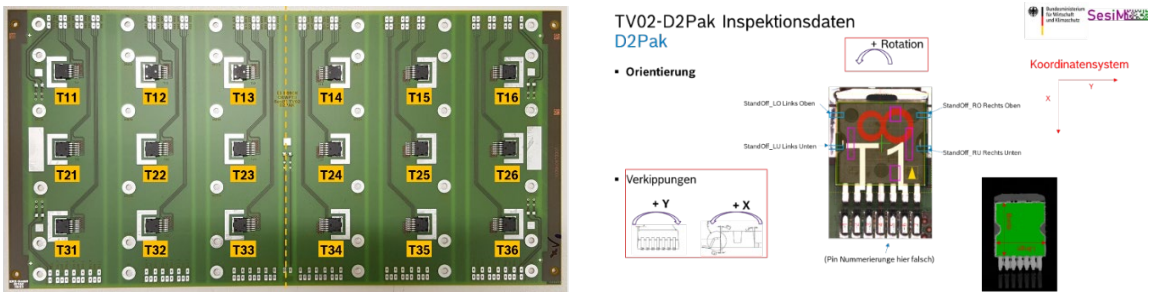


Abbildung 10: Einheitliche Nummerierung und Orientierung der D2Paks auf TV02-D2Pak

AP 5.1 Entwicklung eines heterogenen physikalischen Modells basierend auf Geometrie, Material und relevanten Einflussgrößen aus AP 1, 2

Auf Grundlage des bei Bosch vorhandenen Expertenwissens, wurde ein Lötstellenversagen für das Testsystem D2Pak gelötet auf Leiterplatte erwartet. Um das Schädigungsverhalten des Systems D2Pak gelötet auf Leiterplatte nach Temperaturwechsel beschreiben zu können, wurden Vorab-Testmuster aufgebaut. Diese wurden einer thermomechanischen Belastung im Temperaturschockwechselofen zwischen -40°C und +150°C unterzogen. Mit Zwischenmessungen wurde der Rth, d.h. der thermische Widerstand des Aufbaus, verfolgt. Aufgrund der experimentellen Voruntersuchungen wurde ein physikalisches Modell für das System D2Pak gelötet auf Leiterplatte erarbeitet. Der durch thermomechanische Belastung im Temperaturwechsel induzierte Fehlermodus war das Lötstellenversagen des second level Aufbau- und Verbindungstechnik, d.h. der Lötstellen zw. Bauelement und Leiterplatte. In einer FEM-Simulation wurde ein Modell des auf Leiterplatte gelöteten D2Paks erstellt. Durch die thermomechanische Simulation wurde eine Vorhersage der Belastung der Lötstellen gemacht, um so das Daisy Chain-Layout sowie die Versuchsplanung (in Bezug auf Temperaturhub, erwartete Testdauer, …) richtig auszulegen.

AP 5.2 Entwicklung und Optimierung von datenbasierten Modellen basierend auf definierten Systemparametern aus AP 2 und den in AP3 erarbeiteten Konzepten

Das Testboard TV02-D2Pak wurde in großen Stückzahlen aufgebaut werden, um möglichst viele Daten aus der optischen Inspektion sowie von den Lebensdauertests für die datenbasierten Modelle zur Verfügung zu stellen. Zunächst wurden seitens Uni Stuttgart die SPI, AOI und AXI-Daten (Inputdaten des statischen Datenpfads) auf Korrelationen hin untersucht und dies mit Bosch diskutiert. Damit sollte der Parameterraum für die daran anschließende KI-Modellierung mit den Lebensdauerdaten, eingeschränkt werden. Messparameter, die große Abhängigkeiten zueinander aufweisen, sind als redundante Inputgrößen anzusehen und können reduziert werden.

Die Korrelationen der von Bosch aufbereiteten Inspektionsdaten des TV02-D2Pak, für die sich in Lebensdauertests befindlichen Testleiterplatten, ist in den folgenden Korrelationsmatrizen dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurden geometrisch gleiche Lötstellen zusammengefasst ausgewertet. Der Fokus wurde auf die Lötstellen mittig unterhalb des Bauelements (im thermischen Pfad) gelegt, da diese für die Lebensdauer relevant sind.

Es erfolgte zunächst die Darstellung der Inspektionsparameter jeweils getrennt für die AOI, AXI und SPI-Messwerte. So wurden die AOI-Daten von ursprünglich 27 Parametern, durch Mittelung auf 13 Parameter reduziert. Die AXI und SPI-Daten (jeweils drei Parameter je Lötstelle) wurden durch Mittelungen auf jeweils neun Parameter reduziert. Dadurch sind die Daten übersichtlicher und können besser ausgewertet und korreliert werden. Exemplarisch sind die Korrelationen der SPI-Parameter in Abbildung 11 dargestellt.

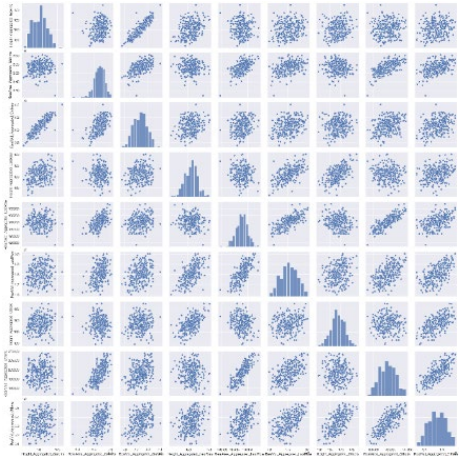


Abbildung 11: SPI-Parameter

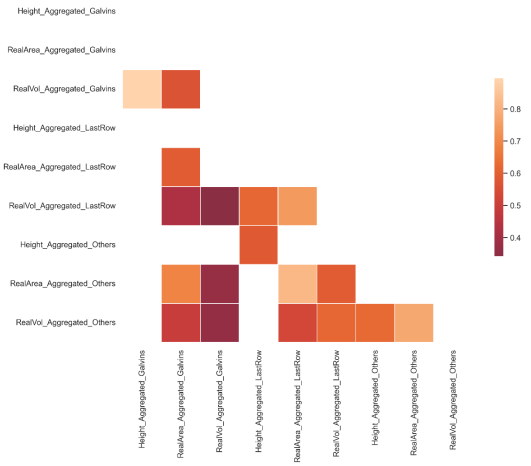


Abbildung 12: SPI-Korrelationsmatrix

Über die Betrachtung der einzelnen Parameter in einer Korrelationsmatrix, können durch eine Skala Wechselwirkungen zwischen den Parametern farblich visualisiert werden. Für die hier gewählten Darstellungen gilt: je heller die Farbe, desto größer die Korrelation. Aus der AOI-Korrelationsmatrix in Abb. 14 lässt sich entnehmen, dass der Parameter AverageHeight in Summe die höchsten Korrelationen aufweist. Außerdem korreliert der Standoff „oben“ mit dem Standoff „unten“.

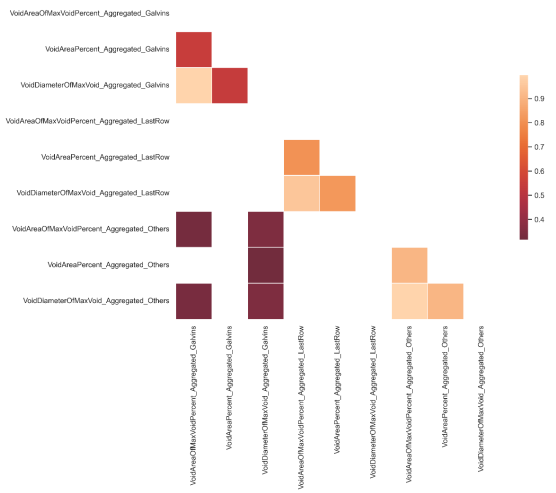


Abbildung 13: AXI-Korrelationsmatrix

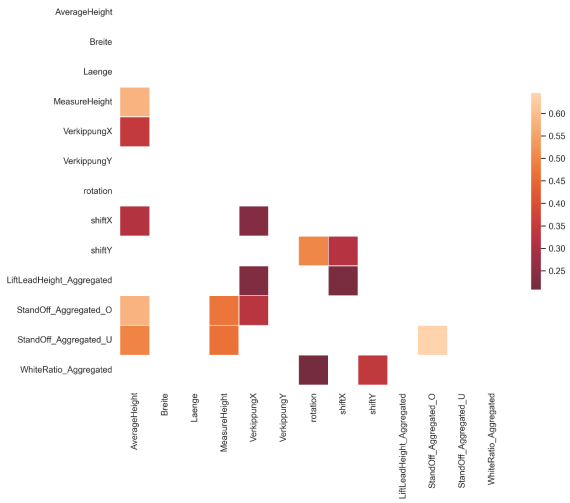


Abbildung 14: AOI-Korrelationsmatrix

Aus der AXI-Korrelationsmatrix in Abb. 13 lässt sich erkennen, dass die drei Parameter VoidAreaOfMaxVoidPercent, VoidAreaPercent und VoidDiameterOfMaxVoid je Lötstellengruppe (Gullwings, letzte Reihe und Mitte („Others“)) stark korrelieren.

Mit Hilfe der SPI-Korrelationsmatrix in Abb. 12 wird deutlich, dass es beispielsweise mit RealArea und Height Parameter gibt, welche kaum korrelieren und somit für zukünftige Betrachtungen entfernt werden können. Der Parameter RealVol hingegen weist eine starke Korrelation mit Height und RealVol innerhalb der Lötstellengruppe auf. Somit ist er redundant und es kann ein Parameter reduziert werden. Die reduzierten Datensätze aus SPI, AOI und AXI-Daten wurden von der Uni Stuttgart in einem gemeinsamen Datenframe zusammengeführt. Dies wurde für die hybride Modellierung in AP 5.3 genutzt.

AP 5.3 Kombination von heterogenen physikalischen und datenbasierten Modellen zu einer hybriden Abbildung von Elektronikkomponenten

Das physikalische Modell auf Grundlage der physikalischen Schädigungsmechanismen sowie die datenbasierten Modelle, wurden gemeinsam in eine hybride Modellierung überführt. Hierfür wurde von Bosch ein Lebensdauerdatensatz für den Temperaturwechseltest -40/150°C an die Uni Stuttgart übergeben. Unter Einbeziehung der für die erprobten Testboards aufgenommenen SPI, AOI und AXI-Daten (siehe AP 5.2) erfolgte seitens der Uni Stuttgart eine Modellierung mittels KI. Die gewählten KI-Modelle sowie die Möglichkeiten zur Optimierung wurden gemeinsam, d.h. unter Einbeziehung des Expertenwissens (physikalische Modelle), diskutiert. Ansätze hierfür waren beispielsweise die Gruppierung der Lötstellen oder die Anwendung verschiedene KI-Ansätze. Dadurch konnte mittels der der TV02-D2Pak Daten eine Klassifizierung der Lebensdauerprognose in zwei Klassen erreicht werden. Durch den Einsatz einer Hyperparameteroptimierung für neuronale Netzwerke, einem Decision Tree, kann mit einer Genauigkeit von ca. 70 bis 80% diese Vorhersage erfolgen. Dabei ist zu erkennen, dass es keine offensichtlichen Abhängigkeiten der Inputparameter aus SPI, AOI und AXI gibt. Die Abhängigkeiten der Inputparameter aus den Inspektionsdaten sind höheren Grades, die nur mit einer solchen KI-Modellierung zu erfassen sind.

AP 5.4 Entwicklung einer Selbstvalidierungsmethode (Prognose: optimaler Betrieb) auf Basis der hybriden Modellierung

Zwischen Bosch und der Uni Stuttgart erfolgte die Diskussion der KI-Modellierung mit den Inputdaten des TV02-D2Pak. Aufgrund der großen Anzahl an Inputdaten und der limitierten Anzahl an Zuverlässigkeitstests, sind die KI-Modelle nicht in der Lage eine exakte Lebensdauerprognose zu tätigen. Abhängig vom verwendeten KI-Modell, ist die erforderliche Menge an End of Life Daten für eine gute Prognose unterschiedlich groß. Prinzipiell gilt auch für den TV02-D2Pak Datensatz: Je mehr Lebensdauerdaten vorliegen, desto genauer kann die Lebensdauerprognose gemacht werden. Mit den vorliegenden Daten des TV02-D2Pak kann jedoch mit einer Vorhersagegenauigkeit von ca. 70 bis 80 % eine Klassifizierung in zwei Klassen erfolgen. Dies demonstriert erfolgreich die Machbarkeit des im Rahmen des Projekts SesiM erarbeiteten Ansatzes zur KI-basierten Lebensdauerprognose. Für eine größere Vorhersagewahrscheinlichkeit bzw. eine genauere Vorhersage des Ausfallzeitpunktes, wären größere Datenmengen erforderlich.

2.1.6 Arbeitspaket 6: Übergeordnete Software- und Kommunikationsarchitektur

Die Definition einer übergeordneten Softwarearchitektur ist Inhalt des AP 6. Dies erfolgt durch die integrative Betrachtung von Cloud-, Edge- und Embedded-Computing und durch die Einbindung von Maschinensteuerungen. Prototypische Softwarefunktionen werden entwickelt und Schnittstellen zwischen den einzelnen Modell- und Datenebenen werden definiert und implementiert.

AP 6.1 Definition einer übergeordneten, verteilten Softwarearchitektur unter Berücksichtigung individueller Computing- und Performanceanforderungen einzelner Module (AP 4, 5, 7), unter integrativer Betrachtung von Cloud-, Edge-Computing, Embedded-Computing sowie der Einbindung von Maschinensteuerungen

Um eine übergeordnete Softwarearchitektur definieren zu können, wurde seitens Gestalt Robotics von den Anwendungen die Inputgrößen, mit jeweiliger Datenart, -format, -volumen, usw., abgefragt. Diese können aus der optischen Inspektion, von Onlinemessungen während der Zuverlässigkeitstests oder z.B. aus Simulationen stammen. Alle Bosch Daten wurden in einer einheitlichen Struktur gespeichert, um den Datenzugriff für die Uni Stuttgart zu vereinfachen und die Übersicht über die sehr großen Datenmengen zu wahren. Die Softwarearchitektur wurde seitens Gestalt Robotics ausgearbeitet. Dies erfolgt im Austausch und in der Zusammenarbeit mit Bosch. Für den Datenaustausch wurde die Amazon Cloud ausgewählt.

2.1.7 Arbeitspaket 7: Analyse der Musteranwendungen – Bildgebende Analyseverfahren und Datenkonditionierung

Inhalt des AP 7 ist die Erarbeitung eines flexiblen Datenkonzepts von Inspektionsdaten und relevanten Produktionsdaten. Ziel war es, über universelle Kommunikationsschnittstellen einen multidirektionalen und multistrukturellen Datenaustausch zu ermöglichen. Neben den optischen Inspektionssystemen von Göpel wurden weitere Inspektionstechnologien anderer Anbieter für die Nutzung und Aufbereitung der bildbasierenden Analyseergebnisse genutzt. In Zusammenarbeit mit Göpel wurde die Messung des Standoff mittels eines AOI-Systems für die Zuverlässigkeitsprognose von Lötstellen erarbeitet. Göpel setzte die seitens Bosch definierte Anforderung der Standoffmessung mit seiner 3D AOI-Anlagentechnik mit Schrägblickkameras um. Daraus entstand ein gemeinschaftliches Patent von Göpel und Bosch „Ermittlung des Standoff als Zuverlässigkeitsindikator“.

AP 7.2 Hinzunahme zusätzlicher Inspektionstechnologien zur Erhöhung der Datenbasis für die Zuverlässigkeitsbewertung mittels KI

Voraussetzung für eine gute KI-Modellierung ist die Kenntnis der Güte der Inputgrößen, d.h. der optischen Inspektions(Mess-)daten. Um die Güte der Daten aus dem Automatischen Optischen Inspektionssystem (AOI) bewerten zu können, wurden am TV01-D2Pak durch Bosch exemplarische Verifikationsmessungen an 56 D2Paks durchgeführt. Die hierfür eingesetzten Verfahren waren metallographische Schliffe und Messungen mittels Laserprofilometer. Damit wurde ein Vergleich der Anlagen- bzw. Messtechnik zwischen Bosch Ansbach und Göpel gemacht und es erfolgte eine exemplarische Untersuchung der Messgenauigkeit der Anlagen. Die Erkenntnisse aus diesen Analysen flossen in die Auslegung und das Design des Testaufbaus TV02-D2Pak.

In Tabelle 5 ist eine Übersicht der von Bosch Ansbach und Göpel mittels ihrer AOI-Systeme ermittelten Messwerte dargestellt. Diese Parameterliste wurde seitens Bosch nach internen Diskussionen sowie Gesprächen mit Göpel und Bosch Ansbach definiert. Der Fokus bei den Verifikationsmessungen wurde

auf die folgenden Parameter gelegt: Länge, Breite des Moldkörpers, absolute Höhe des Bauelements, absolute Höhe gemessen am Leadframe, Verkippung sowie Rotation des D2Paks.

Tabelle 5: Übersicht der Messwerte

Messwerte 3D AOI √ GÖPEL electronic ✓ BOSCH

	Parameter	3D AOI	Berechnete Größen	Verifikation
1	Breite, Länge Mold	√	✓	☺
2	Absolute Höhe	√ ✓		☺
3	Absolute Höhe Leadframe	√ ✓		☺
4	Standoff-Höhe Drain	√		
5	Verkippung		√ ✓	☺
6	Rotation	√ ✓		☺
7	Versatz x-/y-Richtung	✓		
8	Gullwings Pinhöhe	√ ✓		
9	Gullwings Lotanstieg	√ ✓		

Zur Verifikation der ermittelten Höhen, wie beispielsweise dem von Göpel gemessenen Standoff, wurden exemplarische metallographische Schliffe (Abb. 15) ausgewertet. Der Hauptfokus lag jedoch auf Messungen mittels eines Keyence Laserprofilometers. In Abb. 16 sind die Messflächen sowie die Referenzflächen auf bzw. neben dem D2Pak der jeweiligen AOI-Anlagen sowie der Laserprofilometermessung dargestellt.

Abbildung 15: Metallographische Schliffe längs (links) und quer (rechts) durch den D2Pak

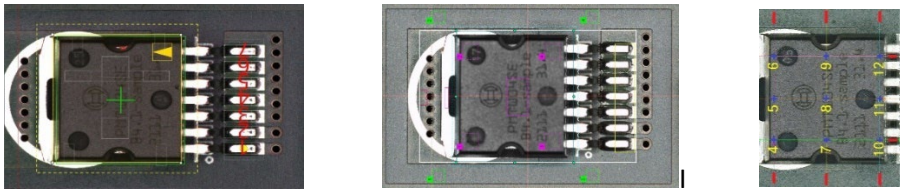


Abbildung 16: Mess- und Referenzstellen auf dem D2Pak der AOI-Anlagen von Bosch Ansbach (links), von Göpel (mitte) und des Keyence Laserprofilometers (rechts)

Im Folgenden ist exemplarisch die Auswertung der Gesamthöhe des D2Paks dargestellt (Abb. 17). Hier ist ein Unterschied zwischen den bei Bosch Ansbach gemessenen Gesamthöhen und den bei Göpel gemessenen Höhen zu erkennen. Die Mittelwerte unterscheiden sich um rund 200 µm. Die Standardabweichung der Göpel-Werte beträgt ca. 55 µm, während sie bei Bosch Ansbach nur knapp 7 µm beträgt.

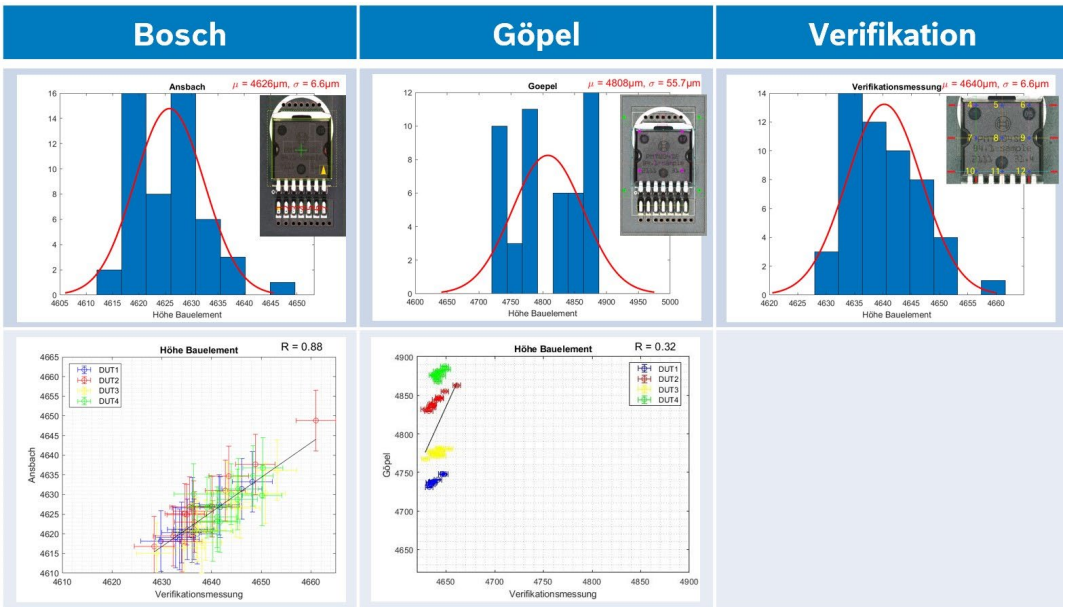


Abbildung 17: Auswertung der Gesamthöhe des D2Paks mit Angabe von Mittelwert (μ) und Standardabweichung (σ) von Bosch Ansbach (links), Göpel (mitte) und der Verifikationsmessung mittels Profilometer (rechts)

Die Verifikationsmessungen bestätigten mit einer hohen Genauigkeit die AOI-Messungen von Bosch Ansbach. Diese gute Übereinstimmung wird in Abb. 17 deutlich. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Profilometermessungen und den Ansbacher AOI-Messungen zu erkennen. Bei den Messungen von Göpel ist eine Gruppierung der pro Leiterplatte vier D2Paks in Abhängigkeit der Position 1 bis 4 zu erkennen. Dies lässt sich auf eine über die gesamte Leiterplatte gelegte Referenzebene zurückführen. Für die Bestimmung von Länge und Breite des Moldkörpers hat dies keinen Einfluss, jedoch auf die Messung jeglicher Höhen. Die Verkippung in x- und y-Richtung kann aus den gemessenen Höhenwerten ermittelt werden und zeigt insbes. bei Ansbach einen hohen linearen Zusammenhang mit den Verifikationsmessungen.

Um mögliche Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den gemessenen Parametern Breite, Länge, Verkippung X, Verkippung Y, Höhe Mold und Höhe Leadframe zu erkennen, wurden die Daten in einem Korrelationsplot dargestellt und ausgewertet. In Abb. 18 ist exemplarisch der Korrelationsplot für die Daten von Bosch Ansbach dargestellt. Hier ist beispielsweise für die Verkippung in Y-Richtung und die Höhe des Leadframes sowie die Höhe des Molds eine Korrelation zu erkennen.

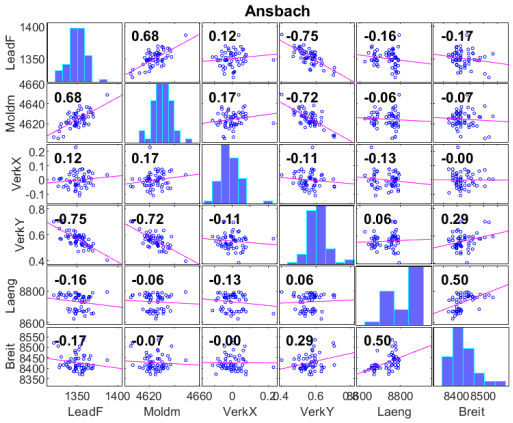


Abbildung 18: Korrelationsplot AOI-Messdaten von Bosch Ansbach

AP 7.3 Erweiterung der Baugruppendaten durch Inspektionsergebnisse anderer Anbieter von Inspektionssystemen

Sowohl für das TV01-D2Pak, als auch für das TV02-D2Pak wurden von Siemens, Göpel und Bosch Inspektionsdaten aufgenommen. Im Bosch Werk in Ansbach wurden AOI- und AXI-Daten auf Anlagen der Hersteller Viscom und Omron für beide Testboards aufgenommen. Im Zuge der Durchführung der Verifikationsmessungen konnten die Messwerte der verschiedenen Anlagenhersteller Viscom, Omron und Göpel miteinander verglichen werden (siehe AP 7.2). Damit konnten Inspektionsdaten von verschiedenen Inspektionsanlagen verglichen bzw. die Inspektionsergebnisse erweitert werden.

AP 7.4 Erweiterung der Baugruppendaten durch qualitätsrelevante Produktionsdaten des Fertigungsprozesses

Im Zuge des umfänglichen Aufbaus des TV02-D2Pak im Bosch Werk in Ansbach konnten weitere Produktionsdaten mit aufgenommen werden. Für dieses Testboard erfolgt der gesamte Aufbauprozess einschließlich Lotpastendruck, Bestückung und Lötprozess im Bosch Werksmusterbau in Ansbach. Qualitätsrelevante Produktionsdaten beinhalten hauptsächlich die optischen Inspektionsdaten aus SPI, AOI und AXI. Weitere Daten aus der Produktion der Baugruppen, welche auf deren Qualität einen Einfluss haben könnten, sind beispielsweise das Lötprofil oder Bestückdaten (z.B. Bestückkraft).

2.1.8 Arbeitspaket 8: Systemcharakterisierung in kombinierten Belastungstests

Im Rahmen des AP 8 erfolgt der Aufbau von geeigneten Testvehikeln basierend auf den Erkenntnissen von AP 3 und AP 4. Es folgte die experimentelle Erprobung inklusive der Auswertung und Bewertung. In den zu untersuchenden Designelementen wurde die Degradation in Korrelation zur Belastung mittels online Messung von definierten Systemparametern beschrieben. Anschließend wurden physikalische Modelle zur Beschreibung der Degradation abgeleitet. Des Weiteren erfolgte im AP 8 die Entwicklung einer neuartigen Mess- und Erprobungsapparatur. Mit dieser war es möglich unter applikationsnaher Belastung eine online Datenüberwachung der ausgewählten Systemparameter durchzuführen.

AP 8.1 Aufbau von geeigneten Testvehikeln basierend auf den Erkenntnissen aus AP 3 / 4

TV01-D2Pak

Wie bereits in AP 3.1 und AP 4 geschildert, erfolgte die Layouterstellung des TV01-D2Pak von Bosch (Abb.). Der Aufbau wurde im Gesamtnutzen bei Siemens durchgeführt.

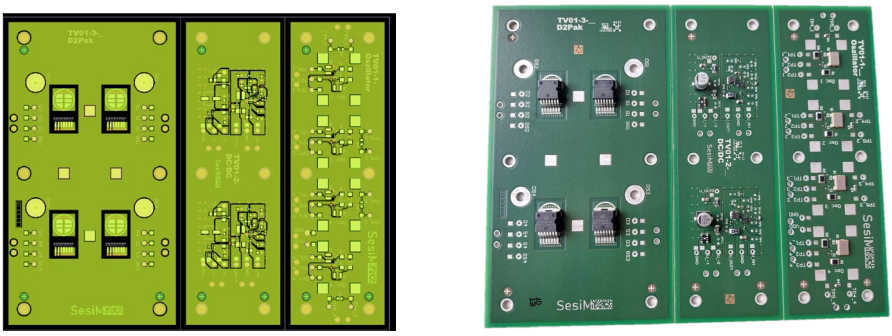


Abbildung 19: Layout (links) und bestücktes (rechts) TV01

Die 14 St. Testboards wurden mit einer Lotpastendicke von 150 µm bedruckt. Die AOI-Prüfung des TV01-D2Pak erfolgte bei Siemens im Rahmen des Aufbaus. Des Weiteren wurden die Testboards bei Göpel und bei Bosch nach erfolgter Bestückung mittels AOI und AXI geprüft.

TV02-D2Pak

Der Aufbau des TV02-D2Pak wurde im Bosch Werksmusterbau in Ansbach durchgeführt. Insgesamt erfolgte der Aufbau von 50 St. TV02-D2Pak, d.h. 900 St. D2Pak Bauelemente wurden verarbeitet. 12 St. TV02-D2Pak wurden zum Einfahren der Prozesse, für Vorversuche und die Inbetriebnahme von Tests aufgebaut. 38 St. TV02-D2Pak standen für Versuche zur Verfügung.

Die Leiterplatten wurden zunächst mittels eines Lotpastendruckers mit Lotpaste bedruckt. Im Anschluss daran wurde die Lotpasteninspektion (SPI) durchgeführt. Danach erfolgte die Bestückung mit dem Bauelement D2Pak. Die bestückte Leiterplatte wurde nochmals kontrolliert, bevor sie dann im Reflowofen gelötet wurde. Nach dem Lötprozess erfolgten die Automatische Optische Inspektion (AOI) und die Röntgeninspektion (AXI). Zusätzlich zu den bei Bosch durchgeführten AOI und AXI-Prüfungen, wurden diese Inspektionen anschließend auch bei Göpel durchgeführt. Nach Abschluss aller optischer Inspektionen wurden pro Leiterplatte fünf PT100 aufgelötet. Außerdem erfolgt das Anlöten aller Kabel für die Onlinemesstechnik (Abb. 20).

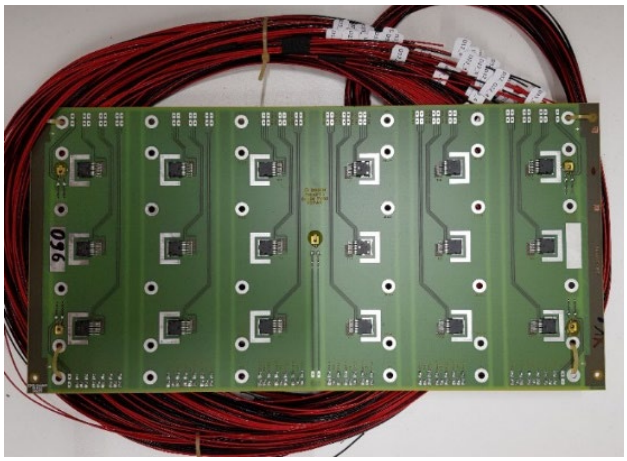


Abbildung 20: TV02-D2Pak mit angelöteten Kabeln für die Daisy-Chain Messung

AP 8.2 Entwicklung neuartiger Mess- und Erprobungsapparatur zur online Überwachung der relevanten Systemparameter (AP 2) unter applikationsnaher kombinierter Belastung

Für die Entwicklung der geplanten Erprobungs- und Messapparatur bei Bosch wurden die Anforderungen erarbeitet. Ziel war die Onlineüberwachung der D2Paks durch elektrische und thermische Messgrößen während der Zuverlässigkeitstests. In Diskussionen mit Aucoteam wurden verschiedene Möglichkeiten zur elektrischen Überwachung von D2Paks erarbeitet und bewertet. Aucoteam realisierte entsprechende Messaufbauten und testete die definierten Messungen. Nach der Bewertung dieser Vorabuntersuchungen anhand von Vorabtestmustern und anhand des TV01-D2Pak, definierte Bosch eine Online-Widerstandsmessung einiger zuverlässigkeitsrelevanter Lötstellen. Diese Daisy-Chain Messung wurde mit dem dafür angepassten Layout am TV02-D2Pak angewandt (Abb. 28). Messanschlüsse dienten der Überwachung und Messung von Spannungen und Temperaturen wie in AP 4.2 beschrieben.

Die aufwändige Entwicklung der Anlagentechnik für die online Messtechnik für 18 St. D2Pak Bauelemente pro Testleiterplatte wurde erfolgreich von Bosch in Betrieb genommen. Es konnte zeitgleich bei vier Testboards die Widerstandsmessungen der Daisy Chain Lötstellenpaare und die Temperaturmessungen erfolgreich durchgeführt werden (Abb. 21).

Abbildung 21: Testaufbau und Testergebnisse der elektr. Messungen des TV02-D2Pak

AP 8.3 Experimentelle Evaluierung der einzelnen Modellierungsschritte und Selbstvalidierung

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden mit den D2Pak Vorabtestboards von Bosch bereits bei Aucoteam passive Temperaturwechseltests durchgeführt. Die Vorgehensweise zur Kontaktierung und zur Messung von Spannungen und Temperaturen konnte damit bereits erarbeitet werden.

Vor dem Start der Temperaturwechselerprobung der TV02-D2Pak war die Einstellung der Temperaturprofile in den Temperaturwechselöfen erforderlich. Das Ziel der Optimierung der Temperaturprofile war es, eine möglichst homogene Temperaturverteilung im gesamten Prüfbereich des Ofens zu erlangen. Denn alle Leiterplatten sollten an allen Stellen zu jeder Zeit in der Aufheiz- und Abkühlphase des Temperaturprofils idealerweise die gleiche Temperatur aufweisen. Andernfalls könnten die leicht variierenden Testbedingungen (Temperaturunterschiede von über 100 K zw. den verschiedenen Messstellen) zu einer größeren Streuung der End of Life Daten führen und dadurch einen größeren Einfluss haben als die Prozessstreuung beim Aufbau der Testmuster.

Neben einer Variation der Ofeneinstellungen, wurden auch bauliche Maßnahmen seitens Bosch entwickelt. Aufgrund der vorgenommenen Optimierungen in der Ofenkammer, konnte ein signifikant geringerer Temperaturgradient von ca. 40 K während der Aufheiz- und Abkühlphasen erreicht werden als ohne die Maßnahmen. Die seitens Bosch definierten Maßnahmen wurden an Aucoteam übergeben, so dass die Prüfanordnungen für alle passiven Temperaturwechseltests gleich sind.

Mit den definierten Maßnahmen wurden drei Zuverlässigkeitstests inklusive der entwickelten Onlinemesstechnik mit dem TV02-D2Pak durchgeführt:

- Temperaturschockwechsel -40/125°C bei Aucoteam
- Temperaturschockwechsel -40/150°C bei Bosch
- Temperaturschockwechsel -40/65/150°C bei Bosch

Die Zuverlässigkeitstests -40/125°C wurden bei Aucoteam nach Erreichen von 10.000 Zyklen beendet. Trotz der langen Laufzeit dieses Tests von ca. 11 Monaten, konnten nur wenige Ausfälle der Daisy Chains gemessen werden. Auch der Test mit dem Stufenprofil von -40/65/150°C zeigte nur eine geringe Anzahl an Ausfällen. Hier wurden aufgrund der deutlich längeren Zyklusdauer von ca. 1,5 Stunden ca. 7.000 Zyklen erreicht. Im Zuverlässigkeitstest -40/150°C wurden innerhalb der Testdauer von ca. 10.000 Zyklen ca. 80% an Ausfällen der Daisy Chains detektiert. Die Tests wurden damit erfolgreich beendet.

AP 8.4 Prüfung der Systemsignatur unter Einbeziehung von Ausgangszustand, Degradation, gezielter Manipulation

Bewertung des Ausgangszustands

Wie in AP 8.1 beschrieben erfolgt der Aufbau des TV02-D2Pak. Damit verbunden wurden SPI-, AOI- und AXI-Daten vom Bosch Werksmusterbau in Ansbach aufgenommen. Des Weiteren wurden seitens Göpel weitere AOI- und AXI-Messungen durchgeführt. In den Abbildungen 22 und 23 sind exemplarische Bilder der AOI- und AXI-Daten dargestellt.

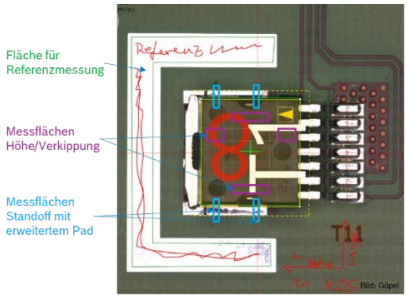


Abbildung 22: Übersicht Mess- und Referenzflächen AOI-Messung (Göpel)

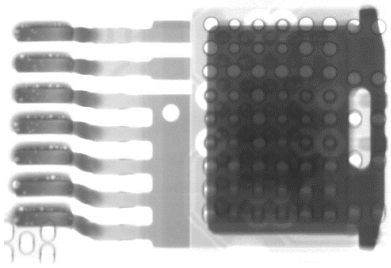


Abbildung 23: Exemplarisches AXI-Bild (Göpel)

Bosch wertete die seitens Göpel und Bosch Ansbach aufgenommenen Messdaten der Testboards TV02-D2Pak zunächst aus. Auf Basis dieser Auswertung, wurde seitens Bosch eine Vorauswahl der für die Lebensdauertests bestimmten TV02-D2Pak getroffen. Es wurden Testboards aus der Mitte der Verteilungen ausgewählt, um möglichst repräsentative Daten zu betrachten. Exemplarische Auswertungen einiger Parameter sind im Folgenden dargestellt: die Gesamthöhe (Abb. 24), der Standoff (Abb. 25), das Lotvolumen (Abb. 26) und der Anteil der Voidfläche (Abb. 27).

Für die Testboards TV02-D2Pak wurden zwei AOI-Messdatensätze aufgenommen: einer von Göpel und einer von Bosch Ansbach. Für die Messungen wurden die im Testlayout vorgesehenen Mess- und Referenzflächen genutzt (Abb. 22). Es konnten gezeigt werden, dass mit zwei unterschiedlichen Messsystemen sehr gut übereinstimmende Messwerte erzielt werden konnten. Folglich ist das erarbeitete Messlayout/-prinzip für dieses Testmuster erfolgreich und die AOI-Daten konnten für die KI-Modellierung genutzt werden.

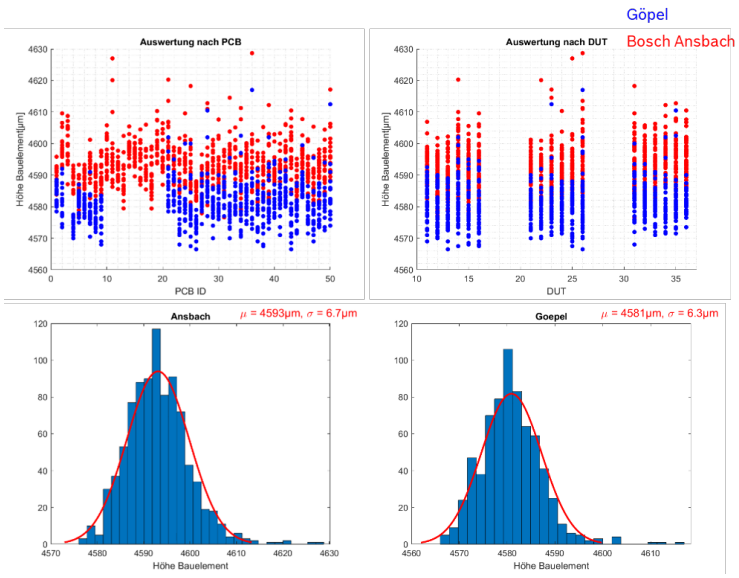


Abbildung 24: Auswertung Gesamthöhe (D2Pak + Lot) Messung Göpel und Messung Bosch Ansbach: Mittelwert und Standardabweichung

Neben der Messung der Gesamthöhe konnte, seitens Göpel, der Standoff (Höhe der Lötstelle) gemessen werden. Beispielhaft ist in Abbildung 25 die Auswertung einer der vier Standoff Messstellen dargestellt. Diese neuartige Messgröße ist sehr interessant, da durch das Messen der reinen Lötstellenhöhe, die Bauteilgeometrie, welche laut Datenblatt auch gewissen Schwankungen unterliegen kann, keine Rolle spielt. Dadurch kann direkt die Lötstellenhöhe ermittelt werden.

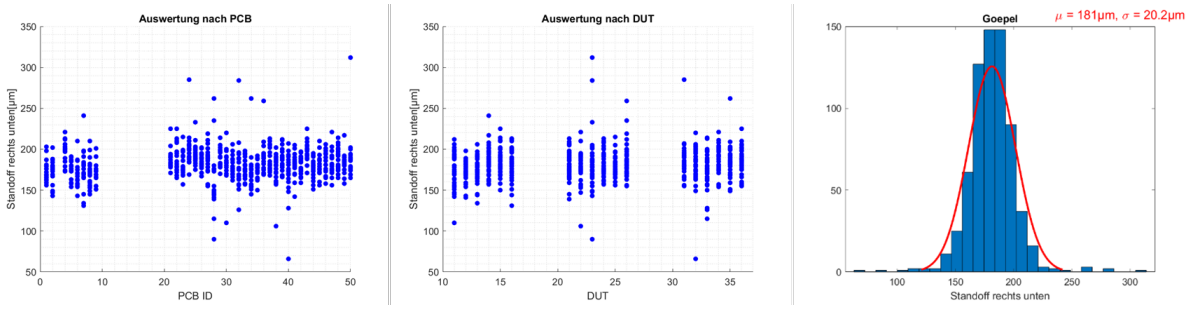


Abbildung 25: Auswertung Standoff am Bsp. Standoff rechts unten, Messung Göpel

Aus den SPI-Daten wird hier exemplarisch die Auswertung des gedruckten Lotpastenvolumens dargestellt (Abb. 26). Das gedruckte Lotvolumen streut im Rahmen einer Normalverteilung nur in sehr geringem Maß um den Mittelwert von 0,034mm³ Lotvolumen. Auch die SPI-Daten eignen sich als Inputgröße für die Lebensdauerprognose mittels KI.

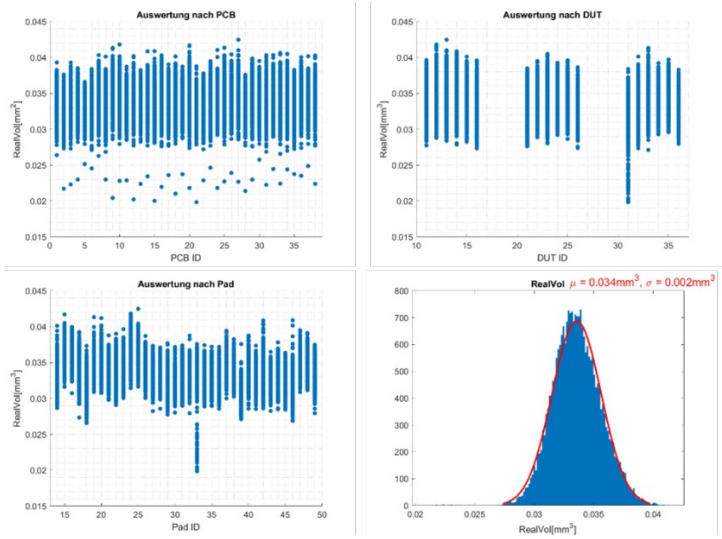


Abbildung 26: Auswertung gedrucktes Lotpastenvolumen, Messung Bosch Ansbach

Eine für die Lötstellenzuverlässigkeit interessante Information aus den AXI-Daten, ist der Anteil des Voidings (Hohlräume) in den Lötstellen. Eine Herausforderung stellte die automatisierte Auswertung einer jeden einzelnen Lötstelle hinsichtlich des Voidings dar, was kein Standard ist. In Abbildung 27 ist die Auswertung des Anteils der Voidfläche je Lötstelle dargestellt. Wie die AOI- und SPI-Daten, wurden auch die AXI-Daten für die Uni Stuttgart so aufbereitet, dass diese in die KI-Modellierung zur Lebensdauerprognose des D2Pak auf Leiterplatte einfließen konnten (siehe AP5). Korrelationen der Prozessdaten wurden durchgeführt und sind in AP 5.2 beschrieben

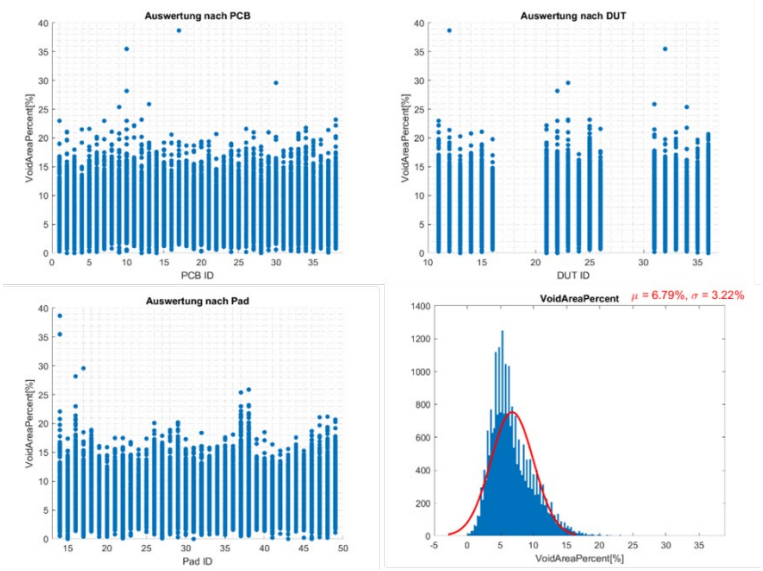


Abbildung 27: Auswertung Anteil der Voidfläche, Messung Bosch Ansbach

Bewertung der Degradation

Die Degradation der Lötstellen der D2Paks wurde mittels einer Widerstandsmessung online überwacht. In Abbildung 28 ist exemplarisch die elektrische Widerstandsmessung für eine Testleiterplatte TV02-D2Pak im Temperaturwechseltest -40/150°C dargestellt. Es werden für 18 D2Paks jeweils vier Messketten (Daisy Chain DC) überwacht: DC1 bis DC4. Eine signifikante Widerstandserhöhung bedeutet einen Ausfall der Messkette. Aufgrund unterschiedlich starker, thermomechanischer Belastung, fallen die Messketten DC1 und DC3 tendenziell früher aus als DC2 und DC4. Der Ausfall einer jeden Daisy Chain kann als ein End of Life Kriterium gewertet werden.

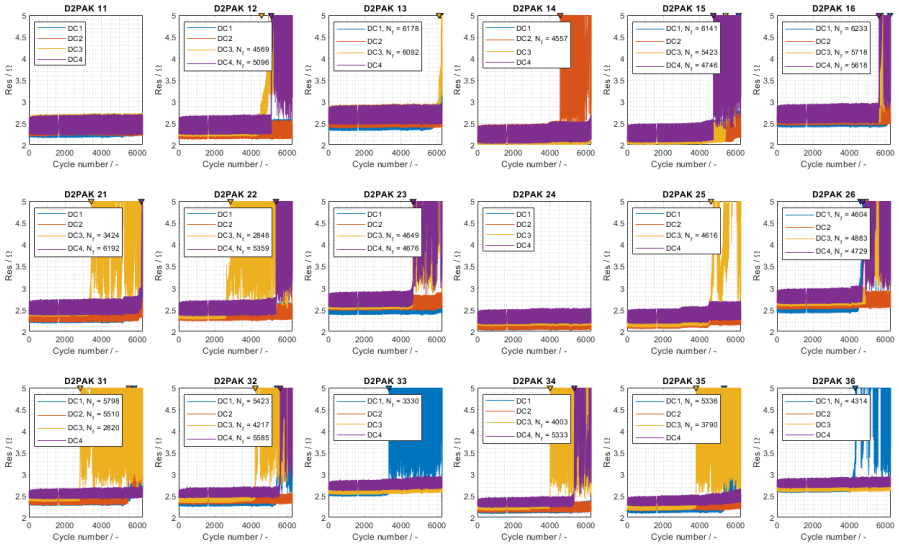


Abbildung 28: Widerstandsmessung der Daisy Chains 1 bis 4 je D2Pak auf einer PCB

Das Ergebnis der Lebensdauertests lässt sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 29):

- $\Delta T_{P,1}$ (TS-40/150°C): 80% Ausfälle

→ Datensatz für KI-Modellierung geeignet

- $\Delta T_{P,2}$ (TS-40/125°C): 19% Ausfälle
  - Test nach ca. 10.000 Zyklen beendet

→ Zu wenige Ausfalldaten für Korrelation mit opt. Inspektionsdaten mittels KI-Modellierung

- $\Delta T_{P,3}$ (TS-40/65/150°C): 14% Ausfälle
  - Test wird bis zum Erreichen von 10.000 Zyklen weitergeführt, um weitere Ausfälle zu detektieren

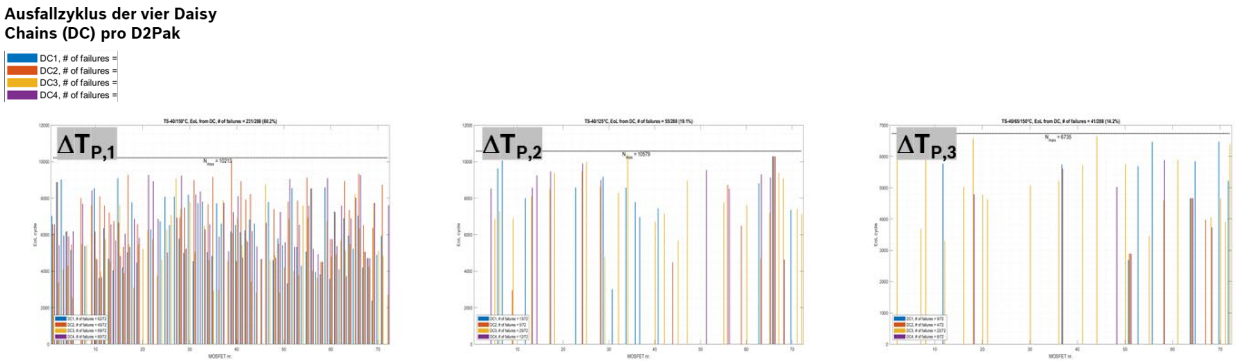


Abbildung 29: End of Life (elektrischer Ausfall) der Daisy Chains 1 bis 4 der Temperaturwechseltests -40/150°C (links), -40/125°C (Mitte), -40/65/150°C (rechts) am Testende

Es erfolgte eine statistische Auswertung der End of Life Daten Daisy Chain 1 bis 4 aller drei Temperaturschockwechseltests (Abb. 30). Je mehr Ausfalldaten vorliegen, desto besser lässt sich das Ausfallverhalten entlang der Geraden beschreiben. Aber auch für die geringeren Datenmengen von $\Delta T_{P,2}$ (TS-40/125°C) und $\Delta T_{P,3}$ (TS-40/65/150°C) kann dieser Trend bereits erkannt werden. Die End of Life Daten (elektrische Ausfälle der Daisy Chains 1 bis 4) des Lebensdauertests TS -40/150°C wurden für die Korrelation mit den optischen Inspektionsdaten mittels KI-Modellierung genutzt.

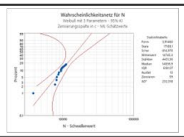
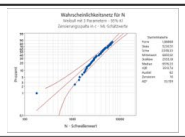
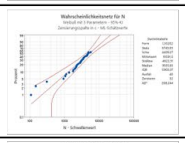
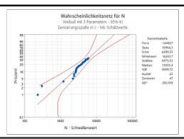
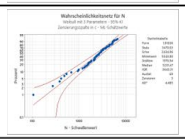
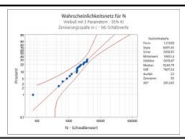
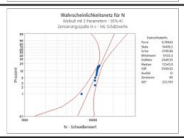
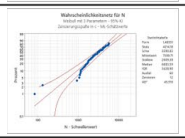
Daisy chain	TC -40/125°C	TC -40/150°C	TC -40/65/150°C
DC1			
DC2	—		—
DC3			
DC4			—

Abbildung 30: 3P Weibull: Statistische Auswertung der End of Life Daten der drei Lebensdauertests TS -40/125°C, -40/150°C und TS -40/65/150°C

AP 8.5 Ableitung physikalischer Modelle zur Beschreibung der Degradation in den zu untersuchenden Designelementen

Seitens Bosch wurde erwartet, dass die Lötstellen, wie sie im TV02-D2Pak vorkommen, im System D2Pak gelötet auf Leiterplatte die Schwachstelle sind und als erstes eine Schädigung aufweisen sollten. Da in den Tests hier Widerstandserhöhungen gemessen werden konnten, bestätigt dies die Expertenschätzung von Bosch. Durch die online Überwachung des TV02-D2Pak, konnte die Degradation der Lötstellen während der Tests an vier unterschiedlichen Daisy Chains über die elektrische Messung erfasst werden. Wenn eine Widerstandserhöhung der Daisy Chain Messkette

gemessen werden kann, bedeutet das, dass der elektrische Kontakt nicht mehr intakt ist. Folglich muss es eine Unterbrechung, einen Riss in einer der Lötstellen der Messkette geben.

Die Reihenfolge der detektierten elektrischen Ausfälle der Daisy Chains entspricht der FE-Vorhersage. Die am höchsten belasteten Lötstellen, darunter DC3 und DC1 fallen als erstes aus. Je geringer die Belastung, desto später erfolgt ein Ausfall. Die höchste Belastung zeigt sich in den äußeren Lötstellen. Je mittiger sich die Lötstelle unter dem Bauelement befindet, desto geringer ist die Belastung und desto später erfolgt eine Rissentwicklung/Degradation der Lötstelle. Die elektrischen Ausfälle wurden in exemplarischen metallographischen Schliffen (Abb. 31) und mittels Computer Tomographie (CT) (Abb. 32) verifiziert. Eine beispielhafte CT-Aufnahme, welche die bereits elektrisch detektierten Risse bestätigt, ist im Folgenden dargestellt.

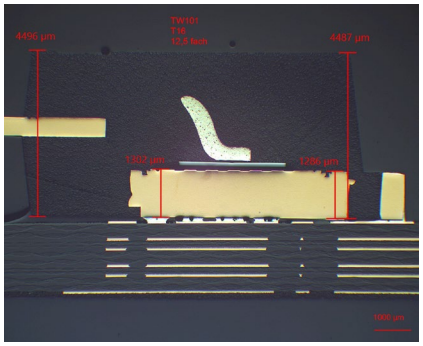


Abbildung 31: Metallographischer Schliff des TV02-D2Pak im Ausgangszustand

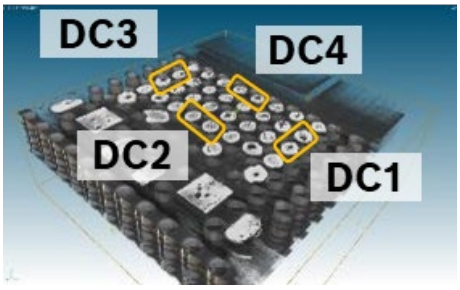


Abbildung 32: CT-Scan des TV02-D2Pak nach elektrischem Ausfall

2.1.9 Arbeitspaket 9: Integration der Lösungsansätze in Demonstrator und Funktionsnachweis der Zustandsüberwachung (BIST)

Der Entwurf und die Realisierung eines Demonstratorsystems für die Validierung der in den AP 1 bis AP 8 entwickelten Lösungsansätze ist Inhalt des AP 9. Alle im Projekt SesiM erarbeiteten Konzepte und Methoden zur Zustandsüberwachung werden auf die Anwendungen aus Bahn- und Automobiltechnik angewendet und verifiziert.

AP 9.1 Entwurf und Realisierung eines Demonstratorsystems für die Validierung der Lösungsansätze

Durch die Kombination des DC/DC-Wandlers (Fraunhofer IZM), des Oszillators (Siemens) und des D2Paks (Bosch) soll die Projektidee, die während des Projekts jeweils für jede Anwendung einzeln und in der Tiefe erarbeitet wurde, gemeinsam demonstriert werden (Abb. 33). Im Bereich „Leistungsstufe“ sind zwei der von Bosch im Projektverlauf untersuchten D2Paks enthalten. Die für diese Komponenten bei Bosch gewonnen Erkenntnisse aus den Testmustern, beispielsweise hinsichtlich der Erfassung der Inspektionsdaten, flossen in den Demonstratoraufbau mit ein. Durch die Partner wurde somit erfolgreich ein gemeinsamer, funktionaler Demonstrator realisiert, welcher die drei Hauptkomponenten des Projekts SesiM, D2Pak (von Bosch), Oszillator (von Siemens) sowie einen DC/DC-Wandler (von IZM), enthält (Abb. 34).

Abbildung 33: Layout des SesiM Demonstrators

Abbildung 34: Funktionsfähiger SesiM Demonstrator

Begleitend zur Hardware wurde von Gestalt Robotics und der Uni Stuttgart eine Demonstrator Software entwickelt. Diese Software ist ein Simulationsprogramm zur Klassifizierung der Lebensdauer elektronischer Baugruppen und Komponenten. Dabei erfolgt eine Simulation der Lebensdauerklasse auf Grundlage eingespeister Inspektionsdaten der im Projekt untersuchten Baugruppen/Komponenten. In enger Zusammenarbeit von Bosch und Göpel entstand eine Vorlage für die Gestaltung der Softwareoberfläche (Abb. 35). Hier wurden Ideen und Vorschläge für die Struktur erarbeitet. Dazu zählt beispielsweise welche Informationen in welcher Form und an welcher Stelle angezeigt werden.

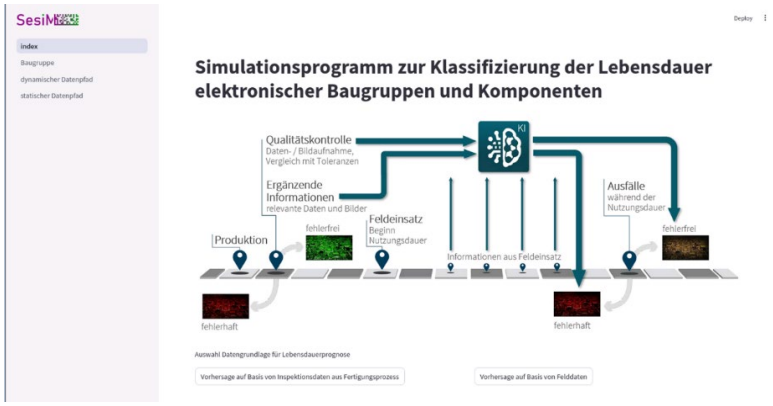


Abbildung 35: Screenshot der Demonstrator Software Oberfläche

AP 9.2 Beschreibung des Systems in ausgewählten Domänen (elektrische, mechanische, thermische, thermo-mechanische Signaturen) unter Berücksichtigung einer möglichen Separation zwischen natürlicher Feld-Alterung und weiten ungewollten Systemzuständen

Durch die partnerübergreifende Zusammenarbeit konnte ein komplexes Demonstratorsystem entwickelt und aufgebaut werden. An diesem konnten die im Projekt erarbeiteten Methoden und Technologien demonstriert werden. Aufgrund der sehr hohen Komplexität sowie einer langen Prüfdauer wurden jedoch keine Zuverlässigkeitstests für den Demonstrator durchgeführt. Es wäre eine (Online)Überwachung der drei Hauptkomponenten D2Pak, Oszillator und DC/DC-Wandler erforderlich, um den End of Life messen zu können. Da dies für die drei Testboards TV02 ganz unterschiedlich realisiert wurde, wäre dies sehr komplex und nur mit immens hohem Aufwand auf den Demonstrator zu übertragen und umzusetzen. Daher wurde eine App realisiert, mit welcher eine Lebensdauerprognose auf Basis auszuwählender, virtueller Lastprofile und der gemessenen Inspektionsdaten erfolgen kann. Die in diesem Software Demonstrator (siehe Kapitel 9.1) hinterlegten KI-Modelle basieren auf den Modellen und Daten der ausführlichen Zuverlässigkeitstests der Testboards TV02.

AP 9.3 Verifikation effizienter Detektionsmöglichkeiten

Am gemeinsamen Projektdemonstrator wurden alle in SesiM erarbeiteten Technologien und Methoden eingesetzt und aufgezeigt. Der Fokus des Demonstrators wurde auf die Kombination aller drei Hauptkomponenten in einer Anwendung sowie die Realisierung von Temperatursensoren, welche in Echtzeit Daten per Funk bereitstellen können, gelegt. Damit wurde der Ansatz für ein zukünftiges Condition Monitoring gezeigt. Über Sensoren wird kontinuierlich die Belastung des Systems an die hinterlegten, KI-basierten Berechnungsmodelle übergeben. Mit diesen Belastungsdaten aus dem Feldbetrieb und den bei der Produktion aufgenommenen Inspektionsdaten kann dann eine Prognose der Lebensdauer erfolgen.

2.1.10 Arbeitspaket 10: Konzept zur Überführung in die industrielle Praxis

Inhalt des AP 10 ist die Bewertung der Umsetzbarkeit und Übertragung der im Rahmen von SesiM erarbeiteten Konzepte auf weitere sicherheitskritische Anwendungen. Des Weiteren werden Aspekte des Datenmanagements, der Datensicherheit, von Standardisierung und Daten-Infrastruktur beleuchtet.

AP 10.1 Beantwortung von Fragestellungen zum Datenschutz unter Berücksichtigung europäischer Datenschutzstandards, insbesondere der Themen Eigentümer der Daten und Datenspeicherung

Bei Bosch gibt es Diskussionen und Aktivitäten zur Speicherung und Verarbeitung von Daten sowie zum Thema Datenschutz. Hierbei geht es einerseits um den Umgang mit Fertigungsdaten, andererseits um den Umgang mit Felddaten. Für die Speicherung von Felddaten, wie z.B. Temperaturen, welche für ein Condition Monitoring erforderlich sind, müssen noch weitere Diskussionen insbesondere mit den OEMs der Automobilindustrie erfolgen. Hier gibt es erste gemeinsame Projekte, die die Fragestellungen zum sicheren Umgang mit diesen Daten bearbeiten.

Die im Rahmen von SesiM geleistete Arbeit zur Vereinheitlichung und Speicherung der verschiedensten Inspektionsdaten liefert einen wertvollen Beitrag zum Thema Datenspeicherung. So konnte beispielhaft die Datenspeicherung und Bereitstellung für die KI-Modellierung über eine Cloud (AWS – Amazon Web Services) gezeigt werden. Hierfür wurde, unter Mitwirkung von Bosch, eine einheitliche Datenstruktur für das Speichern der unterschiedlichsten Prozessdaten erarbeitet.

AP 10.2 Vertrauensintervall des Modells

Die Aussagesicherheit der KI-basierten Prognose der Lebensdauer des TV02-D2Pak wurden zwischen Bosch und der Uni Stuttgart diskutiert. Die KI-Modelle geben eine prozentuale Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen der Prognose aus. Je nach gewähltem Ansatz bzw. Modell sowie Dateninput wird die Prädiktion der Lebensdauerklasse mit unterschiedlich großer Sicherheit ausgegeben. Das für die Lebensdauerprognose des TV02-D2Pak ausgewählte Modell kann eine Klassifikation der Komponente in zwei Klassen mit einer Sicherheit von 70% bis 80% tätigen. Das bedeutet wiederum, dass für ca. 20% bis 30% der D2Paks die Lebensdauerklasse möglicherweise nicht korrekt vorhergesagt werden kann. Diese Aussagesicherheit könnte durch verschiedene Faktoren verbessert werden. Dazu zählt:

- Das Bereitstellen von weiteren Ausfalldaten (hier: elektrischer Ausfall der Daisy Chains), was jedoch einen immensen Testaufwand bedingt.
- Der Einsatz anderer KI-Modelle, die im Rahmen von SesiM nicht gewählt wurden.

- Möglicherweise eine weitere Vorverarbeitung der Inputdaten auf Basis von Expertenwissen, um im Verhältnis zu den End of Life Daten weniger detaillierte Inputdaten in das KI-Modell zu geben.

Jedoch wird es von KI-Modellen keine Aussagesicherheit von 100% geben, da solche Prognosen immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. Es ist in jedem Fall Aufwand und Nutzen abzuschätzen, um eine möglichst hohe Aussagesicherheit zu erreichen. Da Bosch im Rahmen von SesiM die Erarbeitung der prinzipiellen Methode und Vorgehensweise anhand einer Beispielanwendung zum Ziel hatte, ist die erlangte Aussagesicherheit für die Lebensdauerprognose des TV02-D2Pak ausreichend.

AP 10.3 Standardisierung und IP-Schutz

Im Rahmen von SesiM war Bosch an zwei Patenteinreichungen beteiligt und hat damit die im Projekt entstandenen IPs geschützt. Für das neuartige Verfahren zur „Messung der Lotspaltbreite“ mittels eines AOI-Systems wurde von Bosch und Göpel eine gemeinschaftliche Patentanmeldung getätigt. Dieses Patent wurde bereits am 02.01.2025 erteilt und veröffentlicht. Die zweite gemeinschaftliche Idee, welche im Rahmen von SesiM zum Patent angemeldet wurde, ist die prinzipielle Methodik zur „Hybriden Systemmodellierung zur Zustandsbestimmung komplexer elektronischer Systeme im Feld“. Dies erfolgte in Zusammenarbeit von Bosch, Siemens, Uni Stuttgart, Fraunhofer IZM und Gestalt Robotics.

1. Anmeldung: „Messung der Lotspaltbreite“
   Beteiligte Partner: Bosch, Göpel
   Anmeldetag: 08.03.2023
   Tag der Veröffentlichung der Patenterteilung: 02.01.2025
2. Anmeldung: „Hybride Systemmodellierung zur Zustandsbestimmung komplexer elektronischer Systeme im Feld“
   Beteiligte Partner: Bosch, Siemens, Uni Stuttgart, Fraunhofer IZM, Gestalt Robotics
   Anmeldetag: 04.08.2023

AP 10.4 Konzeptioneller Entwurf zur Nutzung etablierter Dateninfrastruktur im Fertigungsprozess als Kommunikationsweg für eine KI-basierte Zustandsüberwachung

Zur Nutzung der vielzähligen und vielfältigen Fertigungsdaten, wie beispielsweise Bestückdaten, Ofenparameter, optische Inspektionsdaten, werden bei Bosch Konzepte erarbeitet. Die im Fertigungsprozess entstehenden Daten liegen typischerweise in unterschiedlichen Formen und Formaten vor. Sie werden meist lokal in den Anlagen gespeichert. Bei Inspektionsanlagen werden Stand heute häufig nur die Inspektionsdaten auffälliger Prüflinge gespeichert. Dies muss auf alle Prüflinge angepasst werden. Für die dabei entstehenden großen Datenmengen sind einheitliche Datenstrukturen, Datenschnittstellen sowie neue Datenbanksysteme erforderlich. Dies bringt noch viele offenen Punkte mit sich, die aktuell bei Bosch bearbeitet werden.

Durch SesiM kann für einen gezielt ausgewählten Bereich beispielhaft das Konzept einer Dateninfrastruktur des Fertigungsprozesses für eine Nutzung mittels KI gezeigt werden. Das bedeutet, dass Bosch an einer konkreten Komponente (D2Pak) den Weg von der SPI-, AOI- und AXI-Datenaufnahmen, der Datenspeicherung, über die Datenaufbereitung und -vereinheitlichung, bis hin zur KI-basierten Korrelation mit Lebensdauerdaten aufgezeigt hat. Dieses Konzept kann nun mit weiteren Prozessdaten erweitert und auf andere Anwendungen übertragen werden.

AP 10.5 Übertragbarkeit auf weitere sicherheitskritische Applikationen

Bosch möchte die im Rahmen von SesiM erarbeiteten Ergebnisse auf weitere automotive Anwendungen übertragen. Für Bosch ist SesiM als methodisches Projekt von großer Bedeutung. Anhand des leistungselektronischen Musters „D2Pak gelötet auf Leiterplatte“ wurden die Technologien und Methoden erarbeitet, die für eine Korrelation von Inspektionsdaten und Zuverlässigkeitsdaten erforderlich sind. Diese Baugruppe wurde seitens Bosch bewusst ausgewählt. Das innovative Siliziumkarbid Package SiC D2Pak-7L, kommt in verschiedensten Bosch automotive Produkten zur Anwendung, bzw. ist für zukünftige leistungselektronische Applikationen vorgesehen. Da der untersuchte Aufbau generischer Natur ist, kann der „SesiM Ansatz“ zur Prädiktion der Lebensdauer auch auf andere Anwendungen übertragen werden. Nicht nur für lebensdauerkritische Komponenten aus dem Bereich der Leistungselektronik, sondern auch für sicherheitskritische Komponenten aus dem Bereich des autonomen Fahrens können die erarbeiteten Methoden genutzt werden. Für das autonome Fahren sind robuste und sichere elektronische Baugruppen notwendig. Daher ist die Kenntnis der Restlebensdauer von kritischen Komponenten bzw. ein Condition Monitoring zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit sinnvoll. Die hierfür benötigten Technologien und Methoden wurden an einem Beispiel exemplarisch aufgezeigt. Für neue, andere Bauelementeformen ist das Erarbeiten der für eine KI-Modellierung relevanten Parameter aus den Inspektionen während des bzw. nach dem Fertigungsprozess erforderlich. Des Weiteren müssen auch hierfür Lebensdauerdaten ermittelt werden. Der grundsätzliche Weg kann jedoch von SesiM übernommen werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind in der gesondert eingereichten Endabrechnung enthalten.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Im Gesamtprojekt wurden verschiedene Fragestellungen für eine Lebensdauervorhersage mittels KI-Modellierung elektronischer Komponenten und Baugruppen untersucht. Entlang der Wertschöpfungskette wurden umfangreiche Arbeiten der Partner aus Industrie und Forschung hierzu durchgeführt. Durch die branchenübergreifende Zusammenarbeit von Bahntechnik und Automobiltechnik, wurde eine große Breitenwirkung erreicht.

Die in zehn Arbeitspaketen detailliert geplanten Arbeiten zum Erreichen der Projektziele, wurden von den Projektpartnern wie geplant durchgeführt. Bosch erarbeitete erfolgreich die Methodik Daten aus Inspektionsanlagen mit Lebensdauerdaten für eine Lebensdauerprognose zu kombinieren. Für die Demonstration dieser Vorgehensweise wurden mehr als 60 Testboards designt und aufgebaut sowie insgesamt ca. 1.000 St. SiC D2Pak Bauelemente bestückt. Es wurden Konzepte zur Datenerfassung von SPI, AOI und AXI-Daten erstellt. Dazu zählten beispielsweise die Definition der Art der Daten oder die Datenstruktur. Des Weiteren wurden von Bosch aufwändige Zuverlässigkeitstests entwickelt und optimiert, um eine online Datenerfassung zu ermöglichen. Die Tests wurden über einen Zeitraum von nahezu einem Jahr und mehr als 10.000 Temperaturwechselzyklen durchgeführt.

Die in SesiM erarbeiteten Technologien und Methoden können auf andere Anwendungen übertragen werden. Alle Arbeiten im Projekt SesiM waren notwendig zur Durchführung sowie angemessen, was sich im Erfolg und an den Ergebnissen des Projekts zeigt. So sind durch die intensiven, innovativen Arbeiten im Rahmen von SesiM auch zwei Patente entstanden, an denen Bosch beteiligt ist. Des

Weiteren ist auf Grundlage der guten SesiM Ergebnisse eine Weiterführung sowie Erweiterung der Konzepte in einer weiteren Aktivität geplant.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen: Verwertbarkeit des Ergebnisses

Für die Automobilindustrie der Zukunft wird ein nachhaltiger, ressourcenschonender Umgang mit elektronischen Baugruppen immer wichtiger. Aufgrund der endlichen Ressourcen ist es wichtig den Zustand der Elektronik zu kennen, um diese so lange wie möglich einsetzen oder wiederverwenden zu können. Gleichzeitig muss im Bereich der Automobilelektronik die Sicherheit und Robustheit der elektronischen Komponenten gewährleistet werden.

Im Anschluss an das Projekt SesiM ergeben sich folgende Potentiale:

- Ergebnisse aus dem Projekt heraus helfen den Zustand sicherheitskritischer Automobilelektronik besser bewerten zu können
- Detailliertere Kenntnis der Lötverbindungen im Ausgangszustand für eine genauere Auslegung in Abhängigkeit der erwarteten Belastung
- Innovative Methode zur Lebensdauervorhersage bzw. Zustandsüberwachung, welche für eine Vielzahl anderer Automobilelektroniken, wie z.B. aus dem Bereich des autonomen Fahrens, angewendet werden kann
- Klassifizierung der Elektronik am vermeintlichen Lebensende, um diese für eine Wieder- oder Weiterverwertung, ein Upgrade oder ein Recycling vorzusehen
- Vermeidung von Overdesign bzw. Ermöglichung einer längeren Einsatzdauer von Elektronik
- Ressourcen- und Kosteneinsparungen aufgrund der genaueren Kenntnis der erwarteten Lebensdauer

2.5 FE-Ergebnisse Dritter während der Laufzeit des Vorhabens

Es sind während der Laufzeit von SesiM keine FE-Ergebnisse seitens Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

2.6 Veröffentlichungen

Im Rahmen der Laufzeit des Projekts SesiM wurden die folgenden Veröffentlichungen getätigt:

Während der Projektlaufzeit wurden erste Zwischenergebnisse im Rahmen von Konferenzen und Seminaren veröffentlicht. Hierzu zählen die folgenden Veranstaltungen:

- ESREF 2022: Multi-domain system level modeling approach for assessment of degradation behaviour under thermal and thermo-mechanical stress (IZM / Siemens, Vortrag Tom Dobs)
- INTEC Leipzig 2023: Ungenutzte Potentiale der Elektronikfertigung: Ist die automatische Inspektion auch für Lebensdauerprognosen nutzbar? (Göpel, Vortrag Jens Kokott)
- INTEC Leipzig 2023: Einstieg in KI und Machine Learning – Ein Überblick (Uni Stuttg. / GR, Vortrag …)
- SMT Connect 2023: Ungenutzte Potentiale der Elektronikfertigung: Ist die automatische Inspektion auch für Lebensdauerprognosen nutzbar? (Göpel, Vortrag Jens Kokott)
- SMT Ausstellung 2022: SesiM Projektvorstellung
- Wir gehen in die Tiefe Dresden 2022: SesiM Projektvorstellung (Siemens, Vortrag Klaus Wilke)

- Forschung Kompakt: Selbstvalidierung von komplexen elektronischen Systemen durch Grey-Box-Modelle
- AUCO TIMES Kundenmagazin 2023: SesiM Projektvorstellung
- ESREF 2023: Mission profile-based digital twin framework using functional mock up interfaces for assessing system's degradation behaviour
- ACOD Kongress (Automotive Cluster Ostdeutschland) 13.09.2023 (Vortrag: Jens Kokott)
- PackMEMS 2023: Framework für die Zustandsüberwachung von komplexen elektronischen Systemen auf Basis des Functional Mock-up Interfaces (FMI) (IZM, Poster: Mariam Elsotohy)
- PackMEMS 2023: KI-basierte Zustandsüberwachung in Automotiveanwendungen (Bosch, Vortrag: Roumen Ratchev)
- Siemens Mobility Hausmesse 17.11.2023: Projektvorstellung SesiM (SAG, Poster: Tom Dobs)
- 14. Berliner Technologieforum: Data Mining in der Baugruppenfertigung: Was uns Produktionsdaten über die Zuverlässigkeit sagen, 29.02 2024, Tom Dobs
- EBL 2024: Bild- und Inspektionsdatenanalyse zur Gruppierung von elektrischen Bauteilen für die Korrelation mit der Lebensdauer (Uni Stuttgart, Gestalt Robotics, Vortrag: Maurice Artelt)
- EBL 2024: Methode zur Zustandsbestimmung elektronischer Systeme unter Berücksichtigung von Produktions- und Betriebsdaten (Siemens, Aucoteam, Vortrag: Tom Dobs)
- ICCC 2024: Neuartiger hybrider Simulationsansatz für die Zustandsüberwachung elektronischer Systeme für Mobilitätsanwendungen (IZM, Uni St, Vortrag: Mariam Elsotohy)
- 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024: Hybrid Approaches and Datasets for Remaining Useful Life Prediction: A Review (Uni Stuttgart, Vortrag: Maurice Artelt)
- Electronics goes Green 2024: Multi-domain system level modeling approach for assessment of degradation behaviour under thermal and thermo-mechanical stress (Siemens, IZM)

3 Anlage

3.1 Erfolgskontrollbericht

3.2 Kurzfassung (Berichtsblatt und Document Control Sheet)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Selbstvalidierung komplexer elektronischer Systeme in sicherheitskritischen Mobilitätsanwendungen auf Basis von Greybox-Modellen (SesiM) – Teilvorhaben: Lebensdaueruntersuchungen auf Basis von automotive Demonstrationsmustern zur Ermittlung und Verifikation von KI-Modellen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Mager, Christiane	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2024
	6. Veröffentlichungsdatum Tbd. / geplant
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Robert Bosch GmbH Postfach 106050 70049 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19I21018B
	11. Seitenzahl 37 Seiten
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 5 Tabellen
	15. Abbildungen 35 Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik
   Die Zustandsüberwachung von mechanischen Komponenten war bereits vor den Aktivitäten von SesiM Stand der Technik, während die von elektronischen Komponenten Forschungsgegenstand war und ist. In Veröffentlichungen wurden bereits Methoden und Ansätze beschrieben, mit denen der Zustand einzelner Technologien, wie beispielsweise Lötverbindungen, anhand von Parameteränderungen abgeschätzt werden kann. Bei den üblichen Ansätzen ist es jedoch schwer die Komplexität elektronischer Systeme und Komponenten sowie deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Die Ermittlung der Fehlermechanismen erfolgt durch die systematische Identifikation der relevanten Fehlerorte, -modi, -ursachen und Fehlermechanismen unter Berücksichtigung des Belastungsprofils aus der Anwendung. Alterungsmodelle beschreiben die physikalische Degradation während des Einwirkens einer Last bis zum Ausfall. Für die Erstellung der Alterungsmodelle sind deshalb zeit- und kostenintensive beschleunigte Lebensdauertests sowie FEM-Simulationen nötig. Die Kombination von physikalischen Modellansätzen mit KI-Methoden, um die Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer elektronischer Baugruppen prognostizieren zu können, ist der Ansatz von SesiM. Die KI-Methoden scheitern jedoch in der industriellen Praxis meist an der großen Menge an Trainingsdaten, welche nicht zur Verfügung stehen. Der Einsatz von datengetriebenen Modellen in sicherheitskritischen Anwendungen ist ein offenes Forschungsthema. Ansätze wie Hybrid Machine Learning können durch den Einsatz von Grey-Box Modellen helfen, Entscheidungen der Modelle nachvollziehbarer zu machen, da bekannte, nachvollziehbare physikalische Modelle in die Entscheidungsfindung einfließen. Dieser Ansatz kann ebenfalls die notwendige Anzahl an Trainingsdaten reduzieren, da das Modell z.B. mithilfe der physikalischen Modelle vortrainiert werden kann.

2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung
   Bei sicherheitskritischen elektronischen Systemen werden aktuell Überauslegung oder redundante Aufbauten zur Vermeidung von Ausfällen genutzt. Zentraler Aspekt von SesiM ist die Entwicklung einer KI-basierten Zustandsüberwachung für den optimierten Betrieb von Mobilitätselektronik. Durch die Entwicklung dieser hybriden KI-Modellierung von elektronischen Komponenten für die Bereiche Bahntechnik und Automotive, soll es zukünftig möglich sein auf alterungsbedingten Verschleiß und sicherheitskritische Änderungen proaktiv reagieren zu können. Das Teilvorhaben der Robert Bosch GmbH im Rahmen des Förderprojekts SesiM fokussierte sich dabei schwerpunktmäßig auf die Ermittlung und Bewertung von optischen Inspektionsdaten sowie die Durchführung und Bewertung von Lebensdaueruntersuchungen von automotive Musteranwendungen. Der Fokus war die Bereitstellung der erforderlichen Daten zur Ermittlung und Verifikation von KI-Modellen, um eine Lebensdauerprognose für die automotive Anwendung machen zu können.

3. Methode
   Die in SesiM erarbeitete Methode ist die Korrelation von Prozessdaten und Lebensdauerdaten mittels KI-Modellierung, um eine Abschätzung der Restlebensdauer machen zu können. Die hierfür realisierten elektronischen Musteranwendungen aus dem Bereich Automotive wurden mittels optischer Inspektionsmethoden gemessen und bewertet, um die Fertigungseinflüsse zu erfassen. Zu den ausgewählten optischen Inspektionsmethoden zählten die Lotpasteninspektion (SPI), die Automatische Optische Inspektion (AOI) und die Automatische Röntgeninspektion (AXI). Nach der Messung der zuverlässigkeitsrelevanten Daten der automotive Musteranwendungen erfolgte die Auswertung, Bewertung und Vorbereitung der Messdaten als Inputdaten für die KI-Modelle.
   Der zweite Input für die KI-Modellierung stellten Lebensdauerdaten dar. Hierfür wurden Belastungen in der Nutzungsphase – mittels Durchführung von beschleunigten Lebensdauertests – gemessen. Abgeleitet von den Belastungsprofilen der automotive Anwendung, wurden Temperaturschockwechseltests durchgeführt. Durch die Realisierung einer aufwändigen Onlinemesstechnik konnten während der gesamten Testlaufzeit Widerstandswerte der überwachten, lebensdauerbestimmenden Lötstellen aufgenommen werden. Die End of Life Daten der Lebensdauertests und die Messwerte aus den optischen Inspektionen stellten die Inputgrößen für die KI-Modelle dar. Es wurde eine KI-Modellierung durchgeführt und die Daten auf Abhängigkeiten hin untersucht. Das Ergebnis der Modellierung war die Prognose einer Lebensdauerklasse für die untersuchte Musteranwendung.

4. Ergebnis
   Durch die Kombination der optischen Inspektionsdaten mit den End of Life Daten der Lebensdauertests mittels KI-basierter, innovativer Modellierung, konnte eine Klassifizierung der elektronischen Baugruppen in Lebensdauerklassen erfolgen. Dies ermöglicht eine Vorhersage der Restlebensdauer. Für die automotive Anwendung war eine Klassifikation in zwei Lebensdauerklassen möglich. Durch den Einsatz einer Hyperparameteroptimierung für neuronale Netzwerke, einem Decision Tree, konnte mit einer Genauigkeit von ca. 70 bis 80% diese Vorhersage erfolgen. Dabei war zu erkennen, dass es keine offensichtlichen Abhängigkeiten der Inputparameter aus SPI, AOI und AXI gibt. Die Abhängigkeiten der Inputparameter aus den Inspektionsdaten sind höheren Grades, die nur mit einer solchen KI-Modellierung zu erfassen sind.

5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten
   Die Methodik für ein Condition Monitoring und eine Bestimmung der Restlebensdauer konnte am Beispiel der automotive Musteranwendung erarbeitet werden. Die hierfür erforderlichen Methoden zur Aufnahme zuverlässigkeitsrelevanter Parameter aus optischen Inspektionsmethoden und die Methodik zur online Aufnahme von Lebensdauerdaten in beschleunigten Zuverlässigkeitstests wurden erarbeitet. Mit der KI-Modellierung konnte ein Zusammenhang zwischen optischen Inspektionsdaten und Lebensdauerdaten aufgezeigt werden. Dies kann auf zukünftige weitere Komponenten und Baugruppen übertragen werden. Außerdem soll die Kenntnis des Zustands der Elektronik zukünftig für deren Wieder-/Weiterverwendung bzw. Recycling genutzt werden.

19. Schlagwörter
SesiM, Elektronik, Condition Monitoring, KI-Modellierung, optische Inspektionsmethoden, SPI, AOI, AXI, Restlebensdauer, Zuverlässigkeit

20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planed	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title Self-Validation of Complex Electronic Systems in Safety-Critical Mobility Applications Using Grey-Box Models (SesiM) – Sub-project: Lifetime Studies Based on Automotive Demonstration Prototypes to Identify and Verify AI Models (Selbstvalidierung komplexer elektronischer Systeme in sicherheitskritischen Mobilitätsanwendungen auf Basis von Greybox-Modellen (SesiM) – Teilvorhaben: Lebensdaueruntersuchungen auf Basis von automotive Demonstrationsmustern zur Ermittlung und Verifikation von KI-Modellen)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Mager, Christiane	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date Tbd. / planed
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Robert Bosch GmbH Postfach 106050 70049 Stuttgart	9. originator's report no.
	10. reference no. 19I21018B
	11. no. of pages 37 pages
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables 5 tables
	15. no. of figures 35 figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

1. Current State of Science and Technology

   The condition monitoring of mechanical components was already state of the art before the activities of SesiM, while the monitoring of electronic components was and still is a subject of research. Publications have already described methods and approaches to estimate the condition of individual technologies, such as solder joints, based on changes in parameters. However, with the usual approaches, it is difficult to consider the complexity of electronic systems and components as well as their interactions. The determination of failure mechanisms is carried out through the systematic identification of relevant failure locations, modes, causes, and mechanisms, taking into account the load profile from the application. Aging models describe the physical degradation during the application of a load until failure. Therefore, the creation of aging models requires time-consuming and costly accelerated reliability tests as well as FEM simulations. The approach of SesiM is to combine physical model approaches with AI methods to be able to predict the reliability or lifespan of electronic assemblies. However, AI methods often fail in industrial practice due to the large amount of training data that is not available. The use of data-driven models in safety-critical applications is an open research topic. Approaches such as Hybrid Machine Learning can help make model decisions more understandable by using Grey-Box models, as known, understandable physical models are incorporated into the decision-making process. This approach can also reduce the necessary amount of training data, as the model can be pre-trained using physical models, for example.

2. Justification/Objectives of the Study

   In safety-critical electronic systems, over-engineering or redundant setups are currently used to avoid failures. A central aspect of SesiM is the development of AI-based condition monitoring for the optimized operation of mobility electronics. By developing this hybrid AI modeling of electronic components for the railway and automotive sectors, it should be possible in the future to proactively respond to aging-related wear and safety-critical changes. The sub-project of Robert Bosch GmbH within the framework of the SesiM project focused primarily on the determination and evaluation of optical inspection data as well as the execution and evaluation of lifetime investigations of automotive sample applications. The focus was on providing the necessary data to determine and verify AI models to make a lifetime prognosis for the automotive application.

3. Method

   The method developed in SesiM is the correlation of process data and lifetime data using AI modeling to estimate the remaining useful lifetime. The electronic sample applications realized for this purpose in the automotive sector were measured and evaluated using optical inspection methods to capture manufacturing influences. The selected optical inspection methods included Solder Paste Inspection (SPI), Automatic Optical Inspection (AOI), and Automatic X-ray Inspection (AXI). After measuring the reliability-relevant data of the automotive sample applications, the data were evaluated, assessed, and prepared as input data for the AI models.

   The second input for the AI modeling was lifetime data. For this purpose, loads during the usage phase were measured by conducting accelerated lifetime tests. Derived from the load profiles of the automotive application, temperature shock tests were performed. By implementing elaborate online measurement technology, resistance values of the monitored, life-determining solder joints were recorded throughout the entire test duration. The end-of-life data from the lifetime tests and the measurement values from the optical inspections constituted the input variables for the AI models. AI modeling was performed, and the data were examined for dependencies. The result of the modeling was the prediction of a lifetime class for the investigated sample application.

4. Result

   By combining the optical inspection data with the end-of-life data from the lifetime tests using AI-based innovative modeling, it was possible to classify the electronic assemblies into lifetime classes. This enables a prediction of the remaining lifetime. For the automotive application, classification into two lifetime classes was possible. By using hyperparameter optimization for neural networks, a decision tree, this prediction could be made with an accuracy of about 70 to 80%. It was observed that there are no obvious dependencies of the input parameters from SPI, AOI, and AXI. The dependencies of the input parameters from the inspection data are of a higher order, which can only be captured with such AI modeling.

5. Conclusion/Application Possibilities

   The methodology for condition monitoring and determining the remaining lifetime could be developed using the example of the automotive sample application. The necessary methods for recording reliability-relevant parameters from optical inspection methods and the methodology for online recording of lifetime data in accelerated reliability tests were developed. With the AI modeling, a correlation between optical inspection data and lifetime data could be demonstrated. This can be transferred to future components and assemblies. Additionally, the knowledge of the condition of the electronics should be used in the future for their reuse, repair or recycling.

19. keywords

SesiM, electronics, condition monitoring, AI modeling, optical inspection methods, SPI, AOI, AXI, remaining useful lifetime, reliability

20. publisher	21. price