

Zusammenfassung

zum Teilvorhaben des Fraunhofer ENAS

Echtzeit-Reaktion auf thermo-mechanische Degradationserscheinungen in der Fahrzeug- und Industrie-Elektronik

im BMBF-Verbundprojekt **EMDRIVE**

Für die Realisierung einer wirksamen Eigenüberwachung systemrelevanter Elektronik-Module künftiger Fahrzeuge und Industrieanlagen hat Fraunhofer ENAS in EMDRIVE exemplarisch für ein Leistungselektronikmodul ein Surrogat-Modell entwickelt, das die Grundlage für den kompakten digitalen Zwilling bildet, der diese Überwachung in der Applikation (Fahrzeug, Roboter, Maschine) vornehmen kann. Dieses kompakte Modell kann wichtige Eigenschaften des physischen Systems in verschiedensten Betriebsituationen so realistisch nachstellen, dass Abweichungen von seinen Prognosen den Hinweis auf Degradationseffekte wie Rissbildung, Delamination und Überhitzung im betreffenden Modul geben. Aus der Größe der Abweichung kann die elektro-thermo-mechanische Simulation die erwartbare Restlebensdauer der Baugruppe abschätzen und eigenständig im Betrieb eine Reduzierung der Belastung durch Änderung des Betriebsmodus herbeiführen. Ziel ist es dabei, die Funktionsfähigkeit zumindest solange sicherzustellen, bis die laufende Mission (Fahrt, Produktionsschicht etc.) wie geplant abgeschlossen werden konnte. Somit steigert der digitale Zwilling von Fraunhofer ENAS die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Automobil- bzw. Industrieanwendungen und bietet zugleich erhebliche wirtschaftliche Vorteile durch reduzierte Redundanz und optimierte Wartungsplanung.

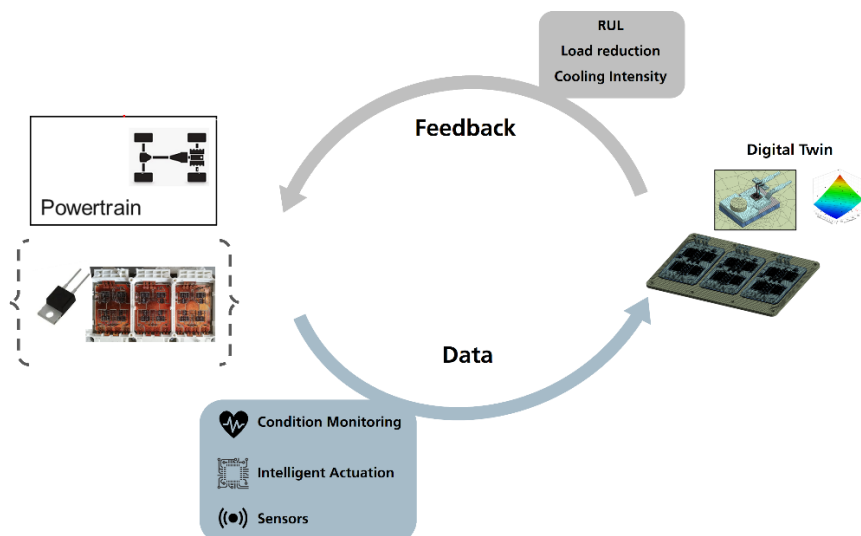


Abbildung 1: Konzeptdefinition für die Echtzeitüberwachung und Rückmeldung von Degradationen in leistungselektronischen Modulen

Die wichtigsten Arbeiten und Ergebnisse des Fraunhofer ENAS sind hier zusammengefasst:

- **Entwicklung und Kalibrierung des FE-Modells:** Es wurden Finite-Elemente-Modelle (FE) entwickelt, um Hauptausfallmechanismen leistungselektronischer Module wie Delamination des Die-Attach und Bruch der Drahtbonds aufgrund thermischer Wechselbelastung zu simulieren. Effiziente Vernetzungsstrategien reduzierten die Rechenzeiten. Die FE-Modelle wurden anhand experimenteller Daten beschleunigter Lebensdauertests kalibriert und erreichten eine hohe Genauigkeit.
- **Versuchsplanung (DoE) und Datengenerierung:** Das kalibrierte FE-Modell wurde für eine Design of Experiments (DoE)-Studie eingesetzt, in der Parameter wie Laststrom, Umgebungstemperatur und Delaminationsgrad variiert wurden. Dadurch entstand ein umfassender Datensatz, der das Modulverhalten unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen abbildet.
- **Erstellung des Surrogatmodells und FMU-Export:** Die DoE-Ergebnisse bildeten die Grundlage für ein kompaktes Surrogatmodell, das kritische Eingangsgrößen mit Ausgangsparametern wie

Sperrschichttemperatur, Drain-Source-Spannung und thermischem Widerstand verknüpft. Das Modell wurde in ANSYS optiSLang erstellt und als Functional Mock-up Unit (FMU) für die Integration in Simulationen und eingebettete Systeme exportiert.

- **Algorithmusentwicklung für SoH- und RUL-Prognose:** Ein Python-basierter Algorithmus wurde entwickelt, der die FMU zur kontinuierlichen Überwachung und Prognose von State of Health (SoH) und Restlebensdauer (RUL) nutzt. Die Schlüsselparameter wurden normiert und eine an den Automotive-Bereich angepasste RUL-Gleichung für Echtzeitprognosen implementiert.

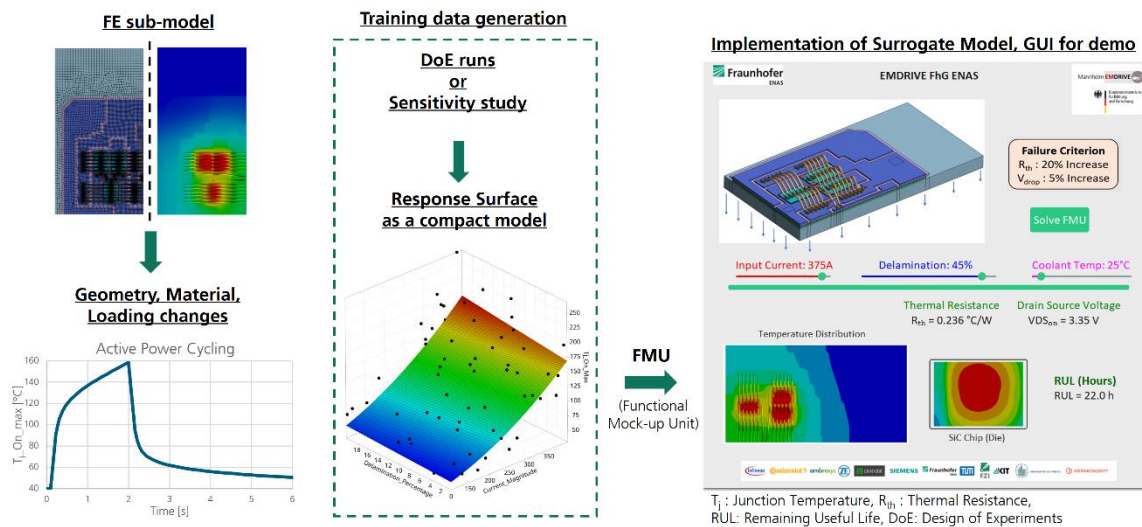


Abbildung 2: Verschiedene Phasen der Entwicklung des Surrogatmodells

Arbeitspaket Zusammenfassung:

Fraunhofer ENAS leistete wesentliche Beiträge im Projekt als aktiver Teilnehmer in den Arbeitspaketen AP3, AP5 und AP6 und übernahm gemeinsam mit Continental die Leitung des AP6. Zu Projektbeginn lag der Fokus auf der Organisation der Konsortialaktivitäten, dem Abschluss von Vereinbarungen und der Förderung der Zusammenarbeit durch regelmäßige Treffen. Das bildete eine wichtige Grundlage für die erfolgreiche Projektarbeit aller Partner.

Als Forschungsleistung hat Fraunhofer ENAS im AP3 ein Konzept zur Bewertung des Gesundheitszustands elektronischer Module mittels standardisierter Power-Cycle-Tests und Finite-Elemente-Simulationen entwickelt, wobei die Sperrschichttemperatur und der thermische Widerstand der entscheidenden Bauelemente als Kriterium genutzt wurde. Das Konzept wurde zunächst an einer TO220-Leistungsdioden erprobt.

Das AP5 konzentrierte sich auf den Aufbau einer Infrastruktur für Echtzeitüberwachung und Diagnostik. Fraunhofer ENAS hat als Demonstrationsobjekt für die Implementierung seines neuen Konzepts das 'HP Drive'-Module des Projektpartners Infineon AG ausgewählt, dafür ein parametrisches Simulationsmodell entwickelt und mit diesen umfangreichen Fallstudien durchgeführt, aus denen ein Surrogat-Modell abgeleitet werden konnte, das nun die Grundlage für den digitalen Zwilling bildet.

In AP6 half Fraunhofer ENAS bei der Definition automobilbezogener Anwendungsfälle und unterstützte die Integration in die Fahrzeugdynamik- und Aktuatorregelungsplattform von Continental. Zur Veranschaulichung der praktischen Wirkung des Surrogat-Modells hat Fraunhofer ENAS beim Abschlussmeeting ein Poster und eine Live-Demonstration vorgestellt, mit der die Funktionalität des umgesetzten Konzepts mithilfe einer neu geschaffenen grafischen Benutzeroberfläche (GUI) für verschiedenste Fahrmanöver anschaulich gezeigt werden konnte.