

Lebensdauerabschätzung von Umrichtern in Modellen Elektrischer Antriebsstränge

Tag der Mechatronik, 2014
Markus Öttl, FH Vorarlberg

FHV
Vorarlberg University
of Applied Sciences



Einleitung

Motivation

- Moderne Inverter:
 - Hohe thermische Beanspruchung
 - Reduzierte Lebensdauer von Leistungshalbleitern
 - Fehlervorhersage unter realen Bedingungen schwierig

Ziel

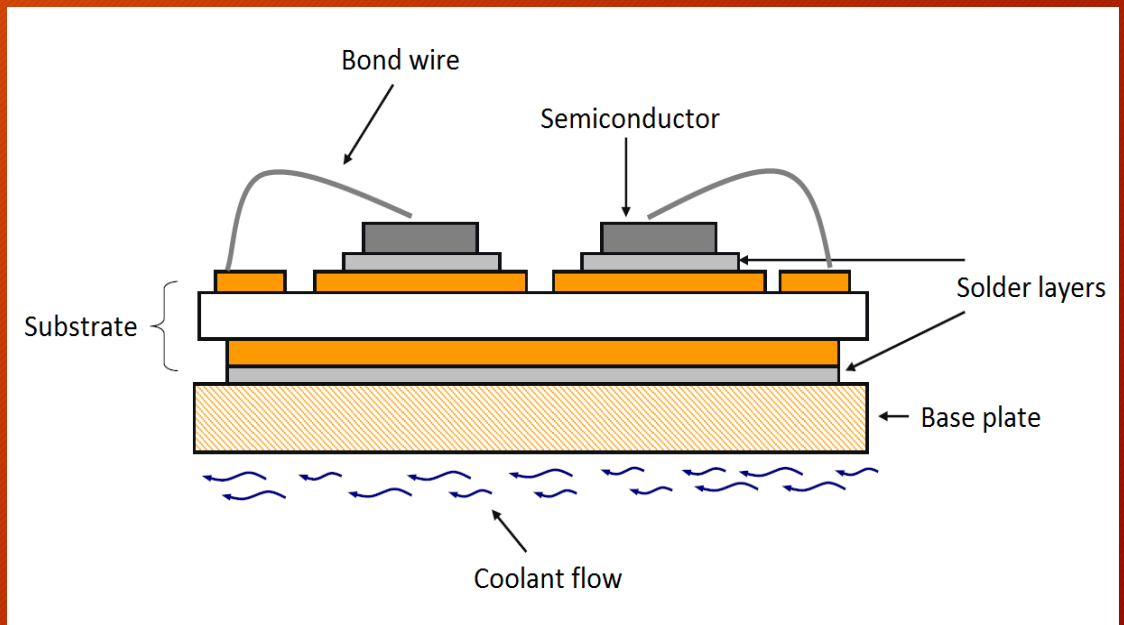
- Einen Weg finden wie eine Lebensdauerabschätzung in Bestehende Fahrzeugmodelle integriert werden kann, um in Simulationen sinnvolle Abschätzungen der Lebensdauer treffen zu können.



200 kW Umrichter für Automotive - Anwendungen (Quelle: www.bruza.biz)

Halbleiterleistungsmodul im Querschnitt

- Mehrere Lagen unterschiedlicher Materialien
- Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten
- Mechanischer Stress durch erhöhte Temperatur
- Wechselnde Last durch Temperaturänderungen führt zu Materialermüdung an Schwachpunkten

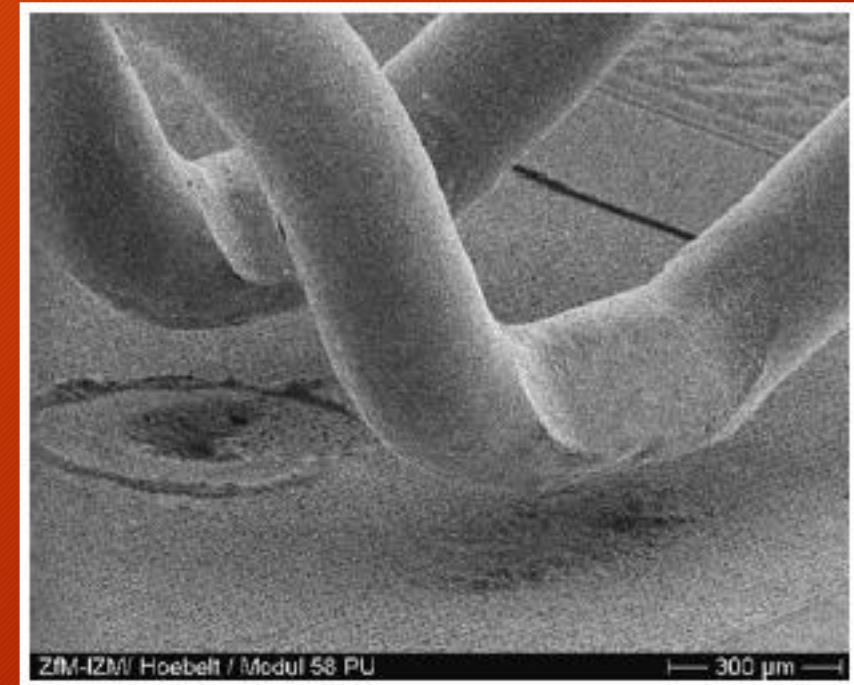
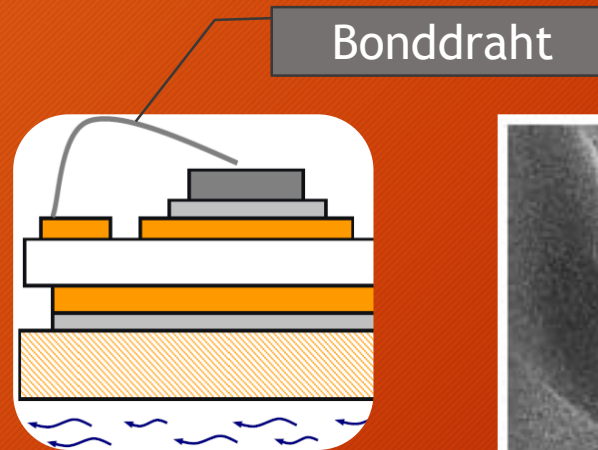


(Quelle: Fraunhofer IISB)

Fehlermechanismen in Leistungshalbleitern

Abheben der Bonddrähte

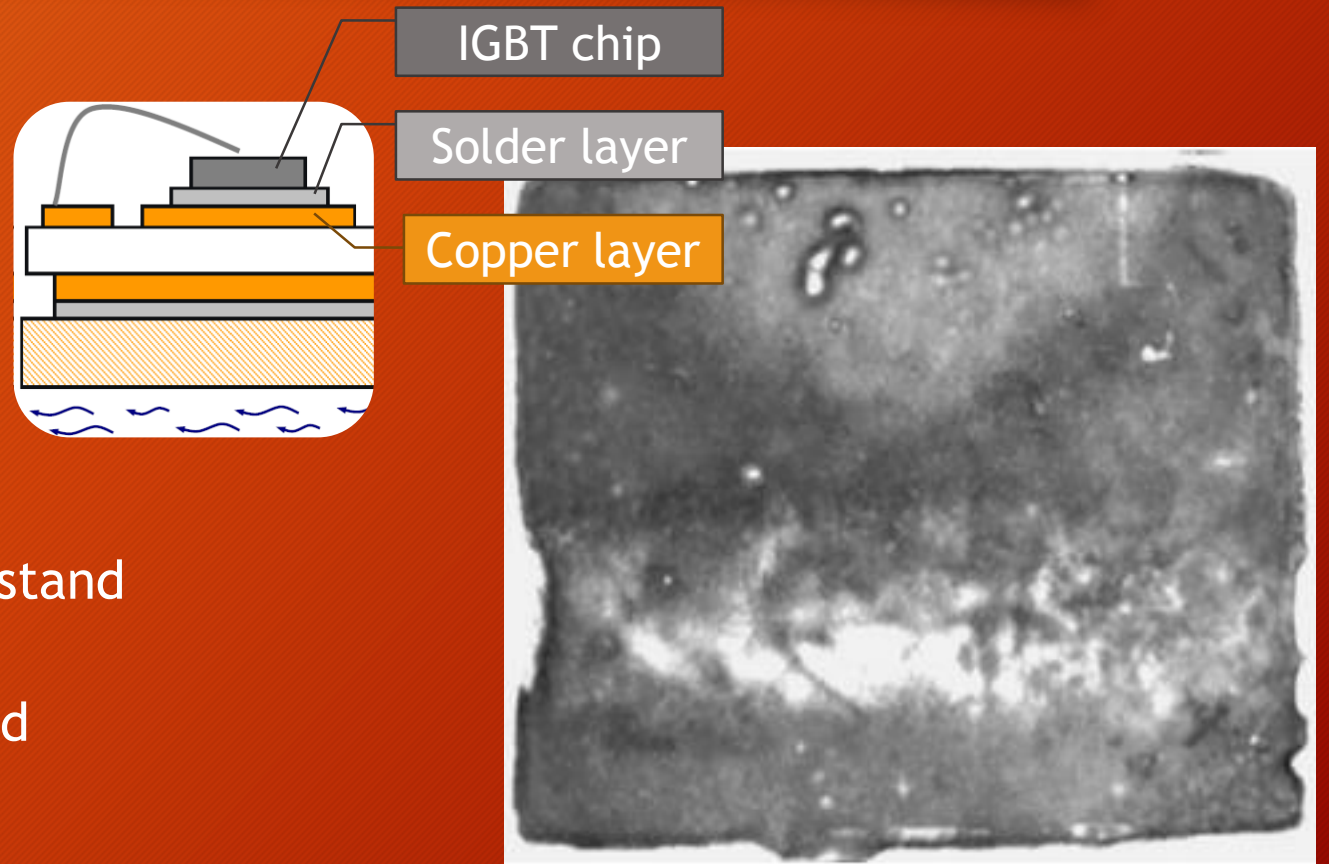
- Bonddrähte sind auf Kupfer geschweißt
- Verbindung wird durch Bewegungen geschwächt
- Thermischer und elektrischer Widerstand erhöhen sich
- Einzele Drähte können Kontakt verlieren
- Belastung auf verbleibende Drähte steigt folglich (selbstverstärkender Effekt)



Fehlermechanismen in Leistungsmodulen

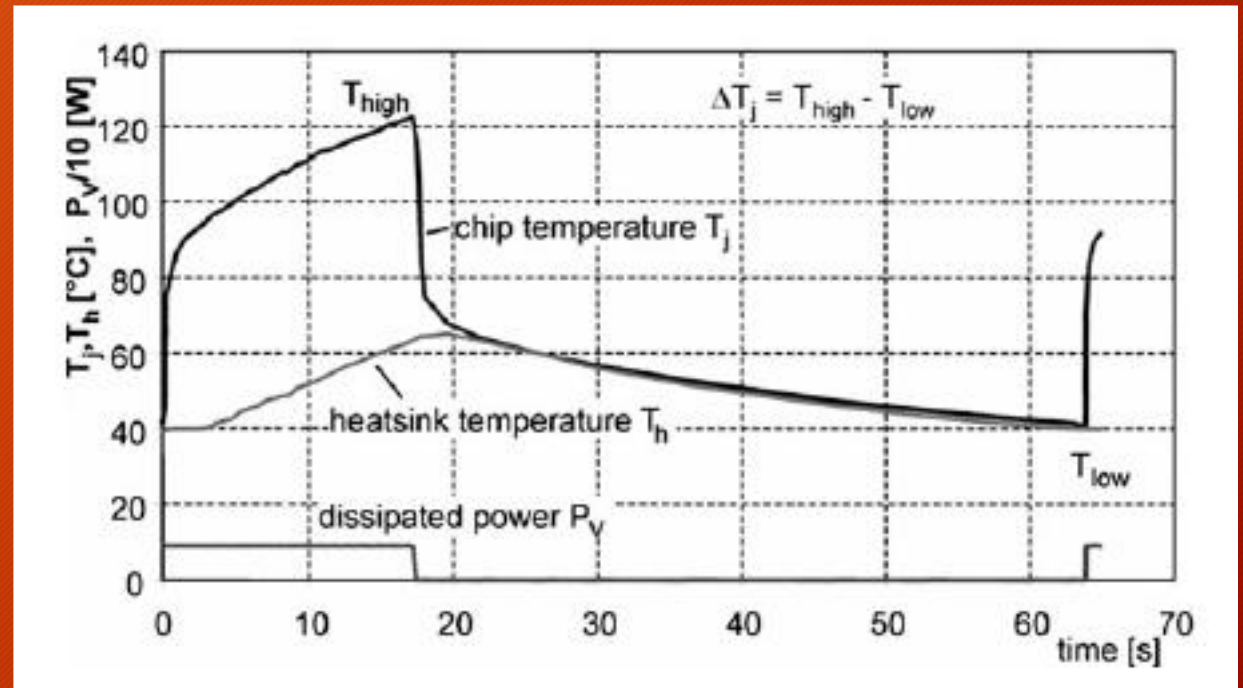
Verschleiß der Löt­schicht

- Kupferschicht und IGBT sind durch eine Löt­schicht verbunden
- Löt­schicht kann brüchig werden
- Effektiver Querschnitt sinkt
- Thermischer und elektrischer Widerstand erhöhen sich
- Effekt ist ebenfalls selbstverstärkend



Power Cycling Test (PC Test)

- Von Halbleiterherstellern durchgeführt
- Dient dem Herausfinden der MTTF (mean time to failure)
- Tests bei verschiedenen Temperaturen zum Ableiten von Lebensdauermodellen.



Power cycling Test Profil
(source: Lutz J., Semiconductor Power Devices)

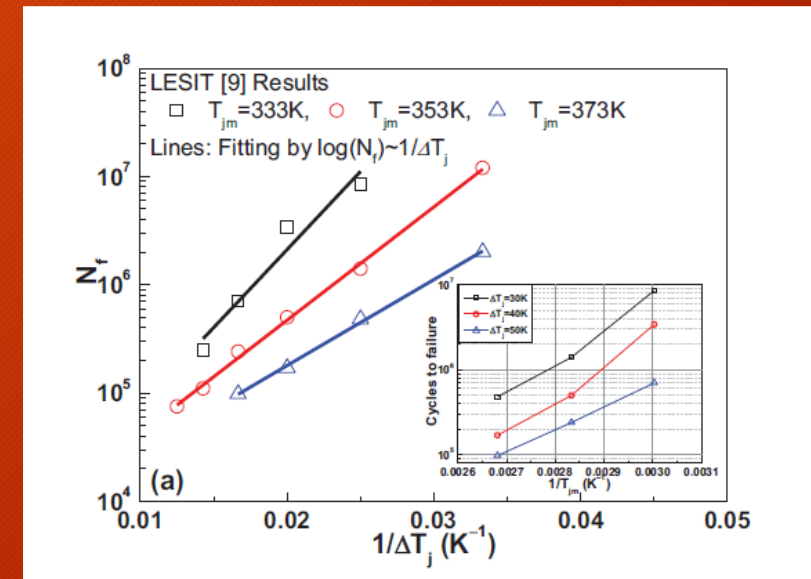
Lebensdauermodelle

LESIT Model

- Anwendbar für Standard Module mit Metal Grundplatte und Aluminiumoxid Substrat

$$N_f = A \cdot \Delta T_j^{-\alpha} \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T_{jm}}\right)}$$

- Wird derzeit in unserer Lebensdauerabschätzung verwendet



LESIT model; MTTF over temperature

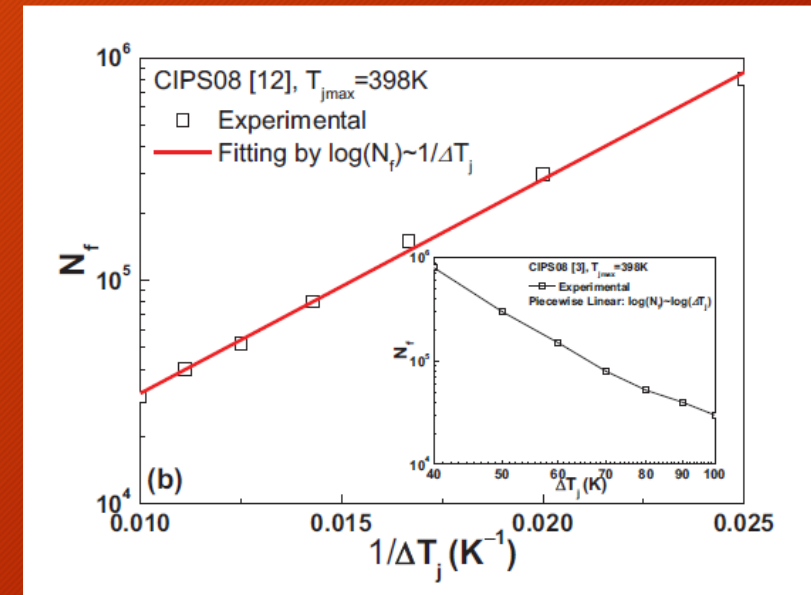
Lebensdauermodelle

CIPS08 Model

- Durch Verbesserungen in den Materialien, war ein besseres Modell nötig, um diese Verbesserungen korrekt abzubilden.

$$N_f = A \cdot \Delta T_j^{\beta_1} \cdot e^{\left(\frac{\beta_2}{T_{low}}\right)} \cdot t_{on}^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4} \cdot V^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6}$$

- Hängt von wesentlich mehr Faktoren ab

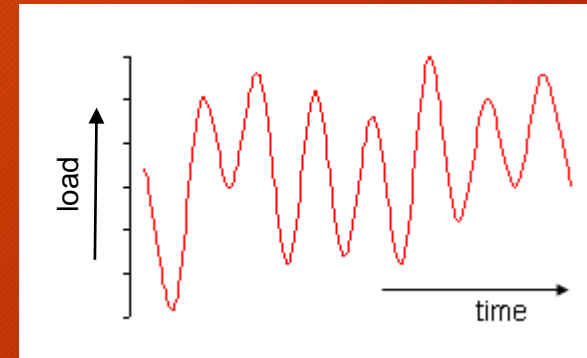


CIPS08 model; MTTF over temperature

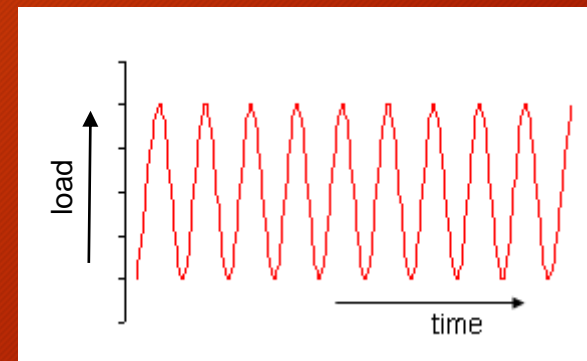
Einsatzprofil (Mission Profile)

Problem:

- Einsatzprofil ist in der Realität völlig zufällig und vom Fahrverhalten abhängig.
- PC Tests mit periodischen Signalen → Resultate können nicht direkt auf Einsatzprofil umgelegt werden um die Lebensdauer abzuschätzen.



Zufällige Last
(Einsatzprofil)

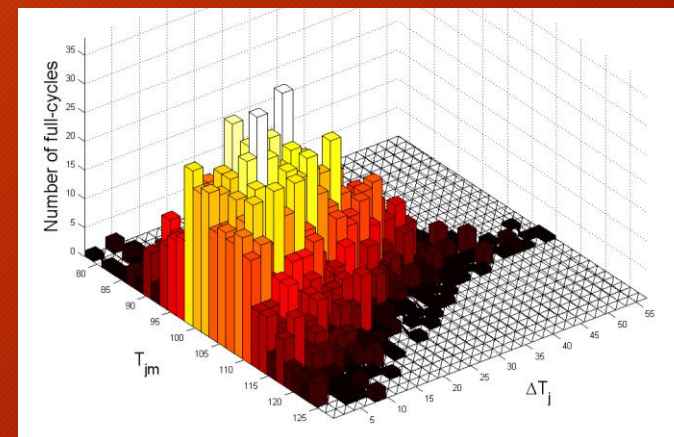
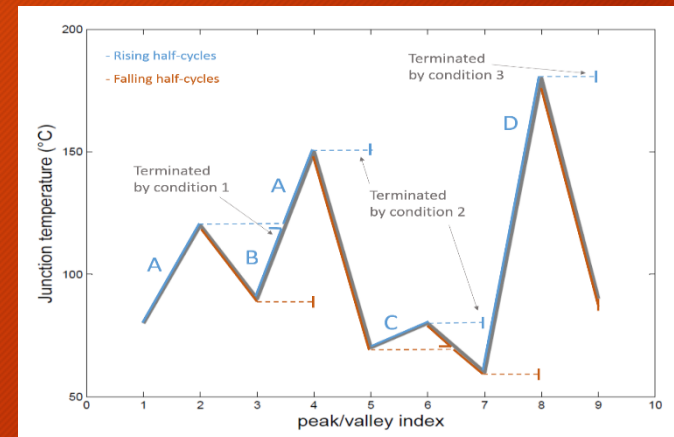


Gleichmäßig
schwingende Last
(PC Test)

Rainflow counting

→ Transformiert ein zufälliges Lastprofil in eine Superposition von vielen Einzellasten.

- Zählt Halb- und Vollzyklen des Temperaturprofils (oberes Diagramm) durch einen definierten Algorithmus
- Vollzyklen werden nach deren Amplitude und Mittelwert gruppiert. (unteres Diagramm)



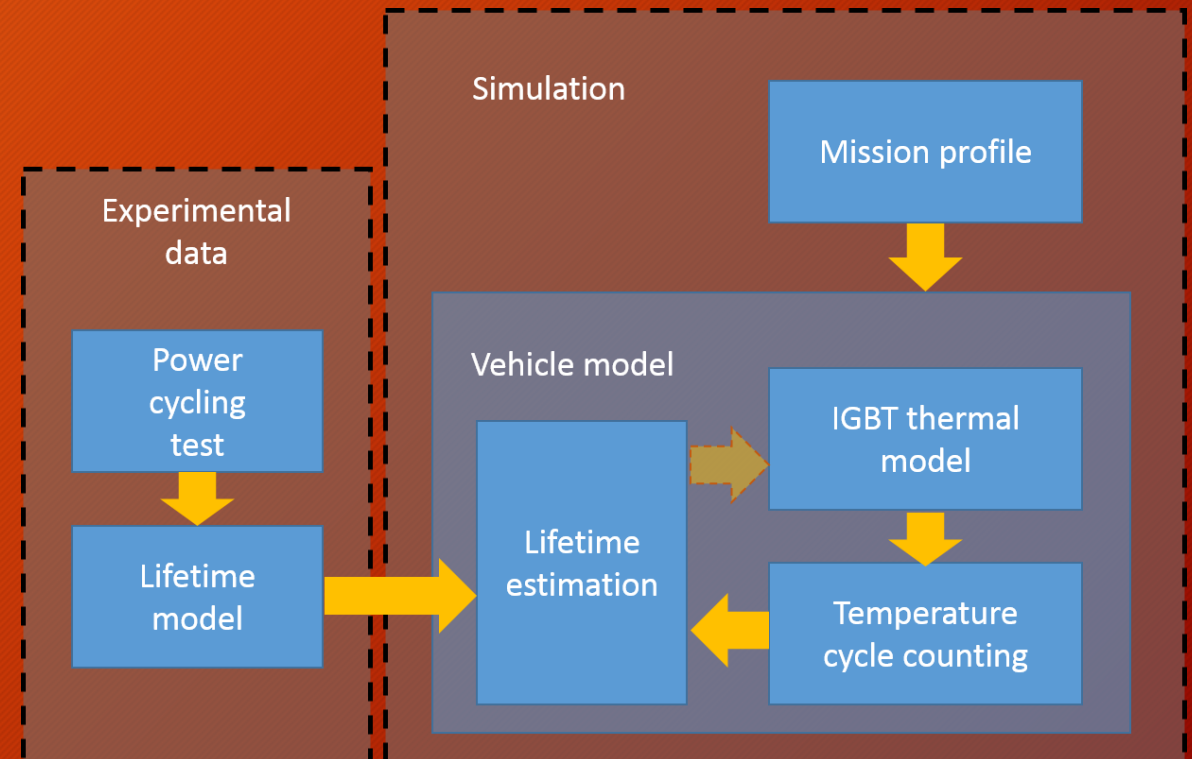
Lebensdauerabschätzung

Linke Seite

- „Reale Welt“ → Tests durch Hersteller

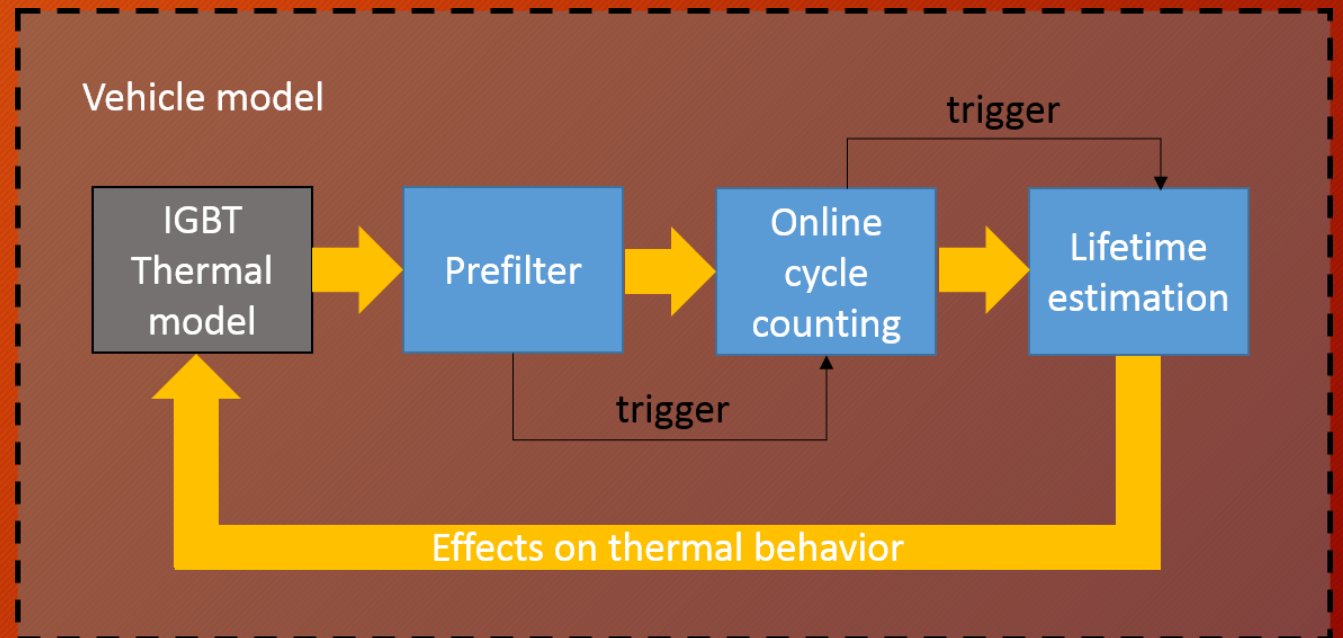
Rechte Seite

- Einsatzprofil (Mission Profile)
- Lebensdauerabschätzung mit Feedback zum Thermischen Modell des Halbleiters



Integration im Fahrzeugmodell

- Thermisches IGBT Modell simuliert Temperatur, idealer Weise unter Berücksichtigung des Lebensdauer-
verbrauchs
- Vorfilter triggert Rainflow Counting
Algorithmus bei jedem neuen
Temperaturminimum oder -maximum
- Effizienter on-line Rainflow
Algorithmus verarbeitet
Temperaturprofil
- Wird ein neuer Vollzyklus gezählt,
wird Lebensdauerverbrauch neu
berechnet



Lebensdauerverbrauch

Folgt linearer Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner (a.k.a. Miner's rule)

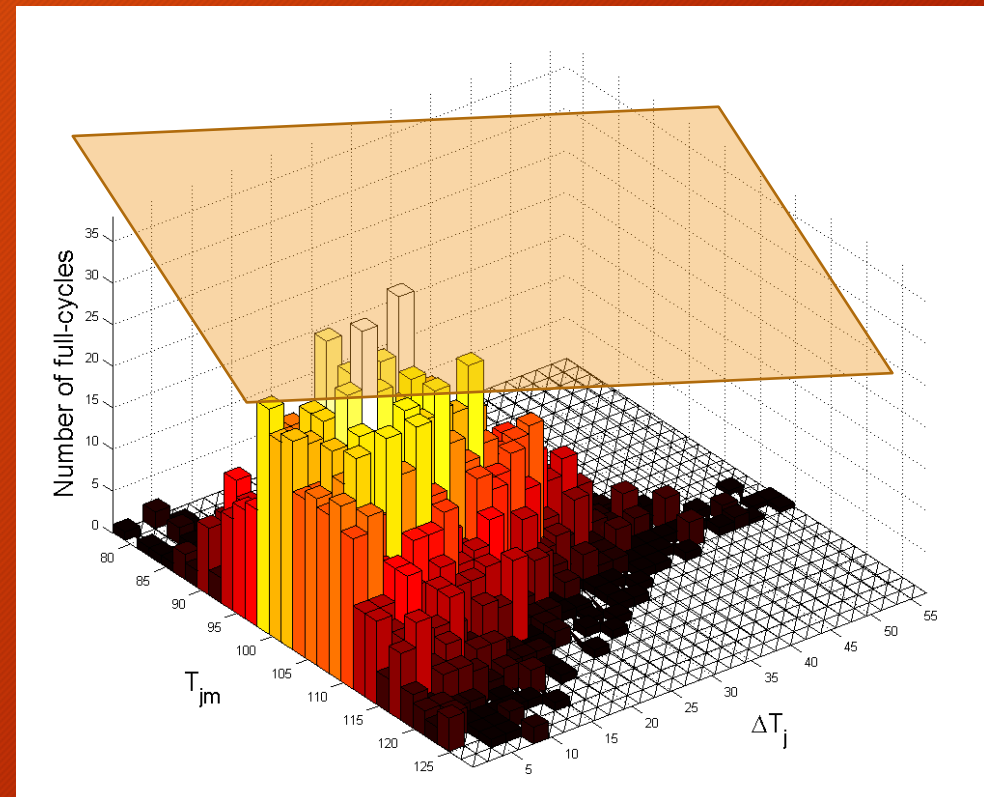
$$LC = \sum_{i,j=1}^n \frac{N_{(i,j)}}{N_{f(i,j)}}$$

LC = Lebensdauerverbrauch (life-time consumption) → Zahl zwischen 0 und 1

N = Anzahl gezählter Zyklen

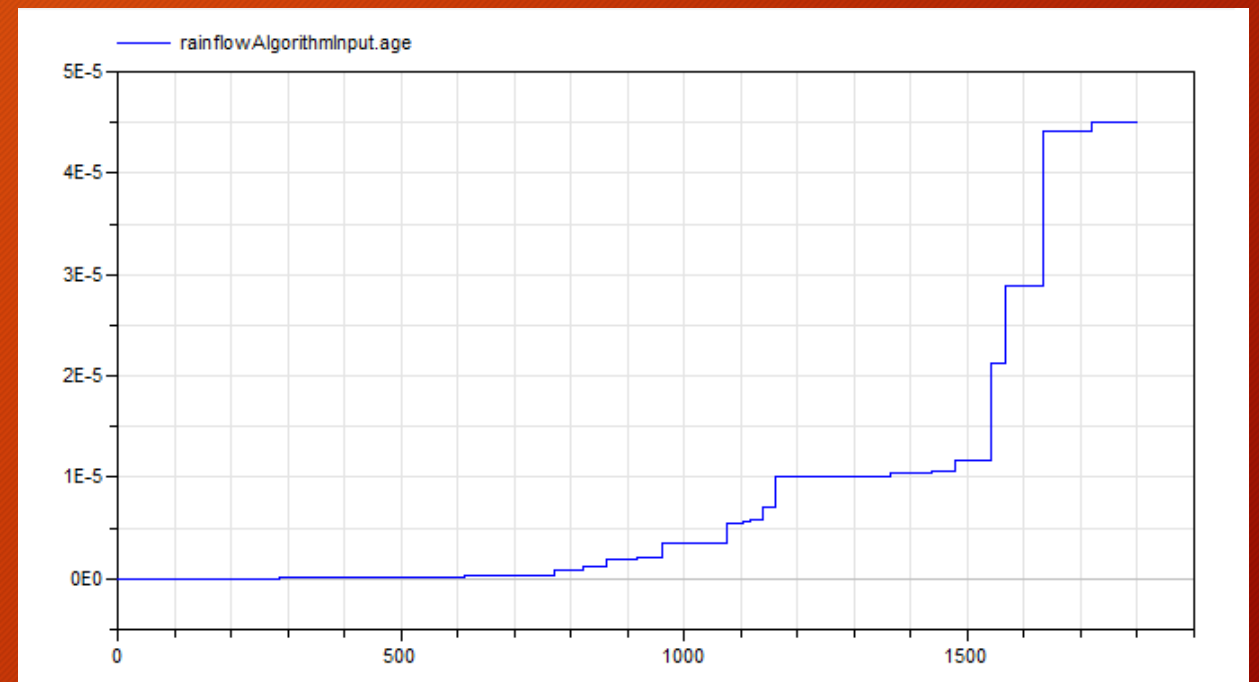
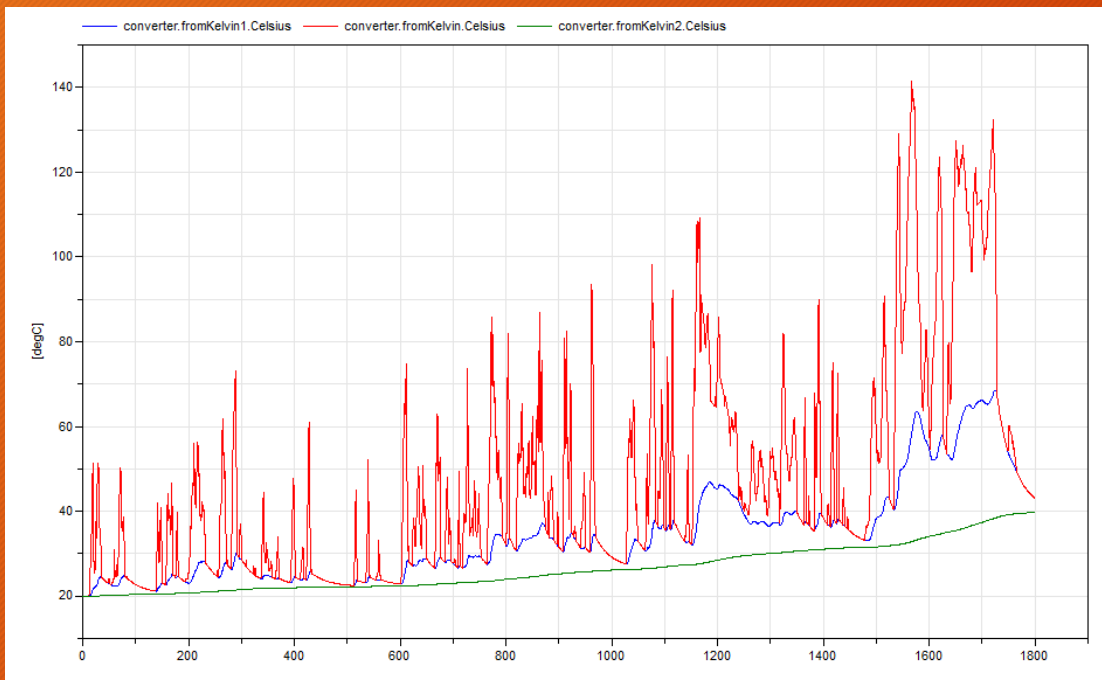
N_f = Maximal erreichbare Zyklen nach Modell

Wenn $LC \geq 1$, MTTF des Leistungs-
halbleitermoduls erreicht.



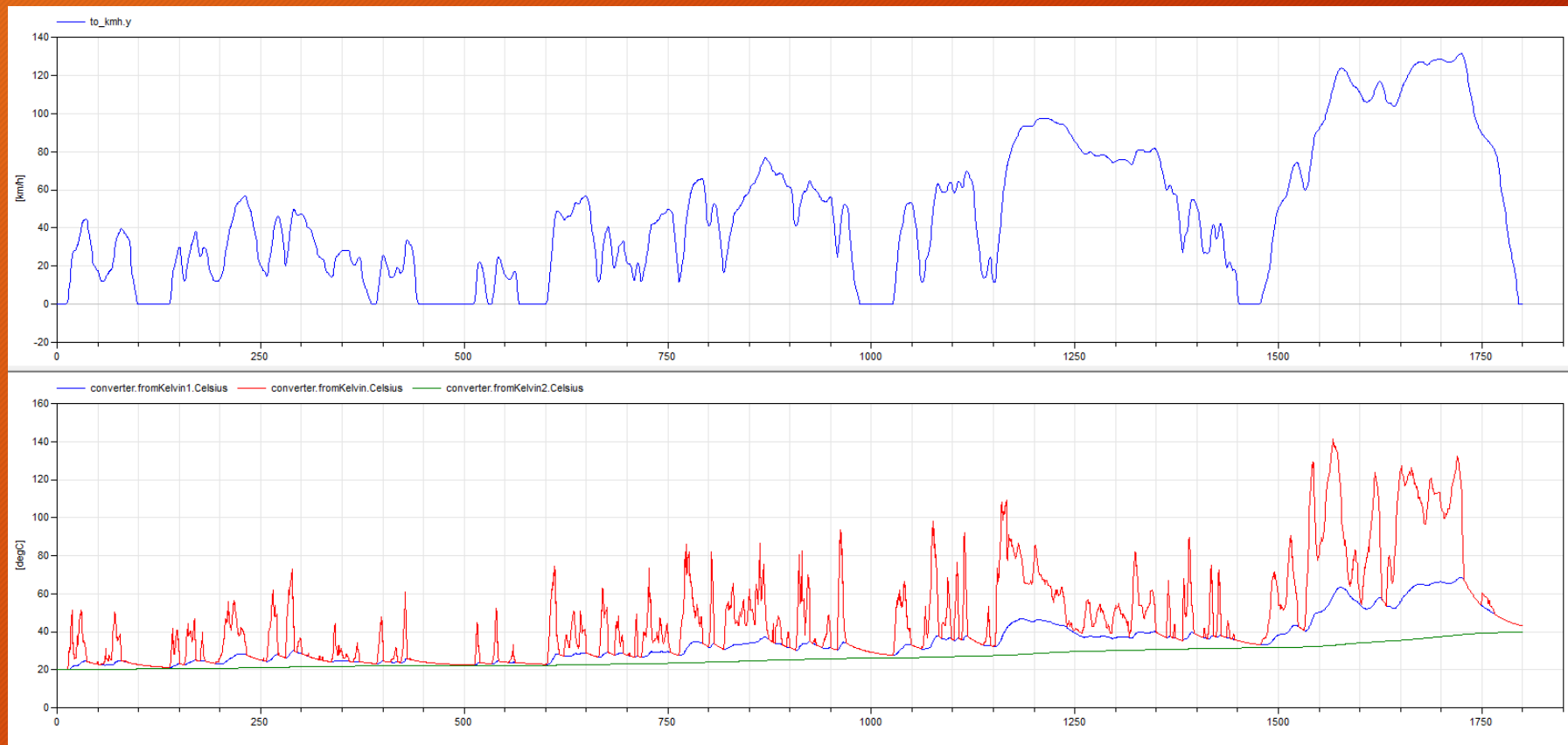
Test einer Implementierung in Dymola

Rechts: Temperaturen eines IGBT
Leistungsmoduls während eines WLTP Zyklus



Rechts: Simulierter Lebensdauerverbrauch
eines Leistungshalbleitermoduls

Verwendetes Einsatzprofil: WLTP



Zusammenfassung und Ausblick

- Weg zur Lebensdauerabschätzung in einem Fahrzeugmodell wurde vorgestellt.
- Lösung geeignet zur Lebensdauerabschätzung der Umrichter in realem Fahrzeug. (Zählalgorithmus sehr effizient)
- IGBT Modelle, die Einfluss der Alterung auf das thermische Verhalten berücksichtigen, müssen noch entwickelt werden.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

FHV
Vorarlberg University
of Applied Sciences

