

Thermische Impedanzmessungen zur Lebensdaueranalyse von Leistungselektronik

DVM Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V.
Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptiver Systeme

Aaron Hutzler
Adam Tokarski
Andreas Schletz
Felix Zeys

25.02.2015

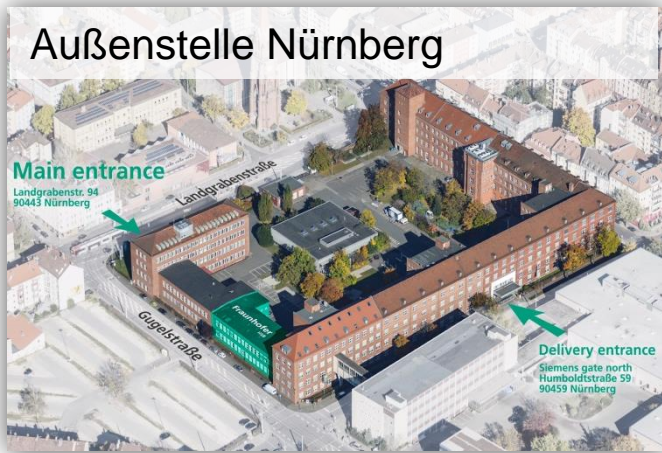
Inhalt

1. Leistungselektronik und deren Aufbaukonzepte
2. Temperaturwechselbelastung im Betrieb
3. Überblick Aktive Lastwechseltests
4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung
5. Weitere Fehleranalyse durch elektrisches Verhalten
6. Zusammenfassung
7. Ausblick: Implementierung der Methodik in den Fahrzeugbetrieb

Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)



- Institutsleiter: Prof. L. Frey
- Forschungsschwerpunkte
 - Leistungselektronik
 - Halbleiter-Technologien
(1000 m² Reinraum, Klasse 10, CMOS)
- Mitarbeiter: 200
- Budget:
 - ⇒ 20...25% Grundfinanzierung
 - ⇒ **75...80% Drittmittel**
- www.iisb.fraunhofer.de



Fraunhofer IISB – Fields of Competence

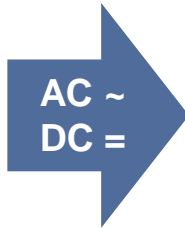


1. Leistungselektronik und deren Aufbaukonzepte

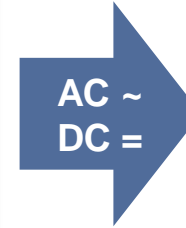
Information



Elektrische
Energie



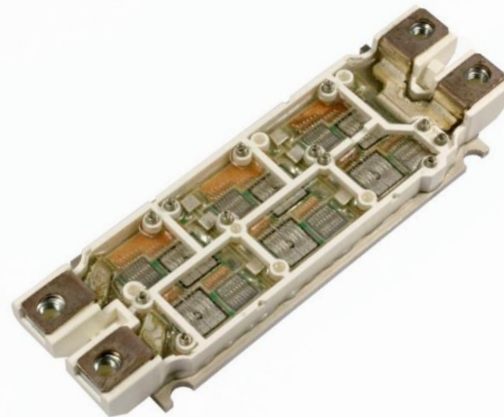
Leistungselektronik
Energieverarbeitung



Elektrische
Energie



Batteriemodul Artega GT
(Eigenentwicklung Fraunhofer IISB)

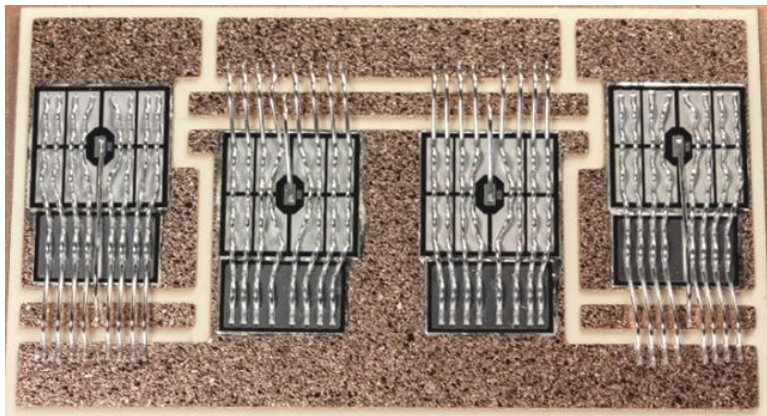
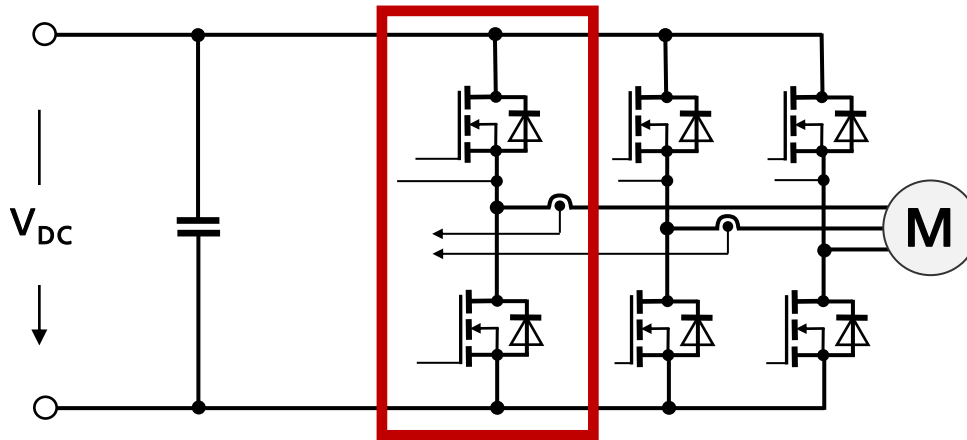


600V/600A Leistungsmodul



Umbau Artega GT zu Elektrofahrzeug
(Eigenentwicklung Fraunhofer IISB)

1. Leistungselektronik und deren Aufbaukonzepte



600V/400A Leistungsmodul basierend auf der IGBT3 Technologie
(Eigenentwicklung Fraunhofer IISB)



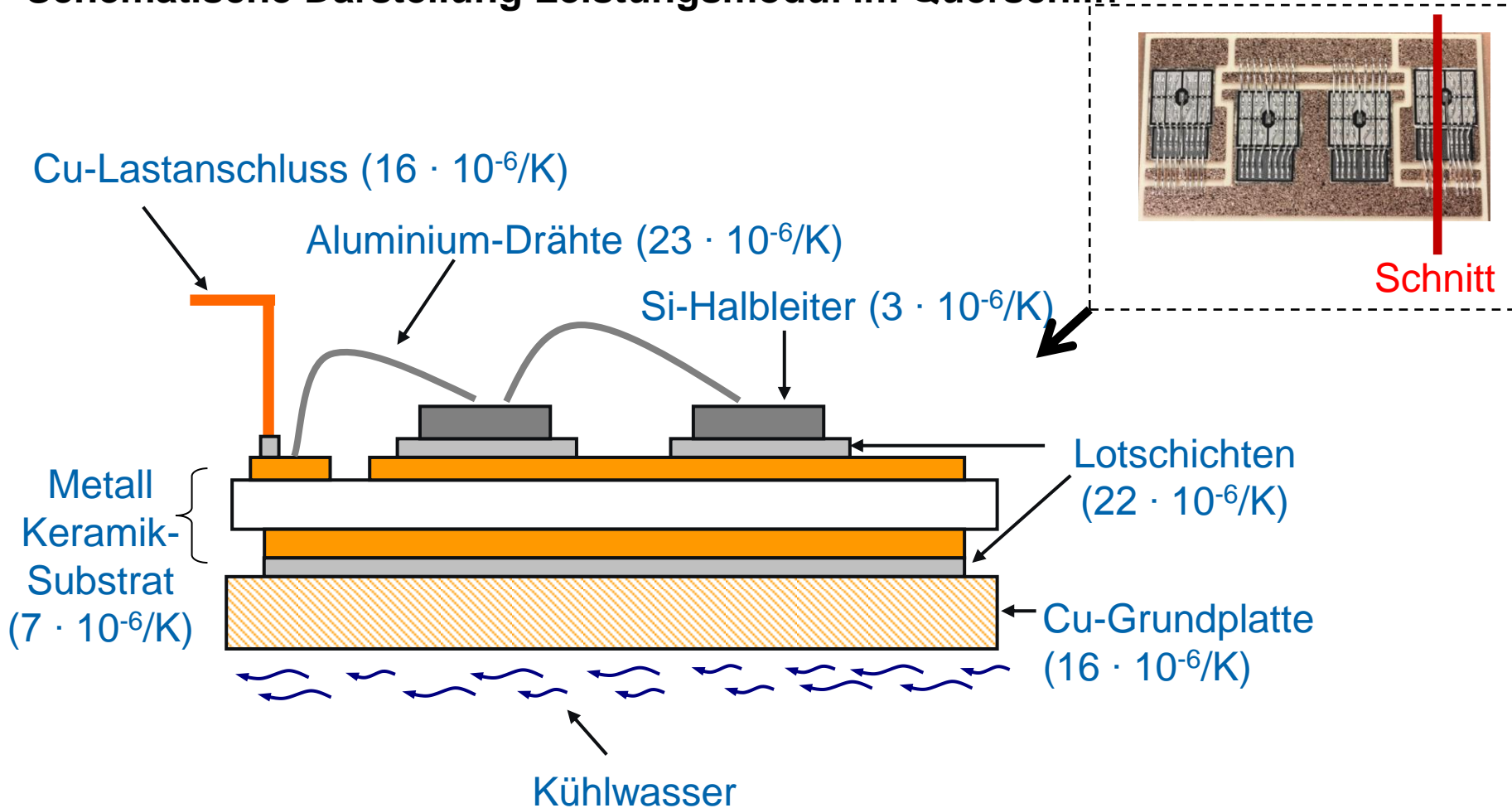
50 kW Elektromotor
(Eigenentwicklung Fraunhofer IISB)

■ Beispiel: Leistungsmodul IISB

- 8 Leistungshalbleiter:
4 Bipolar-Transistoren und
4 Dioden (jeweils 2 parallel)
- Unterseitig gelötet auf
Schaltungsträger
- Ultraschallgeschweißte
Drahtkontaktierung oberseitig

1. Leistungselektronik und deren Aufbaukonzepte

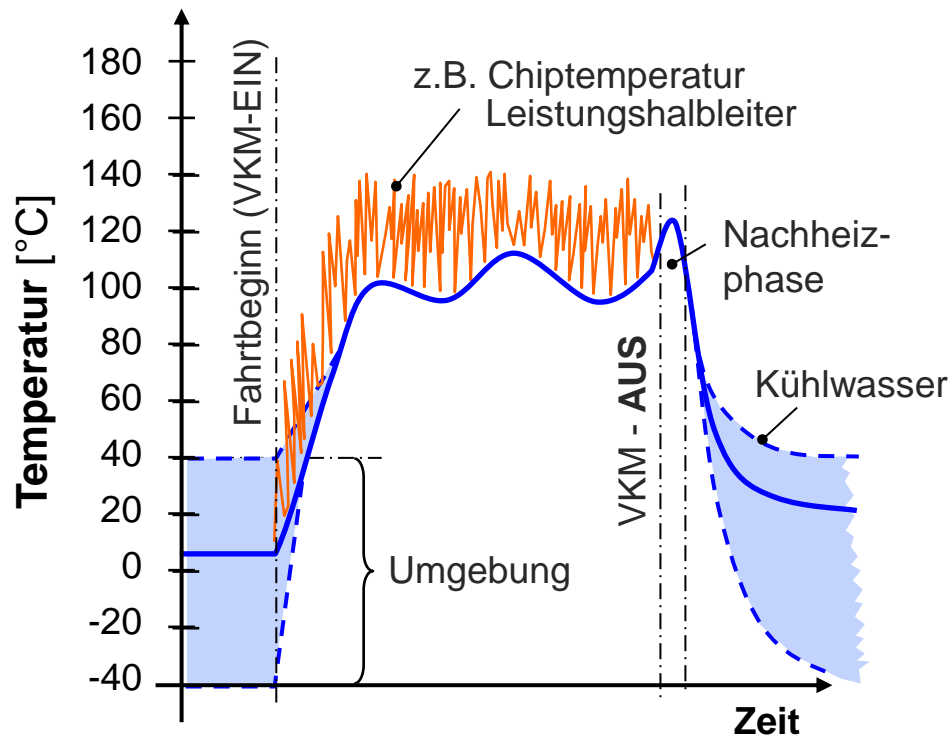
Schematische Darstellung Leistungsmodul im Querschnitt



In Klammern ist der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient mit angegeben

2. Temperaturwechselbelastung im Betrieb

Temperaturprofil einer Leistungselektronik am VKM¹-Kühlkreislauf:



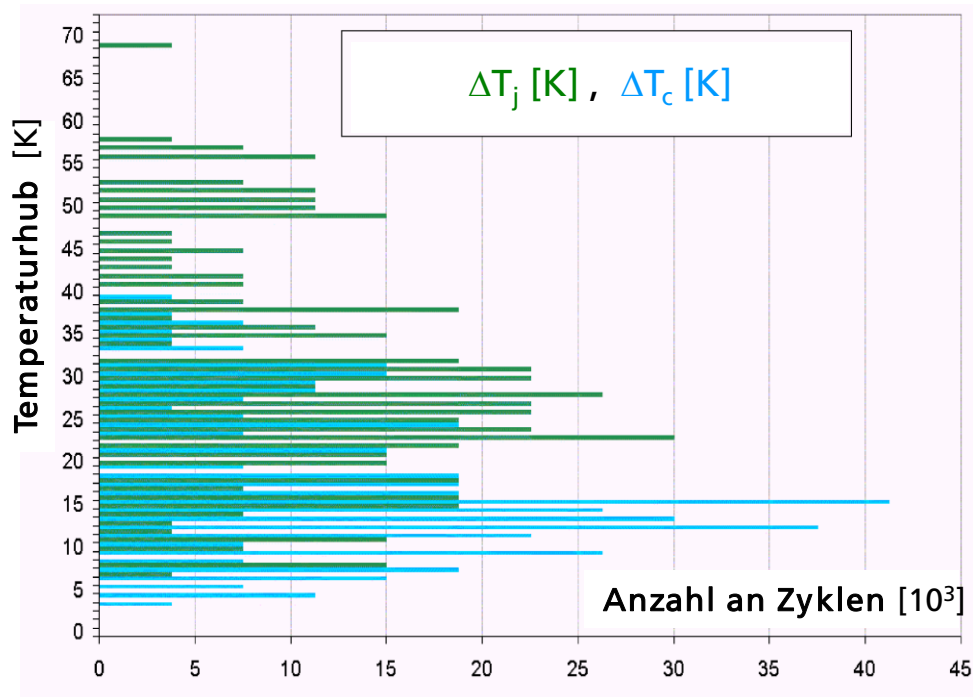
- **Passive Temperaturzyklen (—)**
10k ...15k im Fahrzeugleben mit $\Delta T \approx 100\text{ K}$
- **Aktive Temperaturzyklen (—)**
Leistungshalbleiter typisch 2...3 Mio. Zyklen mit z.B. $\Delta T = 30\text{ K}$ im Fahrzeugleben



¹Verbrennungskraftmaschine

2. Temperaturwechselbelastung im Betrieb

Temperaturverlauf als Histogramm ¹⁾

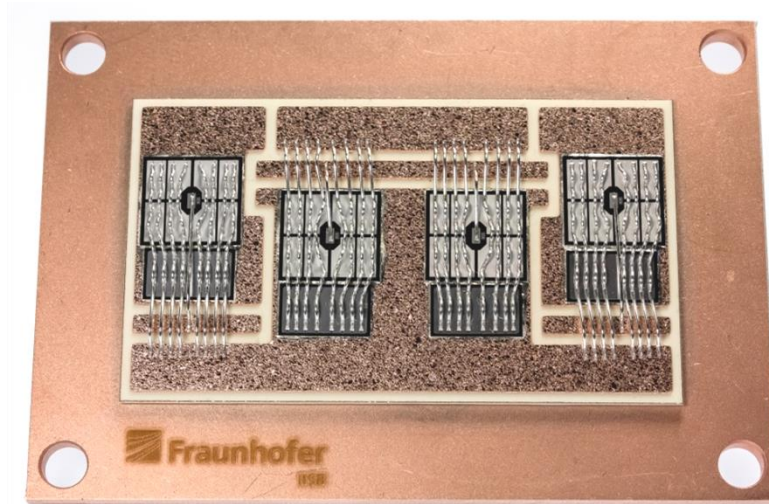


- Zerlegung Temperaturprofil in Klassen (z.B. Rainflow-Algorithmus)
- Auftragung als Histogramm
- Temperaturwechsel der Halbleiter ΔT_j
- Temperaturwechsel des Kühlmittels ΔT_c
- Thermomechanische Spannungen aufgrund unterschiedlicher Wärmedehnung
- Ausfall des Leistungsmoduls

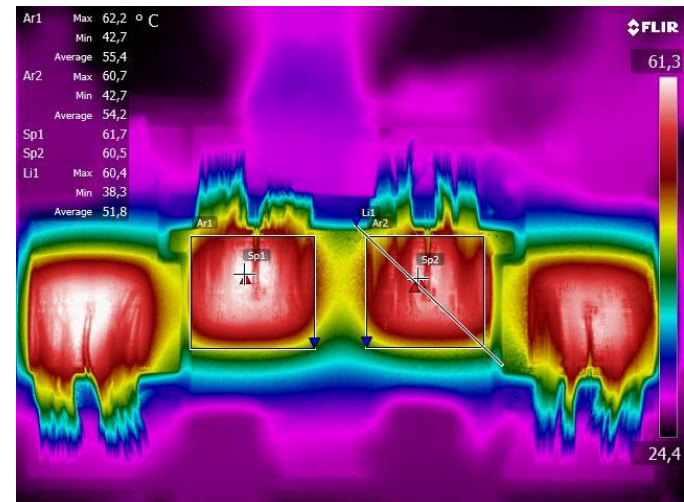
1) Quelle: G.Coquery, et al.: Power module lifetime estimation from chip temperature direct measurement in an automotive traction inverter. Microelectronics Reliability 41 (2001), 1695-1700

3. Aktive Lastwechseltests

- Test der aktiven Temperaturwechsel während der Anwendung
- Heizphase durch Betrieb der Halbleiter (Verlustleistung, DC)
- Kühlphase durch Kühlmedium (Wasser, Luft) und Stromabschaltung
- Festlegung des Temperaturhubs durch Heizstrom und Kühlmitteltemperatur
- Testende wenn Temperaturhub, thermischer/elektrischer Widerstand um mehr als 20% angestiegen ist



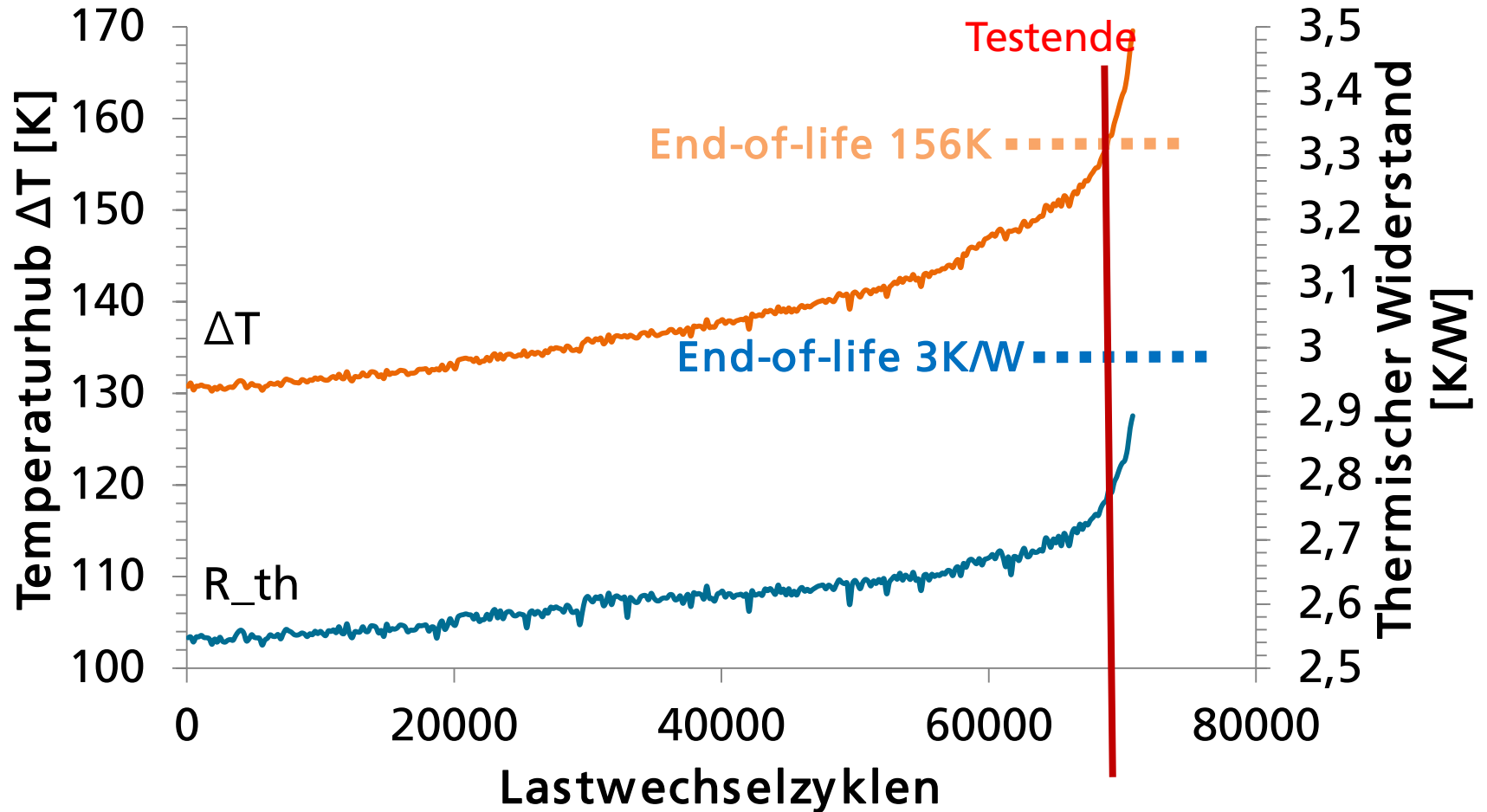
600V/400A Leistungsmodul basierend auf der IGBT3 Technologie
(Eigenentwicklung Fraunhofer IISB)



Thermographiebild des links gezeigten Leistungsmoduls während aktiver Lastwechseltests (nur IGBTs wurden bestromt)

3. Aktive Lastwechseltests: In-situ Messung

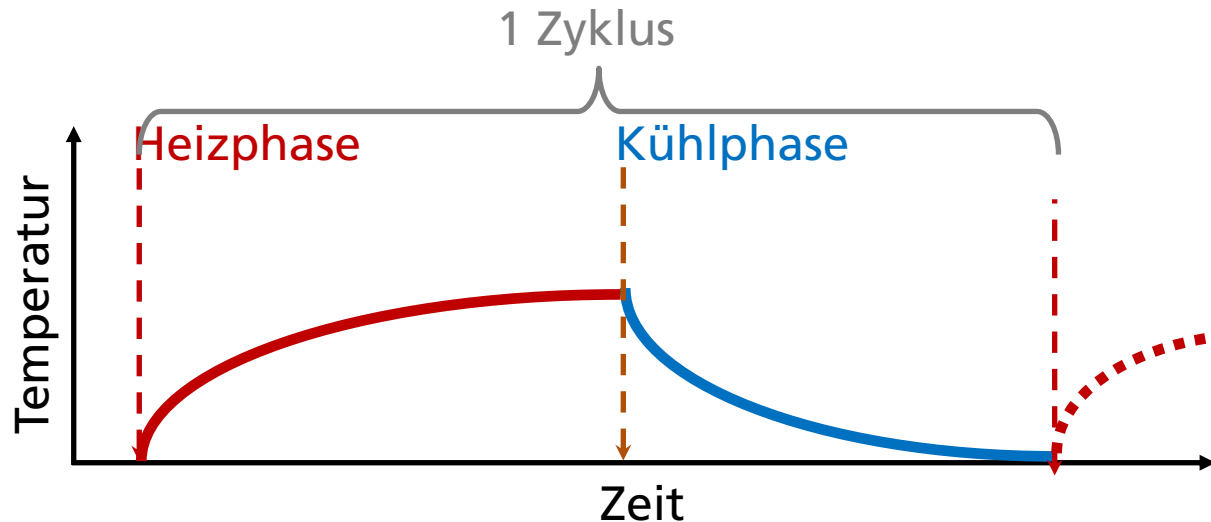
- Testende: 20% Anstieg der Messwerte



Verlauf des Temperaturhub ΔT ($T_{\max} - T_{\min}$) und des thermischen Widerstands ($\Delta T/P_{\text{Verlust}}$) während aktiver Temperaturwechseltests

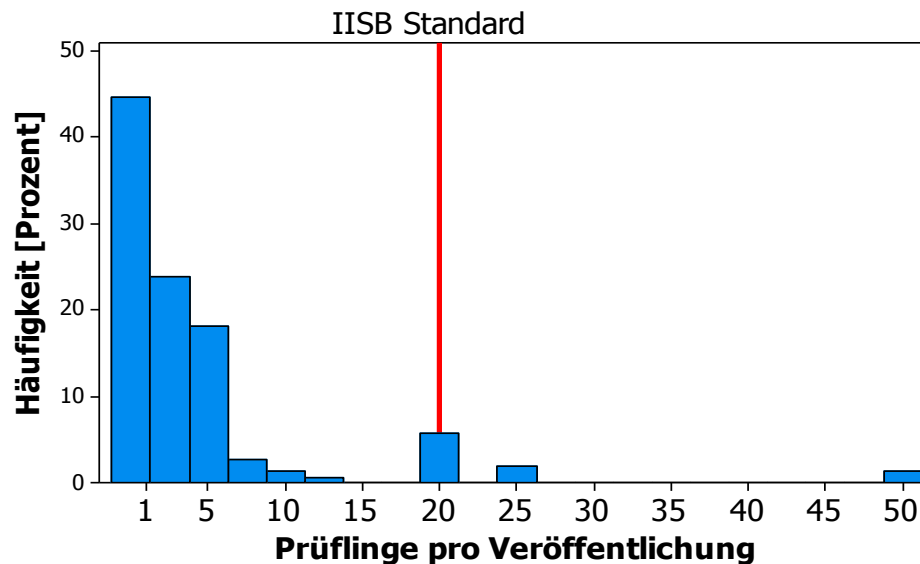
3. Aktive Lastwechseltests

- Unterschied zu passiven Temperaturwechseltests mit 2 Kammer-Systemen
 - Inhomogene Erwärmung/Kühlung der Bauteile
 - Sehr kurze Zykluszeiten von 1...100 Sekunden
 - In-situ Überwachung jedes einzelnen Prüflings zu jedem Zeitpunkt durch elektrische Messung möglich
 - Sehr schnelles (10^{-5} Sekunden) und genaues Temperatur-Messverfahren durch Nutzung der Halbleiter als Sensoren



3. Aktive Lastwechseltests

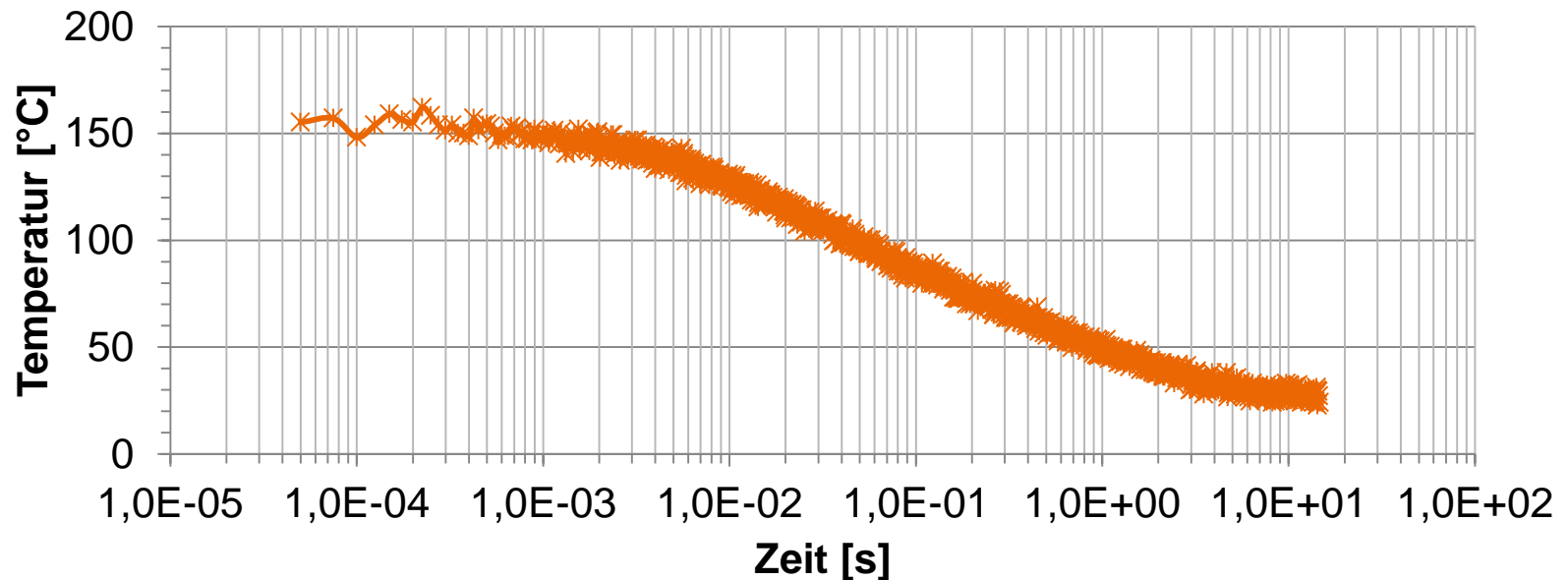
- Probleme bei aktiven Lastwechseltests
 - Begrenzte Prüflingsanzahl¹ (1-20 Prüflinge)
 - Hohe Kosten (ca. 15.000 Euro für 20 Prüflinge) durch Einrichtung, Fachpersonal, Energie und Testzeit
 - Dauer der Tests (Wochen bis Monate)
 - Analyse und Interpretation der Ergebnisse komplex/aufwändig



1) Quelle: Literaturstudie über Lastwechselergebnisse der letzten 20 Jahre. Weitere Infos unter www.iisb.fraunhofer.de/pct

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

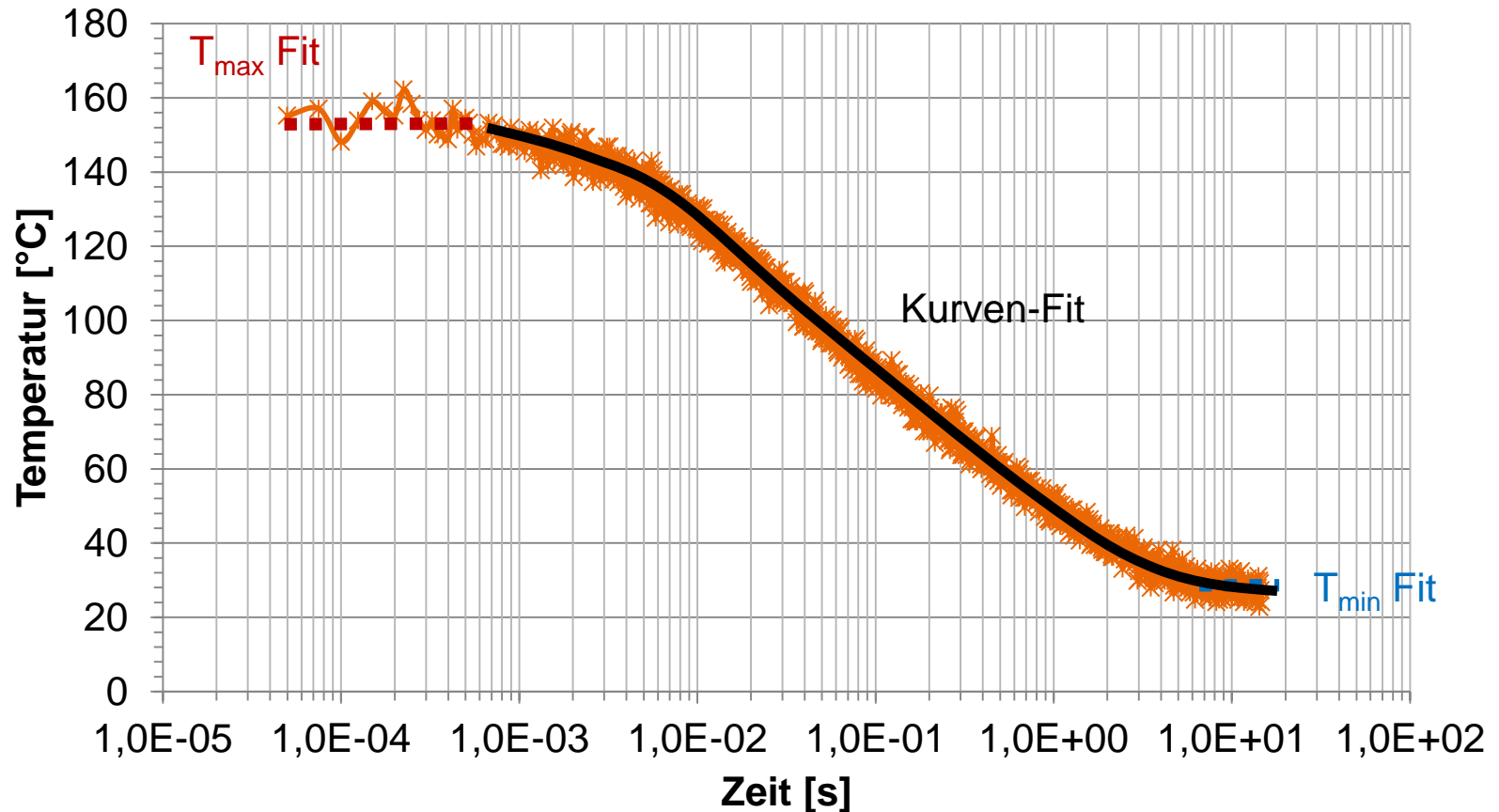
- Messung des thermischen Verhaltens jedes Prüflings in jedem Zyklus
- Parametrisierung eines thermischen Netzwerks durch Fit-Funktion der Abkühlkurve (Foster-Cauer)
- Identifizierung der Ausfallursache
- Verkürzung der Testzeit durch Modellierung und Extrapolation der Ergebnisse



Abkühlverhalten eines Prüflings während eines Lastwechseltests (Kühlmitteltemperatur 25°C)

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

- Parametrisierung eines thermischen Netzwerks durch Fit-Funktion der Abkühlkurve (Foster-Cauer)



Abkühlverhalten eines Prüflings während eines Lastwechseltests (Kühlmitteltemperatur 25°C)

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

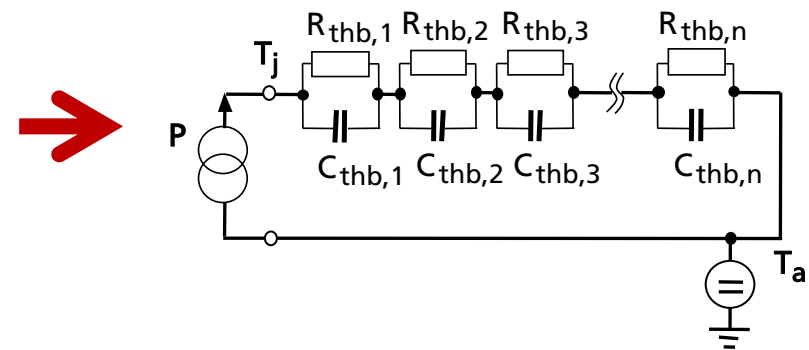
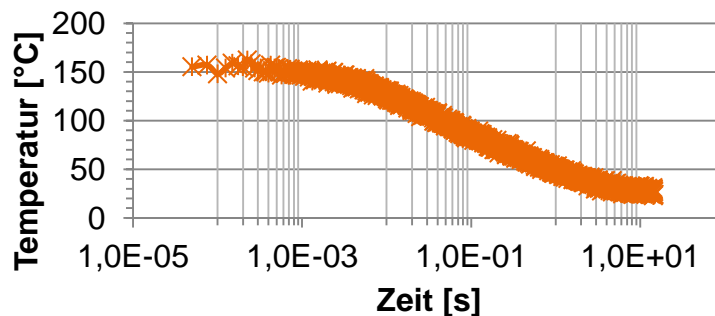
- Parametrisierung eines thermischen Netzwerks durch Fit-Funktion der Abkühlkurve (Foster-Cauer)
 - Kirchhoff stellte bereits 1845 fest:
Zwei verschiedene Energieformen laufen gleichartig ab, wenn die grundlegenden sie beschreibenden Differentialgleichungen gleiche Form haben und die Rand- und Grenzbedingungen übereinstimmen.
 - Korrespondierende physikalische Größen

Thermisch		↔	Elektrisch	
Temperatur T	in [K]		Spannung U	in [V]
Wärmestrom P	in [W]		Strom I	in [A]
Wärmewiderstand R_{th}	in [K/W]		Ohm. Widerstand R	in [V/A]
Wärmekapazität C_{th}	in [Ws/K]		Kapazität C	in [As/V]

Quelle: Prof. Martin März: Thermisches Management in der Leistungselektronik, Fraunhofer IISB 2014

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

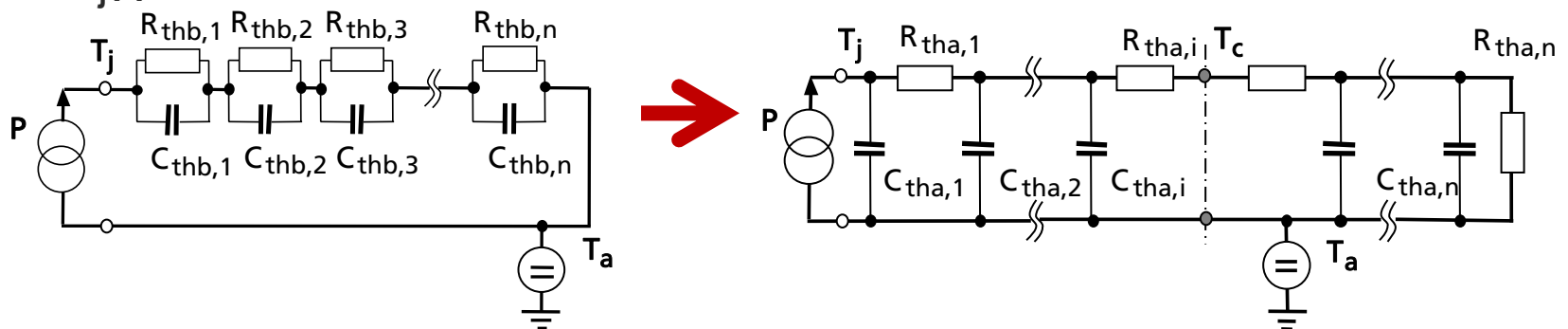
- Partialbruch-Netzwerk (Foster)
 - Keinerlei Korrelation zwischen den $R_{th,n}$ bzw. $C_{th,n}$ und der physikalischen Struktur
 - Innere Knoten ohne physikalische Bedeutung
 - Jede Änderung im System erfordert die Neuparametrisierung aller Elemente des Netzwerks
 - Sehr einfach anzuwenden, da der Z_{th} als geschlossener Ausdruck angebar ist
 - Einfach aus Aufheiz- oder Abkühlkurven zu parametrisieren



Quelle: Prof. Martin März: Thermisches Management in der Leistungselektronik, Fraunhofer IISB 2014

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

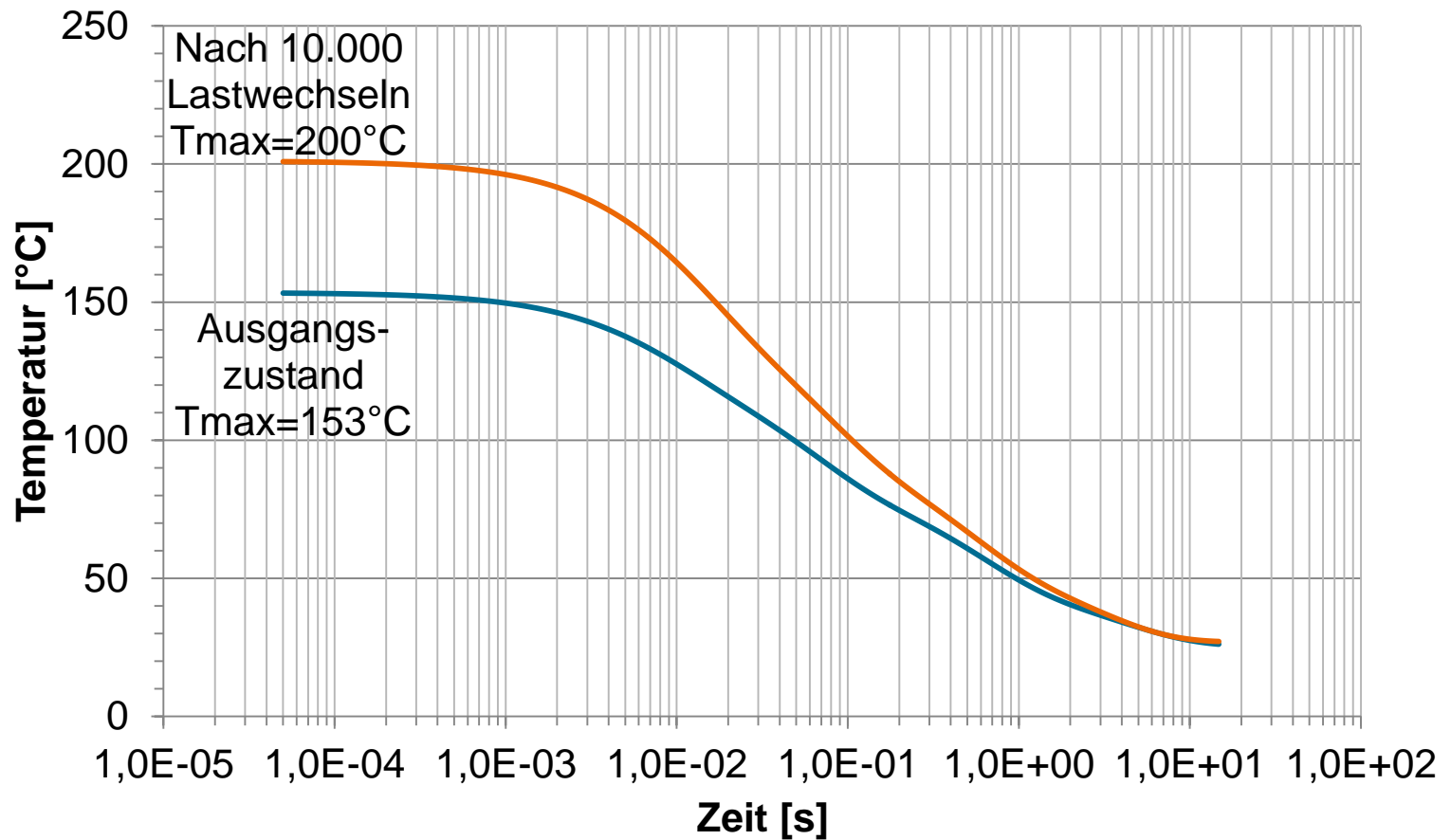
- Leitungs-Ersatzschaltbild (Cauer)
 - Physikalisch basiertes thermisches Ersatznetzwerk
 - R_{th} und C_{th} Elemente korrespondieren zu Strukturelementen und können direkt auf der Basis von Materialparametern ermittelt werden
 - Wohl definierte thermische Knoten ermöglichen:
 - Abschnittsweise Parametrisierung des Netzwerks
 - Zugriff auf „innere“ Temperaturen
- **Bei korrekter Parametrisierung liefern beide Netzwerke gleiche Verläufe für $T_j(t)$**



Quelle: Prof. Martin März: Thermisches Management in der Leistungselektronik, Fraunhofer IISB 2014

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

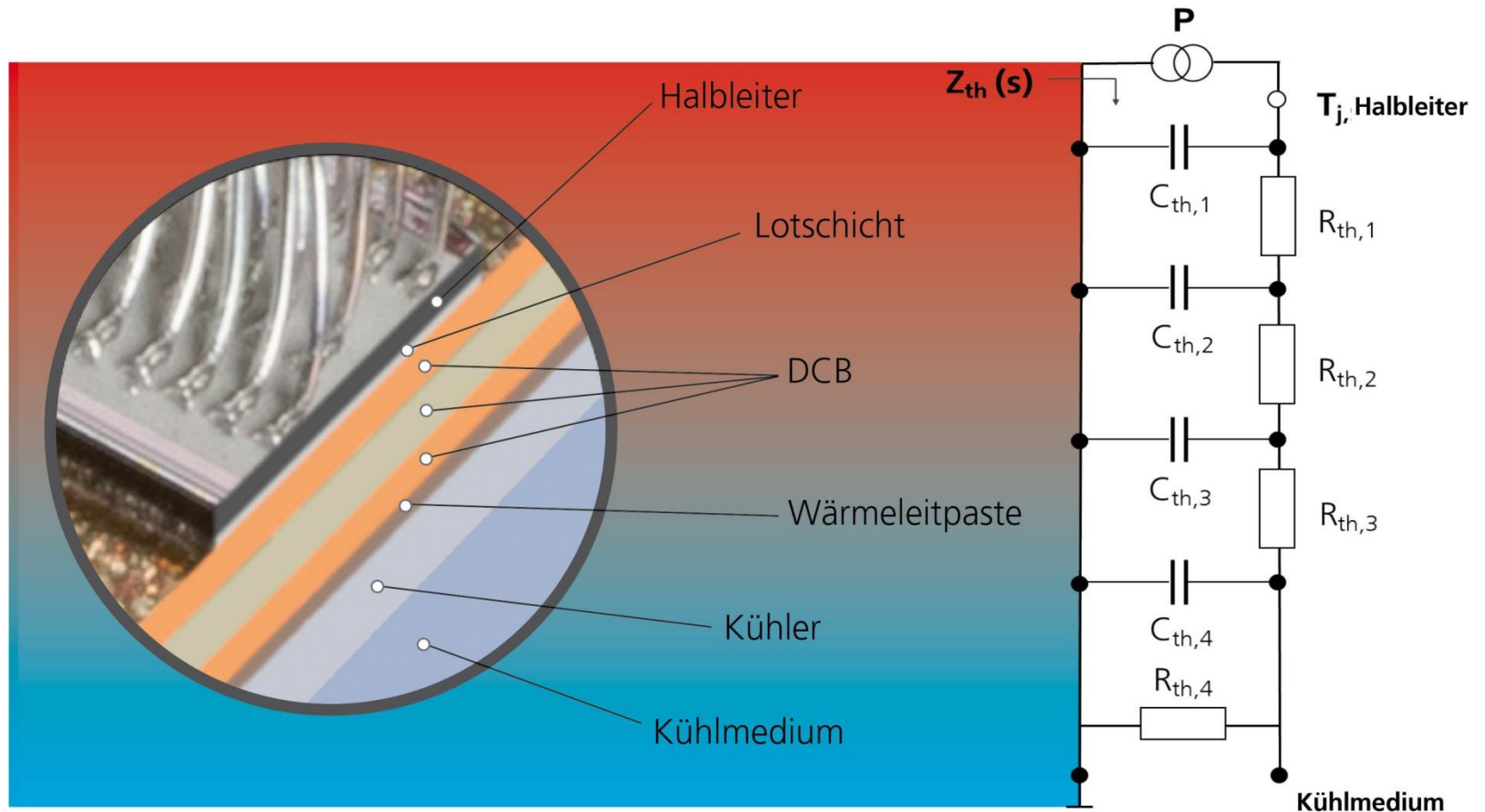
- Temperaturmessung vor und nach dem Test



Abkühlverhalten zweier Prüflinge während aktiver Lastwechselfests (Kühlmitteltemperatur 25°C)

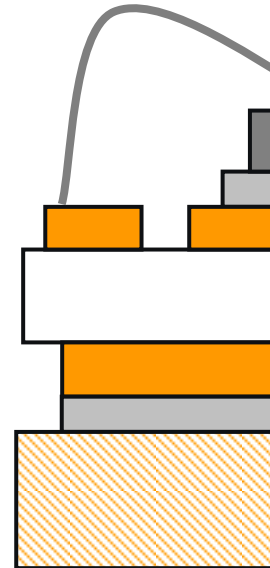
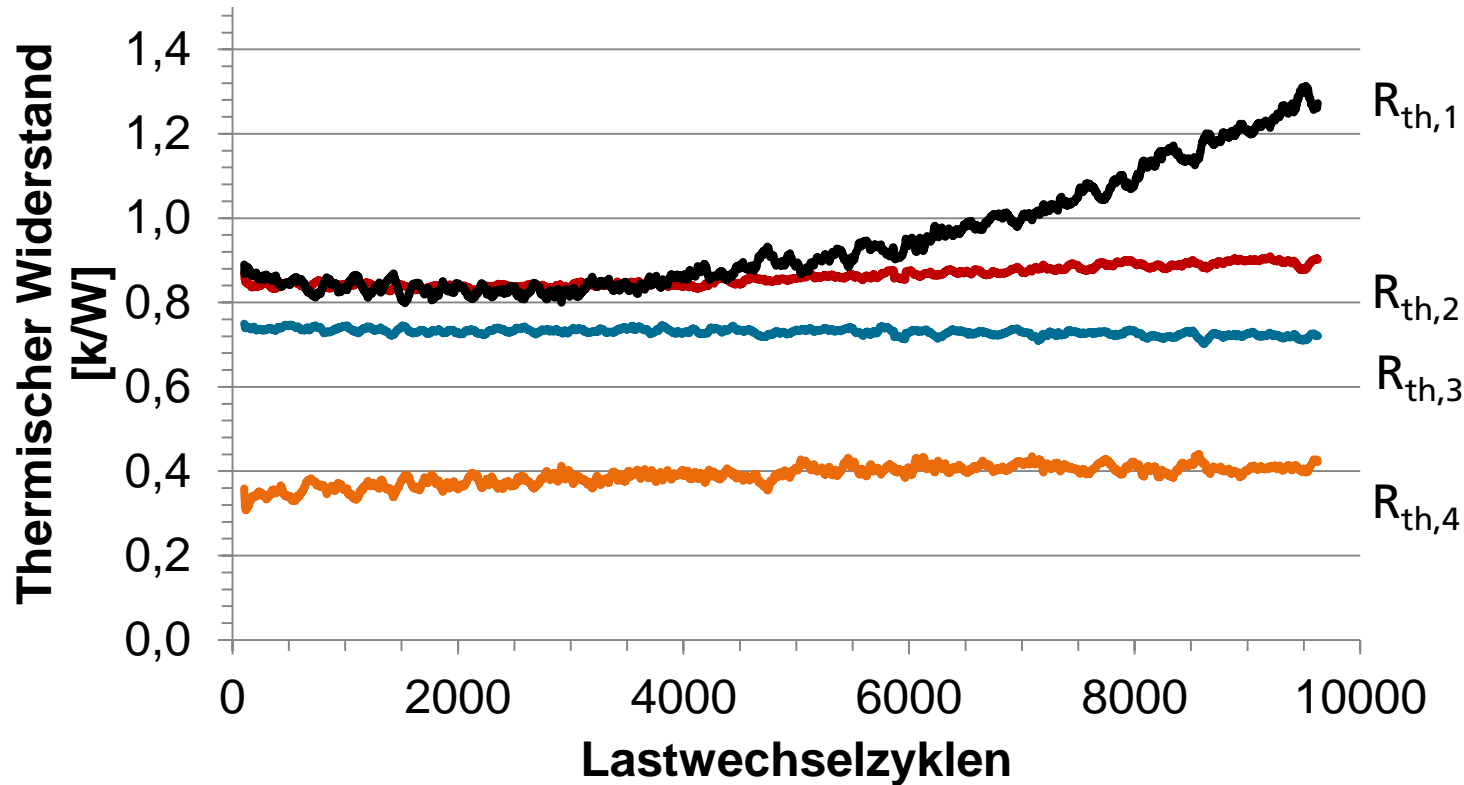
4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

- Parametrierung eines thermischen Netzwerks durch Fit-Funktion der Abkühlkurve (Cauer)



4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

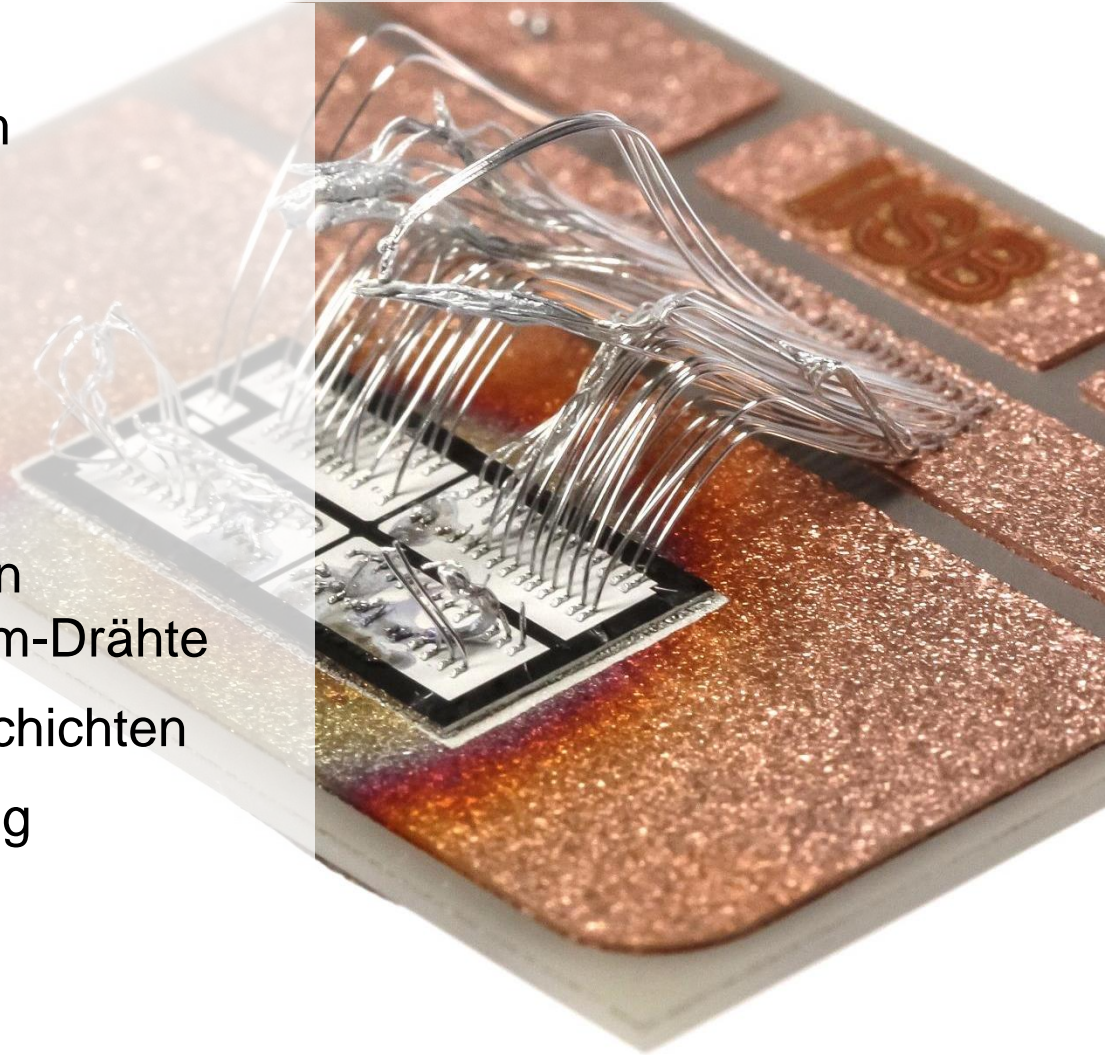
- Mit Cauer-Netzwerk: Annäherung der einzelnen R_{th} und C_{th} zu einzelnen Schichten (Halbleiter-nah bzw. fern) möglich



Verlauf der berechneten Cauer- R_{th} s eines Prüflings bei aktiven Lastwechseltests

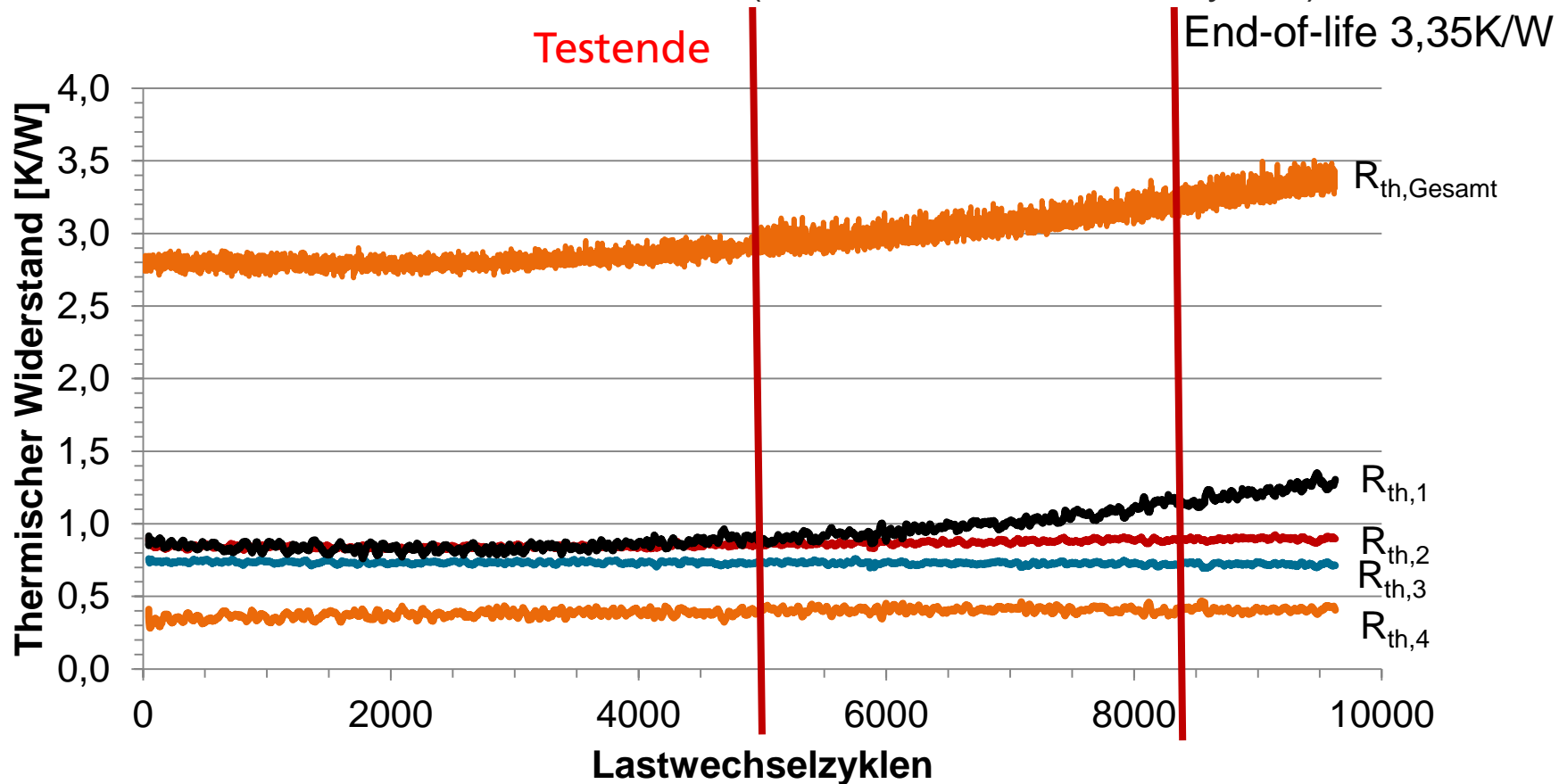
4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

- Problem 20% EOL-Kriterium
 - Lange Testzeit
 - Hohe Kosten
 - Proben stark geschädigt
 - Thermal Run-away
 - Teilweise Aufschmelzen Lotwerkstoffe/Aluminium-Drähte
 - Zerstörung einzelner Schichten
 - Ausfallanalyse schwierig



4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

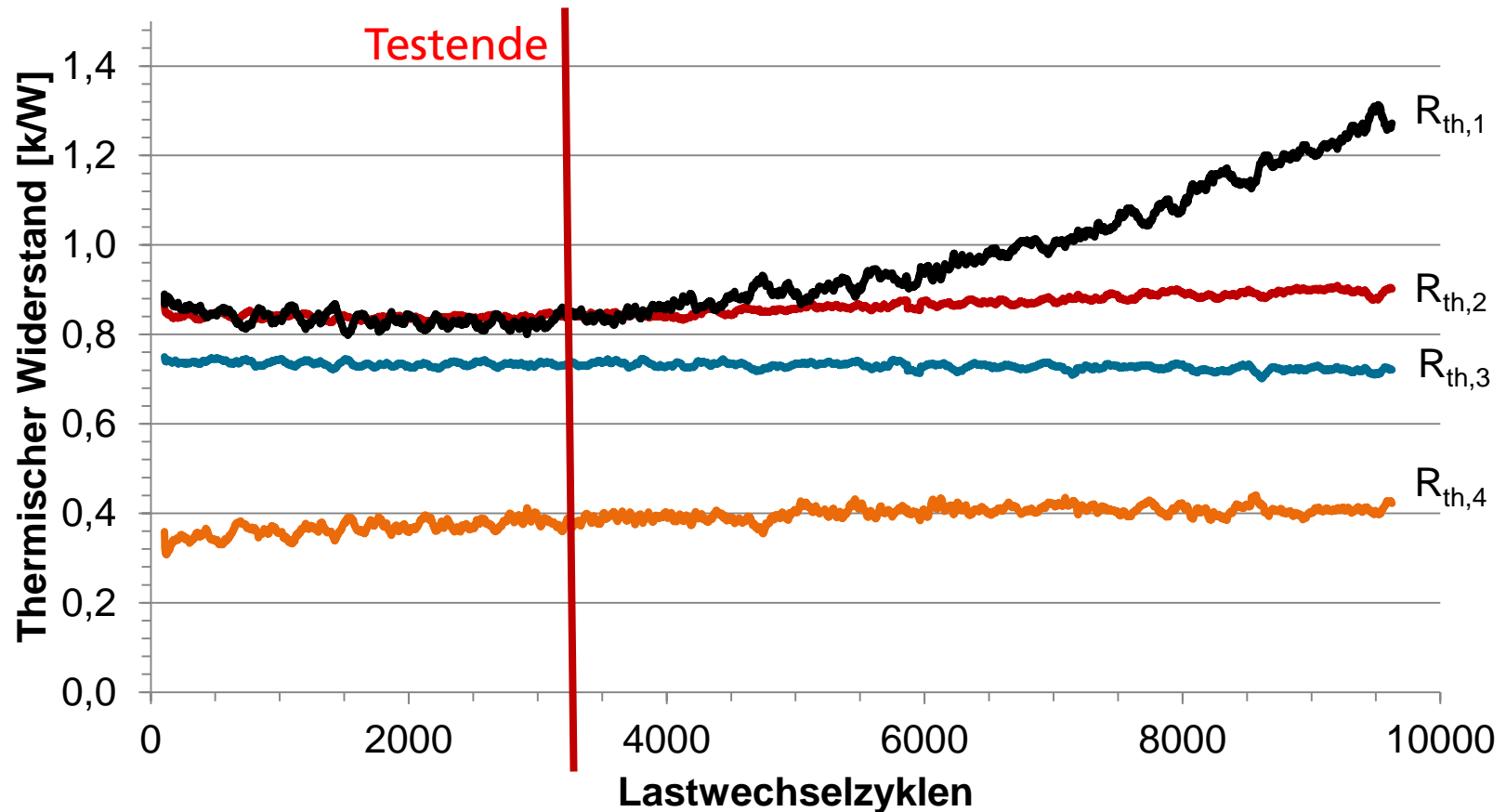
- Abbruch des Tests nach 5% $R_{th,Gesamt}$ Anstieg
- Testende nach ca. 5000 Lastwechseln (End-of-life nach 8400 Zyklen)



Verlauf der berechneten Cauer- $R_{th,s}$ eines Prüflings bei aktiven Lastwechselfests

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

- Abbruch des Tests nach 5% $R_{th,1}$ Anstieg, Extrapolation der Ergebnisse
- Testende nach ca. 3300 Lastwechseln (End-of-life nach 8400 Zyklen)



Verlauf der berechneten Cauer- $R_{th,s}$ eines Prüflings bei aktiven Lastwechseltests

4. Verkürzung der Testzeit durch Modellierung

- Erster signifikanter Anstieg eines berechneten thermischen Widerstands kann als Testende verwendet werden (z.B. 5% Anstieg)
- Durch Identifikation der voraussichtlichen Ausfallursache (Lage des R_{th} Anstiegs) kann ein entsprechendes Modell herangezogen werden
 - Beispiel Folie 21: $R_{th,1}$ ist einem halbleiter-nahen Defekt zuordenbar: z.B. Lotschicht/Halbleitermetallisierungen
 - Verwendung des vorher ermittelten Lebensdauermodells (z.B. über Exponentialgesetz)
 - Extrapolation auf 20% R_{th} Anstieg für Vergleichbarkeit (z.B. mit Literaturwerten)
 - Gezielte Ausfallanalyse der zu erwartenden Ausfallursache (z.B. Querschliff der Lotschicht)

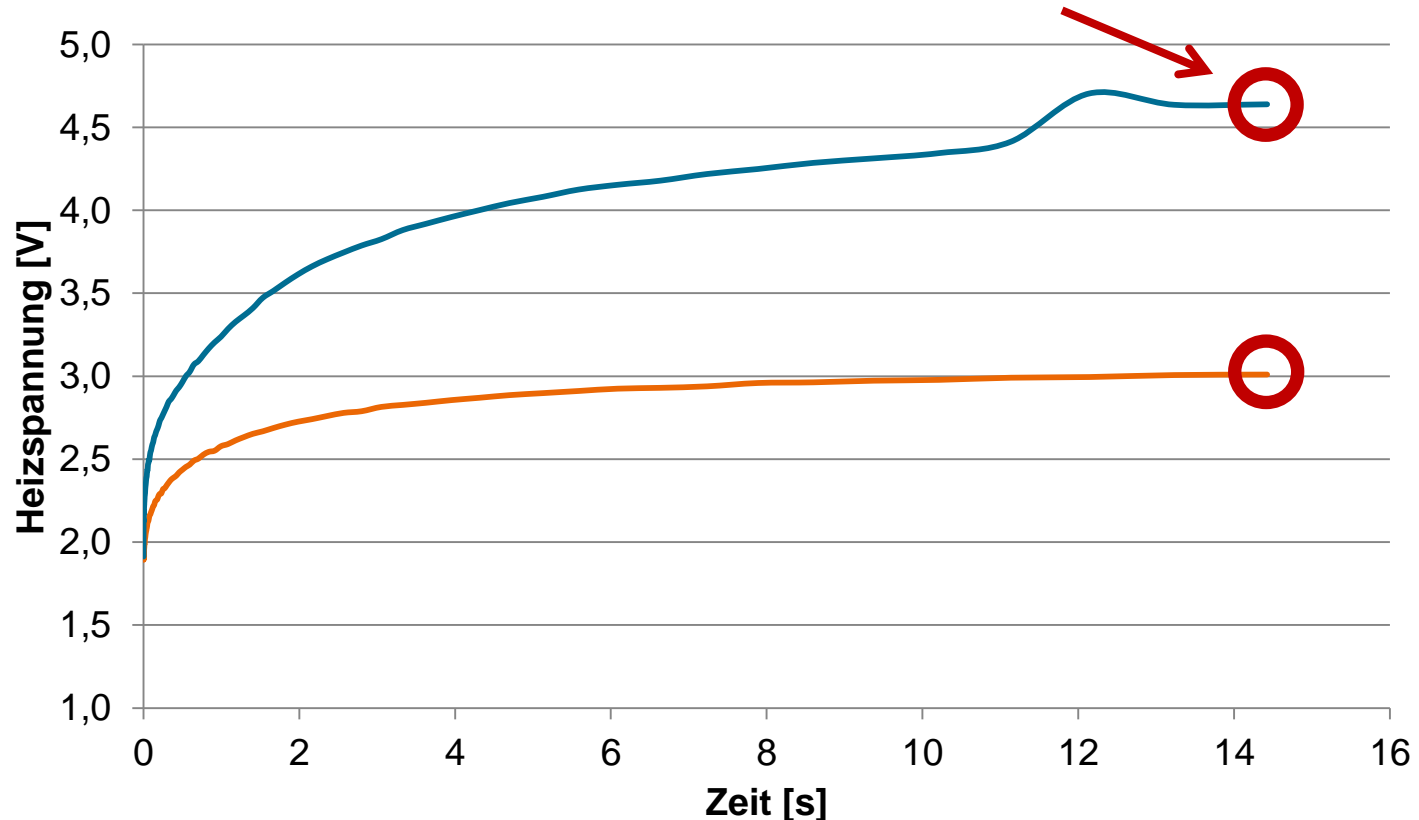
5. Weitere Fehleranalyse durch elektrisches Verhalten

- Abkühlverhalten bzw. thermische Impedanz: Bereich Halbleiter bis Kühlwasser
- Aufheizverhalten: Spannungsmessung am Halbleiter unter Laststrom
- Fehleranalyse zwischen Stromquelle und Halbleiter, z.B.
 - Bonddrähte (thermo-mechanische Ermüdung, Herstellungsfehler)
 - Lastanschlüsse bzw. deren Lotverbindung am Schaltungsträger (thermo-mechanische Ermüdung, mechanische Belastung, Vibration, Herstellungsfehler)
 - Schaltungsträger (thermo-mechanische Ermüdung, Elektromigration, Korrosion, Zulieferqualität)
 - Schraubverbindungen/Stecker/etc. (mechanische Belastung, Vibration, Montagefehler)
- **Problem: Zuordnung sehr schwierig, jedoch Fehlerbereich bekannt und leicht einschränkbar!**

5. Weitere Fehleranalyse durch elektrisches Verhalten

■ Analyse Aufheizverhalten

- Konventionell: Spannungsmessung nur am Ende der Heizphase

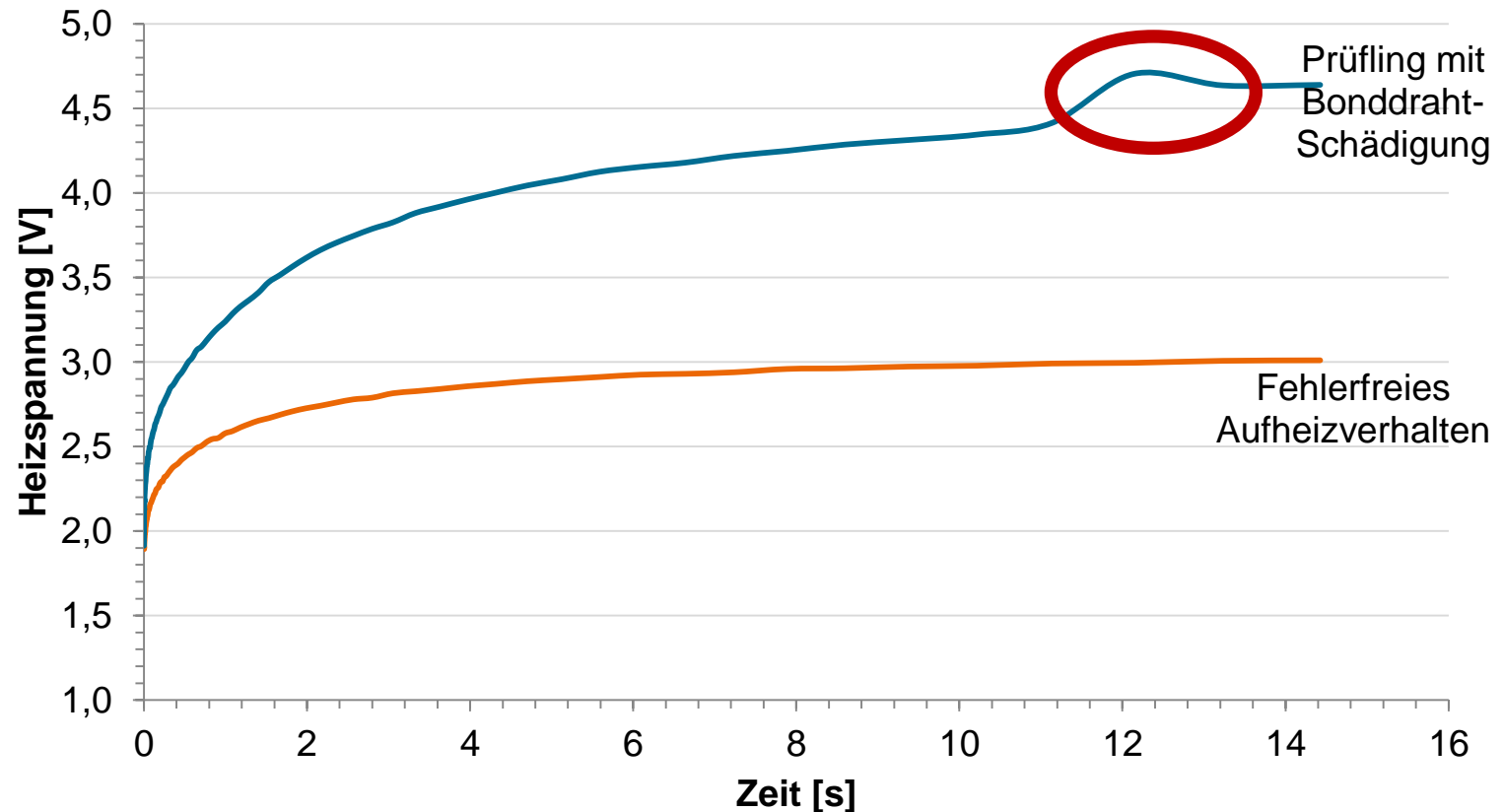


Spannung während der Heizstrom-Phase bei aktiven Lastwechselltests eines geschädigten und unbeschädigten Prüflings

5. Weitere Fehleranalyse durch elektrisches Verhalten

■ Analyse Aufheizverhalten

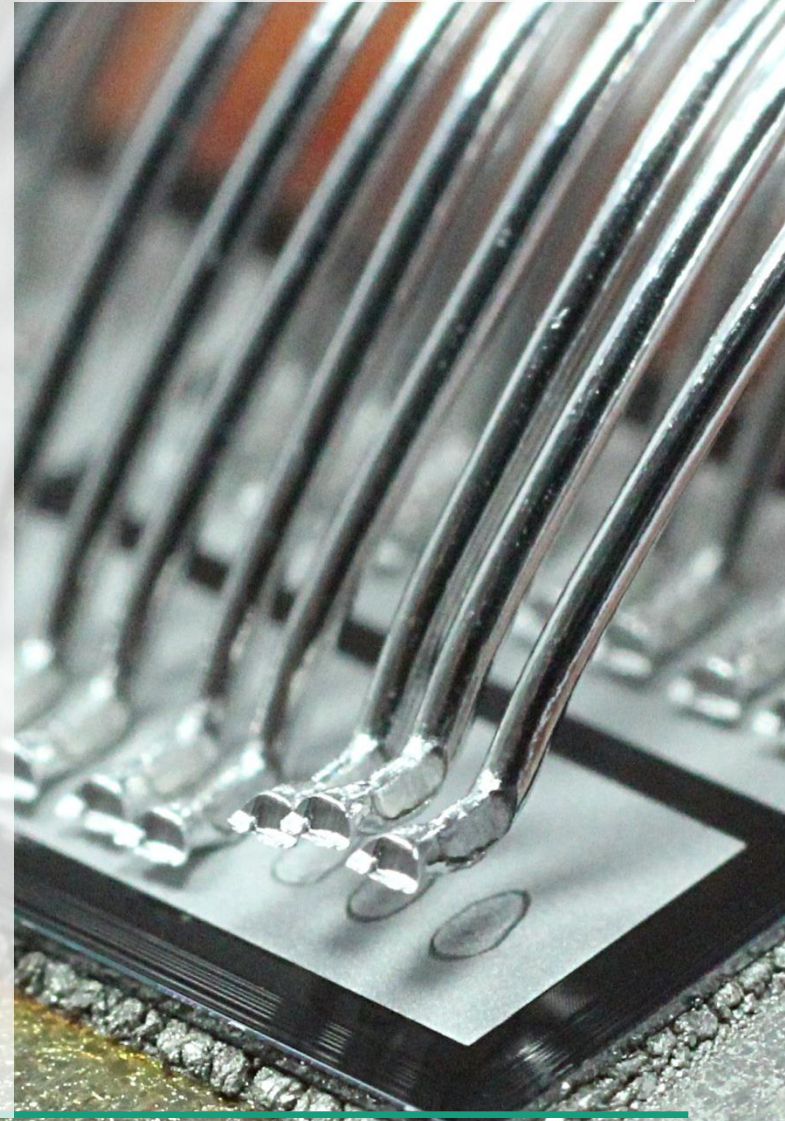
- Zusatz-Information: Analyse des Aufheizverhaltens und frühzeitige Erkennung von Fehlern



Spannung während der Heizstrom-Phase bei aktiven Lastwechselltests eines geschädigten und unbeschädigten Prüflings

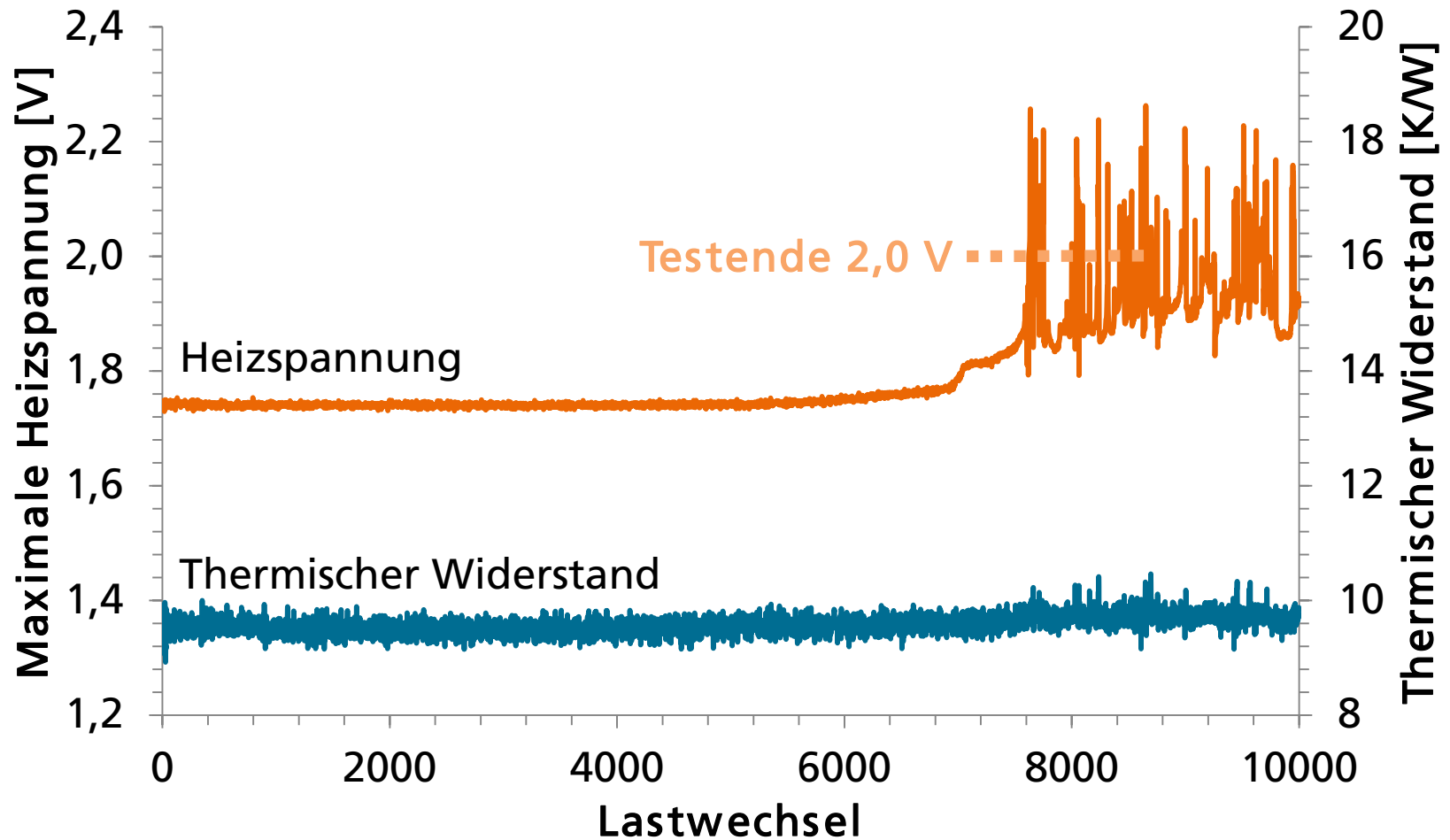
5. Weitere Fehleranalyse durch elektrisches Verhalten

- Schlagartiger Anstieg der Heizspannung
 - Bonddraht löst sich vom Halbleiter
 - Laststrom wird auf übrige Drähte verteilt
 - Anstieg des elektrischen Widerstands
 - Durch erhöhten elektrischen Widerstand
 - Temperaturanstieg
 - Erhöhung der thermo-mechanischen Belastung der übrigen Bonddrähte
 - Thermal Run-away
 - Aufschmelzen der Bonddrähte
 - Durch frühzeitiges Erkennen
 - Kein Aufschmelzen der Bonddrähte
 - Einsparung Testzeit



5. Weitere Fehleranalyse durch elektrisches Verhalten

- Beispiel: Ablösen der Bonddrähte führt zu instabiler Heizspannung



6. Zusammenfassung

- Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanalyse von Leistungselektronik durch
 - Thermische Impedanzmessungen zur Erkennung von Materialermüdung zwischen Halbleiter und Kühler
 - Analyse der Aufheizkurven für Fehlerdiagnose zwischen Stromquelle und Halbleiter
- Frühzeitige Identifikation der Ausfallursache und des Ausfallorts durch thermische Impedanzmessungen möglich
- Gezielte Ausfallanalyse möglich durch
 - Zerstörungsfreie Methoden (Ultraschallmikroskopie, Röntgen)
 - Zerstörende Methoden (Querschliffe, Lichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie, Focused-Ion-Beam)
- Frühzeitige Detektierung von Materialermüdung bzw. Einbau-Fehlern durch Aufheizkurven möglich

7. Ausblick

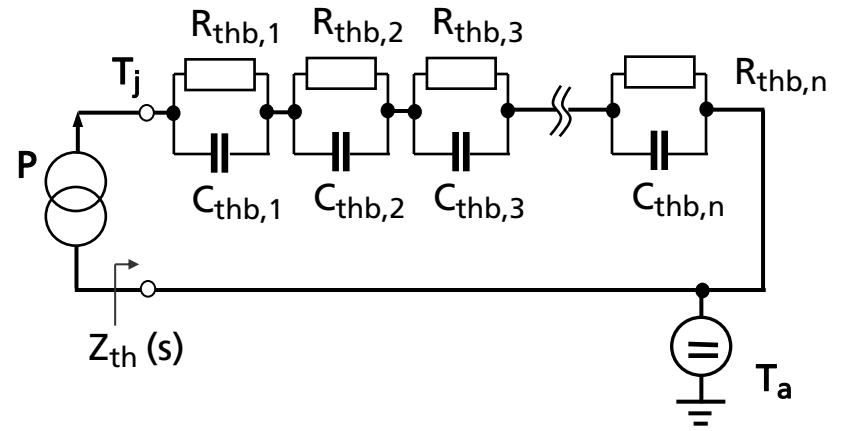
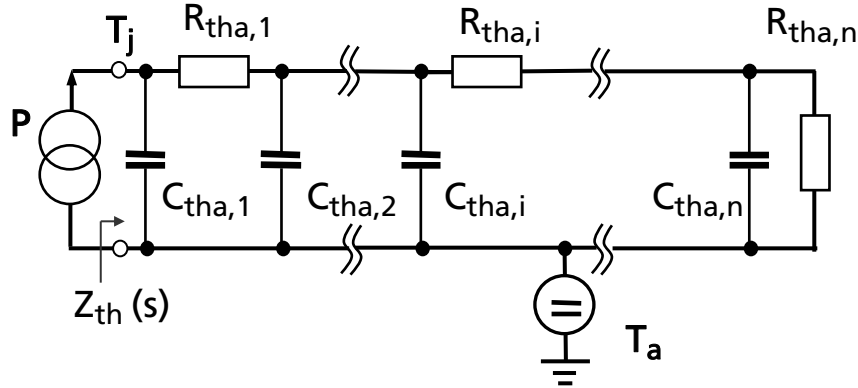
- Implementierung der Methodik in den Fahrzeugbetrieb
 - Ermittlung der Aufheiz- bzw. Abkühlkurven nach Montage/Burn-In des mechatronischen Systems und Bestimmung der Foster-Cauer-Netzwerke im Auslieferungszustand
 - Erkennung von Montagefehlern bzw. Bauteilfehlern
 - Bewertung der Montage- und Zulieferer-Qualität
 - Durch Ansteuerelektronik im Fahrzeug wird nach jeder Fahrt das Aufheiz- bzw. Abkühlverhalten gemessen und ausgewertet
 - Frühzeitiges Erkennung von drohenden Ausfällen
 - Frühwarnsystem für Kunden
 - Leichtes Erkennen von defekten Teilen
 - Automatische Erhebung von Lebensdauerdaten während des Betriebs

Lifetime analysis remains hot!

Aaron.Hutzler@iisb.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB
Landgrabenstraße 94 • 90443 Nürnberg • Telefon +49-911-23568-25
www.iisb.fraunhofer.de

Anhang: Zusatzinformationen zu Foster-Cauer Netzwerk



Leitungs-Ersatzschaltbild

Partialbruch-Netzwerk

Übertragungsfunktion

$$Z_{th}(s) = \frac{1}{sC_{tha,1} + \frac{1}{R_{tha,1} + \frac{1}{sC_{tha,2} + \dots + \frac{1}{R_{tha,n}}}}}$$

$$Z_{th}(s) \cdot s^{-1}$$



$$Z_{th}(s) = \frac{1}{sC_{thb,1} + \frac{1}{R_{thb,1}}} + \dots + \frac{1}{sC_{thb,n} + \frac{1}{R_{thb,n}}}$$

Nicht geschlossen angebbar! Sprungantwort

$$Z_{th}(t) = \sum_{v=1}^n R_{thb,v} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{thb,v} C_{thb,v}}} \right)$$

Quelle: Prof. Martin März: Thermisches Management in der Leistungselektronik, Fraunhofer IISB 2014