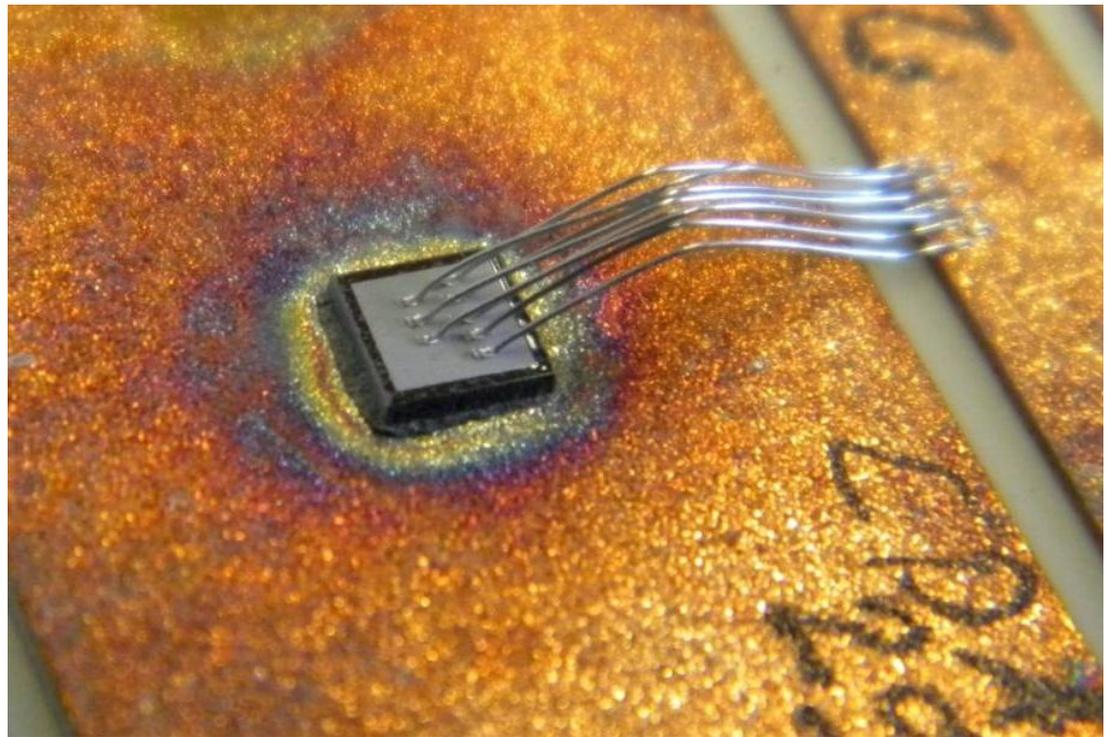

Aktive Temperaturwechsel

Test und Interpretation

Andreas Schletz

Leistungselektronik -
Fraunhofer Innovationscluster
21.05.2012



Inhalt

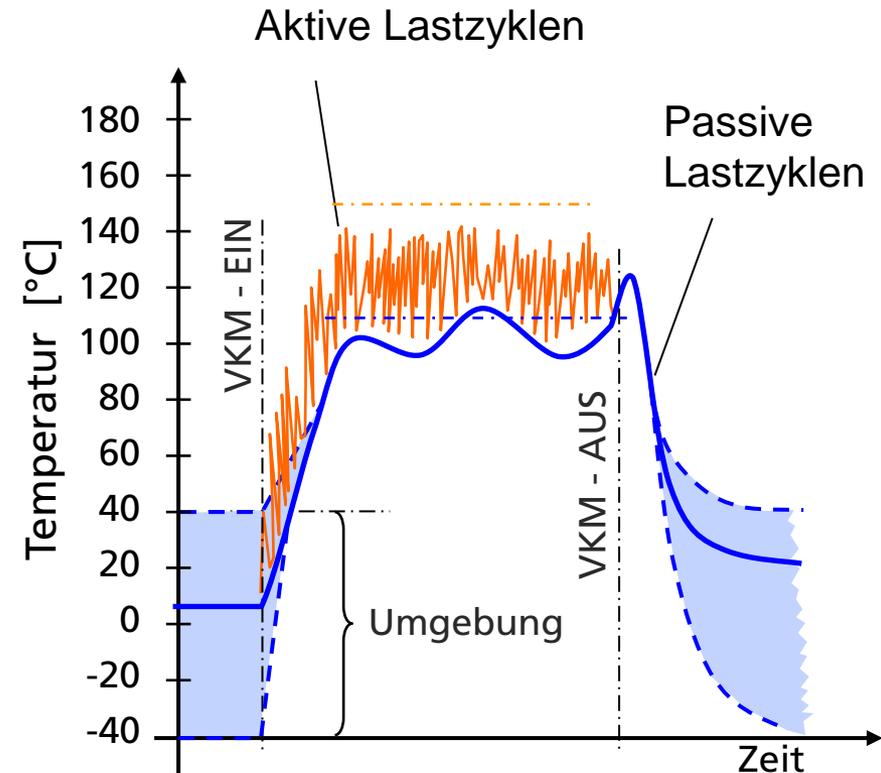
- Zuverlässigkeit und Anforderungen
- Lebensdauer und Ausfallmechanismen
- Messen der Halbleitertemperatur
- Aktive Temperaturwechsel – Konzept
- Ablauf der Messung
- Interpretation der Messkurven
- Statistische Auswertung der Tests

Aktive Temperaturwechsel, Failure Cause

Beispiel Automobilelektronik:

Typisches Anforderungsprofil PKW

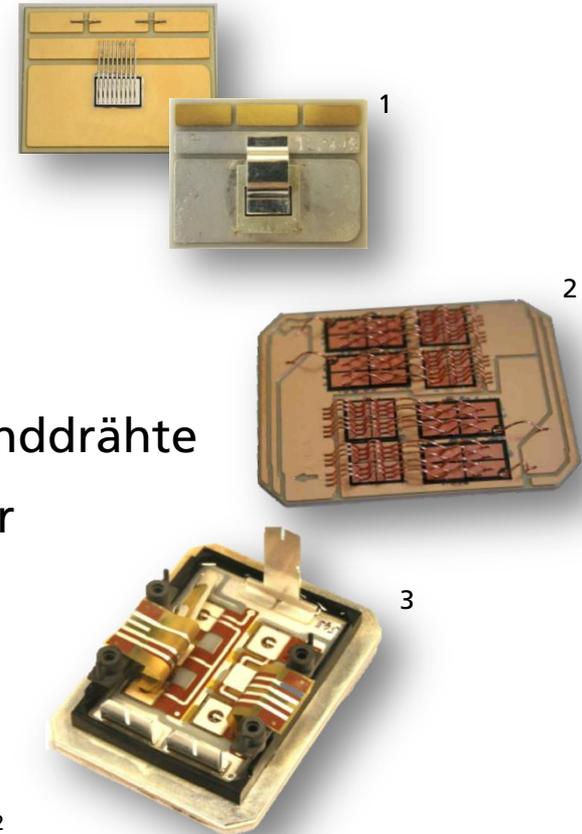
Bezeichnung	Anforderung	Einheit
Lebensdauer	15	a
Betriebsdauer	8.000	h
Fahrstrecke	300.000	km
Passive Temperaturzyklen	10.000	#
Aktive Temperaturzyklen	3...10 Mio.	#
Zuverlässigkeit	Hersteller-spezifisch	a



Definition: TW durch eigene Erwärmung durch eigene Verlustleistung

PCT: Einfluß auf die Lebensdauer: Aufbkkonzepte/ Technologien (Failure Cause)

- Indirekte/ direkte Bodenplattenkühlung
- Indirekte/ direkte Isoliersubstratkühlung
- Stand der Technik: SnAgCu Lote + Al – Bonddraht
- Ag-Sintern + Cu Bonddraht mit Al Mantel
- .XT Technologie: Diffusionslötten (Cu, Zn) + Cu – Bonddrähte
- Skin-Technologie: Ag-Sintern + Ag-Sintern Flexleiter
- IISB: Ag-Sintern + Ag Sintern Bändchen
- Und viele Andere...



1) Kraft, S. et al. "Reliability of Silver Sintering on DBC and DBA Substrates for Power Electronic Applications", CIPS, 2012

2) Guth, K. et.al. "New assembly and interconnects beyond sintering methods", PCIM, 2010

3) Beckedahl, P. et. al. "Performance comparison of traditional packaging technologies to a novel bond wire less all sintered power module, PCIM", 2011

PCT: Einfluss auf die Lebensdauer (Failure Cause)

Test-Parameter

■ CIPS2008-Modell

$$N_f := K \cdot \Delta T_J^{\beta_1} \cdot e^{\frac{\beta_2}{T_J + 273}} \cdot t_{on}^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4} \cdot V^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6} \quad (1)$$

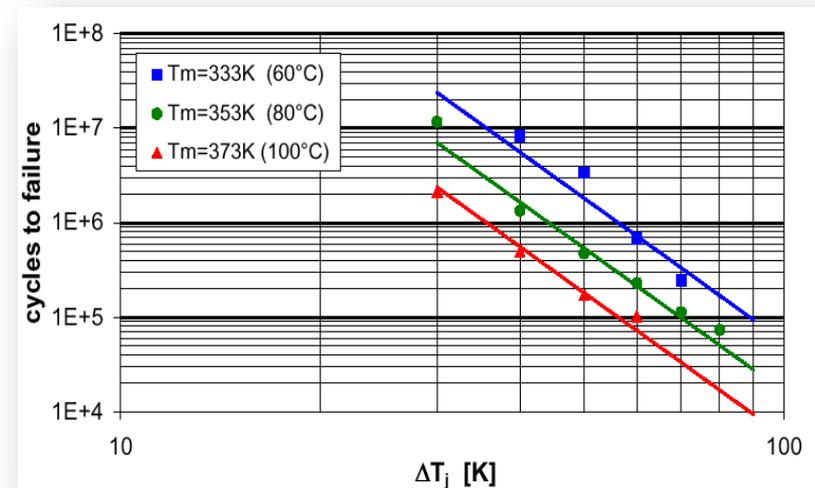
mit T_J : Maximale Sperrschichttemperatur, I : Strom pro Bonddraht,
 T_{on} : Heizzeit, V : Sperrspannung des Halbleiters, D : Durchmesser des Bonddrahts)

■ LESIT:

Einfluss der mittleren Temperatur T_m (2)

■ Weitere:

Verlauf der Heizleistung
(=Temperaturgradient),
 t_{off} , Art der Kühlung,
Gate-Spannung, Test-Strategie



1) Bayerer, R et. al. "Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules – various factors influencing lifetime", CIPS 2008

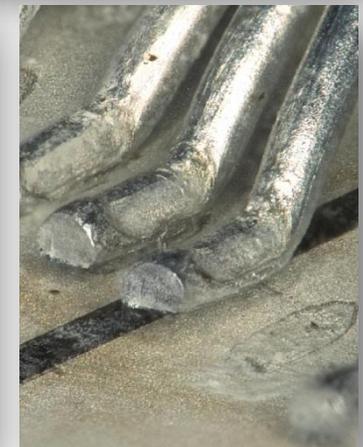
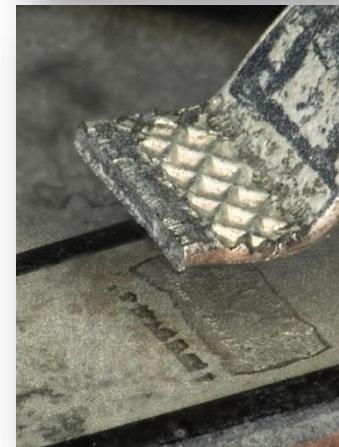
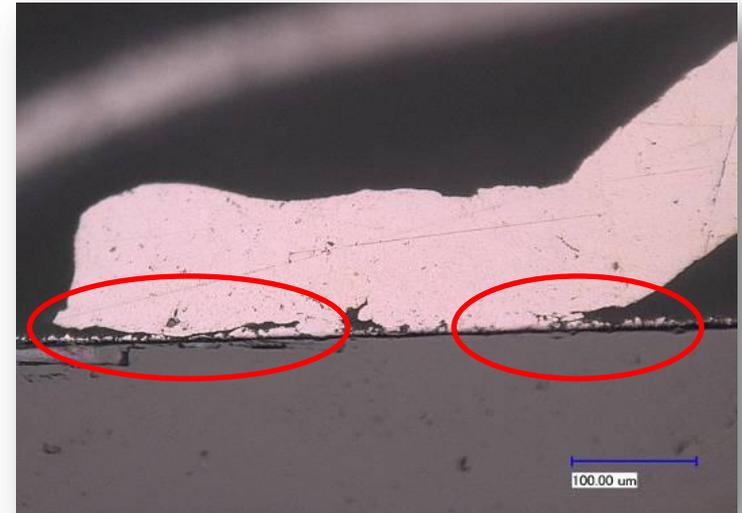
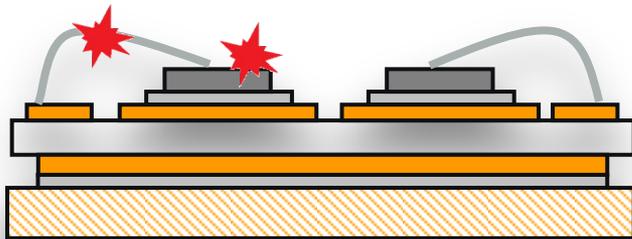
2) Held, M. et. al. "Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application, Proceedings Power Electronics and Drive Systems, IEEE 1997

PCT: Fehlermechanismen

Degradation der Chipmetallisierung

Bondwire Liftoff

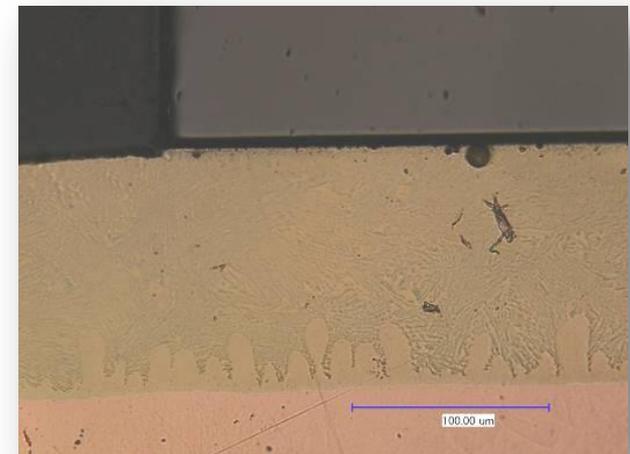
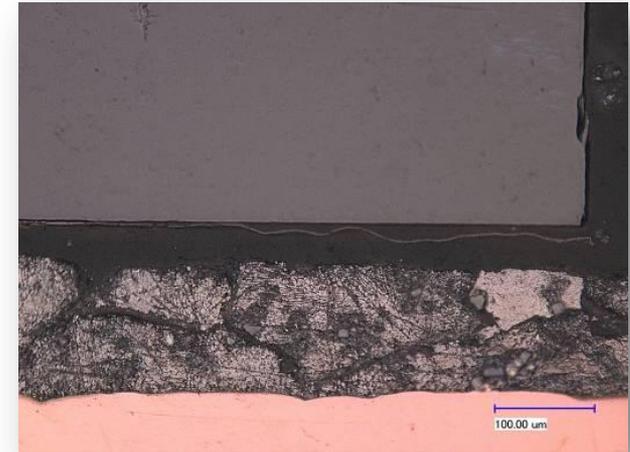
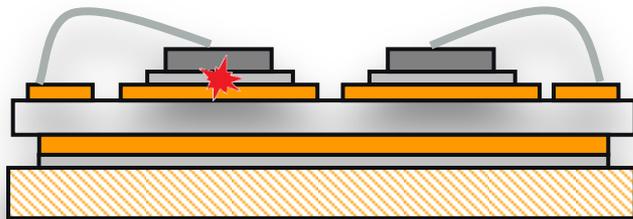
- CTE Unterschiede der Materialien
- Werkstoffeigenschaften d. Materialien
- Versetzung durch Magnetfeld
- Vibration
- Oberflächenqualität
- Bondparameter



PCT: Fehlermechanismen

“Lot” Ermüdung

- CTE Unterschiede der Materialien
- Materialparameter
- Wachstum intermetallischer Phasen
- Risse entlang intermetallischer Phasen
- Ablösen der Chip-Metallisierung



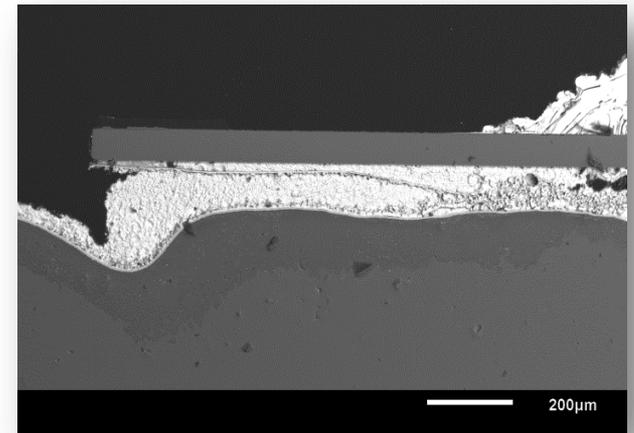
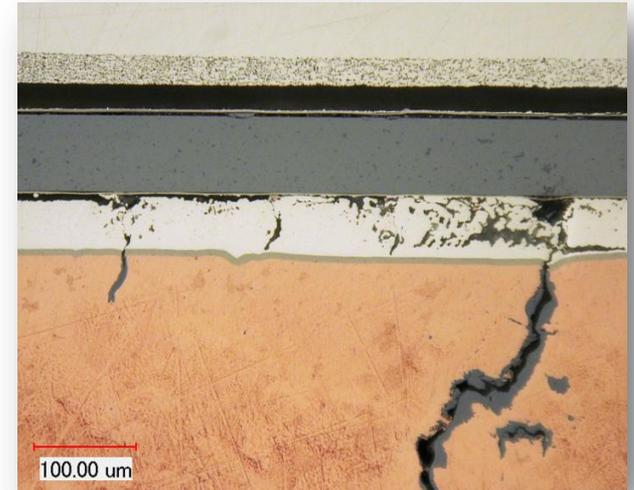
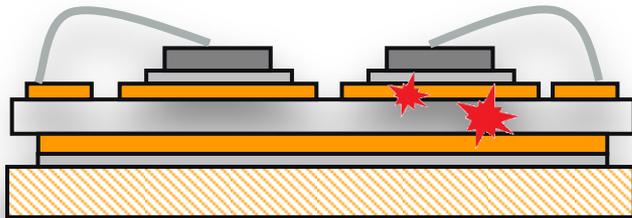
PCT: Fehlermechanismen

Schäden am Isoliersubstrat DCB

- Vertikale Risse in Substratmetallisierung
- Korrosion

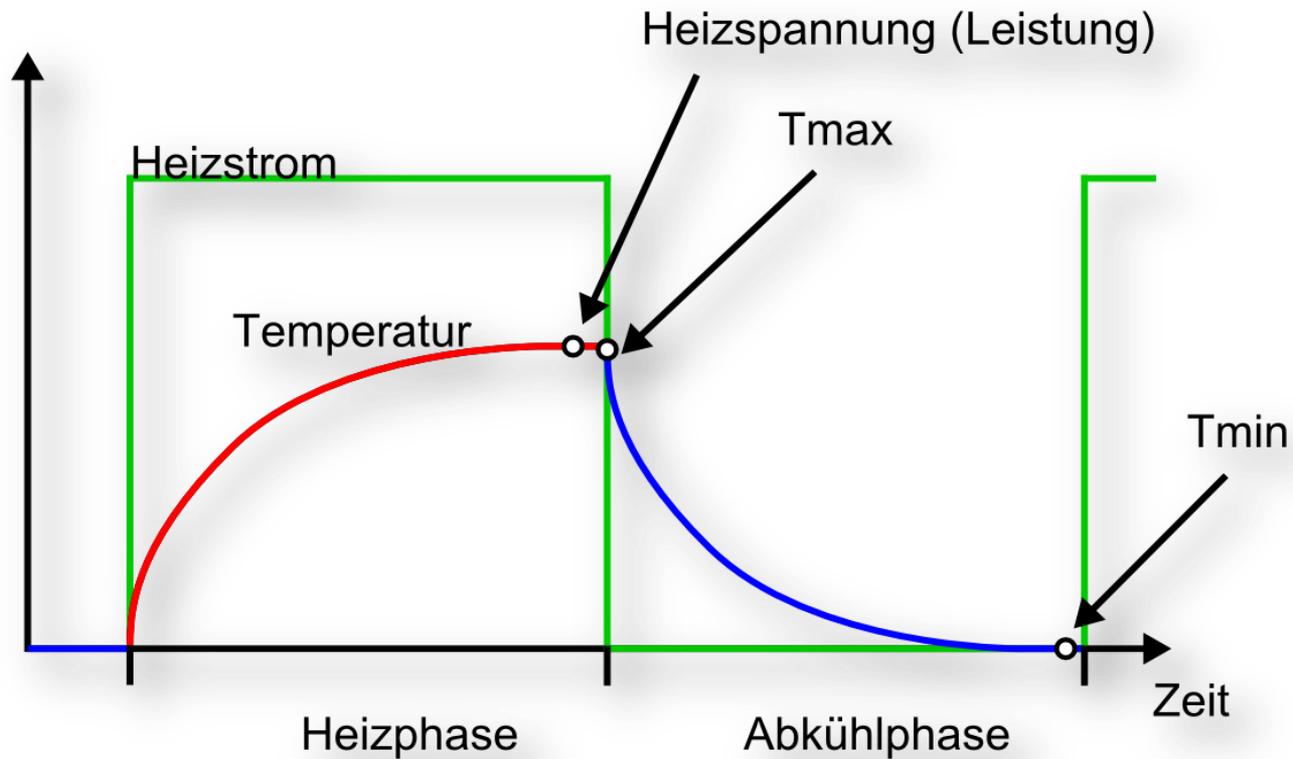
Schäden am Isoliersubstrat DAB

- Rekristallisation der Metall-Lage
→ Wellige Chip-Verbindungsschicht



Aktive Temperaturwechsel im Test

Aufheizen und Abkühlen



PCT: Messen der Temperatur

Problem

- Temperaturgradient über Halbleiter-Chip
- Abhängig von der Kühlung

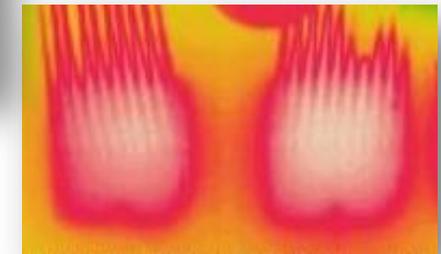
Thermographie/ Pyrometer

- Vorteile
 - Temperaturverteilung kann erfasst werden
- Nachteile
 - Direkter Sichtzugang zu den Oberflächen nötig
 - Metallische Oberflächen schwer messbar
 - Reflexionen und Abschattungen (z.B. Bonddrähte) verfälschen Ergebnis
 - Oberflächen abdecken → definierter Emissionskoeffizient
 - Emissionskoeffizienten ggf. Temperaturabhängig
 - Messung der absoluten Temperatur nicht trivial
 - Erfassung transienter thermischer Vorgänge an Auflösung und Verfügbarkeit gebunden
 - Sehr aufwendig, praktisch nur für wenige Prüflinge möglich

ohne Bodenplatte



mit Bodenplatte



PCT: Messen der Temperatur

Indirektes Temperaturmessverfahren

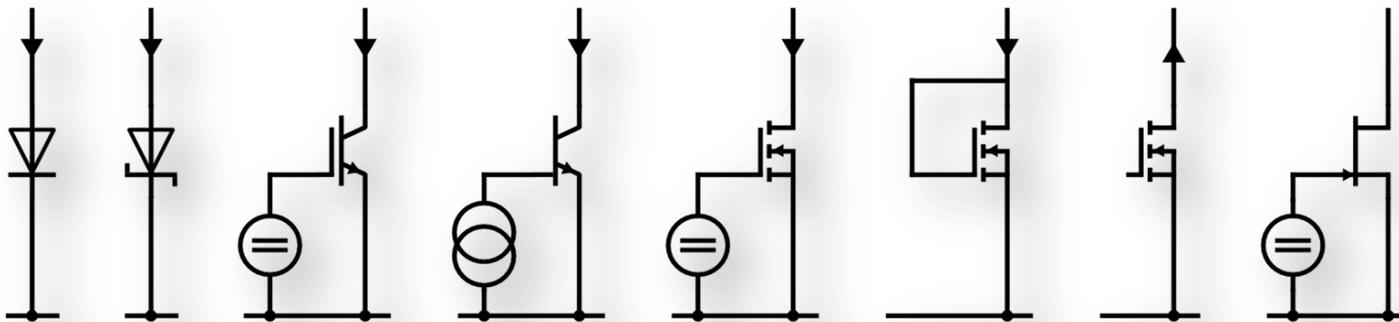
- Ausnutzen der Temperatur abhängigen Halbleitereigenschaften
- Temperatur-Spannungs-Kalibrierung
- Nachteile
 - Gemessene Temperatur ist eine Ersatztemperatur (Zusammenhang zwischen Stromdichte und Spannung)
 - Überlagerte elektrische Einschwingvorgänge durch parasitäre externe Komponenten
 - Überlagerte Störungen durch Halbleiter (Rekombination, Kapazitäten)
 - Linearität der Spannungs-Temperatur-Kurve
- Vorteile
 - Einfach anzuwenden
 - Rel. kostengünstig parallelisierbar
 - Transiente elektrische Vorgänge mit hoher Bandbreite messbar



PCT: Indirektes Temperaturmessverfahren

Möglichkeiten und Vorgehen

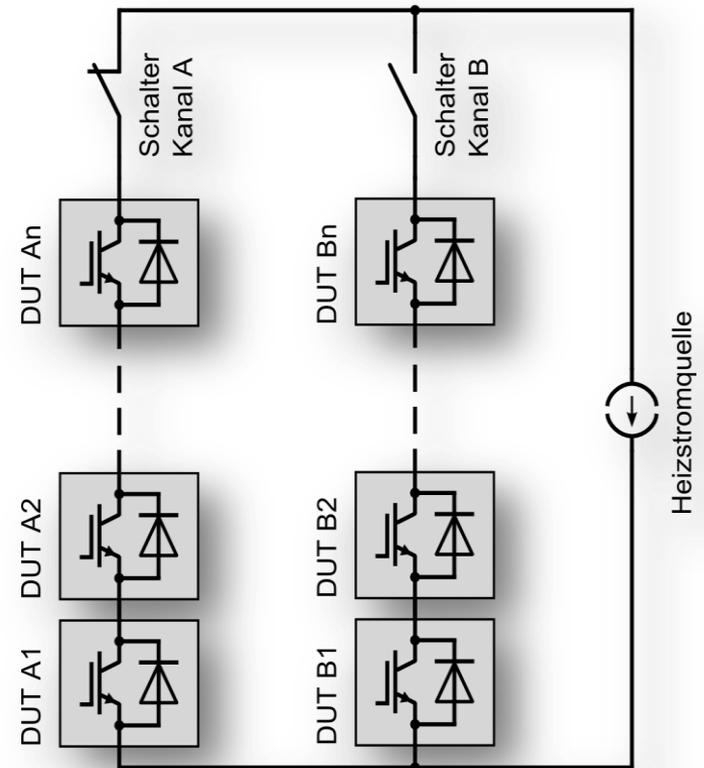
	Heizen	Messen
Diode	Flussspannung	Flussspannung
MOSFET	Vorwärtsrichtung, lin. Bereich	Flussspannung der intrinsischen Diode
JFET norm. on, off	Vorwärtsrichtung, lin. Bereich	Flussspannung der intrinsischen Diode
BJT	Vorwärtsrichtung, lin. Bereich	Vorwärtsrichtung
IGBT	Vorwärtsrichtung	Vorwärtsrichtung



Power Cycling Test @ IISB

Konzept

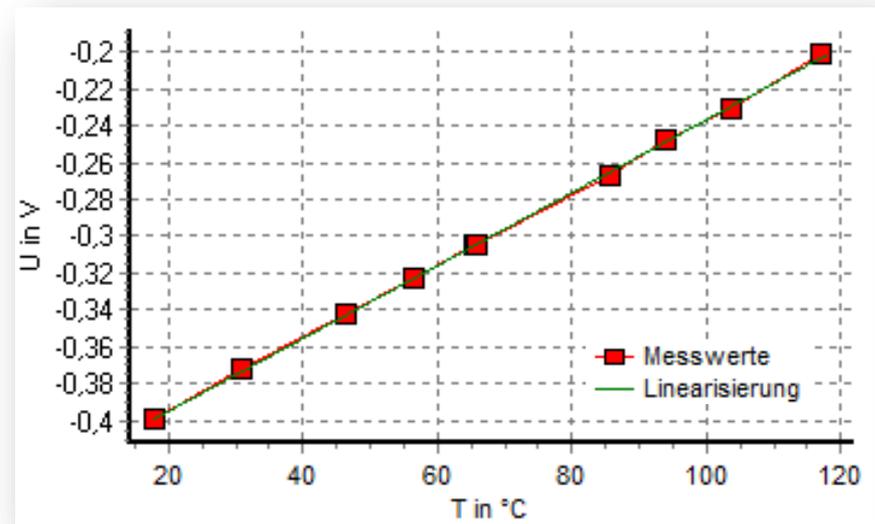
- 2 Stränge (Kanal A und B)
- In einem Strang Prüflinge in Serie
- DUT sind „passiv“, zu- und abschalten mit Lastschalter
- Abwechselndes Schalten
 - kein Zyklieren der Heizquelle
 - Kein Zyklieren des Temperiergeräts
- Pro DUT eine Messwerterfassung: gleichzeitige Signalerfassung pro Zyklus



PCT: Ablauf

Temperatur-Spannungs-Kalibrierung

- Temperierung des Kühlkörpers und damit der DUTs
- Warten auf thermisch eingeschwungenen Zustand
- Berechnung von dT/dt sowie dU/dt zur Kontrolle
- -20..150°C einfach möglich
- Kleinere Temperaturen (Betaung) oder höhere (Temperaturstabilität der Verdrahtung) unter hohem Aufwand im Ofen
- Automatische Ablaufsteuerung
- Messstrom +/-100mA; +/-6V (Schutzkleinspannung @ 10 DUTs in Serie)



PCT: Ablauf: Temperaturhub-Einstellung

Gleicher Temperaturhub für alle DUTs

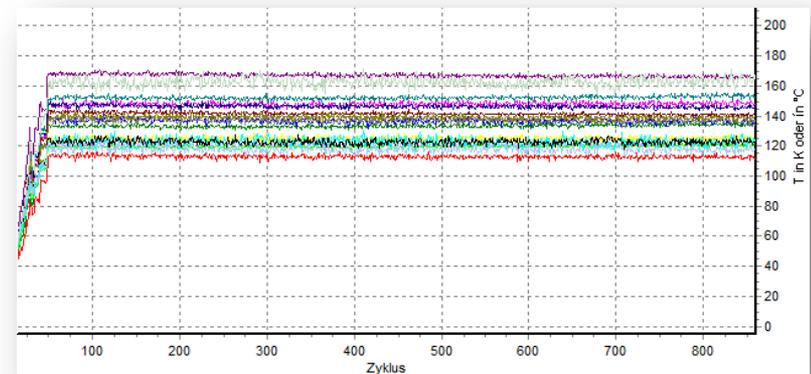
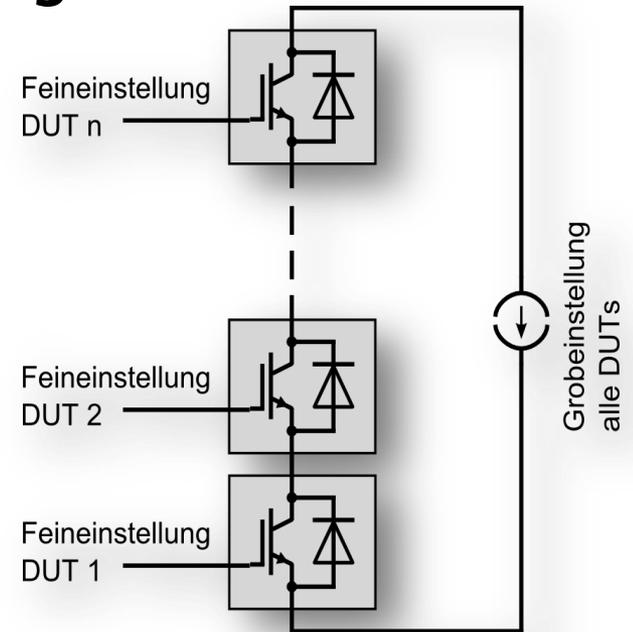
- Grobeinstellung mit Heizstrom für alle DUTs gleichzeitig
- Feineinstellung mit Gate-Spannung

Einschränkung:

- Feineinstellung nur mit steuerbaren Bauelementen

Unterschiedliche Prüfverfahren

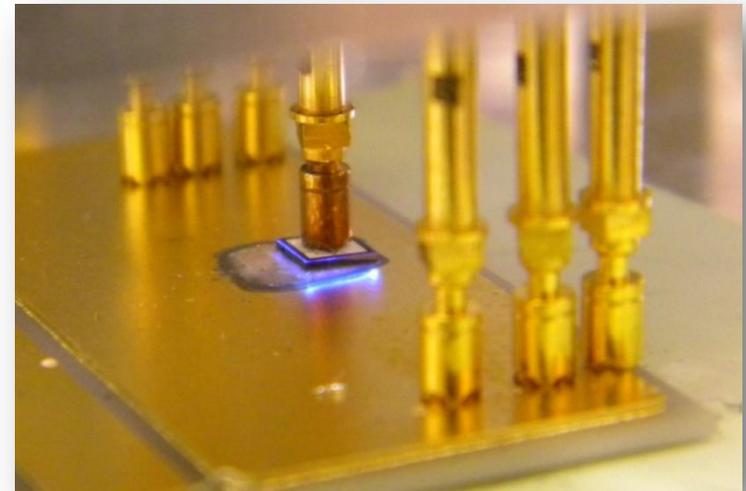
- Konstanter Temperaturhub (= konstanter Fehlermechanismus)
- Konstante Heizleistung
- Konstanter Heizstrom (= Anwendungsnah)



PCT: Ablauf: Messzyklen

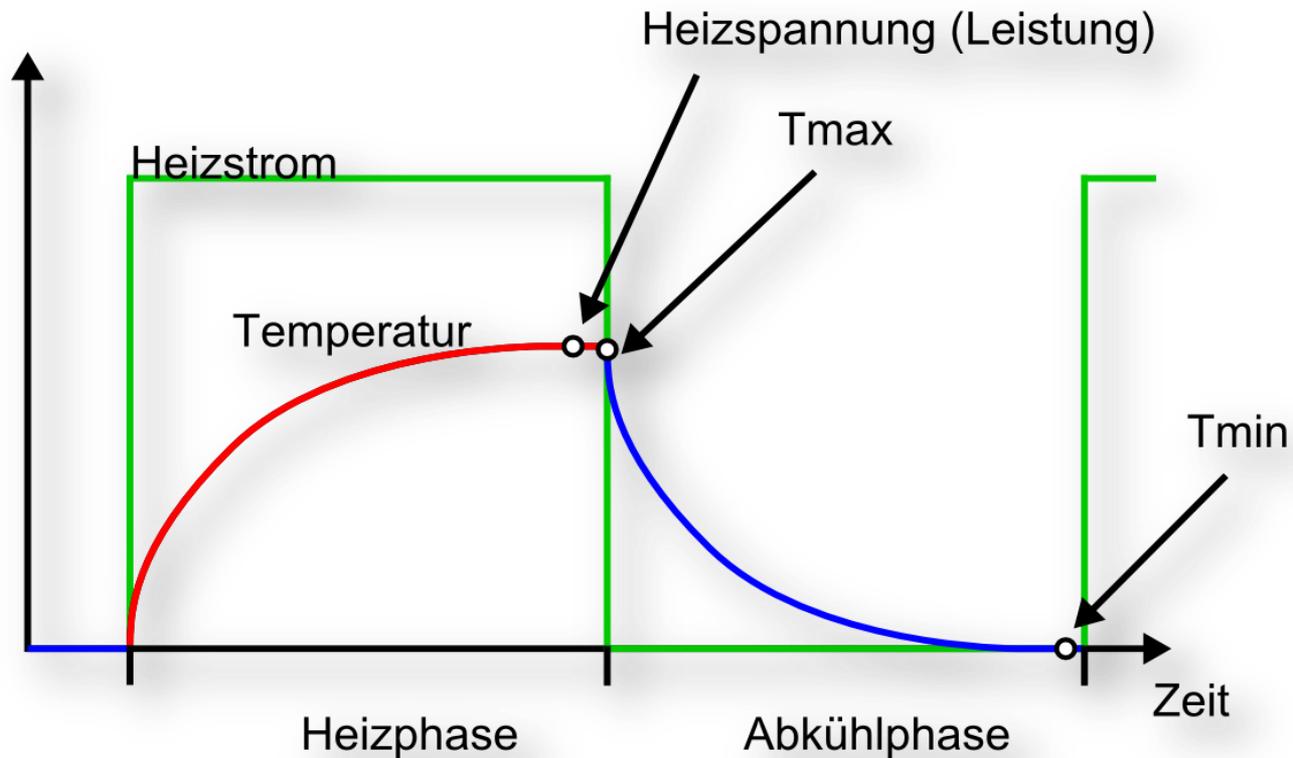
Warten auf Abbruchkriterium

- Kühlmitteltemperatur
- Temperatur am Prüfling (externer Pt100 Sensor)
- Spannung/ Leistung während der Heizphase
- T_{\min} , T_{\max} , Temperaturhub
- Gate-Leckstrom



PCT: Messen der Temperatur

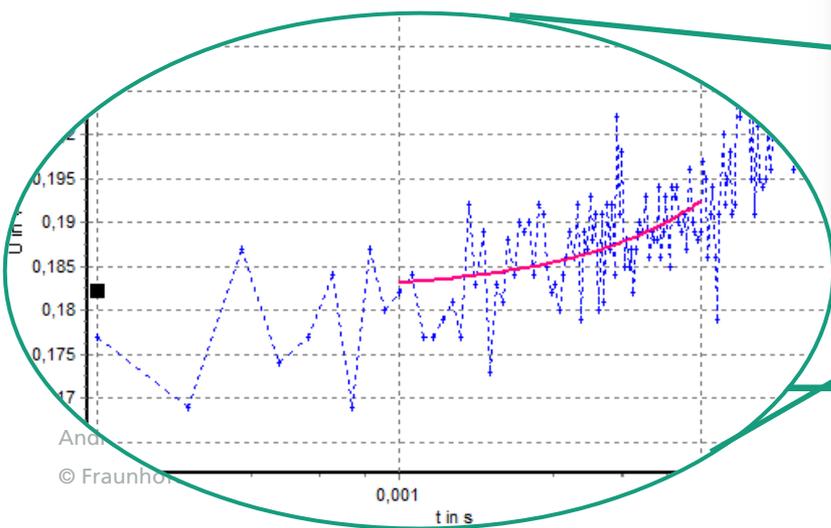
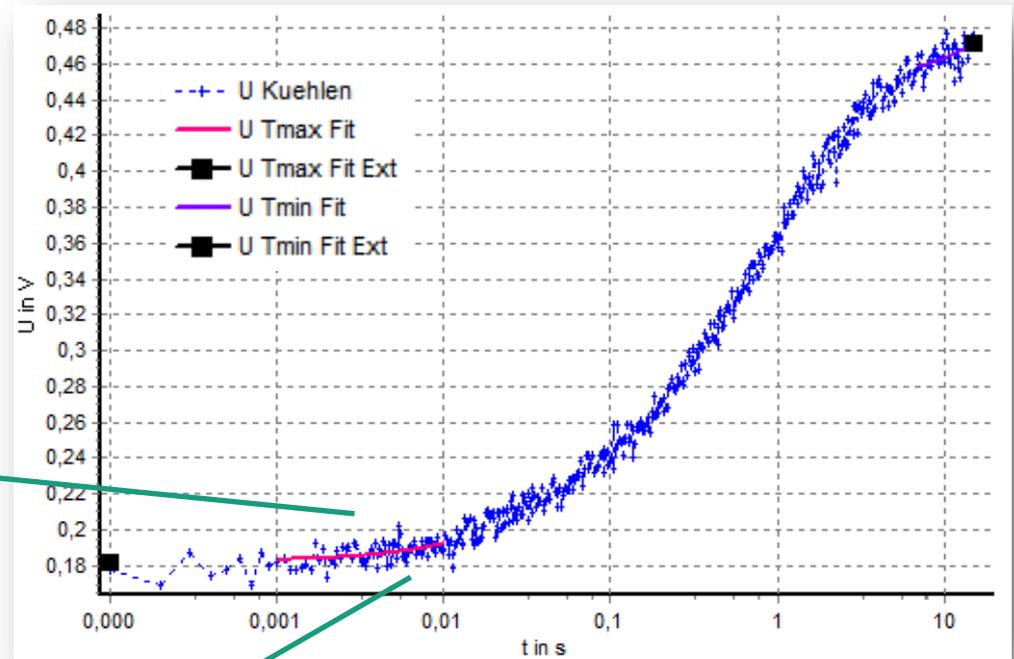
Bestimmen der Temperatur/ Heizspannung



PCT: Messen der Temperatur

Ermittlung der Temperatur T_{\max}

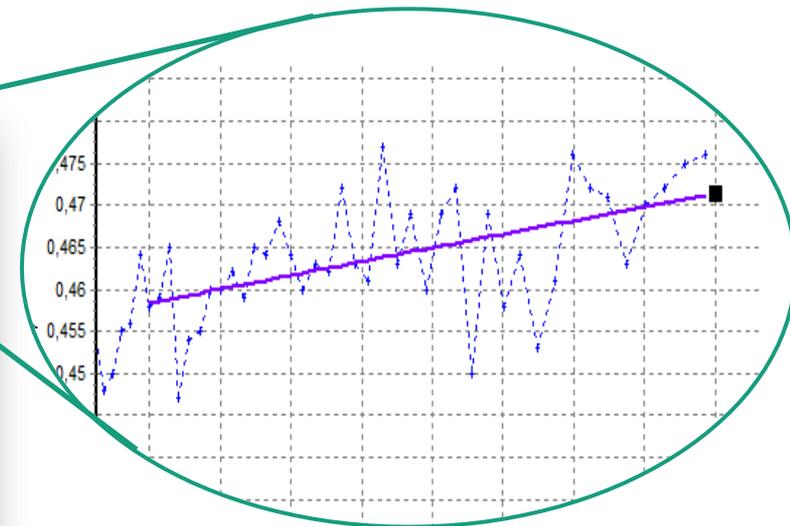
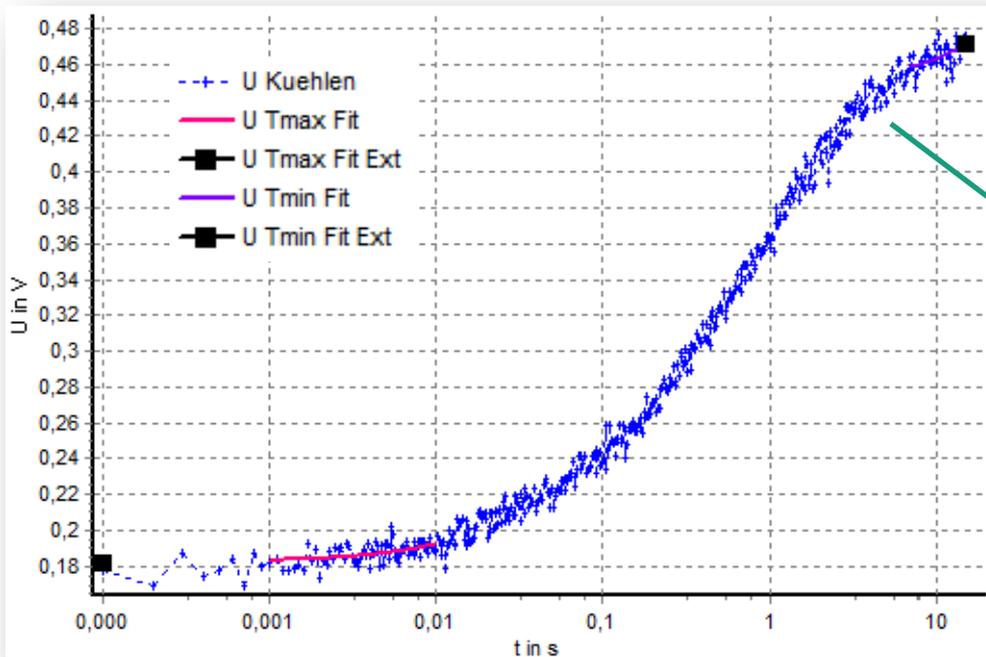
- Messen der Spannung (Rohdaten)
- logarithmischer Zeitabstand
- Lineare Regression im gültigen Zeitintervall (opt. Kontrolle möglich, schnelle Berechnung)
- Zeitbereich einstellbar
- Extrapolation zur Zeit Null



PCT: Messen der Temperatur

Ermittlung der Temperatur T_{\min}

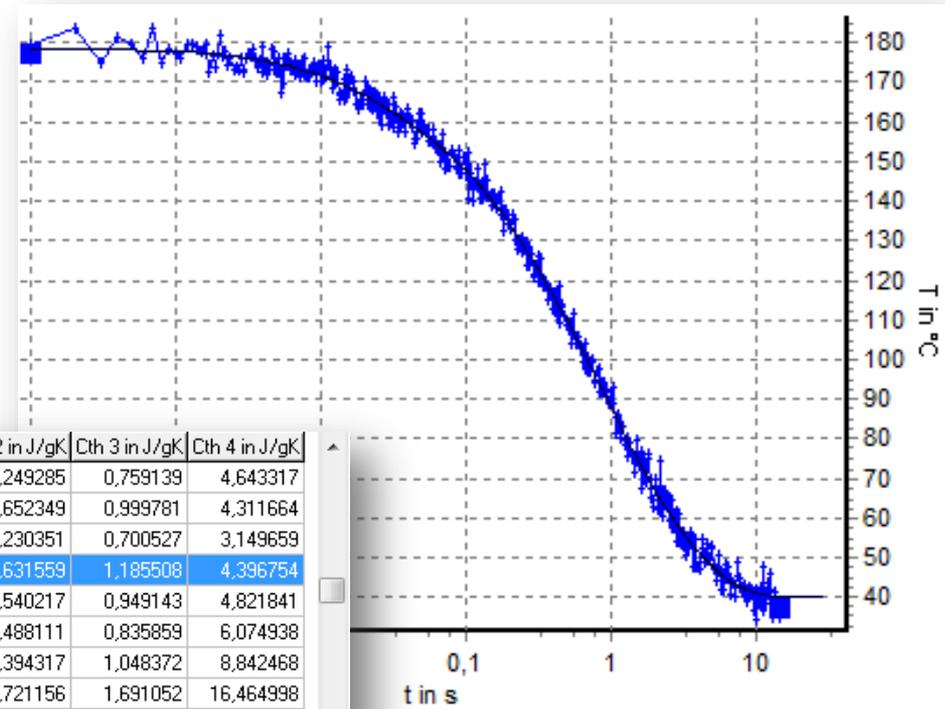
- Lineare Regression im gültigen Zeitintervall
- Zeitbereich einstellbar
- Extrapolation zur Zeit Zykluszeit / 2



PCT: Messen der Temperatur

Ermittlung der Temperatur $T_{\max, \min}$

- Mit Hilfe der Temperatur-Spannungs-Beziehung
- Umrechnung der Fitgeraden
- Umrechnung der extrapolierten Punkte
- Ausblick:
Umrechnung der Abkühlkurven
in Foster/ Cauer Ersatznetzwerk
→ Z_{th} pro Zyklus

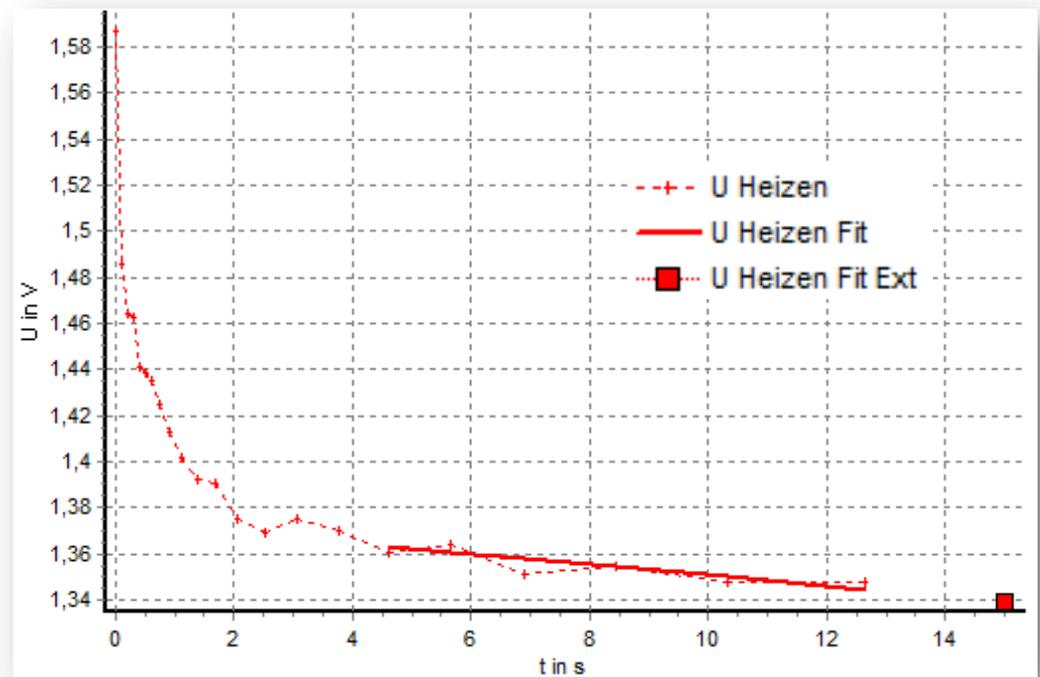


Rth ges. in K/W	Rth ber. in K/W	Rth 1 in K/W	Rth 2 in K/W	Rth 3 in K/W	Rth 4 in K/W	Cth 1 in J/gK	Cth 2 in J/gK	Cth 3 in J/gK	Cth 4 in J/gK
1,65	1,65118	0,05337	0,221802	0,756968	0,61904	0,171105	0,249285	0,759139	4,643317
1,63	1,639697	0,131822	0,230101	0,655378	0,622396	0,132318	0,652349	0,999781	4,311664
1,66	1,68229	0,064713	0,20322	0,672068	0,742289	0,037501	0,230351	0,700527	3,149659
1,66	1,639159	0,142674	0,277884	0,611938	0,606663	0,141537	0,631559	1,185508	4,396754
1,63	1,643569	0,121331	0,223712	0,717282	0,581244	0,158022	0,540217	0,949143	4,821841
1,65	1,660704	0,118923	0,204749	0,824959	0,512073	0,099605	0,488111	0,835859	6,074938
1,65	1,662544	0,097195	0,303092	0,835859	0,426398	0,116041	0,394317	1,048372	8,842468
1,64	1,651218	0,184582	0,433419	0,763437	0,26978	0,154091	0,721156	1,691052	16,464998

PCT: Messen der Spannung

Ermittlung der Spannung während Heizphase

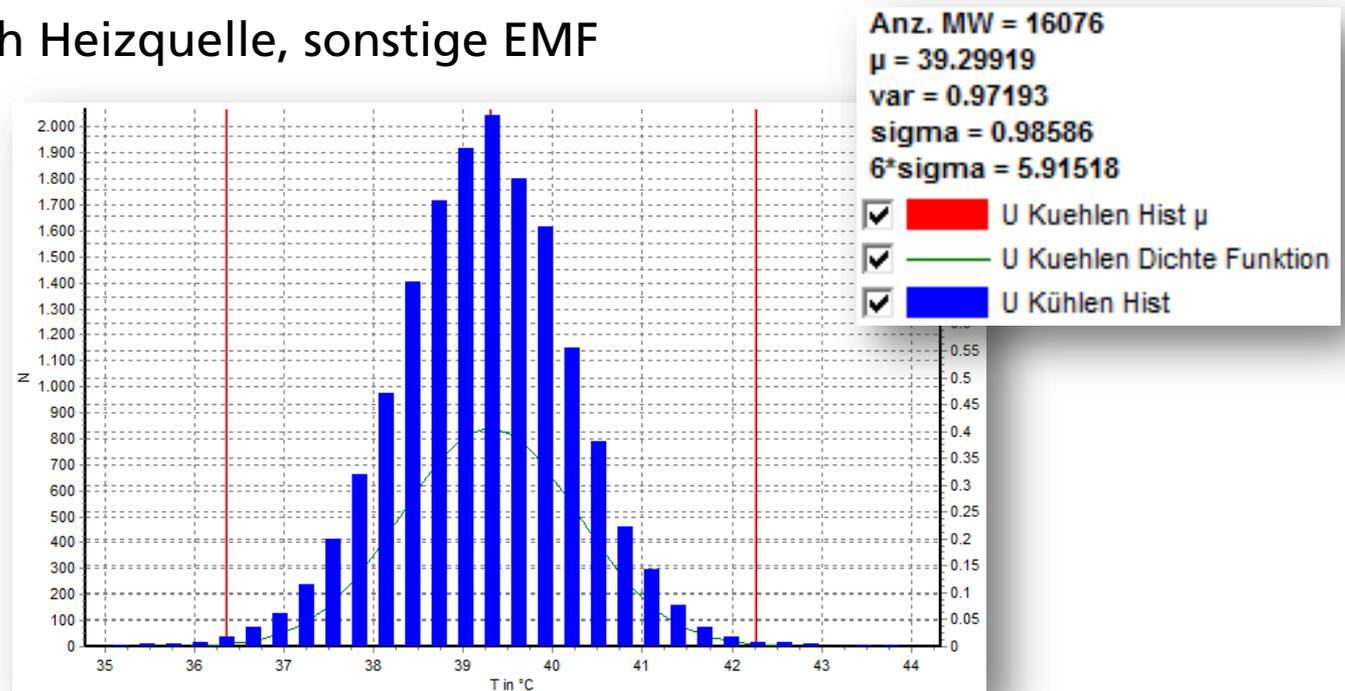
- Lineare Regression im gültigen Zeitintervall
- Extrapolation zur Zeit Zykluszeit / 2
- Zeitbereich einstellbar
- „Aufheizkurve“
- Keine echte Sprungantwort da Heizleistung nicht konst.
- Keine Temperatur-Spannungsbeziehung möglich
- Nur Start und Ende-Werte sind durch die Abkühlkurve bekannt



PCT: Messen der Temperatur

Grenzen des (indirekten) Temperaturmessverfahrens

- Regelschwankungen der Temperierung
- Temperaturgradient über Kühlkörper (bei mehr als einem Prüfling)
- Alterung des Halbleiter-Chips während des Tests
- Störungen durch Heizquelle, sonstige EMF
- Rauschen



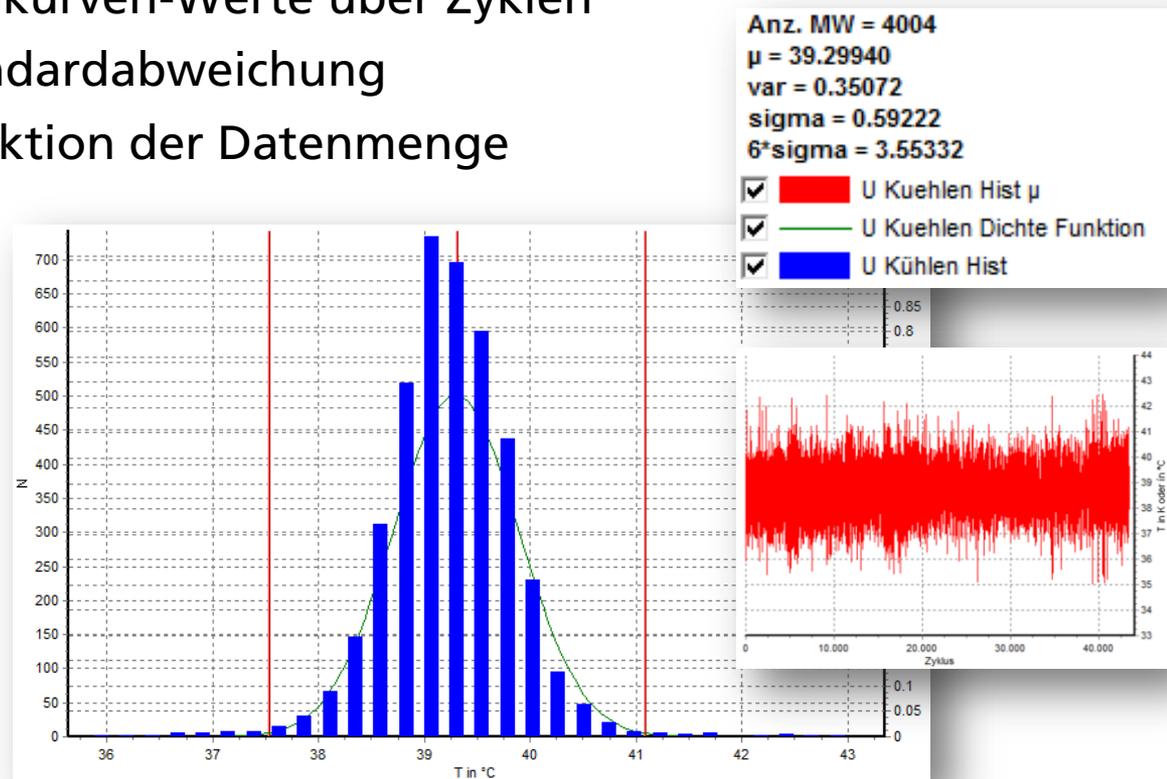
Histogramm T_{\min}
über Zyklen

PCT: Messen der Temperatur

Grenzen des (indirekten) Temperaturmessverfahrens

- Mitteln der Abkühlkurven-Werte über Zyklen
- Reduktion der Standardabweichung
- Nebeneffekt: Reduktion der Datenmenge

Histogramm T_{\min}
über 4 Zyklen
gemittelt



PCT: Messsystem PCT3

Übersicht

- Einspeisung mit „Maschinen Aus“
- Verfügbare Heizquellen:
 - 400A/ 35V
 - 2000A/ 20V
- Leitreechner und Messwerverfassung
- Prüflingskammer für bis zu 20 Prüflinge
- Verfügbare Temperierung:
 - 20..150°C, +9/ -20kW
 - -60..200°C, +2/ 12kW
 - 5 unabhängige Messsysteme stehen am IISB zur Verfügung



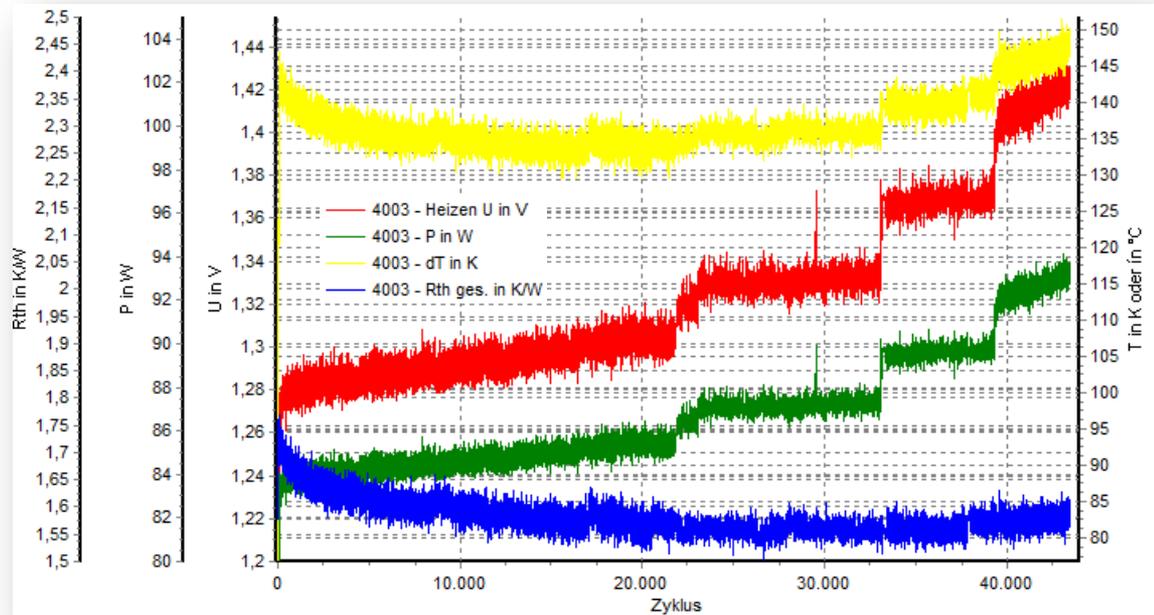
Inhalt

- Zuverlässigkeit und Anforderungen
- Lebensdauer und Ausfallmechanismen
- Messen der Halbleitertemperatur
- Aktive Temperaturwechsel – Konzept
- Ablauf der Messung
- Interpretation der Messkurven
- Statistische Auswertung der Tests

PCT: Interpretation der Messkurven

Veränderung des elektrischen Widerstands

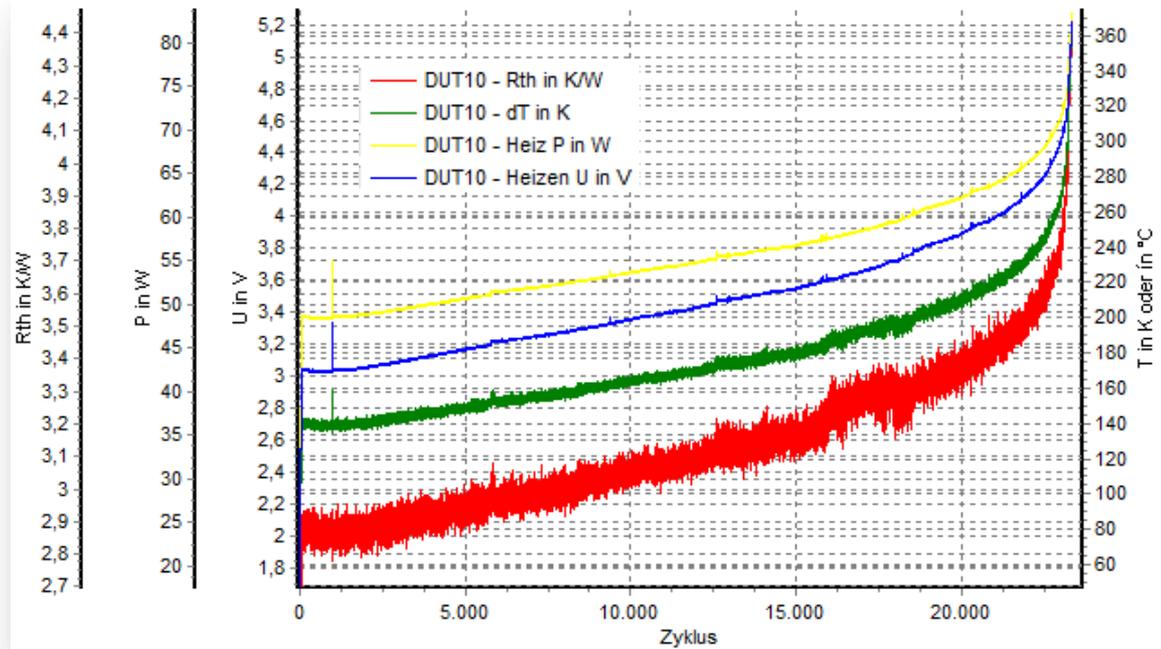
- Verursacht durch
z.B. Bondraht, Chip-Metallisierung,
aber auch Substratmetall, Drift der Halbleiterparameter
- Anstieg der Heizleistung und Spannung während der Heizphase
- Dadurch Anstieg des Temperaturhubs
- Gleichbleibender thermischer Widerstand (Junction to Coolant)



PCT: Interpretation der Messkurven

Veränderung des thermischen Widerstands

- Verursacht durch Lot-/ Sinterschicht Degradation, Isoliersubstrat
- Anstieg des Temperaturhubs
- Dadurch Änderung der Spannung während der Heizphase abh. vom Temperaturkoeffizienten
- Steigender berechneter thermischer Widerstand (Junction to Coolant)



PCT: Interpretation der Messkurven

Ziel:

- Vergleich der Ergebnisse mit eigenen/ publizierten Daten

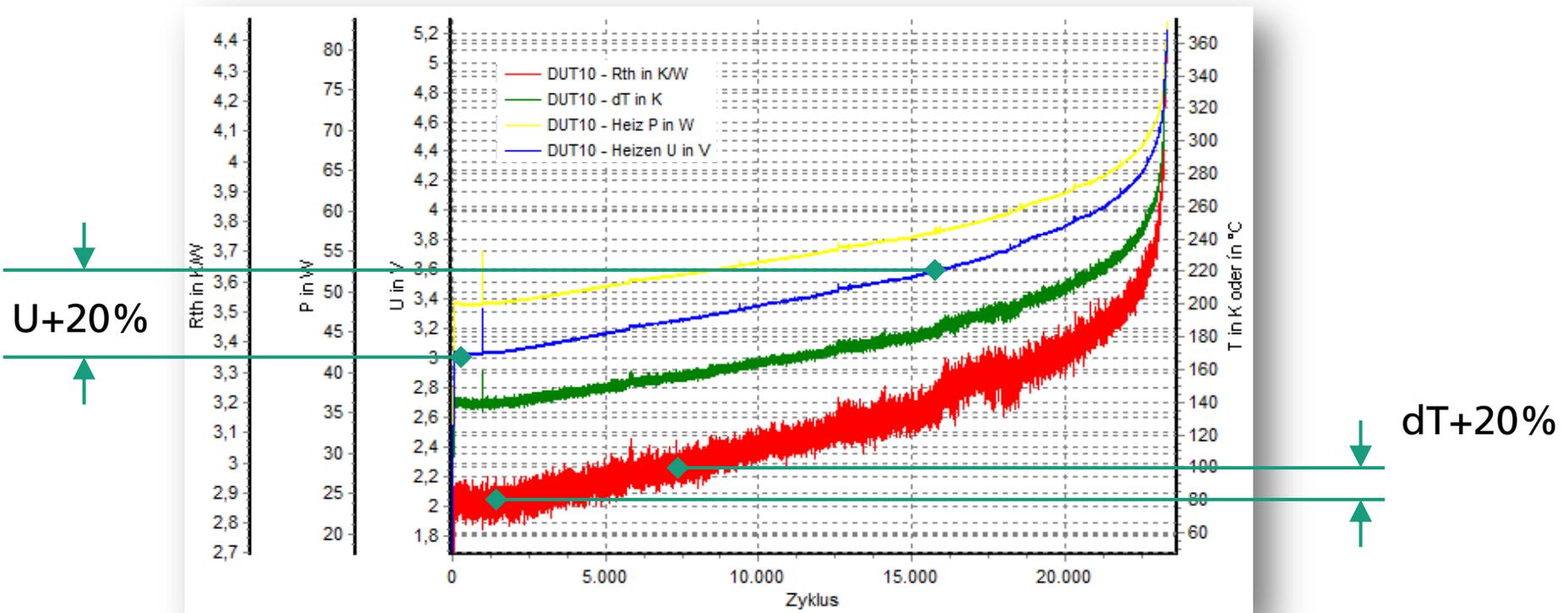
Herausforderungen (bei den eigenen sowie den Vergleichsdaten):

- Bestimmen des Ausfallzeitpunktes
- Bestimmen des Temperaturhubs
- Unterschiedliche Temperaturhübe in einem Test
- Wahl der richtigen Verteilung
- Wahl eines Vertrauensintervalls
- Angabe der Ausfallrate

PCT: Interpretation der Messkurven

End-of-Life - Kriterium

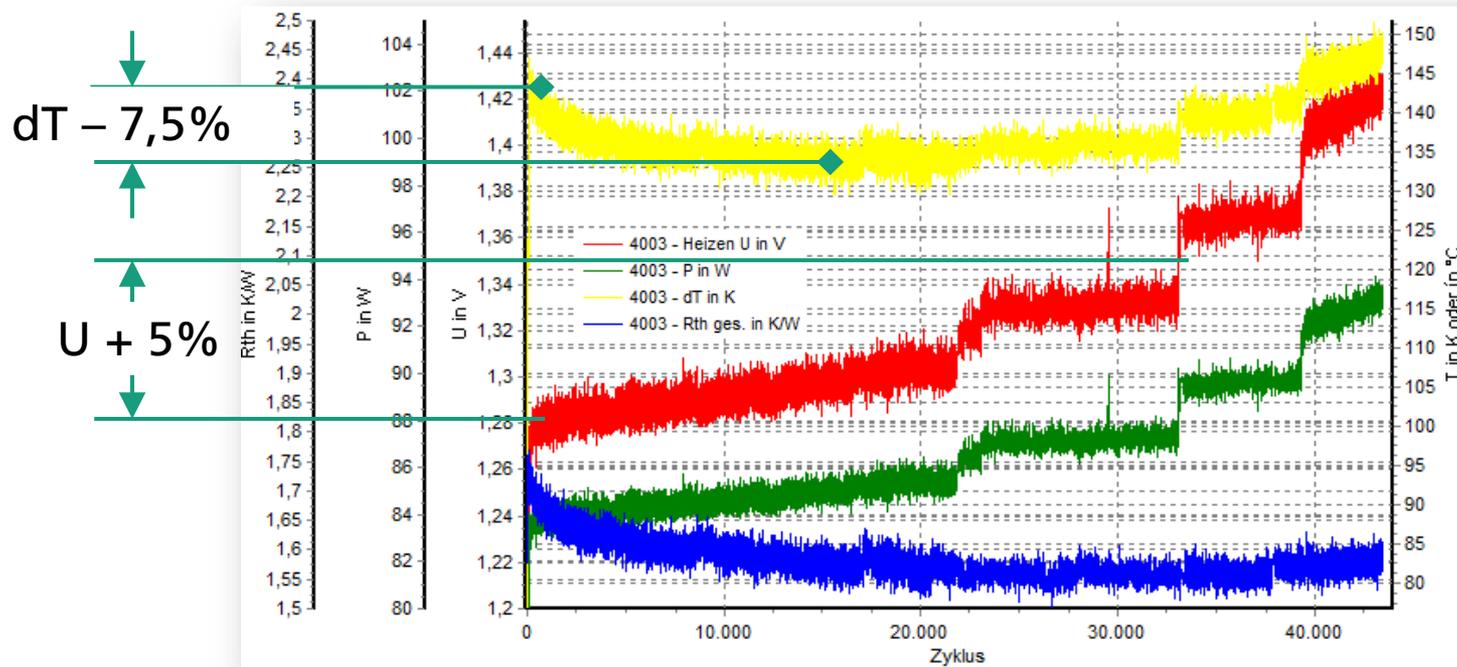
- Anstieg dT um 20%
- Anstieg Spannung während Heizphase um 5% oder 20%



PCT: Interpretation der Messkurven

End-of-Life - Kriterium

- Anstieg dT um 20%
- Anstieg Spannung während Heizphase um 5% oder 20%



PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Fallstudie

- Vergleich zweier Modultypen
 - Jeweils 10 Module pro Typ
 - Zeitzensur bei ca. 68000 Zyklen (Abbruch)
 - Modul A:
10 Prüflinge vollständig ausgefallen
 - Modul B:
Nur 8 von 10 Prüflingen ausgefallen
- Erster Schritt: Verteilungsanalyse der Daten
 - Überprüfung der Weibullverteilung
 - Dadurch Erkennen von Fehlern oder Unterschieden im Messsystem
 - Erkennen unterschiedlicher Ausfallmechanismen

Modul A EOL@Zyklus	Modul B EOL@Zyklus
7319	10714
8499	18377
9111	18463
9364	40491
9441	41745
11606	49182
11998	49186
12022	57994
14069	66796*
16130	66796*

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Finden der „richtigen“ Verteilung

- Je besser die Verteilung an die Daten angepasst ist
 - Desto kleiner ist Anderson-Darling-Wert
 - Desto näher liegt der Korrelationskoeffizient bei 1
 - Desto genauer liegen die Punkte im Wahrscheinlichkeitsnetz auf einer Geraden
- Überprüfen der Messwerte
 - Verteilung mit der „konservativsten Schätzung“

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Anderson-Darling

- Abstandsquadrate zwischen Verteilung und Messpunkten
- Je geringer der AD-Wert, desto besser passt die Verteilung zu den Punkten
- Berechnung: $A^2 = -n - \left(\frac{1}{n}\right) \sum [(2i - 1) \ln U_{(i)} + (2n + 1 - 2i) \ln(1 - U_{(i)})]$

Korrelationskoeffizient

- Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen den Messpunkten und der Geraden des Wahrscheinlichkeitsnetztes
- Je näher der R-Wert an 1, desto besser passt die Verteilung zu den Punkten
- Berechnung:
$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)\sigma_x\sigma_y}$$

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

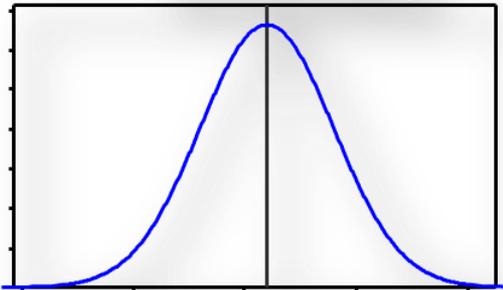
Fallstudie: Folgende Verteilungen wurden getestet

- Weibull mit 2 Parametern
- Weibull mit 3 Parametern (Mindestlebensdauer)
- Normal (Gaußverteilung)
- Lognormal
- Kleinster Extremwert
- Exponential

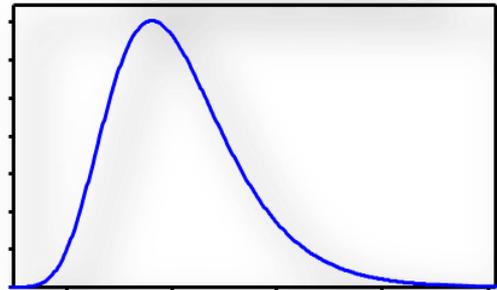
PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Dichtefunktionen einzelner Verteilungen

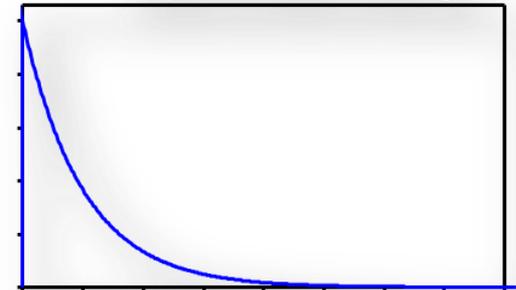
Normalverteilung



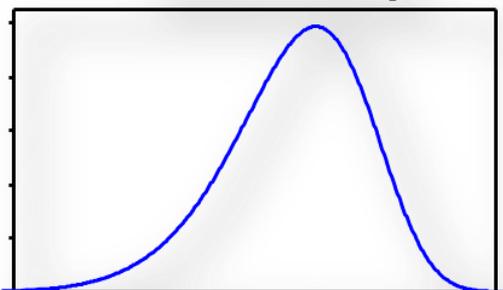
Lognormalverteilung



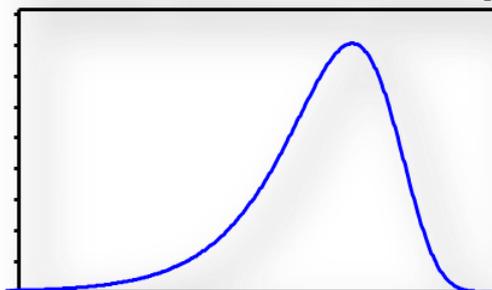
Exponentialverteilung



Weibullverteilung



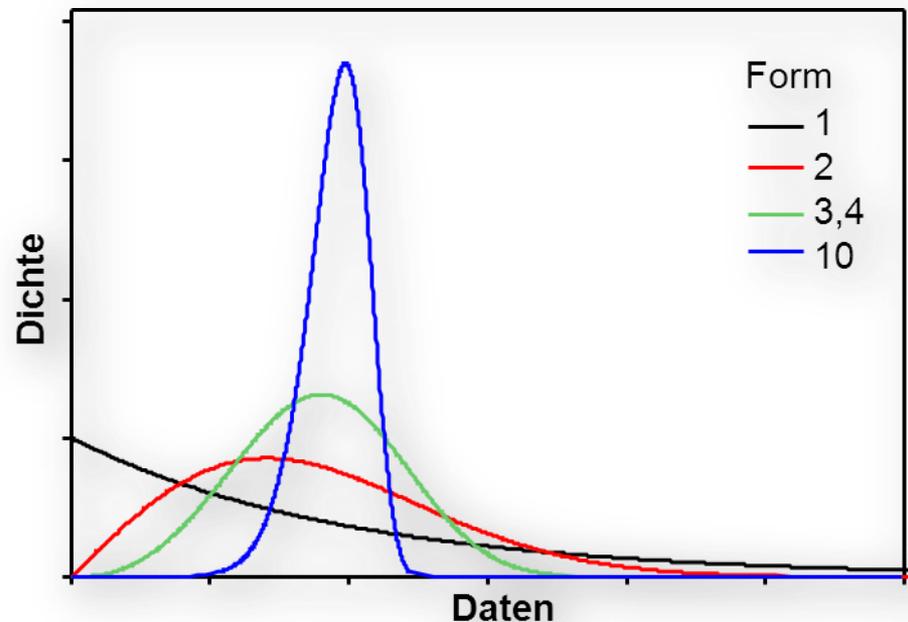
Kleinster Extremwert-Verteilung



PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Die Weibullverteilung ist sehr flexibel

- $\alpha = 1$ ergibt die Exponentialverteilung
- $\alpha \approx 3,4$ nähert sich der Normalverteilung an



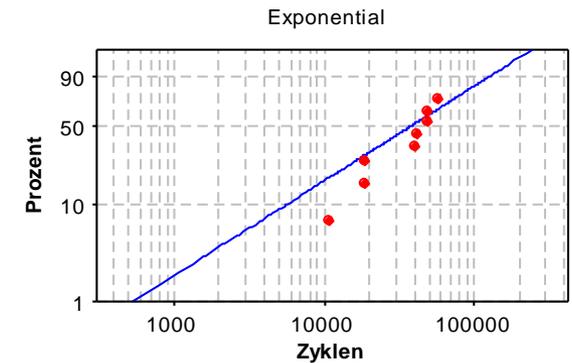
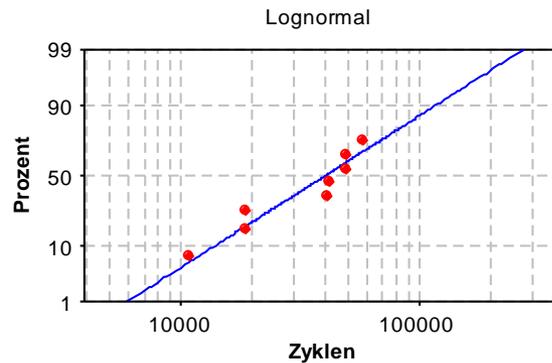
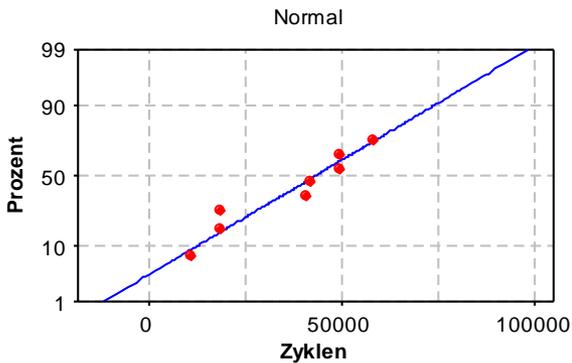
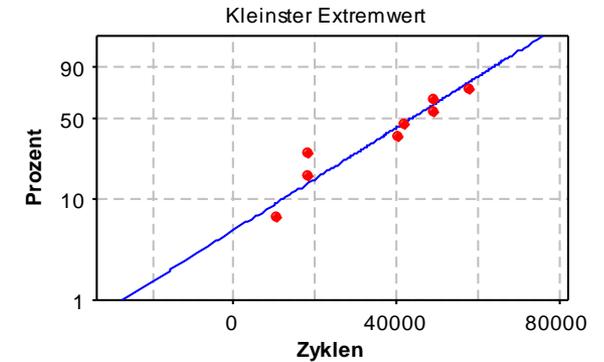
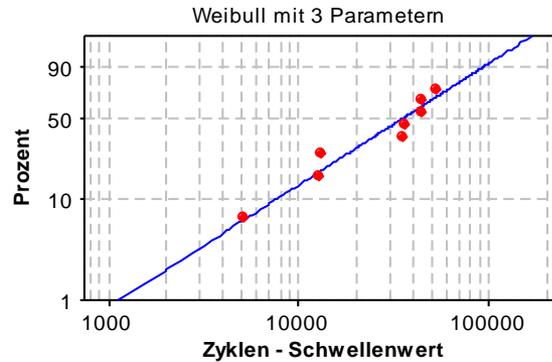
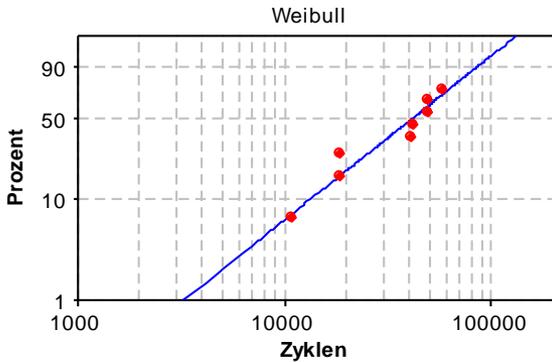
PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Berechnung der Dichtefunktion einzelner Verteilungen

- Normal: $\frac{1}{\sqrt{2\pi}a} \exp\left[-\frac{(x-\beta)^2}{2a^2}\right]$
- Lognormal: $\frac{1}{ax\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x)-\beta)^2}{2a^2}\right] dt$
- Weibull: $\frac{\beta}{a^\beta} (x)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{x-\gamma}{a}\right)^\beta\right) \quad \gamma = \text{Schwellwert}$
- Exponential: $\frac{1}{a} \exp\left(-\frac{x}{a}\right)$
- Kleinster Extremwert: $\left(\frac{1}{a}\right) \exp\left[\frac{(x-a)}{\beta}\right] \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{(x-a)}{\beta}\right]\right\}$
- $\alpha = \text{Skala/ Form}, \beta = \text{Lage}$

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Finden der „richtigen“ Verteilung



Auswertung mit der Statistiksoftware Minitab®

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Je nach Verteilung ergeben sich deutlich unterschiedliche Ausfallzeiten (Kleinste-Quadrate-Methode)

Verteilung	%	Zyklen	Unter- grenze 95% KI	Ober- grenze 95% KI	ρ (Kor)	AD-Wert
Weibull	5	8653	2340	32002	0,967	13,642
Weibull mit 3 Param.	5	9868	5637	22218	0,965	13,650
Normal	5	-11814	-44307	29452	0,963	13,653
Lognormal	5	10346	4048	26438	0,955	13,671
Kleinster Extremwert	5	-45	-30659	30569	0,951	13,645
Exponential	5	2694	1346	5392	-	13,997

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

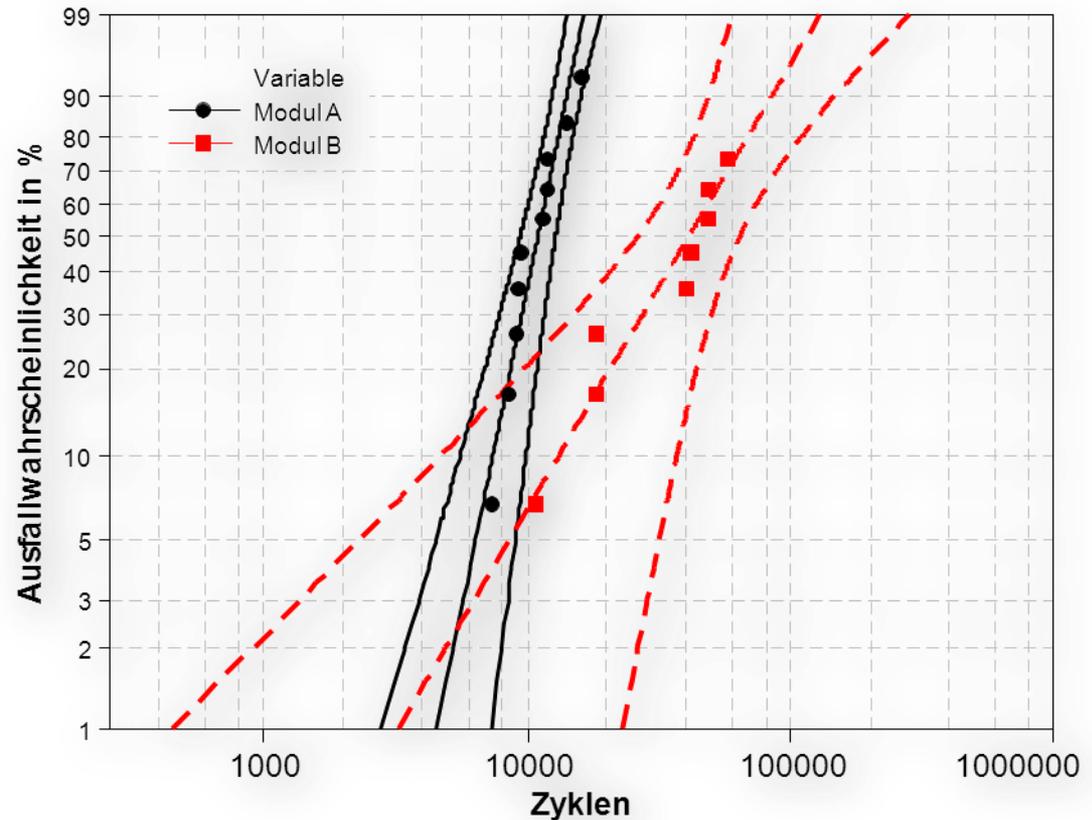
Fallstudie: Festlegung der Verteilung

- Für Modul B ähnlicher Zusammenhang
- Weibull (2 Parameter) als Verteilungsfunktion festgelegt
 - Korrelationskoeffizient ρ liefert besten Wert
 - Anderson-Darling liefert besten Wert
 - Sichere Schätzung (für Mindestlebensdauer)
 - Defakto Standard

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Vergleich der beiden Module im Wahrscheinlichkeitsnetz

- Zyklenanzahl von Modul B höher
- Streuung deutlich größer
- Kreuzen beider Weibullgeraden und Konfidenzintervalle im unteren Zyklbereich
- Modul A liegt in der Mindestfestigkeit über Modul B



PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Vergleich der beiden Module A und B

	Prozent	Zyklus	Untergrenze 95% KI	Obergrenze 95% KI
Modul A	1	4528	2783	7367
Modul B	1	3238	452	23175
Modul A	5	6377	4503	9029
Modul B	5	8653	2340	32003
Modul A	50	11017	9828	12870
Modul B	50	41604	29982	64991

- Zwischen der 1 % und 5 % Ausfallwahrscheinlichkeit kommt es zur Kreuzung der Weibullgeraden

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Bei der Auswertung von Vorteil

- Verwendung von Konfidenzintervallen
 - Maß für die Streuung der Werte
 - Die untere Grenze des KI dient zur Festlegung der Mindestfestigkeit
- Unterschiedliche Temperaturen der Prüflinge
 - Unterteilung nach der gemessenen Temperatur
 - Regression mit den Lebensdauerdaten zur Feststellung des Temperatureinflusses

PCT: Interpretation der EOL Zyklus-Werte

Bei der Auswertung beachten

- Bei einem Lebensdauertest können Bauteile aufgrund verschiedener Mechanismen ausfallen (z.B. Bondwire-Liftoff vs. Lotschichtversagen)
- Verschiedene Fehlermechanismen folgen meist unterschiedlichen Verteilungsfunktionen oder Verteilungsparametern
 - Evtl. unterschiedliche Steigungen im Wahrscheinlichkeitsnetz
 - Lebensdaueranalyse in Ausfallursachen unterteilen
 - Verteilungsidentifikation für jede Ausfallursache

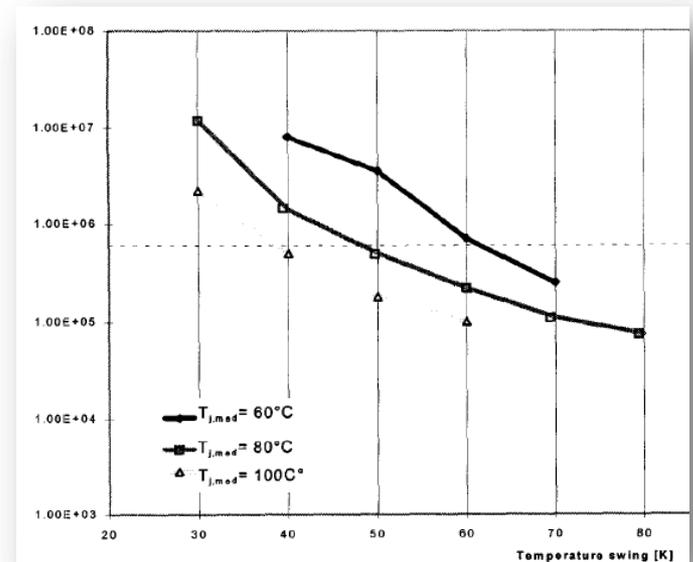
PCT: Interpretation der Messkurven

Ziel gelingt oft nicht:

- Erhebliche Unterschiede in der Teststrategie
- Unterschiede in den Testparameter
- Unterschiedliche Methoden bei der Bestimmung des Ausfallzeitpunkts
- Bei der Bestimmung des Temperaturhubs
- Viel zu wenig Prüflinge
- Keine Angabe der Verteilungsfunktion
- Keine Angabe des Vertrauensintervalls
- Keine Angabe bei welcher Ausfallrate

Wunsch:

- Ausreichende Anzahl Prüflinge verwenden
- Unterschiedliche Technologien immer vergleichend Testen



Auerbach, F, et. al. "Power Cycling Stability of IGBT-Modules", IAS, 1997

Thank you for your attention

Andreas Schletz

Andreas.Schletz@iisb.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie,
Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik (FhG IISB-ZKLM)
Landgrabenstrasse 94 • 90443 Nürnberg • Tel. 0911/235 68-27, Fax -12
www.iisb.fraunhofer.de

The authors would like to thank the European Union (EU), the German BMBF and the state of Bavaria for the financial support of this work.
Special thanks to Aaron Hutzler, Adam Tokarski and Marc Zeltner for preparing input for this presentation.