

# Erweiterte Messsystemanalyse mittels statistischer Versuchsplanung

Anwendungsbeispiel anhand eines Lebensdauertests für Leistungselektronik

Aaron Hutzler

04.03.2016  
Six Sigma Fachkonferenz

# Inhalt

1. Vorstellung des Fraunhofer IISB
2. Einführung Leistungselektronik
3. Lebensdauertests für Leistungselektronik
4. Messsystemanalyse mittels DOE
5. Zusammenfassung und Ausblick

# 1. Vorstellung des Fraunhofer IISB

## Fraunhofer Gesellschaft

- **Rechtsform:** e.V.
- **Mission:** anwendungsnahe Forschung
- **Mitarbeiter:** ca. 20.000
- **Institute:** 66
- **Haushalt:** 2 Mrd. €/Jahr



# 1. Vorstellung des Fraunhofer IISB

Hauptsitz Erlangen



## Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB

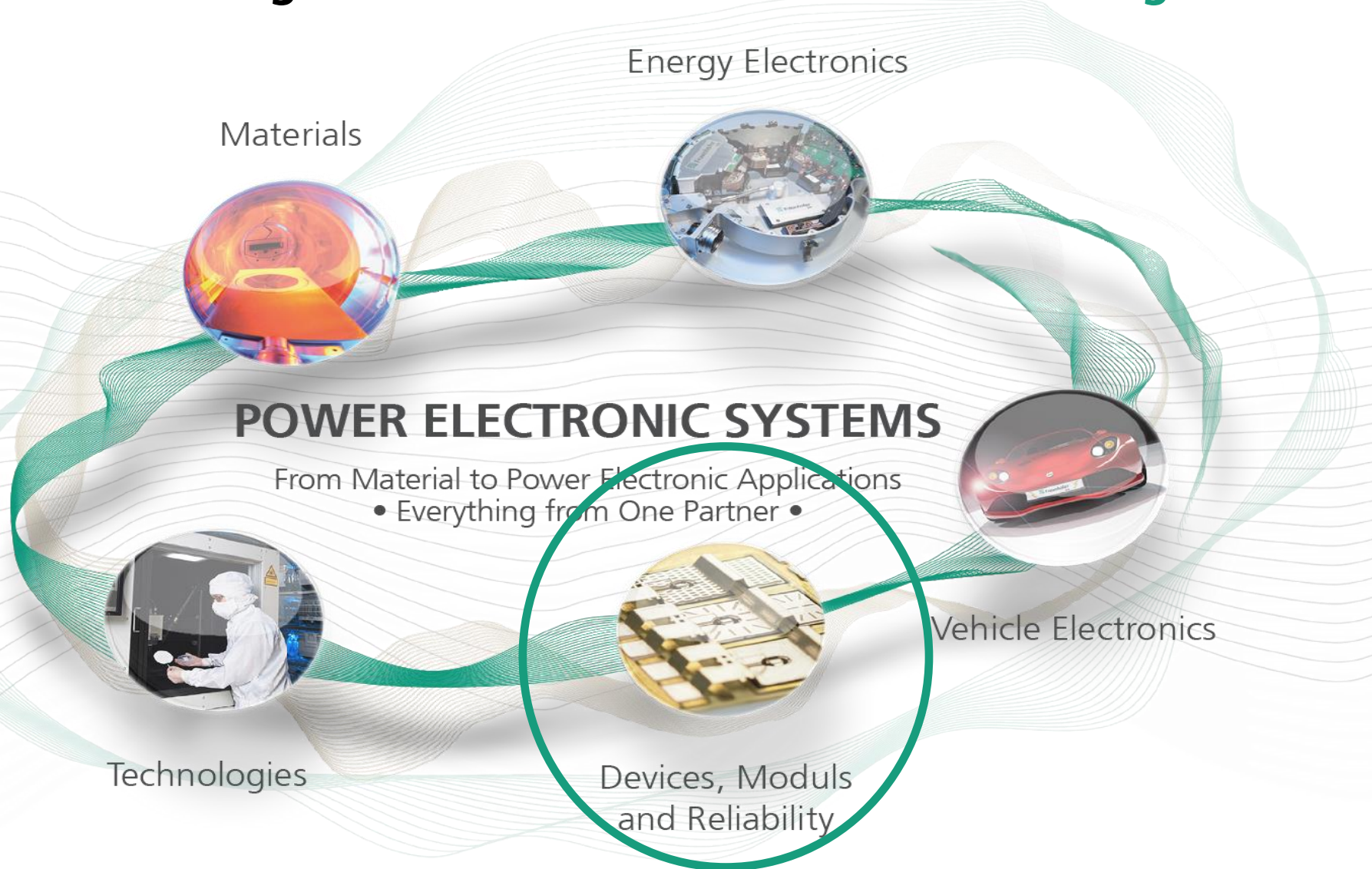
Institutsleiter: Prof. L. Frey

- Forschungsschwerpunkte
  - Leistungselektronische Systeme
  - Halbleitertechnologien  
(1000 m<sup>2</sup> Reinraum CI 10, CMOS)
- Mitarbeiter: 200
- Budget:
  - ⇒ 20...25% Grundfinanzierung
  - ⇒ **75...80% Projektfinanzierung**
- [www.iisb.fraunhofer.de](http://www.iisb.fraunhofer.de)

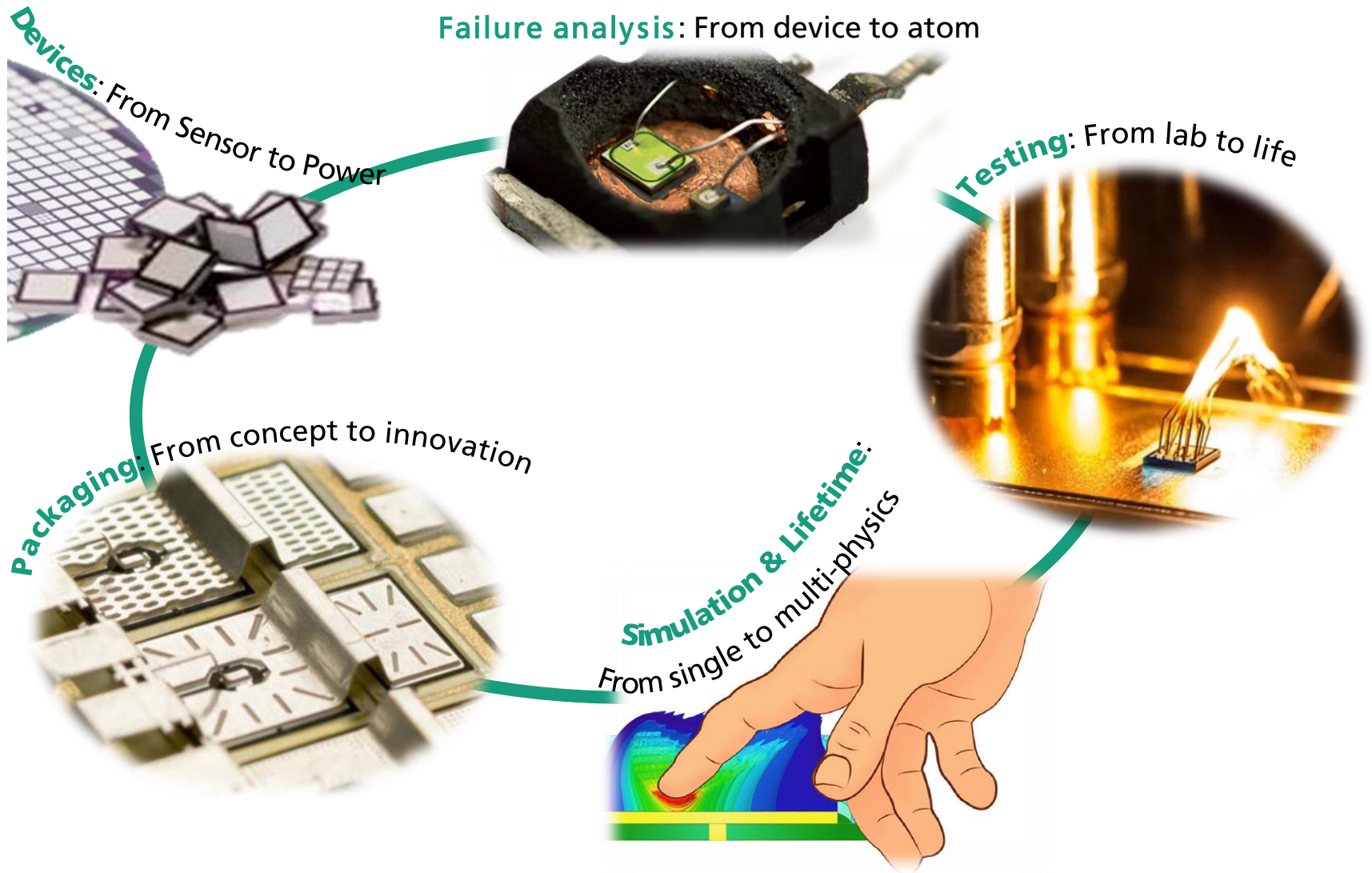
Außenstelle Nürnberg



# 1. Vorstellung des Fraunhofer IISB: **The Whole Widget**



# 1. Vorstellung des Fraunhofer IISB: **Abteilung BMZ**



## 2. Einführung Leistungselektronik



# 3. Lebensdauertests für Leistungselektronik

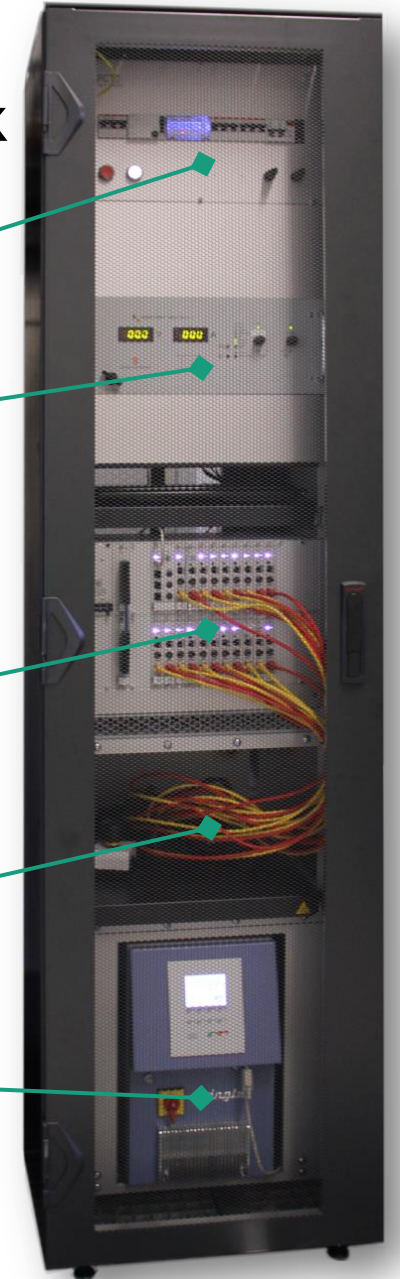
- Ziel: Abschätzung der Produkt-Lebensdauer durch Labortests
- Beispiel: Infineon PowerBlock
- Anwendungen
  - Verkehrszüge
  - Windkraftanlagen
  - Industrieantriebe
- Während der Anwendung treten Temperaturwechsel auf
  - Durch An- und Ausschalten der Bauteile
  - Durch Änderung der Außentemperaturen
- Fokus auf Eigenerwärmung der Bauteile
  - Prüfung durch aktive Lastwechseltests





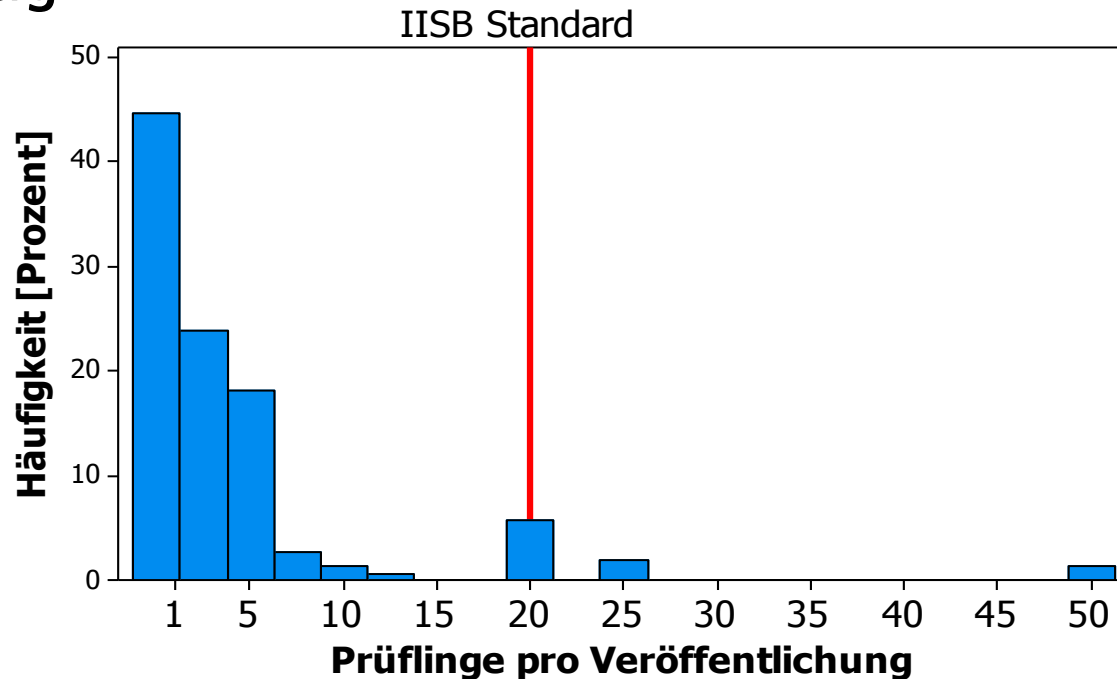
### 3. Lebensdauertests für Leistungselektronik

- Aktive Lastwechseltests
- 6 unabhängige Messplätze
- Energieeinspeisung
- Netzteil
  - 400A / 35V
  - 800A / 15V
  - 2000A / 20V
- Messkarten
- Testkammer für bis zu 20 Prüflinge
- Temperiergerät
  - -60..350°C



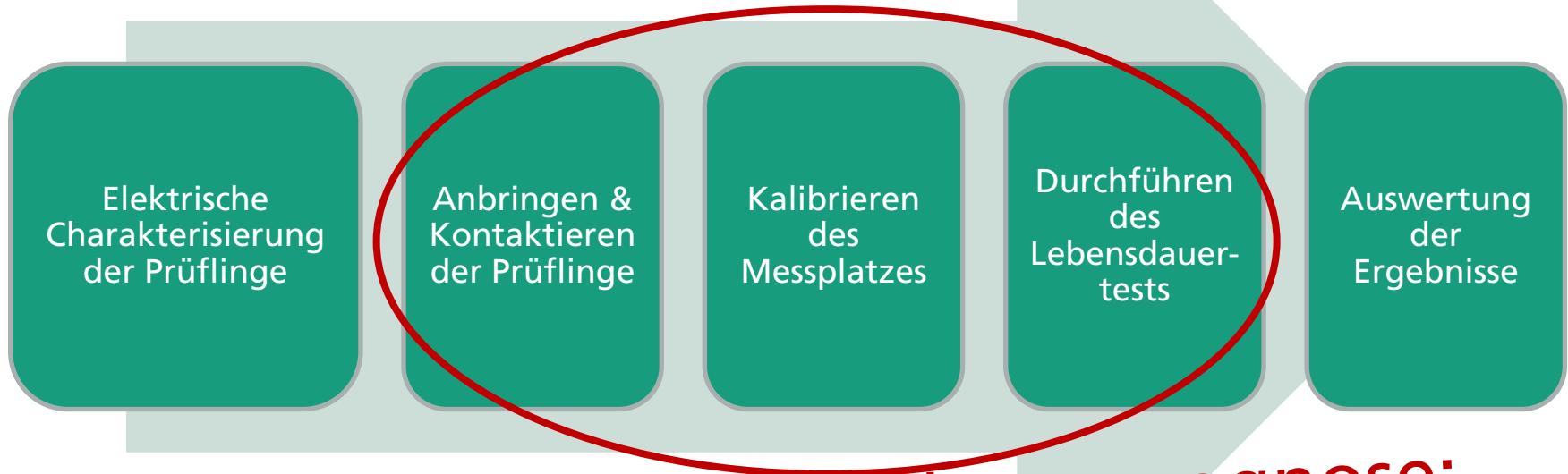
# 3. Lebensdauertests für Leistungselektronik

- Studie über publizierte Ergebnisse der letzten 20 Jahre<sup>1</sup>
  - Aufgrund hoher Kosten meist nur wenige Prüflinge pro Test
  - **Deshalb: Kenntnis über Messunsicherheit besonders wichtig**



1) Hutzler, A. et. al. "Power Cycling Community 1994-2014", Bodo's Power Magazine, 2014

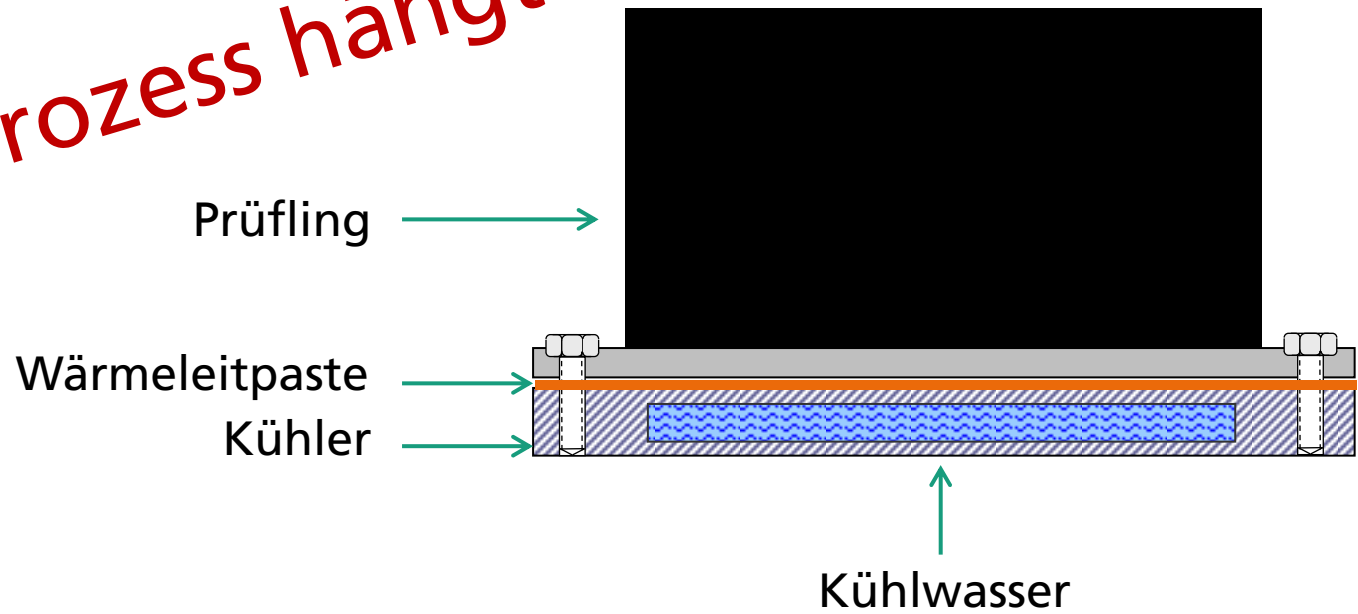
### 3. Lebensdauertests für Leistungselektronik



**Für präzise Lebensdauerprognose:  
Einfluss Prüfer/Messsystem/Prüflinge  
bestimmen, um Fehleinschätzungen zu  
vermeiden**

### 3. Lebensdauertests für Leistungselektronik

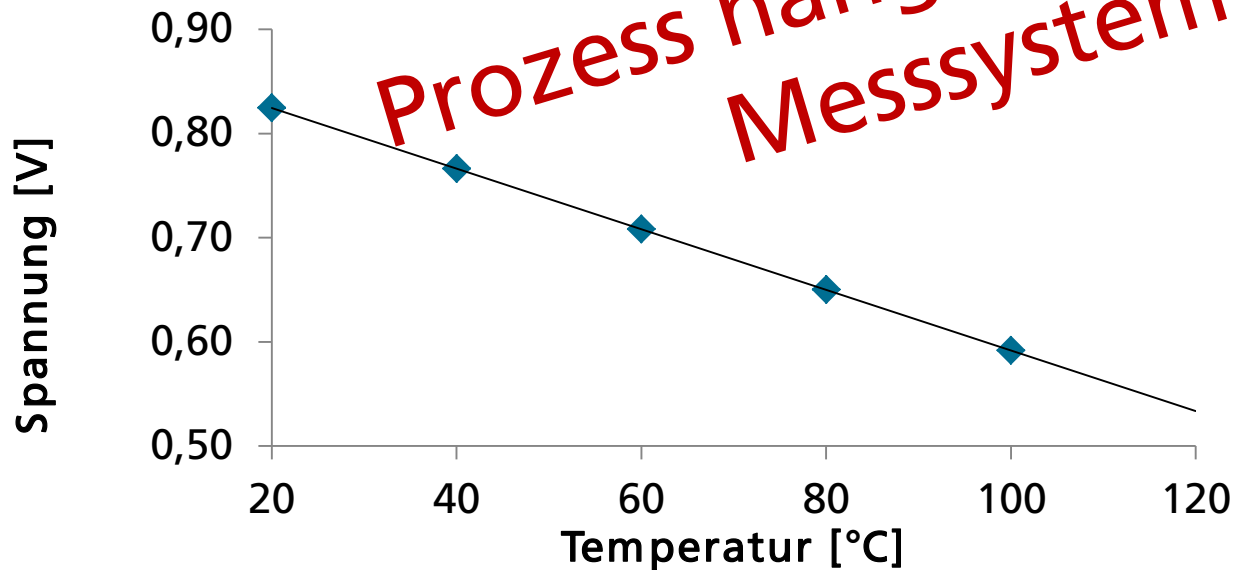
- Anbringen und Kontaktierung der Prüflinge (DUTs)
  - Aufbringen der Wärmeleitpaste auf die Rückseite der Prüflinge
  - Anbringen der Prüflinge auf den Kühler mittels Schraubverbindung
  - Anbringen der Kabel zur elektrischen Kontaktierung



# 3. Lebensdauertests für Leistungselektronik

## ■ Spannungs-Temperatur-Kalibrierung

- Messung der Spannung bei unterschiedlichen Temperaturen für jeden Prüfling
- Konstanter Messstrom von 30 mA
- Berechnung der Geradengleichung



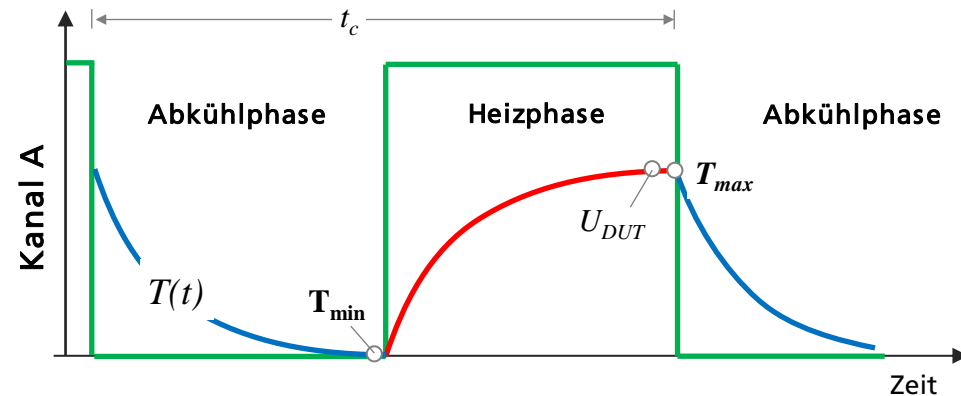
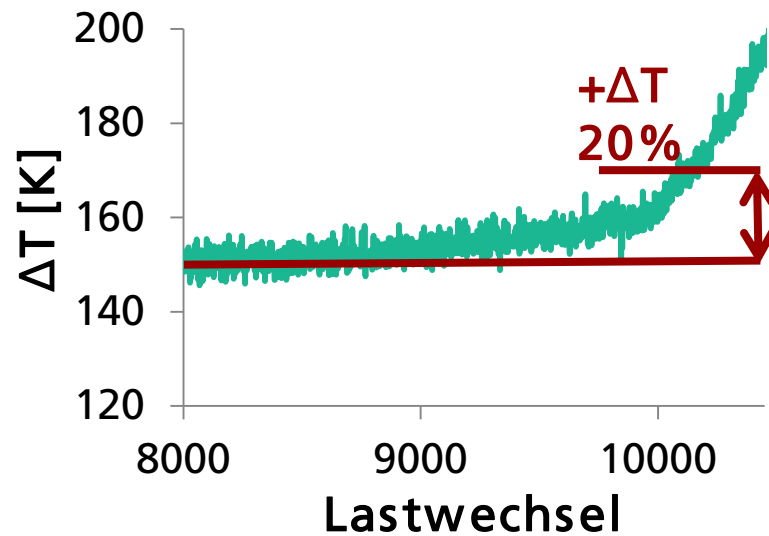
# 3. Lebensdauertests für Leistungselektronik

## ■ Online-Messung und Auswertung der Prüflinge

- Elektrischen Eigenschaften:  $U$ ,  $I$ ,  $P (=U \cdot I)$
- Aus elektrischen Werten mittels Kalibrierung:  
Thermischen Eigenschaften:  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $\Delta T (=T_{max} - T_{min})$ ,  $R_{th} (= \Delta T / P)$

## ■ Ausfallkriterium

- 20% Anstieg des Temperaturhubs  $\Delta T$



# 3. Lebensdauertests in der Leistungselektronik

## ■ Lebensdauermodell von Infineon<sup>1</sup>

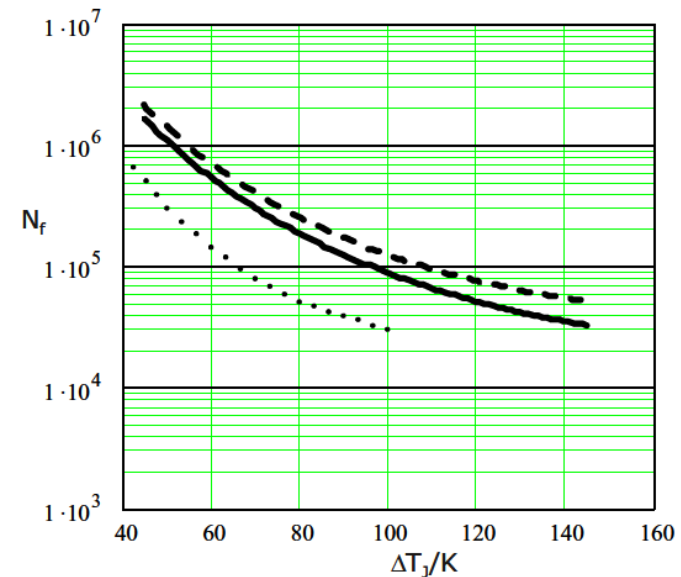
$$N_f := K \cdot \Delta T_J^{\beta_1} \cdot e^{\frac{\beta_2}{T_j + 273}} \cdot t_{on}^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4} \cdot V^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6} \quad (1)$$

mit  $T_j$ : Maximale Temperatur,  $I$ : Strom pro Bonddraht,  $t_{on}$ : Heizzeit)

## ■ Lebensdauer für Standard-Module( $\Delta T=100K$ ): 29913 Lastwechsel

## ■ Abschätzung eines Messfehlers:

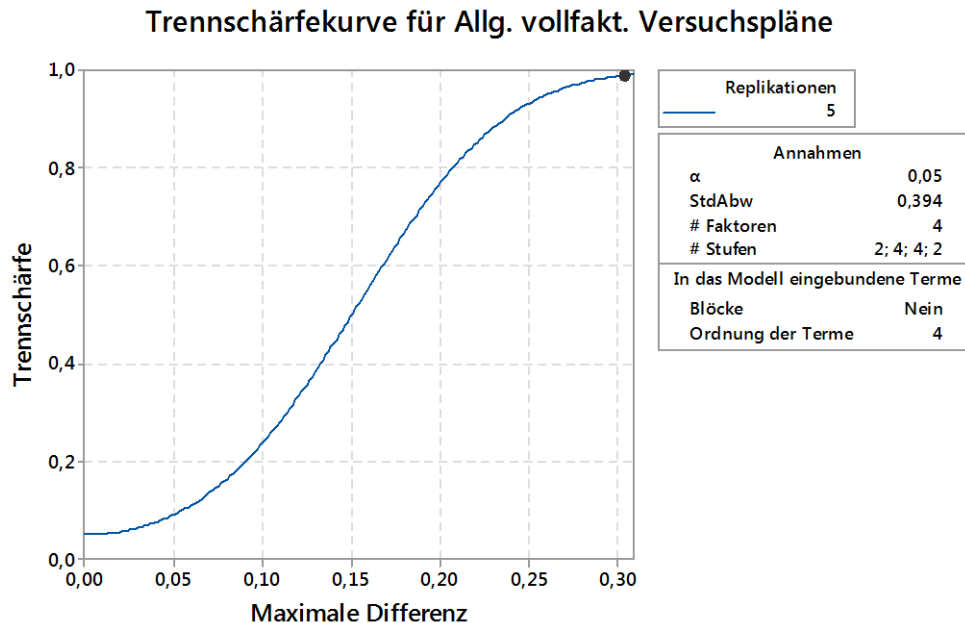
- +1K: -1286 Lastwechsel = -4,3%
- -1K: +1358 Lastwechsel = +4,5%
- +2K: -2505 Lastwechsel = -8,4%
- -2K: +2791 Lastwechsel = +9,3%
- +3K: -3660 Lastwechsel = -12,2%
- -3K: +4307 Lastwechsel = +14,4%



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

# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

- Messsystemanalyse Typ 1: 80 Messungen
- Standardabweichung  $\Delta T$ : 0,394
- Verwendung für Trennschärfeabschätzung
- Ergebnis: Effekt von  $0,3^{\circ}\text{C}$  mit 5 Replikationen zu 99% auflösbar





# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

- Versuchsplan – Faktoren

- Prüfer: 2



- Prüflinge: 4



- Messkarten: 4



- Kühlmitteltemperaturen: 20°C und 60°C



- Antwort:  $\Delta T (=T_{\max}-T_{\min})$  und  $R_{\text{th}} (= \Delta T/P)$

- Mehrstufiger faktorieller Versuchsplan (optimales Design)

- Blockbildung (4 Messungen pro Block)

- Ergebnis: 16 Durchläufe

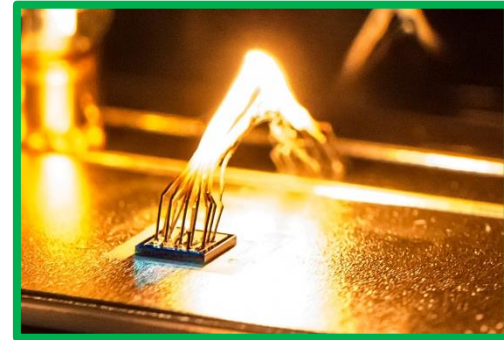
# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

- Versuchsplan – Auswertung mittels Regression + ANOVA
- Signifikant ( $\alpha = 0,05$ ; p-Wert  $< 0,05$ )

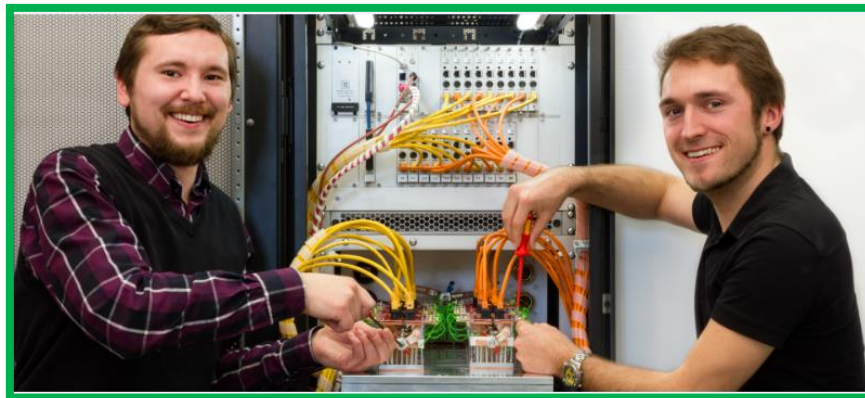
- DUT
- $T_{\min}$
- Prüfer



+



+



# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

- Signifikant ( $\alpha = 0,05$ , p-Wert  $< 0,05$ )

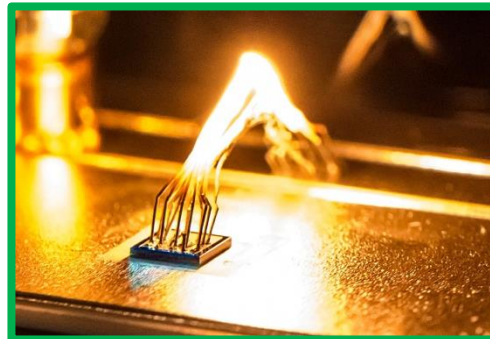
- Nicht signifikant

  - Messkarte



- Wechselwirkungen

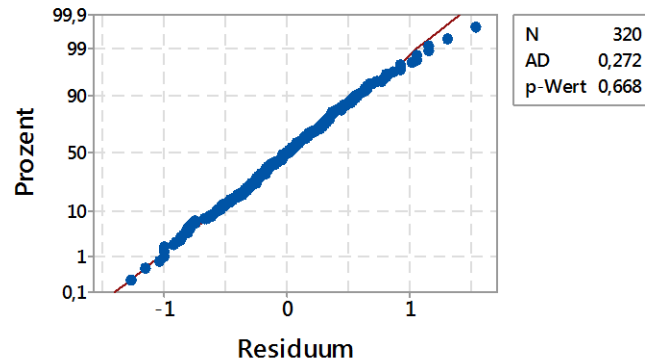
  - DUT ·  $T_{\min}$



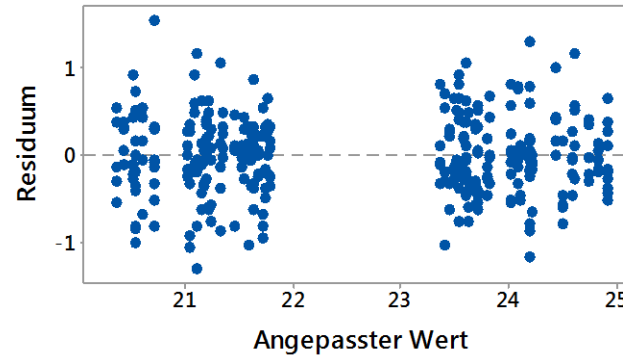
# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

## ■ Residuendiagramme

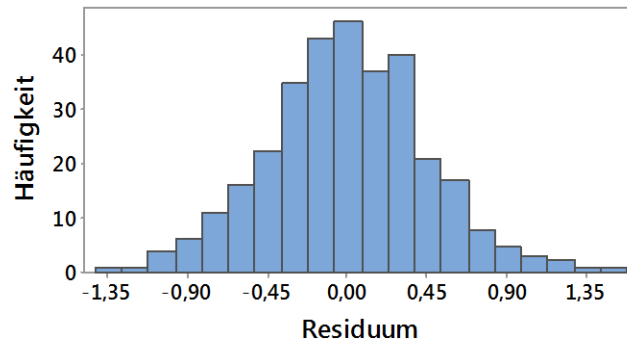
Wahrscheinlichkeitsnetz für Normalverteilung



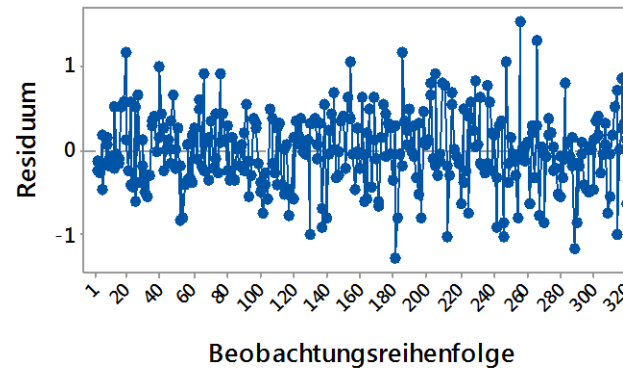
Residuen vs. Anpassungen



Histogramm



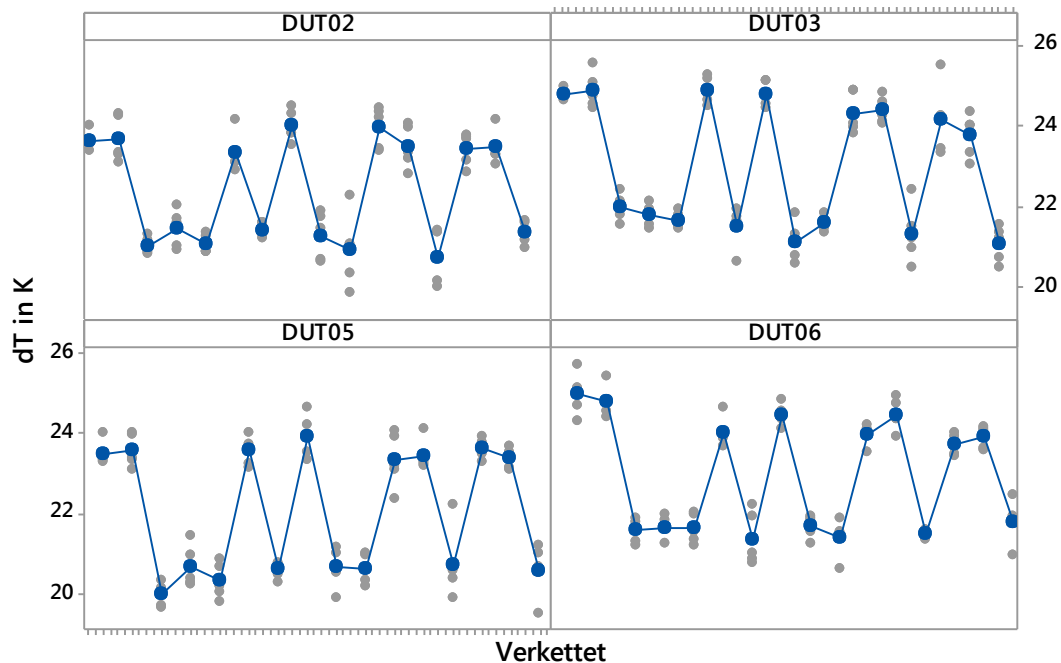
Residuen vs. Reihenfolge



# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

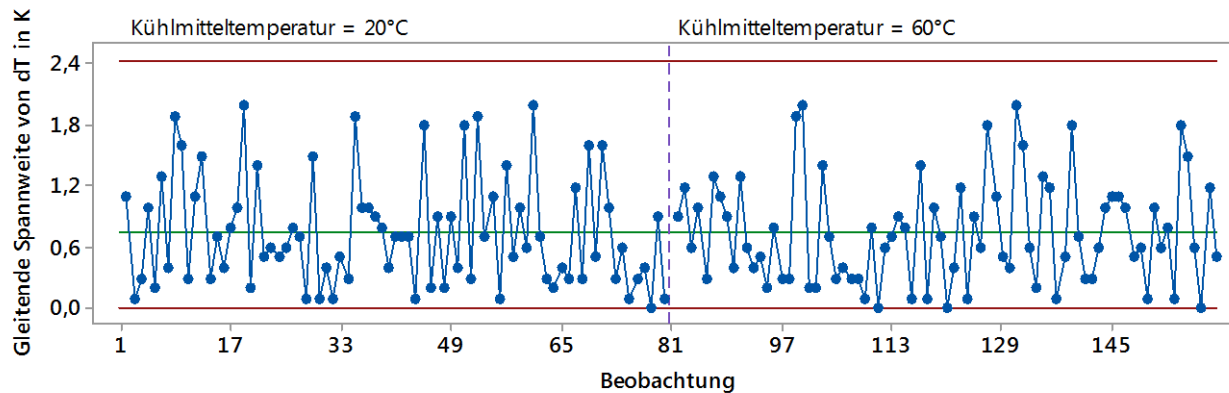
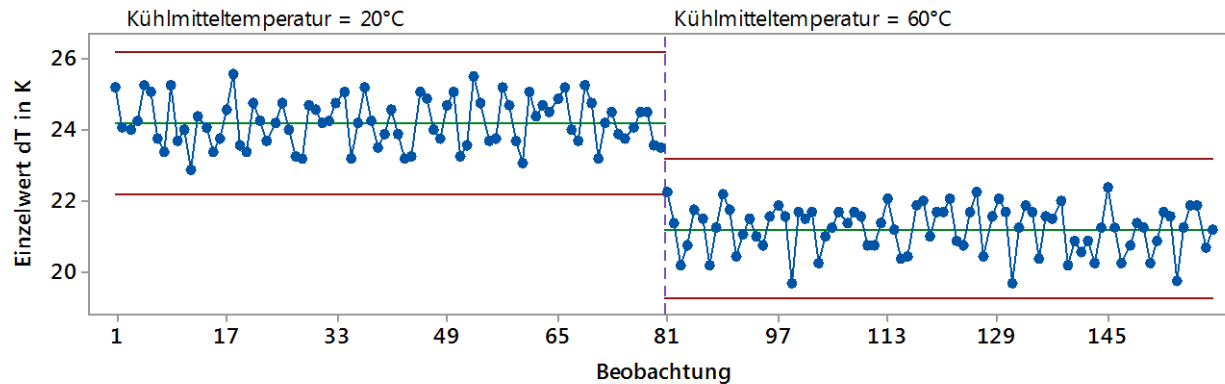
- Anzeigen einzelner DUTs

- Erstellung einer Verkettungsvariable aus  $T_{\min}$ , MW-ID, Prüfer
- Einfluss der DUTs für unterschiedliche Bedingungen erkennbar



# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

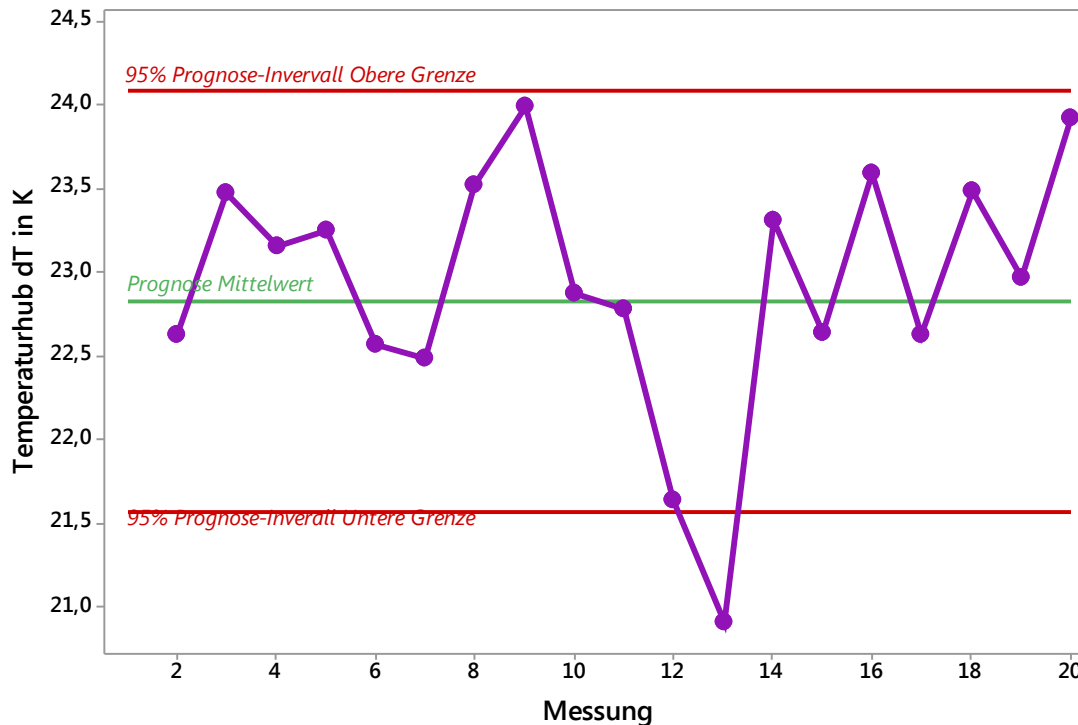
- Versuchsplan – Auswertung nach Spannweite/Streuung
- Streuung bleibt für alle Bedingungen gleich



# 4. Messsystemanalyse mittels DOE

## ■ Verifizierung des Modells

- Prognose des  $\Delta T$  bei 40°C Kühlmitteltemperatur anhand Modell
- Temperaturhub  $\Delta T$  kann prognostiziert werden



## 4. Messsystemanalyse mittels DOE

- R&R (gesamt) für 20°C und 60°C Kühlmitteltemperatur nahezu identisch
  - Messsystem geeignet
  - Aber Prüfer signifikant, d.h. Fachpersonal benötigt

<b>R&amp;R Gesamt in %</b>	<b>10,8</b>
Wiederholbarkeit	9,5
Reproduzierbarkeit	5,3
Prüfer	5,3
Messkarte	0,0
Zwischen den Teilen	9,4
Prüfling	9,4
Gesamtstreuung	14,2



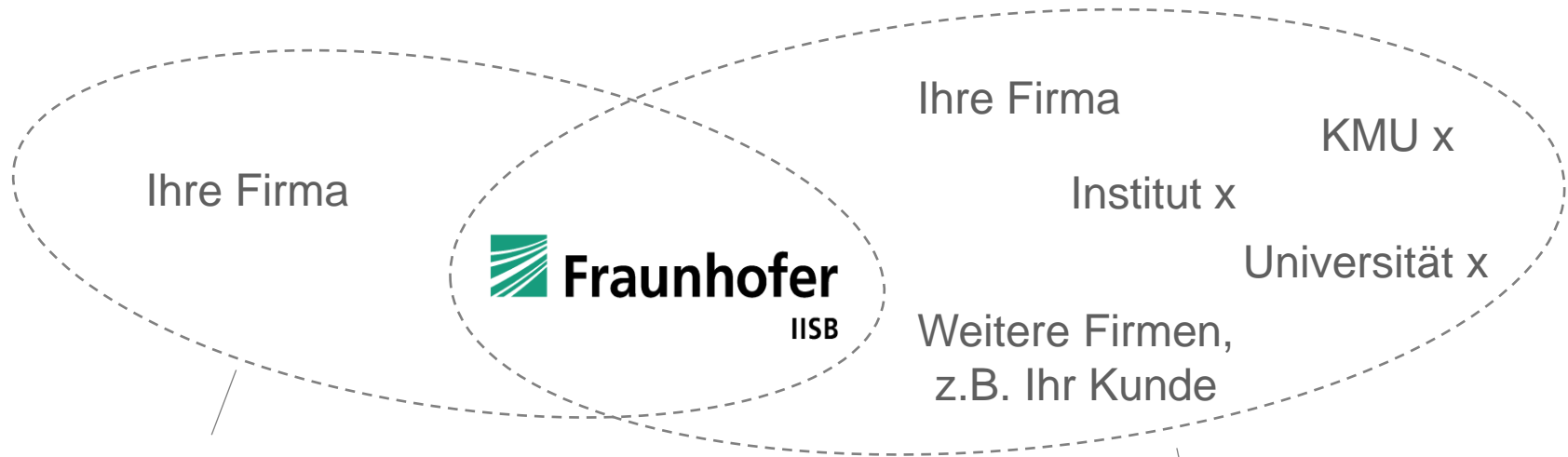
# 5. Zusammenfassung und Ausblick

- Fazit Messsystemanalyse mittels statistischer Versuchsplanung
  - Reduzierung des Aufwandes durch optimales Design
  - Einfluss des Messsystems, der Prüfer und Umgebungsbedingung kann gut aufgelöst werden
  - Durch DOE Auswertung: Umfangreicherer Informationsgewinn
- Fazit Messsystemanalyse des Lastwechseltests
  - Kein signifikanter Einfluss: Messkarten
  - Signifikanter Einfluss: Umgebungstemperatur, Prüfling
  - Einfluss durch den Prüfer, d.h. Unterschied zwischen Fachpersonal und ungeschulten Prüfer erkennbar
  - Reproduzierbare Ergebnisse bei gewissenhaftem Aufbau (genaue Arbeitsanweisung, Fotodokumentation) möglich

# 5. Zusammenfassung und Ausblick

- Messsystemanalyse wird bei Dauertests oft vernachlässigt, da...
  - Zeitintensiv
  - Sehr komplex (geschultes Fachpersonal notwendig)
  - Aufwändige Durchführung
  - MSA für jeden neuen Aufbau notwendig
  - Mangelndes Verständnis für die Notwendigkeit
  - Geringe Bereitschaft die Kosten zu tragen
- Schäden durch fehlerhafte Lebensdauerbewertungen sind **enorm**:
  - Datenblätter/Publicationen mit falschen Angaben
  - Entscheidung für/gegen ein Produkt/Zulieferer/Technologie
  - Fehlerhafte Auslegung (sicherheitsrelevanter) Bauteile

# Wege der Zusammenarbeit mit Fraunhofer



## Bilaterale Projekte

Von Messungen, Ausfallanalysen, Studien, Aufbau von Prototypen bis zu

- Langfristigen Kooperationen
- Schulungen und Beratung
- Vollständigen Systementwicklungen
- ➔ Fokus auf direkter Verwertung der Ergebnisse
- ➔ Projektergebnisse sind Eigentum des Kunden
- ➔ Projektergebnisse werden streng vertraulich behandelt

## Öffentlich geförderte Projekte

- Förderung durch öffentliche Geldgeber wie z.B. Bund, Länder oder EU
- Bildung es Konsortiums aus Industriefirmen, Instituten, Universitäten
- ➔ Fokus auf Forschung und Networking
- ➔ Handhabung der Projektergebnisse wird mit Konsortialvertrag geregelt

# Denken Sie an die Leistungselektronik!

[Aaron.Hutzler@iisb.fraunhofer.de](mailto: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](http://www.iisb.fraunhofer.de)

Mein Dank geht an Björn Noreik für die umfangreiche Unterstützung.