

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

Sächsischer Arbeitskreis Elektronik – Technologie

57. Treffen

Prof. Mathias Nowotnick  
Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik  
Universität Rostock

[mathias.nowotnick@uni-rostock.de](mailto:mathias.nowotnick@uni-rostock.de)

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

Mathias Nowotnick



## Gliederung:

Anforderungen AVT/Leistungselektronik  
Poren in Lötverbindungen  
Begriff Zuverlässigkeit  
Typische Schädigungsmechanismen  
Prüfung der thermo-mechanischen Eigenschaften  
Einflüsse auf die thermo-mechanischen Eigenschaften  
Alternative Technologien

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

Parameter	Consumer	Industrial	Automotive
Temperaturbereich	0°C bis +40°C	-10°C bis +70°C	-40 bis +85 / 125 / 155 / ..°C
Betriebsdauer	1 - 3 Jahre	5 - 10 Jahre	10 - 15 Jahre
Vibration	vernachlässigbar	0 - 1000 Hz	0 - 2000 Hz
Beschleunigung	vernachlässigbar	50 m/s <sup>2</sup>	500 m/s <sup>2</sup>
Chemische Einflüsse	kaum	Umwelt	Fahrzeug und Umwelt
Feuchte	vernachlässigbar	Umwelt	0 % r. F. bis Watfähigkeit
Tolerierte Feldausfallmenge	< 10 %	< 1 %	Ziel: Null-Fehler-Rate!
Dokumentation des Ausfallverhaltens	nein	bedingt	Ja
Langzeitversorgung	nein	bedingt (bis 5 Jahre)	MobiloLife: bis 30 Jahre

## Anforderungen an Elektronik-Baugruppen

Quelle: W. Kempe, DaimlerChrysler

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

Metall	elektrische Leitfähigkeit, 10 <sup>6</sup> S/m	thermische Leitfähigkeit, W/mK
Silber	62	429
Kupfer	58	390
Gold	45	317
Aluminium	38	237
Zinn	9,2	67
SnAgCu - Lot	8,0	ca. 60
SnAg3,5 - Lot	7,7	ca. 60
Sn63Pb37 - Lot	5,6	50
Blei	4,8	35
Pb95Sn5 - Lot	4,3	ca. 30

Wiedemann-Franzsches Gesetz:  $\frac{\lambda_{th}}{\sigma_{el} \cdot T} = const.$

## Elektrische und thermische Leitfähigkeit ausgewählter Metalle

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

Beispiel:

5x5 mm<sup>2</sup> Chip / Lotspalt 50µm / Strom 10A / Leistung 120W / Substrat 100°C ideal gekühlt

**Ag-gefüllter Leitklebstoff:**

0,5·10<sup>6</sup> S/m;

2 W/mK;

10 µm

Widerstand: 0,8 µΩ.

Spannungsabfall: 8 µV

Verlust: 80 µW

**SnAgCu-Lot:**

8·10<sup>6</sup> S/m

60 W/mK

50 µm

Widerstand: 0,25 µΩ.

Spannungsabfall: 2,5 µV

Verlust: 25 µW



denkbar: "Cu-gefüllte" Lötverbindungen durch übereutectische Lote, feste Ausscheidungen sind auf etwa 50 Vol% begrenzt  
theoretisch mögliche Leitfähigkeit 33·10<sup>6</sup> S/m statt 8·10<sup>6</sup> S/m

Verlust: 6 µW

## Größenordnungen elektrischer Verluste

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

Beispiel:

5x5mm<sup>2</sup> Chip / Lotspalt 50µm / Strom 10A / Leistung 120W / Substrat 100°C ideal gekühlt

**Ag-gefüllter Leitklebstoff:**

0,5·10<sup>6</sup> S/m;

2 W/mK;

10 µm

Thermischer Widerst.: 0,2 K/W

Chiptemperatur: 124°C

**SnAgCu-Lot:**

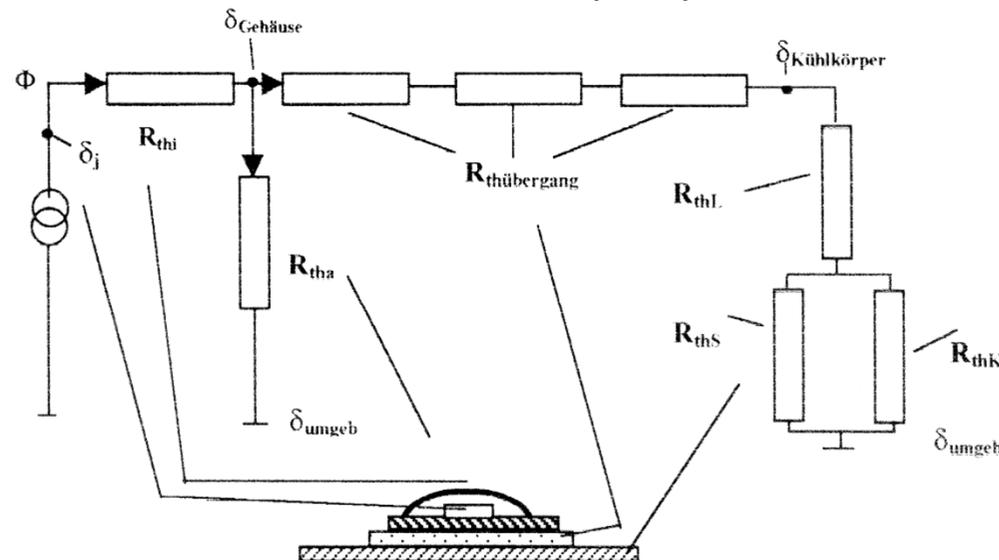
8·10<sup>6</sup> S/m

60 W/mK

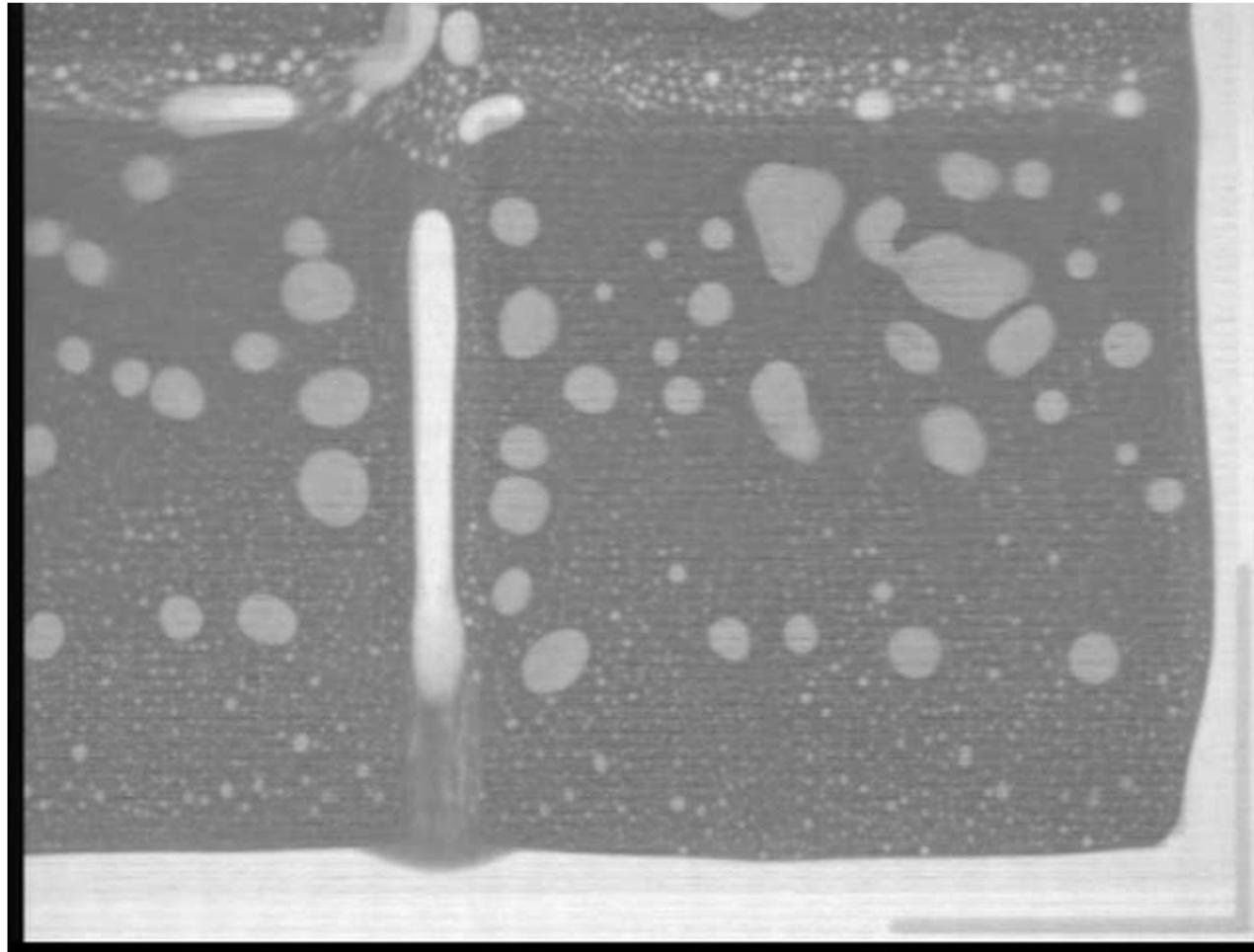
50 µm

Thermischer Widerst.: 0,03K/W

Chiptemperatur: 104°C

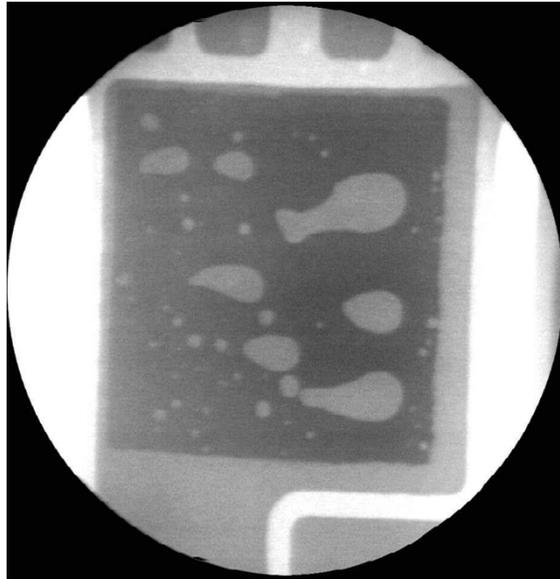


## Größenordnungen thermischer Verluste

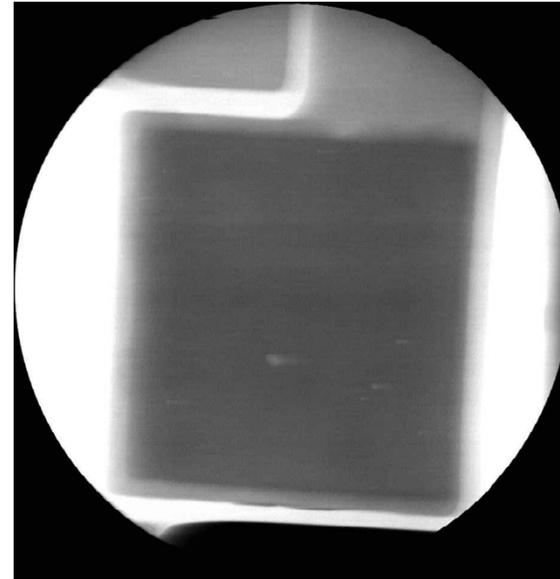


## Untersuchungen zur Porenentstehung

Quelle: AK "Avoid a Void" / M. Poech, FhG ISiT



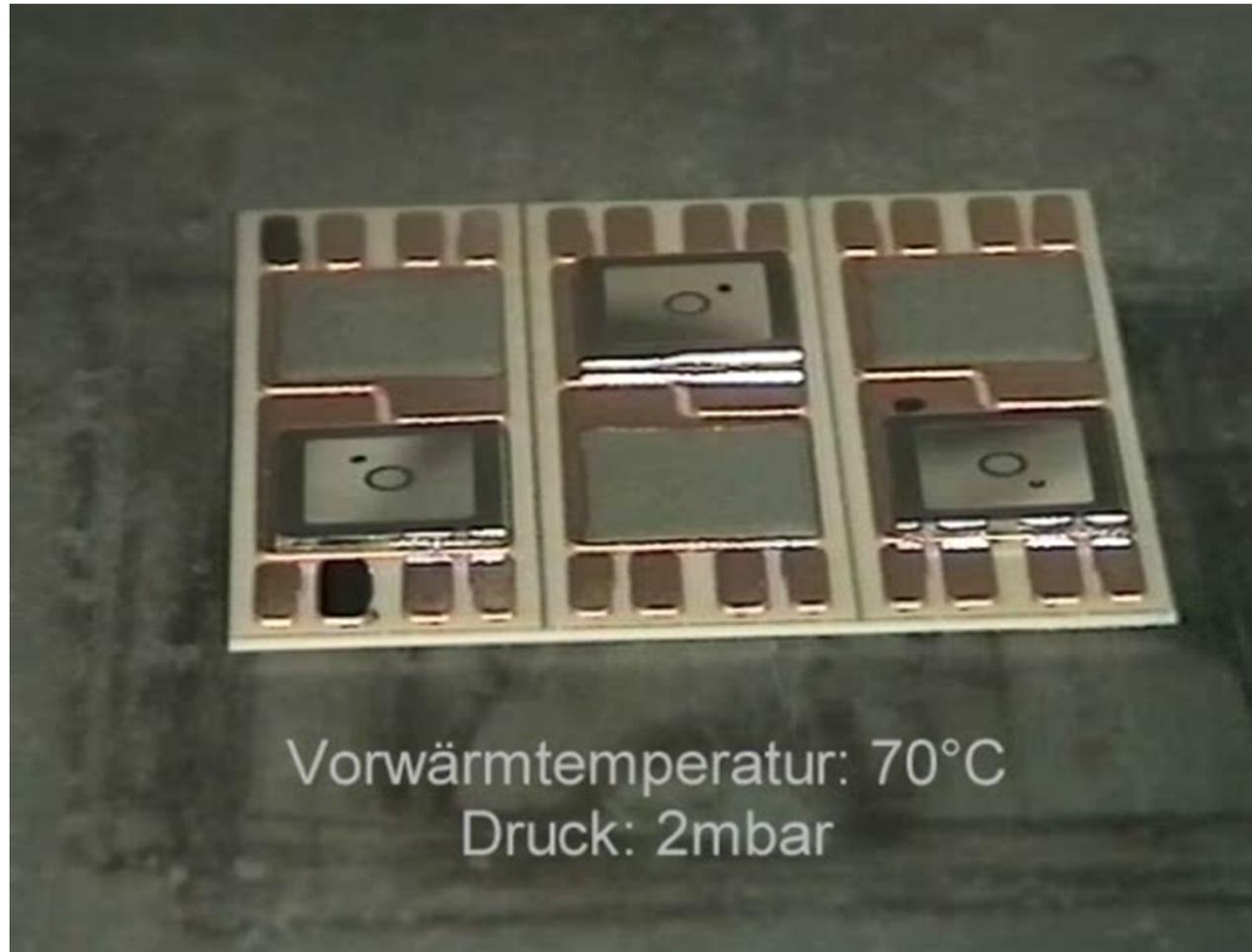
Flächige Chip-Lötung  
ohne Vakuum



Flächige Chip-Lötung  
mit Vakuum

## Vermeidung von Poren durch Vakuumlöten

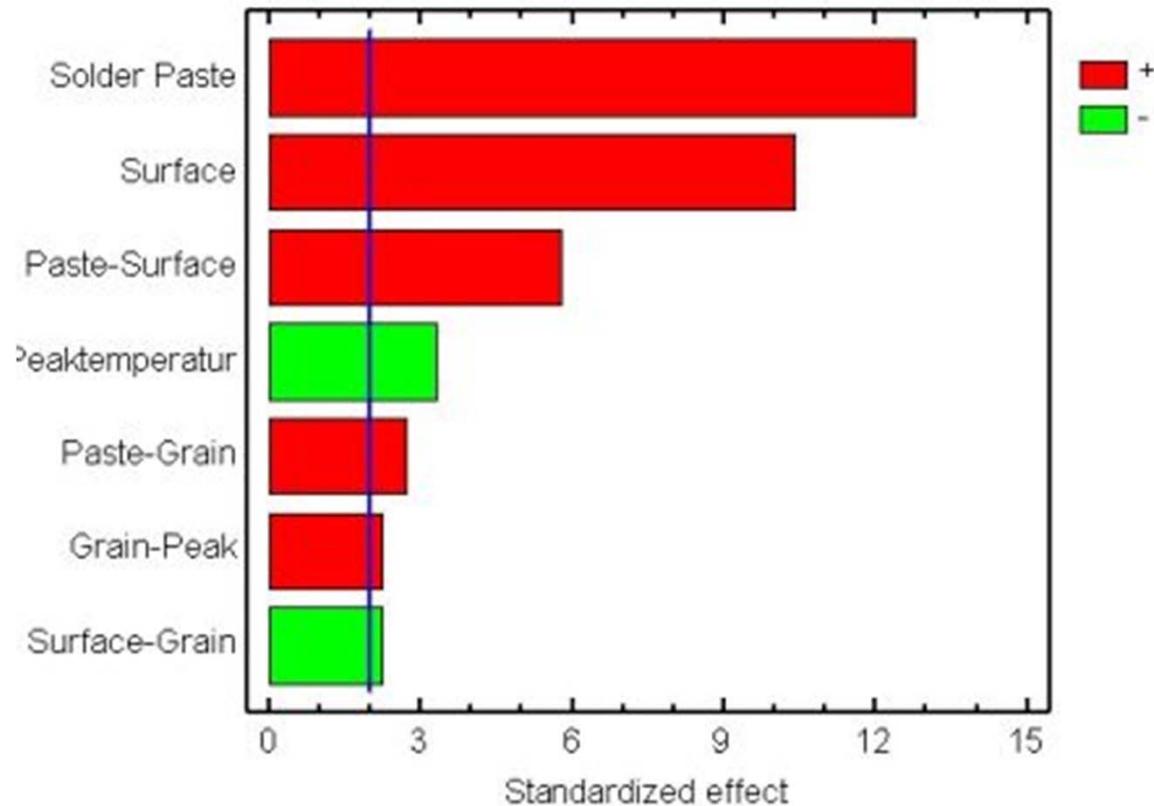
# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik



**Für das Löten im Vakuum müssen geeignete Lotpasten verwendet werden**

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

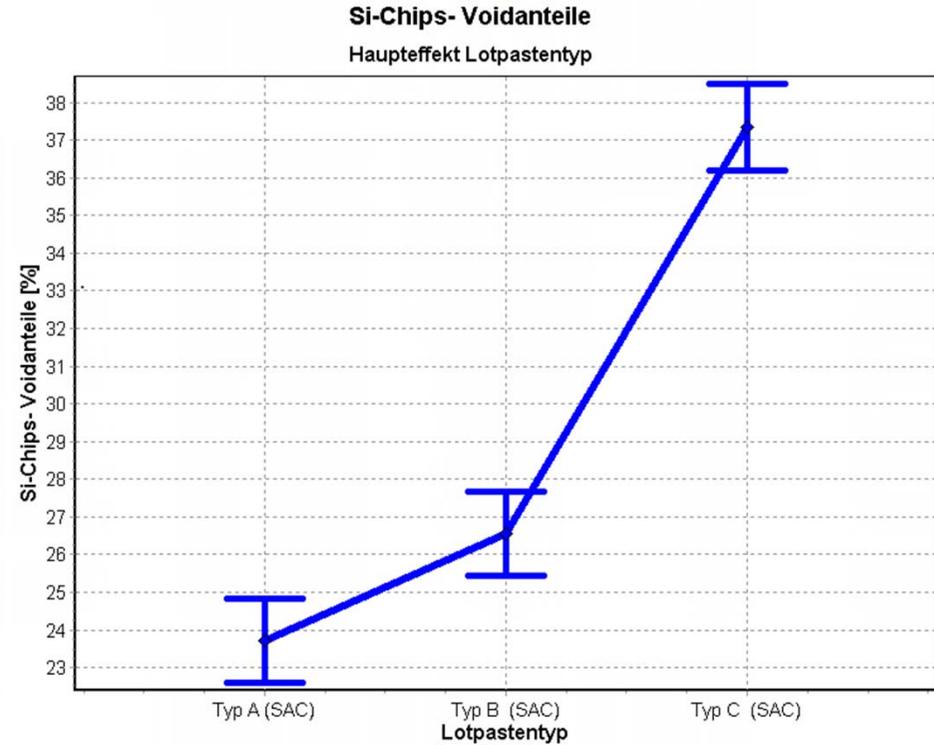
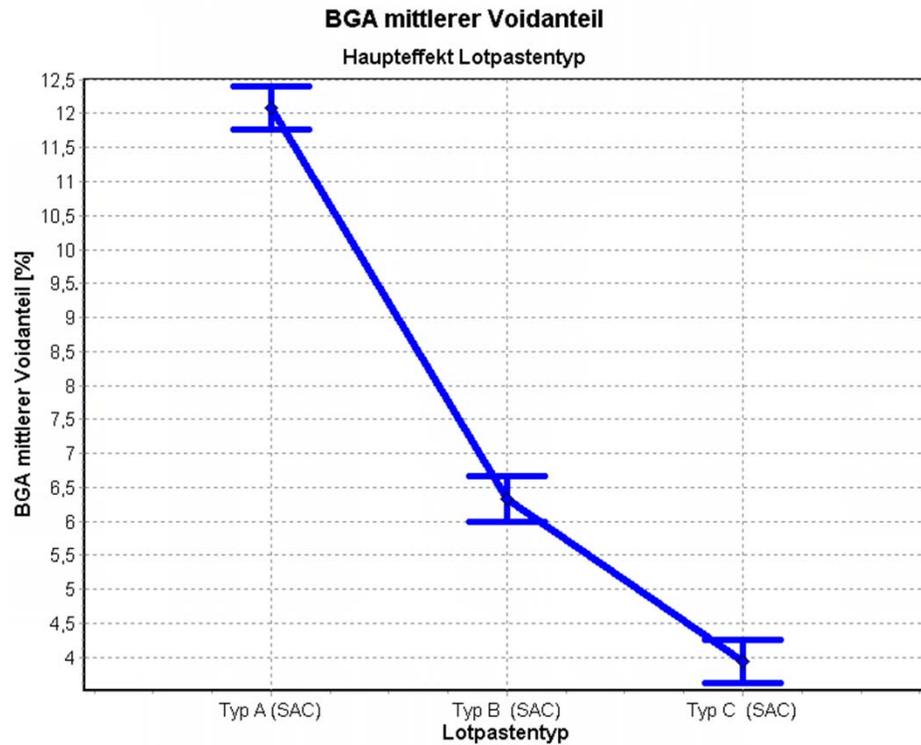
Pareto chart mittlerer Voidgehalt [%] Endzustand



## Pareto-Diagramm - Einflüsse auf den mittleren Porenanteil

Quelle: AK "Avoid a Void" / H. Wohlrabe, TU Dresden

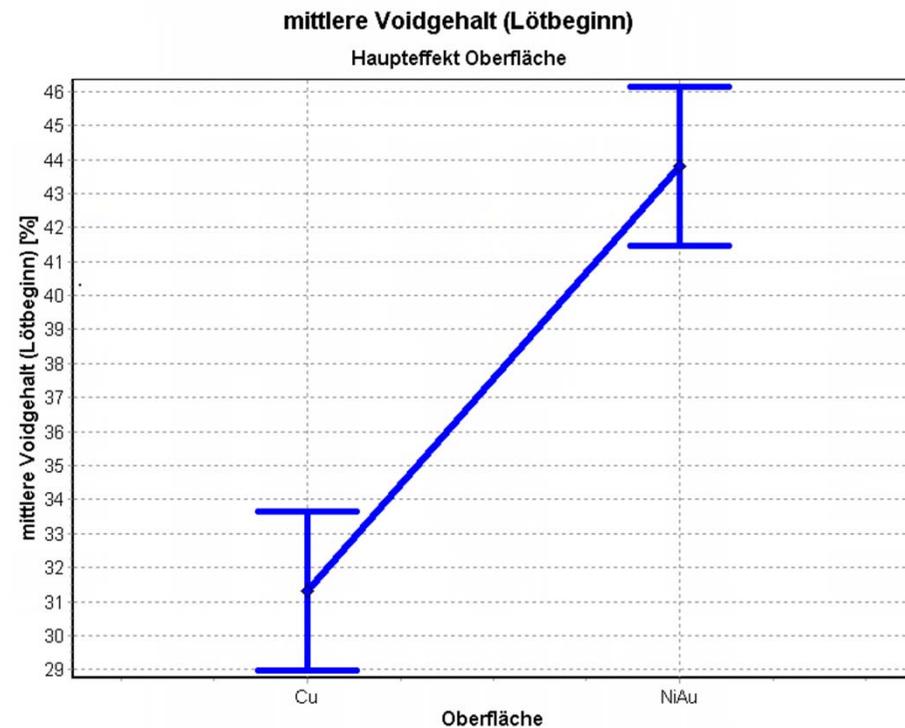
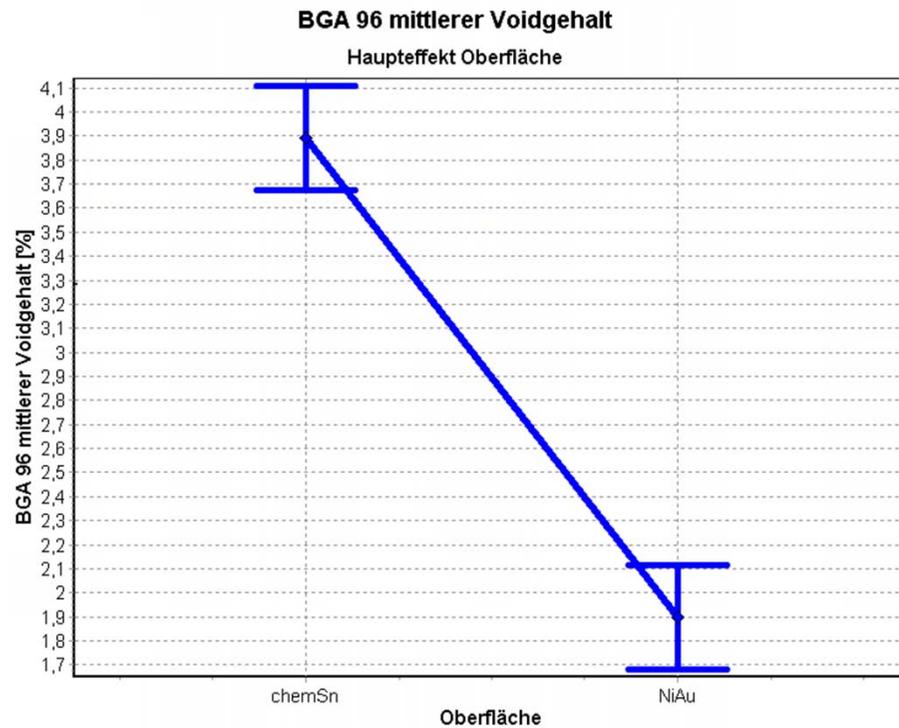
# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik



## Vergleich des Pasteneinflusses für punktuelle und flächige Lötverbindungen

Quelle: AK "Avoid a Void" / H. Wohlrabe, TU Dresden

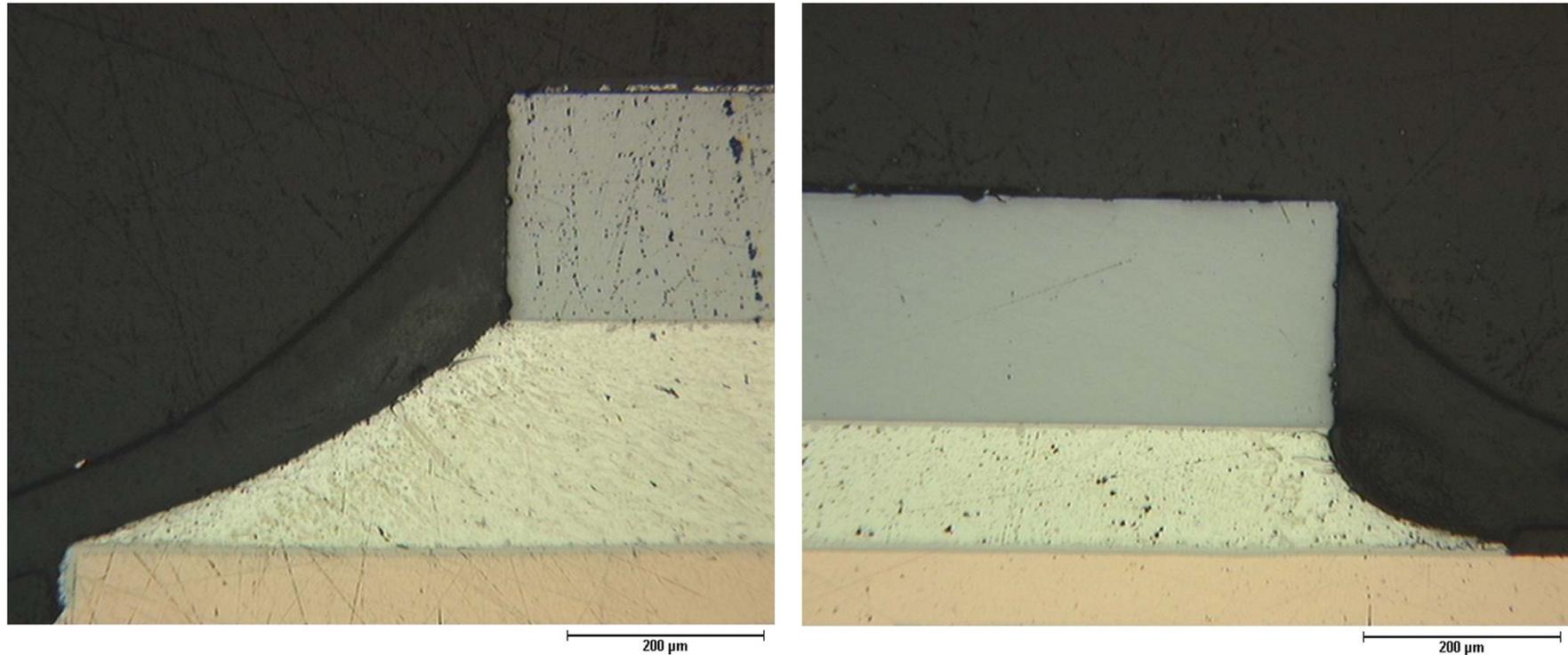
# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik



## Vergleich des Oberflächeneinflusses für punktuelle und flächige Lötverbindungen

Quelle: AK "Avoid a Void" / H. Wohlrabe, TU Dresden

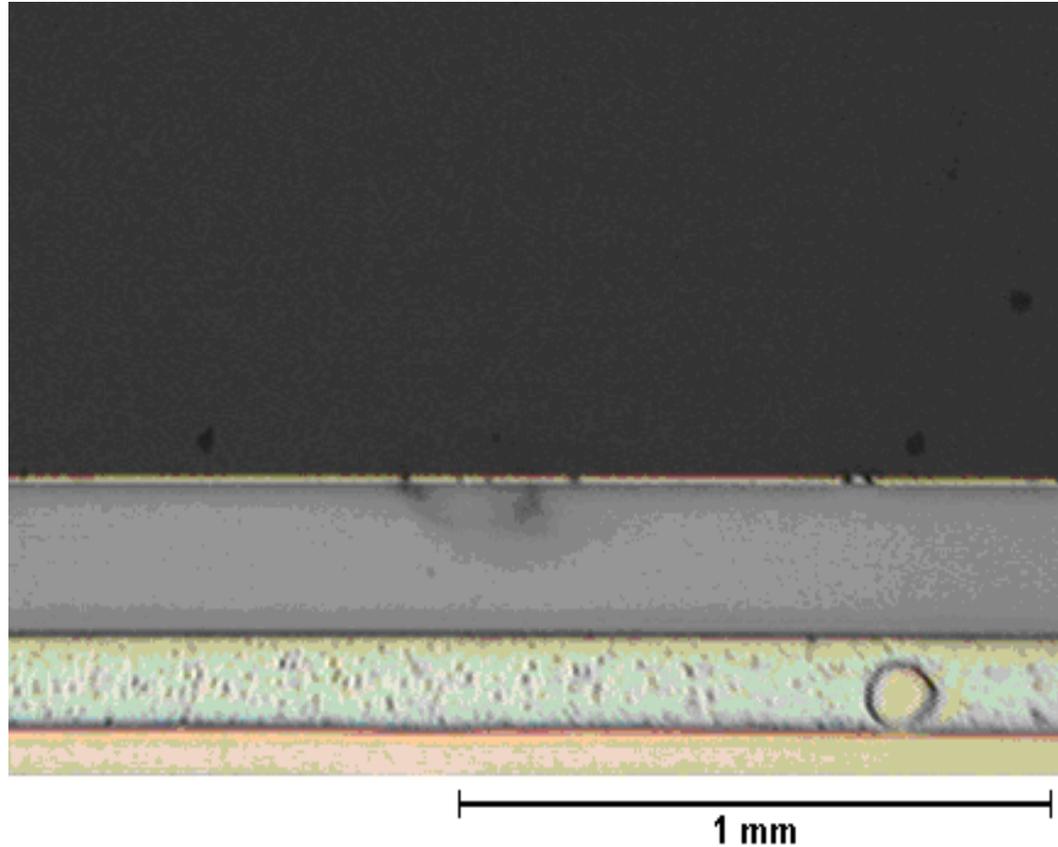
# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik



Poren führen zu einem ungleichmäßigen Lotspalt (links 210 µm, rechts 110 µm)

## Verkipfung von Bauelementen durch Poren im Lotspalt

Einfluss der Spaltdicke auf die Dehnung:  $\varepsilon = \frac{l \times \Delta T \times \Delta \alpha}{h}$



## Kontrollierte Lotspaltdicke durch eingelagerte Kupferkugeln

[Quelle: Kuhlmann, Frederick u.a.: US Patent 20060255476]

## Begriffe:

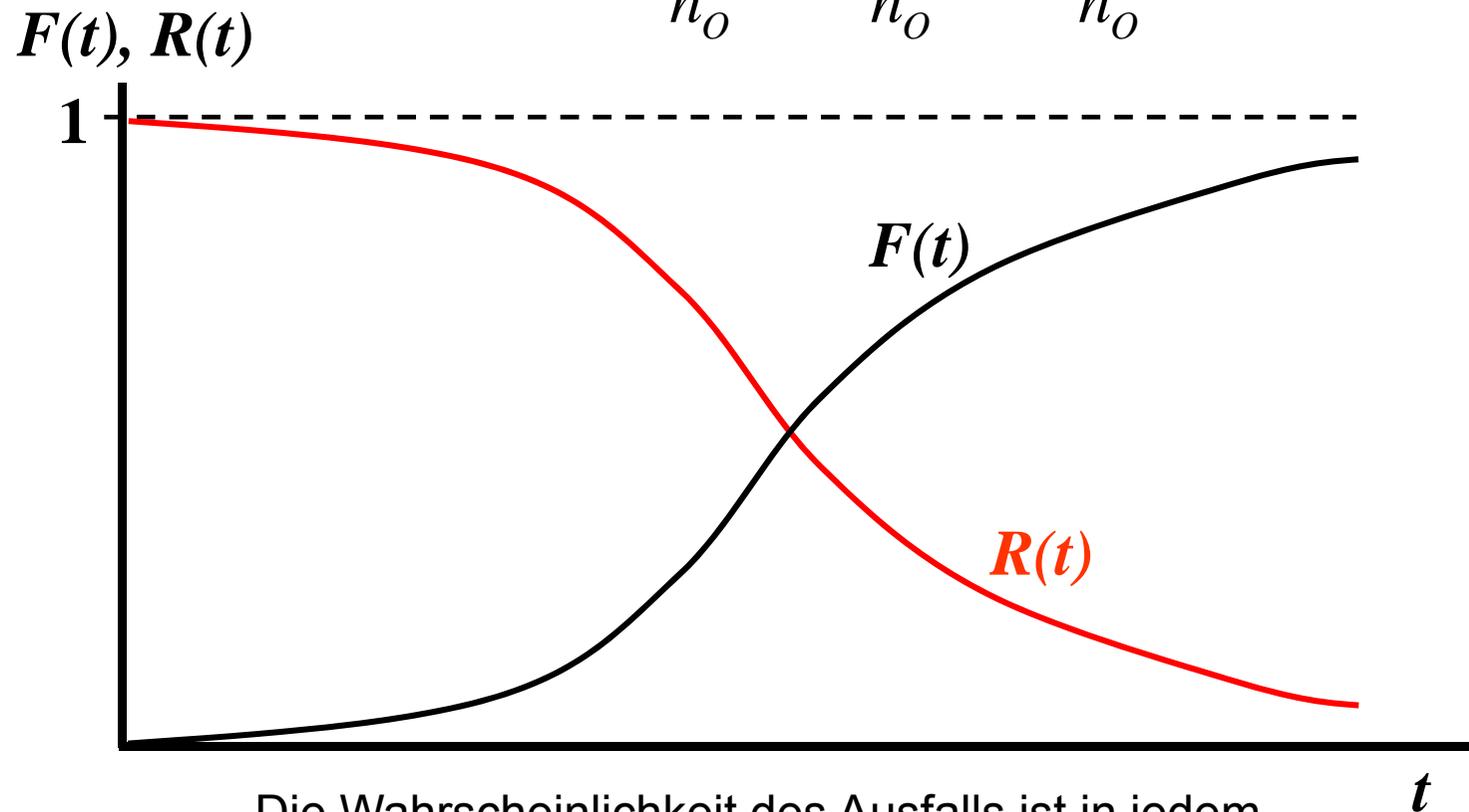
Qualität ist (DIN EN ISO 9000:2005) der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt ...

*(lat.: Qualitas = Beschaffenheit, Merkmal, Eigenschaft, Zustand)*

Zuverlässigkeit ist (DIN 40041/40042) die **Fähigkeit** einer Einheit, denjenigen durch den **Verwendungszweck** bedingten **Anforderungen** zu genügen, die an das Verhalten ihrer **Eigenschaften** während einer gegebenen **Zeitdauer** gestellt sind.

## Ausfall – und Funktionswahrscheinlichkeit

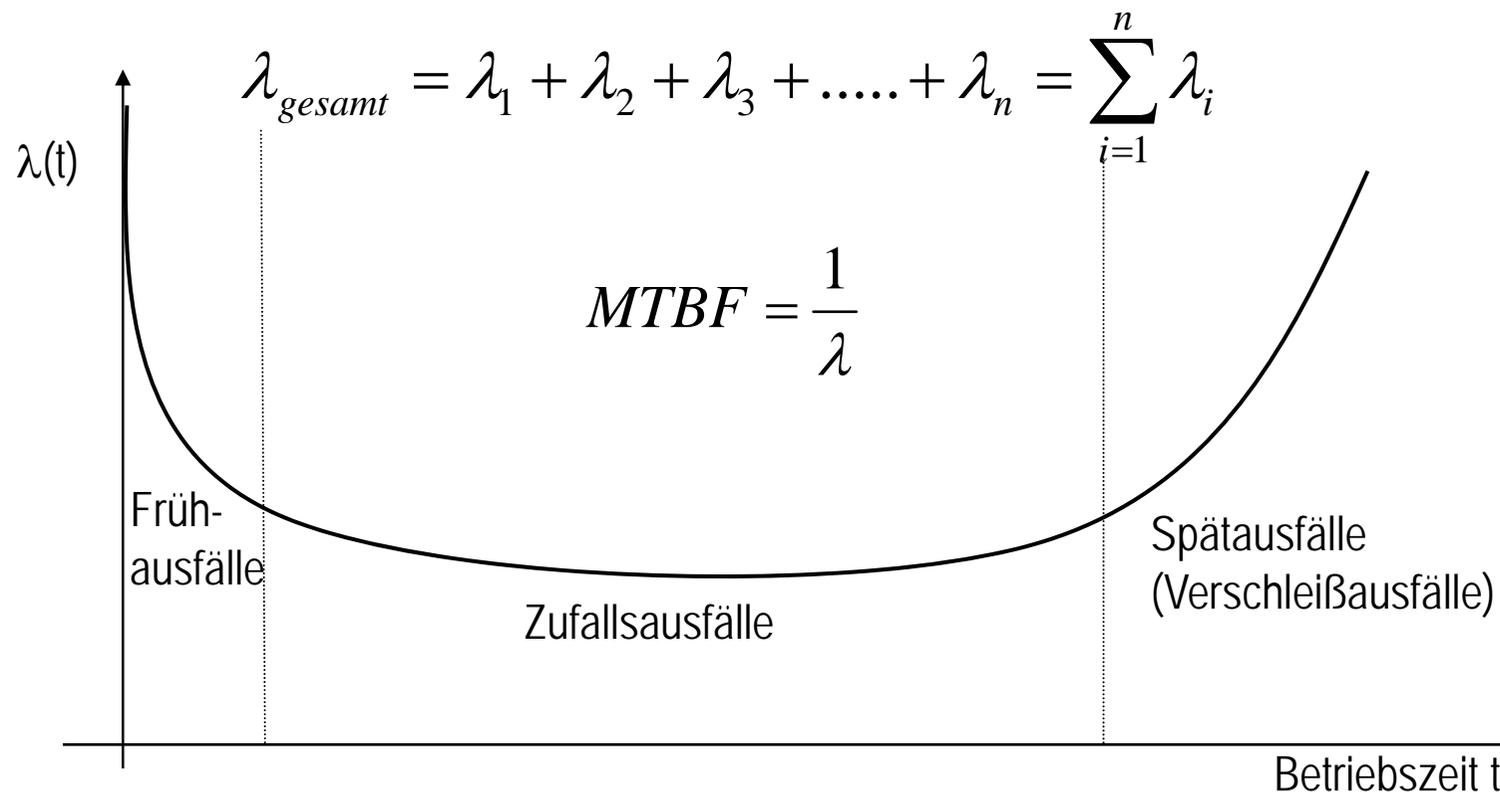
$$F(t) + R(t) = \frac{n_A}{n_O} + \frac{n_O - n_A}{n_O} = \frac{n_O}{n_O} = 1$$



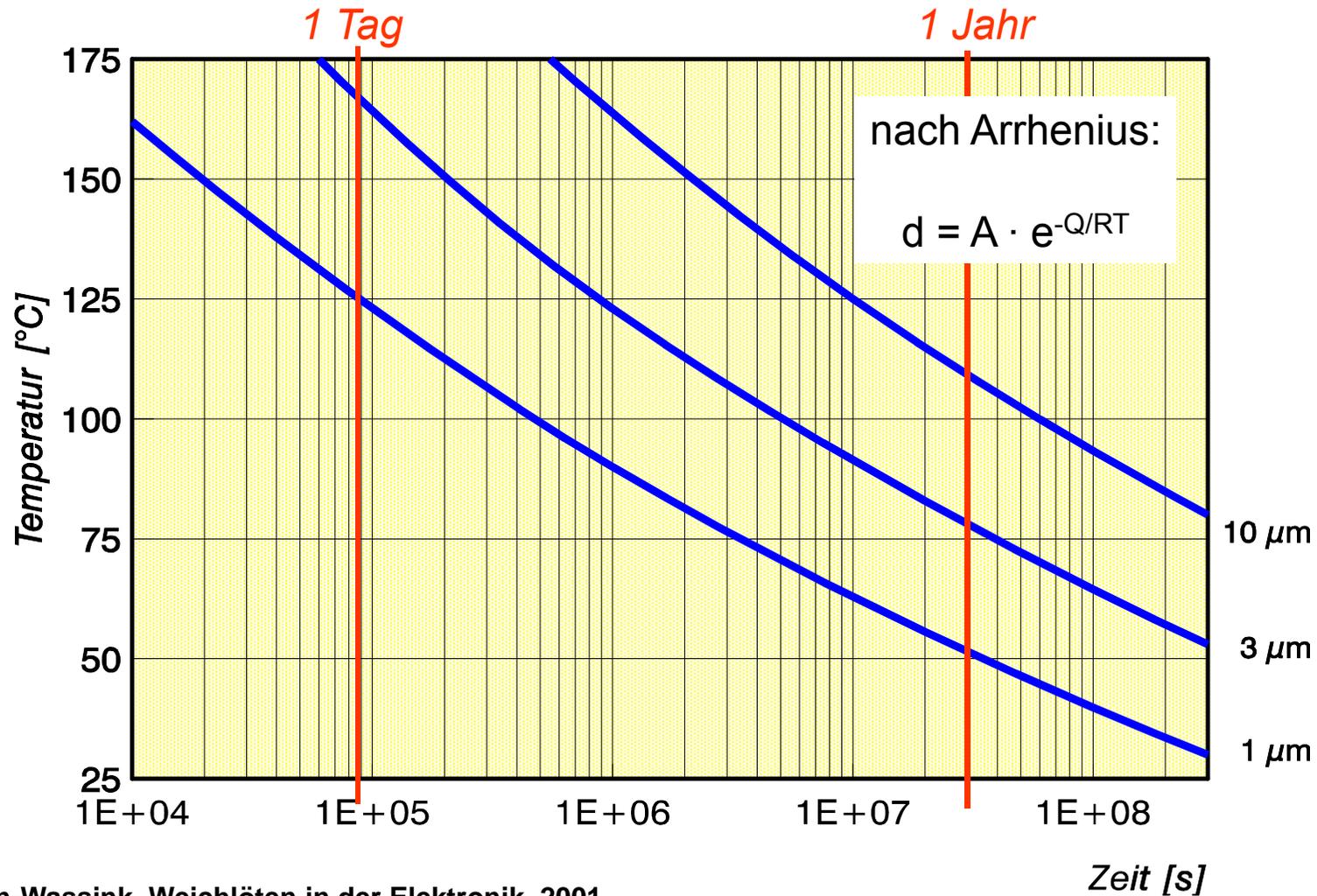
Die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls ist in jedem infinitesimalen Zeitabschnitt  $dt$  unterschiedlich.

## Ausfallrate

$$\lambda(t) = \frac{1}{n_0 - n_A} \cdot \frac{dn_A}{d(t)} = \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$$



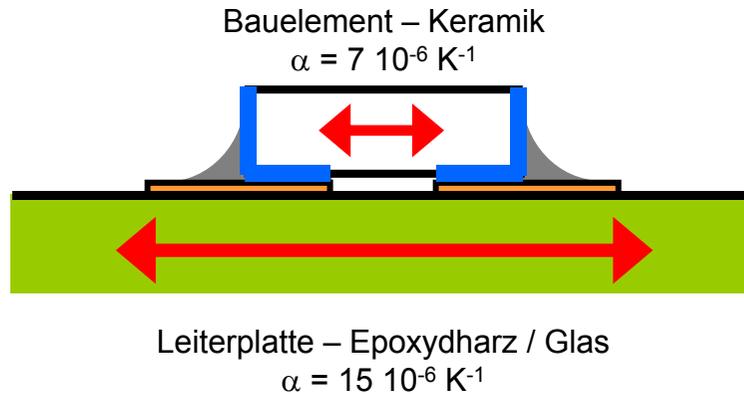
## Wachstum intermetallischer Phasen



Quelle: Klein-Wassink, Weichlöten in der Elektronik, 2001

## Thermo-mechanische Ermüdung

Weichlote  $T_L < 450^\circ\text{C}$



Hauptausfallursache:

Temperaturwechsel

↪ thermo-mechanische Beanspruchung

↪ Dehnung (Kriechen)

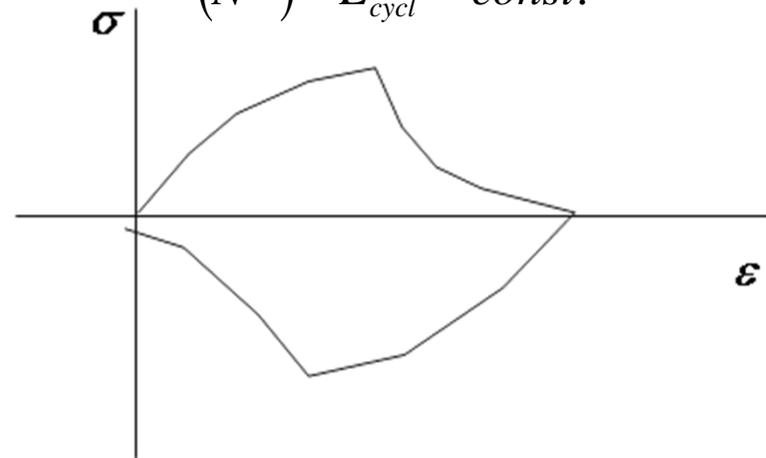
↪ Ermüdung

Dehnungsansatz (Coffin / Manson):

$$(N^f)^c \cdot \varepsilon_{pl} = const.$$

Energieansatz (Morris):

$$(N^f)^a \cdot E_{cycl} = const.$$

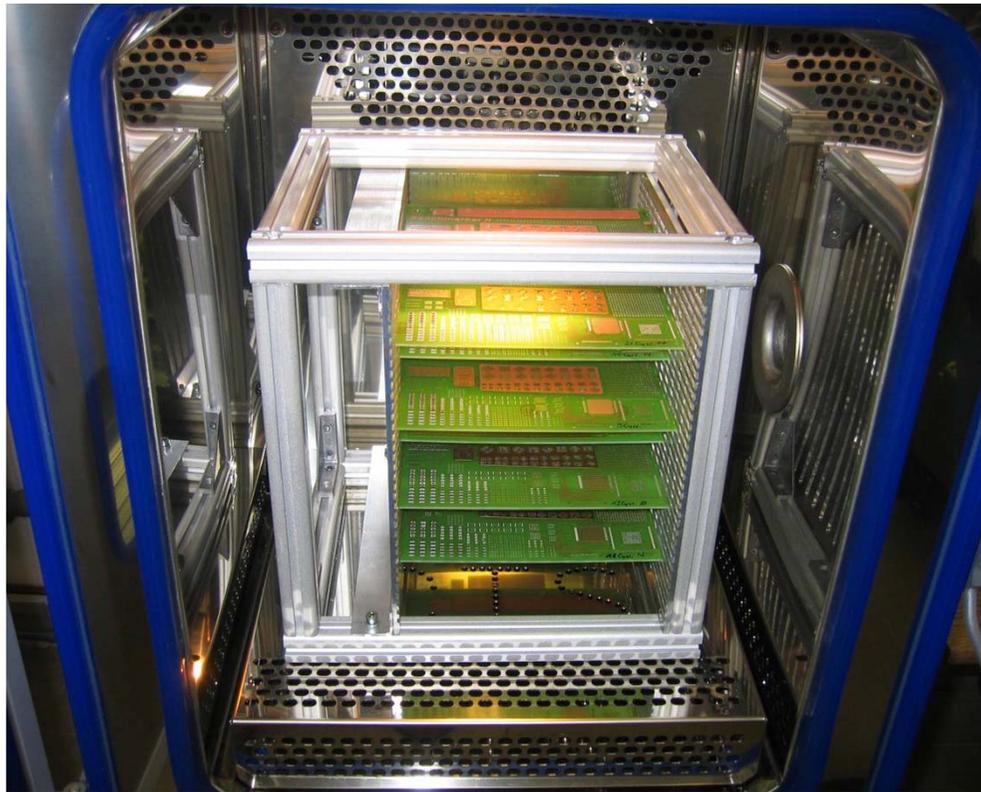


Statistischer Ansatz  
(Exponentialverteilung / Weibull):

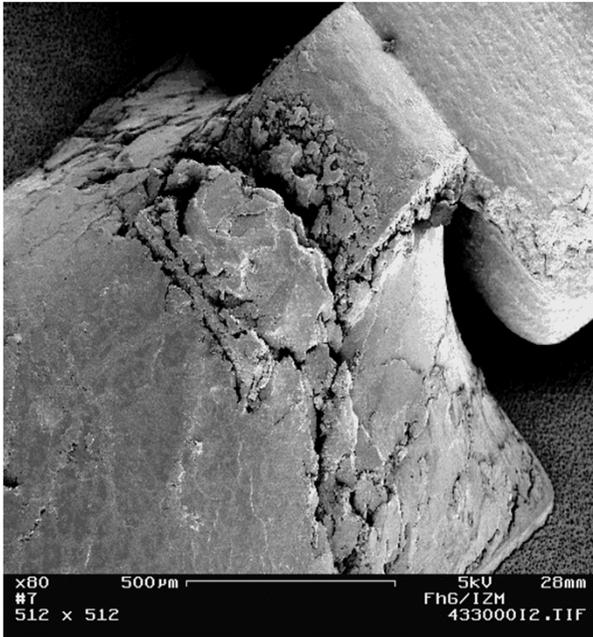
$$F(t) = 1 - e^{-(\lambda t)^\beta}$$

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

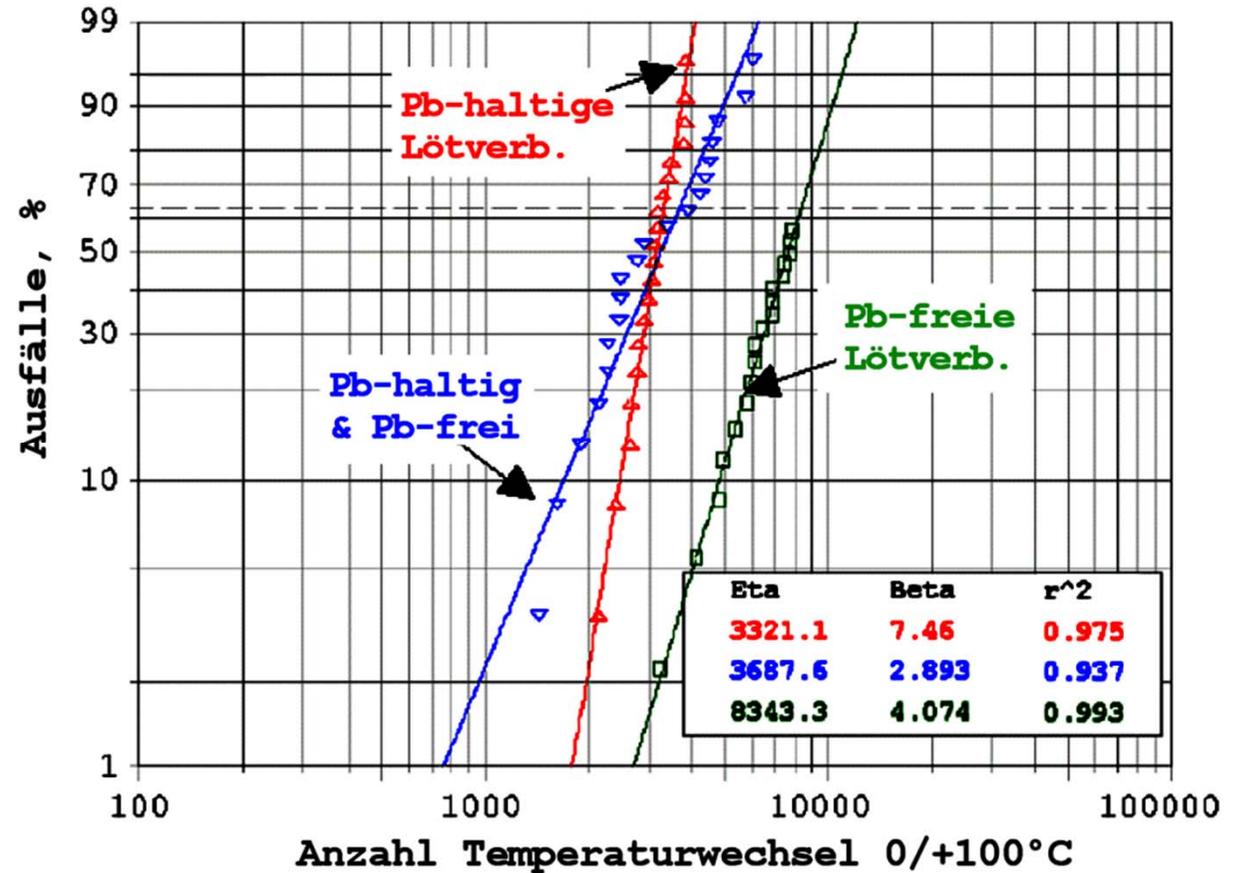
## Temperaturwechsel- und Klimaprüfkammer



## Beschleunigte Alterung von Weichlötverbindungen



Lötverbindungen nach Temperaturwechselltests



Weibull-Diagramm zur Bewertung von Ausfällen von Weichlötverbindungen

Quelle: K. Halser QPZ/IZM

Quelle: Carol Handwerker et al. (NIST), SMTA - Chicago 2003

## Beschleunigungsfaktoren

(für Bauelemente 1206 ermittelt)

Coffin – Manson:

$$N_{Field} = N_{Test} \left[ \frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Feld}} \right]^{CM} \rightarrow CM = \frac{\ln \left[ \frac{N_{Feld}}{N_{Test}} \right]}{\ln \left[ \frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Feld}} \right]}$$

mit:

$N_{Test}$

= Zyklen – Test

$N_{Feld}$

= Zyklen - Feld

$\Delta T_{Test}$

= Temperaturbereich - Test

$\Delta T_{Feld}$

= Temperaturbereich - Feld

CM

= Coffin-Manson Exponent

	CM Exponent	$N_{Test}$	$N_{Feld}$
SnPb	2.4	1 926	10 950
SnAgCu	5.1	272	10 950

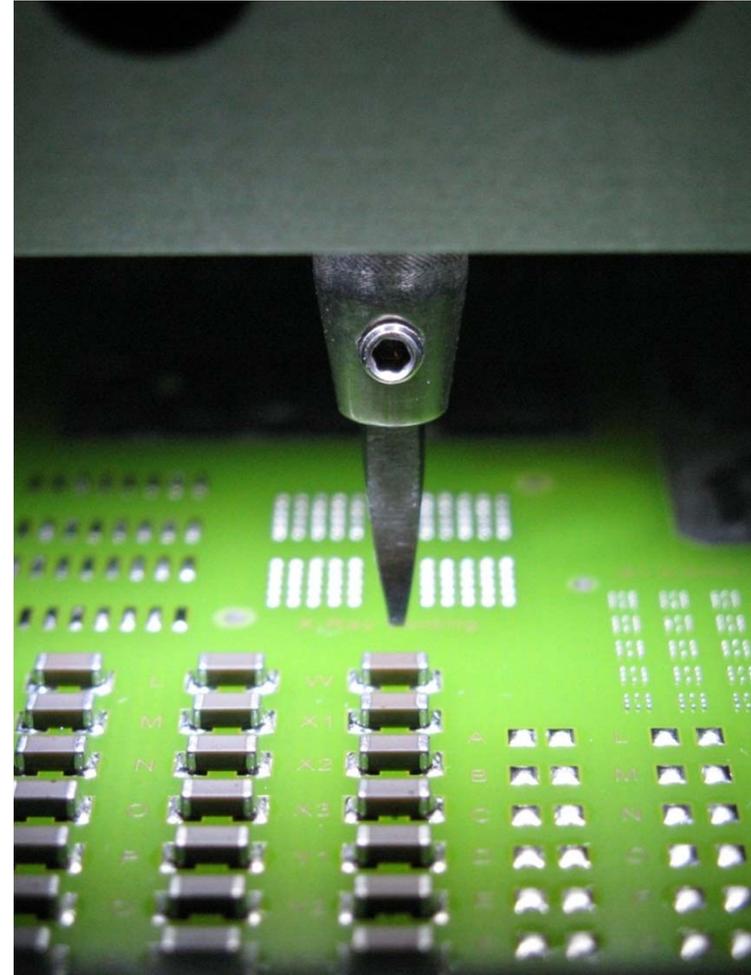
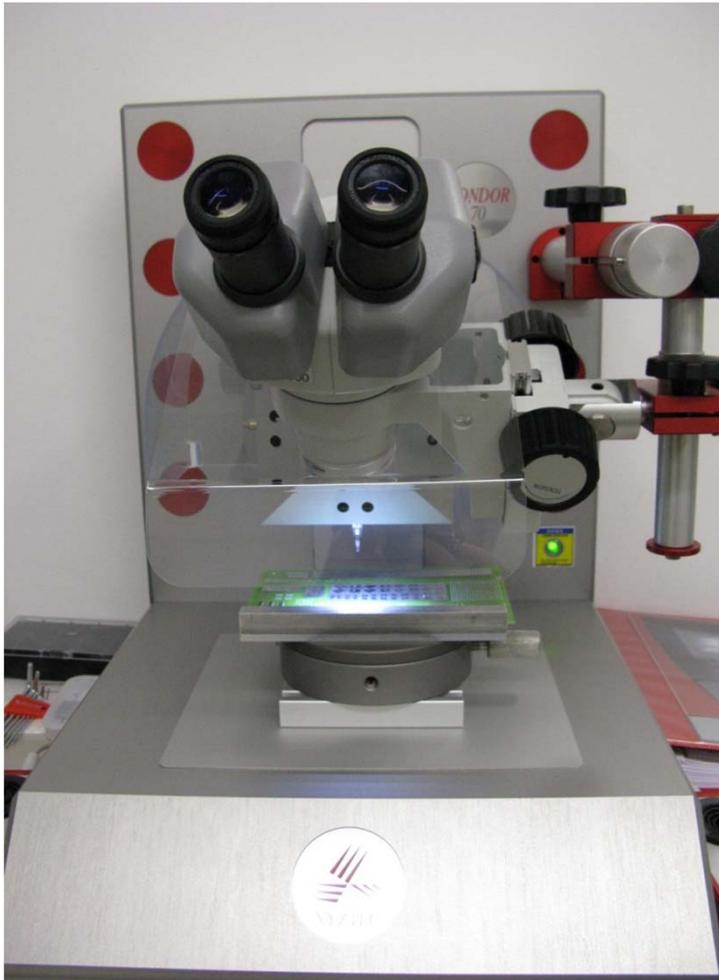
$$\Delta T_{Test} = 165 \text{ K}$$

$$\Delta T_{Feld} = 80 \text{ K}$$

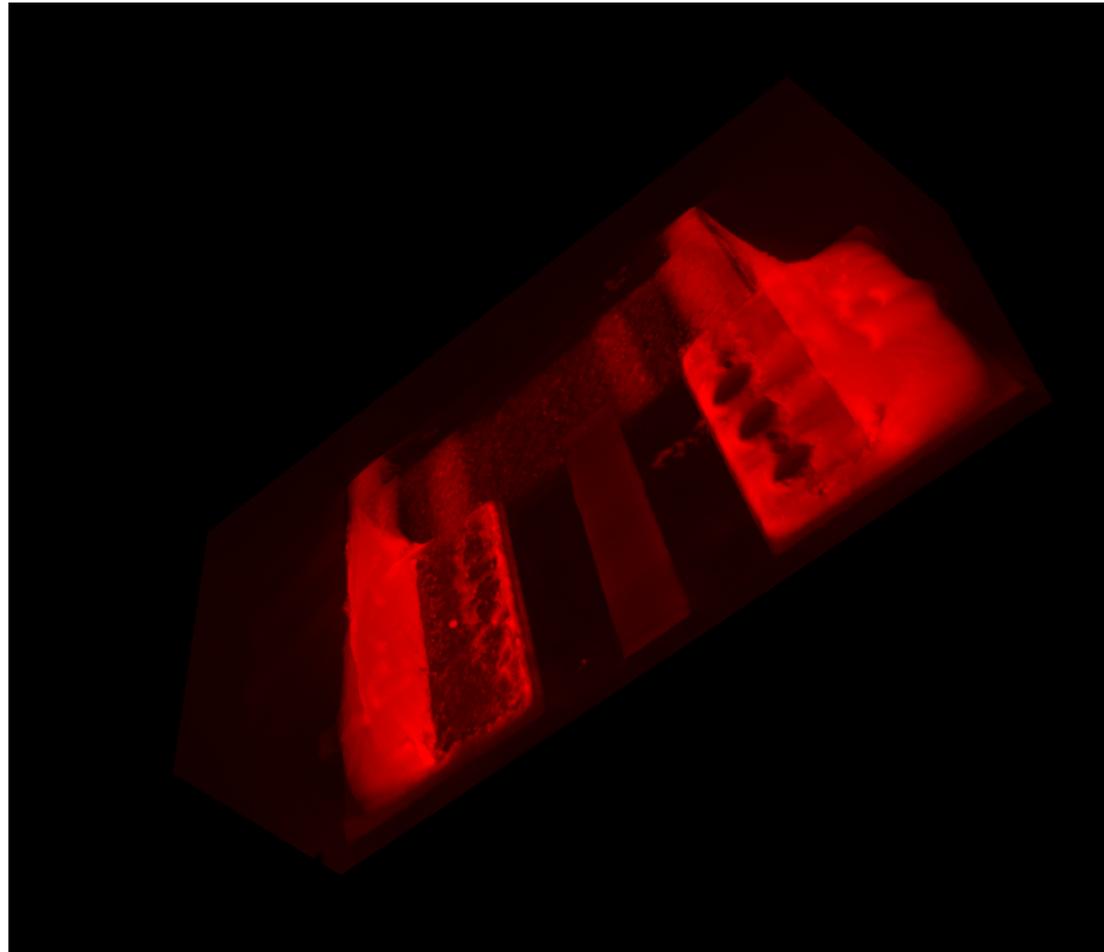
CR 1206

Quelle: R. Ratchev, Projekt LiVe 2009

## Schertester

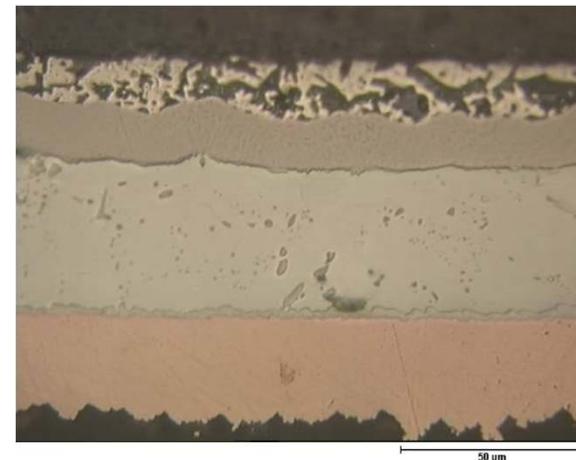
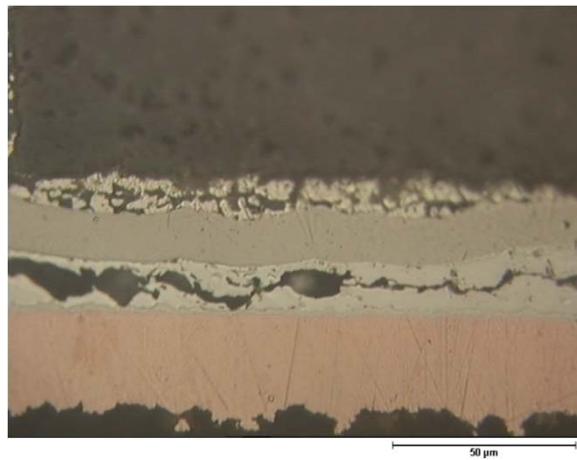
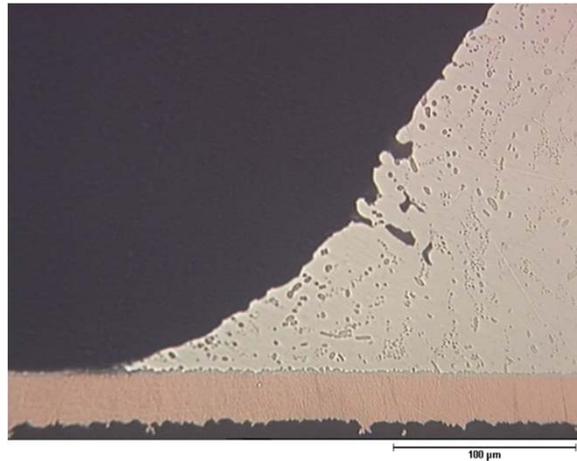


## Zerstörungsfreie Prüfung



3D Röntgen-CT eines Chipwiderstandes 0805

## Einfluss: Lotvolumen



sehr kleine Lotdepots

große Lotdepots

Lotmeniskus und Lotspalt eines auf Cu-OSP gelöteten CR1206 nach 500 Zyklen

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

## Einfluss: Bauteilgröße

Quelle: BMBF-Projekt NanoPAL

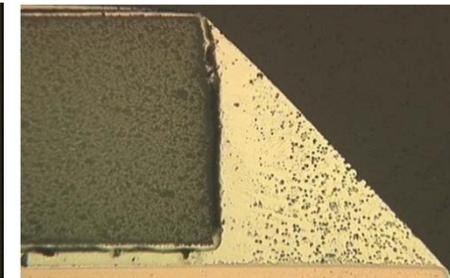
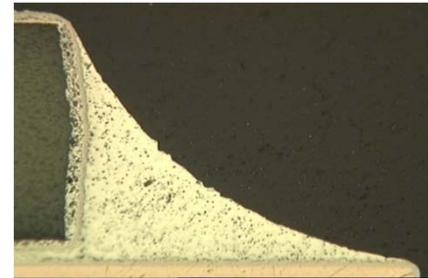
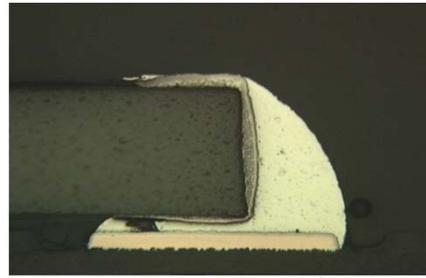
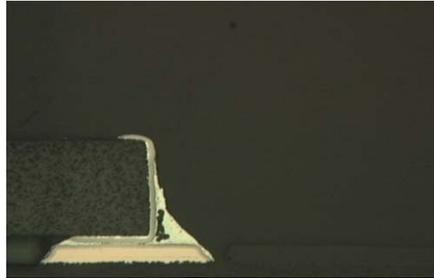
NiP/Au CR0201

CR0402

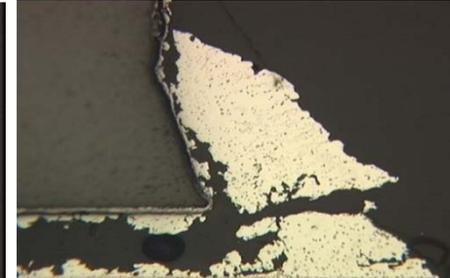
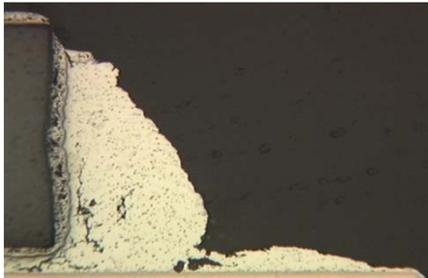
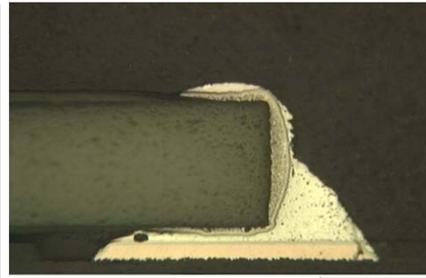
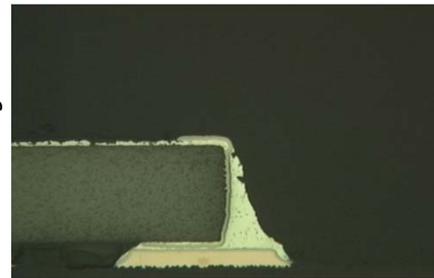
CR1206

CR2512

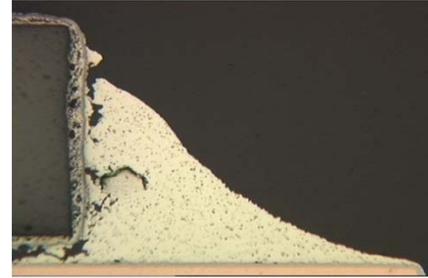
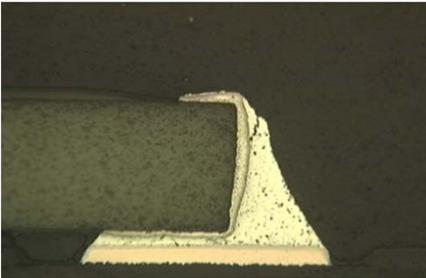
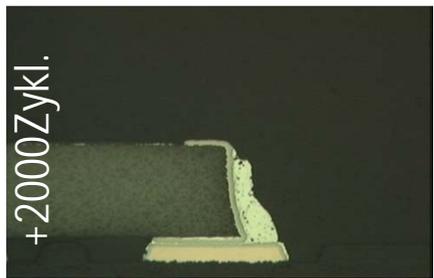
1600h/150°C



2000Zykl.



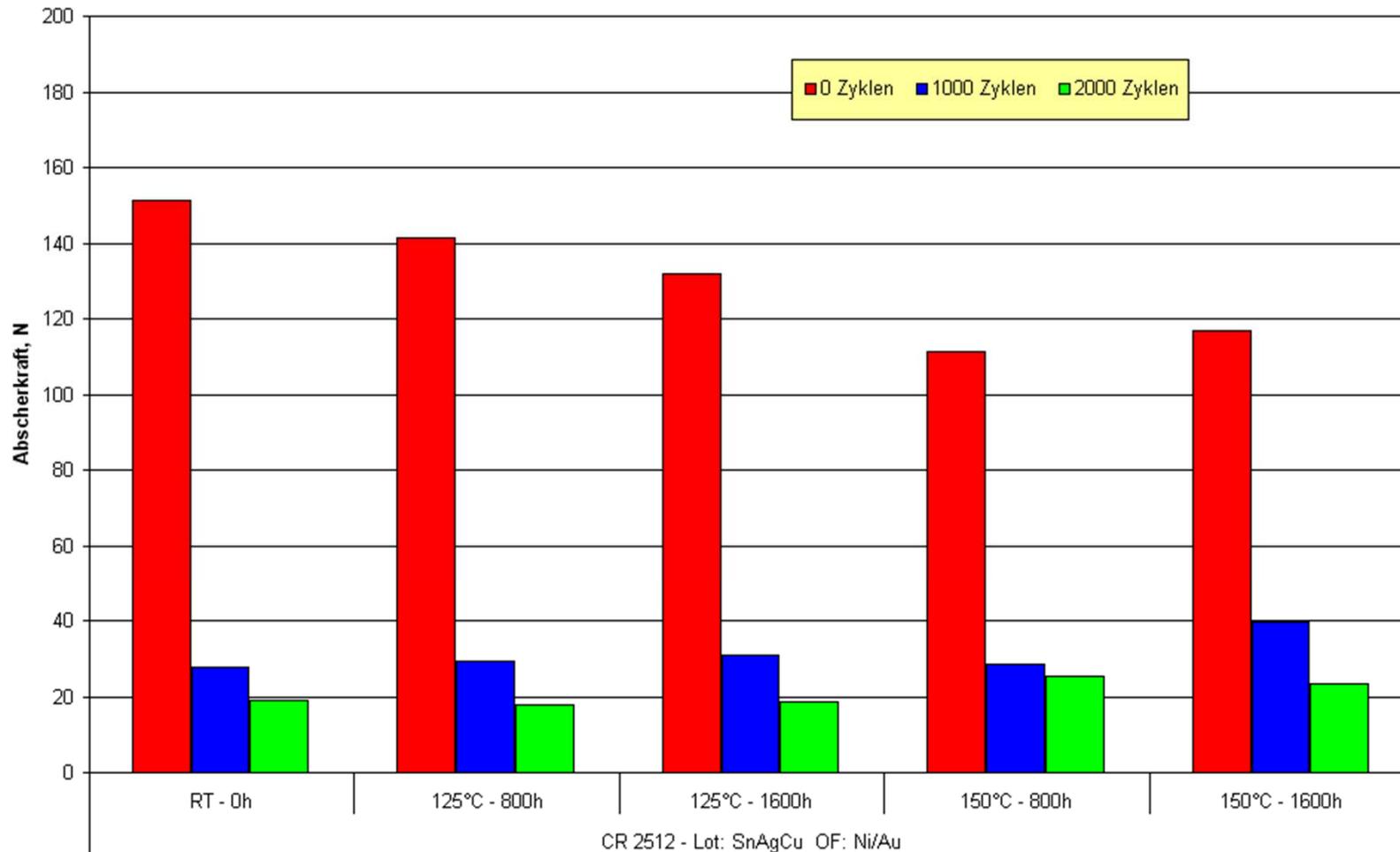
1600h/150°C



2512

## Einfluss: Bauteilgröße

NiP/Au



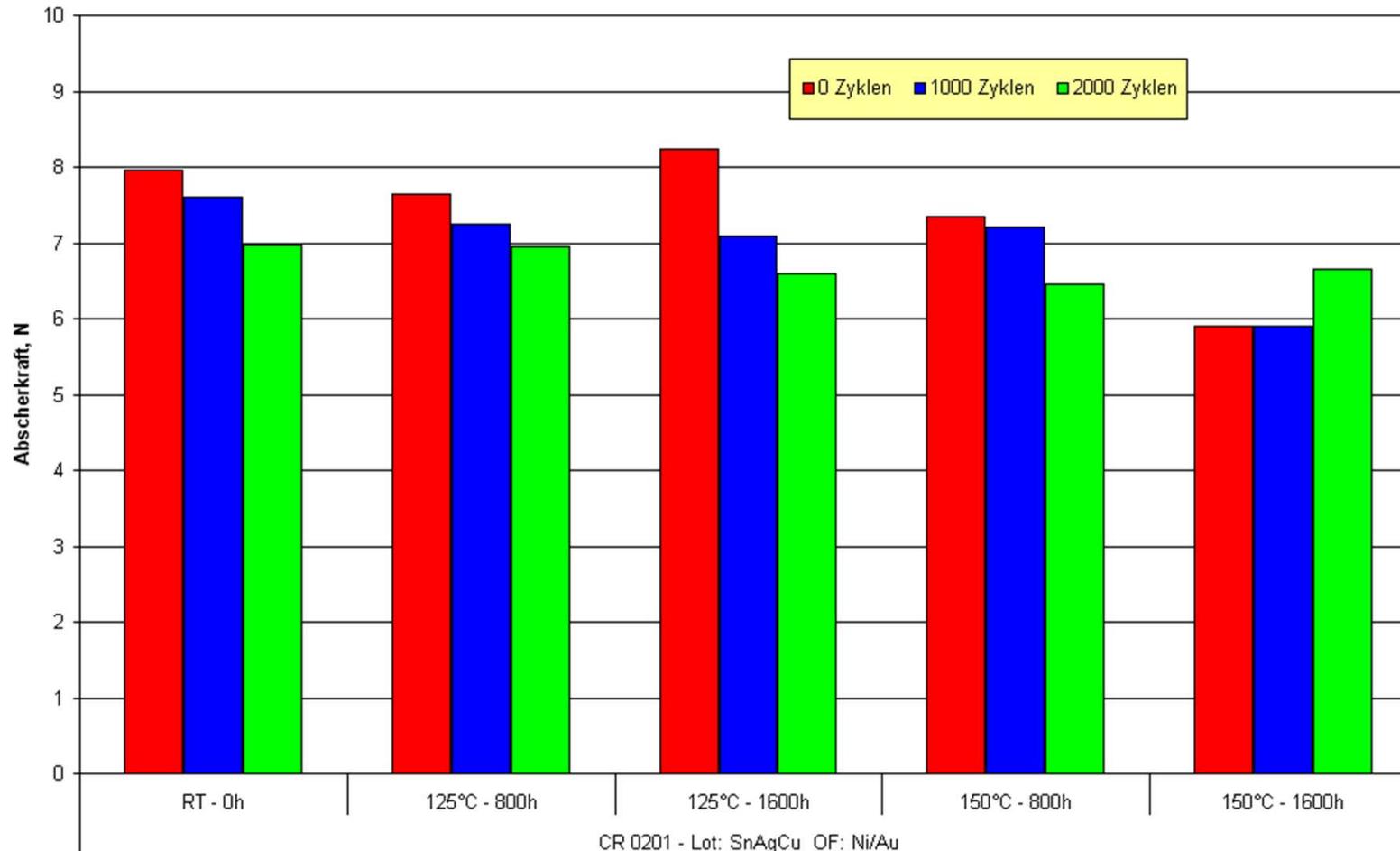
Scherkräfte der Bauelemente 2512 auf gealterter Testbaugruppe

Quelle: BMBF-Projekt NanoPAL

0201

## Einfluss: Bauteilgröße

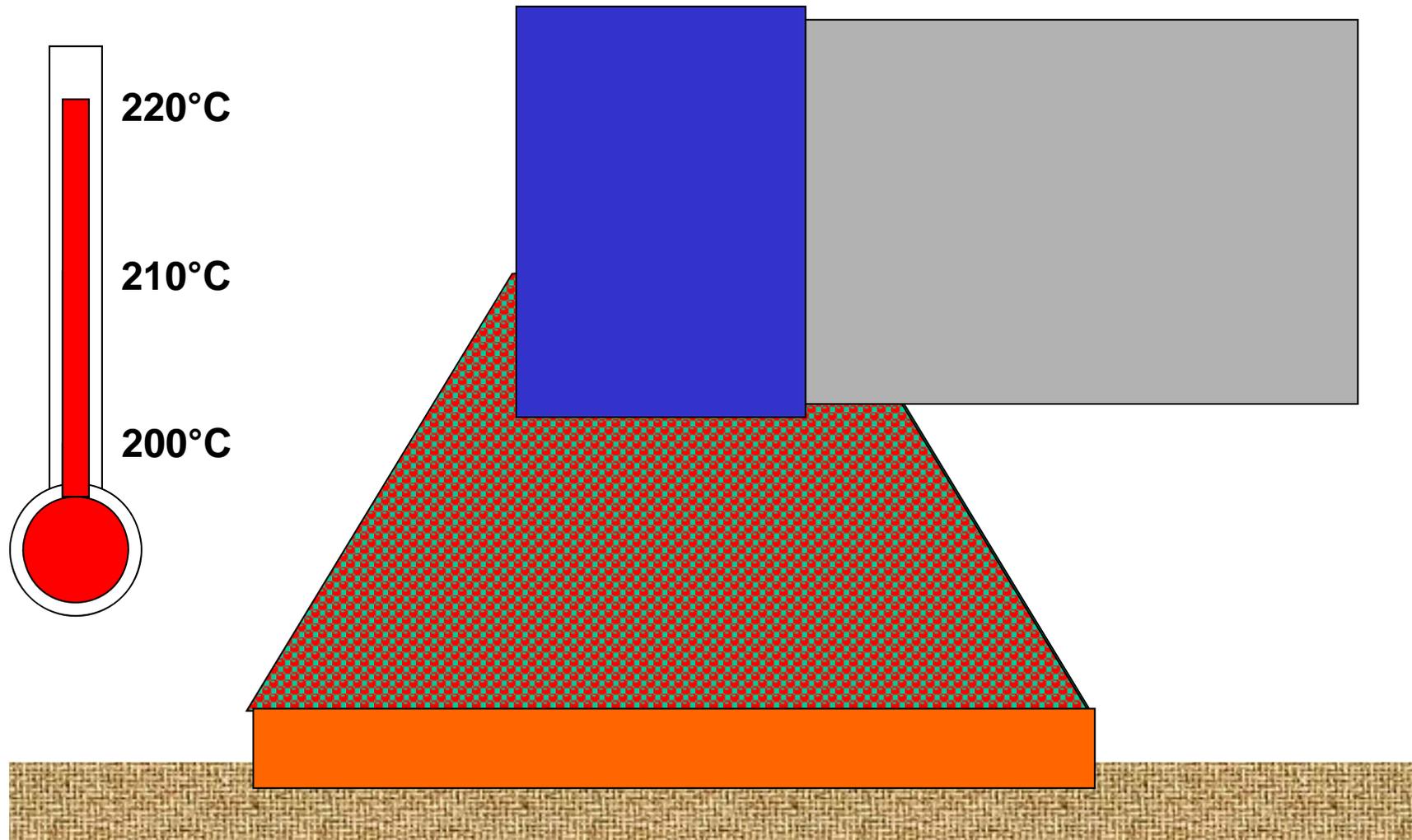
NiP/Au



Scherkräfte der Bauelemente 0201 auf gealterter Testbaugruppe

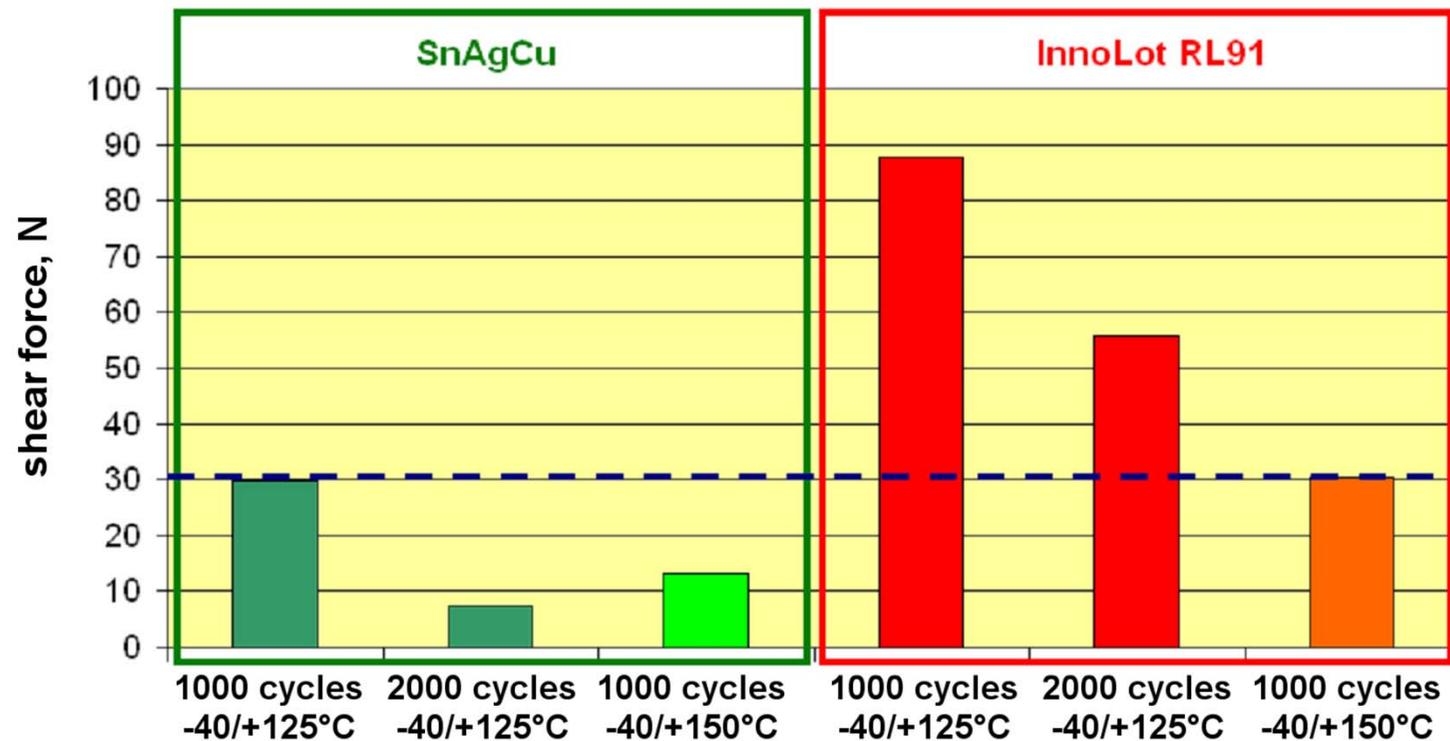
Quelle: BMBF-Projekt NanoPAL

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik



## Wirkprinzip von Reaktionslotpasten

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik



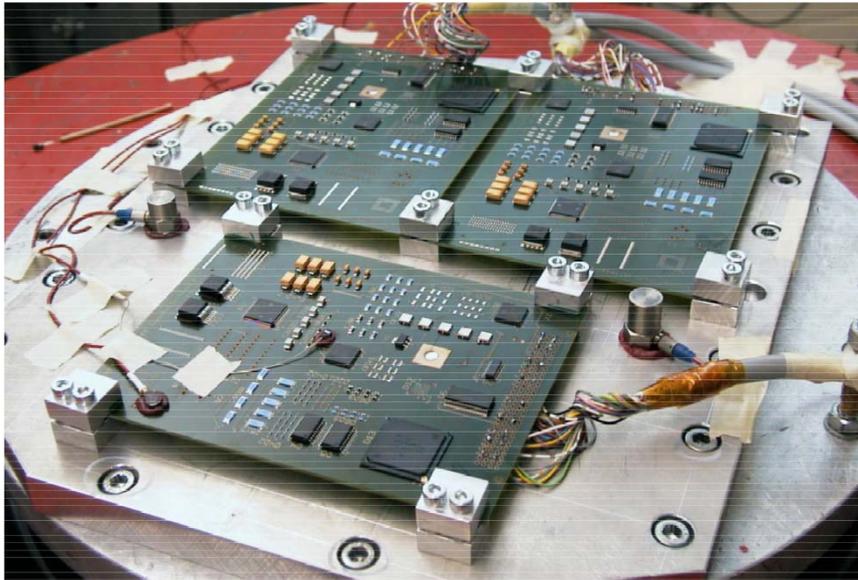
Beispiel: Chip Widerstand CR 2010

## Vergleich der Scherfestigkeiten von gelöteten CR1206 nach Temperaturwechseln -40/125°C bzw. -40/150°C

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

## Vibration

Vibrationsprüfung  
von elektronischen  
Baugruppen

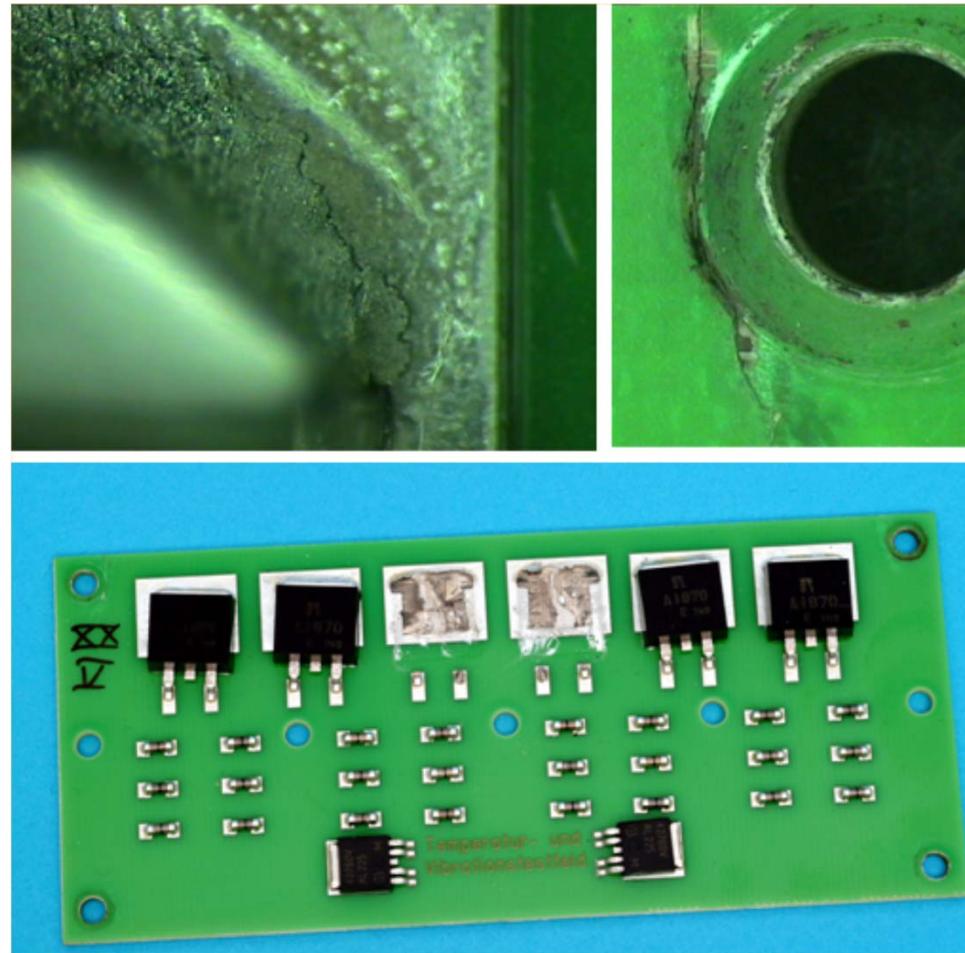


Erfassung  
elektrischer Ausfälle  
während der Prüfung

500 TW	I	II	III	IIIa	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	2g	5g	10g	15g	15g	15g	15g	15g	20g	20g	30g
<b>SnAgCu</b>	3min	3min	3min	3min	15min	15min	45min	60min	15min	60min	60min
CR1206											
P-TQFP (D3)											
SIMID 1210											
SIMID 0603											
TO263-7 (S19)											
SO (D8)											
CR0603											
CR2512											
CR2010											

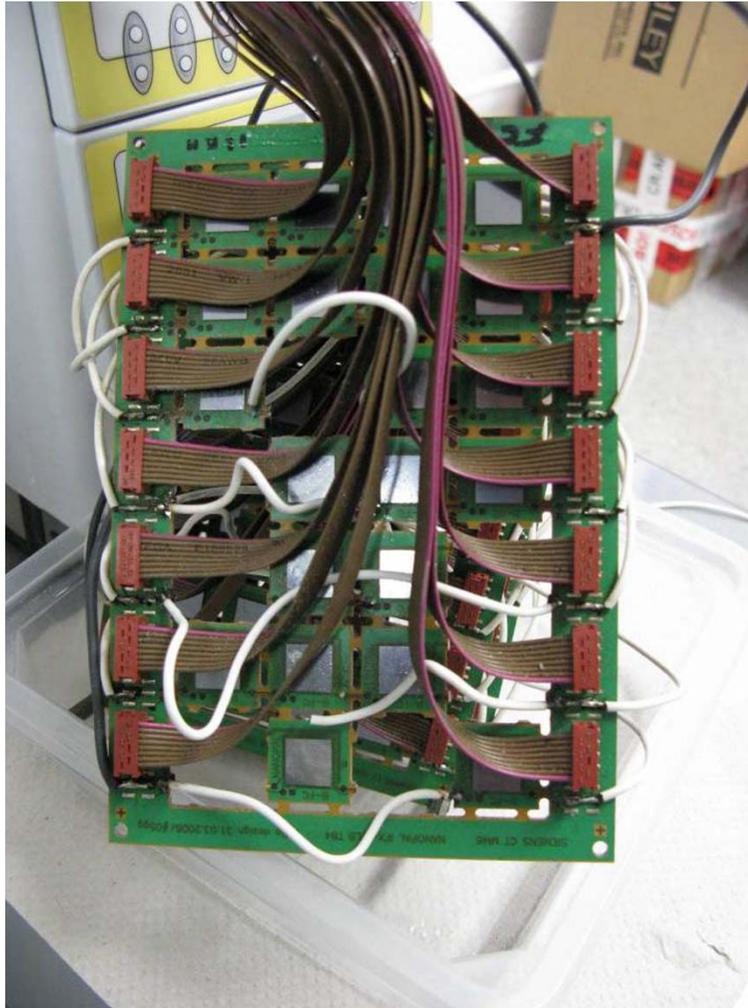
Messplatz, Fa. Bosch

## Vibration



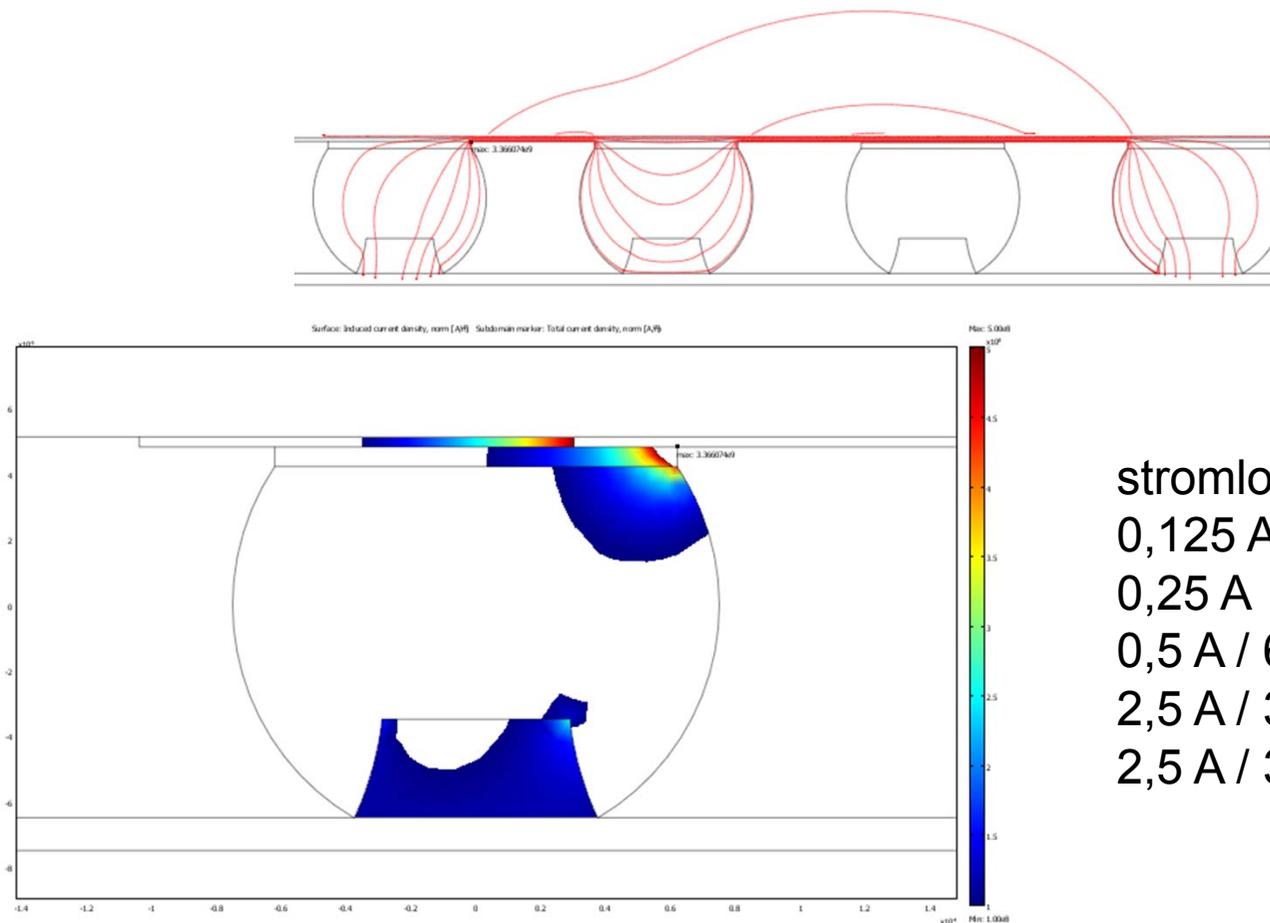
Geschädigte Baugruppe nach Vibrations-Belastung

## Elektromigration



Migrations-Testboard mit  
herausgetrenntem Flip-Chip

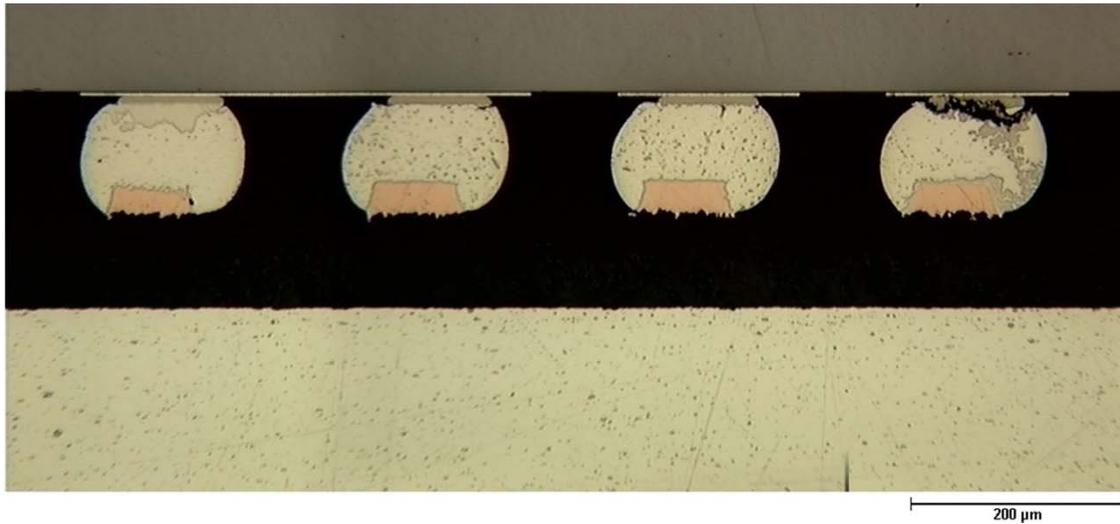
## Elektromigration



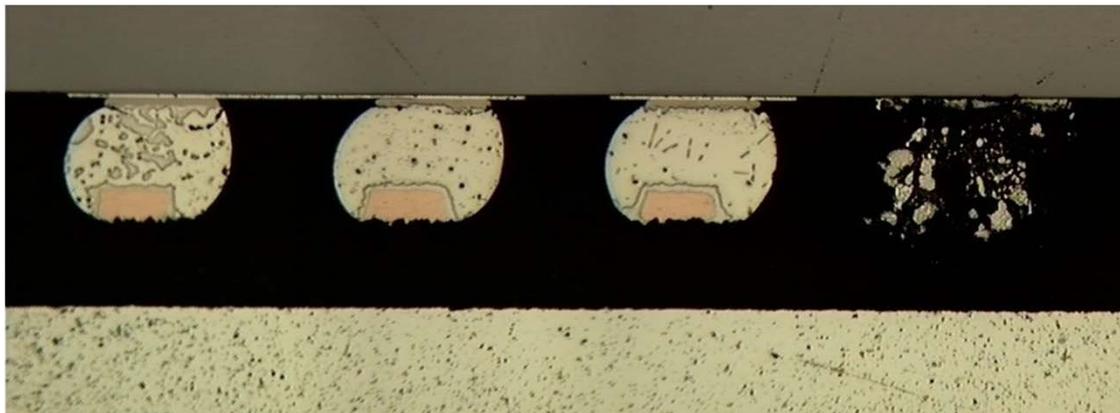
stromlos / 125°C,  
0,125 A / 16 A/mm<sup>2</sup> / 125°C,  
0,25 A / 32 A/mm<sup>2</sup> / 125°C,  
0,5 A / 64 A/mm<sup>2</sup> / 125°C,  
2,5 A / 320 A/mm<sup>2</sup> / 125°C;  
2,5 A / 320 A/mm<sup>2</sup> / RT

Simulation der Strompfade und Stromdichteverteilung in Flip-Chip Kontakten

## Elektromigration



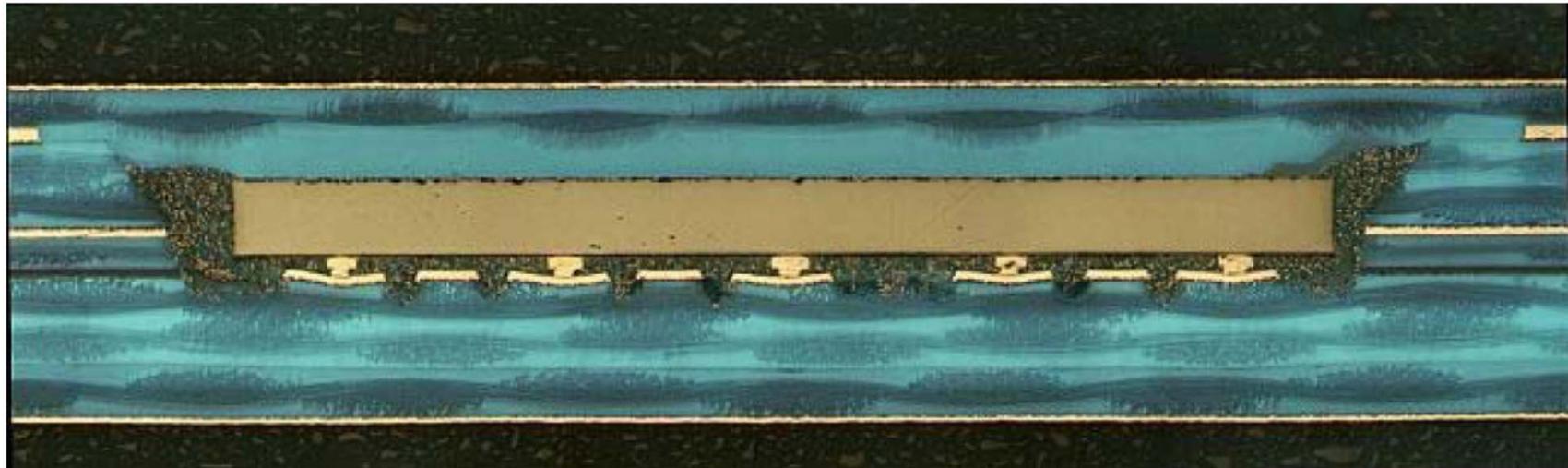
Flip-Chip 2,5 A / RT, Ausfall nach 585 h



Flip-Chip 2,5 A / 125°C, Ausfall nach 105 h

Ausfall der Flip-Chip Kontakte durch Strom/Temperatur

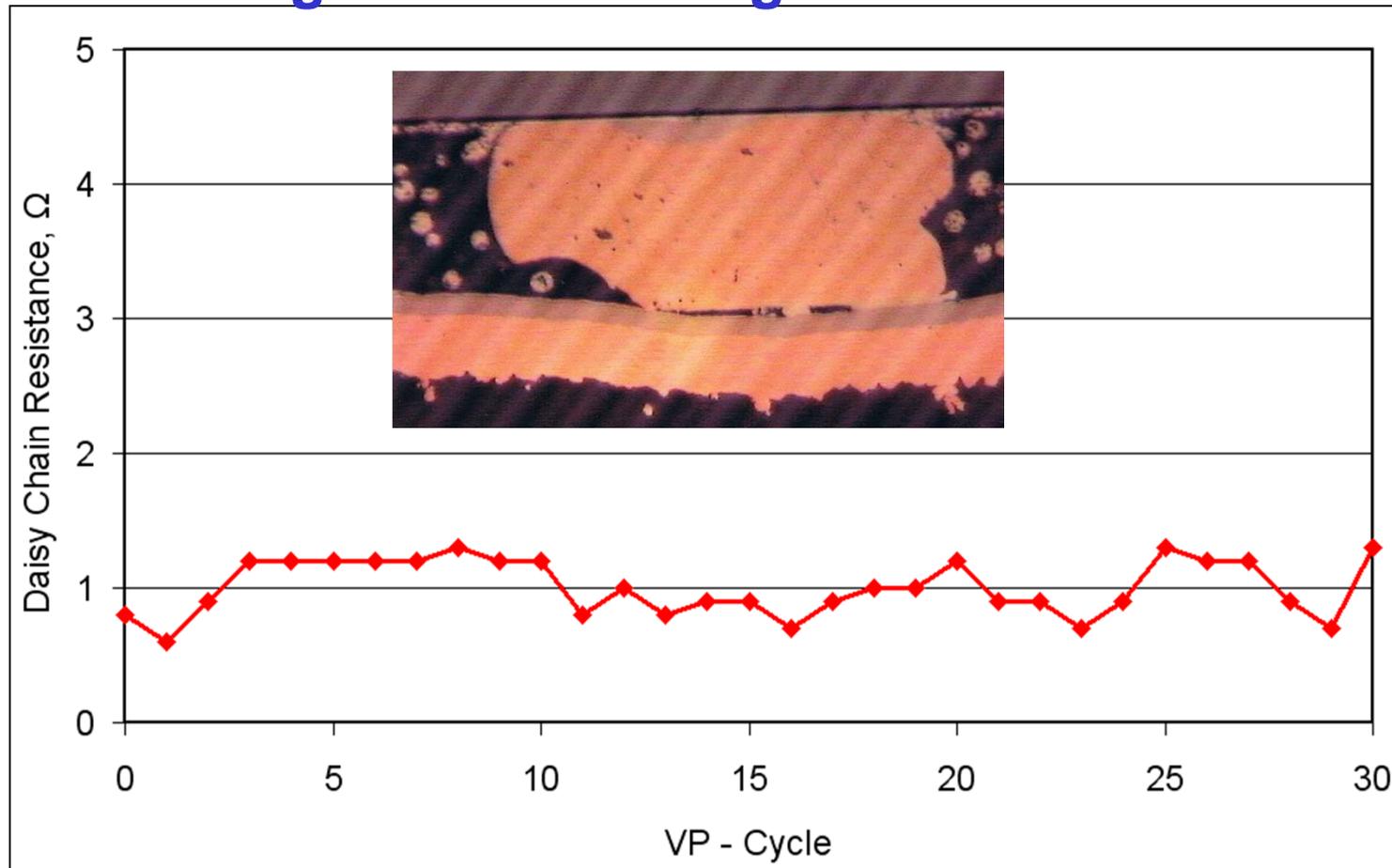
## Erhöhung der Zuverlässigkeit: Diffusionslöten



Quelle: R. Schönholz, Würth / M. Nowotnick, Uni Rostock: 2009

Lötverbindungen eingebetteter Chips in Leiterplatten (Lasercavity)

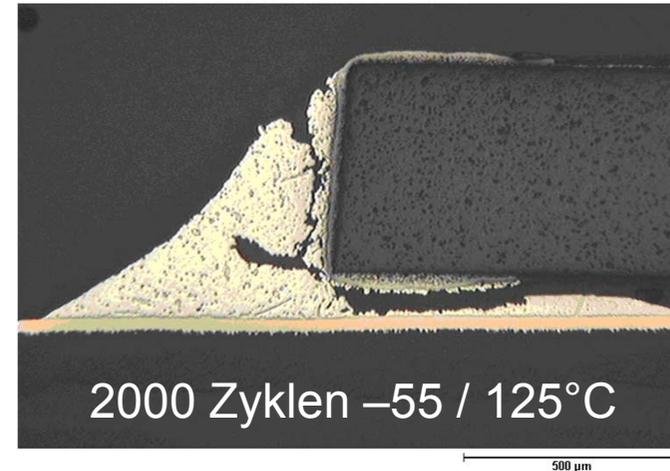
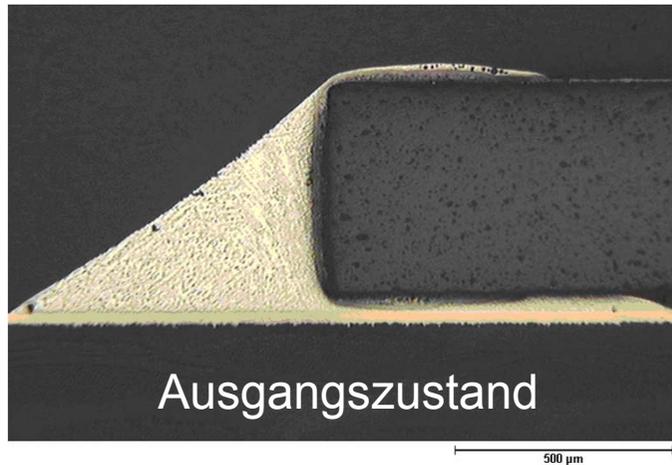
## Erhöhung der Zuverlässigkeit: Diffusionslöten



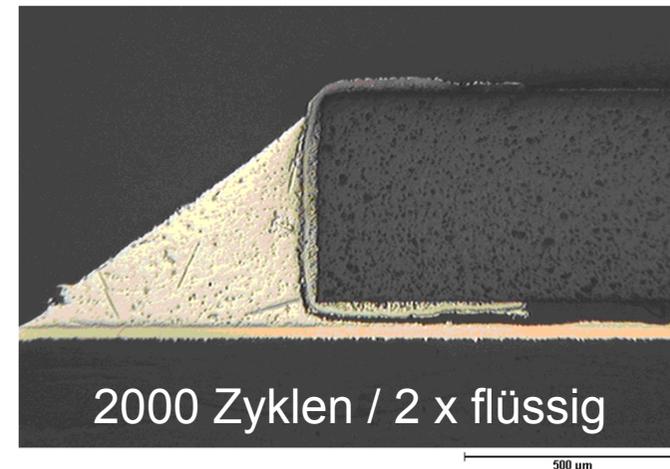
Quelle: R. Schönholz, Würth / M. Nowotnick, Uni Rostock: 2009

## Daisy-Chain Widerstandsmessungen nach dem Dampfphasenlöten

## Erhöhung der Zuverlässigkeit: Erhaltungslöten

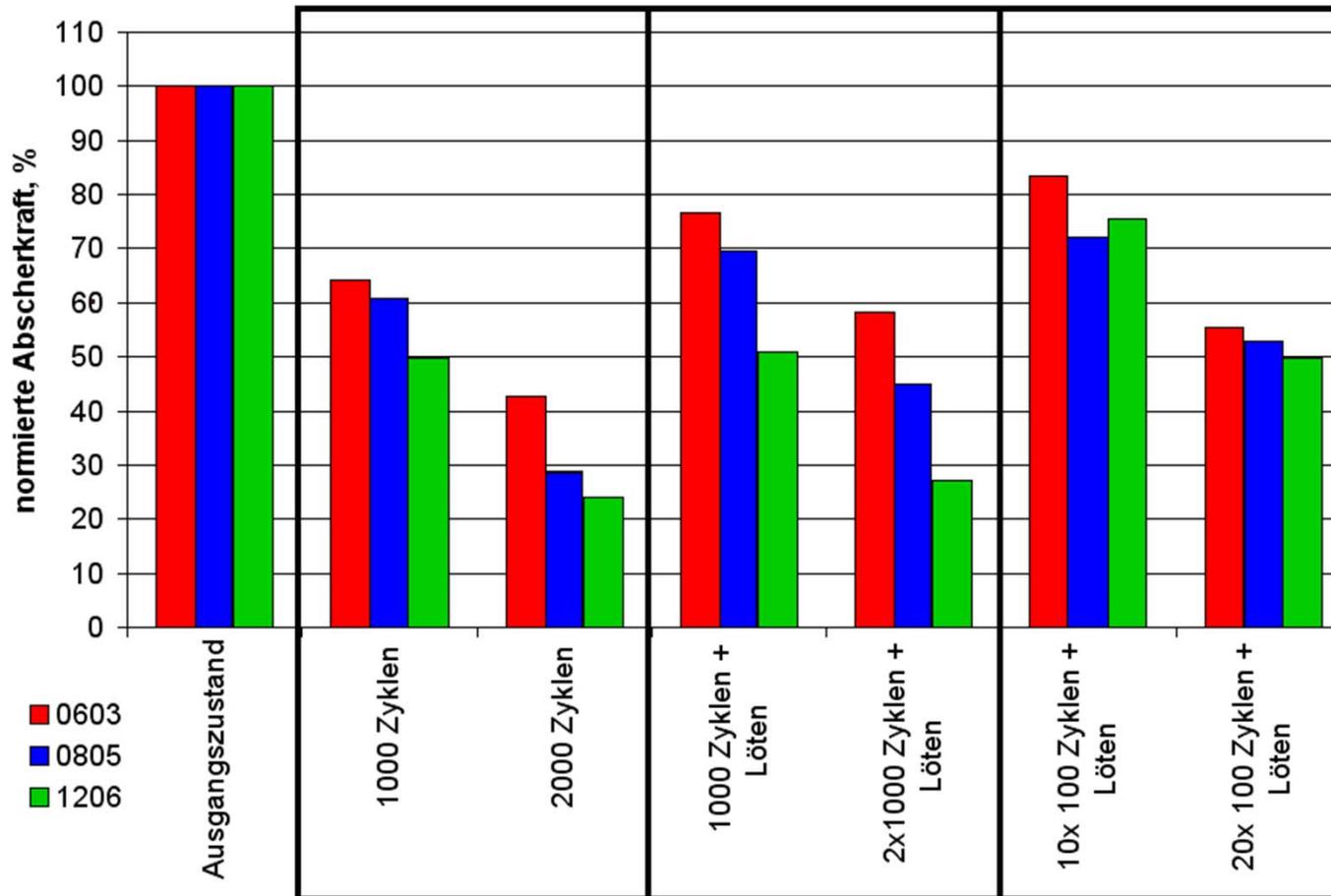


Durch regelmäßiges Nachlöten der Baugruppen werden die Lötverbindungen kurzzeitig flüssig (Erhaltungslöten)



Lötverbindungen eines Chipwiderstandes CR1206 mit SnAgCu-Lot

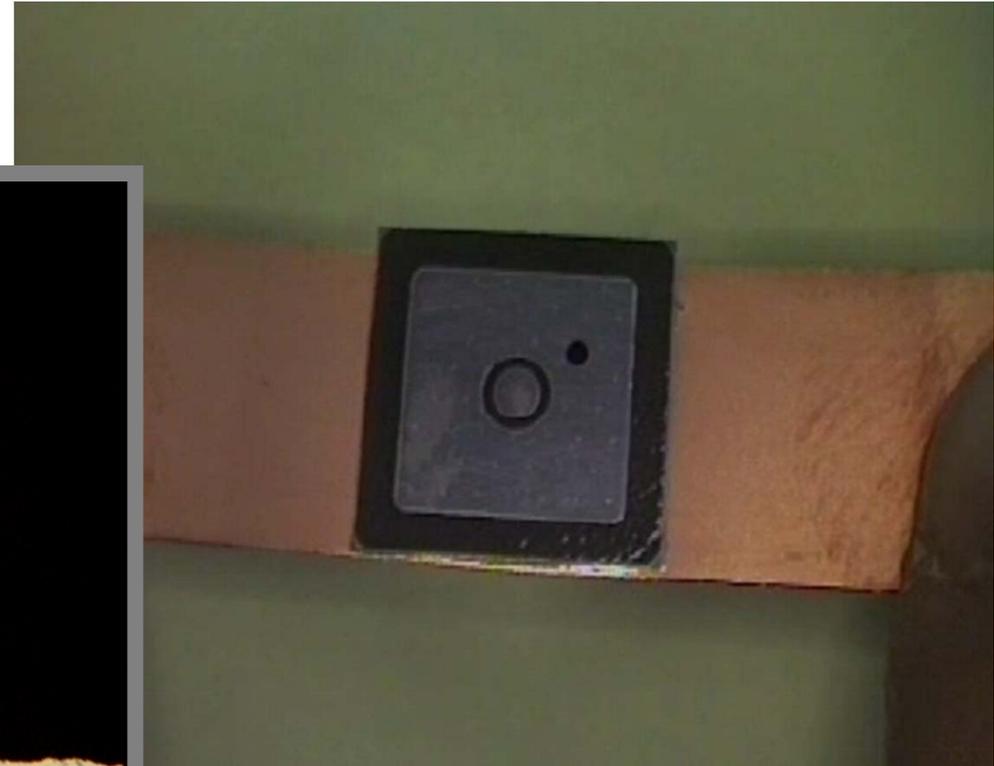
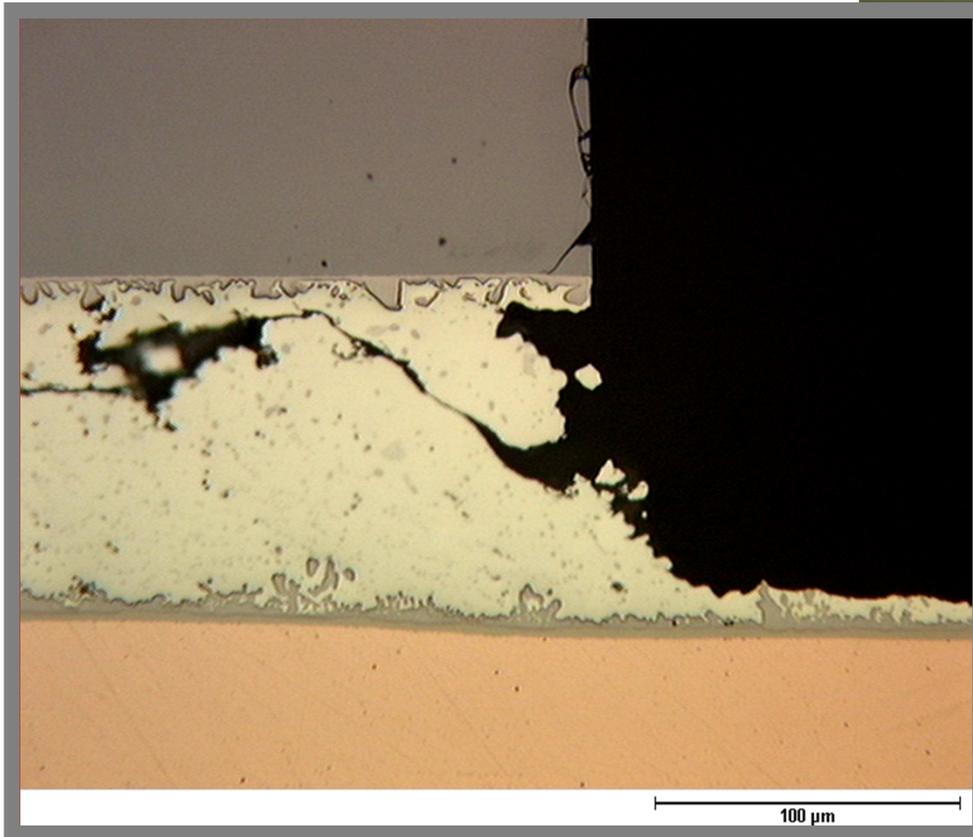
## Erhöhung der Zuverlässigkeit: Erhaltungslöten



Abscherkräfte von SnAgCu-Lötverbindungen

# Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik

## Erhöhung der Zuverlässigkeit: flüssige statt feste Verbindungen



## Zusammenfassung:

Besondere Anforderungen an Lötverbindungen in der Leistungselektronik: elektrische/thermische Leitfähigkeit

Problem: Poren in Lötverbindungen / Vakuumlöten?

Thermo-mechanische Zuverlässigkeit: große BE problematisch

Stabilere Lötverbindungen durch Diffusionslöten?