

# Funktion von Schmelzsicherungen bei erhöhter Erwärmung

## 2. Arbeitsberatung



Prof. Dr.-Ing. S. Großmann  
PD Dr.-Ing. habil. H. Löbl  
Dr.-Ing. S. Schlegel

Dresden, 07. Juni 2012

## Gliederung

- **Einleitung**
- **Theorie**
- **Erwärmungsversuche**
  - Versuchsplan
  - Aufbau
  - Ergebnisse
- **Langzeitversuche mit Schmelzleitern**
  - Versuchsplan
  - Messmethode
  - Ergebnisse
- **Zusammenfassung und Ausblick**

## Einleitung

### **Problem: Ausfall und Versagen von Sicherungen in der Praxis**

- Zunehmend kompaktere Bauweise in der Niederspannungstechnik
- Erhöhen der Grenztemperatur für Betriebsmittel IEC 61439-1:2009
  - Grenztemperatur von 140 °C für Kupfer-Sammelschiene, -Leiter und -Steckkontakte zugelassen
- Bleifreie Lote gefordert RL 2002-95-EG
  - Veränderte Interdiffusion zwischen Zinn und Kupfer im Schmelzleiter
- Belasten der Sicherungen in der Praxis mit Bemessungsstrom (z. B. Biogas- und Photovoltaikanlagen)
- Prüfung der Sicherung nach Norm IEC 60269-1:2006+A1:2009
  - Prüfbedingungen unterscheiden sich erheblich von denen im praktischen Einsatz (Prüfung frei in Luft, Querschnitt der Anschlussleiter (z. B. matt schwarz gestrichen), Umgebungstemperatur  $(20 \pm 5)$  °C)



## Theorie

**Problem:** Einsatz der Sicherung bei erhöhter Umgebungs- und damit Schmelzleitertemperatur

### Auswirkung:

Fehlabschalten der Sicherung unterhalb des Auslösestroms

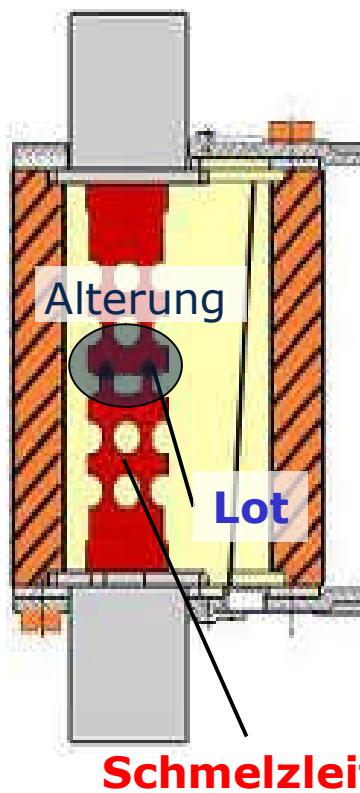
### Mögliche Ursachen:

Interdiffusion zwischen Zinnlot und Schmelzleiter durch Schmelzleitertemperaturen über 130 °C

→ Bilden Intermetallischer Phasen (IMP)

→ IMP hart, spröde, schlechte elektrische Leitfähigkeit

→ Erhöhen des Schmelzleiter-Widerstandes oder Bruch des Schmelzleiter



Versagen der Sicherung bei Überlast

Erhöhte Oxidation des Zinnlots bei Schmelzleiter-temperaturen über 130 °C

→ Zinn bildet keine schützende Oxidschicht

→ Entstehen dicker Oxidschichten

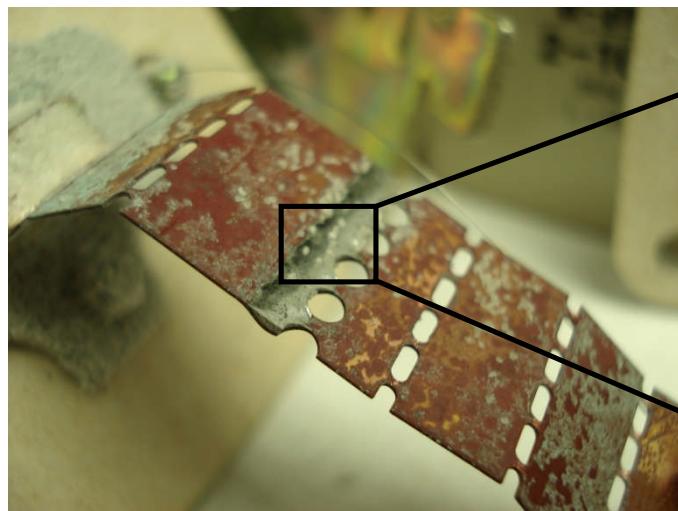
→ Umwandlung des Zinns in Zinnoxid

→ Kein Zinn mehr bei Überlast zur Diffusion verfügbar

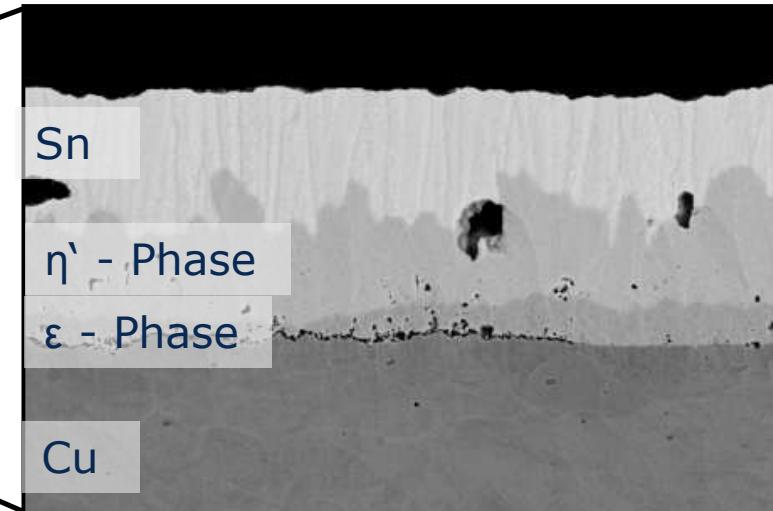
# Theorie

## Interdiffusion

Interdiffusion ist der Stofftransport von Atomen zu gitterfremden Bausteinen aufgrund von Konzentrationsunterschieden und dem Bestreben diese auszugleichen (Volumendiffusion  $T \uparrow$ , Grenzflächendiffusion  $T \downarrow$ ).



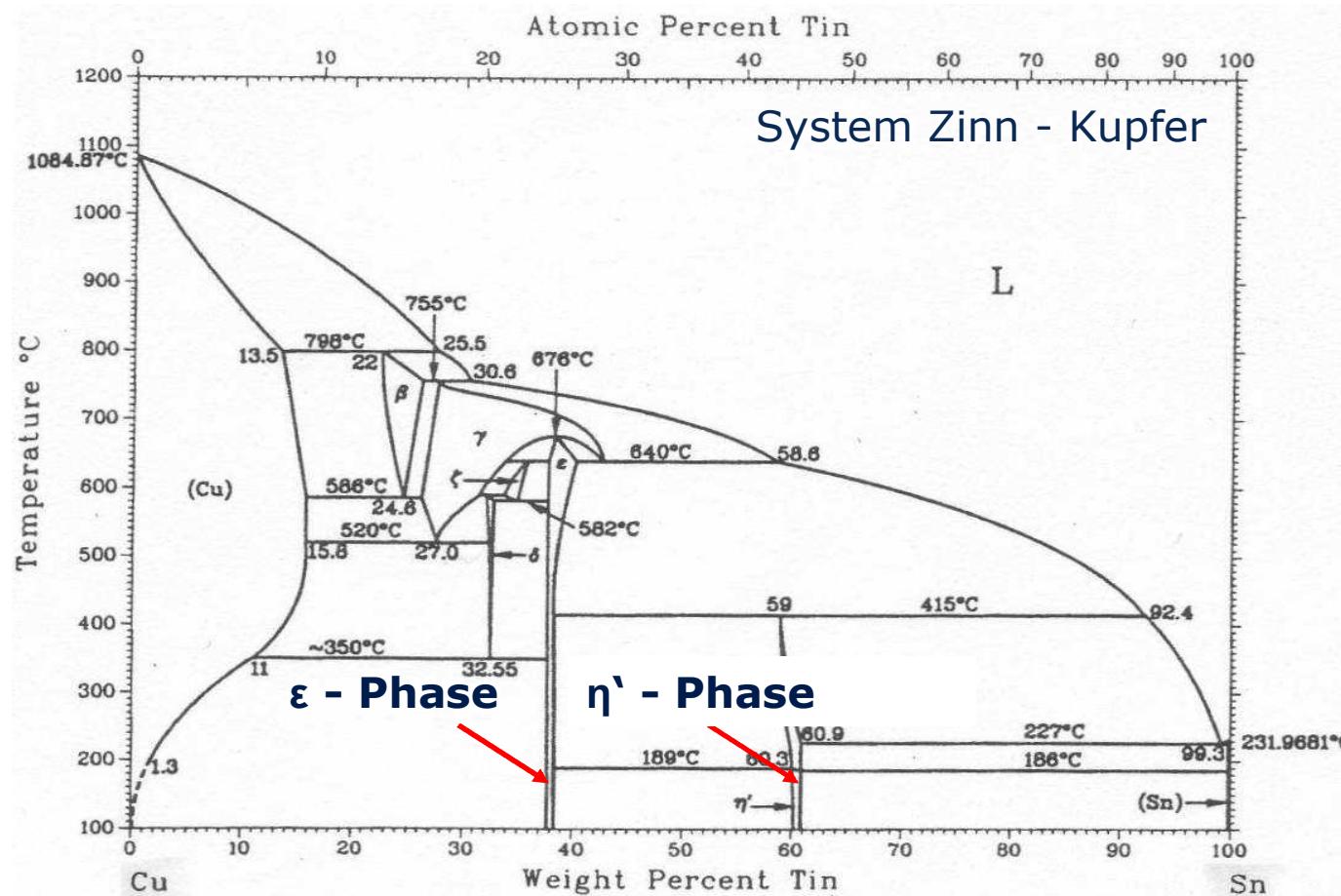
Kupfer-Schmelzleiter mit Zinnlot



Intermetallische Phasen

- Intermetallische Phasen (IMP) besitzen andere elektrische und mechanische Eigenschaften als die Ausgangsmetalle
- **Einfluss der Interdiffusion auf das Langzeitverhalten von Kupfer- und Silber-Schmelzleitern mit Zinn-Beschichtung**

## Theorie Interdiffusion



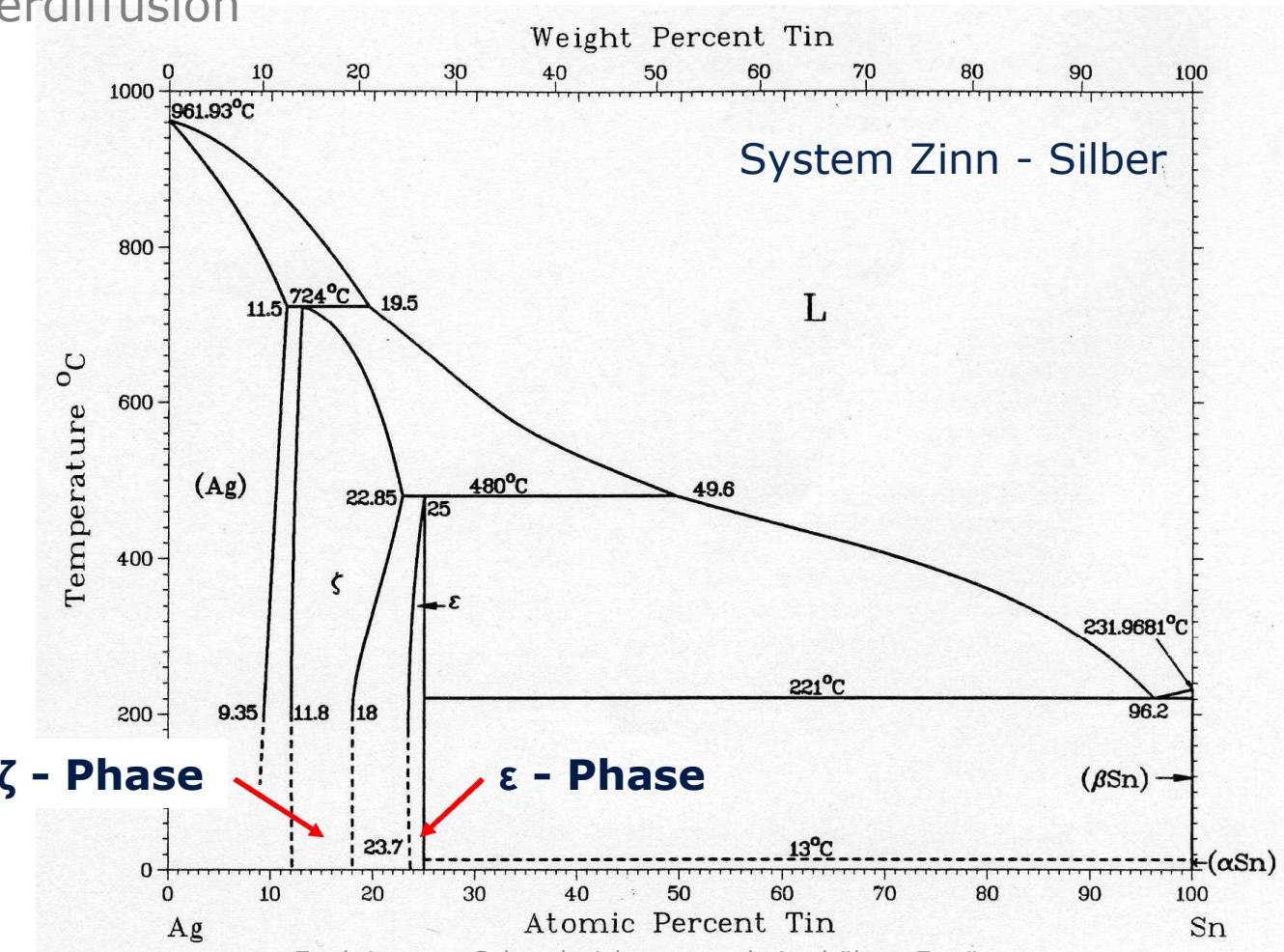
# Theorie

## Interdiffusion

System Kupfer - Zinn bildet im Temperaturbereich bis 188 °C die  $\varepsilon$  - und  $\eta'$  - Phase

Eigenschaft	Kupfer (Cu)	Zinn (Sn)	$\eta'$ -Phase ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ )	$\varepsilon$ -Phase ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ )
Schmelztemperatur in °C	1.083	232	415	676
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	8,89	7,30	8,28	8,90
Elastizitätsmodul in kN/mm <sup>2</sup>	110 - 130	47	90	110
Thermischer Ausdehnungskoeffizient in 1/K	$17 \cdot 10^{-6}$	$26 \cdot 10^{-6}$	$16,3 \cdot 10^{-6}$	$19 \cdot 10^{-6}$
Härte in HV <sub>0,005</sub>	95	7	539	472
Querkontraktionszahl	0,34	0,33	0,32	0,33
Elektr. Leitfähigkeit in m/Ω·mm <sup>2</sup>	59,6	8,6	8,2	4,9
Temperaturbeiwert in 1/K	$3,81 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$

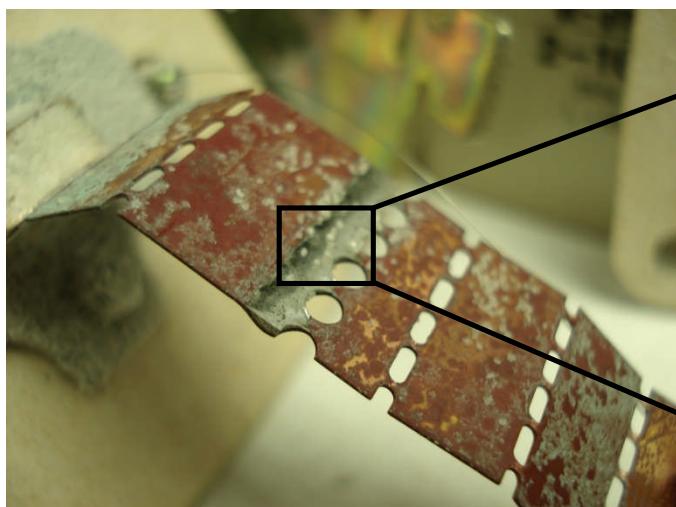
# Theorie Interdiffusion



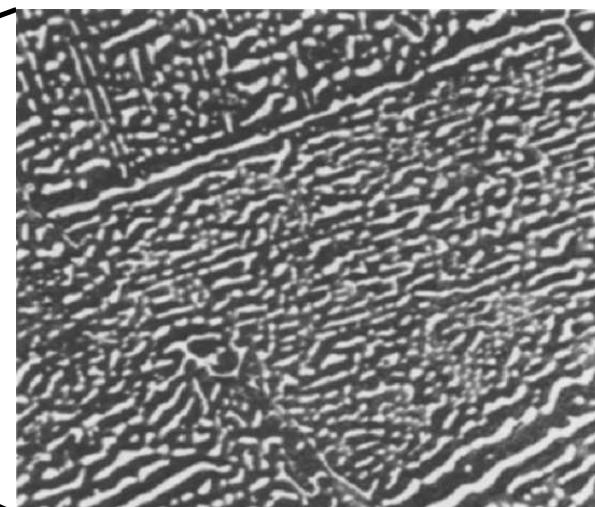
## Theorie

### Oxidation

In der Chemie ist die Oxidation als der Teil einer Redoxreaktion definiert, bei dem Elektronen abgegeben werden. Dieser Vorgang ist mit einem Erhöhen der Oxidationszahl verbunden.



Kupfer-Schmelzleiter mit Zinnlot

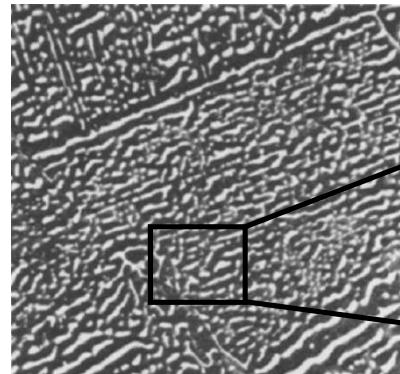


Oxidschicht auf Zinn

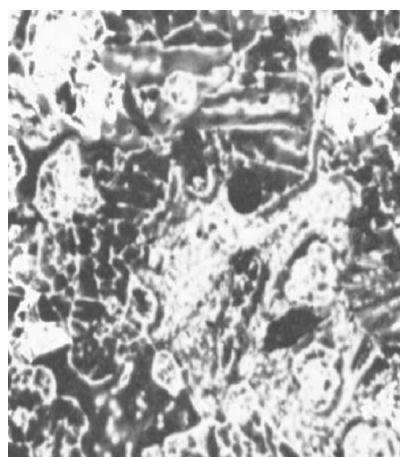
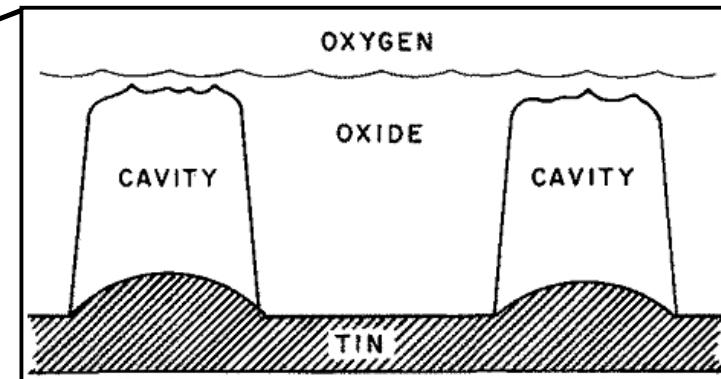
- Entstehen von Zinn(II)-oxid  $\text{SnO}$  bis zum Schmelzpunkt des Basismaterials ( $175\text{ }^\circ\text{C} - 300\text{ }^\circ\text{C}$ , Disproportionierungsreaktion)
- **Oxidschicht bei Zinn nicht schützend → kontinuierliches Schichtwachstum der Oxidschicht**

## Theorie Oxidation

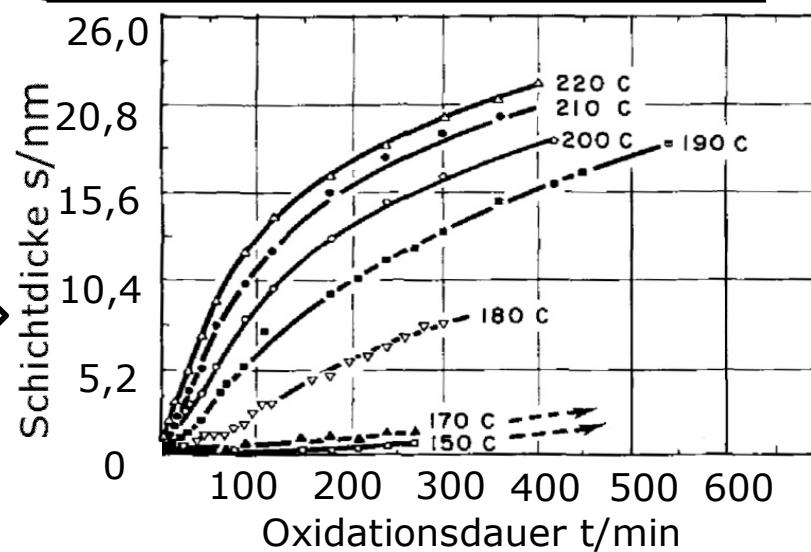
**Quelle:** Boggs, W. E.; Trozzo, P. S.; Pellissier G. E.: The Oxidation of Tin: II. The Morphology and Mode of Growth of Oxide Films on Pure Tin. Journal of the Electrochemical Society 108 (1961), S. 13-24



Geschlossene  
Oxidschicht mit  
Hohlräumen



Fragmentierte  
Oxidschicht



# Erwärmungsversuche

## Versuchsplan

Sicherungstyp/ Sicherungsleiste	Sammelschienenttemperatur in °C		
	90	115	140
Marke B - gG 400A NH2	A/B/C	A/B/C	A/B/C
Marke C - gG 400A NH2	A/B/C	A/B/C	A/B/C

A: Hersteller 1, B: Hersteller 2, C: Hersteller 3  
rot...Bereits untersucht



### Ziel:

- Bestimmen der Messertemperatur der Sicherung abhängig vom Belastungsstrom der Sicherung bei konstanter Sammelschienenttemperatur
- Bestimmen des Widerstandes der Sicherung vor und nach der Belastung

### Belastung:

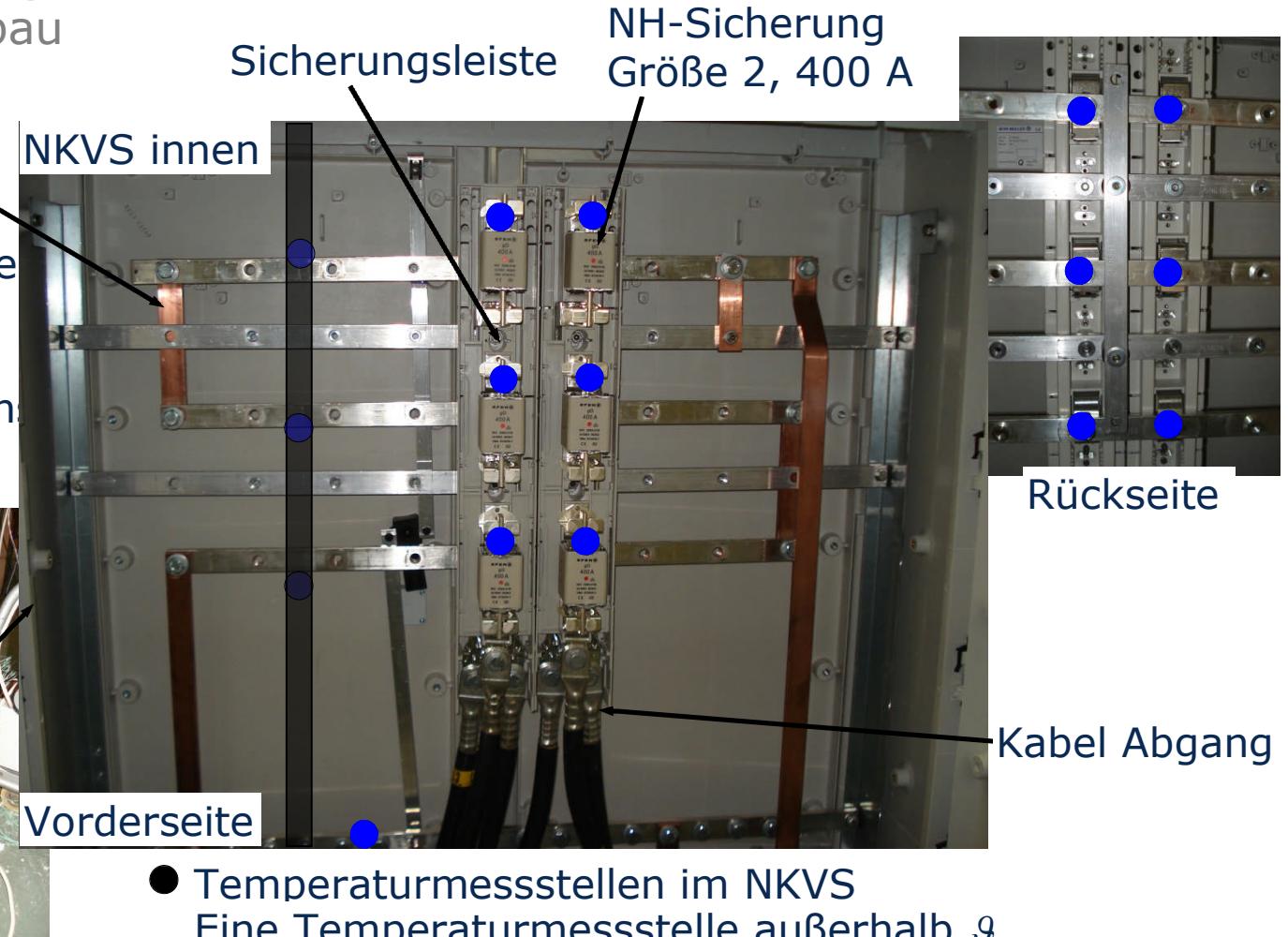
Strom

## Erwärmungsversuche

### Versuchsaufbau

Sammel-  
schiene-  
system

Einspeisung de-  
Belastungs-  
stroms über  
Hochstromtran-  
formatoren



- Temperaturmessstellen im NKVS  
Eine Temperaturmessstelle außerhalb  $\vartheta_u$

Funktion von Schmelzsicherungen bei erhöhter Erwärmung

# Erwärmungsversuche

## Versuchsaufbau

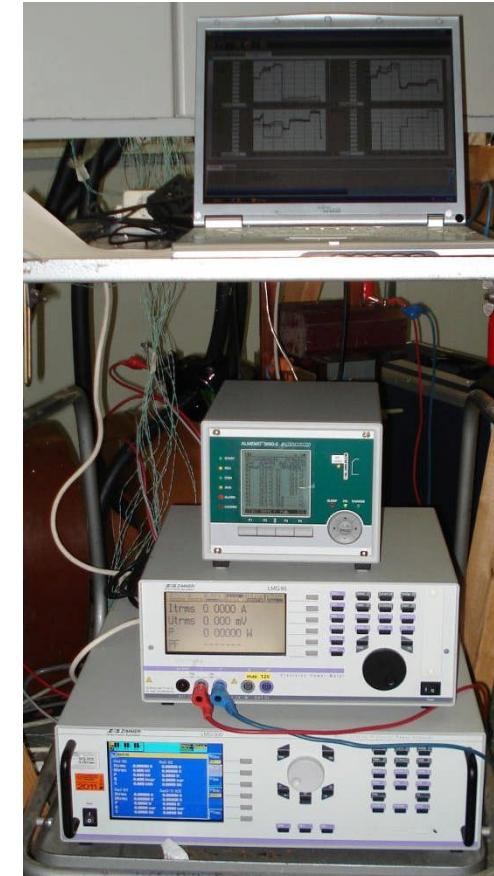


- Erwärmungsversuche bei unterschiedlichen Strömen in der Sammelschiene und in den Sicherungsabgängen (Versuchsplan)
- Aufzeichnen der Temperaturverläufe an den Temperaturmesspunkten und der Ströme in den Sicherungsabgängen sowie in der Sammelschiene

### Versuchsaufbau mit Thermoelementen

Dresden, 03.06.2012

Funktion von Schmelzsicherungen bei erhöhter Erwärmung

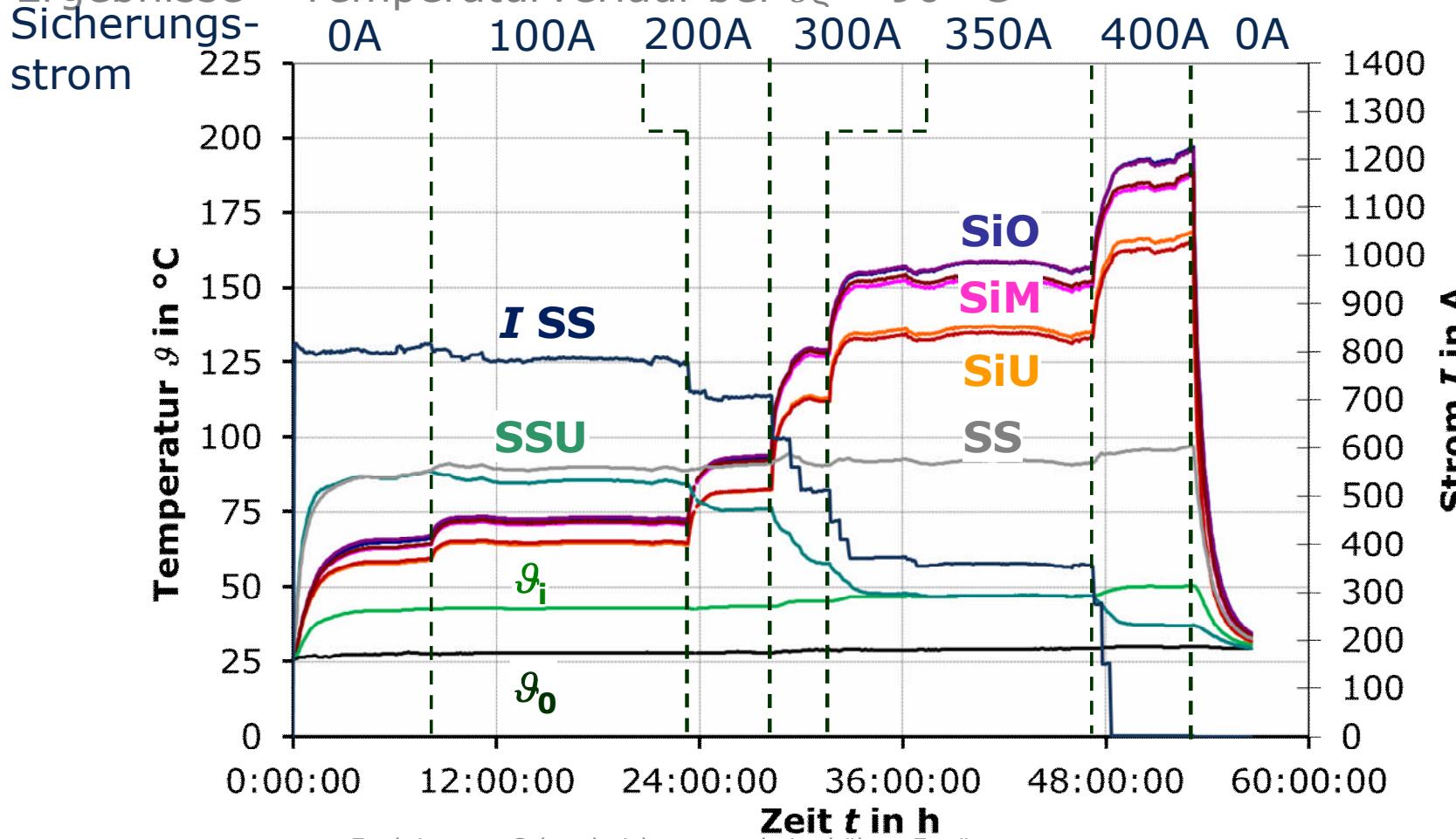


### Messtechnik

Folie 13

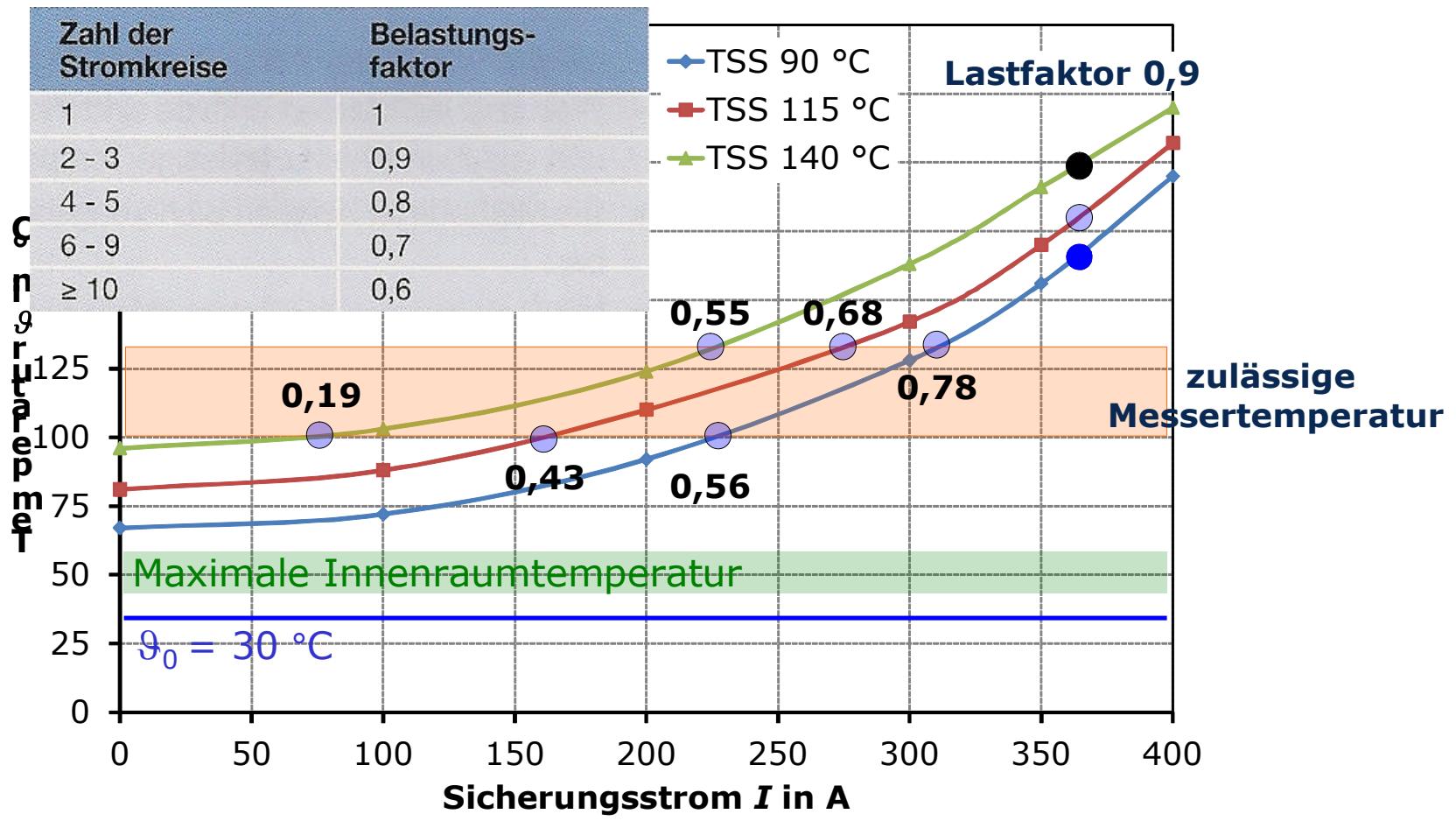
## Erwärmungsversuch

Ergebnisse – Temperaturverlauf bei  $g_c = 90^\circ\text{C}$



# Erwärmungsversuch

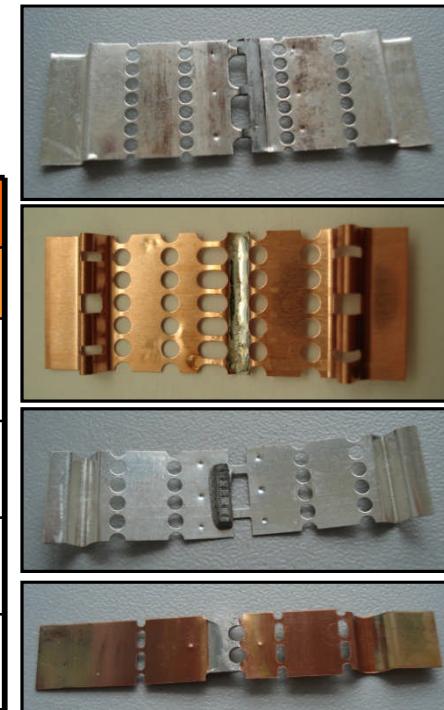
## Ergebnisse – NH-Sicherungen 400 A



# Langzeitversuche mit Schmelzleitern

## Versuchsplan

Schmelzleitertyp/ Probenzahl	Temperatur in °C			
	140	180	210	230
Marke B - Ag 100A	3	3	3	3
Marke D - Cu-Ag 100 A	3	3	3	3
Marke E - Cu 100 A	3	3	3	3
Marke C - Cu 100 A	3	3	3	3



**Ziel:**

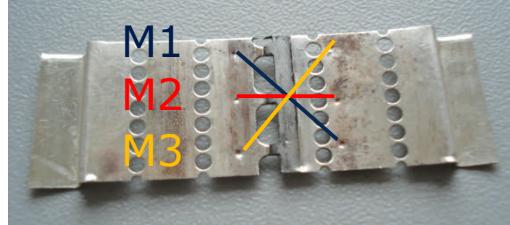
- Messen des Widerstands der mit Lot beschichteten Engestelle abhängig von der Zeit und Temperatur
- Untersuchen der Alterung der Schmelzleiter (Interdiffusion und Oxidation)

**Belastung:** Temperatur im Wärmeschrank

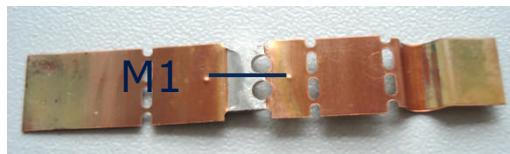
# Langzeitversuche mit Schmelzleitern

## Messmethode

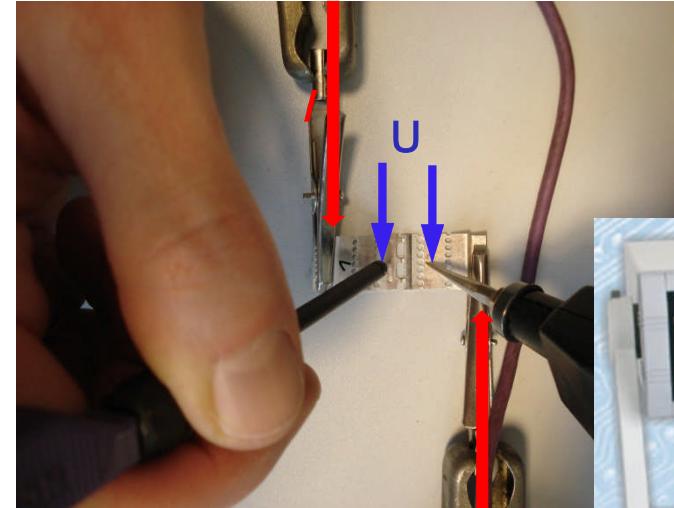
- Anwenden der Vierpunkt-Messmethode
- Messpunkte vor dem Lagern im Wärmeschrank eingekörnt
- Sechs Messpunkte bei den Schmelzleitern Marken B, D, E  
→ Widerstand → Mittelwert aus drei Messungen
- Zwei Messpunkte bei dem Schmelzleiter Marke C  
→ Widerstand → Mittelwert aus drei Messungen



Messpunkte Proben  
Marken B, D, E



Messpunkte Proben  
Marke C



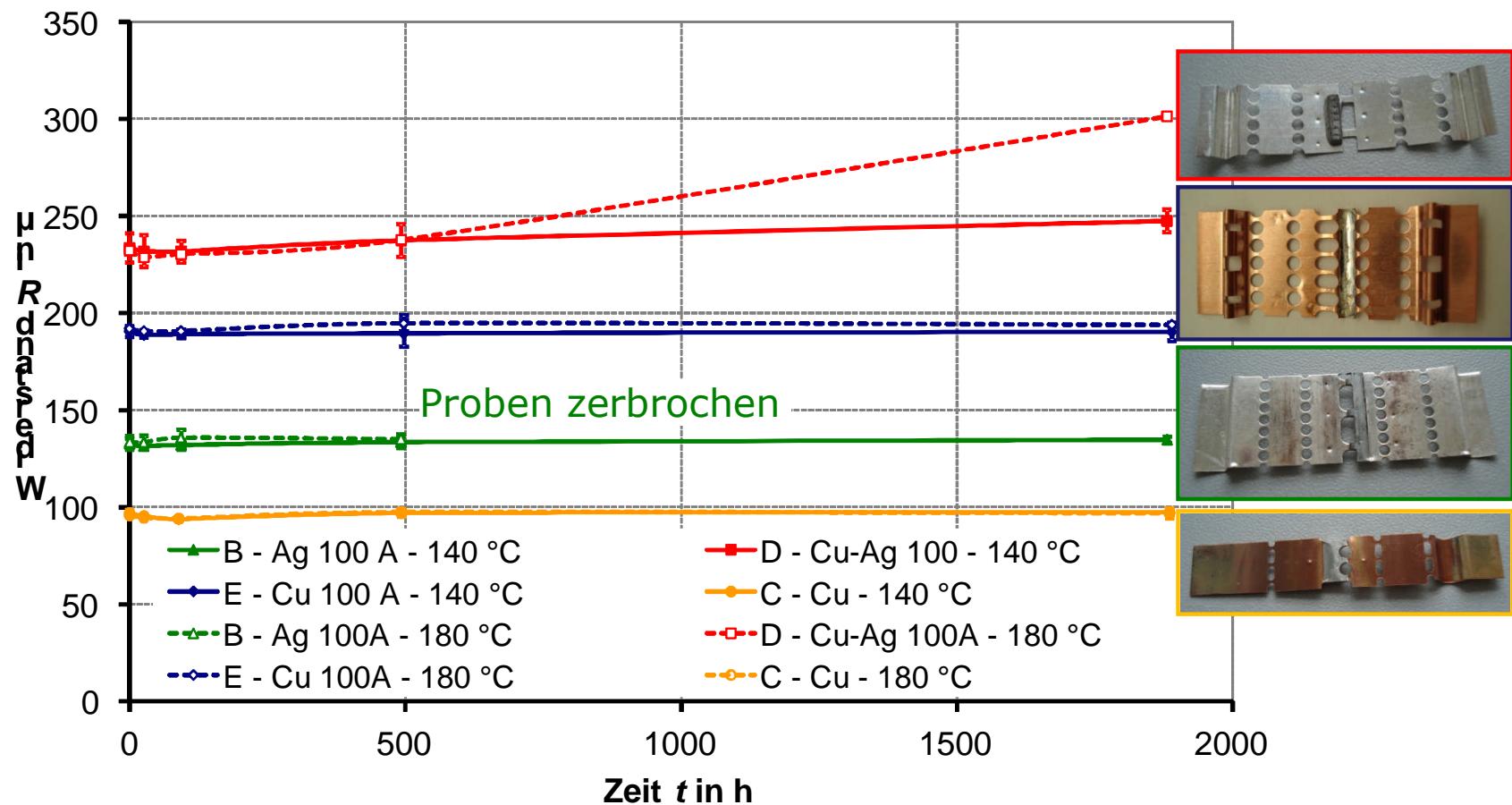
Messprinzip



Mikroohmmeter

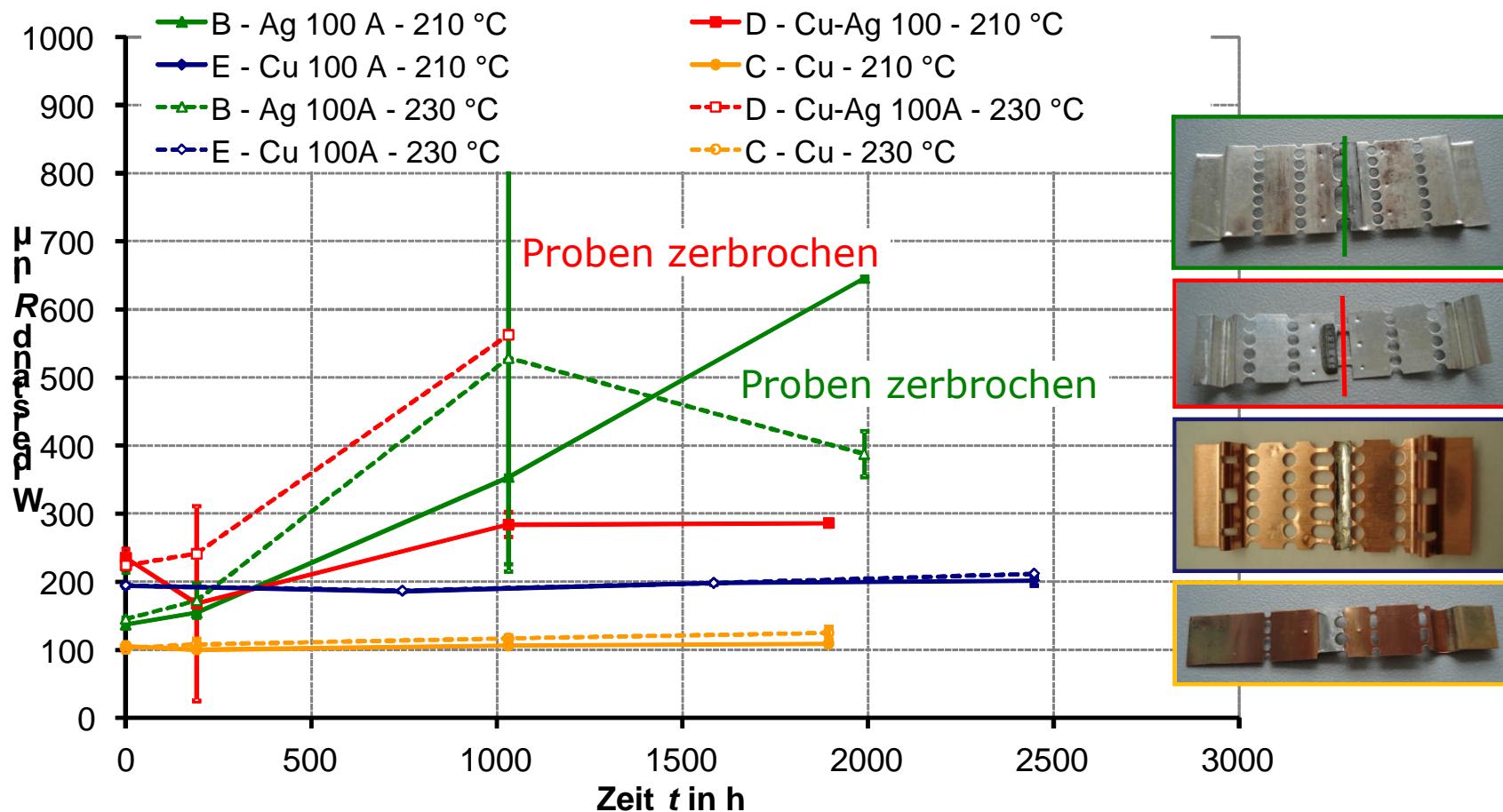
## Langzeitversuche mit Schmelzleitern

### Ergebnisse bei 140 °C und 180 °C



# Langzeitversuche mit Schmelzleitern

## Ergebnisse bei 210 °C und 230 °C



# Langzeitversuche mit Schmelzleitern

## Ergebnisse – Mikroskopische Untersuchungen

- Schmelzleiter aus Silber oder versilbert sind bei Temperaturen über 140 °C beim Messen des Widerstandes an der Engstelle gebrochen
- Probe B - Ag 100 A - 180 °C → Mikroskopische Untersuchungen

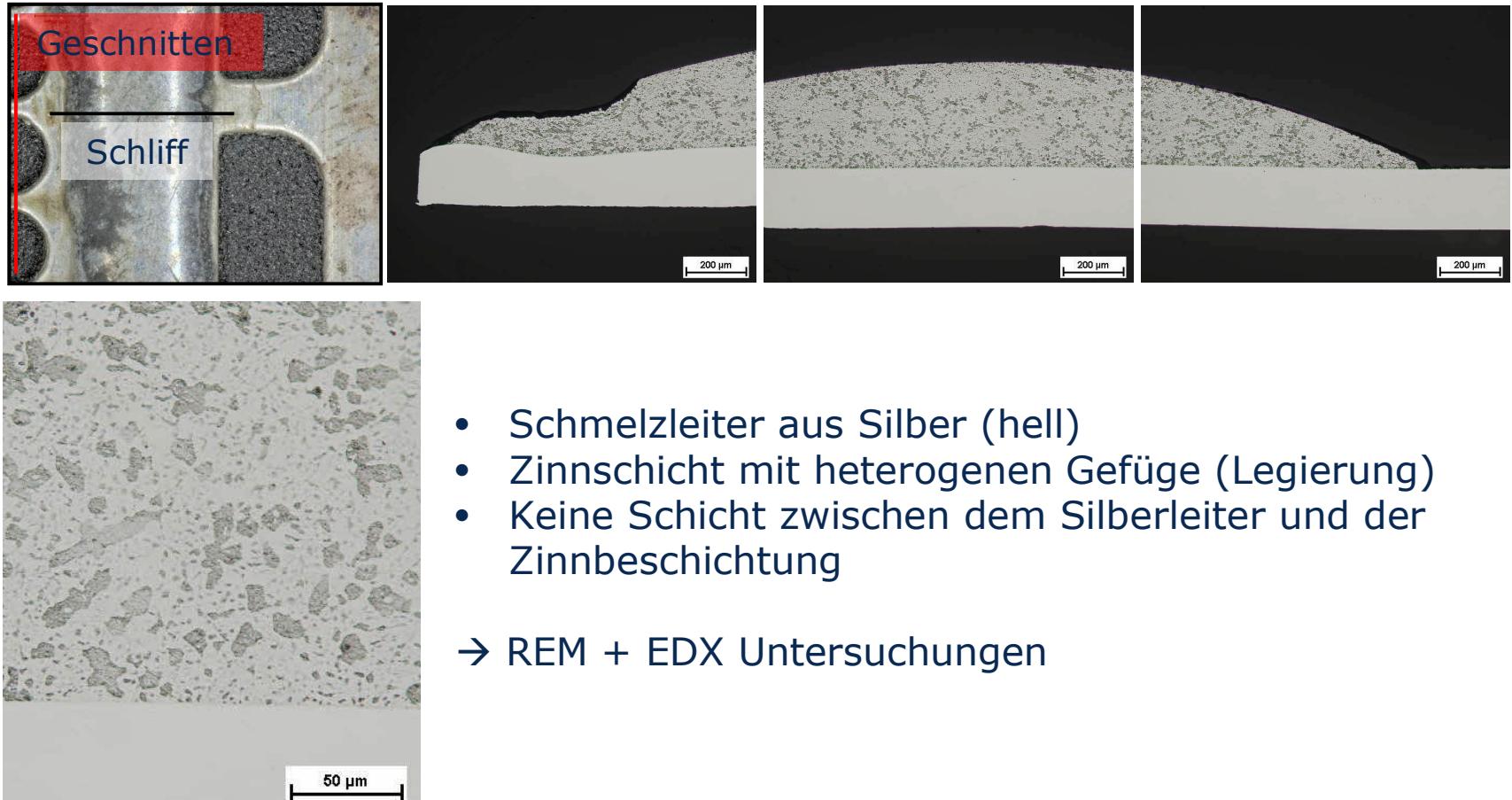


- Im gealterten Zustand deutliche Veränderungen im Bereich der Engstelle mit Zinnlot (Oberflächenveränderung, Perlenbildung)

→ Querschliffe und REM + EDX Untersuchungen

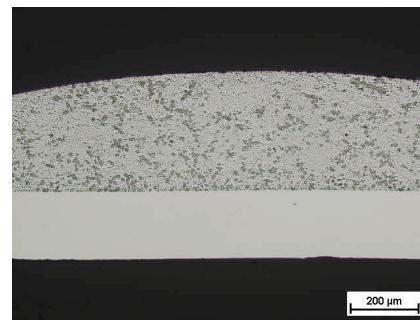
# Langzeitversuche mit Schmelzleitern

## Ergebnisse – Querschliff Neuzustand

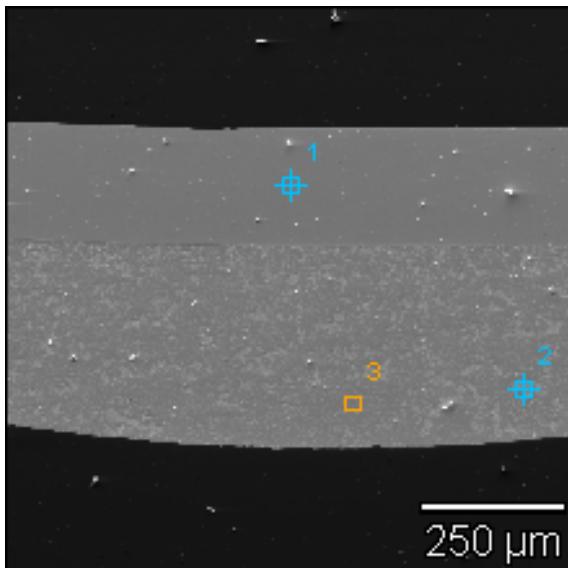


# Langzeitversuche mit Schmelzleitern

## Ergebnisse – REM + EDX Neuzustand



Beschleunigungsspannung: 15 kV  
Vergrößerung: 100

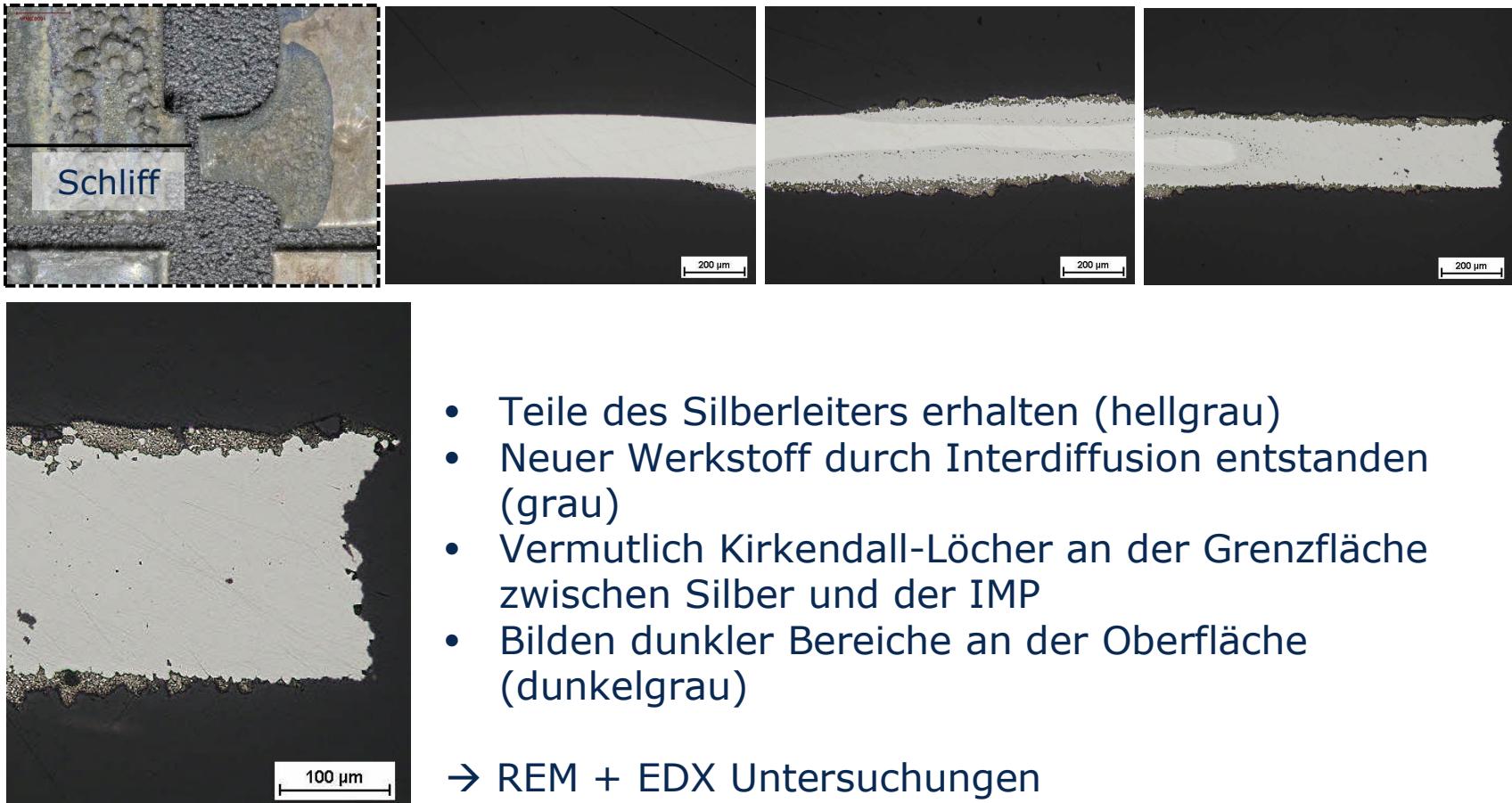


### Ergebnisse der EDX-Analyse:

- Punkt 1: 100 gew.-% Silber
  - Punkt 2: 17 gew.-% Zinn und 83 gew.-% Blei
  - Punkt 3: 27 gew.-% Zinn und 73 gew.-% Blei
- Bleihaltiges Lot vorhanden  
→ Blei und Zinn bildet Eutektikum, Verringern der Schmelztemperatur auf ca. 183 °C

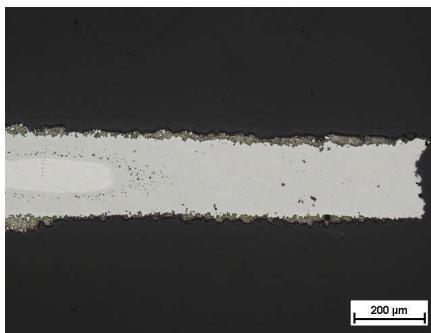
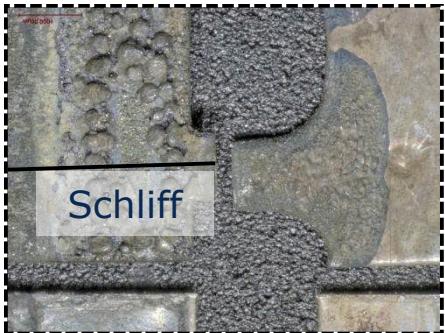
## Langzeitversuche mit Schmelzleitern

### Ergebnisse – Querschliff gealterter Zustand (500 h – 180 °C)

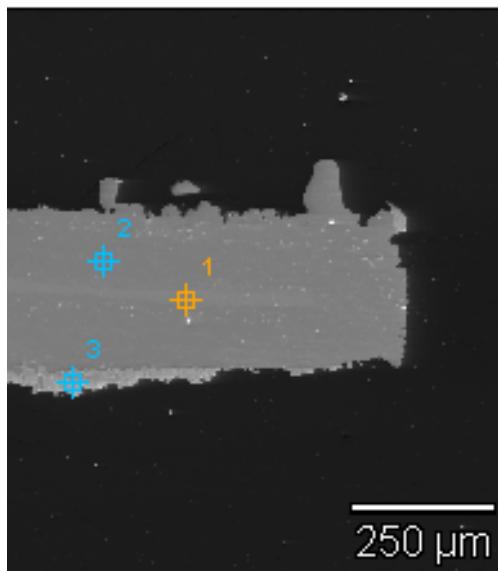


## Langzeitversuche mit Schmelzleitern

### Ergebnisse – REM + EDX gealterter Zustand



Beschleunigungsspannung: 15 kV  
Vergrößerung: 100



#### Ergebnisse der EDX-Analyse:

- Punkt 1: Silber
  - Punkt 2: 72 gew.-% Silber und 28 gew.-% Zinn
  - Punkt 3: 11 gew.-% Zinn und 89 gew.-% Blei
- Zusammensetzung in Punkt 2 entspricht in etwa der  $\epsilon$  – Phase im System Silber-Zinn  
(Phasenidentifikation durch XRD)
- Blei kann an der Phasenbildung nicht teilnehmen und wird nach außen gedrängt
- ⇒ Vermutlich Bilden der  $\epsilon$  - Phase (hart und spröde)
- ⇒ Bruch des Schmelzleiters an der Engstelle

## Zusammenfassung

- Mögliche Ursachen des Ausfalls und Versagens von Schmelzsicherungen bei erhöhter Umgebungstemperatur diskutiert
- Erwärmungsversuche bei unterschiedlichen Sammelschienentemperaturen und Sicherungsströmen durchgeführt
  - Belastungsfaktoren nach Norm ungenügend
  - Grenztemperaturen der Sicherungsmesser deutlich überschritten (max. 220 °C bei 140 °C TSS)
- Widerstand von vier Schmelzleitertypen abhängig von der Zeit und bei einer Temperatur von 140 °C, 180 °C, 210 °C und 230 °C bestimmt
  - Erhöhen des Widerstandes bei Schmelzleitern aus Silber
  - Ab einer Temperatur von 180 °C Bruch der Schmelzleiter aus Silber
- Mikroskopische Untersuchungen an einem Schmelzleitertypen durchgeführt
  - Zinnlot des untersuchten Schmelzleiters ist bleihaltig
  - Wahrscheinlich Bilden einer IMP, die zum Bruch des Schmelzleiters führte

## Ausblick

- Weitere Erwärmungsversuche mit den Sicherungsleisten von B und C. sowie den Schmelzsicherungen von C (Diskussion)
- Mikroskopische Untersuchungen an den allen Schmelzleitertypen nach zu erstellenden Versuchsplan (Neuzustand, gealterter Zustand)
- Aufbau eines Wärmenetzen für die untersuchten Sicherungen in Einbaulage
- Aufbau einer Mustersicherungen mit Thermoelementen nahe des Schmelzleiters

### **Offene Fragen der letzten Arbeitsberatung:**

- (Vereinfachte) Zeichnungen der Schmelzleiter als Vorlage für das Rechenmodell
- Materialdaten der Schmelzleiter und des Lots zur Modellierung des Diffusionsverhaltens



**»Wissen schafft Brücken.«**



Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann  
[grossmann@ieeh.et.tu-dresden.de](mailto:grossmann@ieeh.et.tu-dresden.de)



PD. Dr.-Ing. habil. Helmut Löbl  
[loebel@ieeh.et.tu-dresden.de](mailto:loebel@ieeh.et.tu-dresden.de)



Dr.-Ing. Stephan Schlegel  
[schlegel@ieeh.et.tu-dresden.de](mailto:schlegel@ieeh.et.tu-dresden.de)

TU Dresden, IEEH  
Mommsenstraße 10  
Binderbau  
01062 Dresden