

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

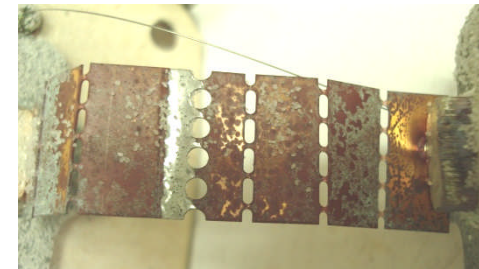
Gliederung

- **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±5) °C)



Theorie

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

Auswirkung:

Fehlabschalten der Sicherung unterhalb des Auslösestroms

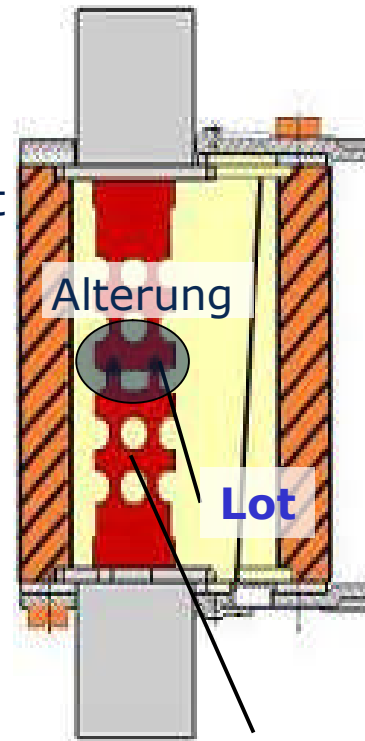
Mögliche Ursachen:

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 Schmelzleitertemperaturen über 130 °C

→ Zinn bildet keine schützende Oxidschicht

→ Entstehen dicker Oxidschichten

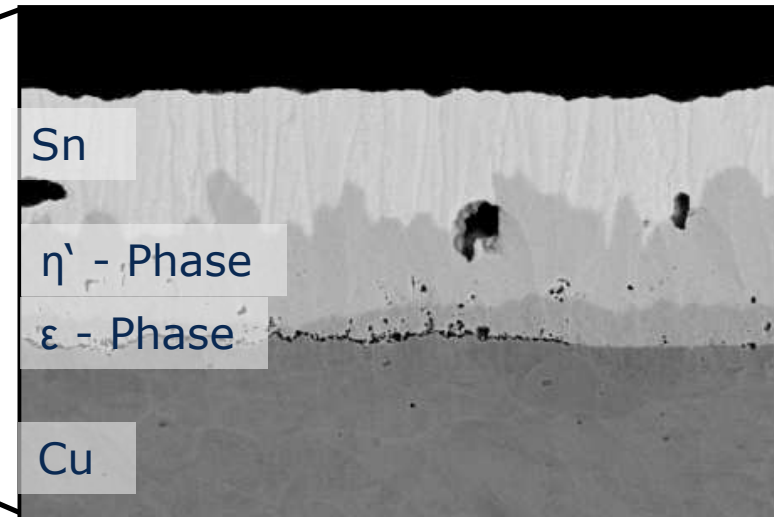
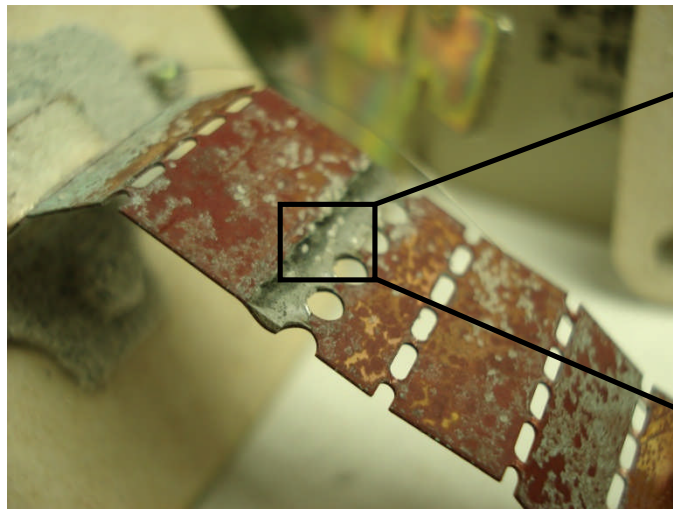
→ Umwandlung des Zinns in Zinnoxid

→ 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 $T \downarrow$).



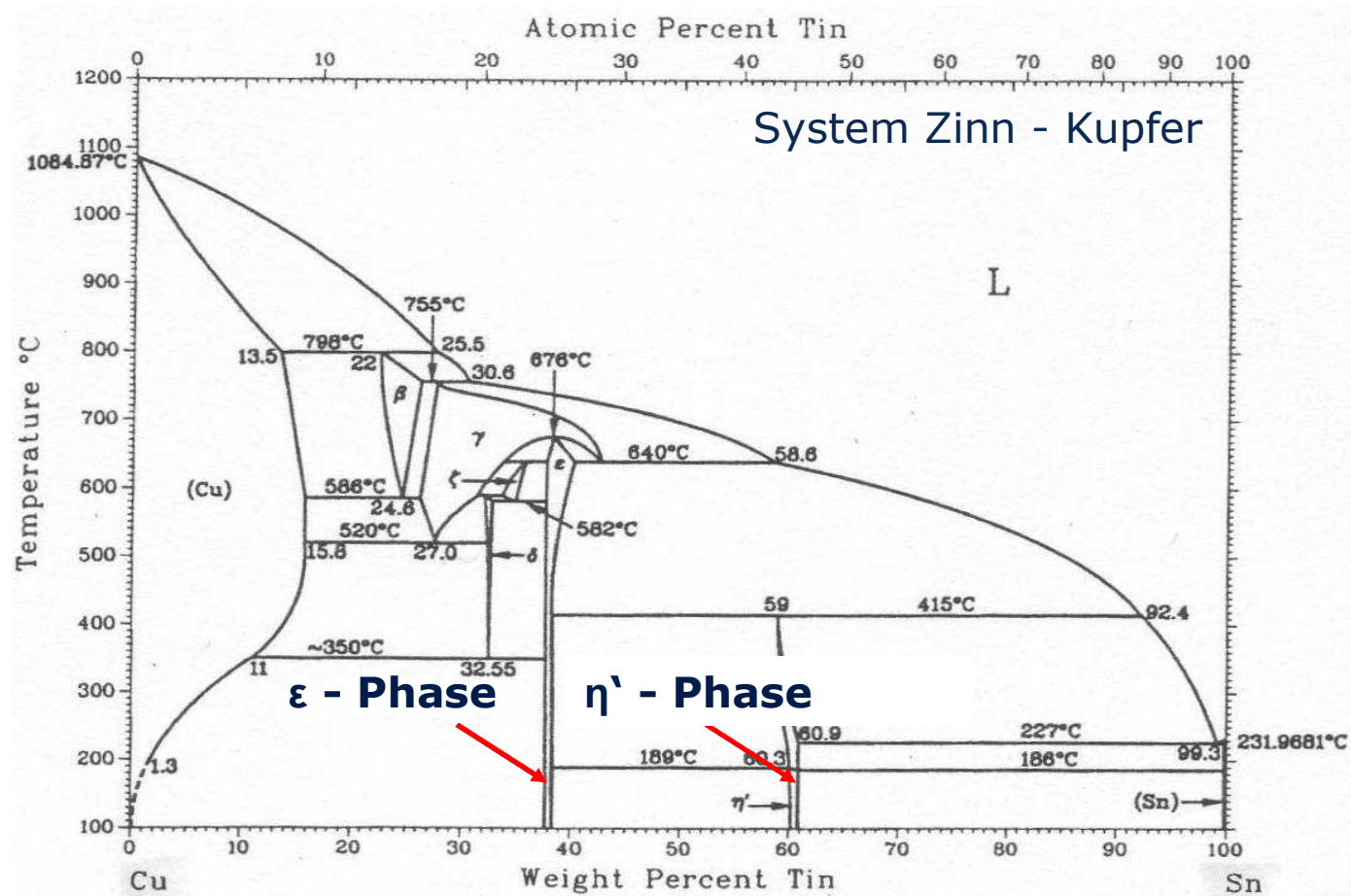
Kupfer-Schmelzleiter mit Zinnlot

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

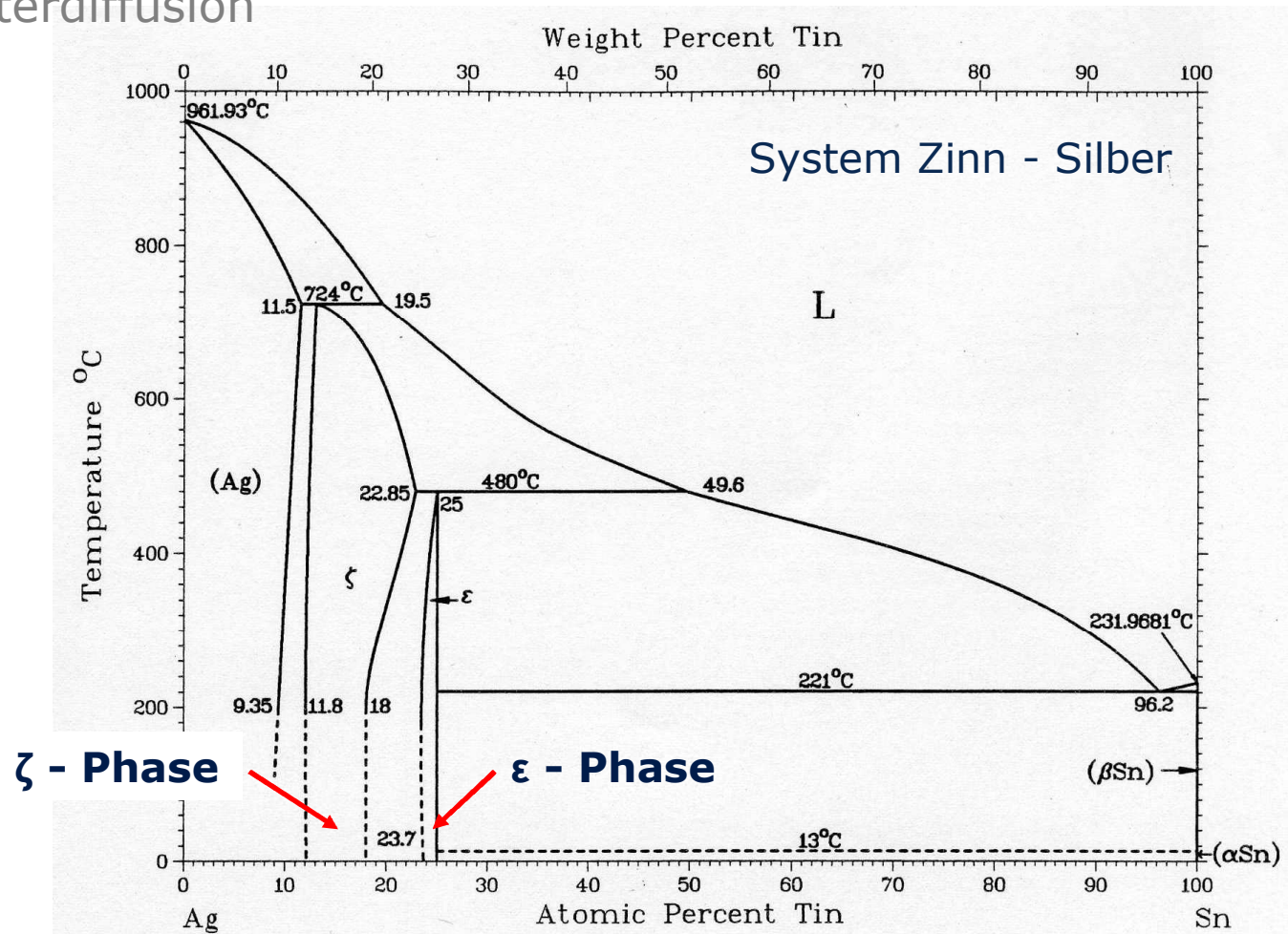
Interdiffusion

System Kupfer - Zinn bildet im Temperaturbereich bis 188 °C die ε - und η' - Phase

Eigenschaft	Kupfer (Cu)	Zinn (Sn)	η' -Phase (Cu ₆ Sn ₅)	ε -Phase (Cu ₃ Sn)
Schmelztemperatur in °C	1.083	232	415	676
Dichte in g/cm ³	8,89	7,30	8,28	8,90
Elastizitätsmodul in kN/mm ²	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 _{0,005}	95	7	539	472
Querkontraktionszahl	0,34	0,33	0,32	0,33
Elektr. Leitfähigkeit in m/Ω·mm ²	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

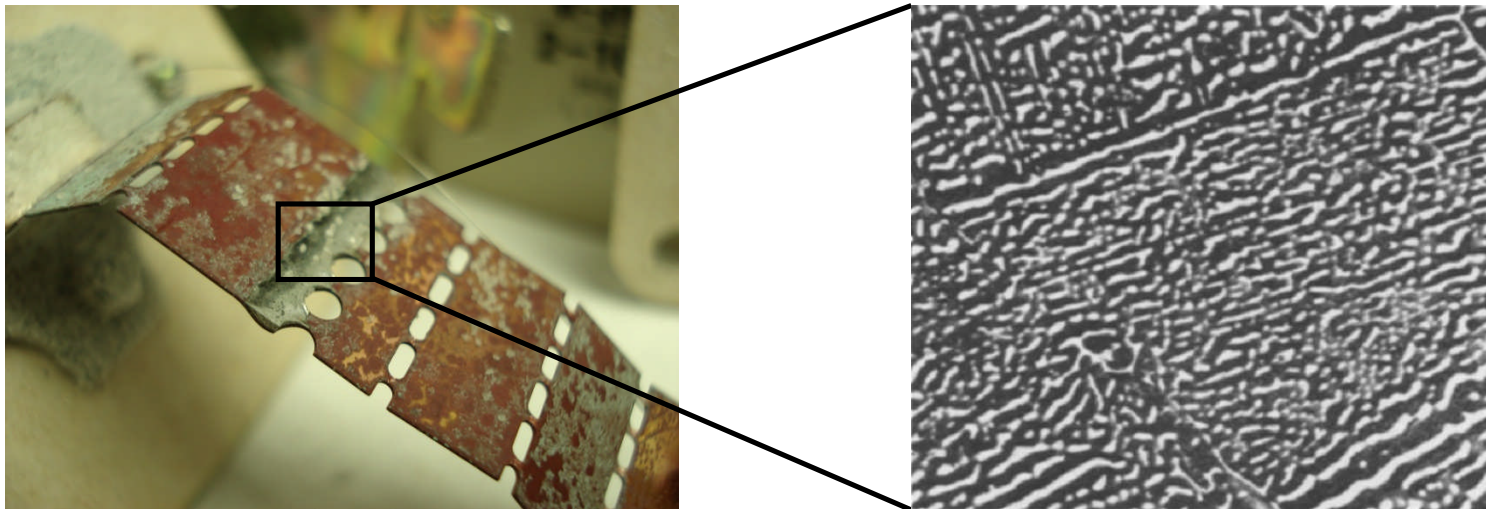
Interdiffusion



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.



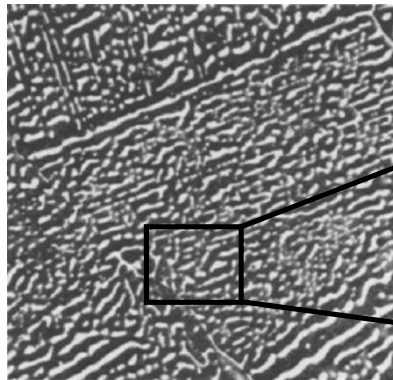
Kupfer-Schmelzleiter mit Zinnlot

Oxidschicht auf Zinn

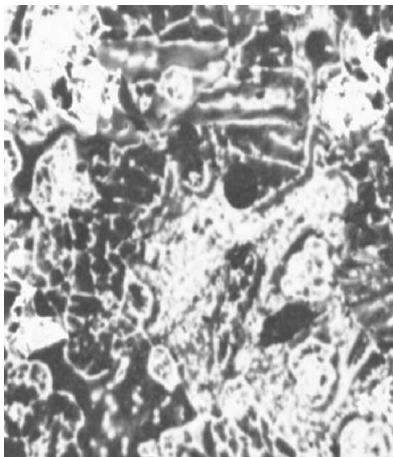
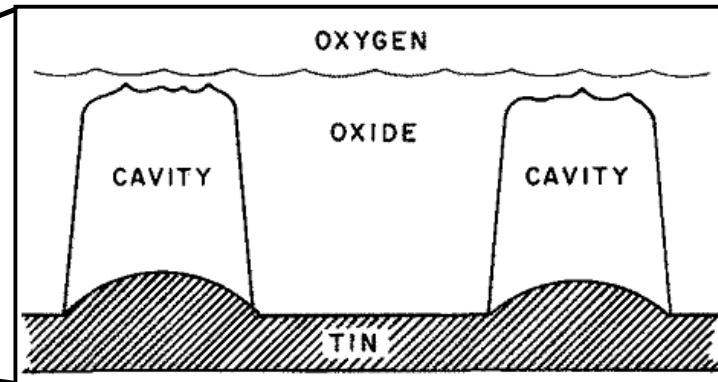
- ➔ Entstehen von Zinn(II)-oxid SnO bis zum Schmelzpunkt des Basismaterials ($175\text{ °C} - 300\text{ °C}$, Disproportionierungsreaktion)
- ➔ **Oxidschicht bei Zinn nicht schützend → kontinuierliches Schichtwachstum der Oxidschicht**

Theorie Oxidation

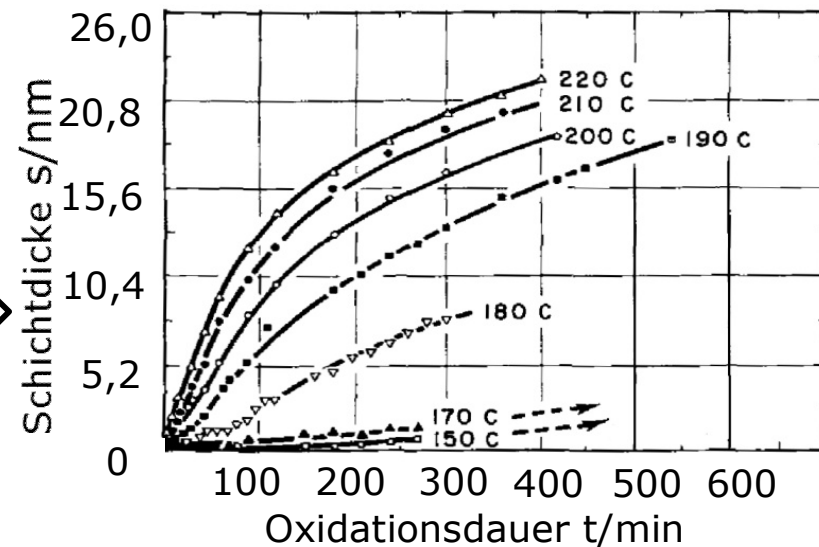
Quelle: Boggs, W. E.; Trozzo, P. S.; Pellissier G. E.: The Oxidation of Tin: II. The Morphology and Mode of Growth of Oxide Films on Pure Tin. Journal of the Electrochemical Society 108 (1961), S. 13-24



Geschlossene
Oxidschicht mit
Hohlräumen



Fragmentierte
Oxidschicht



Erwärmungsversuche

Versuchsplan

Sicherungstyp/ Sicherungsleiste	Sammelschientemperatur 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 Sammelschientemperatur
 - Bestimmen des Widerstandes der Sicherung vor und nach der Belastung
- Belastung:** Strom

Erwärmungsversuche

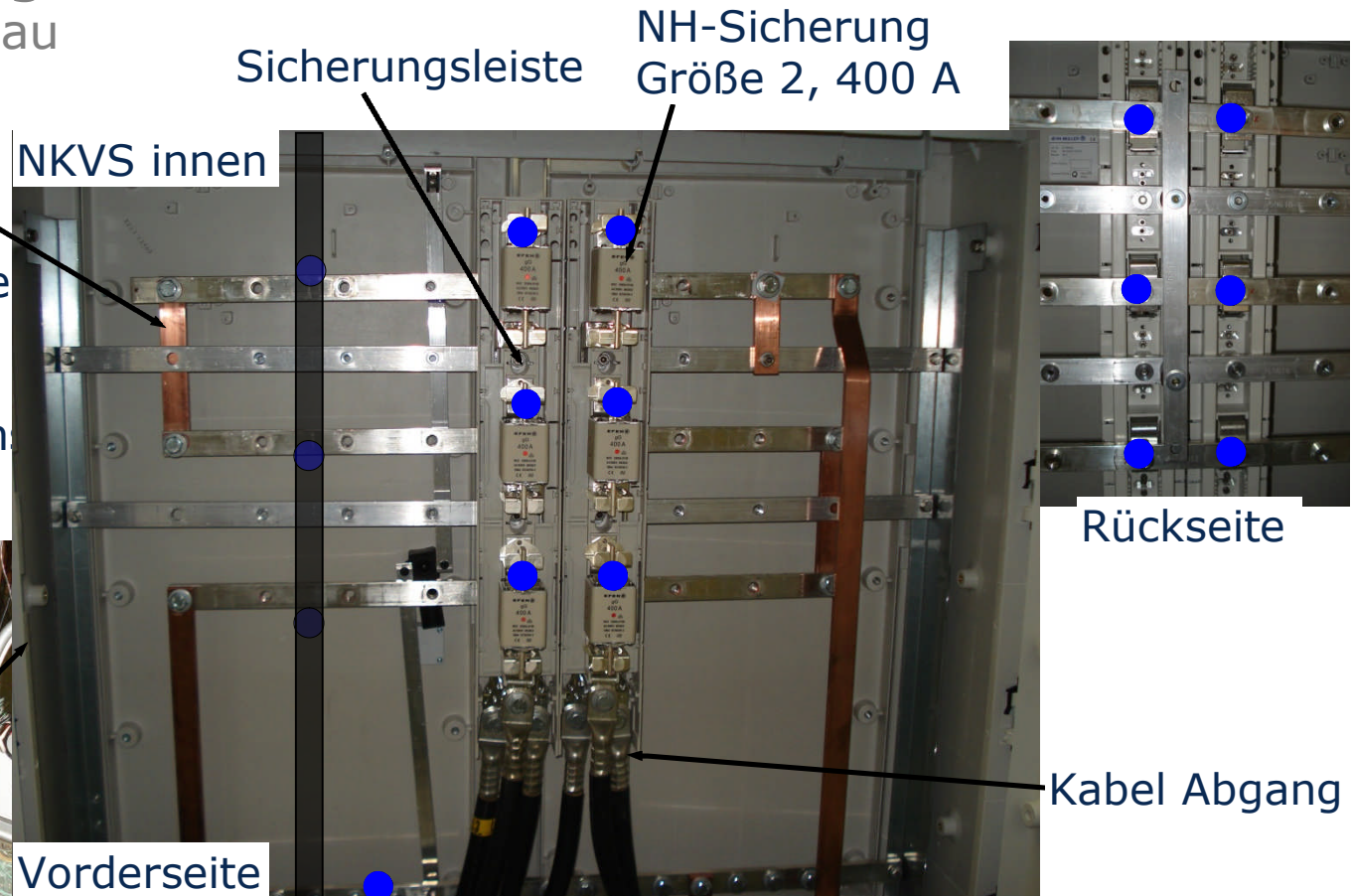
Versuchsaufbau

Sammel-
schienen-
system

Einspeisung des
Belastungs-
stroms über
Hochstromtran-
sformatoren



Dresden, 03.06.2012



- Temperaturmessstellen im NKVS
Eine Temperaturmessstelle außerhalb ϑ_u

Funktion von Schmelzsicherungen bei erhöhter Erwärmung

Folie 12

Erwärmungsversuche

Versuchsaufbau

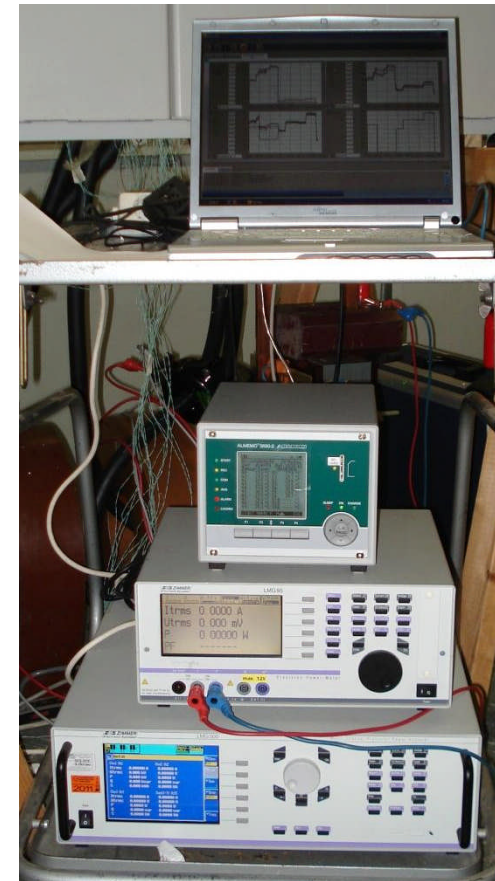


- Erwärmungsversuche bei unterschiedlichen Strömen in der Sammelschiene und in den Sicherungsabgängen (Versuchsplan)
- Aufzeichnen der Temperaturverläufe an den Temperaturmesspunkten und der Ströme in den Sicherungsabgängen sowie in der Sammelschiene

Versuchsaufbau mit Thermoelementen

Dresden, 03.06.2012

Funktion von Schmelzsicherungen bei erhöhter Erwärmung

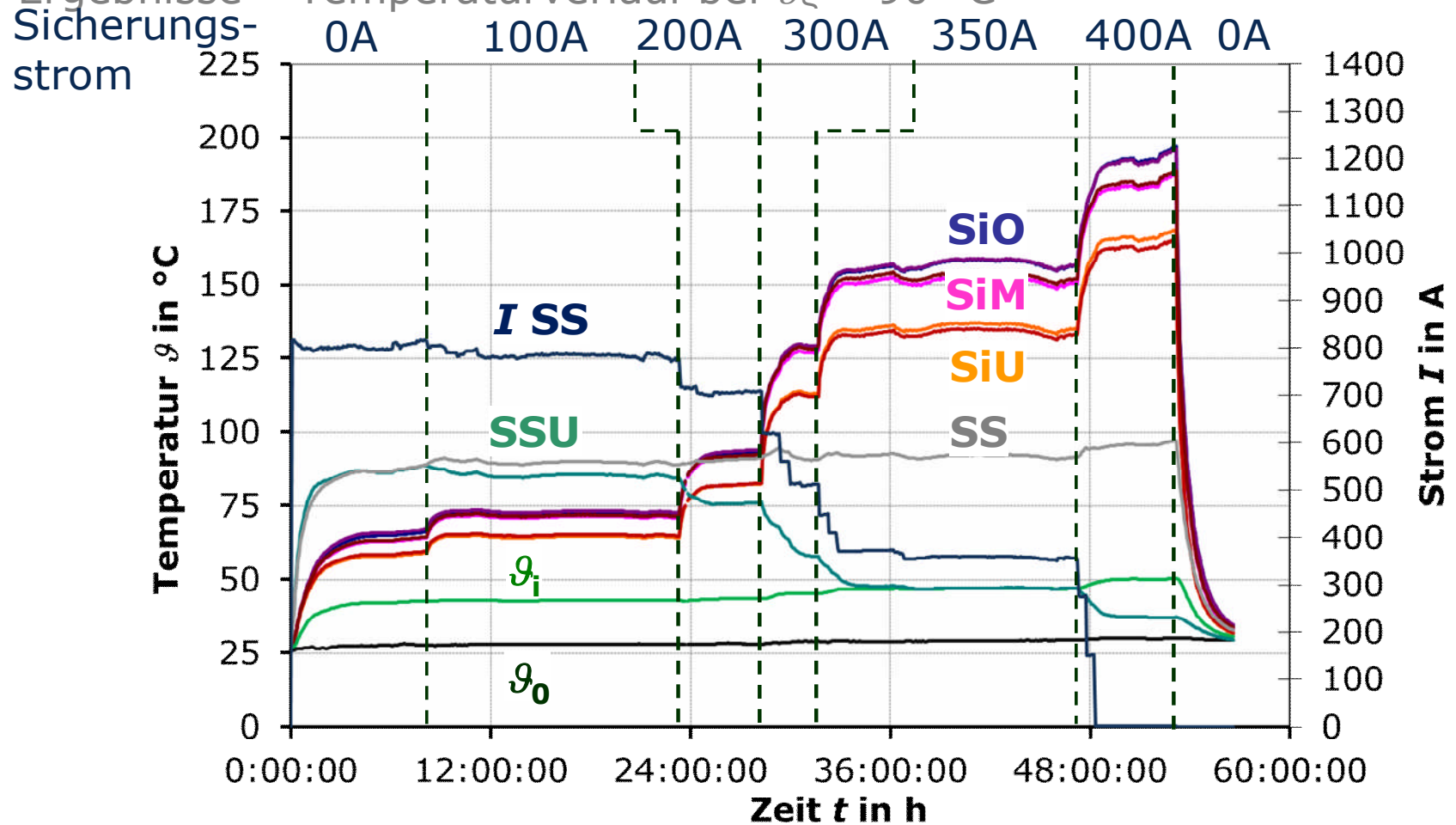


Messtechnik

Folie 13

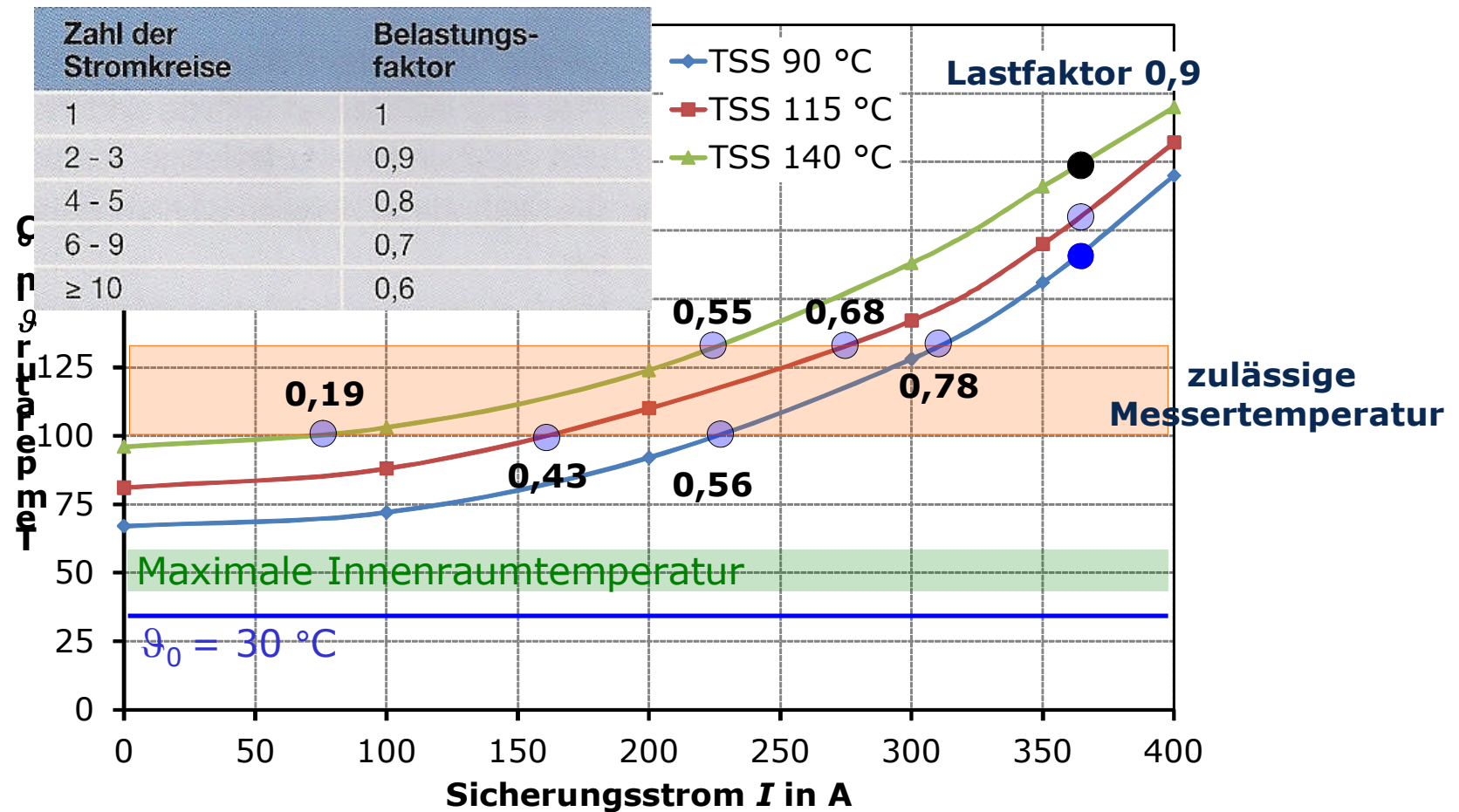
Erwärmungsversuch

Ergebnisse – Temperaturverlauf bei $\vartheta_c = 90\text{ °C}$



Erwärmungsversuch

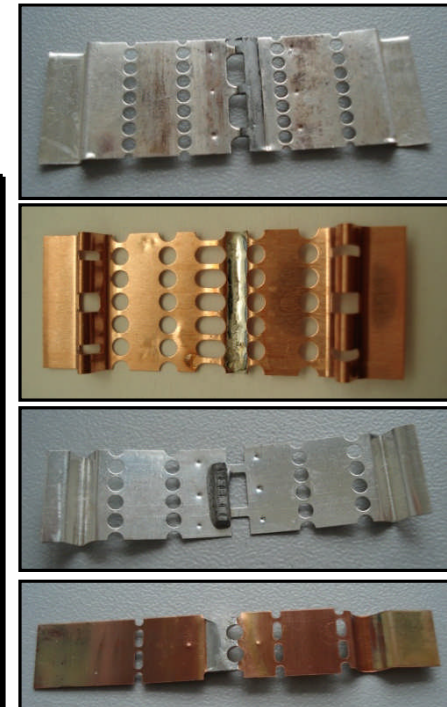
Ergebnisse – NH-Sicherungen 400 A



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

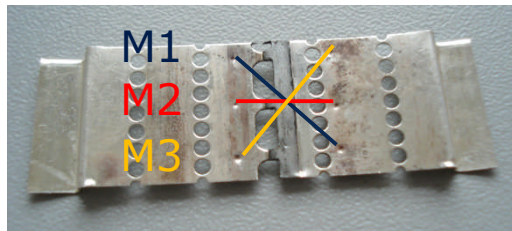


- Ziel:**
- Messen des Widerstands der mit Lot beschichteten Engstelle abhängig von der Zeit und Temperatur
 - Untersuchen der Alterung der Schmelzleiter (Interdiffusion und Oxidation)
- Belastung:** Temperatur im Wärmeschrank

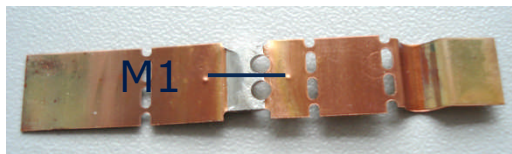
Langzeitversuche mit Schmelzleitern

Messmethode

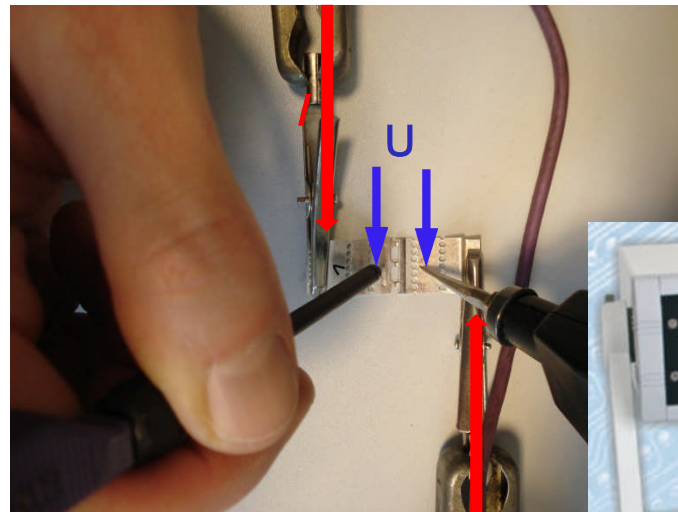
- Anwenden der Vierpunkt-Messmethode
- Messpunkte vor dem Lagern im Wärmeschrank eingekörnt
- Sechs Messpunkte bei den Schmelzleitern Marken B, D, E
→ Widerstands → Mittelwert aus drei Messungen
- Zwei Messpunkte bei dem Schmelzleiter Marke C
→ Widerstand → Mittelwert aus drei Messungen



Messpunkte Proben
Marken B, D, E



Messpunkte Proben
Marke C



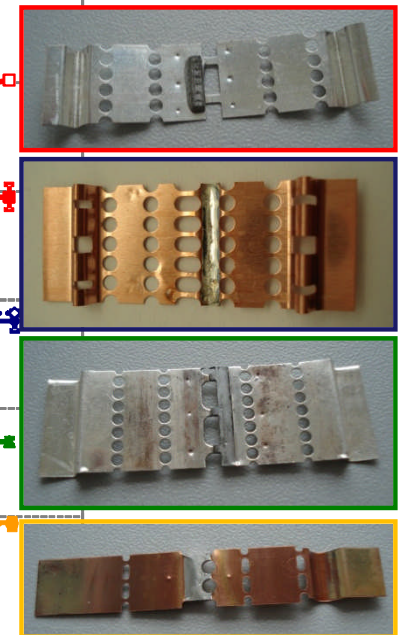
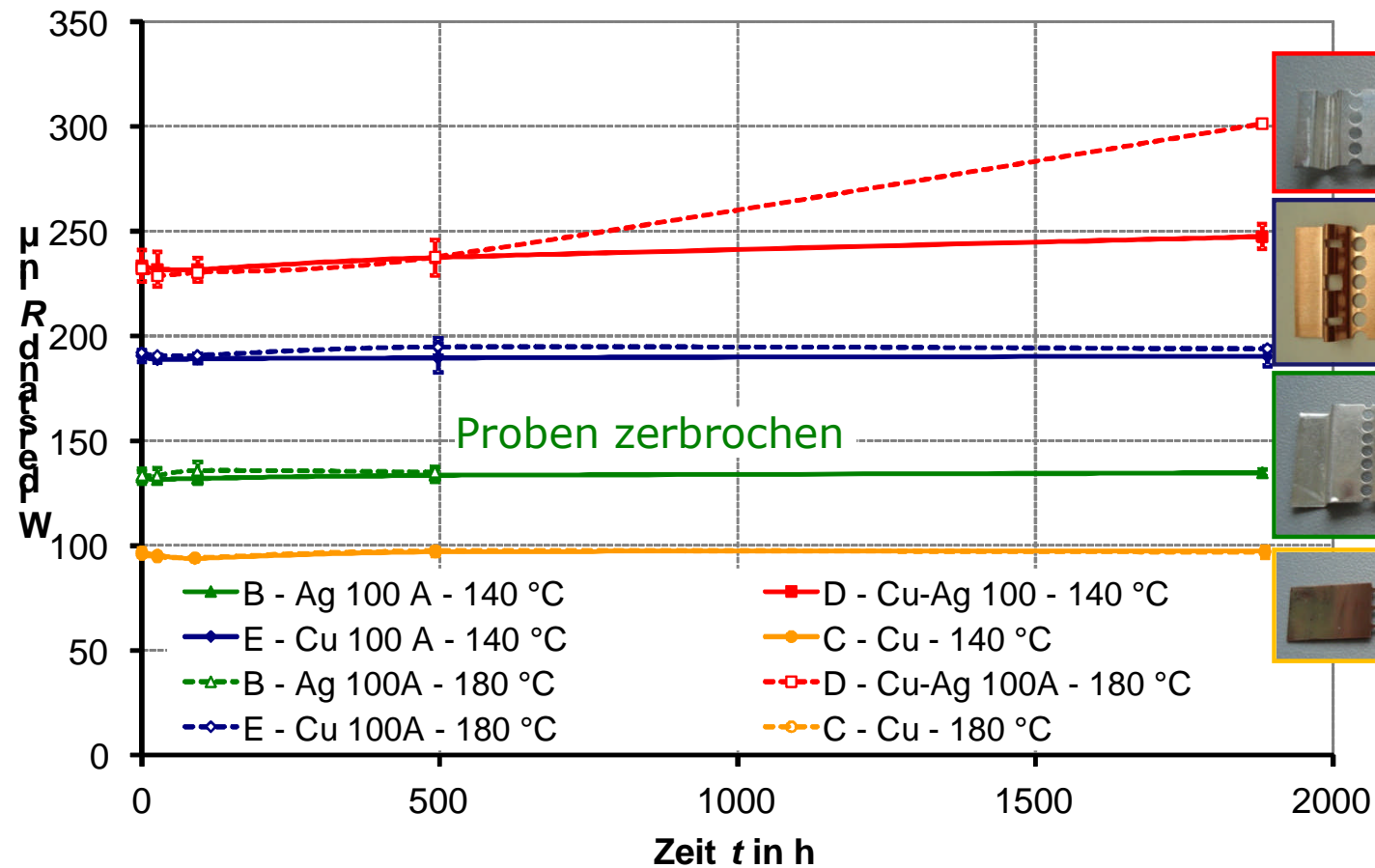
Messprinzip



Mikroohmmeter

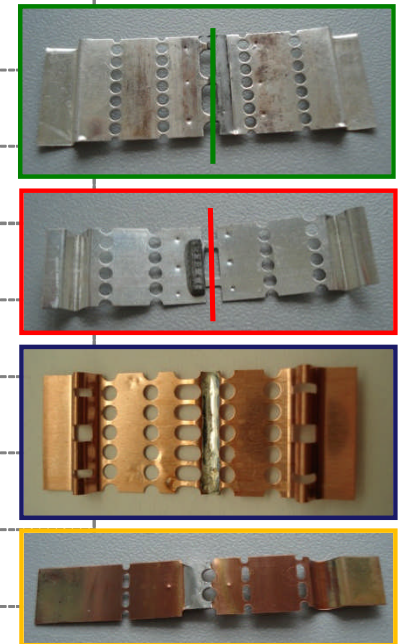
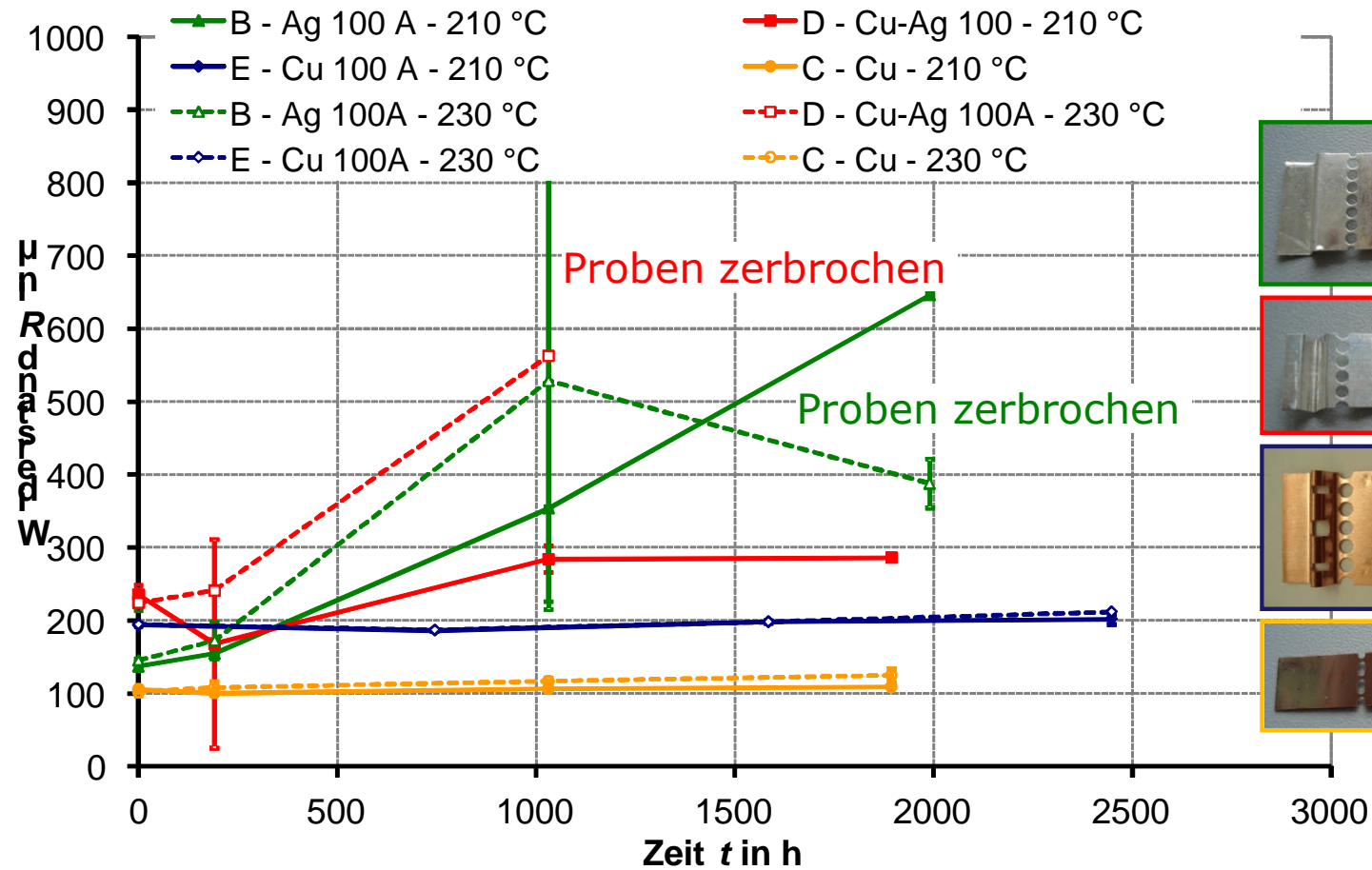
Langzeitversuche mit Schmelzleitern

Ergebnisse bei 140 °C und 180 °C



Langzeitversuche mit Schmelzleitern

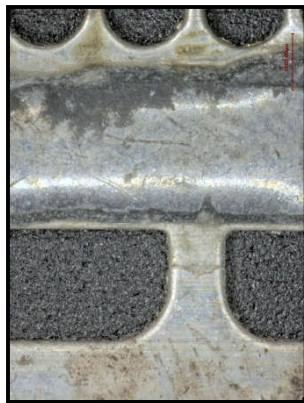
Ergebnisse bei 210 °C und 230 °C



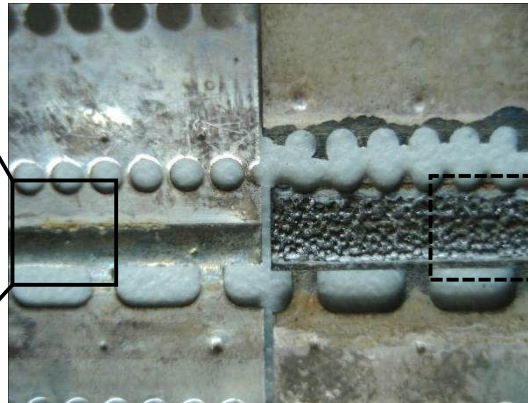
Langzeitversuche mit Schmelzleitern

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



Neuzustand



Vergleich Neuzustand
zu gealtertem Zustand



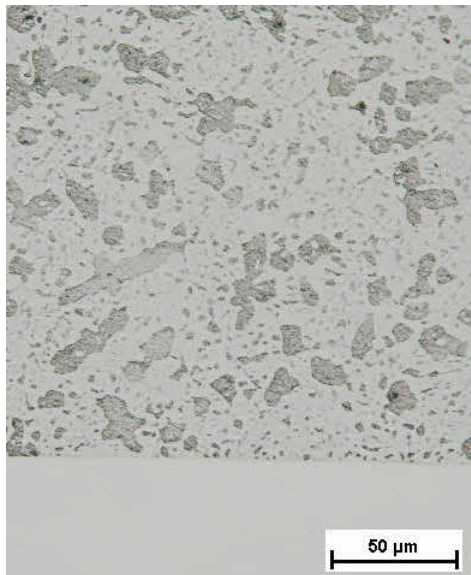
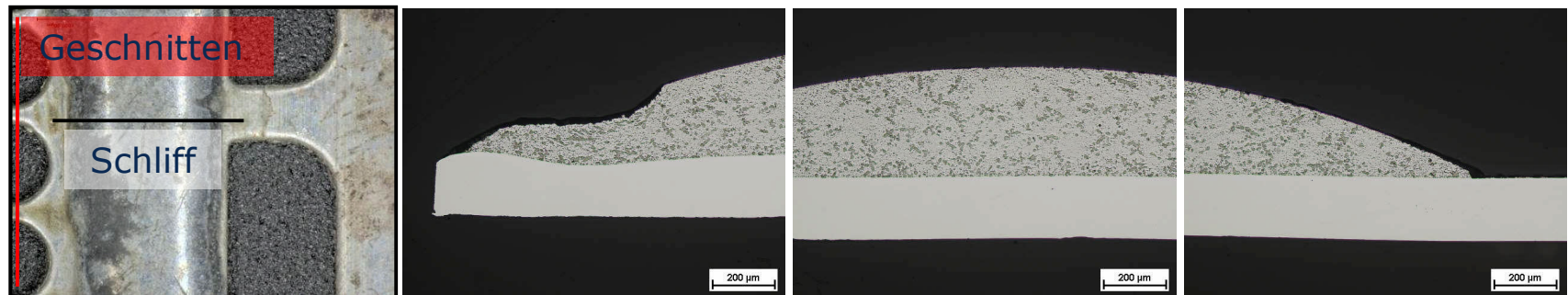
Gealterter Zustand
500 h bei 180 °C

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

→ Querschliffe und REM + EDX Untersuchungen

Langzeitversuche mit Schmelzleitern

Ergebnisse – Querschliff Neuzustand

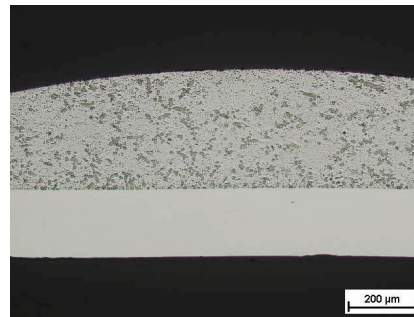


- Schmelzleiter aus Silber (hell)
- Zinnschicht mit heterogenen Gefüge (Legierung)
- Keine Schicht zwischen dem Silberleiter und der Zinnbeschichtung

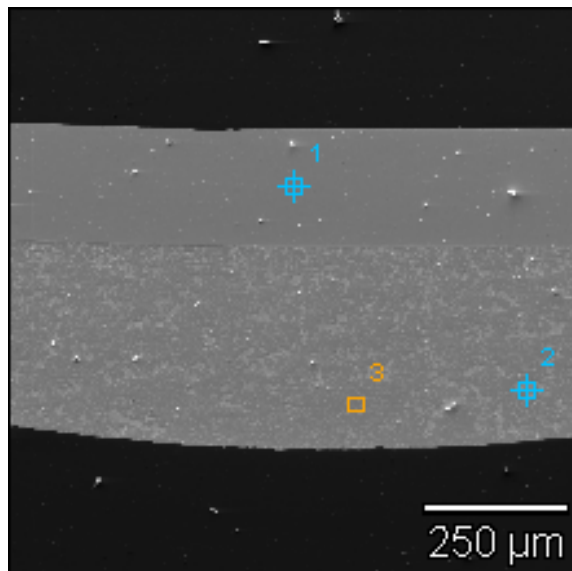
→ REM + EDX Untersuchungen

Langzeitversuche mit Schmelzleitern

Ergebnisse – REM + EDX Neuzustand



Beschleunigungsspannung: 15 kV
Vergrößerung: 100

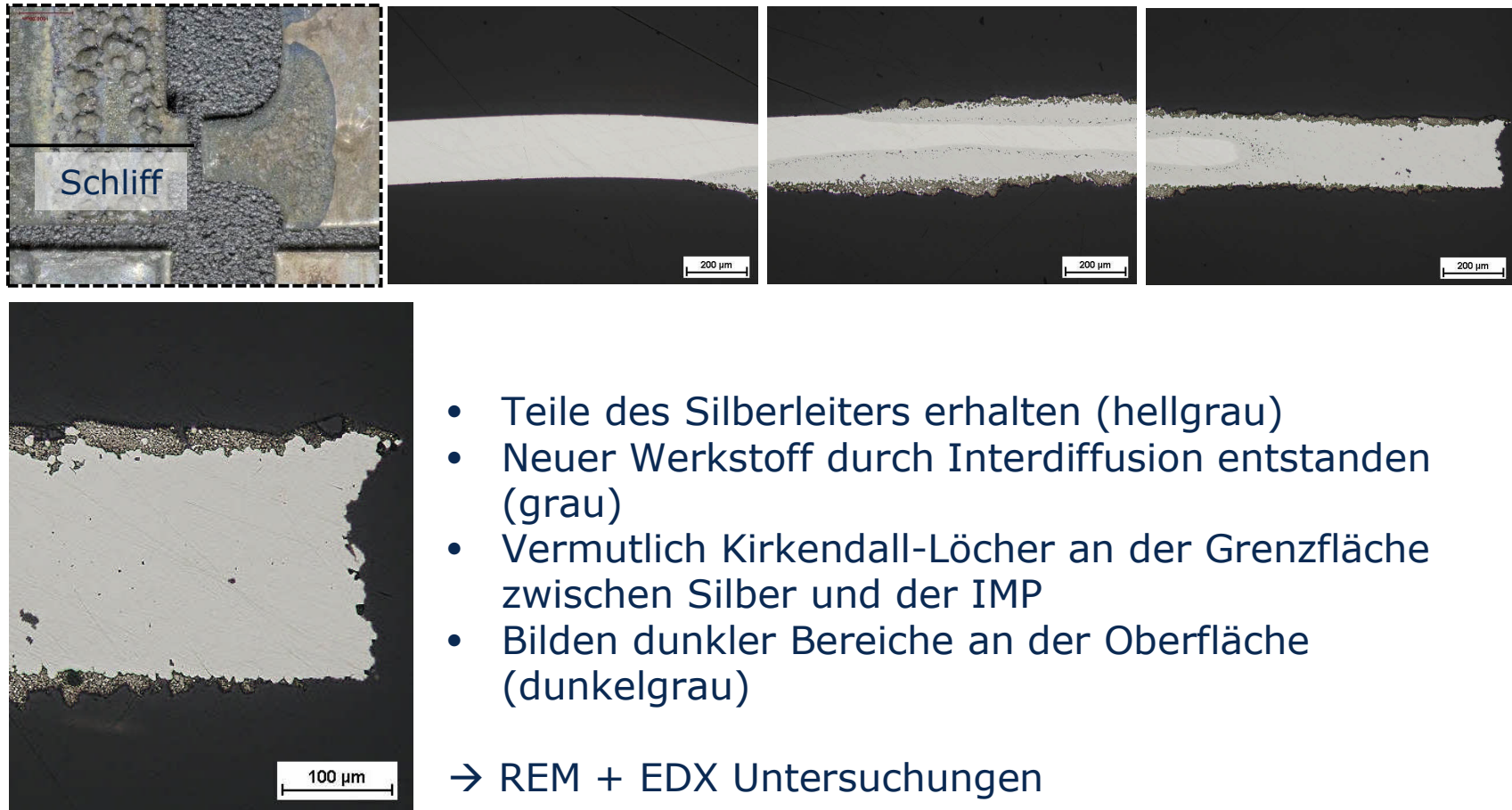


Ergebnisse der EDX-Analyse:

- 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

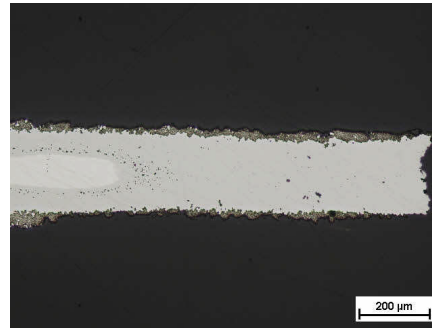
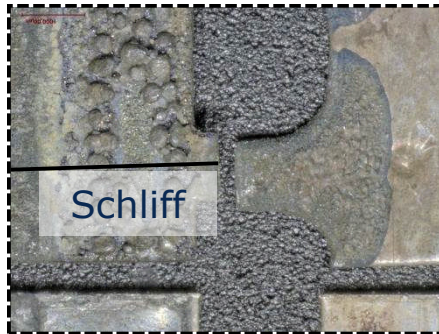
Langzeitversuche mit Schmelzleitern

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

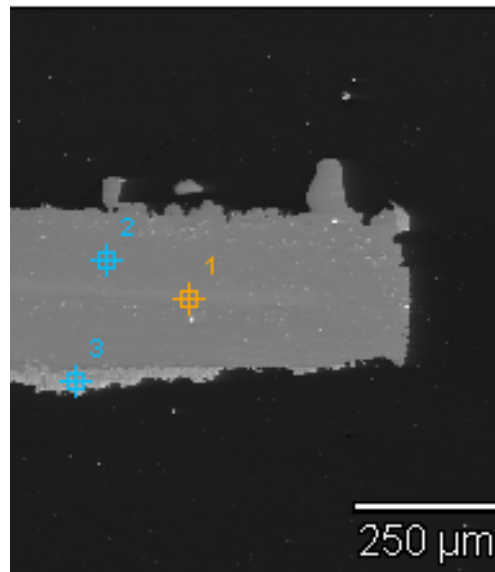


Langzeitversuche mit Schmelzleitern

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 ϵ - Phase im System Silber-Zinn (Phasenidentifikation durch XRD)
- Blei kann an der Phasenbildung nicht teilnehmen und wird nach außen gedrängt
- ⇒ Vermutlich Bilden der ϵ - 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 Sammelschientemperaturen 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



PD. Dr.-Ing. habil. Helmut Löbl
loeb1@ieeh.et.tu-dresden.de

TU Dresden, IEEH
Mommsenstraße 10
Binderbau
01062 Dresden



Dr.-Ing. Stephan Schlegel
schlegel@ieeh.et.tu-dresden.de