

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik

BERICHT HH 37/10

Thema: "Funktion von Schmelzsicherungen bei erhöhter Erwärmung"

Auftraggeber	NH / HH – Recycling e. V. Hofmannstraße 6 93491 Stamsried	
Auftrag	Nr. 37/10 vom 17.02.2011	
Projektzeitraum	17.02.2011 bis 28.03.2013	
Datum		
Berichtsumfang	30 Seiten und 9 Anlage(n)	
Ansprechpartner beim	Herr DrIng. Herbert Bessei	
Auftraggeber		1 1 1
Bearbeiter beim	DiplIng. Christian Kühnel	Ita
Auftragnehmer		0-000
durchgesehen	DrIng. Stephan Schlegel	SI. Sulla
bestätigt	Prof. DrIng. Steffen Großmann	Alle Mucun
Verteiler	1 x Auftraggeber	
	1 x Institut	V //
	1 x Bearbeiter	
Dieser Bericht darf nu	ur mit Genehmigung des Auftragne	ehmers vollständig oder
auszugsweise an Dritt	e weitergegeben werden und nur	mit Zustimmung des
Auftragnehmers vollständ	ig oder auszugsweise veröffentlicht wer	den.

INHALTSVERZEICHNIS

1 2	P V	Prob ′ers	lems	stellung saufbau und –durchführung	3 3
	2.1		Erwä	ärmungsverhalten und Temperaturverteilung der Sicherungseinsätze	3
	2 2 2	2.1. [*] 2.1.* 2.1.*	1 2 3	Präparation der Sicherungseinsätze Frei in Luft Niederspannungskabel-Verteilerschrank	3 4 6
	2.2		Abbi Luft	Iden der stationären Temperaturverteilung eines Sicherungseinsatzes frei in mit der Wärmenetzmethode	8
	2 2	2.2.7	1 2	Grundlagen der Wärmenetzmethode Aufbau des Wärmenetzes	8 8
	2.3 2.4		Scha Lang	altverhalten von Sicherungseinsätzen gzeitverhalten von Schmelzleitern	11 12
3	E	irge	bnis	se	13
	3.1 3.2 3.3		Erwä Scha Tem	ärmungsverhalten der Sicherungseinsätze Itverhalten von Sicherungseinsätzen peraturverteilung in Sicherungseinsätzen	13 16 16
	3 3 3	8.3.7 8.3.2 8.3.3	1 2 3	Frei in Luft Niederspannungskabel-Verteilerschrank Temperaturdifferenz oberes Sicherungsmesser - Schmelzleiter	16 18 19
	3.4 3.5		Abbi Luft Lang	lden der stationären Temperaturverteilung eines Sicherungseinsatzes frei in mit der Wärmenetzmethode gzeitverhalten von Schmelzleitern	20 22
4 5 6	Z L A	lusa iter	amm aturv ang .	enfassung und Ausblick verzeichnis	28 30 31

1 PROBLEMSTELLUNG

Sicherungen werden zum Schutz elektrotechnischer Betriebsmittel vor Überstrom und vor Kurzschlussströmen eingesetzt. Diese Sicherungen werden bis ihren zu Bemessungsströmen in kleinräumigen, gekapselten Anlagen bei erhöhten Umgebungstemperaturen betrieben. Diese Betriebsbedingungen führen zu wesentlich höheren Temperaturen an den Schmelzleitern der Sicherung und damit zu einer beschleunigten Alterung dieser. Durch Interdiffusion zwischen dem Schmelzleiter und dem Lot wird der Widerstand im Schmelzbereich der Sicherung, damit die Verlustleitung und die Temperatur der gesamten Sicherung immer höher. Die Lebensdauer der Sicherung wird verringert und es kann zu Fehlausschaltungen oder Schaltversagen der Sicherung kommen. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es daher, sowohl das Erwärmungsverhalten von Sicherungen als auch die Alterung der Sicherung bzw. des Schmelzleiters bei erhöhter thermischer Beanspruchung genauer zu untersuchen. Dazu wurden Versuche zur

Erwärmung und zur Temperaturverteilung an und in Sicherungen durchgeführt. Es wurde weiterhin ein Wärmenetz zur Berechnung der Temperaturverteilung in einer Sicherung erstellt und damit der Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die Erwärmung der Sicherung untersucht. Zudem wurde in Langzeitversuchen die Alterung unterschiedlicher Schmelzleiter abhängig von der Temperatur und mit dem Schwerpunkt auf der Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot untersucht.

2 VERSUCHSAUFBAU UND – DURCHFÜHRUNG

2.1 ERWÄRMUNGSVERHALTEN UND TEMPERATURVERTEILUNG DER SICHERUNGSEINSÄTZE

2.1.1 Präparation der Sicherungseinsätze

Um die Temperaturverteilung innerhalb von Sicherungseinsätzen untersuchen zu können, wurden diese mit Thermoelementen (Typ K) zur Temperaturmessung präpariert. Insgesamt drei Sicherungseinsätze (Hersteller Jean Müller, NH 1, gG, $I_n = 250 \text{ A}$) wurden mit jeweils 21 sehr dünnen Thermoelementen präpariert (Bild 1 und Bild 2). Die Thermoelemente zum Messen der Temperatur des oberen und unteren Sicherungsmessers wurden eingekörnt, alle weiteren mit Schamottkleber (Firma *Fix-Tec*, Typ *DK27*) aufgeklebt.



Bild 1: Schematische Darstellung eines präparierten Sicherungseinsatzes mit Position der Thermoelemente

Zum Anbringen der Thermoelemente im Inneren der Sicherungseinsätze wurden diese demontiert. Die Thermoelementleitungen wurden über ein in die untere Abdeckplatte gestanztes Loch herausgeführt. Nach erneuter Montage wurde dieses Loch mit Schamottkleber verfüllt. Weiterhin wurde der Quarzsand vor dem Wiederbefüllen 12 h im Wärmeschrank bei 180 °C getrocknet, um dessen Leitfähigkeit durch aufgenommene Feuchtigkeit nicht zu verändern.

Um zu überprüfen, ob die Präparation die Strombahn beschädigt hat, wurden die Durchgangswiderstände jedes Sicherungseinsatzes vor und nach der Präparation mit einem Mikroohmmeter (Firma *Rasmus*: Typ *Mo2A*) gemessen (Tabelle 1). Hierbei wurden keine über die Messungenauigkeit hinausgehenden Veränderungen festgestellt.



Bild 2: Auf Schmelzleiter und Keramikgehäuse geklebte Thermoelemente

Tabelle 1:	Durchgangswiderstände der Sicherungseinsätze vor und nach de
	Präparation (zwischen oberem und unterem Messer)
	Durchgangswiderstand B in $\mu\Omega$

Durchgangswiderstand R in $\mu\Omega$						
	vor der Präparation	nach der Präparation				
Temperatur $artheta_{ m 0}$ in °C	25,0	25,4				
NH-Einsatz 1	241	241				
NH-Einsatz 2	243	244				
NH-Einsatz 3	244	242				

2.1.2 Frei in Luft

An einem präparierten Sicherungseinsatz (siehe Abschnitt 2.1.1) wurden, angelehnt an die Typprüfung nach Norm *DIN EN 60269-1:2010,* Erwärmungsversuche frei in Luft durchaeführt. Der Sicherungseinsatz wurde dazu in das Unterteil einer Sicherungslastschaltleiste (Hersteller Jean Müller) eingesetzt. Diese war über verzinnte Aluminium Stromschienen $(A = (30 \times 10) \text{ mm}^2; I = 0,56 \text{ m})$ und flexible Kupferleiter an einen Hochstromtransformator angeschlossen (Bild 3). Der Sicherungseinsatz wurde mit unterschiedlichen Strömen I = (50; 100; 150; 200; 250) A in vertikaler und horizontaler Einbaulage belastet. Der über den Hochstromtransformator induktiv eingespeiste Strom wurde mit einem Leistungsmessgerät (Firma ZES: Typ LMG 95) über einen Stromwandler gemessen. Mit einem Temperaturmessgerät (Firma Ahlborn: Typ Almemo 5690-2) wurden die Temperaturen aller Thermoelemente erfasst. Alle Strom- und Temperaturverläufe wurden zur späteren Auswertung von einem Messrechner gespeichert.

Um zu überprüfen, ob die Belastung des Sicherungseinsatzes bereits zu einer Alterung desselben geführt hat, wurde vor und nach jedem Erwärmungsversuch der Durchgangswiderstand des Sicherungseinsatzes gemessen. Auch hier wurden keine über die Messungenauigkeit hinausgehenden Widerstandsänderungen festgestellt (Tabelle 2). Der Sicherungseinsatz wurde daher für weitere Versuche eingesetzt.

	nach der Präparation	nach fiL vertikal	nach fiL horizontal					
Temperatur ϑ_0 in °C	25,4	23,5	23,7					
NH-Einsatz 1	241	238	239					

 Tabelle 2:
 Gemessene Durchgangswiderstände des Sicherungseinsatzes bei den Erwärmungsversuchen frei in Luft

 nach der
 nach fill



Bild 3:

Versuchsstand NH - Sicherung frei in Luft (fiL)

2.1.3 Niederspannungskabel-Verteilerschrank

Angelehnt an die praktischen Einsatzbedingungen wurden Erwärmungsversuche mit Sicherungseinsätzen in einem Niederspannungskabel-Verteilerschrank (NKVS) bei unterschiedlichen Strömen und Sammelschienentemperaturen durchgeführt. Die Sicherungseinsätze dazu wurden in zwei nebeneinander montierte eingesetzt Sicherungslastschaltleisten (Hersteller Jean Müller) (Bild 4). Zusätzlich angebrachte Steinwolle- bzw. Styroporplatten verhinderten eine Wärmeabgabe über die Seitenwände der Sicherungslastschaltleisten. Weiterhin wurde der NKVS auf der Unterseite mit Styropor und Steinwolle abgedichtet, um den direkten Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft zu verhindern. Damit wurde eine erhöhte Erwärmung, z. B. durch das Vorhandensein weiterer Sicherungslastschaltleisten, nachgebildet und eine geschlossene Zirkulation der Innenluft erreicht.



Die Belastungsströme der Sicherungseinsätze $I_{\rm NHn}$ sowie der Sammelschienenstrom $I_{\rm SS}$ wurden über einzelne Hochstromtransformatoren eingespeist (Bild 4). Über den Sammelschienenstrom konnte die Temperatur der Sammelschiene unabhängig von den Strömen der einzelnen Abgänge eingestellt werden. Die Ströme wurden mit Leistungsmessgeräten über Stromwandler aufgezeichnet (Firma ZES: Typ LMG 95 und LMG 500), alle Temperaturverläufe mit mehreren Temperaturmessgeräten (Firma Ahlborn) gemessen und sowohl Strom- als auch Temperaturverläufe mit einem Messrechner gespeichert.

In den Sicherungslastschaltleisten wurden unterschiedliche Sicherungseinsätze untersucht. Zum einen wurden insgesamt sechs Sicherungseinsätze der Firma *EFEN* (NH2, gG, $I_n = 400 \text{ A}$) eingesetzt. Über eingekörnte Thermoelemente wurde die Temperatur des oberen Sicherungsmessers jedes Einsatzes bestimmt. Mit weiteren Thermoelementen wurden zusätzlich die Temperaturen der Sammelschiene und der NKVS-Innenluft Bild A4). unbestromter Sammelschiene gemessen (Anhang Bei sowie den Sammelschienentemperaturen $\theta_{ss} = (90; 115; 140) \circ C$ wurden die Sicherungen jeweils mit den Strömen $I_{NHn} = (100; 200; 300; 350; 400)$ A belastet und die sich einstellenden stationären Temperaturen gemessen. Zusätzlich zu den Erwärmungsversuchen wurde einer der oberen Sicherungseinsätze analog zu Abschnitt 2.4 metallographisch untersucht.

Um die Temperaturverteilung an Sicherungseinsätzen untersuchen zu können, wurden zusätzlich Versuche mit Sicherungseinsätzen der Firma Jean Müller (NH 1, gG, $I_n = 250 \text{ A}$) im NKVS durchgeführt. Dazu wurden die drei präparierten Sicherungseinsätze (siehe auch Abschnitt 2.1.1) in die linke Sicherungslastschaltleiste des NKVS eingesetzt (Bild 4). Der bereits aus Abschnitt 2.1.2 vorbelastete Einsatz befand sich in oberster Position. In die rechte Sicherungslastschaltleiste wurden unpräparierte Sicherungseinsätze gleichen Typs im Neuzustand eingebaut. Bei diesen wurde zu Vergleichszwecken über eingekörnte Thermoelemente die Temperatur des oberen Sicherungsmessers gemessen.

Analog zu den vorangegangenen Erwärmungsversuchen sollten auch diese Sicherungseinsätze bei unbestromter Sammelschiene sowie den Sammelschienentemperaturen $\mathcal{G}_{SS} = (90; 115; 140) \,^{\circ}\text{C}$ mit unterschiedlichen Strömen bis zum Bemessungsstrom $I_n = 250 \text{ A}$ belastet und die sich einstellenden stationären Temperaturen gemessen werden. Während der Versuche kam es jedoch bei Belastung der Sicherungseinsätze mit Nennstrom und unbestromter Sammelschiene zu einem frühzeitigen Schalten der präparierten als auch der unpräparierten Sicherungseinsätze. Die ursprünglich geplanten Erwärmungsversuche mit unterschiedlichen Sammelschienentemperaturen konnten daher nicht durchgeführt werden. Alternativ wurde mit neuen Sicherungseinsätzen anschließend ein zusätzlicher Dauerversuch mit reduziertem Strom von $0.8 \cdot I_n = 200 \text{ A}$ und unbestromter Sammelschiene durchgeführt. Bei sonst gleichem Versuchsaufbau wurde mit eingekörnten Thermoelementen an den Sicherungseinsätzen jedoch nur die Temperatur der oberen Sicherungsmesser gemessen. Des Weiteren wurde, analog zu den vorigen Abschnitten, in größeren Abständen mit einem Mikroohmmeter (Firma *Rasmus*: Typ *Mo2A*) der Durchgangswiderstand der einzelnen Sicherungseinsätze abhängig von der Versuchszeit gemessen.

2.2 ABBILDEN DER STATIONÄREN TEMPERATURVERTEILUNG EINES SICHERUNGSEINSATZES FREI IN LUFT MIT DER WÄRMENETZMETHODE

2.2.1 Grundlagen der Wärmenetzmethode

Die Wärmenetzmethode ist ein iteratives Berechnungsverfahren, mit dem Wärmeübertragungsvorgänge in einem elektrischen Netzwerk beschrieben werden können. Sie beruht dabei auf den Analogiebeziehungen zwischen elektrischem und thermischem Strömungsfeld (Tabelle 3).

Tabelle 3: Analogiebeziehungen zwischen elektrischem und thermischem Strömungsfeld

Elektrisches Strömungsfeld	Thermisches Strömungsfeld
Potential $arphi$ in V	Temperatur ${\mathcal G}$ in °C
Spannung U in V	Temperaturdifferenz $\Delta \mathcal{G}$ in K
Strom / in A	Leistung <i>P</i> in W
elektr. Widerstand R in Ω	therm. Widerstand $R_{ m th}$ in K / W
Kapazität <i>C</i> in F	Wärmekapazität C _{th} in W/kgK

Für ein Wärmenetz muss der gesamte Leistungsfluss von allen Wärmequellen bis hin zu Punkten bekannter Temperatur, meist der Umgebungstemperatur, beschrieben werden. Die abzubildenden Komponenten werden dazu in mehrere Abschnitte eingeteilt. Diese stellen die Knotenpunkte des Netzwerks dar. Die Anzahl der Abschnitte ist abhängig von den zu beschreibenden Komponenten und der geforderten Genauigkeit der Berechnung. Die in den Abschnitten erzeugte Wärmeleistung wird in die jeweiligen Knoten eingespeist. Alle Wärmeübertragungsprozesse zwischen den Abschnitten, in Form von Wärmeleitung, Wärmestrahlung oder konvektivem Wärmeübergang, werden mit thermischen Widerständen beschrieben. [BÖH-05]

2.2.2 Aufbau des Wärmenetzes

Für den in Abschnitt 2.1.2 untersuchten Sicherungseinsatz der Firma *Jean Müller* wurde ein Wärmenetz für die stationäre Belastung desselben frei in Luft aufgebaut. Das Wärmenetz wurde in mehreren Teilnetzen aufgebaut, die anschließend miteinander verbunden wurden. Die Berechnung der Temperaturverteilung erfolgte dabei auf Grundlage folgender Randbedingungen:

- Belastungsstrom /
- Temperatur des oberen Sicherungsmessers $\mathcal{G}_{\mathrm{Meo}}$
- Temperatur des unteren Sicherungsmessers $\mathcal{G}_{\mathrm{Me}\,\mathrm{u}}$
- Umgebungstemperatur \mathcal{G}_0

Der grundsätzliche Aufbau des Einsatzes geht bereits aus Abschnitt 2.1.1 hervor. Die drei parallelen Schmelzleiter im Inneren des Einsatzes erzeugen den Großteil der Verlustleistung. Diese wird im stationären thermischen Zustand vollständig an die Umgebung abgegeben. Sie wird entlang der Strombahn über die Sicherungsmesser in das Sicherungsunterteil geleitet und über den Quarzsand und das Keramikgehäuse durch Wärmeleitung radial nach außen abgegeben. Ein Teil des Wärmestroms wird zudem vom Quarzsand an die Abdeckplatten geleitet. Von der Oberfläche des Keramikgehäuses und der Abdeckplatten erfolgt die Abgabe der Wärmeleistung über Wärmestrahlung und den konvektiven Wärmeübergang an die Umgebung.

Der zur Berechnung der Verlustleistung notwendige Materialwiderstand des Schmelzleiters wurde an einem einzelnen Schmelzleiter mit einem Mikroohmmeter (*Mo2A*) abschnittsweise gemessen. Um die Temperaturverteilung des Schmelzleiters möglichst genau abzubilden, wurde der Schmelzleiter in insgesamt zwölf Abschnitte (Bild 1) unterteilt und die gemessenen Widerstände entsprechend aufgeteilt. Dazu wurde aus den Abmessungen des Schmelzleiters der Materialwiderstand der nicht verengten Abschnitte 1-6 berechnet und die Differenz aus berechneten und gemessenen Widerständen gleichmäßig auf die vorhandenen Engstellen aufgeteilt.



Bild 5: Schematisches Modell des Schmelzleiters mit Bezeichnung der einzelnen Abschnitte

R_{SL20} in $\mu\Omega$											
Unten				Mi	tte			Oben			
258			1	11	279						
1	e1	2	e2	3	lot	em	4	e3	5	e4	6
47	78	38	78	17	21	90	34	71	40	71	62

Tabelle 4: Materialwiderstände der einzelnen Schmelzleiterabschnitte

Mit Kenntnis der elektrischen Widerstände der einzelnen Abschnitte wurde ein Wärmenetz für die drei parallelen Schmelzleiter aufgebaut. Dabei wurde von einer gleichmäßigen Stromverteilung auf alle parallelen Schmelzleiter ausgegangen und eine mögliche Stromverdrängung vernachlässigt.

Das Wärmenetz bildet die axiale Leitung der erzeugten Verlustleistung entlang der Strombahn ab. Parallel dazu wird radial Wärmeleistung in die mit Quarzsand gefüllten Zwischenräume zwischen den Schmelzleitern geleitet (Bild 6). Identische Farben kennzeichnen dabei selbe Komponenten im Wärmenetz und im Sicherungsmodell.

Die notwendigen Daten zum Berechnen der Wärmeleitungswiderstände ergaben sich aus der vereinfachten Geometrie der Schmelzleiter (Anhang Bild A5) sowie den jeweiligen Stoffwerten (Anhang Tabelle A5).



Bild 6: Teilwärmenetz der drei parallelen Schmelzleiter

Im zweiten Teil des Wärmenetzes wurde die Wärmeleitung von der Schmelzleiteroberfläche über den Quarzsand und den Keramikkörper sowie die anschließende Wärmeabgabe von der Oberfläche des Keramikkörpers an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion beschrieben. Parallel dazu wurde ebenfalls der Wärmestrom in axialer Richtung durch den Quarzsand zur oberen und unteren Abdeckplatte abgebildet (Bild 7).



Bild 7: Teilwärmenetz der Wärmeübertragung durch den Quarzsand und den Keramikkörper an die Umgebung

Die Wärmeübertragung von den Schmelzleitern nach außen wurde für alle vier Seiten getrennt betrachtet. Wärmeleitung zwischen diesen Segmenten wurde vernachlässigt. Weiterhin wurde näherungsweise angenommen, dass das Schmelzleiterpaket mittig im Keramikkörper positioniert war. Durch diesen symmetrischen Aufbau ergab sich ein vereinfachtes Wärmenetz. Die radiale Wärmeleitung durch den Quarzsand wurde durch ebene Wärmeleitwiderstände beschrieben. Dazu wurde das Sandvolumen radial in mehrere Schichten aufgeteilt (Anhang Bild A6). Für die Außenseite des Keramikgehäuses wurde eine einheitliche Oberflächentemperatur angenommen.

Die für die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion angenommenen Kennwerte sind ebenfalls im Anhang zusammengefasst (Tabelle A6).

Die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung vom Quarzsand und dem Keramikkörper an die Abdeckplatten, die Wärmeübertragung von diesen durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung sowie die Wärmeleitung durch das Sicherungsmesser in das Sicherungsunterteil wurden in einem dritten Teil des Wärmenetzes beschrieben (Bild 8).



Bild 8: Teilwärmenetz der Wärmeübertragung durch Abdeckplatte und Sicherungsmesser nach oben

Die Abdeckplatten des Sicherungseinsatzes wurden im Wärmenetz vereinfacht als Vollzylinder und die Sicherungsmesser als Quader abgebildet. Für die im Sicherungsmesser, der Verbindungsplatte zwischen Schmelzleiter und Messer sowie in den elektrischen Verbindungen dieser Bauteile entstehenden Stromwärmeverluste wurde ein zusätzlicher elektrischer Widerstand von $R = 10 \,\mu\Omega$ angenommen.

2.3 SCHALTVERHALTEN VON SICHERUNGSEINSÄTZEN

Um zu überprüfen, ob die thermische Beanspruchung im NKVS die Funktionsfähigkeit der Sicherungseinsätze bereits beeinträchtigt hat, wurden die Sicherungseinsätze der Firma *EFEN* (NH2, gG, $I_n = 400 \text{ A}$) mit dem großen Prüfstrom geprüft. Nach *IEC 60269-1:2009* müssen diese den großen Prüfstrom $I_f = 1,6I_n$ innerhalb der konventionellen Prüfdauer t = 3 h sicher ausschalten.

Die Sicherungseinsätze wurden zur Prüfung in das Unterteil einer Sicherungslastschaltleiste eingesetzt (Bild 9). Über Aluminium-Stromschienen ($A = (30 \times 10) \text{ mm}^2$, I = 0,56 m) wurde diese an einen Hochstromtransformator angeschlossen, der den Prüfstrom induktiv einspeiste. Die Prüfung fand frei in Luft bei einer Umgebungstemperatur von $\mathcal{G}_0 \approx 27 \text{ °C}$ statt.

Neben einem Sicherungseinsatz im Neuzustand wurden die drei vorbelasteten Sicherungseinsätze aus der linken Sicherungslastschaltleiste im NKVS geprüft (siehe auch Abschnitt 2.1.3).

Der Strom wurde mit einem Leistungsmessgerät (Firma ZES: Typ LMG 95) über einen Stromwandler gemessen. Mit eingekörnten Thermoelementen wurde mit einem Temperaturmessgerät (Firma Ahlborn: Typ Almemo 5690-2) die Temperatur des oberen Sicherungsmessers gemessenen. Ein Messrechner zeichnete alle Strom- und Temperaturverläufe auf.



2.4 LANGZEITVERHALTEN VON SCHMELZLEITERN

In Langzeitversuchen wurden vier, vom Auftraggeber zur Verfügung gestellte Schmelzleitertypen unterschiedlicher Materialien und Geometrien untersucht (Bild 10, Tabelle 5). Jeweils drei Exemplare jedes Schmelzleitertyps wurden in Wärmeschränken bei unterschiedlichen Temperaturen $\mathcal{G} = (140; 180; 210; 230)$ °C thermisch gealtert. Alle vier Schmelzleitertypen hatten einen Weichlotauftrag in Schmelzleitermitte (Ganzbereichssicherung). Die chemische Zusammensetzung des Lotauftrages war nicht bekannt.









Bild 10: Schmelzleitertypen für Langzeitversuche

Sehmolzlaiter	Matarial	Belastungstemperatur in °C				
Schineizieitei	IVIALEIIAI	140	180	210	230	
Тур А	Silber	3	3	3	3	
Тур В	Kupfer, versilbert (1 µm)	3	3	3	3	
Тур С	Kupfer	3	3	3	3	
Typ D	Kupfer	3	3	3	3	

Tabelle 5: Schmelzleitermaterial und Probenanzahl

Um die Alterungsprozesse beurteilen zu können, wurde in regelmäßigen Abständen der elektrische Widerstand mit einem Mikroohmmeter (Firma *Rasmus*: Typ *Mo2A*) abhängig von der Zeit und der Beanspruchungstemperatur gemessen. Da vor allem die Veränderungen im Bereich der lotbeschichteten Engstellen von Interesse waren, konzentrierte sich die Widerstandsmessung auf diesen Bereich (Bild 11).



Bild 11: Prinzip der Widerstandsmessung: Stromeinspeisung und Spannungsabgriffe (links); Messpunkte für Proben der Typen A bis C (rechts oben) und des Typs D (rechts unten)

Zusätzlich wurde der Bereich der lotbeschichteten Engstellen metallographisch untersucht. Neben mikroskopischen Aufnahmen der Schmelzleiteroberfläche wurden Schliffbilder der einzelnen Schmelzleitertypen im Neuzustand und im gealterten Zustand angefertigt. Des Weiteren erfolgte eine Untersuchung der Proben im Rasterelektronenmikroskop (REM) in Kombination mit einer EDX-Analyse. Die EDX-Analyse ermöglichte mit begrenzter Genauigkeit das Bestimmen der chemischen Zusammensetzung der Schmelzleiter.

3 ERGEBNISSE

3.1 ERWÄRMUNGSVERHALTEN DER SICHERUNGSEINSÄTZE

Im Niederspannungskabel-Verteilerschrank wurde das Erwärmungsverhalten von Sicherungseinsätzen der Firma *EFEN* (NH2, gG, $I_n = 400 \text{ A}$) abhängig von unterschiedlichen Sammelschienentemperaturen untersucht. In den Sicherungseinsätzen sind vier parallele Cu - Schmelzleiter mit einem reinen Sn - Lotstreifen in Schmelzleitermitte verbaut. Zur Auswertung wurde der obere Sicherungseinsatz betrachtet, da dieser thermisch am höchsten belastet war (Bild 12).





Die gemessen Temperaturen des oberen Sicherungsmessers zeigen eine sehr hohe thermische Beanspruchung der untersuchten Sicherungseinsätze. Bereits ohne Strombelastung des Kabelabgangs erwärmte sich das obere Sicherungsmesser bei einer Sammelschienentemperatur von 140 °C auf bis zu 96 °C. Bei Belastung mit Bemessungsstrom wurden bei derselben Sammelschienentemperatur sogar maximale Messertemperaturen von 220 °C gemessen.

Bei Vorgabe einer maximalen Temperatur des oberen Sicherungsmessers von 130 °C, wie in [BES-11] angegeben, können die Sicherungen je nach zulässiger Grenztemperatur an der Sammelschiene nur mit maximal 55 % bis 78 % ihres Bemessungsstromes belastet werden. Wird ein zulässiger Belastungsfaktor von 0,9 nach der früheren Norm IEC 60439-1:2005 zu Grunde gelegt, erwärmt sich das obere Sicherungsmesser je nach Temperatur der Sammelschiene auf 163 °C bis 197 °C. Mit den Erkenntnissen zur Temperaturverteilung in den Sicherungseinsätzen (Abschnitt 3.2) ist auch bei optimistischen Annahmen davon auszugehen, dass am Schmelzleiter in diesem Fall bereits die Schmelztemperatur des Sn - Lotes überschritten wurde. Dies bestätigen auch Aufnahmen des Schmelzleiters mit dem 3D-Stereomikroskop (Bild 13).



Bild 13: Schmelzleiter nach Beanspruchung im NKVS

Diese zeigen auf der Lotoberfläche deutliche Eindrücke der umgebenden Sandkörner, die nur bei einer Verflüssigung oder starkem Erweichen des Lotes in diesem Ausmaß auftreten konnten. Nach bisherigem Erkenntnisstand war demnach davon auszugehen, dass die Verflüssigung des Lotes zum Schalten der Sicherung führen musste. Die Sicherungen haben in den Versuchen jedoch nicht geschaltet. Ursache dafür war wahrscheinlich eine zu kurze Beanspruchungszeit (ca. 1,5 h bei *I*_n und140 °C Sammelschienentemperatur).

Die metallographischen Untersuchungen zeigen, dass die relativ kurze thermische Beanspruchung bereits ausreichte, um eine ausgeprägte Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot zu ermöglichen (Bild 14). Es konnten sowohl die ϵ -Phase (Bereich 1) als auch die η -Phase (Bereich 2) des Systems Cu - Sn nachgewiesen werden. Die Interdiffusion führte aber zu keiner nennenswerten Querschnittsminderung des Schmelzleiters.



Bild 14: Schliffbild des Schmelzleiters nach Beanspruchung im NKVS

3.2 SCHALTVERHALTEN VON SICHERUNGSEINSÄTZEN

Die zuvor im NKVS belasteten Sicherungseinsätze (Abschnitt 3.1) wurden anschließend mit dem großen Prüfstrom geprüft. Alle vier untersuchten Sicherungseinsätze schalteten dabei innerhalb der vorgeschriebenen Prüfdauer zuverlässig aus (Bild 15). Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede in den Ausschaltzeiten festgestellt. Alle Zeiten waren im zulässigen Bereich $t_A = (60...75)$ min. Erwartungsgemäß besaß der obere Sicherungseinsatz aufgrund der höchsten thermischen Vorbeanspruchung die kürzeste Ausschaltzeit, der neuwertige Sicherungseinsatz hingegen die längste.



Bild 15: Temperaturverlauf des oberen Sicherungsmessers bei Belastung mit großem Prüfstrom

3.3 TEMPERATURVERTEILUNG IN SICHERUNGSEINSÄTZEN

3.3.1 Frei in Luft

Sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Einbaulage (Bild 3) wurden ähnliche Temperaturverteilungen am Sicherungseinsatz (Hersteller: *Jean Müller*, NH1, gG, $I_n = 250 \text{ A}$) gemessen. In vertikaler Einbaulage stellte sich jedoch grundsätzlich eine höhere Temperatur ein (Bild 16, Bild 17 und Anhang Tabelle A1, Tabelle A2). Zurückzuführen war dies auf den besseren konvektiven Wärmeübergang zwischen der Rückseite des Sicherungseinsatzes und der Umgebung, da die vorbeiströmende Luft nicht durch die Sicherungsunterteile behindert wurde.

Die Temperaturen des mittleren Schmelzleiters waren erwartungsgemäß am höchsten, da dieser beidseitig von den benachbarten Schmelzleitern thermisch beeinflusst wurde. Die höchste gemessene Übertemperatur trat dabei an der lotbeschichteten Engstelle des mittleren Schmelzleiters auf und betrug bei Belastung mit Nennstrom und vertikaler Einbaulage $\theta = 118,1$ K (Umgebungstemperatur $\mathcal{G}_0 = 26,7$ °C). Mit größerer Entfernung von den Wärmequellen nahmen die gemessenen Temperaturen entsprechend ab.



Bild 16: Temperaturverteilung des NH-Sicherungseinsatzes frei in Luft im Querschnitt von hinten nach vorn



Bild 17: Temperaturverteilung des Sicherungseinsatzes frei in Luft im Längsschnitt entlang der Strombahn

3.3.2 Niederspannungskabel-Verteilerschrank

Bereits eine Belastung der Sicherungseinsätze (Firma Jean Müller) im Niederspannungskabel-Verteilerschrank (NKVS) mit ihrem Bemessungsstrom von $I_{n} = 250 \text{ A}$ bei unbestromter Sammelschiene führte zu einer thermischen Überbeanspruchung dieser. Aus den Temperaturen der oberen Sicherungsmesser und der Schmelzleiter ging hervor, dass sowohl die präparierten als auch die unpräparierten Sicherungseinsätze frühzeitig auslösten (Anhang Bild A9 und Tabelle A7). Die Präparation der Einsätze als Ursache des Fehlauslösens konnte damit ausgeschlossen werden. Von den präparierten Sicherungseinsätzen erreichte einzig der obere Einsatz bei Bemessungsstrom einen annähernd stationären thermischen Zustand, sodass dessen Temperaturverteilung ausgewertet werden konnte. Im Vergleich zur Belastung frei in Luft erreichte der Einsatz absolut betrachtet deutlich höhere Temperatur. Die gualitative Temperaturverteilung änderte sich dabei nicht signifikant (vgl. Bild 17 und Bild 18). Am Schmelzleiter wurde bei Belastung mit Bemessungsstrom an der lotbeschichteten Engstelle eine maximale Ubertemperatur von 196,5 K (Umgebungstemperatur $\mathcal{G}_0 = 33,5 \,^{\circ}\text{C}$) gemessen. Damit erreichte der Schmelzleiter annähernd die Schmelztemperatur des reinen Zinns. Da reines Zinn vermutlich bei diesem Schmelzleitertyp als Lotauftrag zum Einsatz kam, hätte auch dieser Sicherungseinsatz bei weiterer Strombelastung mit hoher Wahrscheinlichkeit zeitnah ausgelöst.



Bild 18: Temperaturverteilung des Sicherungseinsatzes entlang der Strombahn im NKVS

Bei dem Dauerversuch mit verringerter Strombelastung von $0, 8 \cdot I_n = 200 \text{ A}$ erwärmte sich das Sicherungsmesser der oberen Sicherungen auf eine Übertemperatur von 63 K bei einer maximalen Übertemperatur der Sammelschiene von 26 K (Umgebungstemperatur $g_0 = 27,8 \text{ °C}$). Nach der bisherigen unterbrechungsfreien Versuchszeit von 864 h wurden keine Veränderungen im Erwärmungsverhalten der Sicherungseinsätze festgestellt. Auch die gemessenen Durchgangswiderstände aller Sicherungseinsätze zeigten nach der Versuchszeit von 864 h keine Veränderungen (Tabelle 6).

Zoit	Temperatur	Durchgangswiderstand R in $\mu\Omega$							
	9 in °C	Oben		Mitte		Unten			
2 11 1 1		links	rechts	links	rechts	links	rechts		
0	27,7	250	245	245	247	250	248		
864	27,8	250	246	245	248	250	248		

 Tabelle 6:
 Durchgangswiderstände der Sicherungseinsätze im NKVS

Nach bisherigem Erkenntnisstand zur Temperaturdifferenz zwischen Sicherungsmesser und Schmelzleiter (Abschnitt 3.3.3) sowie aus den Versuchen zur Alterung der Schmelzleiter (Abschnitt 3.5) wird bei dieser Beanspruchung von einem langzeitstabilen Dauerbetrieb ausgegangen.

3.3.3 Temperaturdifferenz oberes Sicherungsmesser - Schmelzleiter

Die Schmelzleitertemperatur an der lotbeschichteten Engstelle ist das maßgebliche Kriterium für einen langzeitstabilen Betrieb des Sicherungseinsatzes. Im praktischen Betrieb ist es jedoch nicht möglich diese Größe messtechnisch zu bestimmen. Alternativ dazu könnte zukünftig die Temperatur des oberen Sicherungsmessers bewertet werden. Daher ist die Temperaturdifferenz zwischen dem oberen Sicherungsmesser und der lotbeschichteten Engstelle als wärmster Punkt des Schmelzleiters von besonderem Interesse. Auch hier wurden abhängig vom Strom erwartungsgemäß große Unterschiede zwischen dem Einsatz frei in Luft und im NKVS festgestellt (Bild 19).

Bei Belastung mit Bemessungsstrom war die Temperaturdifferenz in vertikaler Einbaulage frei in Luft $\Delta \mathcal{G} \approx 55 \,\text{K}$. Aufgrund der behinderten Wärmeabgabe erhöhte sich die Temperaturdifferenz für den untersuchten Sicherungseinsatz innerhalb des NKVS auf bis zu $\Delta \mathcal{G} \approx 80 \,\text{K}$.



Bild 19: Übertemperaturen der oberen Sicherungsmesser und des mittleren Schmelzleiters frei in Luft und im NKVS abhängig vom Belastungsstrom

3.4 ABBILDEN DER STATIONÄREN TEMPERATURVERTEILUNG EINES SICHERUNGSEINSATZES FREI IN LUFT MIT DER WÄRMENETZMETHODE

Das erstellte Wärmenetz wurde mit den Ergebnissen des Erwärmungsversuches für den Sicherungseinsatz frei in Luft in vertikaler Einbaulage validiert (Abschnitt 3.3.1). Die stationären Temperaturen wurden dabei für den Belastungsstrom /=150 A und /=250 A berechnet. Sie zeigten eine sehr aute Übereinstimmung mit den gemessenen Temperaturen im Erwärmungsversuch (Bild 20 und Anhang Bild A7). Bei Belastung mit Bemessungsstrom I = 250 A war die Temperaturdifferenz zwischen berechneten und gemessenen Werten überwiegend im Bereich des Messfehlers der Thermoelemente von ± 2.2 K. Am Schmelzleiter des Sicherungseinsatzes betrug die maximale Abweichung $\Delta g = 2,5$ K. Einzig am Keramikgehäuse waren größere Abweichungen von maximal $\Delta artheta$ = 6,1K zur gemessenen Temperatur vorhanden. Mit dem Wärmenetz kann mit guter Genauigkeit die stationäre Temperaturverteilung innerhalb eines Sicherungseinsatzes frei in Luft berechnet werden. Zudem ist es möglich dieses zu erweitern, um das thermische Verhalten der Sicherung z. B. beim Einsatz mehrerer Sicherungseinsätze in einer Sicherungslastschaltleiste, wie er in Abschnitt 3.3.2 bereits experimentell untersucht wurde, abzubilden.





Mit dem validierten Wärmenetz wurde der Einfluss unterschiedlicher Umgebungstemperaturen und Temperaturen des oberen Sicherungsmessers auf die maximale Schmelzleitertemperatur untersucht. Angelehnt an reale Verhältnisse in gekapselten Anlagen wurde die Umgebungstemperatur im Bereich $\mathcal{G}_0 = (20...60)$ °C sowie die obere Messertemperatur im Bereich $\mathcal{G}_{SL} = (50...140)$ °C variiert. Dabei war es aufgrund der notwendigen Randbedingungen nur möglich, den Einfluss der Messer- und Umgebungstemperatur auf die Schmelzleitertemperatur unabhängig voneinander zu betrachten.

Die Ergebnisse zeigen einen sehr geringen Einfluss unterschiedlicher Umgebungstemperaturen auf die Schmelzleitertemperatur (Tabelle 7, Bild 21, Anhang Bild A8). Variierende Temperaturen des Messers, die hier stellvertretend für Temperaturen der Sammelschienenanschlüsse oder Kabelabgänge stehen, haben hingegen deutliche Auswirkungen auf die Schmelzleitertemperatur. Höhere Messertemperaturen führen nicht zu einer qualitativen Änderung des Temperaturprofils am Sicherungseinsatz, sondern lediglich zu einer Verschiebung des Profils zu höheren Temperaturen. Es wird damit ein dominanter Einfluss der Wärmeleitung entlang der Strombahn im Vergleich zur Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion auf die Schmelzleitertemperatur deutlich.

Bei Belastung mit Bemessungsstrom und Messertemperaturen von $\mathcal{G}_{Me} = 115 \,^{\circ}\text{C}$ werden bereits kritische Schmelzleitertemperaturen $\mathcal{G}_{SL} > 170 \,^{\circ}\text{C}$ erreicht. Diese können, abhängig von der eingesetzten Lotlegierung, nach kurzer Beanspruchung zum vorzeitigen Abschalten des Sicherungseinsatzes führen. Aufgrund der behinderten Wärmeabgabe im Vergleich zur Aufstellung frei in Luft ist daher innerhalb gekapselter Anlagen bei dieser Temperaturbeanspruchung von noch weitaus höheren Schmelzleitertemperaturen und damit einem schnelleren Abschalten auszugehen.

	$(\text{Sicherdingseinsatz Searr Waller, Nith, 90, T_n = 250 \text{ A})$								
	Umgebungstemperatur								
1 =	125 A	20	25	30	35	40	50	60	
ser	50	59,3	59,9	60,4	60,9	61,5	62,5	63,4	
es	90	95,8	96,3	96,9	97,5	98,1	99,2	100,4	
≥ ∽	105	109,2	109,8	110,4	111	111,6	112,8	113,9	
ere	115	118,2	118,8	119,4	120	120,6	121,8	123	
a o	140	140,5	141,1	141,7	142,3	142,9	144,1	145,3	
ı_	250 4	Umgebungstemperatur							
1 =	200 A	20	25	30	35	40	50	60	
ser	50	103,4	104	104,6	105,3	105,9	107,2	108,3	
ess	90	145,0	145,7	146,4	147,0	147,7	149,1	150,4	
≥ s	105	160,4	161,1	161,8	162,5	163,1	164,5	165,9	
ere	115	170,7	171,4	172,1	172,8	173,4	174,8	176,2	
ď	140	196,2	196,9	197,6	198,3	198,9	200,3	201,7	

Tabelle 7: Maximaltemperatur des Schmelzleiters \mathcal{G}_{SL} in °C, abhängig von der Umgebungstemperatur und der Temperatur des oberen Sicherungsmessers (Sicherungseinsatz *Jean Müller*, NH1, gG, L = 250 A)





3.5 LANGZEITVERHALTEN VON SCHMELZLEITERN

Da die Materialien der vier unterschiedlichen Schmelzleiter (siehe auch Bild 10) zu Beginn der Versuche nicht bekannt waren, wurde von jedem Schmelzleitertyp eine Probe im Neuzustand untersucht. Dabei wurde neben lichtmikroskopischen Aufnahmen und Schliffbildern im Bereich der lotbeschichteten Engstelle auch die chemische Schmelzleiter Zusammensetzung des und des jeweiligen Lotes mit einer REM / EDX-Analyse bestimmt. Die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst (Tabelle 8).

Schmelzleitertyp	Schmelzleiter-	Lotwerkstoff	Schmelztemperatur					
	werkstoff	(wt-%, ungefähr)	des Lotes in °C					
Тур А	Ag	Sn/Pb (72 %/28 %)	183195					
Тур В	Cu, versilbert (≈1µm)	Sn/Cd (83 %/17 %)	178200					
Тур С	Cu	Sn	232					
Typ D	Cu	Sn	232					

Tabelle 8: Ausgewählte Eigenschaften der untersuchten Schmelzleiter

Zur Auswertung der Langzeitversuche wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der an den lotbeschichteten Engstellen der untersuchten Schmelzleiter gemessenen Widerstände bestimmt (Bild 22 und Bild 23, Messprinzip siehe Bild 11).



Bild 22: Widerstand der lotbeschichteten Engstelle abhängig von der Temperatur (140 °C, 180 °C) und der Zeit



Bild 23: Widerstand der lotbeschichteten Engstelle abhängig von der Temperatur (210 °C, 230 °C) und der Zeit

Die lotbeschichteten Engstellen der vier untersuchten Schmelzleitertypen unterschieden sich hinsichtlich Querschnitt und Geometrie stark voneinander. Entsprechend variierten auch die Widerstände im Ausgangszustand deutlich. Sie lagen im Bereich von 95,6 $\mu\Omega$ (Typ D) bis zu 235,1 $\mu\Omega$ (Typ B).

Im Temperaturbereich ≤ 180 °C wurden bei den untersuchten Kupfer-Schmelzleitern (Typ C und Typ D) auch nach einer Versuchszeit von ≈ 8500 h keine erhöhten Widerstände im Bereich der lotbeschichteten Engstelle ermittelt (Bild 22). Erst bei einer Temperatur von 210 °C erhöhte sich der Widerstand des Schmelzleitertyps C nach einer Versuchszeit von ≈ 8600 h von im Mittel 194,1µ Ω auf 215,4µ Ω . Bei der Temperatur von 230 °C erhöhten sich die Widerstände bereits nach einer Versuchszeit von ≈ 5500 h auf im Mittel 277,8µ Ω . Ähnliche Verläufe wurden auch beim Schmelzleitertyp D bestimmt. Bei diesem erhöhte sich der Widerstand der lotbeschichteten Engstelle nach ≈ 8100 h bei einer Temperatur von 210 °C von im Mittel 103,8µ Ω auf 127,8µ Ω , bei 230 °C und einer Versuchszeit von ≈ 5000 h sogar bis auf 179,3µ Ω (Bild 23). Zudem kam es bei den Proben der Typen C und D, die mit 230 °C beansprucht wurden, während der Widerstandsmessung zu Brüchen einzelner Schmelzleiter im Bereich der lotbeschichteten Engstelle, da die Schmelzleiter in diesem Bereich sehr hart und spröde geworden waren.

Auch die Widerstände der reinen Silber-Schmelzleiter (Typ A) und der versilberten Kupferschmelzleiter (Typ B) veränderten sich bei Beanspruchung mit 140 °C über eine Versuchszeit von ≈ 8600 h nicht signifikant. Im Temperaturbereich ≥ 180 °C wurden jedoch deutliche Veränderungen festgestellt. Die Schmelzleiter des Typs A waren nach einer Versuchszeit von ≈ 1880 h bei 180 °C bereits so spröde und hart, dass alle Proben während der Widerstandsmessung brachen. Auch bei einer Beanspruchung mit einer Temperatur von 210 °C bzw. 230 °C brachen nach kurzer Versuchszeit jeweils zwei von drei Proben im Bereich der lotbeschichteten Engstelle (Bild 22 und Bild 23). Die bei diesen Temperaturen weiterhin gemessenen Widerstandsverläufe sind daher aufgrund des geringen verbleibenden Probenumfangs nur eingeschränkt aussagekräftig.

Beim Schmelzleitertyp B erhöhten sich die gemessenen Widerstände bei einer Temperatur von 180 °C nach einer Versuchszeit von ≈ 5500 h von im Mittel 223,9 μ Ω auf 385,7 μ Ω (Bild 22). Ähnlich starke Anstiege der Widerstände konnten auch bei den höheren Temperaturen von 210 °C und 230 °C gemessen werden (Bild 23). Zudem brachen auch bei diesem Schmelzleitertyp eine Vielzahl Proben, die mit Temperaturen ≥ 180 °C beansprucht wurden, bei der Widerstandsmessung an der lotbeschichteten Engstelle (Bild 23).

Neben den erhöhten Widerständen an der lotbeschichteten Engstelle, wurde bei allen Schmelzleitern mit höherer Temperatur eine stärker werdende Fremdschichtbildung am Lotstreifen beobachtet. Die Oxidation des Lotes hat wahrscheinlich, aufgrund des geringen Anteils des Lotes an der Stromleitung, keinen Einfluss auf die gemessenen Widerstände. Wird jedoch im Bereich der lotbeschichteten Engstelle durch die fortschreitende Oxidation des Lotes ein minimales Verhältnis von Lot- zu Schmelzleitervolumen unterschritten, zieht sich die für den erfolgreichen Abschaltvorgang im Überlastfall notwendige Interdiffusion über einen zu großen Zeit- und Temperaturbereich hin oder kann möglicherweise nicht mehr vollständig stattfinden [JOH-82]. Ein Schaltversagen der Sicherung wäre die Folge. Da diese Vermutung allein mit den gealterten Schmelzleitern nicht nachgewiesen werden konnte, sollten in zukünftigen Versuchen komplette Sicherungen untersucht sowie metallographische Untersuchungen und Schaltprüfungen der gealterten Sicherungen kombiniert werden. Des Weiteren sollten in Grundlagenversuchen Schmelzleiter im Vakuum betrachtet werden, um die Einflüsse der Oxidation und der Interdiffusion auf den Alterungsvorgang trennen zu können.

Um im Rahmen dieses Projektes genauere Erkenntnisse bezüglich der Folgen der Alterung des Schmelzleiters zu gewinnen, vor allem hinsichtlich der Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot, wurden die gealterten Schmelzleiter analog zu denen im Neuzustand metallographisch untersucht. Die Untersuchung wurde nach unterschiedlichen Versuchszeiten an jeweils einer, bei 180 °C beanspruchten Probe durchgeführt.

Die Schliffbilder im Bereich der lotbeschichteten Engstelle des Silber-Schmelzleiters (Typ A) zeigten bereits nach einer Versuchszeit von 1880 h eine starke Querschnittsminderung um über 65 % im Vergleich zum Neuzustand. Des Weiteren konnte in der REM/EDX-Analyse in diesem Bereich das großräumige Bilden der ε -Phase im System Ag-Sn nachgewiesen werden. Diese intermetallische Phase ist als Produkt einer ausgeprägten Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot entstanden und kann demnach aufgrund ihrer deutlich schlechteren elektrischen und mechanischen Eigenschaften zusammen mit der Querschnittsminderung für die gemessenen erhöhten Widerstände und den Bruch der Schmelzleiter verantwortlich gemacht werden (Bild 22). Überdies wurden Ablagerungen reinen Bleis im äußeren Randbereich des Schmelzleiters nachgewiesen. Das Blei ist wahrscheinlich mit der Zeit nach außen gedrängt worden, da es an der Interdiffusion zwischen Silber und Zinn nicht teilhaben konnte (Bild 24).



Bild 24: Schmelzleiter Typ A - Schliffbild nach 1880 h bei 180 °C

Auch beim versilberten Kupfer-Schmelzleiter konnte mit der metallographischen Untersuchung eine ausgeprägte Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot festgestellt und als Ursache der Widerstandserhöhungen und der Brüche identifiziert werden. So wurden nach einer Versuchszeit von 4835 h große Querschnittsminderungen (Verringerung um \approx 70 %) und Materialveränderungen im Schliffbild deutlich (Bild 25). Die anschließende REM / EDX-Analyse zeigte, angrenzend an den Rest des Kupfer-Schmelzleiters (Bild 26, Bereich 1), die ε -Phase im System Cu - Sn. Weiterhin wurden beidseitig großräumig um den Schmelzleiter eine ternäre Legierung des Systems Cu – Sn - Cd (Bild 26 Bereich 2) sowie mehrere weitere Mischkristalle aller beteiligten Elemente nachgewiesen.



Bild 25: Schmelzleiter Typ B – Schliffbild nach 4835 h bei 180 °C



Bereich	Zusa	ammer Gewic	mögliche		
	Cu	Sn	Cd	Ag	Phase
1	100	-	-	-	
2	59	41	-	-	ε - Phase
3	38	59	3	-	Mischkristall
4	-	100	-	-	
5	-	-	82	18	ε - Phase
6	-	96	4	-	Mischkristall
7	20	-	80	-	Mischkristall

* Die Messung erfolgte mit einem nicht kalibrierten System. Die prozentualen Werte sind daher nur ungefähre Angaben

Bild 26: Schmelzleiter Typ B – REM/EDX-Analyse des gealterten Schmelzleiters aus Bild 25

Die nach einer Versuchszeit von ≈8600 h angefertigten Schliffbilder der Kupfer-Schmelzleiter des Typs C und des Typs D zeigten nahezu identische Materialveränderungen. Trotz der im Vergleich zu den anderen Schmelzleitertypen deutlich größeren Beanspruchungszeit, konnte in den Schliffbildern nahezu keine Verringerung des Kupfer-Querschnitts festgestellt werden (Bild 27, Bild 28). Diese Erkenntnis stimmt mit den gemessenen Widerstandsverläufen (Bild 22) an der lotbeschichteten Engstelle überein.

Trotzdem wurden bei beiden Proben die durch Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot gebildete intermetallischer Phasen (IMP) nachgewiesen. Die IMP sind deutlich in den Schliffbildern beider Proben zu erkennen (Bild 27 und Bild 28). Die mit der REM/EDX-Analyse ermittelte Zusammensetzung dieser Schichten lässt darauf schließen, dass es sich bei beiden Proben angrenzend an den Kupfer-Schmelzleiter (Bereich 3) um die ε -Phase (Bereich 2) und um die η -Phase (Bereich 1) des Systems Cu-Sn handelt. Mit einer ungefähren Dicke von $\approx 20\,\mu$ m nach einer Versuchszeit von $\approx 8600\,h$ sind diese IMP deutlich schwächer ausgeprägt als bei den anderen Schmelzleitern der Typen A und B.



① η – Phase im System Cu – Sn
 ② ε – Phase im System Cu – Sn
 ③ Cu – Schmelzleiter
 Bild 27: Schmelzleiter Typ C – Schliff nach 8625 h bei 180 °C



 $(1)_{\eta}$ – Phase im System Cu – Sn $(2)_{\epsilon}$ – Phase im System Cu – Sn (3) Cu – Schmelzleiter **Bild 28:** Schmelzleiter Typ D – Schliffbild 8621 h bei 180 °C

Zusammenfassend konnte bei allen untersuchten Schmelzleitertypen eine Alterung im Bereich der lotbeschichteten Engestelle durch Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot festgestellt werden. Als Ursache für das deutlich unterschiedliche Langzeitverhalten der Schmelzleiter bei gleicher Beanspruchung ergibt sich die Schmelztemperatur der eingesetzten Lote als wichtigstes Kriterium. Wechselt ein Reaktionspartner vom festen in den flüssigen Aggregatzustand, erhöht sich die Diffusionsgeschwindigkeit stark [HOR-08]. Je näher die Temperatur des Schmelzleiters an der lotbeschichteten Engstelle der Schmelztemperatur des eingesetzten Lotes kommt, desto stärker ist die Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot und desto eher ist ein Schalten der Sicherungen zu erwarten. Für den Einsatz der Sicherungen bei erhöhter thermischer Beanspruchung sind nach bisherigem Erkenntnisstand Schmelzleiter mit einem reinen Sn - Lot aufgrund einer höheren Schmelztemperatur des Lotes besser geeignet als gleiche Schmelzleiter mit einer Sn - Pb oder Cd - Legierung.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

EFEN (NH2, gG, $I_{n} = 400 \text{ A}$) Für Sicherungseinsätze der Firma wurde das Erwärmungsverhalten in einem Niederspannungskabel-Verteilerschrank (NKVS) abhängig von der Sammelschienentemperaturen (90 °C, 115 °C, 140 °C) untersucht. Dabei wurden eine starke thermische Beanspruchung der Sicherungen festgestellt und eine maximale Temperatur am oberen Sicherungsmesser von 220 °C gemessen. Bei Annahme einer Grenztemperatur des oberen Sicherungsmessers von 130 °C [BES-11] wurde abhängig von der Temperatur der Sammelschiene ein maximaler Belastungsstrom der Sicherung von 55 % bis 78 % des Bemessungsstromes ermittelt. Zudem wurde das Schaltverhalten dieser Sicherungseinsätze nach der Belastung im NKVS untersucht. Es konnte nach dieser kurzen Beanspruchungszeit keine Beeinträchtigung des Schaltverhaltens festgestellt werden.

An Sicherungseinsätzen der Firma *Jean Müller* (NH2, gG, $I_n = 250 \text{ A}$) wurde die Temperaturverteilung innerhalb einer Sicherung frei in Luft und im NKVS untersucht. Dazu wurden die Sicherungen innen und außen mit Thermoelementen präpariert. Es wurden maximale Schmelzleitertemperaturen von 144 °C frei in Luft und 230 °C im NKVS gemessen. Die gemessene Temperaturdifferenz bei Belastung mit Bemessungsstrom zwischen oberem Sicherungsmesser und maximaler Schmelzleitertemperatur war frei in Luft $\approx 55 \text{ K}$ und im NKVS $\approx 80 \text{ K}$. Die Belastung der Sicherungen im NKVS mit Bemessungsstrom bei unbestromter Sammelschiene führte zu einer thermischen Überbeanspruchung einiger Sicherungen und zum frühzeitigen Schalten derselben.

Es wurde weiterhin ein Wärmenetz erstellt und die Temperaturverteilung in einem Sicherungseinsatz frei in Luft berechnet und mit den Ergebnissen der Erwärmungsversuche verifiziert. Die berechneten Temperaturen stimmen gut mit den gemessenen überein. Das Wärmenetz kann damit als Grundlage für weiterführende Berechnungen eingesetzt werden. Eine am Wärmenetz durchgeführte Parameterstudie zeigte, im Gegensatz zur Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung, einen dominanten Einfluss der Wärmeleitung entlang der Strombahn auf die Schmelzleitertemperatur.

Des Weiteren wurde in Langzeitversuchen die Alterung unterschiedlicher Schmelzleiter abhängig von der Temperatur (140 °C, 180 °C, 210 °C, 230 °C) untersucht. Dabei wurden bei Widerstände sowie Schmelzleiterbrüche festgestellt. Als Ursache konnte in metallographischen Untersuchungen die Bildung intermetallischer Phasen im Bereich der lotbeschichteten Engstelle aufgrund einer starken Interdiffusion zwischen Schmelzleiter und Lot identifiziert werden. Schmelzleiter mit reinem Sn-Lotauftrag zeigten ein deutlich langzeitstabileres Verhalten. Schmelzleiterbrüche sowie signifikant erhöhte Widerstände wurden bei diesen erst nach langer Beanspruchung und Temperaturen >210 °C festgestellt. Für einen langzeitstabilen Betrieb von Sicherungen bei erhöhter Erwärmung sind nach bisherigem Erkenntnisstand Sicherungen mit Schmelzleitern, deren SN-Lotaufträge keine Zusätze enthalten, die die Schmelztemperatur verringern, besser geeignet. Der Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen sollte daher bevorzugt auf Schmelzleitern mit reinem Sn-Lot bzw. mit Loten höherer Schmelztemperatur liegen. Die Langzeitversuche zeigten bei einigen Schmelzleitern die Bildung intermetallsicher Phasen im Bereich der lotbeschichteten Engstelle, ohne dass erhöhte Widerstände gemessen wurden, sowie eine ausgeprägte Oxidation des Lotauftrages.

Der Einfluss der Fremdschichtbildung auf das Schaltverhalten ist noch nicht abschließend geklärt und sollte in weiteren Untersuchungen unbedingt betrachtet werden.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- [BES-11] *Dr.-Ing. Herbert Bessei:* Sicherungshandbuch. Das Handbuch für Anwender von Nierspannungs- und Hochspannungssicherungen. Kerschensteiner Verlag, Lappersdorf, 2011.
- [BÖH-05] *Böhme, H.:* Mittelspannungstechnik. Schaltanlagen berechnen und entwerfen. Huss-Medien, Verl. Technik, Berlin, 2005.
- [HOR-08] *Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.:* Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. Springer, Berlin [u.a.], 2008.
- [JOH-82] *Johann, H.:* Elektrische Schmelzsicherungen für Niederspannung. Vorgänge, Eigenschaften, techn. Einsatz. Springer, Berlin [West] [u.a.], 1982.
- [SCH-01] *Scholz, H.; Löbl, H.:* Untersuchung zur Strombelastbarkeit und Erwärmung an Niederspannungs-Sicherungen und an der Lastschaltleiste Multivert, Dresden, 2001.

6 ANHANG

	Sicherungslastschaltleiste vertikal						
	Temperatur	-		Belast	tungsstr	om in A	
	messstellen			150	200	225	250
Umg	gebungstemperatur	-	27,0	27,3	27,4	25,8	25,9
		Oben	15,4	34,3	62,8	81,6	104,0
	Vorn	Mitte	16,4	37,2	68,6	89,5	114,5
e		Unten	14,8	33,3	61,1	79,5	101,5
leit		Oben	15,8	35,2	64,6	83,9	107,1
Jelz	Mitte	Mitte	17,2	38,4	70,8	92,3	118,1
chn		Unten	15,7	34,8	63,6	82,8	105,6
Ň		Oben	15,3	34,0	62,0	80,6	102,7
	Hinten	Mitte	16,1	36,6	67,5	88,2	112,8
		Unten	14,7	33,0	60,6	79,0	100,9
	Massar	Oben	10,1	22,0	39,2	50,4	63,2
		Unten	9,8	21,4	38,0	49,2	61,9
		Vorn	9,6	21,0	37,4	48,2	60,9
	Keramik	Rechts	10,1	21,8	39,0	50,4	63,8
	Innen	Hinten	9,1	19,9	35,6	46,3	58,3
Φ		Links	9,5	20,9	37,6	49,0	62,1
äus		Vorn	8,9	19,1	33,8	43,1	54,1
je p:	Keramik	Rechts	9,5	20,4	36,2	46,7	58,8
	Außen	Hinten	9,1	19,4	34,4	43,2	54,1
		Links	9,0	19,4	34,5	44,8	56,4
	Dockol	Oben	9,4	20,1	35,4	45,7	57,4
	Deckei	Unten	9,3	20,1	35,9	46,3	58,2
		Oben	7,3	15,3	26,6	33,6	41,6
ste		Unten	7,0	15,3	27,0	34,4	42,9
Le.	Sammelschiene		5,3	10,7	18,1	22,2	27,1
	Zul. Kabelabgang		5,7	12,1	21,5	26,8	33,2



Bild A1: Erläuterung zur Messstellenbezeichnung

Tab	elle A2:	Übertemperaturen des Sicherungseinsatzes frei in Luft und horizontale	er
		Einbaulage	

	Sicherungslastschaltleiste horizontal						
Temperatur-				Belast	ungsstro	om in A	
	messsteller	l	100	150	200	225	250
Umg	Umgebungstemperatur			24,6	24,8	25,1	25,2
		Oben	14,3	32,5	60,0	77,1	98,2
	Vorn	Mitte	15,5	35,4	66,1	85,3	109,1
er		Unten	13,9	31,8	58,9	75,7	96,4
leit		Oben	14,7	33,5	61,9	79,7	101,5
Ielz	Mitte	Mitte	16,1	36,8	68,4	88,3	112,7
chn		Unten	14,8	33,3	61,5	79,0	100,6
Ň		Oben	14,2	32,1	59,4	76,4	97,2
	Hinten	Mitte	15,3	34,9	65,2	84,1	107,5
		Unten	13,8	31,6	58,6	75,3	95,8
	Massar	Oben	9,1	20,3	36,6	46,2	57,7
		Unten	9,1	20,2	36,2	45,6	57,1
	Keramik Innen	Vorn	8,9	19,7	35,6	45,0	56,9
		Rechts	9,2	20,2	36,6	46,4	58,7
		Hinten	8,5	18,8	33,9	42,8	53,9
Ð		Links	9,0	20,0	36,5	46,4	58,7
äus		Vorn	8,0	17,6	31,4	39,4	49,1
ìeh	Keramik	Rechts	8,6	18,9	33,9	42,7	53,7
0	Außen	Hinten	6,6	14,1	24,9	30,9	38,3
		Links	8,6	18,9	33,8	42,7	53,7
	Dockol	Oben	8,6	18,8	33,2	41,8	52,5
	Deckei	Unten	8,4	18,4	32,8	41,1	51,2
	NH Untortail	Oben	6,2	13,7	24,3	30,2	37,3
ste	NI FOILEILEI	Unten	6,5	14,7	26,3	32,8	40,7
Lei	Sammelschiene		4,4	9,7	17,3	21,3	25,9
	Zul. Kabelabgang		5,2	11,6	20,4	25,3	31,3



Bild A2: Position zusätzlicher Thermoelemente: Abgangsschienen L1, L2 (links); Sicherungsunterteile und Kabelabgänge (Mitte); Oberfläche der Einschwenkvorrichtungen (rechts)



Bild A3: Thermoelemente zum Messen der Lufttemperaturen der Sicherungslastschaltleiste



Bild A4: Position zusätzlicher Thermoelemente zum Messen der Innenlufttemperatur und der Sammelschienentemperatur im NKVS

Übertemperatur in K		obere Sicherung		mittlere Sicherung		untere Sicherung		
Strom in A		125	250	125	250	125	250	
U	mgebungstem	ip. in °C	33,3	33,6	33,3	33,6	33,3	33,6
		Oben	40,4	174,3	38,2	-	33,5	-
	Vorn	Mitte	43,2	191,2	40,5	-	35,6	-
er		Unten	40,4	175,0	38,4	-	32,0	-
leit		Oben	41,2	179,0	40,2	-	34,9	-
Jelz	Mitte	Mitte	44,9	196,5	43,3	-	36,5	-
chn		Unten	42,1	180,0	39,8	-	32,6	-
Ň		Oben	40,3	173,7	38,9	-	33,5	-
	Hinten	Mitte	43,0	189,0	41,6	-	35,5	-
		Unten	40,3	173,8	39,3	-	31,6	-
	Mossor	Oben	28,5	116,3	27,9	-	24,4	-
	-10165561	Unten	30,0	120,2	29,0	-	20,6	-
		Vorn	31,4	126,7	30,5	-	23,0	-
	Keramik	Rechts	31,2	126,9	29,5	-	23,6	-
	Innen	Hinten	29,9	119,9	28,0	-	22,7	-
e		Links	31,3	130,2	-	-	23,8	-
äus		Vorn	29,4	115,7	28,4	-	21,7	-
jeh.	Keramik	Rechts	30,1	119,5	29,0	-	22,8	-
0	Außen	Hinten	29,9	115,8	27,8	-	21,7	-
		Links	30,3	121,3	27,7	-	22,3	-
	Dookol	Oben	29,6	116,9	27,9	-	23,1	-
	Deckei	Unten	30,1	118,2	27,7	-	20,7	-

Tabelle A3:	Ubertemperaturen	der präparierten	Sicherungseinsätze	im NKVS

 Tabelle A4:
 Übertemperaturen der zusätzlichen Temperaturmesspunkte im NKVS

Messstelle	125 A	250 A	Messstelle	125 A	250 A	
O_Messer_re	28,8	-	O_Schiene	16,2	59,6	
M_Messer_re	28,2	114,7	M_Schiene	15,9	61,1	
U_Messer_re	26,9	104,6	O_KA	9,0	34,0	
O_NKVS_air	8,2	33,8	M_KA	10,5	38,8	
M_NKVS_air	6,9	29,4	U_KA	14,0	25,0	
U_NKVS_air	6,0	25,6	O_LE_PVC	14,8	62,1	
O_LE_air	16,9	65,3	M_LE_PVC	13,6	56,8	
M_LE_air	14,3	55,1	U_LE_PVC	11,8	47,9	
U_LE_air	12,4	48,6	O_SS_li	16,0	61,7	
LE_air_in	1,5	4,9	M_SS_li	16,5	63,2	
LE_air_out	18,4	69,9	U_SS_li	14,6	55,5	
O_UT_o	21,3	84,2	O_SS_re	16,4	63,8	
O_UT_u	23,8	92,4	M_SS_re	17,2	64,1	
M_UT_o	20,7	84,0	U_SS_re	15,7	56,5	
M_UT_u	21,7	87,5	SS_0	7,0	29,5	
Globale Indizes	s: 0Oben;	MMitte; l	JUnten			



Bild A5: Abmessungen der Schmelzleiter

Tabelle A5:	Verwendete Werkstoffparameter [BÖH-05], [SCH-01]					
Bauteil	Material	Temperaturkoeffizient $lpha_{\mathrm{T}}$ in \mathcal{K}^{-1}	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m ² K			
Schmelzleiter	Kupfer	0,0039	385			
Sicherungsmesser	Messing	0,0085	70			
Gehäuse	Keramik	-	1,3			
Abdeckplatten	Aluminium	0,004	225			
Füllmaterial	Quarzsand	-	0,5			
Abdichtung	Pappe	-	0,5			

			••	
abelle A5:	Verwendete	Werkstoffparameter	[BOH-05],	[SCH-01]



Bild A6: Geometrie der einzelnen Schichten zur Beschreibung der radialen Wärmeübertragung durch den Quarzsand

			••
Tabelle A6:	Parameter für Wärmestrahlung	g und konvektiven Wärmeübergang	g [BOH-05]

Strahlung ε		
Keramik	0,9	
Aluminium	0,25	
konvektiver Wärmeübergang	C 1	n ₁
Keramikoberfläche	0,15	0,33
obere Abdeckplatte	0,17	0,33
untere Abdeckplatte	0,095	0,33











Bild A9: Temperaturverlauf am mittleren Schmelzleiter im NKVS bei unbestromter Sammelschiene

Tabelle A7: Maximale Temperatur des oberen Sicherungsmessers im NKVS bei unbestromter Sammelschiene (ausgelöste Einsätze fett)

NH-	l = 12	5 A	l = 25	0 A
Position	präpariert	original	präpariert	original
Oben	61,8	62,1	150,5	176,5
Mitte	61,2	61,5	173,1	149,8
Unten	57,7	60,2	163,0	142,0