

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung

---

## Technischer Abschlussbericht

### Teilprojekt 5 – 2

Forschungsprojekt Nr. 2164 0009 75 (AWU 2164 0037)

### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Auftraggeber: NH/HH-Recycling e.V.  
Geschäftsstelle  
Hofmannstraße 6  
93491 Stamsried

Auftragnehmer: Technische Universität Ilmenau  
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung  
Gustav-Kirchhoff-Straße 1  
98683 Ilmenau

Bearbeiter: PD Dr.-Ing. habil. Holger Schau  
Dipl.-Ing. (FH) Dietrich Barsch

Ilmenau, 30. Juni 2014

PD Dr.-Ing. habil. Holger Schau  
Projektleiter

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Prüfverfahren	4
2.1	Dreipoliger Prüfaufbau	4
2.2	Elektrischer Prüfkreis	6
2.3	Prüfdurchführung	8
3	Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen	9
3.1	gG - Sicherungen	16
3.1.1	Lichtbogenenergie	16
3.1.2	Direkte Einwirkenergie	21
3.1.3	Normierte Zeit/Strom-Kennlinien PSAgS	27
3.2	gTr - Sicherungen	32
3.2.1	Lichtbogenenergie	32
3.2.2	Direkte Einwirkenergie	35
3.2	Arbeitsschutz - Sicherungen	38
3.2.1	Lichtbogenenergie	38
3.2.2	Direkte Einwirkenergie	43
4	Praktische Anwendungsregeln zur Einhaltung der Schutzpegel bei dreipoligen Kurzschlüssen und zur Wahl der PSAgS oder der Vorsicherung	48
4.1	Mindestüberstromfaktor	48
4.2	Diagramme zur Auswahl des Sicherungsbemessungsstrom in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für Standardexpositionsbedingungen	50
4.3	Diagramme oder Gleichung zur Ermittlung der zulässigen Ausschaltzeiten von Vorsicherungen	56
4.3.1	Normierte Zeit/Strom-Kennlinie für PSAgS	56
4.3.2	Mathematische Funktion (Geradengleichung)	60
4.3.3	Digitalisierte Kurven für numerische Berechnung	61
5	Zusammenfassung	62
6	Verzeichnis der Abkürzungen	66
7	Abbildungsverzeichnis	67
8	Tabellenverzeichnis	71
9	Literaturverzeichnis	73

## 1 Aufgabenstellung

Nach den Untersuchungen von dreipoligen Kurzschlüssen ohne Vorsicherungen sind dreipolige Störlichtbogenprüfungen mit NH-Sicherungseinsätzen vorgenommen worden. Dabei waren insbesondere gezielte Prüfungen zum messtechnischen Nachweis der aus den zweipoligen Störlichtbogenprüfungen hochgerechneten Untersuchungsergebnisse des vorangegangenen Teilprojekts durchzuführen.

Die Auswahl der Sicherungsbemessungsströme basiert dabei insbesondere auf Prüfkreiseinstellungen mit Vorsicherungen, bei denen die gemessenen elektrischen oder thermischen Lichtbogenenergien im zweipoligen Prüfaufbau (zweipolige Kurzschlüssen) und/oder deren errechnete Werte für dreipolige Kurzschlüsse an der Grenze der Prüfpegel der PSAgS-Schutzklassen lagen.

Die Prüfelektrodenanordnung des bisher angewandten dreipoligen Prüfaufbaus ist zu modifizieren. Die seitliche Einführung einer Prüfelektrode auf eine rückwärtige Einführung der Prüfelektrode in die Prüfbox zu ändern. Damit soll eine gleichmäßige thermische Energieabstrahlung von der Prüfbox und eine symmetrische Energieaufnahme durch die Kalorimeter auf der Prüfplatte erreicht werden.

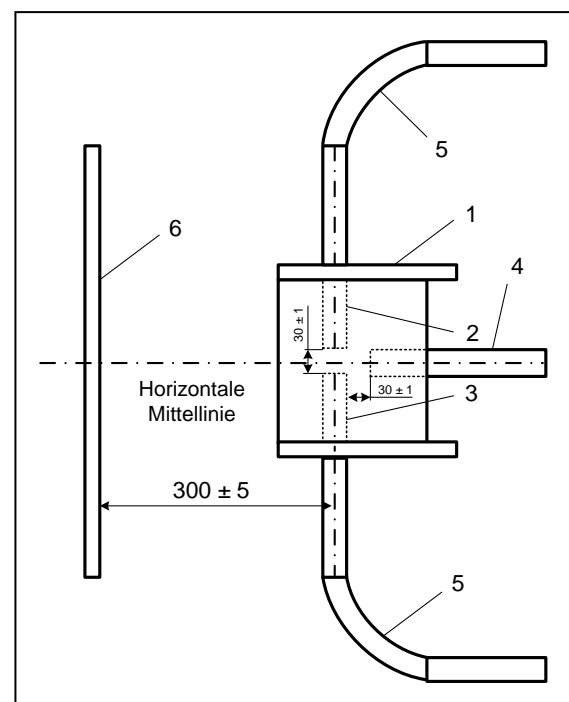
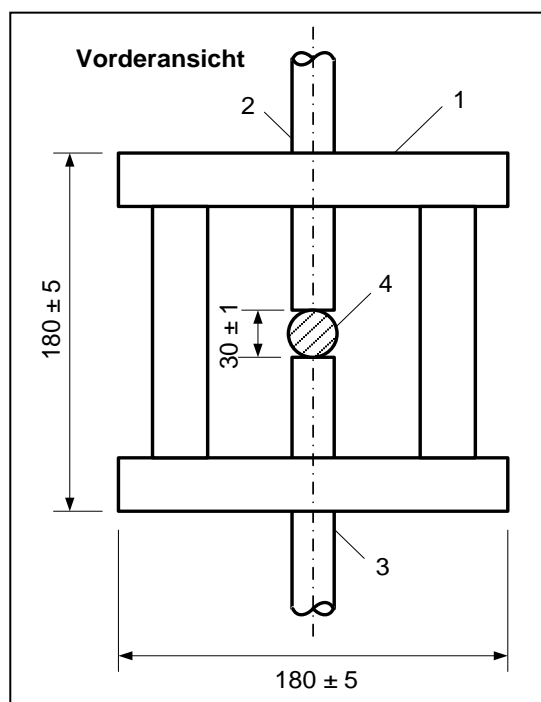
Die Hochrechnungen aus den Untersuchungsergebnissen zweipoliger Störlichtbogenprüfungen und die Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen sind gegenüberzustellen. Aus den Messergebnissen sind Schlussfolgerungen für die praktische Auswahl von PSAgS und von NH-Sicherungen abzuleiten. Die Ergebnisse sind so aufzubereiten, dass eine einfache Handhabung und Nutzung durch den Ingenieur ermöglicht wird.

## 2 Prüfverfahren

### 2.1 Dreipoliger Prüfaufbau

Die dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen erfolgten in Anlehnung an das Box-Test-Verfahren (zweipoliges Prüfverfahren) gemäß DIN IEC 61482-1-2 und an den Box-Test-Aufbau für die dreipoligen Störlichtbogenprüfungen ohne Vorsicherungen, die in [2] beschrieben sind. Im Prüfaufbau wurde jedoch eine Änderung vorgenommen, so dass eine dritte Prüfelektrode rückseitig und im Abstand von 30 mm zu den vertikalen Prüfelektroden eingefügt wurde.

Im Bild 1 ist die Prüfbox mit den drei Prüfelektroden und im Bild 2 die dreipolige Prüfanordnung mit der Prüfplatte dargestellt.



#### Legende

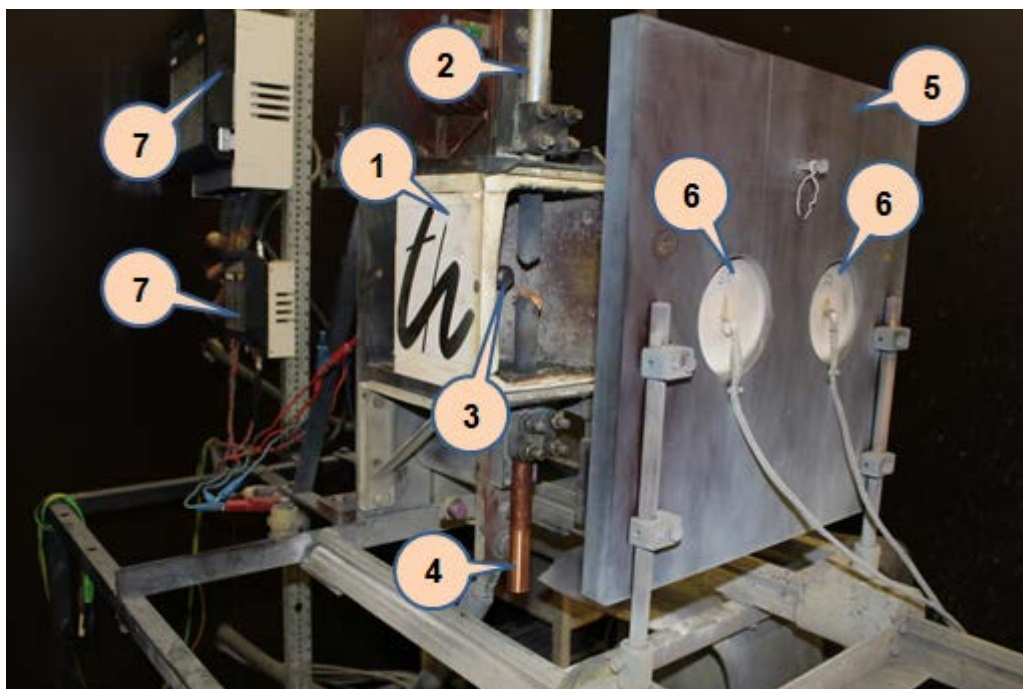
- |   |  |   |                            |
|---|--|---|----------------------------|
| 1 | Prüfbox (nicht leitfähiges, hitzebeständiges Material) | 5 | Kabelverbindung            |
| 2 | Prüfelektrode $\varnothing 25 \pm 0,1$                 | 6 | Prüfplatte mit Kalorimeter |
| 3 | Prüfelektrode $\varnothing 25 \pm 0,1$                 |   |                            |
| 4 | Prüfelektrode $\varnothing 25 \pm 0,1$                 |   |                            |

**Bild 1** – Darstellung der Prüfbox

**Bild 2** – Prüfanordnung Prüfbox mit Prüfplatte

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Das Bild 3 veranschaulicht den dreipoligen Prüfaufbau mit einer Prüfbox ①, den zwei vertikalen Prüfelektroden ② ④ und der dritten horizontalen Prüfelektrode ③. Gegenüber der Prüfbox befindet sich im Abstand von  $a = 300$  mm eine Prüfplatte ⑤ mit zwei Kalorimetern ⑥ und integrierten Sensoren zur Ermittlung der Einwirkenergie. Für die Störlichtbogenprüfungen mit NH-Sicherungseinsätzen sind NH-Sicherungslasttrenner ⑦ vorgesehen.



Legende:

- |  |  |
|--|--|
| 1 Prüfbox (nicht leitfähiges, hitzebeständiges Material) | 4 Prüfelektrode $\varnothing 25 \pm 0,1$ |
| 2 Prüfelektrode $\varnothing 25 \pm 0,1$                 | 5 Prüfplatte                             |
| 3 Prüfelektrode $\varnothing 25 \pm 0,1$                 | 6 Kalorimeter mit Sensoren               |
| 7 Sicherungslasttrennschalter                            |  |

**Bild 3** – Dreipoliger Prüfaufbau mit Prüfbox, den drei Prüfelektroden und der Prüfplatte mit Kalorimeter

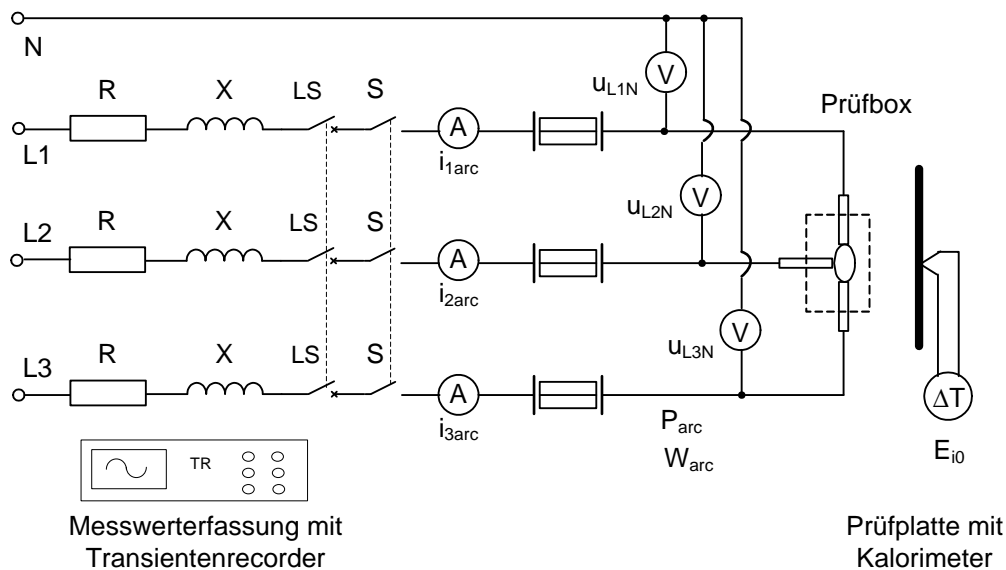
## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

## 2.2 Elektrischer Prüfkreis

Die Hauptbestandteile des elektrischen Prüfkreises für das dreipolige Prüfverfahren sind:

- Einspeisetransformator
- Drossel
- Leistungsschalter als Prüfkreissschalter
- Schütz als Draufschalter
- Stromwandler
- Prüfplatte/Kalorimeter mit Mess- und Übertragungssystem, Operationsverstärker
- Transientenrecorder zur Datenerfassung
- Prüfbox

Bild 4 zeigt eine prinzipielle Darstellung des dreipoligen elektrischen Prüfkreises.



**Bild 4** – Prinzipdarstellung des dreipoligen elektrischen Prüfkreises

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

### Elektrische Prüfparameter

- Prüfspannung ( $\pm 5 \%$ )            400 V AC
- Prüfstrom ( $\pm 5 \%$ )                1 kA, 2,3 kA, 4 kA, 5 kA, 6 kA, 7 kA
- Lichtbogendauer ( $\pm 5 \%$ )        500 ms
- Frequenz ( $\pm 1 \%$ )                 50 Hz

### Messwerterfassung mit Transientenrecorder

- Momentanwerte der Leiterströme  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  und  $i_{L3}$
- Momentanwerte der Leiterspannungen  $u_{L1}$ ,  $u_{L2}$  und  $u_{L3}$
- Prüfdauer  $t_p$  (entspricht in der Regel der Ausschaltzeit  $t_{aus}$ )
- Temperaturkurve der Sensoren an den Kalorimetern

### Messwertauswertung mit Transientenrecorder

- Lichtbogenleistung  $P_{arc}$  / kW                       $P_{arc} = i_1 \cdot u_{1N} + i_2 \cdot u_{2N} + i_3 \cdot u_{3N}$

*Berechnung der Lichtbogenleistung aus dem Momentanleistungen von Strangspannungen und Leiterströmen.*

- Lichtbogenenergie  $W_{arc}$  / kJ                       $W_{arc} = P_{arc} \cdot t_{aus}$

*Berechnung der Lichtbogenenergie durch Multiplikation der Lichtbogenleistung mit der Prüfdauer.*

- Direkte Einwirkenergie  $E_{i0}$  / kJ/m<sup>2</sup>                       $E_{i0} = (m \cdot C_p / A) \cdot 5,52 \text{ kJ/m}^2 \cdot dT_{max}$

*Berechnung der direkten Einwirkenergie durch Multiplikation des konstanten Faktors 5,52 kJ/m<sup>2</sup> (m•C/A) mit der Temperaturdifferenz.*

- Maximale Temperaturerhöhung  $dT_{max}$  / K (Übertemperatur)     $dT_{max} = T_M - T_0$

*Temperaturdifferenz zwischen Bezugstemperatur und maximaler Temperatur.*

- Zeit bis zum Erreichen der Temperaturerhöhung  $t_{max}$  / s                       $t_{max} = t_M - t_0$

*Zeit bis zum Erreichen der maximalen Temperatur.*

---

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

## 2.3 Prüfdurchführung

Für die Durchführung der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen wurde folgende Anordnung der Prüfelektroden und Materialien gewählt:

- Aluminium (Al), Bild 2 ②, oben **AlCuMgPb (3.1645) EN AW 2007**
- Kupfer (Cu), Bild 2 ④, unten
- Niro-Stahl (V2A-Stahl), Bild 2 ③, rückseitig

**Prüfströme:** 1 kA, 2,3 kA, 4 kA, 5 kA, 6 kA 7 kA

**Prüfdauer:** 0,5, 0,7 und 1 s (Ausschaltung durch Prüfkreissschalter)

Die Stromeinstellungen für die Prüfströme erfolgten mit Hilfe von Drosseln.

Während den Einstellungsphasen wurden die drei Prüfelektroden metallisch kurzgeschlossen.

Pro Prüfanordnung wurden mindestens zwei Störlichtbogenprüfungen durchgeführt.

Nach jeder Störlichtbogenprüfung erfolgte eine Reinigung der Prüfbox, eine Demontage der gebrauchten Prüfelektroden und Montage neuer Elektroden mit anschließender Überprüfung des Prüf- und Messstromkreises.

### **Betriebsströme der NH-Sicherungseinsätze der Betriebsklasse:**

gG	80 A, 100 A, 125 A, 200 A, 224 A, 250 A, 315 A, 355 A, 400 A, 425 A
gTr	250 kVA (361 A)
Arbeitsschutz	250 A, 400 A, 500 A

---

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen



## Unsymmetrische Belastung der prospektiven Kurzschlussströme

Bei den Stromeinstellungen der prospektiven Kurzschlussströme wurden unsymmetrische Belastungen der Leiterkurzschlussströme festgestellt, die in der Tabelle 1 aufgeführt sind. Eine symmetrische Einstellung der Kurzschlussströme  $\Sigma I = 0$  konnte nicht erreicht werden.

**Tabelle 1** – Stromeinstellungen der prospektiven Kurzschlussströme

Prospektiver Kurzschlussstrom	Leiterkurzschlussstrom			Summenstrom
$I_P$	$I_{KL1}$	$I_{KL2}$	$I_{KL3}$	$I_{SUMM}$
kA	kA	kA	kA	kA
1	1,163	1,122	1,099	0,129
2,3	2,356	2,317	2,356	0,134
4	4,261	4,267	4,266	0,153
5	5,255	5,318	5,038	0,155
6	6,169	6,291	6,133	0,165
7	7,018	7,009	7,121	0,165

### 3 Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen

Die Messergebnisse der Lichtbogenenergie  $W_{arc}$  und der direkten Einwirkenergie  $E_{i0}$  für die verschiedenen eingestellten Prüfströme (prospektive Kurzschlussströme) aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Sicherungen sind in der Tabelle 2 genannt. Die angegebenen Werte sind arithmetische Mittelwerte aus mehreren Versuchen.

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Lichtbogenenergie  $W_{arc}$  und der direkten Einwirkenergie  $E_{i0}$  aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen

Prospektiver Kurzschlussstrom	Betriebsklasse	Sicherungs-Bemessungsstrom	Lichtbogenenergie	Direkte Einwirkenergie
$I_P$		$I_n (S_n/I_{rat})$	$W_{arc} / \text{kJ}$	$E_{i0} / \text{kJ/m}^2$
1 kA	gG	80 A	63,8	22,3
		100 A	66,7	32,5
		125 A	166,1	72,0
	Arbeitsschutz	250 A	112,7	49,1
2,3 kA	gG	200 A	99,8	53,1
		224 A	287,3	202,0
	gTr	250 KVA / 361 A	324,5	250,0
	Arbeitsschutz	400 A	77,3	25,1
4 kA	gG	250 A	51,5	27,3
	gTr	250 KVA / 361 A	403,5	370,5
	Arbeitsschutz	500 A	39,9	23,0
5 kA	gG	315 A	117,0	68,6
	gTr	250 KVA / 361 A	467,3	485,3
	Arbeitsschutz	500 A	74,5	32,7
6 kA	gG	355 A	300,3	224,9
		400 A	540,8	454,7
		425 A	548,7	498,2
	gTr	250 KVA / 361 A	420,7	366,4
7 kA	gG	400 A	98,8	59,0
		425 A	182,8	157,2
	gTr	250 KVA / 361 A	232,1	193,8

Die prinzipiellen energetischen und thermischen Verhältnisse bei dreipoligen Kurzschlüssen werden durch die Ergebnisse aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen ohne Vorsicherungen charakterisiert [2]. Die Energiewerte bei dreipoligen Kurzschlüssen sind demnach annähernd das Doppelte gegenüber den Energiewerten bei zweipoligen Kurzschlüssen.

Im Teilprojekt 5-1 [2] wurde für die Energien bei zweipoligen und dreipoligen Lichtbogenausbildungen mit gleichem Leiterstrom einen Mittelwert von 2,0 ermittelt.

$$W_{LB3} / W_{LB2} = 2$$

$$E_{i03} / E_{i02} = 2$$

Dieser Mittelwert wurde in [2] zur Hochrechnung verwendet. In den aktuellen Messungen mit der dreipoligen Elektrodenanordnung Al/V2A/Cu-Elektroden ergaben sich hinsichtlich der Energiewerte die Ergebnisse in Tabelle 3.

**Tabelle 3** – Vergleich der Energiewerte zwischen zweipoligen und dreipoligen Elektrodenanordnungen

Vergleich der Energiewerte						
$I_p$	Zweipolige Elektrodenanordnung		Dreipolige Elektrodenanordnung		Energieverhältnis	
	Al/Cu		Al/V2A/Cu		$W_{LB3} / W_{LB2}$	$E_{i03} / E_{i02}$
	$W_{arc}$	$E_{i0}$	$W_{arc}$	$E_{i0}$		
<i>kA</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ/m<sup>2</sup></i>	<i>kJ</i>	<i>kJ/m<sup>2</sup></i>		
4	181	146	404	370	2,2	2,5
7	166	438	685	773	2,1	1,8

Die Energierelation bestätigen sich prinzipiell, auch für die Elektrodenanordnung Al/V2A/Cu mit rückwertig eingeführter Elektrode.

Anmerkung: Die Hochrechnung erfolgt auf der Grundlage der Energierelation zwischen den Messwerten für einen 3-poligen Kurzschluss und einen 2-poligen Kurzschluss mit jeweils dem gleichen prospektiven Kurzschlussstrom (Das ist damit **keine** Fehlerort bezogene Betrachtung, bei der bei gleichem Fehlerort bei 3-poligem Kurzschluss der 1,154-fache Strom gegenüber dem 2-poligen Kurzschluss fließen würde).

Brenn- und Ausschaltverhalten:

- In der Anordnung bilden sich grundsätzlich stabile Störlichtbögen aus, die entweder durch die Sicherungen oder durch den Prüfkreissschalter ausgeschaltet wurden.
- Bei 3-poliger Zündung entsteht zuerst eine 3-polige Lichtbogenphase, nach Ausschalten der Sicherung in einem Leiter, dann eine 2-polige Lichtbogenphase.
- Zum selbsttätigen Verlöschen kam es nur, wenn zuerst die Sicherung in einem Leiter ausgeschaltet hat.
- In wenigen Fällen kam es zur 3-poligen Ausschaltung durch den Prüfkreissschalter, alle Lichtbögen verlöschten.
- In meisten Fällen hat die Sicherung von L3 zuerst ausgeschaltet, d. h. der Lichtbogen L1 – L3 verlöschte.
- Wenige Fälle, wo zwei Sicherungen zuerst quasi gleichzeitig ausschalteten, dann sind alle Lichtbögen verlöscht (da keine Lichtbögen gegen Erde möglich).

Die Vorsicherungen in den 3 Leitern im Drehstromnetz schalten einzeln und meist nicht gleichzeitig. Bei einem dreipoligen Kurzschluss wird - abhängig vom Lichtbogenverhalten - vorwiegend eine Phase (Leiter) zuerst ausgeschaltet, zwischen den zwei anderen Phasen kann dann ein Lichtbogen weiterbrennen. Eine vollständige Ausschaltung aller Lichtbögen beim dreipoligen Kurzschluss erfolgt nur dann, wenn im Fehlerfall sofort zwei Sicherungen schalten.

Im realen Fall wird die Lichtbogenausbildung bei dreipoligen Kurzschlüssen von vielen Faktoren beeinflusst. Ein relevanter Faktor für die Entstehung und Ausbildung von gleichzeitig existierenden Lichtbögen (zwei oder drei Lichtbögen) ist die Anordnung der Elektroden.

---

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Bei der Elektrodenanordnung des gewählten dreipoligen Prüfaufbaus wurde festgestellt, dass sich gleichzeitig immer zwei Lichtbögen ausbilden. Dabei scheint meist folgende Lichtbogenausbildung vorzuliegen: ein relativ stabiler Lichtbogen zwischen den vertikal angeordneten Prüfelektroden (L1, L3) und ein Lichtbogen mit dem Fußpunkt auf der horizontal angeordneten Prüfelektrode (L2), der infolge der Lorenzkraft rotiert und wechselnd an den vertikalen Elektroden ansetzt. Auch die Fußpunkte an den vertikalen Elektroden rotierten; Ansatzpunkte sind jeweils die Elektrodenränder. Vorwiegend wurde der stabilere Lichtbogen durch die Sicherung im Leiter L3 zuerst ausgeschaltet. Der andere Lichtbogen brannte dann mit geringerem Strom bis zum selbsttätigen Verlöschen oder bis zur Ausschaltung durch den Prüfkreissschalter weiter.

Die während den Störlichtbogenprüfungen festgestellten Ausschaltkriterien sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4:** Festgestellte Ausschaltkriterien bei den durchgeführten dreipoligen Störlichtbogenprüfungen

Ausschaltkriterien bei den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen							
Sicherung		1. Lichtbogen	2. Lichtbogen			Energieverhalten	
erste	zweite	ausgeschaltet	ausgeschaltet	selbsttätig verlöscht	Prüfkreissschalter ausgeschaltet	PSAgS-Klasse 1 oder 2	
						eingehalten	nicht eingehalten
x	x	x	x			x	
x	x	x	x				x
x		x		x		x	
x		x			x	x	
x		x		x		x	
x		x		x			x
x		x			x		x
keine	keine				x	x	
keine	keine				x		x

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

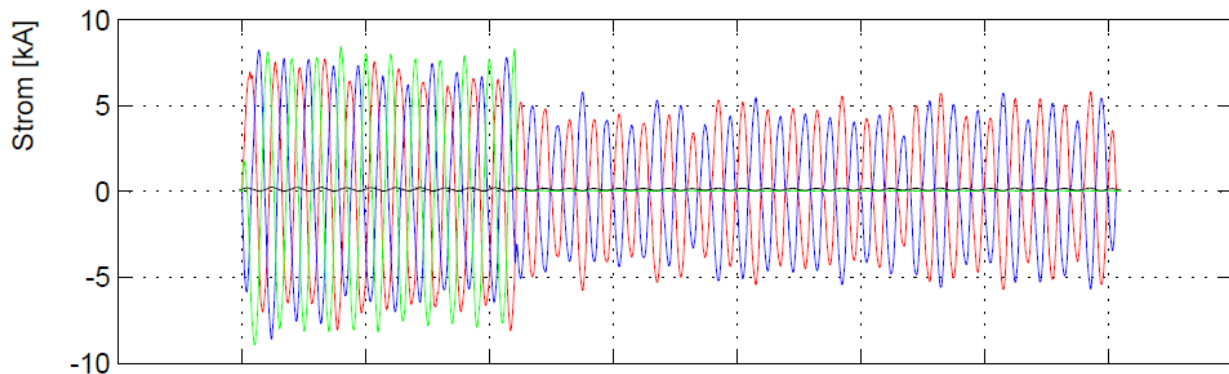
Bei drei Versuchen mit einem Sicherungsbemessungsstrom wurden unterschiedliche zeitliche Ausschaltvarianten registriert, z. B.

- 3 x Ausschalten durch den Prüfkreissschalter
- 1 x Ausschaltung durch Prüfkreissschalter, 1x Lichtbogen selbstständig verlöscht, 1 x Sicherungen ausgeschaltet
- 3 x selbststättigen verlöschen des Lichtbogens, nach Ausschaltung einer Sicherung.

Das heißt, bei dreipoliger Zündung des Kurzschlusses gibt es häufig zunächst eine dreipolige Kurzschlussphase und anschließend eine zweipolige Kurzschlussphase. Die zweipolige Kurzschlussphase ist dann durch einen geringeren Strompegel gekennzeichnet.

Das Bild 5 zeigt die anfangs dreipolige Kurzschlussphase und nach dem Ausschalten einer Sicherung die zweipolige Kurzschlussphase bis zur Abschaltung durch den Prüfkreissschalter.

**Bild 5** - Typisches Oszillogramm für einen dreipoligen Kurzschluss mit einer anfangs dreipoligen Kurzschlussphase und nach Ausschalten einer Sicherungen die zweipolige Kurzschlussphase bis zur Ausschaltung durch den Prüfkreissschalter

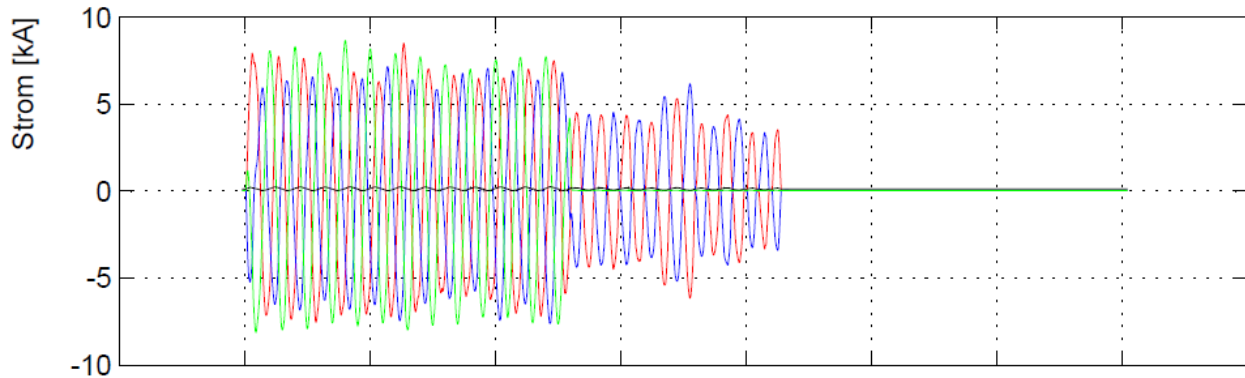


Dagegen ist im Bild 6 die anfangs dreipolige Kurzschlussphase und nach dem Ausschalten einer Sicherung die zweipolige Kurzschlussphase bis zum selbsttätigen verlöschen des Lichtbogens dargestellt.

---

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

**Bild 6** - Typisches Oszillogramm für einen dreipoligen Kurzschluss mit einer anfangs dreipoligen Kurzschlussphase und nach Ausschalten einer Sicherungen die zweipolige Kurzschlussphase bis zum selbsttätigen Verlöschen des Lichtbogens



Für die Bewertung der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen wurden die Lichtbogenenergien und direkten thermischen Einwirkenergien (proportional zu den Werten der maximalen Temperaturerhöhung) für den gesamten Zeitraum bis zur endgültigen Lichtbogenlöschung betrachtet. Die Bewertung erfolgte so, dass die Einhaltung des Personenschutzes durch PSAgS der Klasse 1 und Klasse 2 als gegeben eingeschätzt wurde, wenn für die betreffenden Expositionsbedingungen beide Energiekriterien erfüllt waren und die Werte unter den Prüfpegeln der PSAgS lagen.

In den nachfolgenden Diagrammen und Tabellen sind die hochgerechneten Energiewerte für dreipolige Kurzschlüsse mit den tatsächlich ermittelten Werten der Störlichtbogenprüfungen dargestellt.

Im Vergleich zwischen berechneten und ermittelten Lichtbogenenergiewerten ist festzustellen, dass nur wenige Übereinstimmungen bestehen.

### 3.1 gG - Sicherungen

#### 3.1.1 Lichtbogenenergie

Die ermittelten Lichtbogenenergien aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (rechte Seite) sind den auf dreipolige Kurzschlüsse hochgerechneten Lichtbogenenergien (linke Seite) zugeordnet und in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5** – Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechnete Lichtbogenenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten Lichtbogenenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (gG-Sicherungen)

Lichtbogenenergie $W_{arc}$														
Berechnete Lichtbogenenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme							$I_{nSi}$	Ermittelte Lichtbogenenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme						
1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA		1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA
<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>		<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>
2,2	-	-	-	-	-	-	50 A	-	-	-	-	-	-	-
7,8	-	-	-	-	-	-	63 A	-	-	-	-	-	-	-
34,4	-	-	-	-	-	-	80 A	63,8	-	-	-	-	-	-
146,0	2,2	3,4	-	-	-	-	100 A	66,7	-	-	-	-	-	-
300,2	2,6	2,2	-	-	-	-	125 A	166,1	-	-	-	-	-	-
-	74,0	6,8	-	-	-	-	160 A	-	-	-	-	-	-	-
-	213,0	10,8	-	-	22,0	-	200 A	-	99,8	-	-	-	-	-
-	222,8	66,0	30,0	-	20,6	-	224 A	-	287,3	-	-	-	-	-
-	610,0	87,6	28,6	-	26,0	-	250 A	-	-	51,5	-	-	-	-
-	2100,0	423,0	270,6	68,8	47,0	-	315 A	-	-	-	117,0	-	-	-
-	-	891,2	443,0	134,8	69,0	-	355 A	-	-	-	-	300,3	-	-
-	-	-	1680,0	240,6	90,0	-	400 A	-	-	-	-	540,8	98,8	-
-	-	-	809,6	237,8	156,6	18,4	425 A	-	-	-	-	548,5	182,8	-
-	-	-	-	2340,0	1436,0	131,2	500 A	-	-	-	-	-	-	-

**Legende:**  Klasse 1  Klasse 2  >Klasse 1 und 2

Die Messwerte zeigen z.T. deutliche Abweichungen zu den berechneten Werten, was sich daraus erklärt, dass die dreipoligen Kurzschlüsse in vielen Fällen durch das Ausschalten einer Sicherung mehr oder weniger lange 2-polige Kurzschlussphasen bis zur endgültigen Ausschaltung beinhaltet, die durch ein geringeres Kurzschlussstromniveau geprägt sind. Dadurch kommt es zu geringeren Werten der Lichtbogenleistung für diese Phasen, aber auch zu längeren Ausschaltzeiten gegenüber einer durchgängigen 3-poligen Lichtbogenausbildung.

#### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen



Aus den Messwerten lässt sich in Verbindung mit den Berechnungsergebnissen die Übersicht in Tabelle 4 ableiten.

Mit Tabelle 6 besteht die Möglichkeit, die Bemessungsströme für erforderliche Versicherungen zur Einhaltung des Schutzes durch PSaG-S-Klasse 1 und PSaG-S-Klasse 2 zu bestimmen.

**Tabelle 6** – Einsatz von gG-Sicherungen: Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen anhand der Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse

Übersicht zur Einhaltung der Schutzklassen in Abhängigkeit des Bemessungsstromes (Basis Lichtbogenenergie)													
		gG – Sicherungseinsätze $I_{nSi}$ / A											
		NH00						NH1			NH2		
		50	63	80	100	125	160	200	224	250	315	355	400
$1 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 2,3 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+								
	Klasse 2	+	+	+	+	+							
$2,3 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 4 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+					
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+				
$4 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 5 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
$5 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 6 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
$6 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 7 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
$I''_{K3} \geq 7 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

**Legende**    +    Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

Aus Bild 7 und Bild 8 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätzen und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

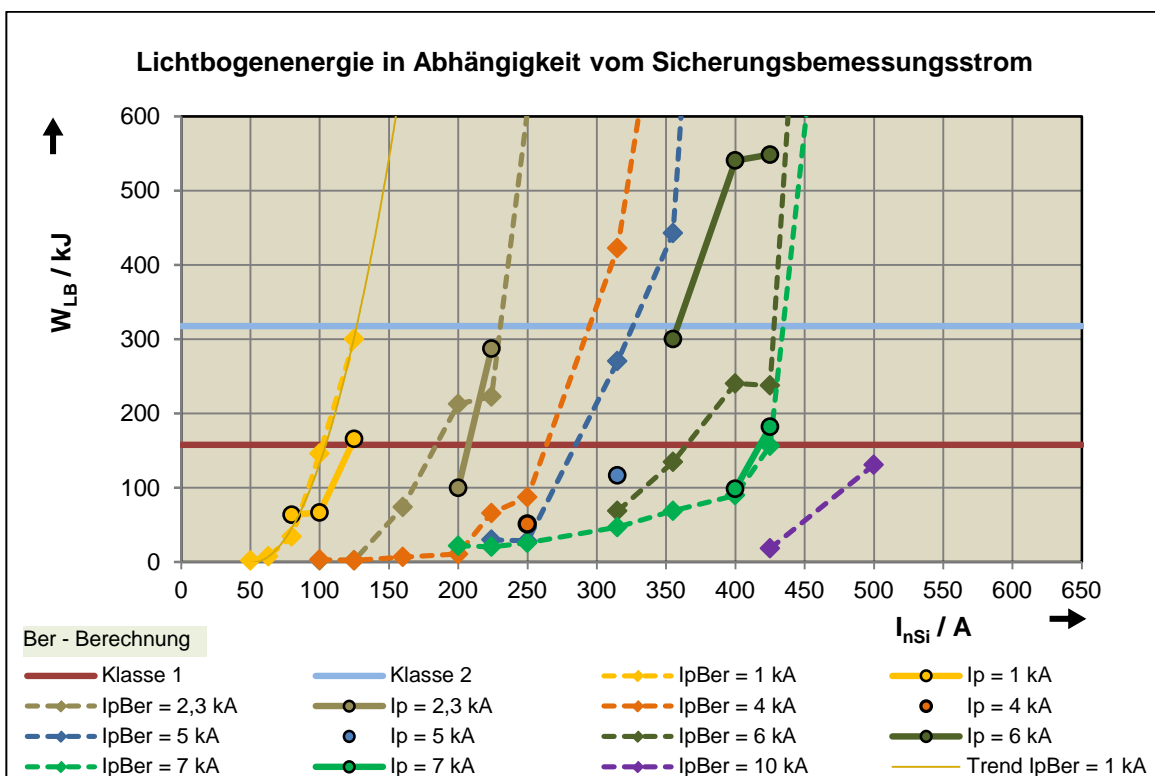
- 1 kA / 80 A, 100 A
- 2,3 kA / 200 A
- 4 kA / 250 A
- 5 kA / 315 A

- 6 kA / 315 A
- 7 kA / 400 A

und die Klasse 2

- 1 kA / 125 A
- 2,3 kA / 224 A
- 5 kA / 355 A
- 6 kA / 355 A
- 7 kA / 425 A

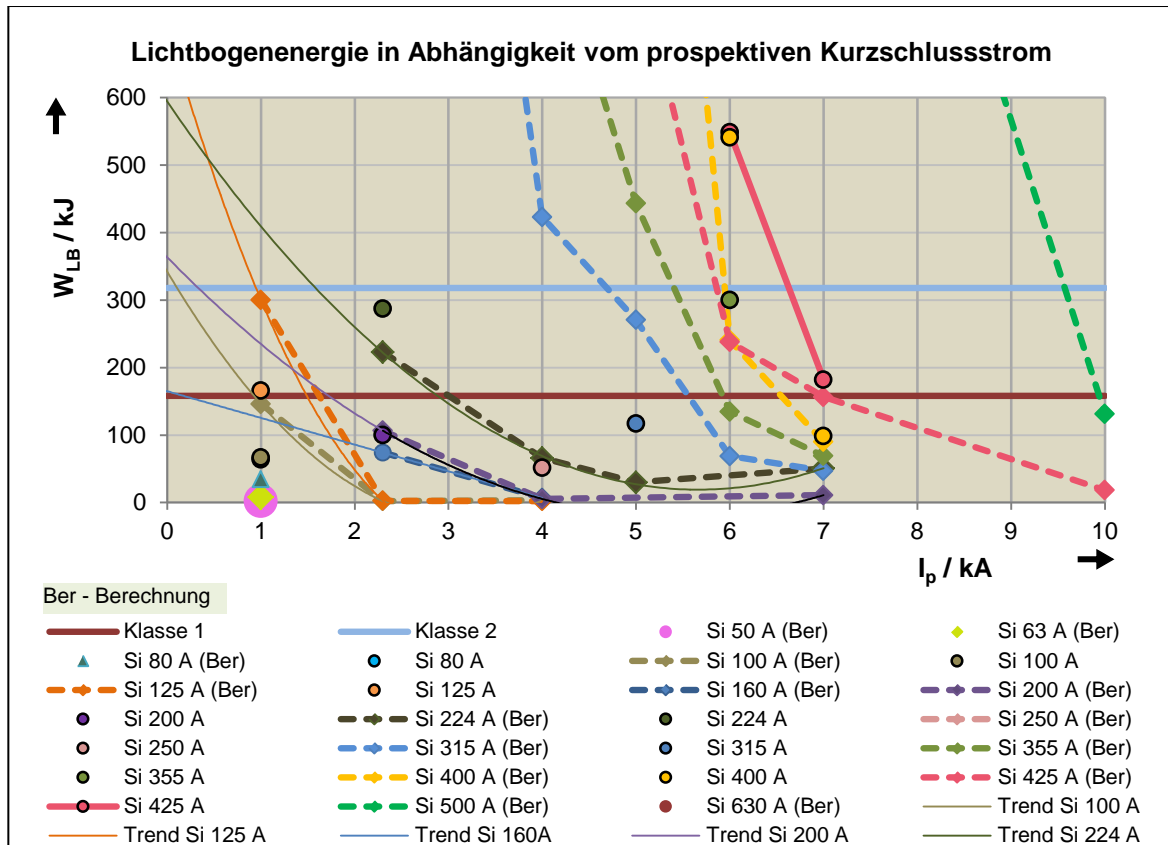
eingehalten wird. Die Werte sind so zu verstehen, dass jeweils ein Mindestkurzschlussstrom, ab dem Schutz besteht, und ein maximaler Sicherungs-Bemessungsstrom, bis zu dem Schutz vorliegt als Grenzen angegeben sind.



**Bild 7** – Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Wie Bild 7 zeigt, bestehen insbesondere bei den prospektiven Kurzschlussströmen von 5 kA (blau) und 6 kA (dunkelgrün) deutlichere Abweichungen zwischen den Kurvenverläufen der hochgerechneten und der Messwerte.



**Bild 8** - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Für den prospektiven Kurzschlussstrom von 1 kA wurden die Werte mit einer Trendlinie (1) extrapoliert (Bild 7):

$$W_{LB1kA} = 0,0554 \cdot I_{nSi}^2 - 5,6392 \cdot I_{nSi} + 142,2 \quad (1)$$

Zur Analyse der Kurvenverläufe bezüglich der Einhaltung der Klassen 1 bzw. 2 wurden auch für die Sicherungsbemessungsströme 100 A (2), 125 A (3), 160 A (4), 200 A (5) und 224 A (6) im Bild 8 Trendlinien hinzugefügt.

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

$$W_{LBSi100A} = 37,138 \cdot I_p^2 - 233,22 \cdot I_p + 342,08 \quad (2)$$

$$W_{LBSi125A} = 76,21 \cdot I_p^2 - 480,37 \cdot I_p + 704,36 \quad (3)$$

$$W_{LBSi160A} = -39,565 \cdot I_p + 165 \quad (4)$$

$$W_{LBSi200A} = 13,053 \cdot I_p^2 - 141,72 \cdot I_p + 363,42 \quad (5)$$

$$W_{LBSi224A} = 17,904 \cdot I_p^2 - 202,91 \cdot I_p + 594,09 \quad (6)$$

In Bild 9 sind die Lichtbogenenergien in Abhängigkeit von den Überstromverhältniswerten dargestellt. Aus diesen Verhältnissen der prospektiven Kurzschlussströme zu den Sicherungsbemessungsströmen wurde jeweils der höchste Wert (Quotient) für die Einhaltung des Prüfpegels für PSAgS-Klasse 1 (158 kJ) und die PSAgS-Klasse 2 (318 kJ) ermittelt und als Mindestüberstromfaktor festgelegt.

Ermittelte Mindestüberstromfaktoren sind:

Klasse 1  $I_p / I_{nSi} = \mathbf{20}$

Klasse 2  $I_p / I_{nSi} = \mathbf{19}$

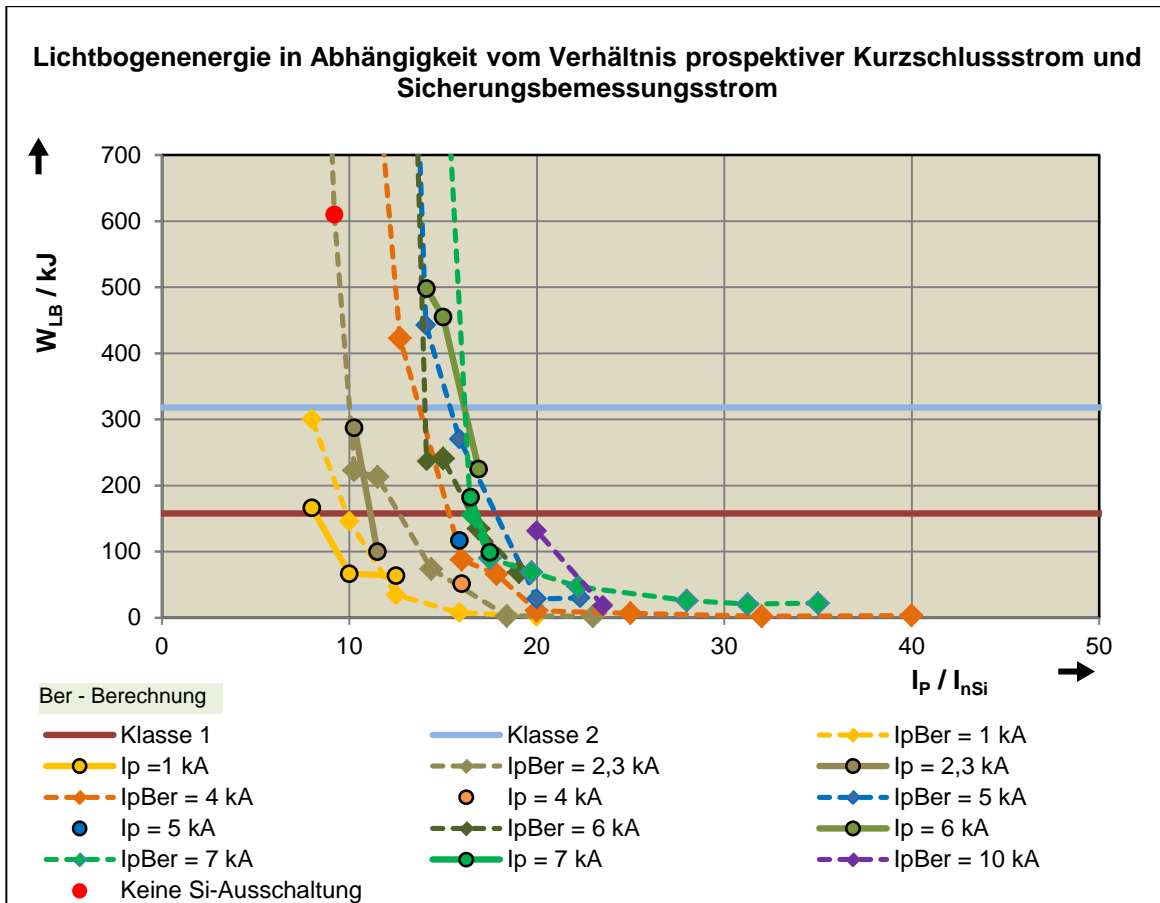
Mit (7) kann der maximale Sicherungsbemessungsstrom (grobe Einschätzung) für einen dreipoligen prospektiven Kurzschlussstrom bei Standardexpositionsbedingungen bestimmt werden.

$$I_{nSi\ max} = \frac{I''_{k3p}}{KÜ_{mind}} \quad (7)$$

$I_{nSi\ max}$  maximaler Sicherungsbemessungsstrom

$I''_{k3p}$  prospektiver Kurzschlussstrom

$KÜ_{mind}$  Mindestüberstromfaktor



**Bild 9** – Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiver Kurzschlussstrom zu Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

### 3.1.2 Direkte Einwirkenergie

In der Tabelle 7 sind die ermittelten direkten Einwirkenergien aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (rechte Seite) und die auf dreipolige Kurzschlüsse hochgerechneten direkten Einwirkenergien (linke Seite) angegeben.

**Tabelle 7** – Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen berechneten direkten Einwirkenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten direkten Einwirkenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen (gG-Sicherungen)

Direkte Einwirkenergie $E_{i0}$														
Berechnete direkte Einwirkenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme							$I_{nSi}$	Ermittelte direkte Einwirkenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme						
1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA		1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA
$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$		$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$
2,6	-	-	-	-	-	-	50 A	-	-	-	-	-	-	-
4,8	-	-	-	-	-	-	63 A	-	-	-	-	-	-	-
12,0	-	-	-	-	-	-	80 A	22,3	-	-	-	-	-	-
71,6	3,6	4,2	-	-	-	-	100 A	32,5	-	-	-	-	-	-
130,6	5,0	11,4	-	-	-	-	125 A	72,0	-	-	-	-	-	-
-	46,4	7,8	-	-	-	-	160 A	-	-	-	-	-	-	-
-	147,2	10,8	-	-	8,6	-	200 A	-	53,1	-	-	-	-	-
-	128,0	47,0	15,4	-	17,0	-	224 A	-	202,0	-	-	-	-	-
-	571,0	71,2	16,8	-	11,4	-	250 A	-	-	27,3	-	-	-	-
-	2680,0	358,4	216,4	60,2	23,4	-	315 A	-	-	-	68,6	-	-	-
-	-	1494,8	443,0	104,4	45,2	-	355 A	-	-	-	-	224,9	-	-
-	-	-	3820,0	206,4	79,0	-	400 A	-	-	-	-	454,7	59,0	-
-	-	-	1552,2	130,6	130,2	15,2	425 A	-	-	-	-	498,2	157,2	-
-	-	-	-	4720,0	3900,0	79,8	500 A	-	-	-	-	-	-	-

**Legende:**  Klasse 1       Klasse 2       >Klasse 1 und 2

Zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2 bei dreipoligen Kurzschlüssen können die erforderlichen Sicherungsbemessungsströme nach Tabelle 8 ausgewählt werden.

**Tabelle 8** – Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen für dreipolige Kurzschlüsse (gG-Sicherungen), Basis: berechnete und ermittelte direkter Einwirkenergien

Übersicht der Einhaltung der Schutzklassen in Abhängigkeit des Bemessungsstromes (direkte Einwirkenergie)													
		gG – Sicherungseinsätze $I_{nSi}$ / A											
		NH00						NH1			NH2		
		50	63	80	100	125	160	200	224	250	315	355	400
1 kA $\leq I''_{K3} < 2,3$ kA	Klasse 1	+	+	+	+	+							
	Klasse 2	+	+	+	+	+							
2,3 kA $\leq I''_{K3} < 4$ kA	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+					
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+				
4 kA $\leq I''_{K3} < 5$ kA	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
5 kA $\leq I''_{K3} < 6$ kA	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
6 kA $\leq I''_{K3} < 7$ kA	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
$I''_{K3} \geq 7$ kA	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

**Legende**    +    Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

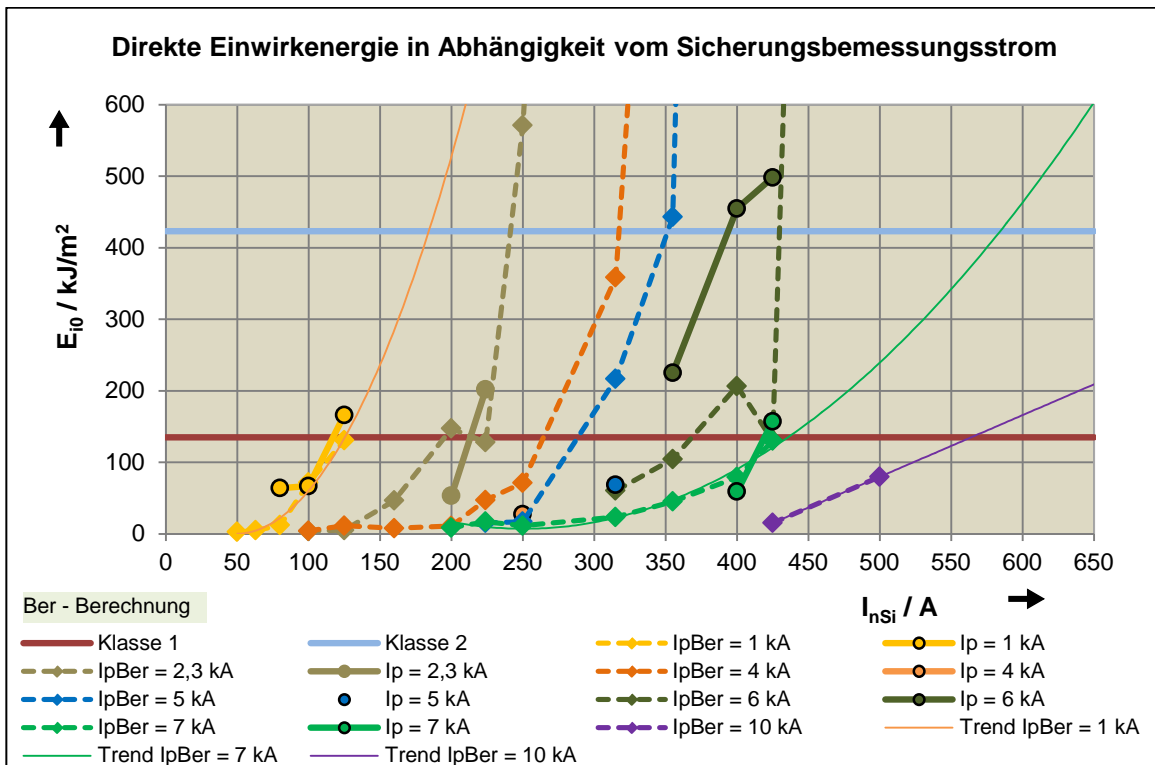
Aus Bild 10 und Bild 11 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätzen und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

- 1 kA / 80 A, 100 A, 125 A
- 2,3 kA / 200 A
- 4 kA / 250 A
- 5 kA / 315 A
- 6 kA / 315 A
- 7 kA 400 A

und die Klasse 2

- 1 kA / 125 A
- 2,3 kA / 224 A
- 4 kA / 315 A

- 5 kA / 315 A
  - 6 kA / 355 A
  - 7 kA / 400 A
- eingehalten wird.

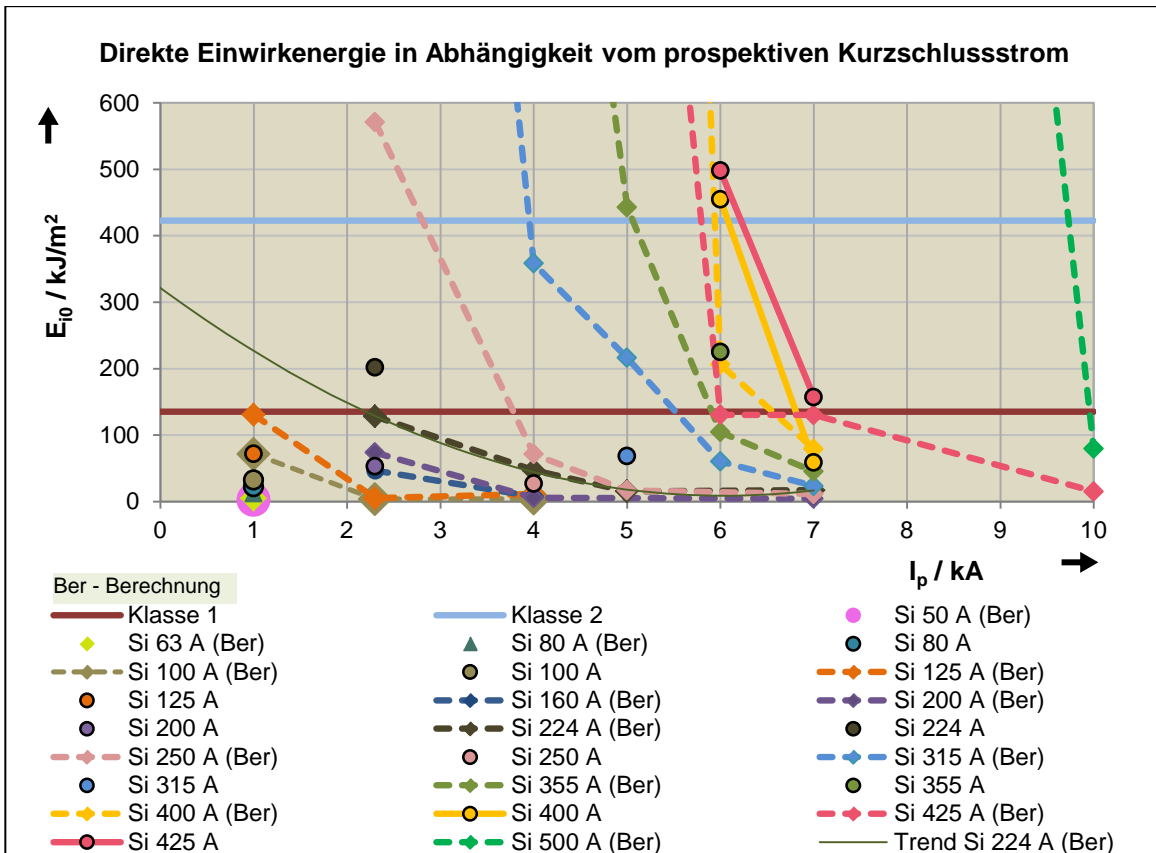


**Bild 10** – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Auch bei den direkten Einwirkenergien sind relativ große Abweichungen der Kurvenverläufe bei den prospektiven Kurzschlussströmen 5 kA (blau) und 6 kA (dunkelgrün) zwischen hochgerechneten und ermittelten Werten im Bild 10 erkennbar.

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen





**Bild 11** - Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Für die prospektiven Kurzschlussströme 1 kA (8), 7 kA (9) und 10 kA (10) im Bild 10 und den Sicherungsbemessungsstrom von 100 A (11) sind im Bild 11 zur Abschätzung der Kurvenverläufe Trendlinien bestimmt worden:

$$W_{LB1kA} = 0,0231 \cdot I_{nSi}^2 - 2,2656 \cdot I_{nSi} + 55,598 \quad (8)$$

$$W_{LB7kA} = 0,0037 \cdot I_{nSi}^2 - 1,8774 \cdot I_{nSi} + 242,58 \quad (9)$$

$$W_{LB10kA} = 0,8613 \cdot I_{nSi} - 350,87 \quad (10)$$

$$W_{LBSi100A} = 8,5763 \cdot I_p^2 - 103,61 \cdot I_p + 321,57 \quad (11)$$

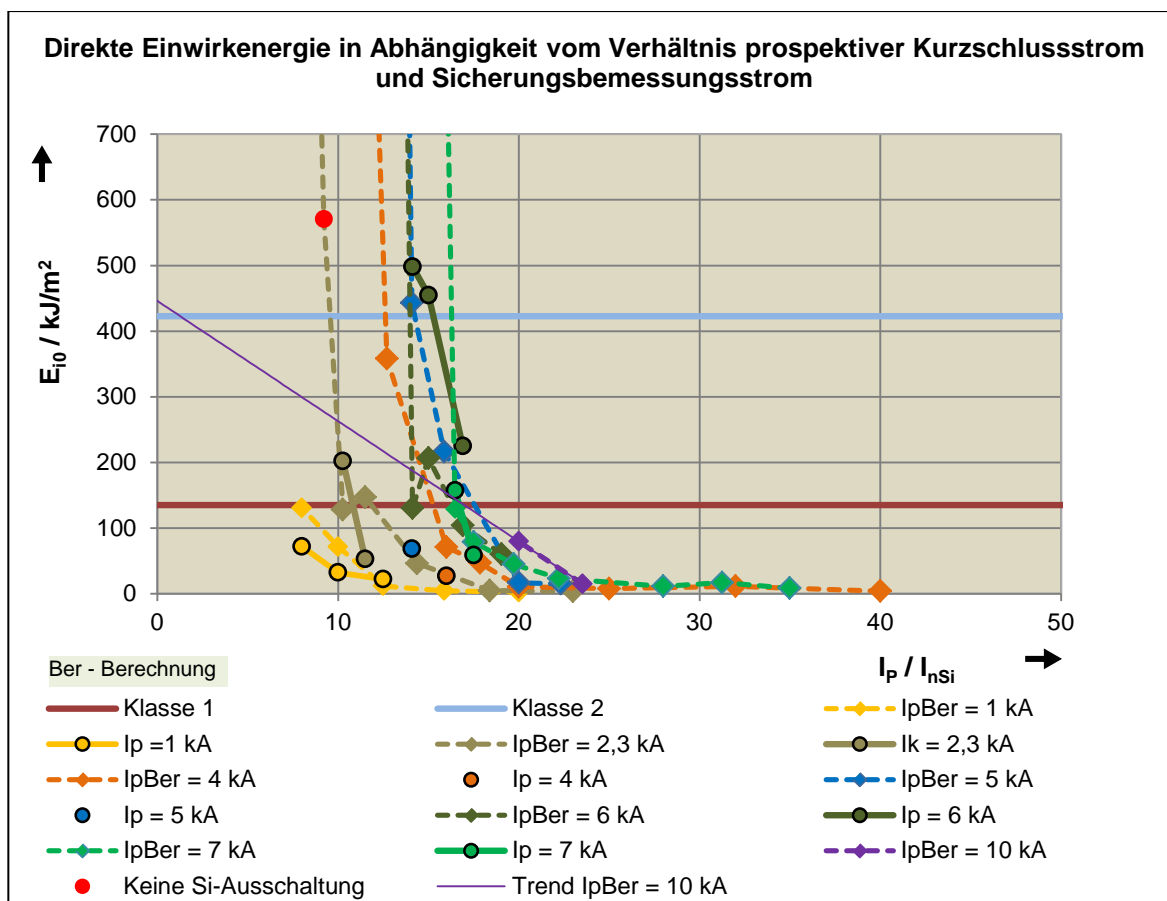
## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Aus den im Bild 12 dargestellten Verhältnissen der prospektiven Kurzschlussströme und Sicherungsbemessungsströme wurde der höchste Wert (Quotient) für die PSAgS-Klasse 1 (135 kJ/m<sup>2</sup>) und die PSAgS-Klasse 2 (423 kJ/m<sup>2</sup>) ermittelt und als Mindestüberstromfaktor festgelegt.

Ermittelte Mindestüberstromfaktoren:

Klasse 1	$I_P / I_{nSi} = 20$
Klasse 2	$I_P / I_{nSi} = 19$

Mit (7) kann der maximale Sicherungsbemessungsstrom (grobe Einschätzung) für einen dreipoligen prospektiven Kurzschlussstrom bei Standardexpositionsbedingungen bestimmt werden.



**Bild 12** – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiven Kurzschlussstrom und Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

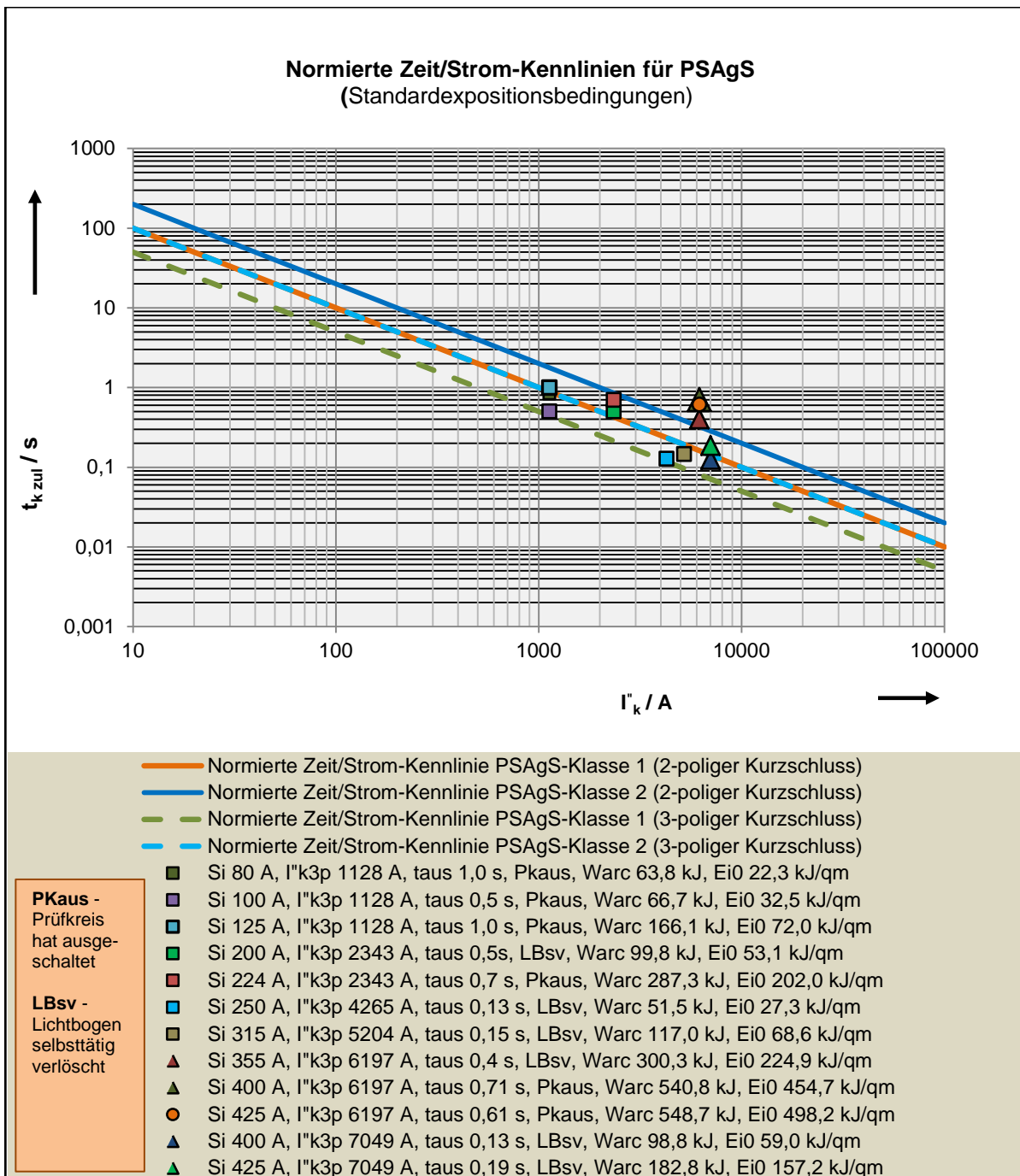
## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

### 3.1.3 Normierte Zeit/Strom-Kennlinien PSAgS

Im Bild 11 sind die normierten Zeit/Strom-Kennlinien für PSAgS-Klassen 1 und 2 bei Standardexpositionsbedingungen für zweipolige Kurzschlüsse und für dreipolige Kurzschlüsse mit den ermittelten Werten aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen dargestellt.

Anmerkung: Die Darstellung der ermittelten Werte erfolgt auf der Grundlage der Energierelation zwischen den Messwerten für einen 3-poligen Kurzschluss und einen 2-poligen Kurzschluss mit jeweils dem gleichen prospektiven Kurzschlussstrom (Das ist damit **keine** Fehlerort bezogene Betrachtung, bei der bei gleichem Fehlerort bei 3-poligem Kurzschluss der 1,154-fache Strom gegenüber dem 2-poligen Kurzschluss fließen würde).

Bei den Kennlinien für zweipolige Kurzschlüsse handelt es sich um die Werte, die in den früheren Untersuchungen [1] aus den tatsächlichen Messwerten mit Sicherheitsabstand festgelegt wurden. Die normierten Kennlinien für dreipolige Kurzschlüsse wurden mit dem Energieverhältnis Lichtbogenenergie 3-polig zu Lichtbogenenergie 2-polig (Basis: gleiche Ströme) berechnet.



**Bild 13** – Normierte Zeit/Strom-Kennlinie für PSAgS für zweipolige Kurzschlüsse und dreipolige Kurzschlüsse mit den Messwerten der Lichtbogenenergie

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Aus Bild 13 ist erkennbar, dass die Lichtbogenenergiewerte der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen die Bereiche der Zeit/Strom-Kennlinien zweipoliger Kurzschlüsse annähernd einhalten.

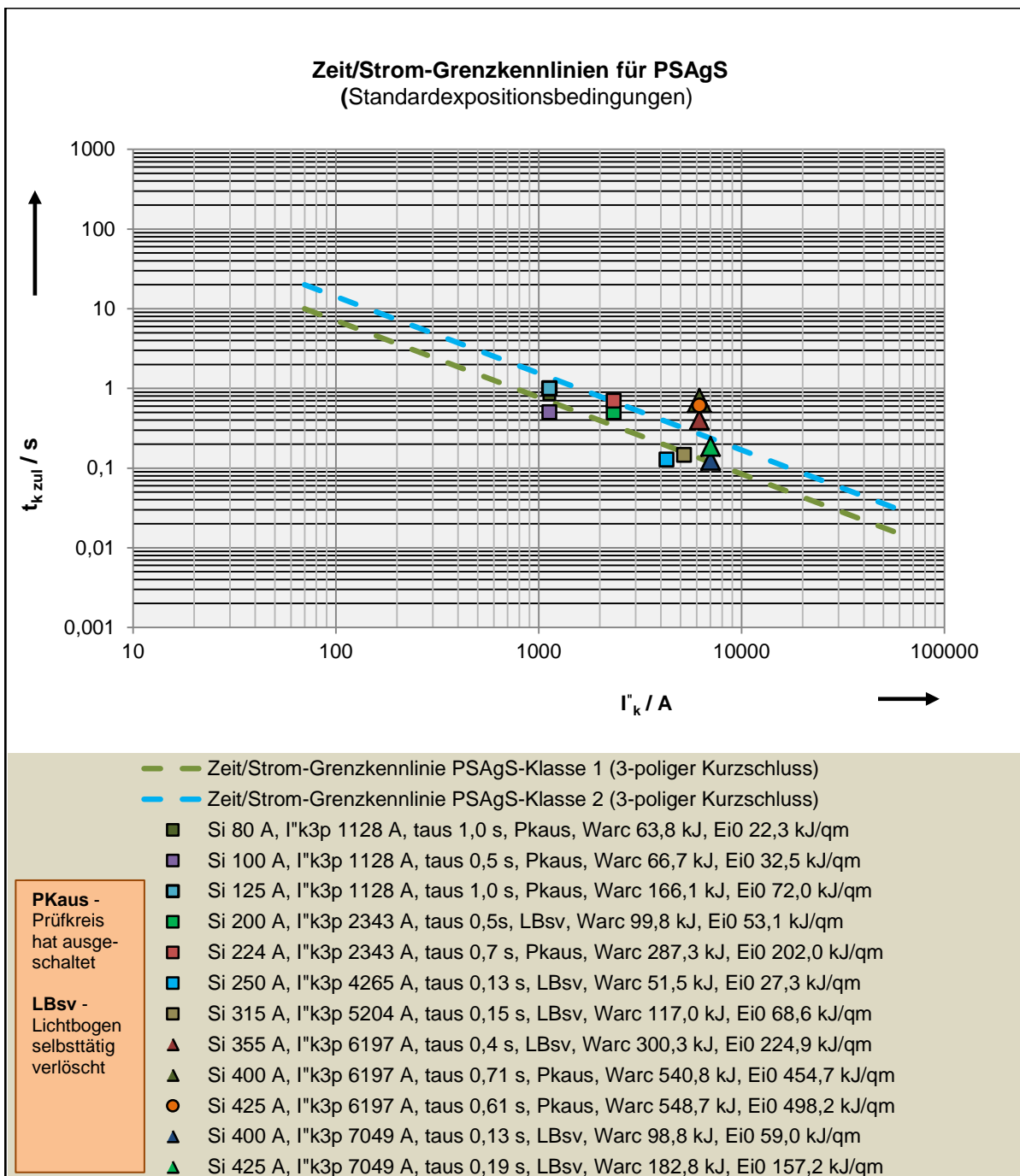
Eine zuverlässige Aussage zur Einhaltung der PSAgS-Klassen 1 und 2 ist infolge der unterschiedlichen Ausschaltvarianten bei den Störlichtbogenprüfungen eines Sicherungsbemessungsstromes derzeit noch nicht erreicht. Es sind weitere Untersuchungen und Störlichtbogenprüfungen mit längeren Prüfkreis Ausschaltzeiten notwendig, um die bisher erzielten Ergebnisse zu bestätigen und sichere Aussagen zu normierten Kennlinien für dreipolige Kurzschlüsse ableiten zu können.

Die Lichtbogenenergiewerte wurden auch mit den Zeit/Strom-Grenzkennlinien nach (normierte Zeit/Strom-Kennlinien ohne Sicherheitsabstand) analysiert. Die Zeit/Strom-Grenzkennlinien [1] wurden aus den Lichtbogenenergiewerten der zweipoligen Störlichtbogenprüfungen ermittelt.

In Tabelle 9 sind die Schnittpunkte der Zeit/Strom-Grenzkennlinien aufgeführt.

**Tabelle 9** - Schnittpunkte der Zeit/Strom-Grenzkennlinien PSAgS \_Klasse 1 Und PSAgS-Klasse 2 für dreipolige Kurzschlüsse

Schnittpunkte der Zeit/Strom-Grenzkennlinien für PSAgS				
PSAgS-Klasse	Kurzschlussstrom	Ausschaltzeit	Kurzschlussstrom	Ausschaltzeit
	$I_k'' / A$	$t_{k\,zul} / s$	$I_k'' / A$	$t_{k\,zul} / s$
1	70	20	60 000	0,03
2	70	40	60 000	0,06



**Bild 14** – Zeit/Strom-Grenzkennlinien für PSAgS für dreipolige Kurzschlüsse mit den Messwerten der Lichtbogenenergie

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Im Bild 14 sind die Zeit/Strom-Grenzkennlinien für dreipolige Kurzschlüsse mit den Messwerten der Lichtbogenenergie dargestellt. Die Sicherungen 80 A und 200 A besitzen die Energiewerte für die PSAgS-Schutzklasse 1, befinden sich aber aufgrund der Ausschaltzeiten außerhalb der Zeit/Strom-Grenzkennlinie für die PSAgS-Schutzklasse 1. Die Sicherung 355 A hat die Energiewerte für die PSAgS-Schutzklasse 2 und liegt auch außerhalb der der Zeit/Strom-Grenzkennlinie für die PSAgS-Schutzklasse 2. Alle anderen Sicherungen befinden sich in den ermittelten Bereichen der PSAgS-Klassen.

Eine eindeutige Aussage ist auch bei der Analyse mit den Zeit/Strom-Grenzkennlinien nicht möglich ohne weitere Untersuchungen möglich.

Deutlich erkennbar ist, dass der Sicherheitsabstand der normierten Zeit/Strom-Kennlinien für die Bewertung der dreipoligen Kurzschlüsse entscheidende Auswirkungen hat.

Die Auswirkungen des Sicherheitsabstandes sind auch bei der Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit mit der Geradengleichung und der Anwendung des Kennlinienfaktors  $f_{KL}$  feststellbar. In Tabelle 10 sind die Kennlinienfaktoren der normierten Zeit/Strom-Kennlinien und der Zeit/Strom-Grenzkennlinien gegenübergestellt.

**Tabelle 10** – Kennlinienfaktoren aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen ermittelt

Kennlinienfaktor $f_{KL}$ für Geradengleichungen		
PSAgS-Klasse	Normierte Zeit/Strom-Kennlinien (mit Sicherheitsabstand)	Zeit/Strom-Grenzkennlinien (ohne Sicherheitsabstand)
1	1000	1300
2	2000	3600

Geradengleichung zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit unter Berücksichtigung beliebiger Expositionsbedingungen.

$$t_{kzul} = f_{KL} \cdot \frac{\left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2}{I''_{kxp}}$$

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Die Auswahl des Kennlinienfaktors für die PSAgS-Klasse erfolgt nach Tabelle 10.

$t_{k\ zul}$  zulässige Ausschaltzeit

$f_{KL}$  Kennlinienfaktor

$$f_{KL} = t_{k\ zul} \cdot I_k''$$

$I_{kxp}''$  zweipoliger Kurzschlussstrom/dreipoliger Kurzschlussstrom

$a$  Arbeitsabstand

Das nachfolgende Beispiel soll zeigen, dass bei einem prospektiven Kurzschlussstrom von 5000 A eine Abweichung der ermittelten zulässigen Ausschaltzeiten zwischen normierter Zeit/Strom-Kennlinie und Zeit/Strom-Grenzkennlinie von ca. 23 % besteht.

Beispiel:

Berechnung mit dem Kennlinienfaktor der **normierten Zeit/Strom-Kennlinie**  
(zweipolige Kurzschlüsse)

Kurzschlussstrom : 5000 A

Kennlinienfaktor: 1000

Expositionsbedingungen

$$t_{k\ zul} = f_{KL} \cdot \frac{\left(\frac{a}{300\ mm}\right)^2}{I_{kxp}''} = 1000 \cdot \frac{\left(\frac{300\ mm}{300\ mm}\right)^2}{5000\ A} = 0,2 \quad \text{zulässige Ausschaltzeit } 0,2\ s$$

Berechnung mit dem Kennlinienfaktor der **Zeit/Strom-Grenzkennlinie**  
(zweipolige Kurzschlüsse)

Kurzschlussstrom : 5000 A

Kennlinienfaktor: 1300

Expositionsbedingungen

$$t_{k\ zul} = f_{KL} \cdot \frac{\left(\frac{a}{300\ mm}\right)^2}{I_{kxp}''} = 1600 \cdot \frac{\left(\frac{300\ mm}{300\ mm}\right)^2}{5000\ A} = 0,26 \quad \text{zulässige Ausschaltzeit } 0,26\ s$$

---

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen



## 3.2 gTr - Sicherungen

### 3.2.1 Lichtbogenenergie

Für die gTr – Sicherungen sind in Tabelle 11 die ermittelten Lichtbogenenergien aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (rechte Seite) und die hochgerechneten Lichtbogenenergien dreipoliger Kurzschlüsse (linke Seite) aufgeführt.

**Tabelle 11** – Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechneten Lichtbogenenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten Lichtbogenenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (gTr-Sicherungen)

Lichtbogenenergie $W_{arc}$											
Berechnete Lichtbogenenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme					$S_n$	$I_{rat}$	Ermittelte Lichtbogenenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme				
4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA			4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA
<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>		<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	
288	348	298	208	28	250 kVA	361 A	403,5	467,3	420,7	232,1	-
-	1300	1600	1092	44	315 kVA	455 A	-	-	-	-	-
-	1240	1056	-	542	400 kVA	577 A	-	-	-	-	-

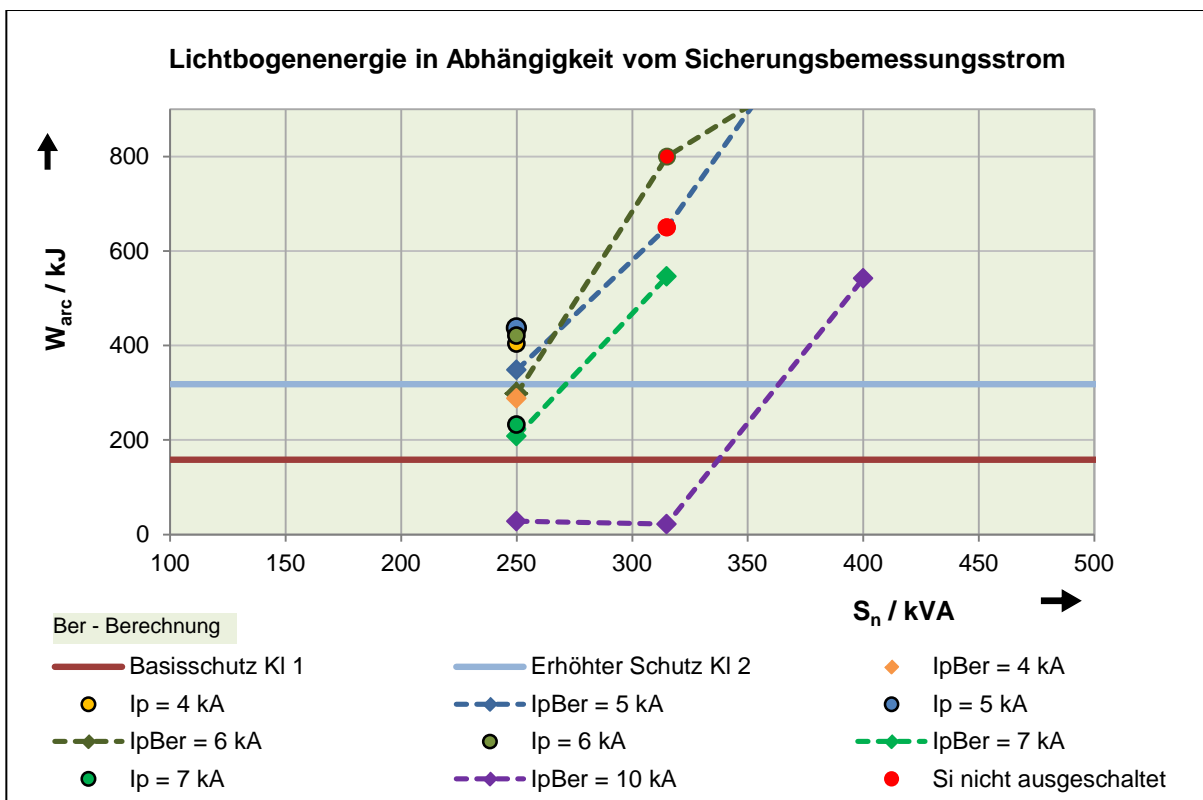
**Legende:**  Klasse 1       Klasse 2       >Klasse 1 und 2

Tabelle 12 zeigt, dass für die Einhaltung der PSAgS-Klasse 2 für Standardexpositionsbedingungen die Sicherung 250 kVA nur bei einem prospektiven Kurzschlussstrom  $\geq 7$  kA ausgewählt werden kann. Bei diesem Mindestkurzschlussstrom würde die Klasse 2 auch bei Einsatz von gTr-Sicherungen kleinerer Bemessungsleistung Schutz gewährleisten, allerdings treten bei Transformatoren kleinerer Bemessungsscheinleistung praktisch keine ausreichend großen Kurzschlussströme mehr auf.

**Tabelle 12** – Zusammenfassung berechneter und ermittelter Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse für die Einhaltung der Schutzklassen (gTr-Sicherungen)

Übersicht der Einhaltung der Kriterien für die Schutzklassen (Lichtbogenenergie)		
		gTr – Sicherungseinsätze $S_n (I_{rat})$
		NH3
		250 kVA (361 A)
$4 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 5 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	
$5 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 6 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	
$6 \text{ kA} \leq I''_{K3} \leq 7 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	
$I''_{K3} \geq 7 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	+

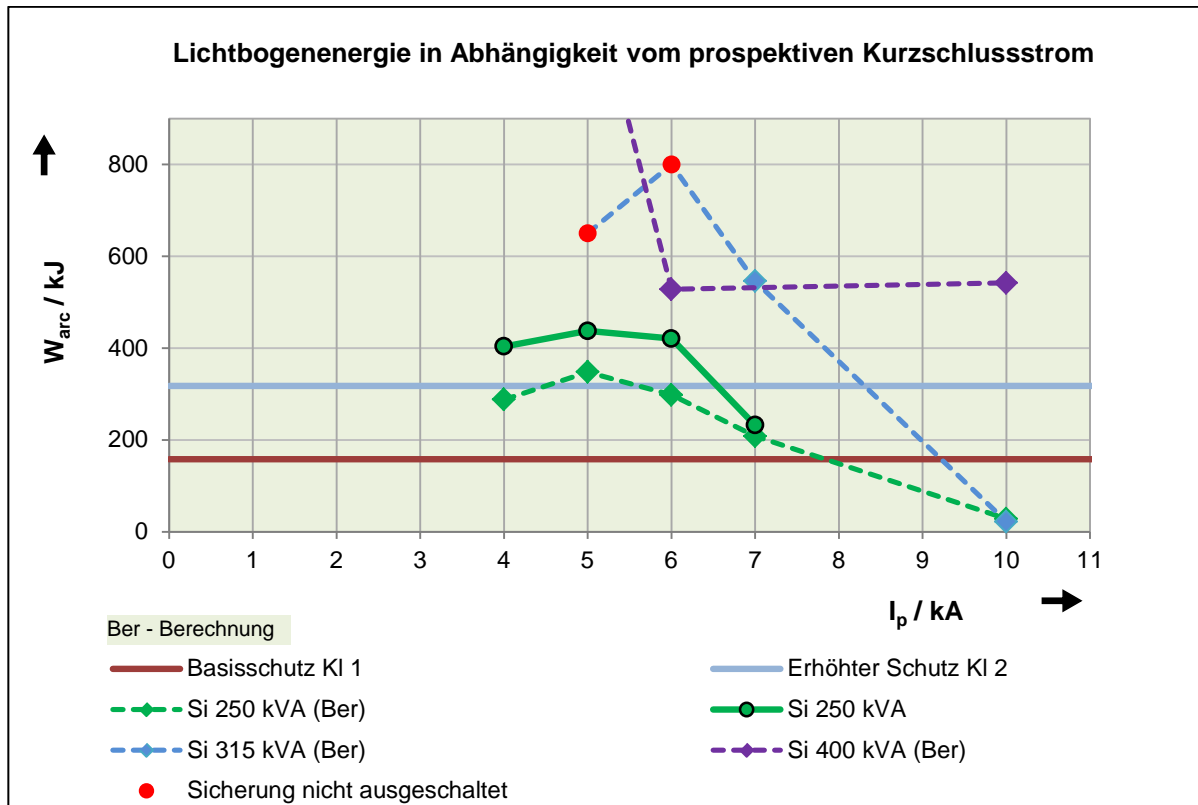
**Legende**    +    Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2



**Bild 15** - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Auch aus Bild 15 und Bild 16 ist erkennbar, dass bei einem Sicherungseinsatz 250 kVA und prospektivem Kurzschlussstrom von 7 kA die Klasse 2 eingehalten wird.



**Bild 16** - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

### 3.2.2 Direkte Einwirkenergie

Für die gTr – Sicherungen sind in Tabelle 13 die ermittelten direkten Einwirkenergien aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (rechte Seite) und die hochgerechneten Lichtbogenenergien dreipoliger Kurzschlüsse (linke Seite) aufgeführt.

**Tabelle 13** – Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechnete direkte Einwirkenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten direkten Einwirkenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (gTr-Sicherungen)

Direkte Einwirkenergie $E_{i0}$											
Berechnete direkte Einwirkenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme					$S_n$	$I_{rat}$	Ermittelte direkte Einwirkenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme				
4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA			4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA
$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$			$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	
259,6	257,4	242,0	186,4	14,8	250 kVA	361 A	370,5	485,3	366,4	193,8	
-	582,0	1088,6	659,2	20,4	315 kVA	455 A	-	-	-	-	
-	2740,0	2500,0	-	1214,0	400 kVA	577 A	-	-	-	-	

**Legende:**  Klasse 1       Klasse 2       >Klasse 1 und 2

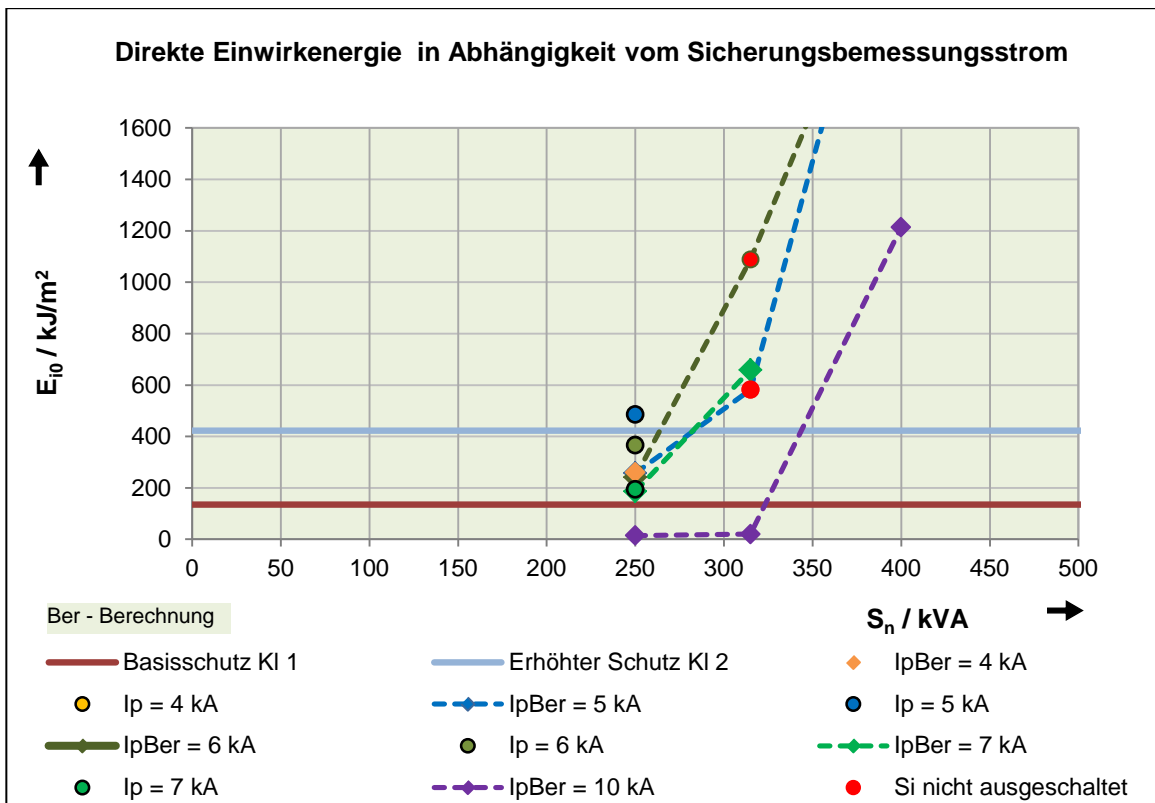
Die Tabelle 14 zeigt, dass gemäß der Messwerte für die Einhaltung der PSAgS-Klasse 2 für Standardexpositionsbedingungen nur die Sicherung 250 kVA bei prospektiven Kurzschlussströmen von 4 kA...5 kA und  $\geq 6$  kA ausgewählt werden kann.

**Tabelle 14** – Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen berechneter und ermittelter direkter Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlüsse (gTr-Sicherungen)

Übersicht der Einhaltung der Kriterien für die Schutzklassen (direkte Einwirkenergie)		
		gTr – Sicherungseinsätze $S_n$ ( $I_{rat}$ )
		NH3
		250 kVA (361 A)
$4 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 5 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	+
$5 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 6 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	
$6 \text{ kA} \leq I''_{K3} \leq 7 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	+
$I''_{K3} \geq 7 \text{ kA}$	Klasse 1	
	Klasse 2	+

**Legende**  + Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

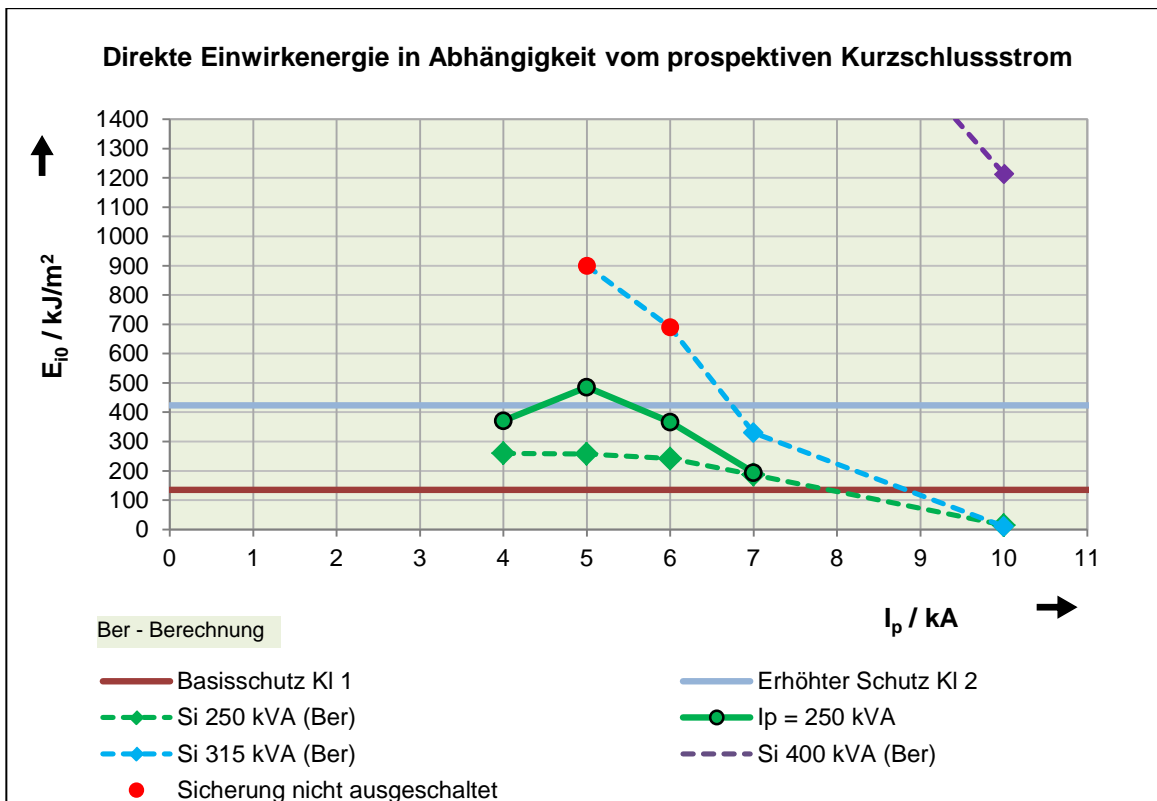


**Bild 17** – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

Aus Bild 17 und Bild 18 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätze und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Scheinleistung) die Klasse 2

- 4 kA / 250 kVA
- 6 kA / 250 kVA
- 7 kA / 250 kVA

eingehalten wird.



**Bild 18** – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

### 3.3 Arbeitsschutz-Sicherungen

#### 3.3.1 Lichtbogenenergie

Für die Arbeitsschutz – Sicherungen sind in Tabelle 15 die ermittelten Lichtbogenenergien aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (rechte Seite) und die hochgerechneten Lichtbogenenergien dreipoliger Kurzschlüsse (linke Seite) aufgeführt.

**Tabelle 15** – Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechneten Lichtbogenenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten Lichtbogenenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (Arbeitsschutz-Sicherungen)

Lichtbogenenergie $W_{arc}$								
Berechnete Lichtbogenenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme				$I_{nSi}$	Ermittelte Lichtbogenenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme			
1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA		1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA
<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>		<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>	<i>kJ</i>
3,2	-	-	-	160 A	-	-	-	-
16,4	-	-	-	200 A	-	-	-	-
159,2	6,2	-	3,0	250 A	112,7	-	-	-
-	8,0	-	5,6	315 A	-	-	-	-
-	19,6	11,6	10,4	350 A	-	-	-	-
-	117,2	14,0	10,6	400 A	-	77,3	-	-
-	1787,4	43,2	17,2	500 A	-	-	39,9	74,5

**Legende:**  Klasse 1       Klasse 2       >Klasse 1 und 2

Zur Einhaltung der PSAGS-Klasse 1 und PSAGS-Klasse 2 bei dreipoligen Kurzschlüssen können die erforderlicher Sicherungsbemessungsströme nach Tabelle 16 ausgewählt werden.

**Tabelle 16** – Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen berechneter und ermittelter Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse (Arbeitsschutz-Sicherungen)

Übersicht der Einhaltung der Schutzklassen in Abhängigkeit des Bemessungsstromes (Lichtbogenenergie)								
		Arbeitsschutz – Sicherungseinsätze $I_{nSi}$ / A						
		NH1		NH2			NH3	
		160	200	250	315	355	400	500
$1 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 2,3 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+				
	Klasse 2	+	+	+				
$2,3 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 4 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	
$4 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 5 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+
$I''_{K3} \geq 5 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+

**Legende**  + Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

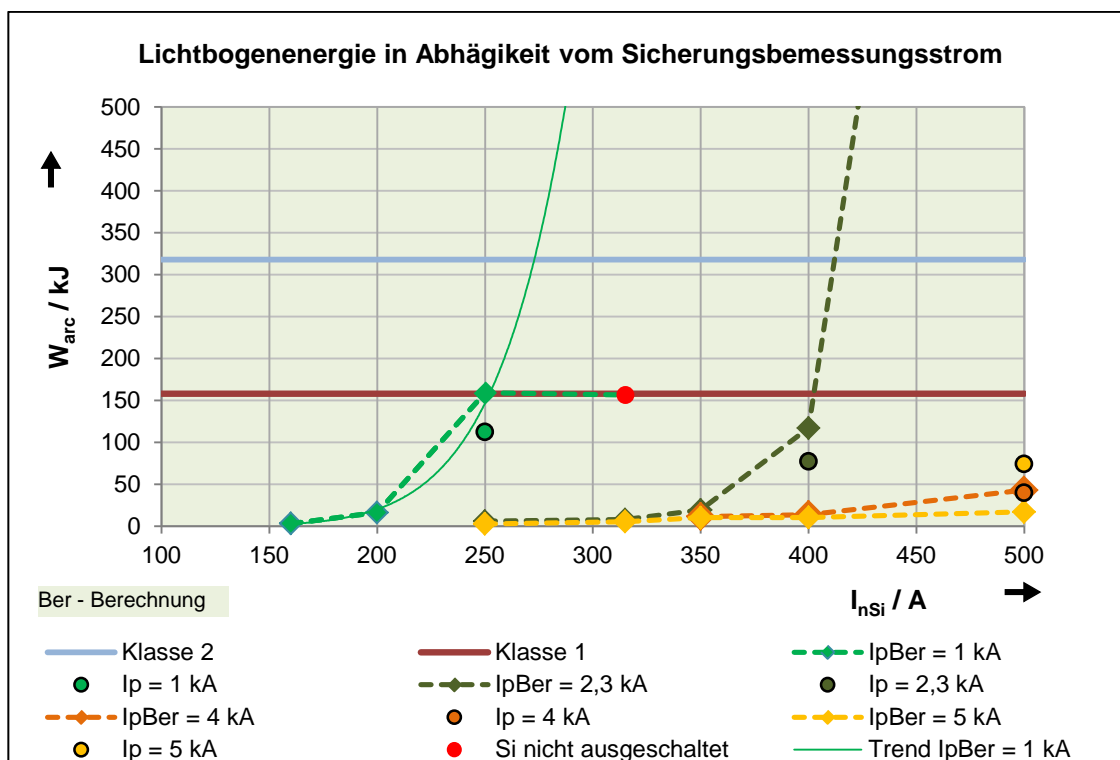
## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

In das Bild 19 wurde eine Trendlinie für den prospektiven Kurzschlussstrom von 1 kA (12) und in das 20 Trendlinien für Sicherungsbemessungsströme 400 A (13) und 250 A (14) hinzugefügt.

$$W_{LBS4kA} = 1E-23 \cdot I_p^{10,337} \quad (12)$$

$$W_{LBSi250A} = 29,127 \cdot I_p^2 - 213,81 \cdot I_p + 343,88 \quad (13)$$

$$W_{LBSi400A} = 21,224 \cdot I_p^2 - 194,42 \cdot I_p + 452,09 \quad (14)$$



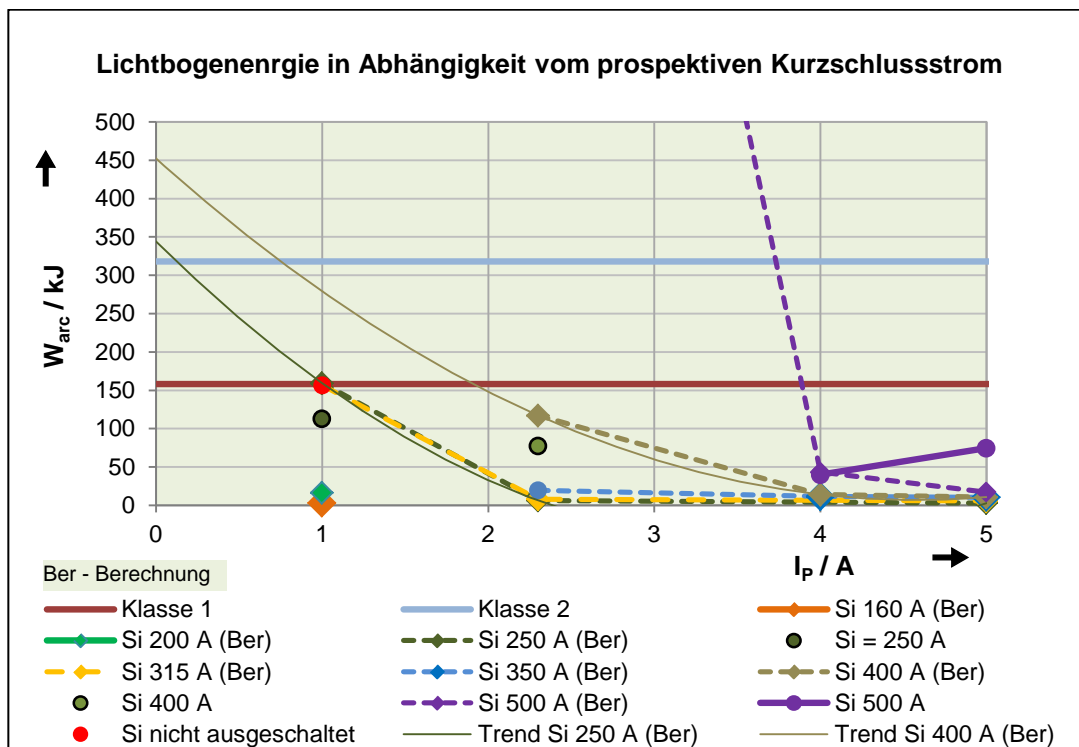
**Bild 19** - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)



Aus Bild 19 und 20 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätzen und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

- 1 kA / 250 A
- 2,3 kA / 400 A
- 4 kA / 500 A
- 5 kA / 500 A

eingehalten wird.



**Bild 20** - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

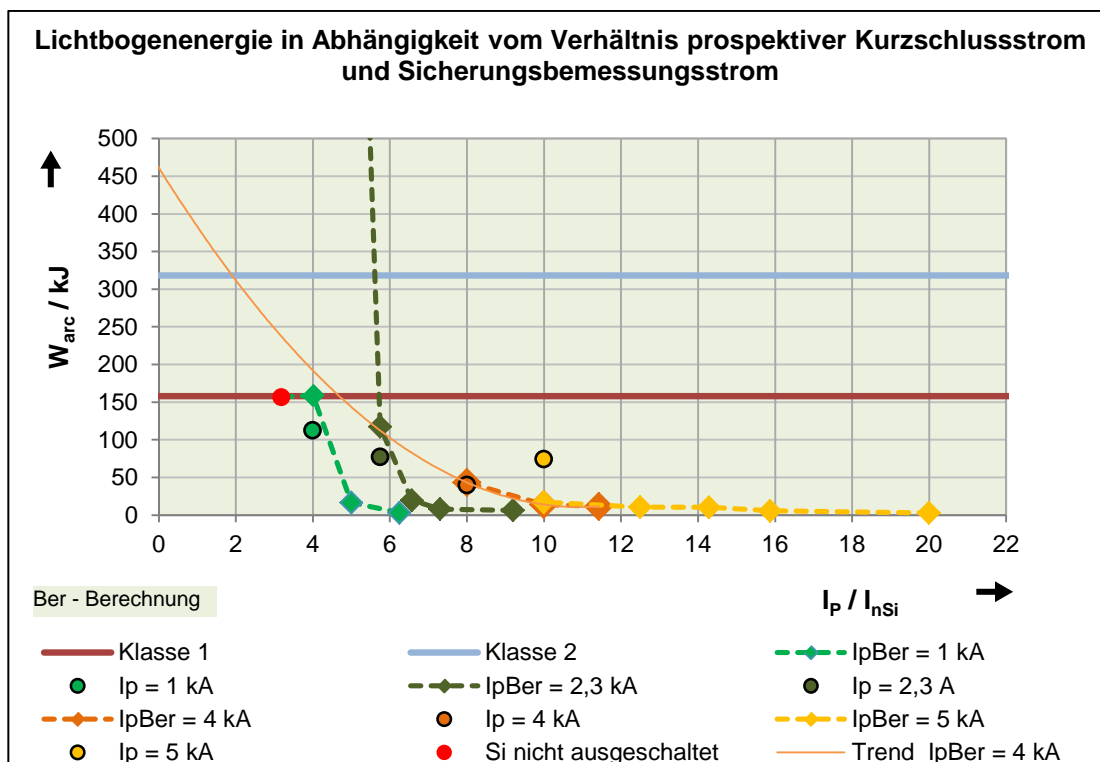
Aus den im Bild 21 dargestellten Verhältnissen der prospektiven Kurzschlussströme und Sicherungsbemessungsströme wurde der höchste Wert (Quotient) für die PSAgS-Klasse 1 (158 kJ) und die PSAgS-Klasse 2 (318 kJ) ermittelt und als Mindestüberstromfaktor festgelegt.

Ermittelte Mindestüberstromfaktoren:

Klasse 1  $I_P / I_{nSi} = 8$

Klasse 2  $I_P / I_{nSi} = 8$

Mit (7) kann der maximale Sicherungsbemessungsstrom (grobe Einschätzung) für einen dreipoligen prospektiven Kurzschlussstrom bei Standardexpositionsbedingungen bestimmt werden.



**Bild 21** - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiver Kurzschlussstrom zu Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

### 3.3.2 Direkte Einwirkenergie

In der Tabelle 17 sind die ermittelten direkten Einwirkenergien aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (rechte Seite) und die auf dreipolige Kurzschlüsse hochgerechneten direkten Einwirkenergien (linke Seite) Arbeitsschutz-Sicherungen angegeben.

**Tabelle 17** – Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechnete direkten Einwirkenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten direkten Einwirkenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (Arbeitsschutz-Sicherungen)

Direkte Einwirkenergie $E_{i0}$								
Berechnete direkte Einwirkenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme				$I_{nSi}$	Ermittelte direkte Einwirkenergien für dreipolige prospektive Kurzschlussströme			
1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA		1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA
$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$		$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$	$\text{kJ/m}^2$
14,0	-	-	-	160 A	-	-	-	-
7,4	-	-	-	200 A	-	-	-	-
63,8	2,8	-	2,2	250 A	49,1	-	-	-
-	3,6	-	3,4	315 A	-	-	-	-
-	6,0	5,2	4,4	350 A	-	-	-	-
-	79,0	6,8	3,8	400 A	-	25,1	-	-
-	2188,8	21,2	8,2	500 A	-	-	23,0	32,7

**Legende:**  Klasse 1       >Klasse 1 und 2

Zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2 bei dreipoligen Kurzschlüssen können die erforderlichen Sicherungs Bemessungsströme nach Tabelle 18 ausgewählt werden.

**Tabelle 18** – Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen berechneter und ermittelter direkter Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlüsse (Arbeitsschutz-Sicherungen)

		Arbeitsschutz – Sicherungseinsätze $I_{nSi}$ / A						
		NH1		NH2			NH3	
		160	200	250	315	355	400	500
$1 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 2,3 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+				
	Klasse 2	+	+	+				
$2,3 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 4 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	
$4 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 5 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+
$I''_{K3} \geq 5 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+

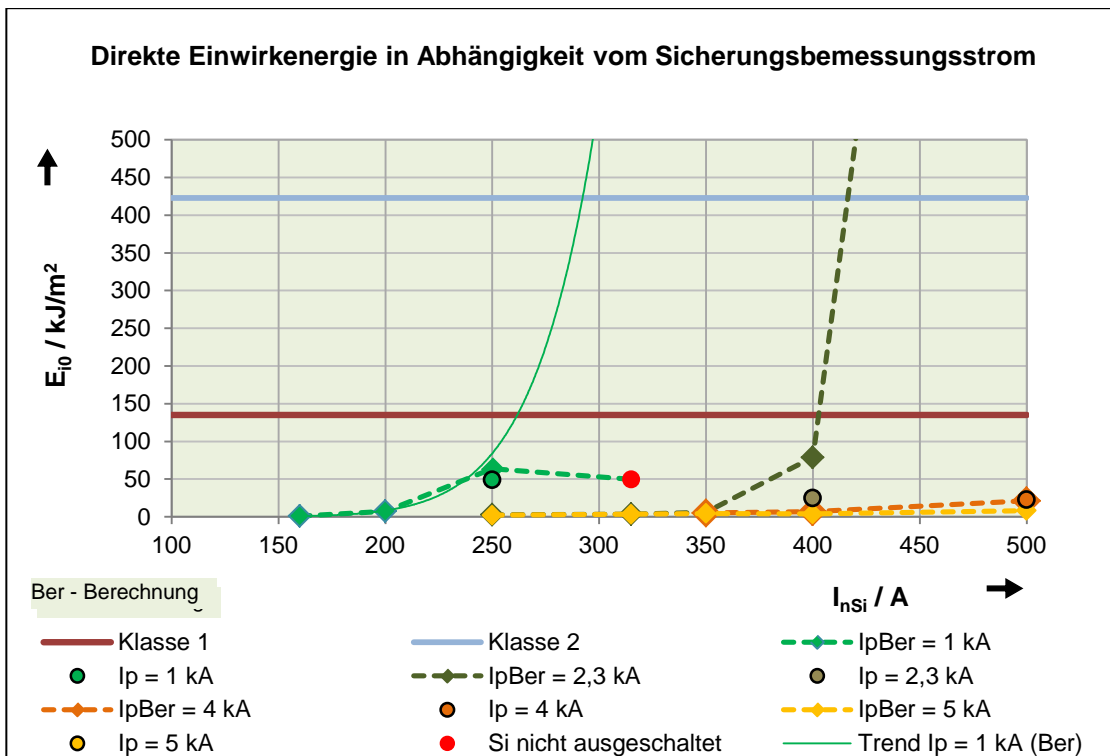
**Legende**    +    Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

Im Bild 22 wurde eine Trendlinie für den prospektiven Kurzschlussstrom von 1 kA (15) und im Bild 23 Trendlinien für Sicherungsbemessungsströme 400 A (16) und 315 A (17) hinzugefügt.

$$W_{LBS4kA} = 1E-23 \cdot I_p^{10,337} \quad (15)$$

$$W_{LBSi315A} = 46,722 \cdot I_p^2 - 358,18 \cdot I_p + 626,46 \quad (16)$$

$$W_{LBSi400A} = 14,619 \cdot I_p^2 - 134,57 \cdot I_p + 311,179 \quad (17)$$

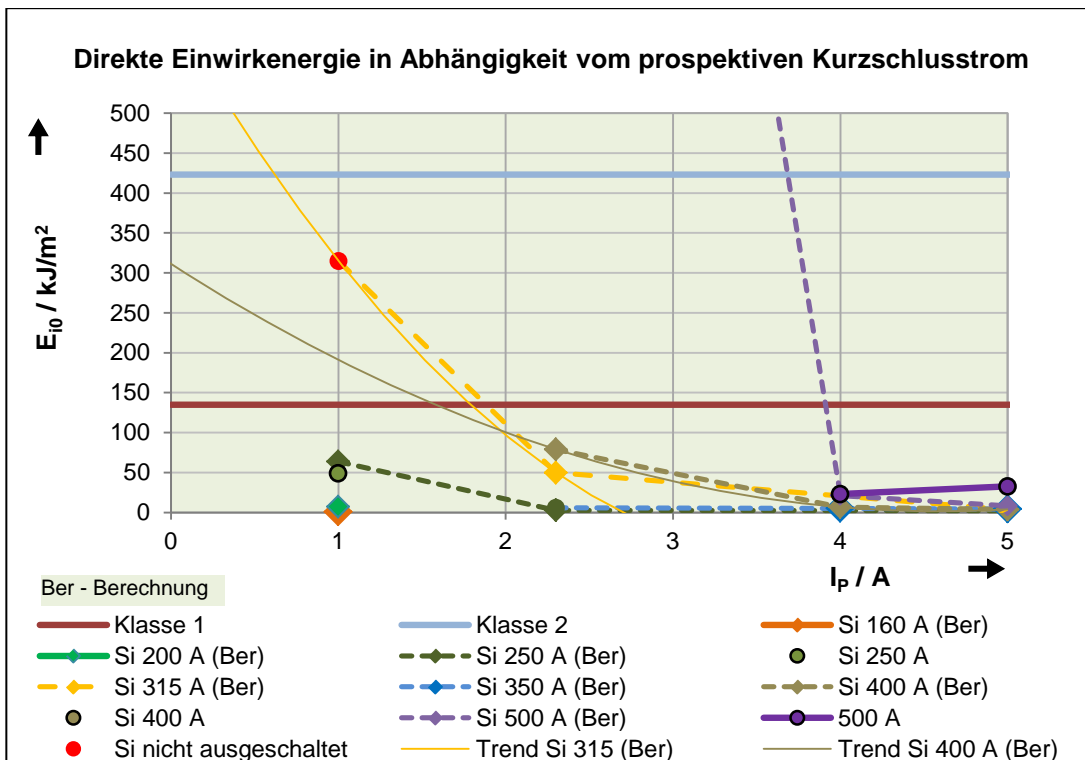


**Bild 22** – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Aus Bild 22 und Bild 23 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätzen und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

- 1 kA / 250 A
- 2,3 kA / 400 A
- 4 kA / 500 A
- 5 kA / 500 A

eingehalten wird.



**Bild 23** – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Aus den im Bild 24 dargestellten Verhältnissen der prospektiven Kurzschlussströme zu den Sicherungsbemessungsströmen wurde der höchste Wert (Quotient) für die PSAGS-Klasse 1 ( $135 \text{ kJ/m}^2$ ) und die PSAGS-Klasse 2 ( $423 \text{ kJ/m}^2$ ) ermittelt und als Mindestüberstromfaktor festgelegt.

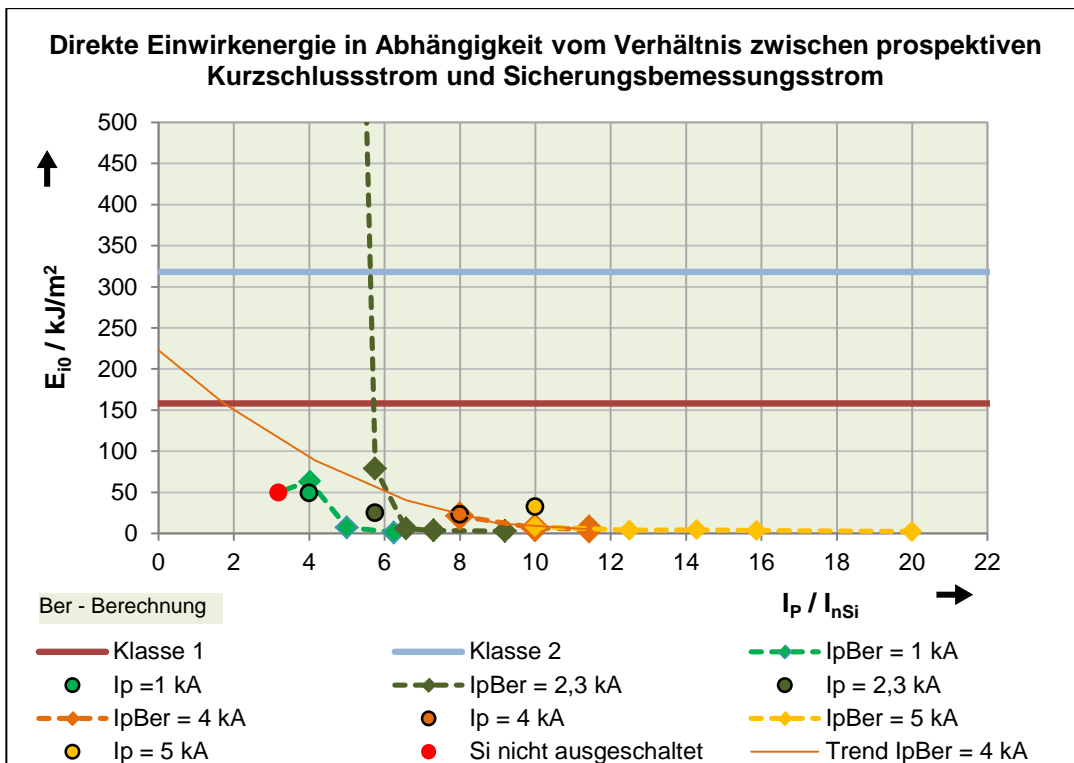
Ermittelte Mindestüberstromfaktoren:

Klasse 1  $I_p / I_{nSi} = 8$

Klasse 2  $I_p / I_{nSi} = 8$

Mit (7) kann der maximale Sicherungsbemessungsstrom (grobe Einschätzung) für einen dreipoligen prospektiven Kurzschlussstrom bei Standardexpositionsbedingungen bestimmt werden.

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen



**Bild 24** – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiver Kurzschlussstrom zu Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Für die Arbeitsschutzsicherungen zeigt sich, dass die Energien (elektrische Lichtbogenenergie und Einwirkenergie) grundsätzlich innerhalb der Grenze der Klasse 1 liegen und damit Schutz mit PSAGs der Klasse 1 grundsätzlich erreicht wird.

## 4 Praktische Anwendungsregeln zur Einhaltung der Schutzpegel bei dreipoligen Kurzschlüssen und zur Wahl der PSAgS oder der Vorsicherung

Die Anwendungshilfsmittel und Regeln wurden so ausgerichtet, dass die Kurzschlussströme jeweils als prospektive, vom Störlichtbogen unbeeinflusste Kurzschlussströme (metallischer Kurzschluss) anzusetzen sind. Diese Ströme werden in den Berechnungsverfahren und Berechnungsprogrammen ermittelt und stehen den Anwendern damit in der Regel zur Verfügung (die tatsächlich fließenden Lichtbogenkurzschlussströme besitzen kleinere Werte, die der Anwender in der Regel schwer einschätzen kann). Der Anwender benutzt also als Ergebnis der Kurzschlussstromberechnung den Anfangskurzschlusswechselstrom  $I''_k$ , der im Falle von generatorfernen Kurzschlüssen auch identisch ist mit dem Dauerkurzschlussstrom und Ausschaltstrom.

Die Anwendungsregeln sind für Standardexpositionsbedingungen gültig.

Standardexpositionsbedingungen:

Arbeitsabstand	$a = 300 \text{ mm}$
Transmissionsfaktor nach BGI 5188	$k_T = 1$ (kleines Anlagenvolumen)

### 4.1 Mindestüberstromfaktor

Eine grobe Bestimmung des maximal möglichen Sicherungsbemessungsstroms kann mit Hilfe des Mindestüberstromfaktors  $k_{\dot{U} \text{ mind}}$  und des prospektiven Kurzschlussstromes  $I''_{k \text{ xp}}$  für Standardexpositionsbedingungen erfolgen.

$$I_{n \text{ Si max}} = \frac{I''_{k \text{ xp}}}{k_{\dot{U} \text{ mind}}}$$

---

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen



$I_{n\ Si\ max}$       Maximalwert des Sicherungsbemessungsstroms  
 $I''_{k\ xp}$           prospektiver Kurzschlussstrom (2-polig oder 3-polig)  
 $k_{\dot{U}\ mind}$         Mindestüberstromfaktor

**Tabelle 19** - Auswahl des Mindeststromfaktors

NH-Sicherung	PSAgS Schutzklasse	Mindestüberstromfaktor	
		Zweipoliger Kurzschluss ( $x_p = 2\text{polig}$ )	Dreipoliger Kurzschluss ( $x_p = 3\text{polig}$ )
gG	1	20	20
	2	18	19
gTr	1	28	28
	2	25	25
Arbeitsschutz	1	6	8
	2	6	8

Der Anwender benutzt den dreipoligen prospektiven (metallischer Kurzschluss) aus der Kurzschlussstromberechnung, um den Sicherungsbemessungsstrom mit Hilfe des Überstromfaktors gemäß Tabelle 19 zu berechnen.

Beispiel:            prospektiver Kurzschlussstrom  $I''_{k3p} = 5472\text{ A}$   
                       für den Einsatz von gG-NH-Sicherungen  
                       Einhaltung der PSAgS-Klasse 1

$$I_{n\ Si\ max} = \frac{I''_{k3p}}{k_{\dot{U}\ mind}} = \frac{5472}{20} = 273,6\text{ A}$$

Auszuwählende Sicherung mit Bemessungsstrom  $I_{n\ si} \leq 273,6\text{ A}$ .

## 4.2 Diagramme zur Auswahl des Sicherungsbemessungsstroms in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für Standardexpositionsbedingungen

Aufgrund höherer oder gleicher Energiewerte gegenüber den direkten Einwirkenergien sind in den Diagrammen zur Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes für den Anwender die ermittelten die Werte der Lichtbogenenergie hinterlegt.

### Wahl von gG-Sicherungen

*Personenschutz bis 1 kA ist gewährleistet*

**Bild 25** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der **PSAgS-Klasse 1** für **zweipolige Kurzschlüsse**

<b>Zweipoliger Kurzschluss</b> Bemessungsstrom von gG– Sicherungen						
Bemessungsstrom $I_{nSi}$ / A	NH-Sicherungseinsätze - gG					
50	<div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;"> <div style="background-color: #fce4d6; padding: 10px; border: 1px solid #ccc; margin-bottom: 10px;"> <p style="margin: 0;"><b>Schutz gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1</b></p> </div> <div style="background-color: #ffe0b2; padding: 10px; border: 1px solid #ccc;"> <p style="margin: 0;"><b>Schutz <u>nicht</u> gewährleistet mit PSAgS-Klasse 2</b></p> </div> </div>					
63						
80						
100						
125						
160						
200						
224						
250						
315						
355						
400						
425						
500						
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms $I''_{k2p}$ / kA					

### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Personenschutz bis **1 kA** ist gewährleistet

**Bild 26** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der **PSAgS-Klasse 2** für **zweipolige Kurzschlüsse**

<b>Zweipoliger Kurzschluss</b> Bemessungsstrom von gG- Sicherungen						
Bemessungsstrom $I_{nSi}$ / A	NH-Sicherungseinsätze - gG					
50	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #e0f0ff; padding: 10px; border: 1px solid black;"> <b>Schutz gewährleistet mit PSAgS-Klasse 2</b> </div> <div style="background-color: #ffe0e0; padding: 10px; border: 1px solid black;"> <b>Schutz <u>nicht</u> gewährleistet mit PSAgS-Klasse 2</b> </div> </div>					
63						
80						
100						
125						
160						
200						
224						
250						
315						
355						
400						
425						
500						
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms $I''_{k2p}$ / kA					

### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Personenschutz bis 1 kA ist gewährleistet

**Bild 27** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 für dreipolige Kurzschlüsse

<b>Dreipoliger Kurzschluss</b> Bemessungsstrom von gG– Sicherungen						
Bemessungsstrom $I_{nSi}$ / A	NH-Sicherungseinsätze - gG					
50	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="background-color: #fce4d6; padding: 10px; border: 1px solid #ccc;"> <b>Schutz <u>nicht</u> gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1</b> </div> <div style="background-color: #ffe0b2; padding: 10px; border: 1px solid #ccc;"> <b>Schutz gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1</b> </div> </div>					
63						
80						
100						
125						
160						
200						
224						
250						
315						
355						
400						
425						
500						
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms $I''_{k3p}$ / kA					

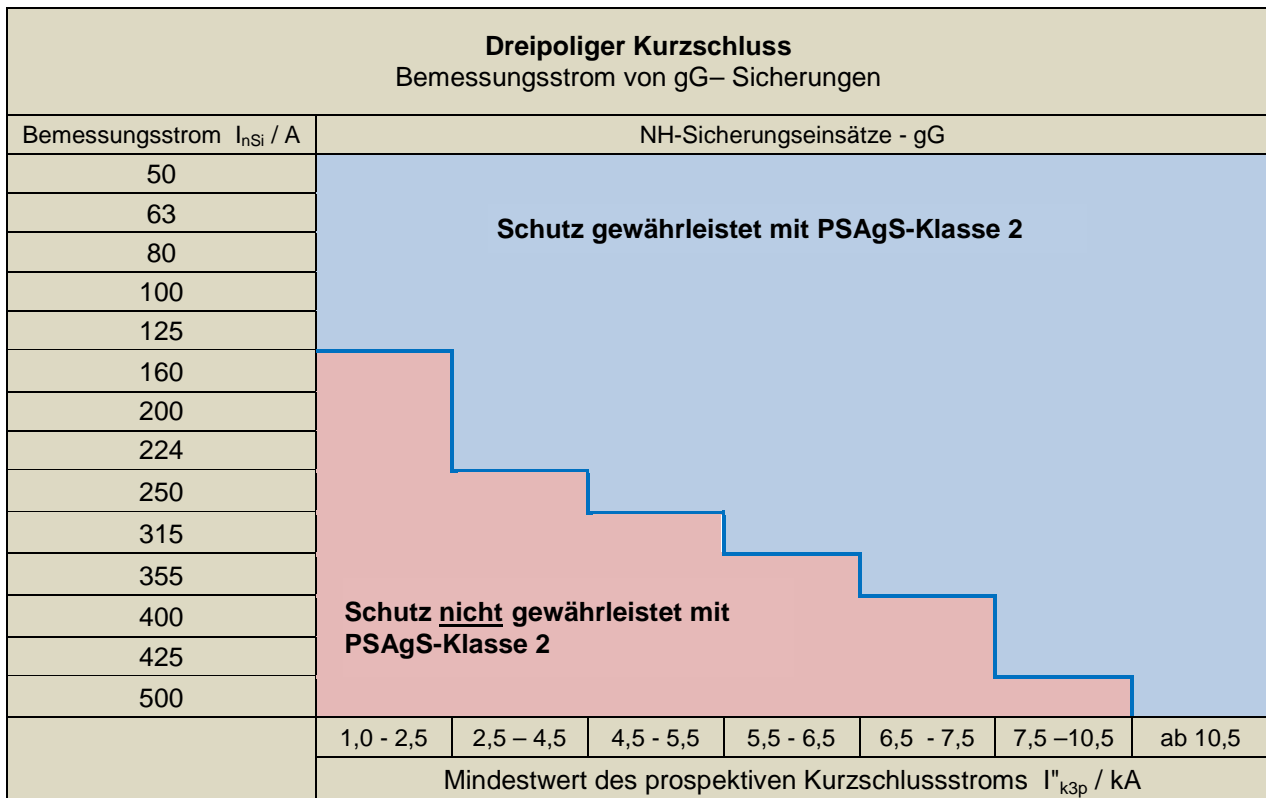
Alle Sicherungen mit Bemessungsströmen bis zur begrenzten Stufe, die für den Bereich gilt, in dem der Kurzschlussstrom liegt, gewährleisten Schutz mit PSAgS.

Beispiel: Der prospektive dreipolige Kurzschlussstrom beträgt 3,6 kA. Dann gilt der Bereich 2,5...4,5 kA. Schutz mit PSAgS Klasse 1 existiert bei Sicherungen mit Bemessungsströmen bis zu 200 A.

### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

*Personenschutz bis 1 kA ist gewährleistet*

**Bild 28** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der **PSAgS-Klasse 2** für **dreipolige Kurzschlüsse**



Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

## Wahl von gTr-Sicherungen

**Bild 29** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der **PSAgS-Klasse 1** für **zweipolige Kurzschlüsse**

<b>Zweipoliger Kurzschluss</b> Bemessungsstrom von gTr – Sicherungen	
Scheinleistung $S_n / \text{kVA} (I_{\text{rat}} / \text{A})$	NH-Sicherungseinsätze - gTr
250 (361)	<b>Schutz gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1</b>
315 (455)	
400 (577)	
	4,5 – 10,5
	ab 10,5
Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms $I''_{k2p} / \text{kA}$	

**Bild 30** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der **PSAgS-Klasse 2** für **zweipolige Kurzschlüsse**

<b>Zweipoliger Kurzschluss</b> Bemessungsstrom von gTr – Sicherungen	
Scheinleistung $S_n / \text{kVA} (I_{\text{rat}} / \text{A})$	NH-Sicherungseinsätze - gTr
250 (361)	<b>Schutz gewährleistet mit PSAgS-Klasse 2</b>
315 (455)	
400 (577)	
	4,5 – 7,5
	ab 7,5
Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms $I''_{k2p} / \text{kA}$	

Bei dreipoligen Kurzschlüssen kann durch PSAgS-Klasse 2 Schutz mit gTr-Sicherungen  $\leq 250 \text{ kVA}$  (361 A) gewährleistet werden, wenn der Kurzschlussstrom mindestens 7 kA beträgt. Bei dreipoligen Kurzschlüssen kann mit gTr-Sicherungen  $\geq 250 \text{ kVA}$  (361 A) durch PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2 kein Schutz gewährleistet werden.

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

## Wahl Arbeitsschutz-Sicherungen

*Personenschutz bis 1 kA ist gewährleistet*

**Bild 31** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von Arbeitsschutz-Sicherungen zur Einhaltung **der PSAgS-Klasse 1** und der **PSAgS-Klasse 2** für **zweipolige Kurzschlüsse**

<b>Zweipoliger Kurzschluss</b>			
Bemessungsstrom von Arbeitsschutz– Sicherungen			
Bemessungsstrom $I_{nSi}$ / A	NH-Sicherungseinsätze - Arbeitsschutz		
160	<b>Schutz gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2</b>		
200			
250			
315			
355			
400	<b>Schutz nicht gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2</b>		
500			
	1,0 – 2,5	2,5 – 4,5	ab 4,5
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms $I''_{k2p}$ / kA		

*Personenschutz bis 1 kA ist gewährleistet*

**Bild 32** - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von Arbeitsschutz-Sicherungen zur Einhaltung **der PSAgS-Klasse 1** und der **PSAgS-Klasse 2** für **dreipolige Kurzschlüsse**

<b>Dreipoliger Kurzschluss</b>			
Bemessungsstrom von Arbeitsschutz– Sicherungen			
Bemessungsstrom $I_{nSi}$ / A	NH-Sicherungseinsätze - Arbeitsschutz		
160	<b>Schutz gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2</b>		
200			
250			
315			
355			
400	<b>Schutz nicht gewährleistet mit PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2</b>		
500			
	1,0 – 2,5	2,5 – 4,5	ab 4,5
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms $I''_{k3p}$ / kA		

## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

### 4.3 Diagramme oder Gleichung zur Ermittlung der zulässigen Ausschaltzeiten von Versicherungen

#### 4.3.1 Normierte Zeit/Strom-Kennlinie für PSAgS

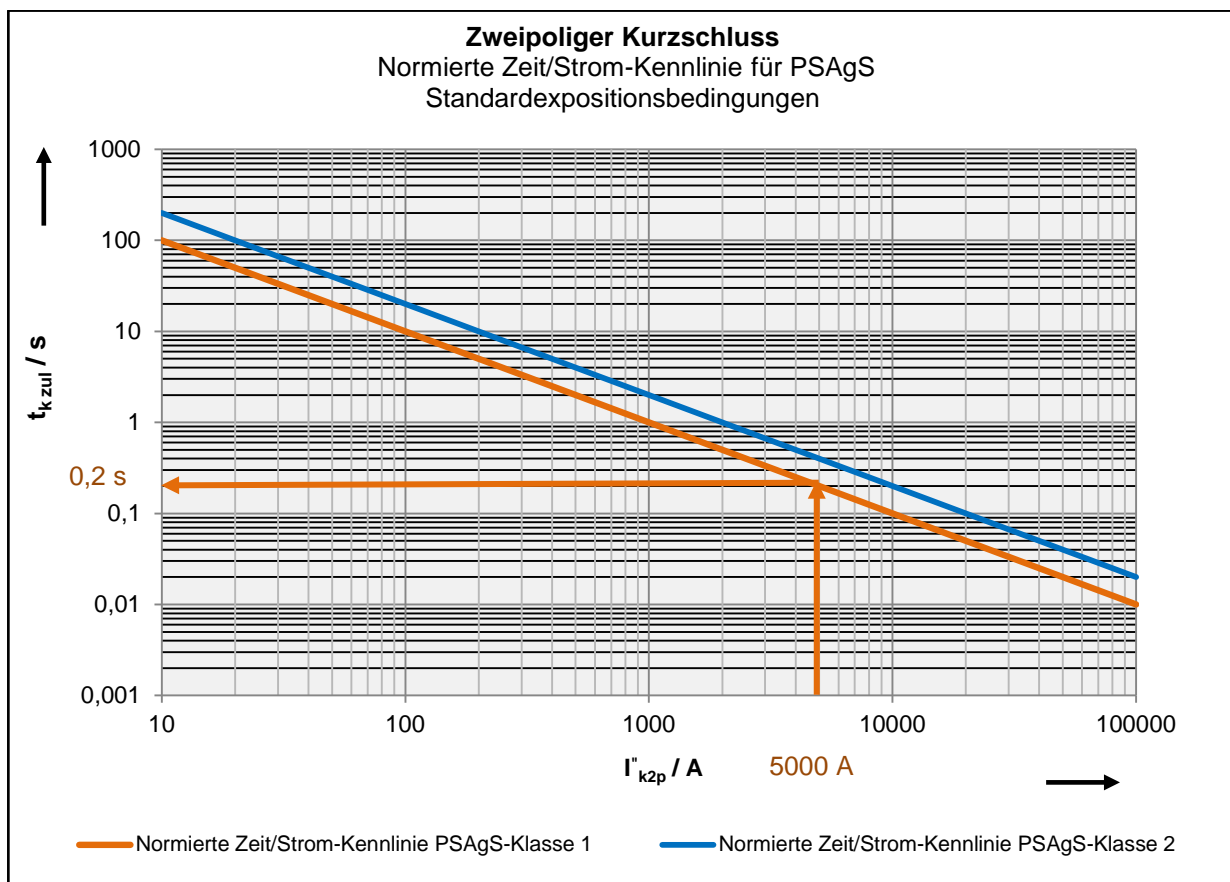
Ermittlung der zulässigen (maximalen) Ausschaltzeit zur Bestimmung der Bemessungsstromstärke der Versicherung aus virtueller Ausschaltzeit der Zeit/Strom-Kennlinie des Herstellers mit tatsächlichem Fehlerstrom  $I_{kLBxp}$  für die Bedingung  $t_{k \text{ aus KLHerst}} < t_{kzul}$  für beliebige Expositionsbedingungen.

$I_{kLBxp}$       Lichtbogenstrom / tatsächlicher Fehlerstrom  
                    $xp$  – 2-polig oder 3-polig

$t_{k \text{ aus KLHerst}}$       Ausschaltzeit nach Kennlinie des Herstellers

$t_{kzul}$       zulässige Ausschaltzeit

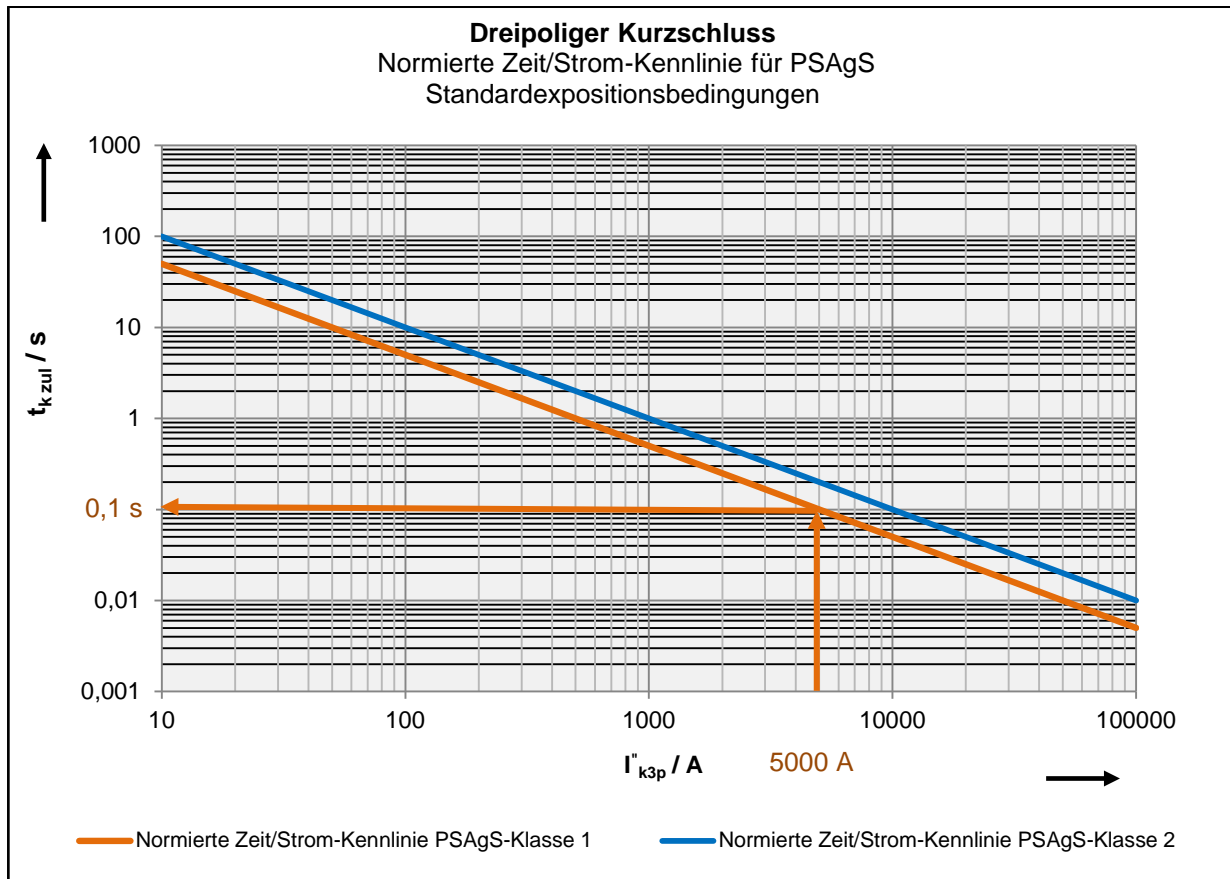
**Bild 33** - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSAgS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für Standardexpositionsbedingungen **zweipoliger Kurzschlüsse**



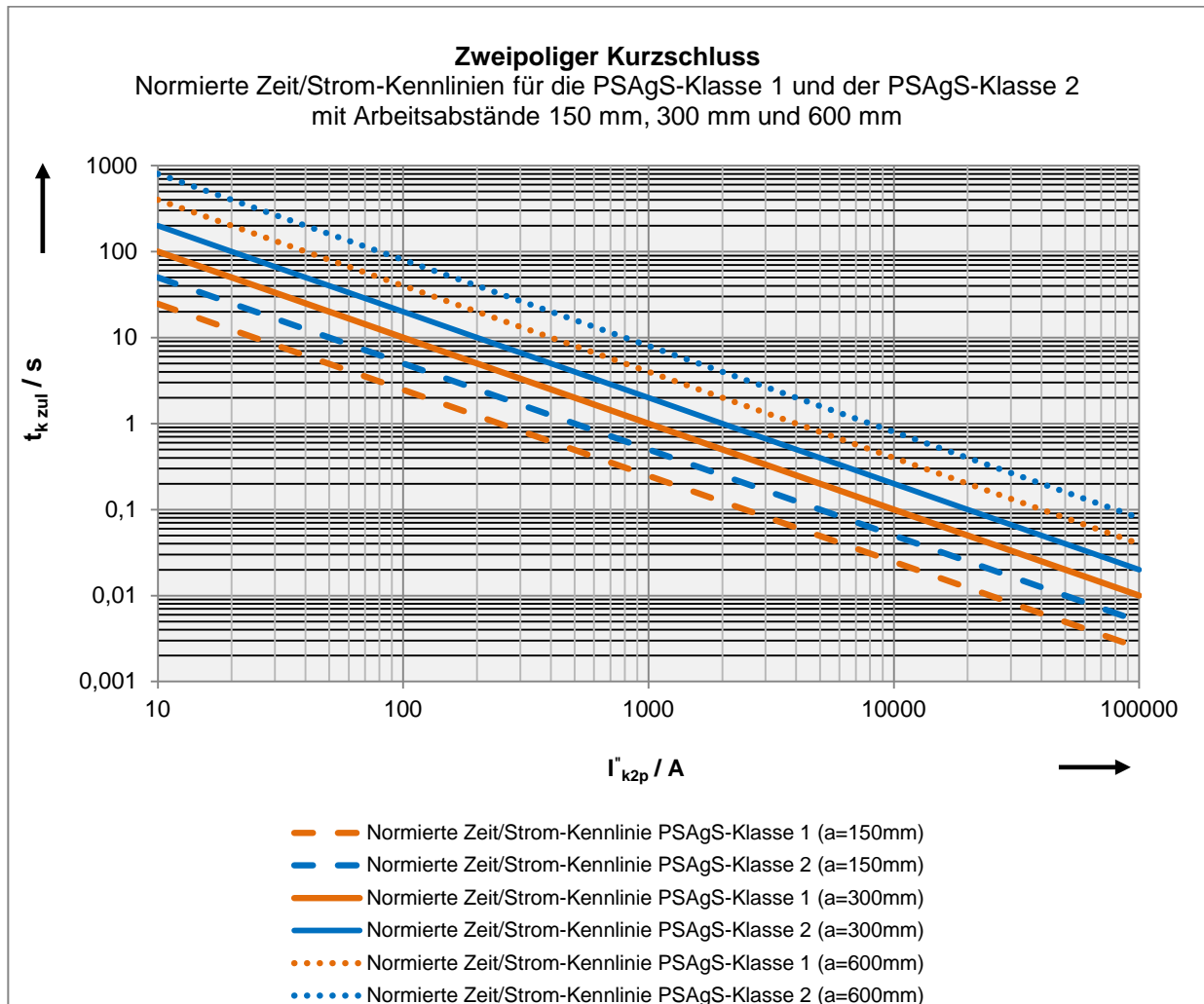
### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen



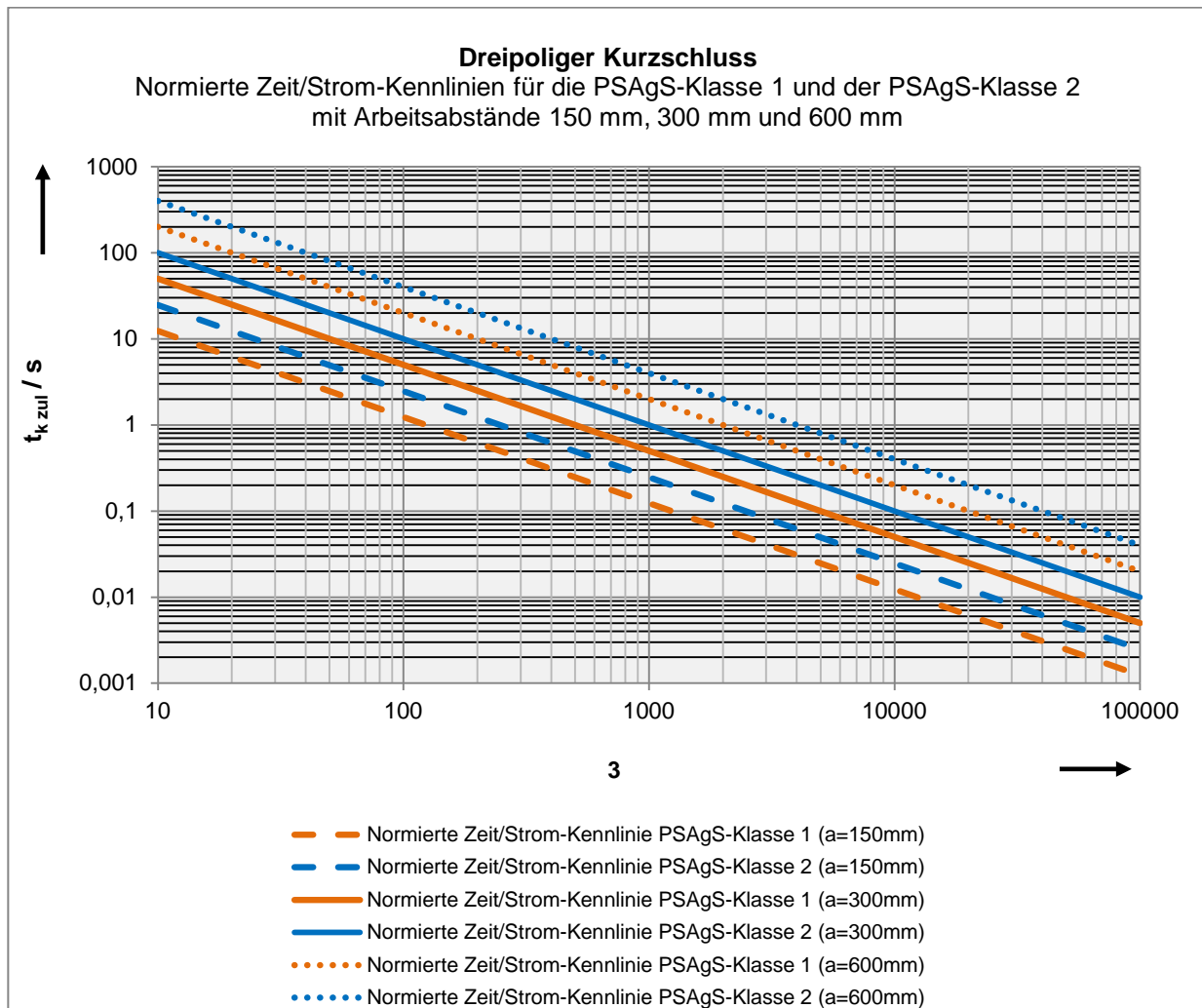
**Bild 34** - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSaGS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für Standardexpositionsbedingungen **dreipoliger Kurzschlüsse**



**Bild 35** - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSAgS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für ausgewählte Arbeitsabstände bei **zweipoligen Kurzschlüssen**



**Bild 36** - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSaGS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für ausgewählte Arbeitsabstände bei **dreipoligen Kurzschlüssen**



## Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

### 4.3.2 Mathematische Funktion (Geradengleichung)

Geradengleichung zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit unter Berücksichtigung beliebiger Expositionsbedingungen.

$$k_{zul} = f_{KL} \cdot \frac{\left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2}{I''_{kxp}}$$

Die Auswahl des Kennlinienfaktors für die PSAgS-Klasse erfolgt nach Tabelle 20.

$t_{k\ zul}$  zulässige Ausschaltzeit

$f_{KL}$  Kennlinienfaktor

$I''_{kxp}$  zweipoliger oder dreipoliger Kurzschlussstrom

$a$  Arbeitsabstand

$$f_{KL} = t_{k\ zul} \cdot I''_{kxp}$$

**Tabelle 20** - Auswahl des Kennlinienfaktors

Kennlinienfaktor $f_{KL}$ für Geradengleichung		
	Zweipolige Kurzschlüsse	Dreipolige Kurzschlüsse
PSAgS-Klasse	$f_{KL}$	$f_{KL}$
1	1000	500
2	2000	1000

### 4.3.3 Digitalisierte Kurven für numerische Berechnung

Bestimmung normierter Zeit/Strom-Kennlinien der PSAgS-Klasse 1 und der PSAgS-Klasse 2 unter Berücksichtigung festgelegter Arbeitsabstände.

**Tabelle 21** - Werte zur Bestimmung von normierten Zeit/Strom-Kennlinien der PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2 unter Berücksichtigung festgelegter Arbeitsabstände für **zweipolige Kurzschlüsse**

Normierte Zeit/Strom-Kennlinien der PSAgS-Klassen für zweipolige Kurzschlüsse						
Zweipoliger Kurzschlussstrom $I_{k2p}$	Zulässige Ausschaltzeit $t_{k\ zul}$					
	PSAgS-Klasse 1			PSAgS-Klasse 2		
	Arbeitsabstand a					
	150 mm	300 mm	600 mm	150 mm	300 mm	600 mm
10 A	25 s	100 s	400 s	50 s	200 s	800 s
100 A	2,5 s	10 s	40 s	5 s	20 s	80 s
1000 A	0,25 s	1 s	4 s	0,5 s	2 s	8 s
10 000 A	0,025 s	0,1 s	0,4 s	0,05 s	0,2 s	0,8 s
100 000 A	0,0025 s	0,01 s	0,04 s	0,005 s	0,02 s	0,08 s

**Tabelle 22** - Werte zur Bestimmung von normierten Zeit/Strom-Kennlinien der PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2 unter Berücksichtigung festgelegter Arbeitsabstände für **dreipolige Kurzschlüsse**

Normierte Zeit/Strom-Kennlinien der PSAgS-Klassen für dreipolige Kurzschlüsse						
Dreipoliger Kurzschlussstrom $I_{k3p}$	Zulässige Ausschaltzeit $t_{k\ zul}$					
	PSAgS-Klasse 1			PSAgS-Klasse 2		
	Arbeitsabstand a					
	150 mm	300 mm	600 mm	150 mm	300 mm	600 mm
10 A	12,5 s	100 s	200 s	25 s	100 s	400 s
100 A	1,25 s	10 s	20 s	2,5 s	10 s	40 s
1000 A	0,125 s	1 s	2 s	0,25 s	1 s	4 s
10 000 A	0,0125 s	0,1 s	0,2 s	0,025 s	0,1 s	0,4 s
100 000 A	0,00125 s	0,01 s	0,02 s	0,0025 s	0,01 s	0,04 s

### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Mit den Werten der Tabellen 21 und 22 lassen sich die normierten Zeit/Strom-Kennlinien in den Diagrammen der Sicherungskennlinien erstellen.

Beispiel: Für zweipolige Kurzschlussströme, der PSAgS-Klasse 1 und einem Arbeitsabstand  $a = 150$  mm werden aus der Tabelle 18 die entsprechenden Werte  $10$  A /  $25$  s,  $100$  A /  $2,5$  s,  $1000$  A /  $0,25$  s,  $10\ 000$  A /  $0,025$  s und  $100\ 000$  A /  $0,0025$  s ausgesucht und punktuell in ein Sicherungskennliniendiagramm eingetragen. Mit der Verbindung dieser Punkte entsteht eine Gerade, die normierte Zeit/Strom-Kennlinie.

## **5 Zusammenfassung der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen**

Die dreipolige Elektrodenanordnung, die in Anlehnung an das Boxtestverfahren aufgebaut wurde, bietet eine Möglichkeit, dreipolige Kurzschlüsse experimentell mit stabilen Lichtbögen nachzubilden.

Bei dieser Prüfanordnung bildeten sich zeitgleich jeweils zwei Lichtbögen aus, ein Lichtbogen zwischen den vertikalen Prüfelektroden und der andere Lichtbogen rotierend zwischen der horizontalen Prüfelektrode und den vertikalen Prüfelektroden.

Infolge der einpoligen Abschaltcharakteristik von Sicherungen erfolgte überwiegend auch nur die Ausschaltung eines Leiters und das Verlöschen eines Lichtbogens, mit geringerem Strom brennt dann der andere Lichtbogen bis zum selbststätigen Verlöschen oder bis zur Ausschaltung durch den Prüfkreissschalter weiter.

Für die dreipoligen Störlichtbogenprüfungen wurden die Sicherungen ausgewählt, die sich auf der Grundlage vorangegangener Untersuchungen und Hochrechnungen elektrischer Energiewerte von zweipoligen Kurzschlüssen im Grenzbereich der PSAgS-Klassen 1 und 2 befanden.

---

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Beim Vergleich hochgerechneter und der durch die dreipoligen Störlichtbogenprüfungen ermittelten Energiewerte sind wenige Übereinstimmungen festzustellen. Ursache dafür sind das Lichtbogenverhalten und die verschiedenen Ausschaltcharakteristiken.

Durch die Ausschaltzeit des Prüfkreisschalters wurde das Ausschaltverhalten des zweiten Lichtbogens bei dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit beeinflusst. Durch eine Verlängerung der Einstellung der Ausschaltzeit des Prüfkreisschalters muss weiter untersucht werden, wann die 2. Sicherung bzw. 2. und 3. Sicherung ausschalten oder ob es zu einem selbsttätigen Verlöschen der Lichtbögen kommt.

Die dreipoligen Kurzschlüsse der Laboruntersuchungen werden signifikant dadurch bestimmt, dass sich zuerst dreipolige Phasen und dann, nach Ausschaltung des ersten Lichtbogens durch die erste Sicherung, zweipolige Phasen einstellen, deren zeitlicher Anteil an der Gesamtbrenndauer des Kurzschlusses sehr unterschiedlicher ist. In den zweipoligen Phasen sind Lichtbogenleistung und Fehlerstrom geringer; die Ausschaltzeiten der verbleibenden Sicherungen verlängern sich entsprechend.

Die Bewertung des Energieverhaltens der Lichtbögen erfolgte vorrangig auf der Basis der Lichtbogenenergie. Zusätzlich wurde immer auch die direkte Einwirkenergie (maximale Temperaturerhöhung) betrachtet, insbesondere bei Ausschaltungen durch den Prüfkreisschalter.

Es wurde bestimmt, in welchen Grenzen hinsichtlich der prospektiven Kurzschlussströme und Sicherungsbemessungsströme eine Einhaltung der Schutzpegel der PSaGS erwartet werden kann. Daraus wurden Auswahldiagramme abgeleitet. Die Aussagen sind auf eine begrenzte Anzahl von Messwerten und die Rechenwerte gestützt, die aus den sehr umfangreichen Messwerten für Kurzschlüsse in der zweipoligen Anordnung mit Hilfe des experimentell begründeten Energieverhältnisses zwischen dreipoligen und zweipoligen Kurzschlüssen gleichen Kurzschlussstroms von rd. 2 berechnet wurden.

Aus diesen Ergebnissen wurde eine Aufbereitung von praktischen Anwendungsregeln und Auswahlhilfsmitteln vorgenommen. Diese Arbeitshilfen extrahieren die für die praktische Betrachtung erforderlichen Zusammenhänge in abstrakter Form und beschränken sich auf Grundgrößen, die ein Praktiker überblicken und handhaben kann. Die Aufbereitung ist in Form von 3 Varianten erfolgt: Mindestüberstromfaktor, Auswahltafel und normierte Strom-Zeit-Kennlinie PSAgS. Die Varianten unterscheiden sich in der Genauigkeit und den erforderlichen Schritten der Handhabung. Eine Variante bietet dabei auch grundsätzlich die Möglichkeit, dass außer den Standardexpositionsbedingungen mit einem Arbeitsabstand  $a = 300$  mm und kleinräumige Anlagenbedingungen mit einem Transmissionsfaktor 1 auch abweichende Verhältnisse näherungsweise erfasst werden können.

Ein zuverlässiges Ergebnis für die normierte Zeit/Strom-Kennlinien PSAgS dreipoliger Kurzschlüsse, das durch Messwerte vollständig gestützt ist, konnte noch nicht erzielt werden. Die Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen liegen in den Bereichen der PSAgS-Klassen zweipoliger Kurzschlüsse, garantieren aber infolge der geringen Tests noch keine fundierte Beurteilung. Die Kennlinien dürften dennoch, auch auf Grund der Sicherheitsabstände, die für die zugrunde liegenden Kennlinien für zweipolige Verhältnisse angesetzt wurden, als anwendbar anzusehen sein.

Die erreichten Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen bilden eine erste Grundlage zur Bewertung dreipoliger Kurzschlüsse; sie beziehen sich insbesondere auf die Bedingungen und Elektrodenanordnung der verwendeten dreipoligen Prüfanordnung.

Schlussfolgerungen zu anderen Elektrodenanordnungen, Bedingungen und Einflüssen dreipoliger Kurzschlüsse lassen sich daraus nicht konkret ableiten.

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse ist eine Fortführung der dreipoligen Kurzschlussuntersuchungen, mit unterschiedlichen Prüfanordnungen, Prüfbedingungen etc. zu empfehlen.



In den Anwenderhilfsmitteln ist durch vergleichende Betrachtungen zu eruieren, ob eine weitere Vereinfachung dahingehend möglich ist, keine Unterscheidungen in zweipoligen und dreipoligen Kurzschlüssen vorzunehmen, sondern eine generelle Aussage unabhängig von der Kurzschlussart vorzugeben.

Es ist die Art der Ausbildung der Lichtbögen in den untersuchten Elektrodenanordnungen weiter detailliert zu analysieren.

Es ist zu untersuchen, ob bei veränderten dreipoligen Elektrodenanordnungen und Orientierungen sowie Box-Verhältnissen Lichtbogenenergien und thermische Einwirkenergien entstehen können, die größere Werte als in der jetzt untersuchten Anordnung aufweisen.

Gegebenenfalls sind für die worst case Bedingungen detaillierte Versuchsreihen ohne und mit Vorsicherungen vorzunehmen und in gleicherweise zu bewerten, wie es im gegenwärtigen Fall erfolgte.

Um eine Integration der praktischen Anwendungshilfen in die BGI 5188 vornehmen zu können, sind systematische Vergleichsbewertungen für praktische Szenarien für Arbeitsorte bzw. für Fehlerorte durchzuführen. Dabei sind einerseits die Bedingungen gemäß dem Algorithmus der BGI 5188 vorzunehmen. Andererseits sind praktischen Anwendungshilfen zu nutzen und es ist festzustellen, ob widersprüchliche Einschätzungen ausgeschlossen sind.

## 6 Verzeichnis der Abkürzungen

AS	Arbeitsschutz - Sicherungen
$E_{i0}$	Direkte Einwirkenergie
gG	Ganzbereichssicherung für allgemeine Anwendungen; Kabel - und Leitungsschutz
gTr	Ganzbereichssicherung für Transformatorenschutz
$I_p$	Prospektiver Kurzschlussstrom
$I_{arc}$ ( $I_{LB}$ )	Lichtbogenstrom
$I''_{k2}$	Kurzschlussstrom (zweipolig)
$I''_{k3}$	Kurzschlussstrom (dreipolig)
$I_{nSi}$	Sicherungsbemessungsstrom
$I_{rat}$	Sicherungsbemessungsstrom von gTr-Sicherungen
KI 1	Klasse 1
KI 2	Klasse 2
$k_p$	Bezogene Lichtbogenleistung
$P_{arc}$ ( $P_{LB}$ )	Lichtbogenleistung
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
$S_n$	Nenn-Scheinleistung des zu schützenden Transformators, Angabe auf von gTr-Sicherungen anstatt des Bemessungsstromes
$S''_k$	Kurzschlussleistung
$t_{aus}$	Ausschaltzeit
$dT_{max}$	Maximalwert der Temperaturerhöhung
$\Delta T_K$	Temperaturerhöhung am Kalorimeter
dT	Übertemperatur
$T_0$	Umgebungstemperatur
$t_{max}$	Zeitpunkt der Maximaltemperatur
$U_{arc}$ ( $U_{LB}$ )	Lichtbogenspannung
$W_{arc}$ ( $W_{LB}$ )	Lichtbogenenergie
$I_{nSi max}$	maximaler Sicherungsbemessungsstrom
$I''_{k3p}$	prospektiver Kurzschlussstrom 3polig
$k_{Ü mind}$	Mindestüberstromfaktor

---

### Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

## 7 Abbildungsverzeichnis

Bild 1 – Darstellung der Prüfbox	4
Bild 2 – Prüfanordnung Prüfbox mit Prüfplatte	4
Bild 3 – Dreipoliger Prüfaufbau mit Prüfbox, den drei Prüfelektroden und der Prüfplatte mit Kalorimeter	5
Bild 4 – Prinzipdarstellung des dreipoligen elektrischen Prüfkreis	6
Bild 5 - Typisches Oszillogramm für einen dreipoligen Kurzschluss mit einer anfangs dreipoligen Kurzschlussphase und nach Ausschalten einer Sicherungen die zweipolige Kurzschluss- phase bis zur Ausschaltung durch den Prüfkreissschalter	14
Bild 6 - Typisches Oszillogramm für einen dreipoligen Kurzschluss mit einer anfangs dreipoligen Kurzschlussphase und nach Ausschalten einer Sicherungen die zweipolige Kurzschluss- phase bis zum selbsttätigen Verlöschen des Lichtbogens	15
Bild 7 – Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)	18
Bild 8 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)	19
Bild 9 – Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiver Kurzschlussstrom zu Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)	21
Bild 10 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)	24
Bild 371 - Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)	25

Bild 12 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiven Kurzschlussstrom und Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)	26
Bild 13 – Normierte Zeit/Strom-Kennlinie für PSAgS für zweipolige Kurzschlüsse und dreipolige Kurzschlüsse mit den Messwerten der Lichtbogenenergie	28
Bild 14 – Zeit/Strom-Grenzkennlinien für PSAgS für dreipolige Kurzschlüsse mit den Messwerten der Lichtbogenenergie	30
Bild 15 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)	34
Bild 386 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)	35
Bild 17 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)	37
Bild 18 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)	38
Bild 19 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)	40
Bild 20 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)	41
Bild 2139 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiver Kurzschlussstrom zu Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)	42

Bild 22 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)	45
Bild 23 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)	46
Bild 24 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiver Kurzschlussstrom zu Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (Messwerte und berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)	47
Bild 25 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 für zweipolige Kurzschlüsse	50
Bild 26 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 2 für zweipolige Kurzschlüsse	51
Bild 27 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 für dreipolige Kurzschlüsse	52
Bild 28 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 2 für dreipolige Kurzschlüsse	53
Bild 29 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 für zweipolige Kurzschlüsse	54
Bild 30 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von gG-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 2 für zweipolige Kurzschlüsse	54
Bild 31 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von Arbeitsschutz-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 und der PSAgS-Klasse 2 für zweipolige Kurzschlüsse	55
Bild 32 - Auswahl des Sicherungsbemessungsstromes von Arbeitsschutz-Sicherungen zur Einhaltung der PSAgS-Klasse 1 und der PSAgS-Klasse 2 für dreipolige Kurzschlüsse	55

Bild 33 - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSAgS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für Standardexpositionsbedingungen zweipoliger Kurzschlüsse	56
Bild 34 - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSAgS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für Standardexpositionsbedingungen dreipoliger Kurzschlüsse	57
Bild 35 - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSAgS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für ausgewählte Arbeitsabstände bei zweipoligen Kurzschlüssen	58
Bild 36 - Normierte Zeit/Strom-Kennlinien für PSAgS zur Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeit für ausgewählte Arbeitsabstände bei dreipoligen Kurzschlüssen	59

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 -	Stromeinstellungen der prospektiven Kurzschlussströme	9
Tabelle 2 -	Ergebnisse der Lichtbogenenergie $W_{arc}$ und der direkten Einwirkenergie $E_{i0}$ aus den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen	10
Tabelle 23 -	Vergleich der Energiewerte zwischen zweipoligen und dreipoligen Elektrodenanordnungen	11
Tabelle 4 -	Festgestellte Ausschaltkriterien bei den durchgeführten dreipoligen Störlichtbogenprüfungen	13
Tabelle 5 -	Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen berechnete Lichtbogenenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten Lichtbogenenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen (gG-Sicherungen)	16
Tabelle 6 -	Einsatz von gG-Sicherungen: Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen anhand der Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse	17
Tabelle 7-	Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen berechneten direkten Einwirkenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten direkten Eiwirkenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen (gG-Sicherungen)	22
Tabelle 8 -	Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen für dreipolige Kurzschlüsse (gG-Sicherungen), Basis: berechnete und ermittelte direkter Einwirkenergien	23
Tabelle 9 -	Schnittpunkte der Zeit/Strom-Grenzkennlinien PSAgS -Klasse und PSAgS-Klasse 2 für dreipolige Kurzschlüsse	29
Tabelle 10 -	Kennlinienfaktoren aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen	31
Tabelle 11-	Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen berechneten Lichtbogenenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten Lichtbogenenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Versicherungen (gTr-Sicherungen)	33

---

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

---

Tabelle 12 - Zusammenfassung berechneter und ermittelter Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse für die Einhaltung der Schutzklassen (gTr-Sicherungen)	34
Tabelle 13 - Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechnete direkte Einwirkenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten direkten Einwirkenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (gTr-Sicherungen)	36
Tabelle 14 - Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen berechneter und ermittelter direkter Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlüsse (gTr-Sicherungen)	36
Tabelle 15 - Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechneten Lichtbogenenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten Lichtbogenenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (Arbeitsschutz-Sicherungen)	39
Tabelle 16 - Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen berechneter Und ermittelter Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse (Arbeitsschutz-Sicherungen)	39
Tabelle 17 - Aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen berechneten direkten Einwirkenergien für dreipoligen Kurzschluss im Vergleich mit den ermittelten direkten Einwirkenergien aus dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen (Arbeitsschutz-Sicherungen)	43
Tabelle 18 - Zusammenfassung für die Einhaltung der Schutzklassen berechneter und ermittelter direkter Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlüsse (Arbeitsschutz-Sicherungen)	44
Tabelle 19 - Auswahl des Mindeststromfaktors	49
Tabelle 20 - Auswahl des Kennlinienfaktors	60
Tabelle 21 - Werte zur Bestimmung von normierten Zeit/Strom-Kennlinien der PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2 unter Berücksichtigung festgelegter Arbeitsabstände für zweipolige Kurzschlüsse	61
Tabelle 22 - Werte zur Bestimmung von normierten Zeit/Strom-Kennlinien der PSAgS-Klasse 1 und PSAgS-Klasse 2 unter Berücksichtigung festgelegter Arbeitsabstände für dreipolige Kurzschlüsse	61

---

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen



## 9 Literaturverzeichnis

- /1/ Schau, H.: Technischer Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Nr. 2164 0009 75 (AWU 2164 0037), Teilprojekte 1 bis 4, Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 19. Dezember 2013
  
- /2/ Schau, H.: Technischer Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Nr. 2164 0009 75 (AWU 2164 0037), Teilprojekt 5–1, Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 19. Februar 2014
  
- /3/ Schau, H.: Ergebnisübersicht zu den Untersuchungen Teilprojekt 5-1 (Stand 13.02.2014), Forschungsprojekt Nr. 2164 0009 75 (AWU 2164 0037), Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 13. Februar 2014
  
- /4/ Schau, H.: Projektzusammenfassung, Forschungsprojekt Nr. 2164 0009 75 (AWU 2164 0037), Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 13. Juni 2014
  
- /5/ Schau, H.: Technischer Bericht zum Forschungsprojekt TU-Vertrags-Nr. 2164 5475, Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 26. April 2011
  
- /6/ DIN IEC 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2):2007: Arbeiten unter Spannung – Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines elektrischen Lichtbogens – Teil 1-2: Prüfverfahren – Verfahren – 2: Bestimmung der Lichtbogenschutzklasse des Materials und der Kleidung unter Verwendung eines gerichteten Prüflichtbogens (Box-Test)
  
- /7/ BGI/GUV-I 5188, Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen, Sachgebiet „Elektrotechnik und Feinmechanik“ des Fachbereichs „Energie, Textil, Elektro, Medienerzeugnisse“ der DGUV, Oktober 2012, 2. Druckauflage