

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung

Technischer Abschlussbericht

Teilprojekt 5 – 1

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, 31. März 2014

PD Dr.-Ing. habil. Holger Schau
Projektleiter

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Prüfverfahren	4
2.1	Dreipoliges Prüfverfahren	4
2.2	Elektrischer Prüfkreis	6
2.3	Prüfdurchführung	8
3	Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen	9
3.1	Ergebnisübersicht	9
3.2	Lichtbogenleistung	10
3.3	Lichtbogenenergie	10
3.4	Direkte Einwirkenergie	13
4	Ergebnisbetrachtung zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen	14
4.1	Lichtbogenleistung zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen ohne Vorsicherungen	14
4.2	Lichtbogenenergie zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen ohne Vorsicherungen	15
4.3	Direkte Einwirkenergie zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen ohne Vorsicherungen	16
4.4	Berechnete Lichtbogenenergien aus zweipoliger Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen für dreipoligen Kurzschluss	17
4.4.1	Berechnete Lichtbogenenergien für gG – Sicherungen	17
4.4.2	Berechnete Lichtbogenenergien für gTr – Sicherungen	23
4.4.3	Berechnete Lichtbogenenergien für Arbeitsschutz – Sicherungen	25
4.5	Berechnete direkte Einwirkenergien aus zweipoliger Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen für dreipoligen Kurzschluss	29
4.5.1	Berechnete direkte Einwirkenergien für gG – Sicherungen	29
4.5.2	Berechnete direkte Einwirkenergien für gTr – Sicherungen	34
4.5.3	Berechnete direkte Einwirkenergien für Arbeitsschutz – Sicherungen	37
5	Zusammenfassung	42
6	Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung	43
7	Vorschlag zur Fortführung dreipoliger Störlichtbogenprüfungen	44
8	Verzeichnis der Abkürzungen	46

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

1 Aufgabenstellung

Die energetischen und thermischen Auswirkungen von dreipoligen Störlichtbögen ohne Vorsicherungen sind bezogen auf den Personenschutz bei Arbeiten unter Spannung zu untersuchen. Die erzielten Ergebnisse von dreipoligen Störlichtbogenprüfungen sind mit den Untersuchungsergebnissen vorangegangener zweipoligen Störlichtbogenprüfungen hinsichtlich relevanter Korrelationen der Lichtbogenparameter, der Ausschaltzeiten, der Lichtbogen- und Einwirkenergien gegenüberzustellen und die Erkenntnisse zu analysieren.

Mit einem qualifizierten dreipoligen Prüfverfahren, das vergleichbare Prüfbedingungen zum zweipoligen Prüfverfahren (Box-Test-Verfahren) nach DIN IEC 62482-1-2:2007 aufweist, sollten die dreipoligen Störlichtbogenprüfungen durchgeführt werden. Eine geeignete räumliche Orientierung und Geometrie der Prüfelektroden ist für einen stabilen Lichtbogen vorzusehen. Die Auswirkungen der Materialvielfältigkeit von Prüfelektroden bei dreipoligen Störlichtbogenprüfungen sind zu beachten.

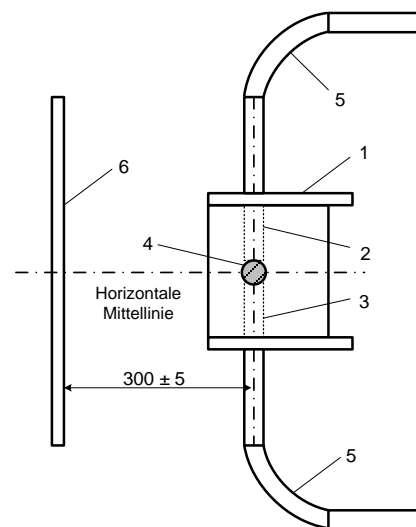
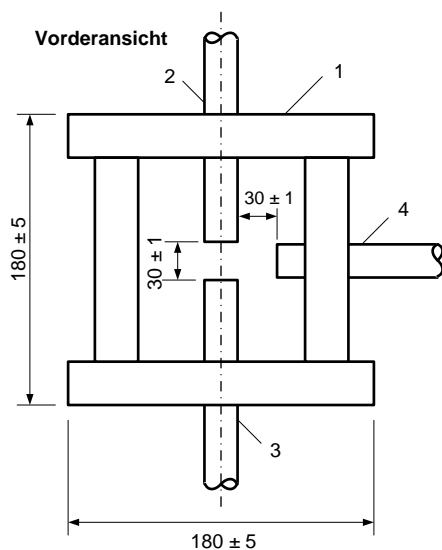
Die Energiewerte aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Sicherungen sind auf die zu erwartenden Energiewerte für dreipolige Kurzschlüsse mit Sicherungen hochzurechnen. Mit ausgewählten Sicherungen bzw. Bemessungsströmen in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom sind diese Hochrechnungen durch Störlichtbogenprüfungen messtechnisch nachzuweisen.

2 Prüfverfahren

2.1 Dreipoliges Prüfverfahren

Die dreipoligen Störlichtbogenprüfungen erfolgten in Analogie an das Box-Test-Verfahren (zweipoliges Prüfverfahren) gemäß DIN IEC 61482-1-2. In die genormte Prüfbox des zweipoligen Prüfverfahrens wurde zusätzlich eine dritte Prüfelektrode, horizontal rechtsseitig im Abstand von 30 mm zu den vertikalen Prüfelektroden, eingefügt.

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



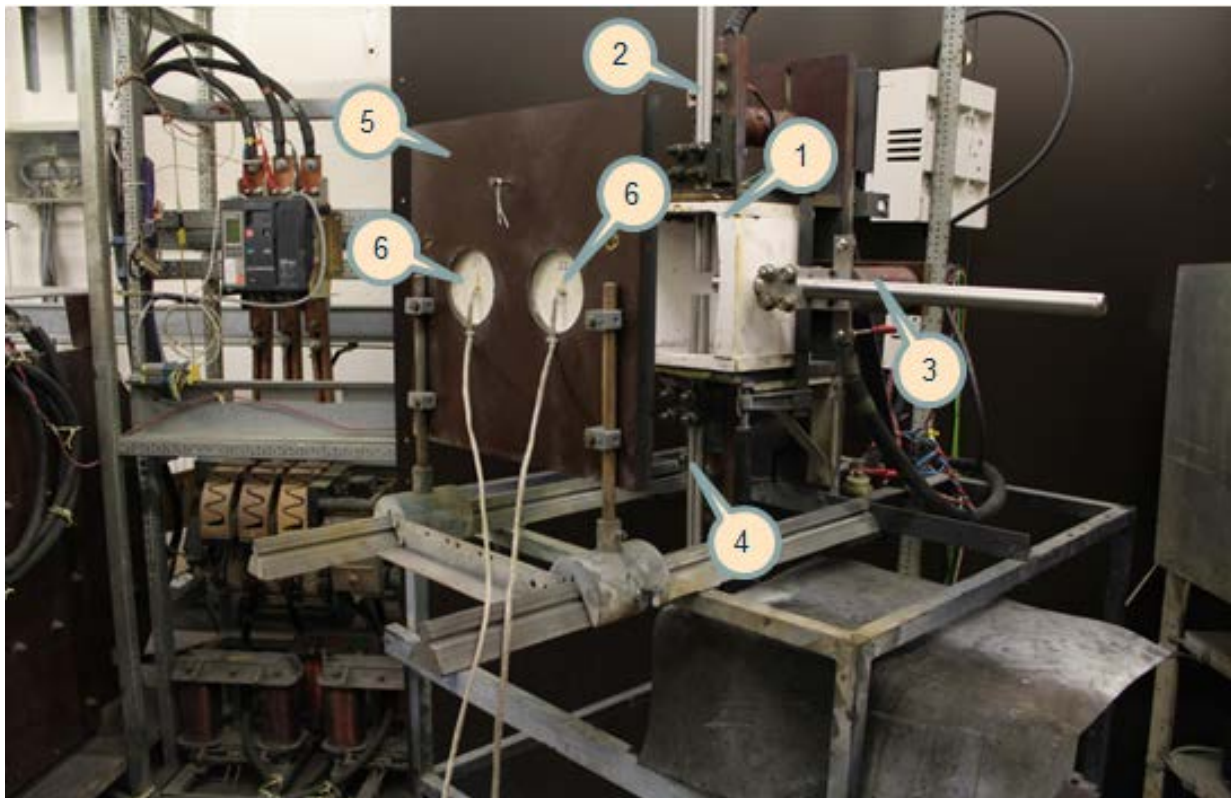
Legende

- | | | | |
|---|--|---|----------------------------|
| 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

Das Bild 3 veranschaulicht den dreipoligen Prüfaufbau mit der Prüfbox und den integrierten zwei vertikalen Prüfelektroden und der dritten horizontalen Prüfelektrode. Die dargestellten Prüfelektroden sind aus V2A-Stahl. Gegenüber der Prüfbox befindet sich im Abstand von 300 mm eine Prüfplatte mit zwei Kalorimetern und integrierten Sensoren zur Ermittlung der Einwirkenergie.



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 |

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 Prüfkreisschalter
- 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.

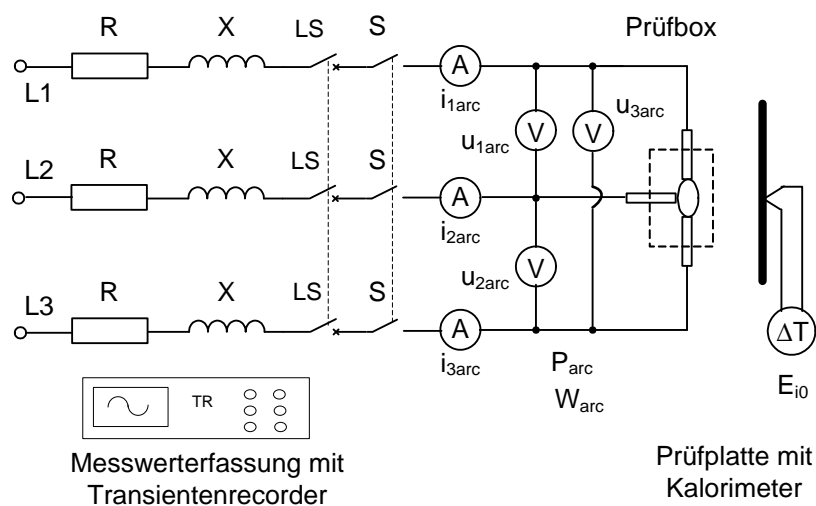


Bild 4 – Prinzipdarstellung des dreipoligen elektrischen Prüfkreises

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Elektrische Prüfparameter

- Prüfspannung 400 V ± 5 % AC
- Prüfstrom 4 kA ± 5 %, 7 kA ± 5 %, 8 kA ± 5 %
- Prüfdauer 500 ms ± 5 %
- Frequenz 50 Hz ± 1

Messwerterfassung mit Transientenrecorder

- Momentanwerte der effektiven Leiterströme i_{L1} , i_{L2} und i_{L3}
- Momentanwerte der effektiven Leiterspannungen u_{L1} , u_{L2} und u_{L3}
- Prüfdauer t_{aus}
- Temperatur der Sensoren an den Kalorimetern

Messwertauswertung mit Transientenrecorder

- Lichtbogenleistung P_{arc} / kW
$$P_{arc} = \frac{1}{t_{aus}} \int_0^{t_{aus}} u_{arc} i_{arc} dt$$

Berechnung der Lichtbogenleistung aus dem arithmetischen Mittelwert der Momentanleistungen von Leiterspannungen 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/m²
$$E_{i0} = (m \cdot C_p / A) \cdot 5,52 \text{ kJ/m}^2 \cdot dT_{max}$$

Berechnung der direkten Einwirkenergie durch Multiplikation des konstanten Faktors 5,52 kJ/m² (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 wurden Elektrodenanordnungen aus den Materialien Kupfer (Cu), Aluminium (Al) und Niro-Stahl (V2A-Stahl) mit folgender Konfiguration (Bild 2; ②/③/④) verwendet:

- Cu / Cu / Cu
- V2A / V2A / V2A
- Cu / Al / Cu
- Cu / Al / Cu
- Cu / V2A / Cu
- Al / V2A / Al
- Al / A / Al

Prüfströme: 4 kA, 7 kA und 8 kA

Prüfdauer: 0,5 s

Die Stromeinstellungen für die Prüfströme erfolgten mit der Zuschaltung von Drosseln. Die drei Prüfelektroden wurden während den Einstellungsphasen 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.

3 Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen

3.1 Ergebnisübersicht

Die aktuellen Prüfergebnisse (Mittelwerte aus zwei Prüfungen je Anordnung) der Lichtbogenleistung, der Lichtbogenenergie und der direkten Einwirkenergie für prospektive Kurzschlussströme von 4 kA, 7 kA und 8 kA sind in der Tabelle 1 angegeben. Aufgrund der Prüfelektrodenanordnung bei den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen sind die Lichtbogensausbildungen und damit auch die Energieabstrahlungen unsymmetrisch, infolgedessen ergibt sich auch eine unsymmetrische Temperaturaufnahme durch die zwei Kalorimeter. Deshalb wurden die Maximalwerte von E_{i0} aus den Einzelprüfungen für die Mittelwertberechnungen verwendet.

Tabelle 1 – Ergebnisse der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen

Dreipolige Störlichtbogenprüfungen				
I_P	Anordnung der Prüfelektroden	P_{arc}	W_{arc}	E_{i0}
kA		kW	kJ	kJ/m ²
4	Cu/Al/Cu	756	380	277
4	Cu/V2A/Cu	775	389	185
4	Al/V2A/Al	786	395	584
4	Al/Al/Al	721	733	805
4	Cu/Cu/Cu	780	391	233
4	V2A/V2A/V2A	805	404	237
7	Cu/Al/Cu	1266	637	524
7	Cu/V2A/Cu	1269	641	394
7	Al/V2A/Al	1323	668	2079
7	Al/Al/Al	1344	826	1986
8	Cu/Cu/Cu	1463	732	424
8	V2A/V2A/V2A	1409	709	674

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

3.2 Lichtbogenleistung

Die Lichtbogenleistungen (Bild 5) verhalten sich proportional zum prospektiven Kurzschlussstrom.

Die Prüfelektroden-Materialien besitzen keinen Einfluss auf die Lichtbogenleistung.

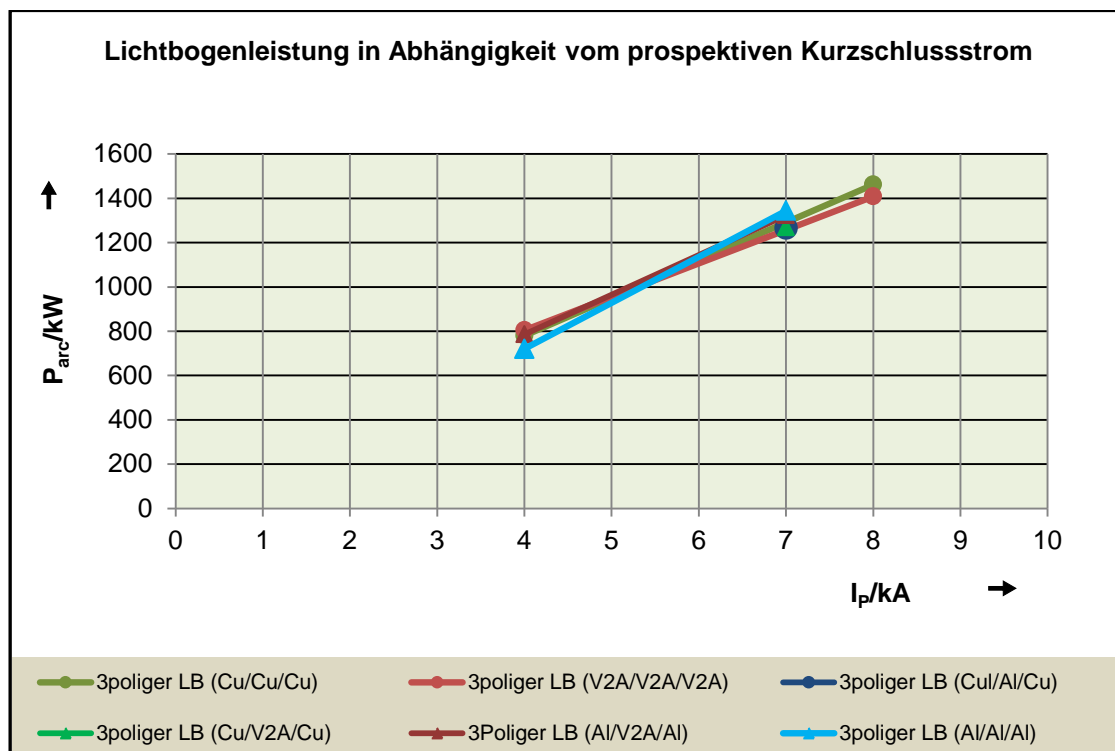


Bild 5 – Lichtbogenleistung in Abhängigkeit des prospektiven Kurzschlussstromes

3.3 Lichtbogenenergie

Die Kennlinien der Lichtbogenenergien im Bild 6 zeigen ebenfalls proportionalen Verlauf zum prospektiven Kurzschlussstrom.

Die Extrapolation der Kennlinien zeigt, dass die Klasse 1 (158 kJ) bei einem prospektiven Kurzschlussstrom von 1,5 kA und die Klasse 2 (318 kJ) bei einem prospektiven Kurzschlussstrom von 3 kA überschritten wird.

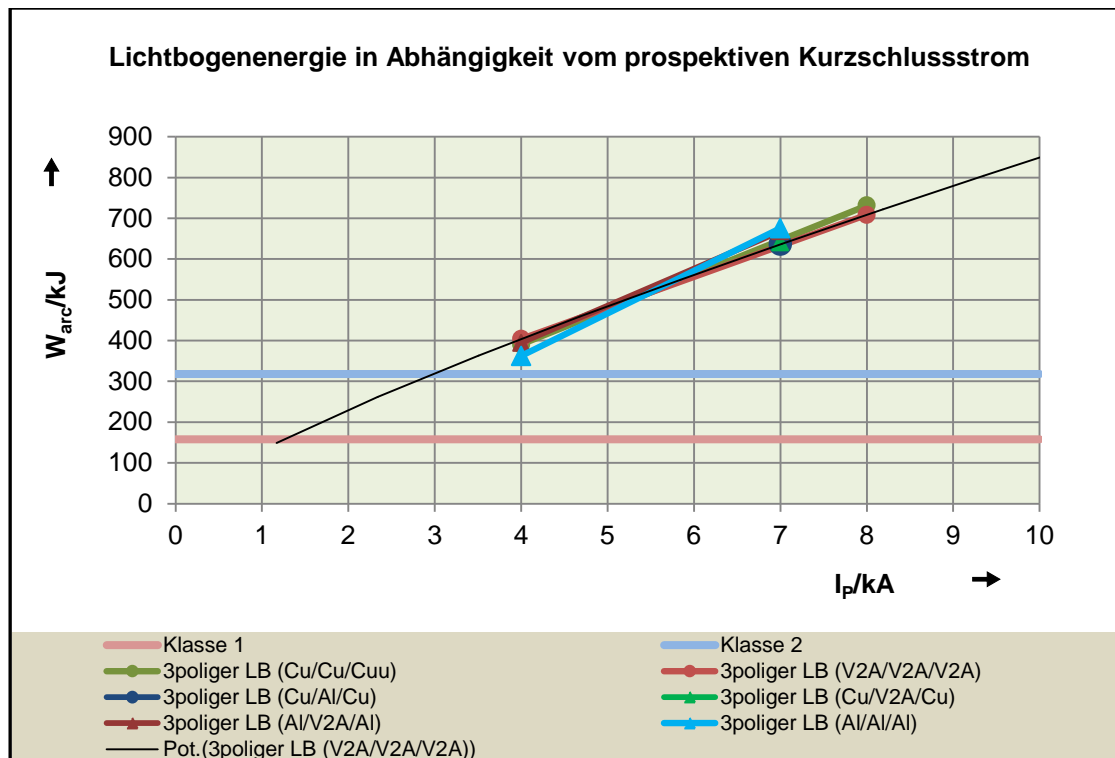


Bild 6 – Lichtbogenenergie in Abhängigkeit des prospektiven Kurzschlussstromes

Auf der Basis der BGI/GUV-I 5188¹ wurde die Lichtbogenenergie im "worst-case-Fall" für einen dreipoligen Kurzschlussstrom am Arbeitsort (Fehlerfall) nach (1) bestimmt. Die berechnete "worst-case"-Kennlinie liegt oberhalb der Kennlinien aus den bisherigen Störlichtbogenprüfungen (Bild 7).

$$W_{LB} = k_p \cdot S^{k_3} \cdot t_k \quad (1)$$

¹ BGI/GUV-I 5188, Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen, Sachgebiet "Elektrotechnik und Feinmechanik" des Fachbereiches „Energie, Textil, Elektro, Medienerzeugnisse“ der DGUV, Oktober 2012, 2. Druckauflage

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Dabei wurde für k_p^2 der maximale Wert im "worst-case-Fall" $k_{pmax} = 0,29 / (R/X)^{0,17}$ eingesetzt.

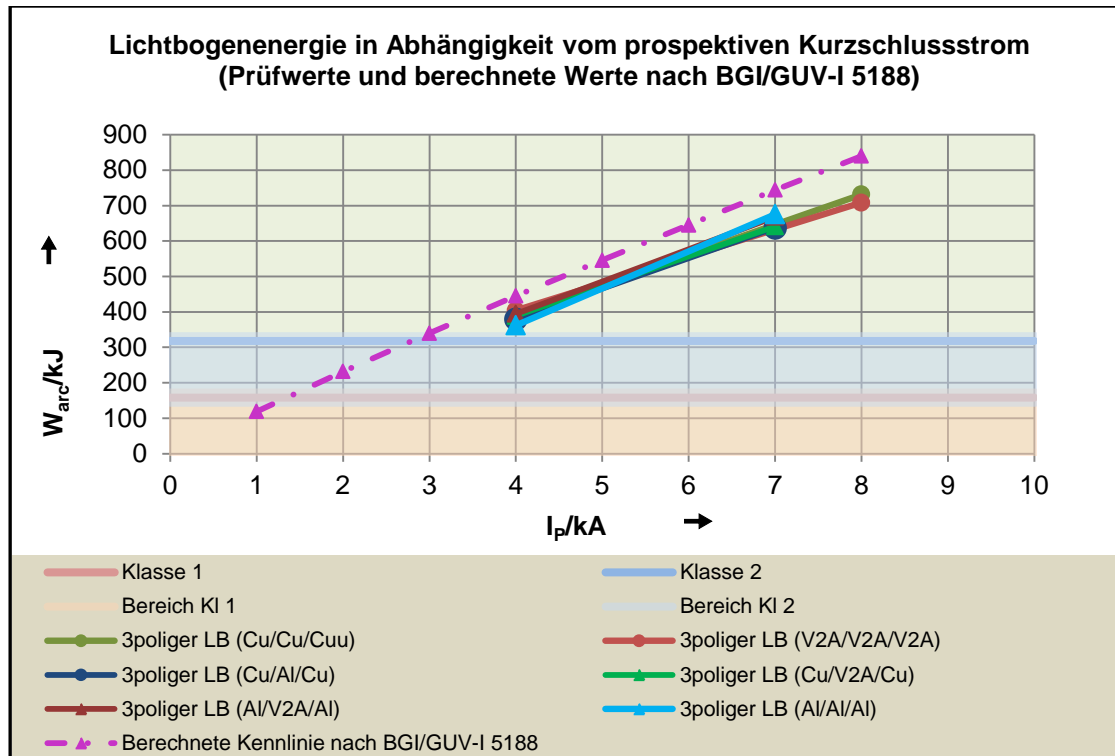


Bild 7 – Lichtbogenenergien der dreipoligen Kurzschlussprüfungen mit der nach BGI/GUV-I 5188 berechneter Lichtbogenenergie im Fehlerfall

² Bezogene Lichtbogenleistung, Verhältnis der Lichtbogenleistung zur Kurzschlussleistung des elektrischen Netzes am Fehlerort

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

3.4 Direkte Einwirkenergie

Bei den direkten Einwirkenergien im Bild 8 ist ein beträchtlicher Materialeinfluss der Prüfelektroden zu verzeichnen.

Ausgehend von den Ergebnissen mit Cu/Cu/Cu-Material für die Prüfelektroden werden die Klasse 1 mit prospektive Kurzschlussströme von $\leq 2,2$ kA und die Klasse 2 mit prospektive Kurzschlussströme bis ca. 8 kA eingehalten.

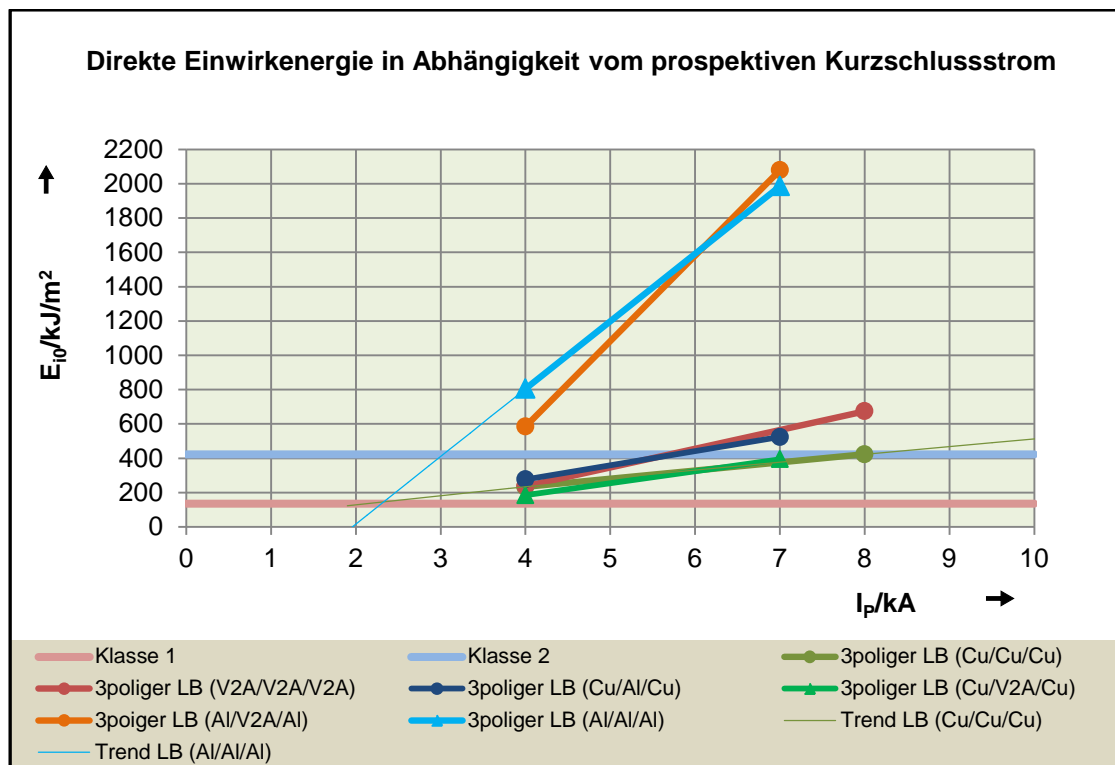


Bild 8 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom

4 Ergebnisbetrachtung zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen

Grundlagen für die Bewertungen der Prüfergebnisse von zweipoligen und dreipoligen Kurzschlüssen sind:

- gleiche Anlage
- zweipoliger Kurzschluss $I''_{K2} = \sqrt{3} / 2 \cdot I''_{K3}$
- dreipoliger Kurzschluss $I''_{K3} = 2 / \sqrt{3} \cdot I''_{K2}$
- gleiche Ströme
- gleiche Ausschaltzeiten

4.1 Lichtbogenleistung zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen ohne Versicherungen

Bei gleichem Kurzschlussstrom ist die Lichtbogenleistung von dreipoligen Störlichtbögen annähernd das Zweifache von zweipoligen Störlichtbögen (Bild 9).

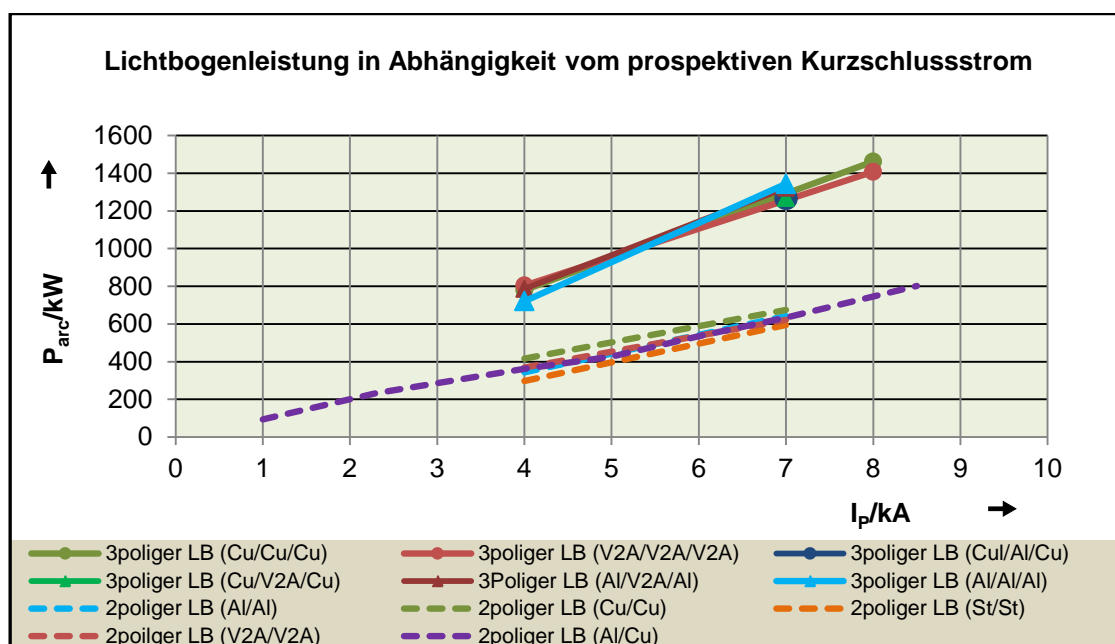


Bild 9 – Lichtbogenleistungen zweipoliger und dreipoliger Kurzschlussströme

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

4.2 Lichtbogenenergie zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen ohne Vorsicherungen

Im Bild 10 sind die Kennlinien der Ergebnisse von zweipoligen Störlichtbogenprüfungen, von dreipoligen Störlichtbogenprüfungen und die nach BGI/GUV-I 5188 für dreipolige Kurzschlüsse berechneten Kennlinie dargestellt.

Bei gleichem Kurzschlussstrom sind auch die ermittelten Lichtbogenenergien dreipoliger Störlichtbögen annähernd das Zweifache der ermittelten Lichtbogenenergien von zweipoligen Störlichtbögen.

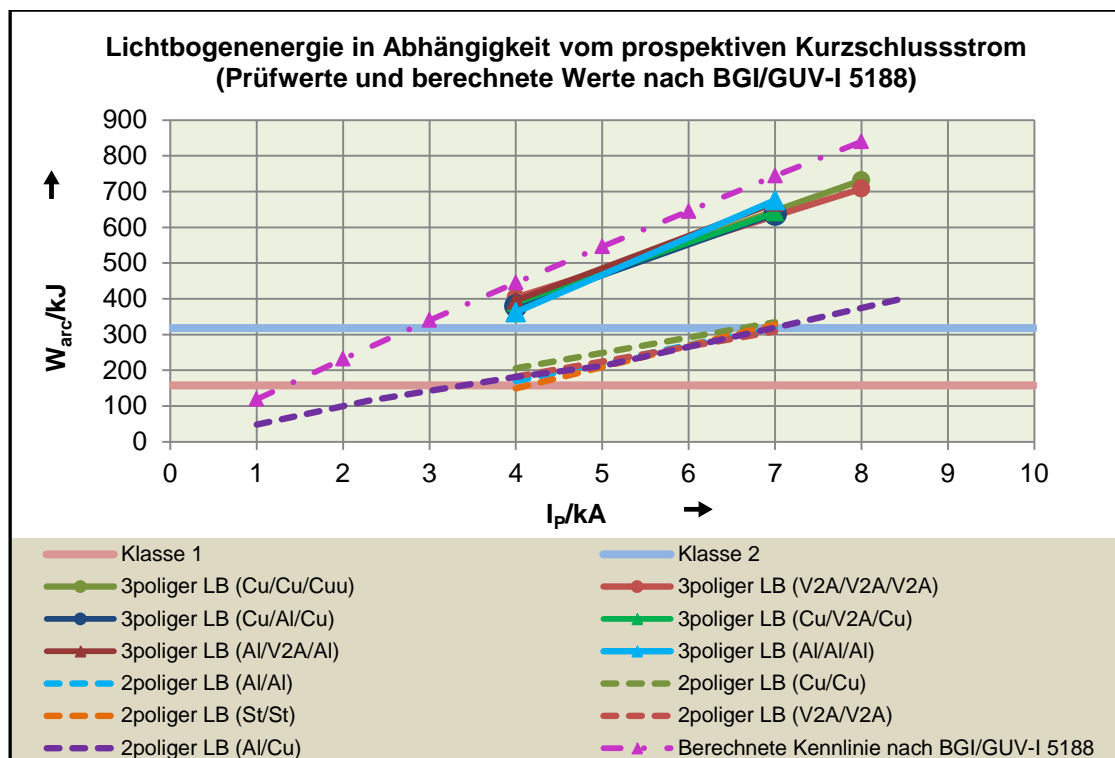


Bild 10 – Lichtbogenenergien von zweipoligen und dreipoligen Störlichtbogenprüfungen und nach BGI/GUV-I 5188 berechnete Lichtbogenenergien

Die Berechnung (Hochrechnung) von Lichtbogenenergien für den dreipoligen Kurzschluss mit den ermittelten Werten von zweipoligen Kurzschlüssen erfolgt (Ergebnis aus Vergleichstests) auf der Grundlage nach (2).

$$W_{LB3} / W_{LB2} = 2 \quad (2)$$

4.3 Direkte Einwirkenergie zweipoliger und dreipoliger Störlichtbogenprüfungen ohne Versicherungen

Im Bild 11 sind die Kennlinien der Ergebnisse von zweipoligen Störlichtbogenprüfungen und von dreipoligen Störlichtbogenprüfungen dargestellt.

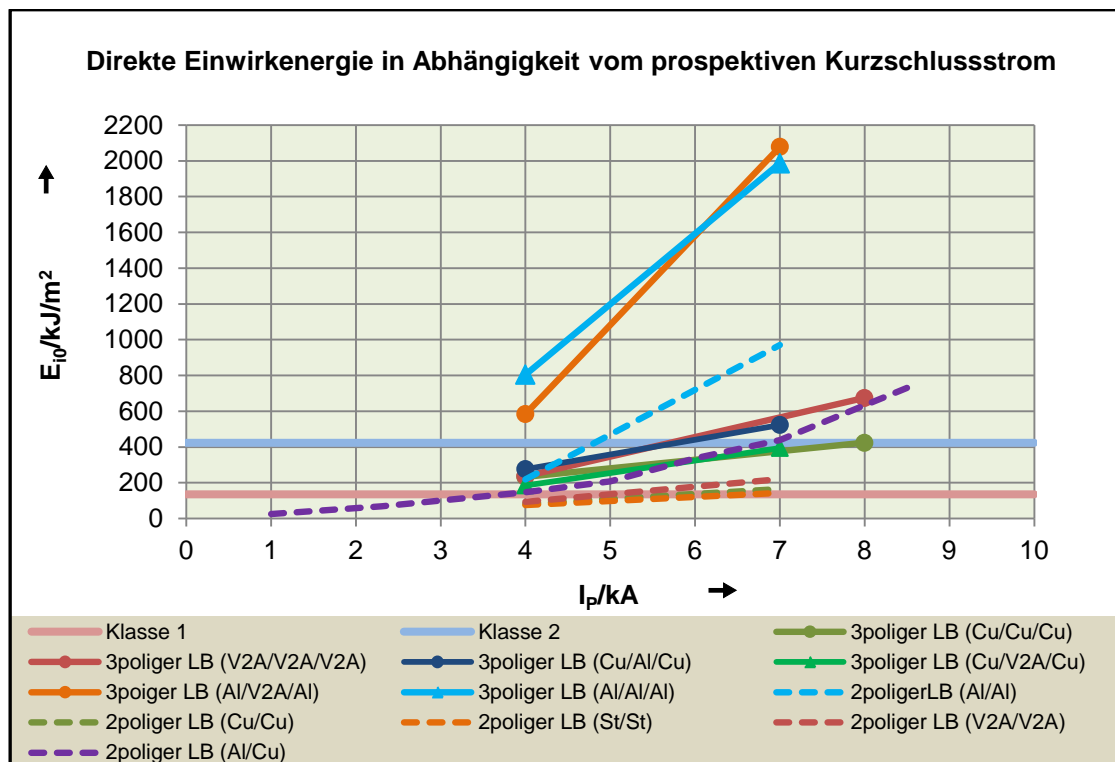


Bild 11 – Direkte Einwirkenergie von zweipoligen und dreipoligen Störlichtbogenprüfungen

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Bei gleichem Kurzschlussstrom sind auch die ermittelten direkten Einwirkenergien dreipoliger Störlichtbögen annähernd das Zweifache der ermittelten direkten Einwirkenergien von zweipoligen Störlichtbögen.

Auf der Basis nach (3) erfolgt die Berechnung (Hochrechnung) von direkten Einwirkenergien für den dreipoligen Kurzschluss mit den ermittelten Werten von zweipoligen Kurzschlüssen (Ergebnis aus Vergleichstests).

$$E_{i03} / E_{i02} = 2 \quad (3)$$

4.4 Berechnete Lichtbogenenergien aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen für dreipoligen Kurzschluss

4.4.1 Berechnete Lichtbogenenergien für gG - Sicherungen

In der Tabelle 2 sind die ermittelten Lichtbogenenergien von den zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit den nach (2) berechneten Lichtbogenenergien für den dreipoligen Kurzschluss in Abhängigkeit von den Sicherungsbemessungsströmen für gG – Sicherungen angegeben.

Festzustellen sind einige Änderungen gegenüber den Ergebnissen aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen hinsichtlich der Einhaltung der Klasse 1 oder Klasse 2 aufgrund der berechneten (zweifachen) Lichtbogenenergie.

Tabelle 2 – Aus den Lichtbogenenergien zweipoliger Kurzschlussströme berechnete Lichtbogenenergien für dreipoligen Kurzschlussströme (gG-Sicherungen)

Lichtbogenenergie W_{arc}														
Zweipoliger prospektiver Kurzschlussstrom							I_{nSi}	Dreipoliger prospektiver Kurzschlussstrom						
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>
1,1	-	-	-	-	-	-	50 A	2,2	-	-	-	-	-	-
3,9	-	-	-	-	-	-	63 A	7,8	-	-	-	-	-	-
17,2	-	-	-	-	-	-	80 A	34,4	-	-	-	-	-	-
73,0	1,1	1,7	-	-	-	-	100 A	146	2,1	3,4	-	-	-	-
150,1	1,3	1,1	-	-	-	-	125 A	300,2	2,7	2,2	-	-	-	-
-	37,0	3,4	-	-	-	-	160 A	-	74,0	6,7	-	-	-	-
-	106,5	5,4	-	-	11,0	-	200 A	-	213,0	10,8	-	-	22,0	-
-	111,4	33,0	15,0	-	10,3	-	224 A	-	222,8	66,0	29,9	-	20,5	-
-	305,0	43,8	14,3	-	13,0	-	250 A	-	610,0	87,7	28,6	-	26,0	-
-	1050,0	211,5	135,3	34,4	23,5	-	315 A	-	2100,0	423,0	270,7	68,8	47,0	-
-	-	445,6	221,5	67,4	34,5	-	355 A	-	-	891,2	443,0	134,8	69,0	-
-	-	-	840,0	120,3	45,0	-	400 A	-	-	-	1680,0	240,7	90,0	-
-	-	-	404,8	118,9	78,3	9,2	425 A	-	-	-	809,6	237,8	156,6	18,4
-	-	-	-	1170,0	718,0	65,6	500 A	-	-	-	-	2340,0	1436,0	131,2

Legende: Klasse 1 Klasse 2 >Klasse 1 und 2

Die diskreten Werte für gG – Sicherungen zur Einhaltung der Klasse 1 und der Klasse 2 in Abhängigkeit des Sicherungsbemessungsstromes beinhaltet die Tabelle 3.

Für einen prospektiven Kurzschlussstrom kann aus der Tabelle 3 die erforderliche Vorsicherung zur Einhaltung der Klasse 1 oder der Klasse 2 ausgewählt werden.

Die Ergebnisse der Tabelle 2 widerspiegeln sich in den Bildern 11 bis 13.

Tabelle 3 – Zusammenfassung über die Einhaltung der Schutzklassen berechneter Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse (gG-Sicherungen)

		Übersicht der Einhaltung der Schutzklassen in Abhängigkeit des Bemessungsstromes (Lichtbogenenergie)												
		gG – Sicherungseinsätze I_{nSi} / A												
		NH00					NH1			NH2			NH3	
		50	63	80	100	125	160	200	224	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	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
$5 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 6 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
$6 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 7 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
$7 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 10 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
$I''_{K3} \geq 10 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Legende + Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

Die Kurvenverläufe der berechneten Werte für die Lichtbogenenergie in Abhängigkeit des Sicherungsbemessungsstromes sind im Bild 11 dargestellt.

Der prospektive Kurzschlussstrom von 1 kA (Bild 12) wurde mit einer Trendlinie (4) verlängert.

$$W_{LB1kA} = 0,0554 \cdot I_{nSi}^2 - 5,6392 \cdot I_{nSi} + 142,2 \quad (4)$$

Zur Analyse der Kurvenverläufe bezüglich der Einhaltung der Klassen 1 bzw. 2 wurden auch für die Sicherungsbemessungsströme 100 A (5), 125 A (6), 160 A (7), 200 A (8) und 224 A (9) im Bild 13 Trendlinien hinzugefügt.

$$W_{LBSi100A} = 37,138 \cdot I_p^2 - 233,22 \cdot I_p + 342,08 \quad (5)$$

$$W_{LBSi125A} = 76,21 \cdot I_p^2 - 480,37 \cdot I_p + 704,36 \quad (6)$$

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

$$W_{LBSI160A} = -39,565 \cdot I_p + 165 \quad (7)$$

$$W_{LBSI200A} = 13,053 \cdot I_p^2 - 141,72 \cdot I_p + 363,42 \quad (8)$$

$$W_{LBSI224A} = 17,904 \cdot I_p^2 - 202,91 \cdot I_p + 594,09 \quad (9)$$

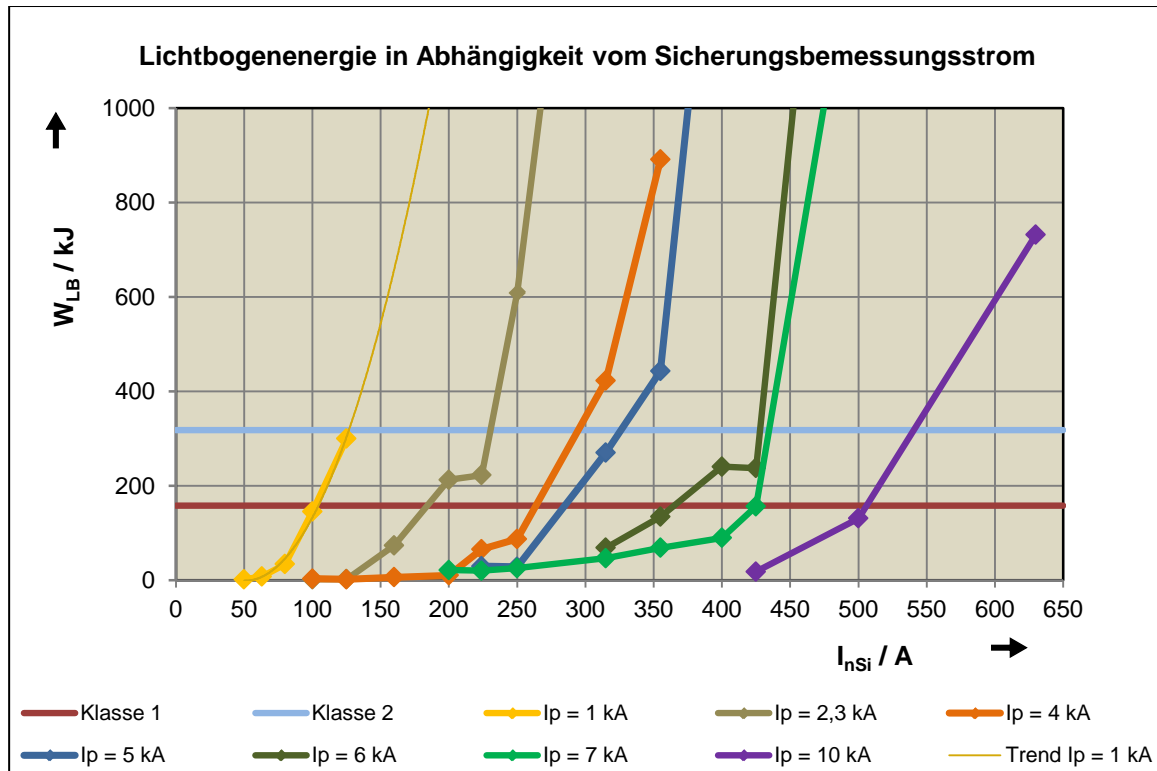


Bild 12 – Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Aus Bild 12 und Bild 13 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätze und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

- 1 kA / 50 A, 63 A, 80 A, 100 A
- 2,3 kA / 100 A, 125 A, 160 A
- 4 kA / 100 A, 125 A, 160 A, 200 A, 224 A, 250 A

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

- 5 kA / 224 A, 250 A
- 6 kA / 315 A, 355 A
- 7 kA / 200 A, 224 A, 250 A, 315 A, 355 A, 400 A, 425 A
- 10 kA / 425 A, 500 A

und die Klasse 2

- 1 kA / 125 A
- 2,3 kA / 200 A, 224 A
- 5 kA / 315 A
- 6 kA / 400 A, 425 A

eingehalten wird.

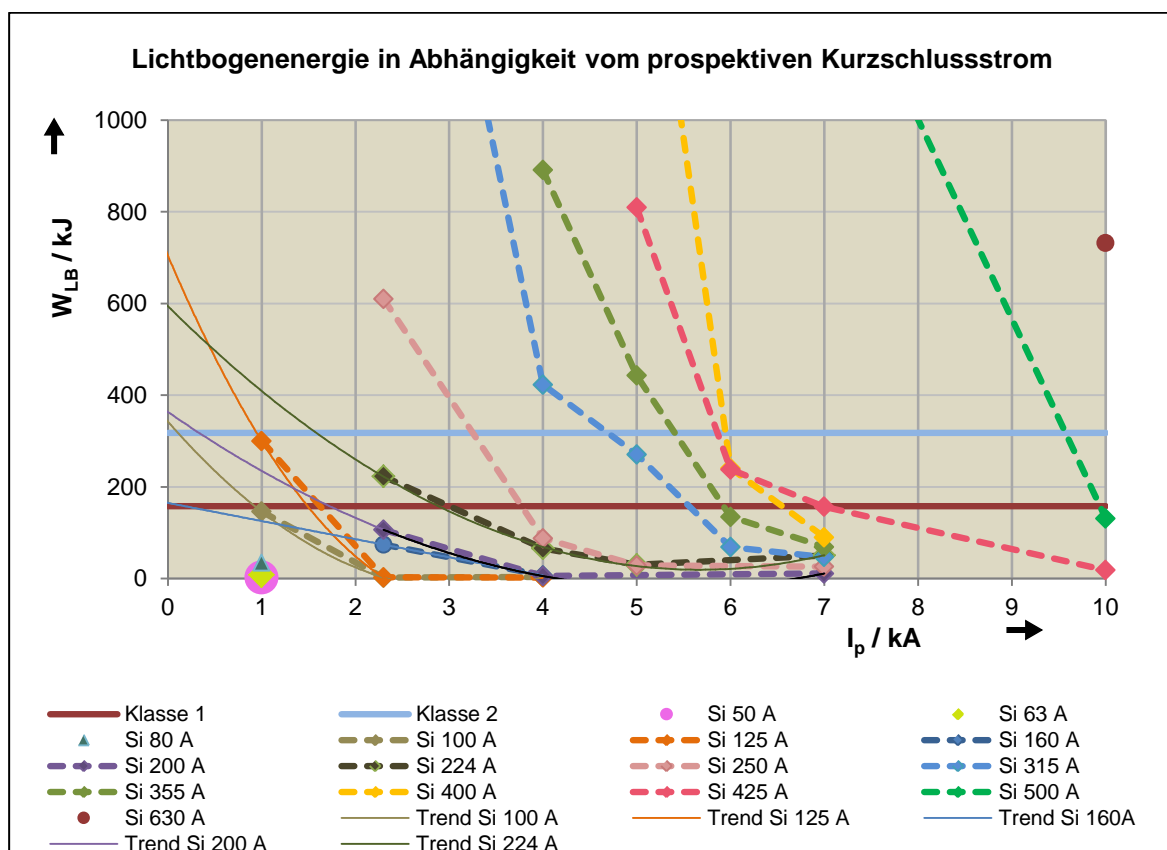


Bild 13 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Aus den im Bild 14 dargestellten Verhältnissen der prospektiven Kurzschlussströme und Sicherungsbemessungsströme wurde der höchste Wert (Quotient) für die Klasse 1 (158 kJ) und die Klasse 2 (318 kJ) ermittelt. Mit dem ermittelten Wert kann nach (10) ein Bemessungsstrom, der die Einhaltung der Klasse 1 oder Klasse 2 garantiert, für einen Kurzschlussstrom / Fehlerstrom der Anlage berechnet werden.

$$\text{Bemessungsstrom} = \text{Kurzschlussstrom der Anlage} / \text{ermittelter Wert} \quad (10)$$

Ermittelter Wert für die

Klasse 1 $I_P / I_{Si} = 20$

Klasse 2 $I_P / I_{Si} = 19$

Beispiel: Kurzschlussstrom / 20 = Bemessungsstrom für Klasse 1

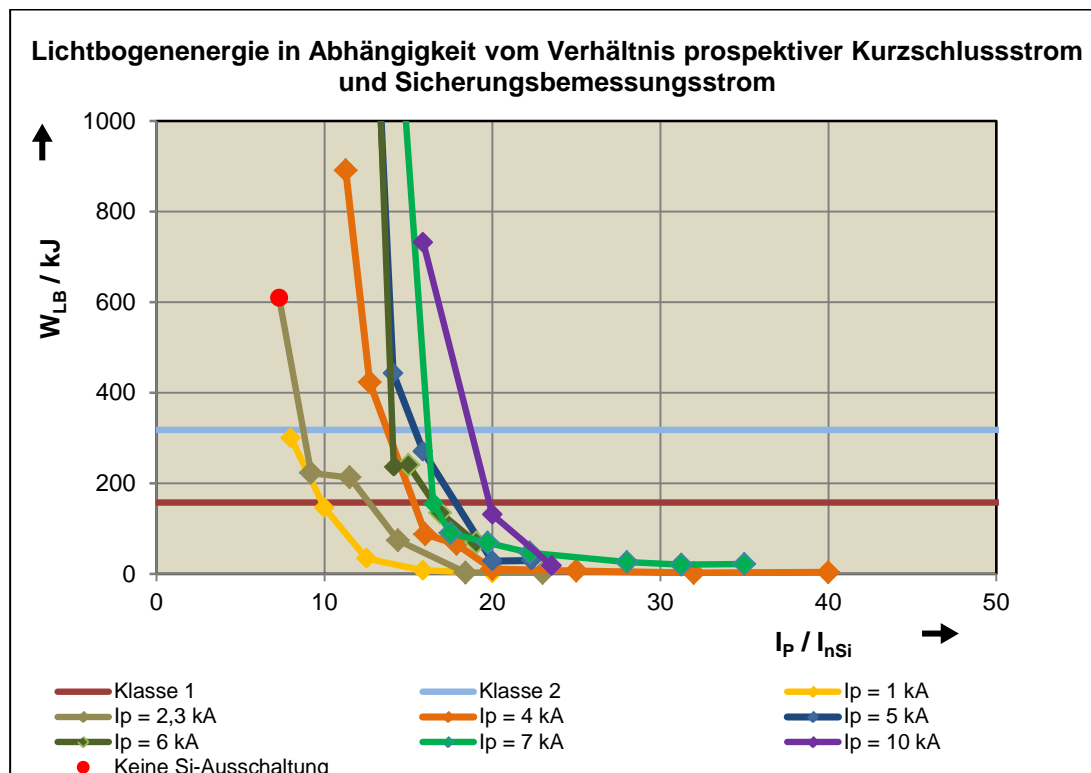


Bild 14 – Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiven Kurzschlussstrom und Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

4.4.2 Berechnete Lichtbogenenergien für gTr - Sicherungen

Für die gTr – Sicherungen sind in Tabelle 4 die ermittelten Lichtbogenenergien der zweipoligen Störlightbogenprüfungen mit den nach (2) berechneten Lichtbogenenergien für den dreipoligen Kurzschluss in Abhängigkeit von der Scheinleistung aufgeführt.

Tabelle 4 – Aus den Lichtbogenenergien zweipoliger Kurzschlussströme berechnete Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlussströme (gTr-Sicherungen)

Lichtbogenenergie W_{arc}											
Zweipoliger prospektiver Kurzschlussstrom					S_n	I_{rat}	Dreipoliger prospektiver Kurzschlussstrom				
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>
144	174	149	104	14	250 kVA	361 A	288	348	298	208	28
-	325	400	273	11	315 kVA	455 A	-	650	800	546	22
-	620	528	-	271	400 kVA	577 A	-	1240	1056	-	542

Legende: Klasse 1 Klasse 2 >Klasse 1 und 2

Tabelle 5 – Zusammenfassung über die Einhaltung der Schutzklassen berechneter Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse (gTr-Sicherungen)

Übersicht der Einhaltung der Kriterien für die Schutzklassen (Lichtbogenenergie)				
		gTr – Sicherungseinsätze S_n (I_{rat})		
		NH3		
		250 kVA (361 A)	315 kVA (455 A)	400 kVA (577 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			
$6 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 7 \text{ kA}$	Klasse 1			
	Klasse 2	+		
$7 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 10 \text{ kA}$	Klasse 1			
	Klasse 2	+		
$I''_{K3} \geq 10 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	
	Klasse 2	+	+	

Legende + Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlightbögen

Aus Bild 15 und Bild 16 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätze und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Scheinleistung) die Klasse 1

- 10 kA / 250 kVA, 315 kVA

und die Klasse 2

- 4 kA / 250 kVA
- 6 kA / 250 kVA
- 7 kA / 250 kVA
- 7 kA / 250 kVA
- eingehalten wird.

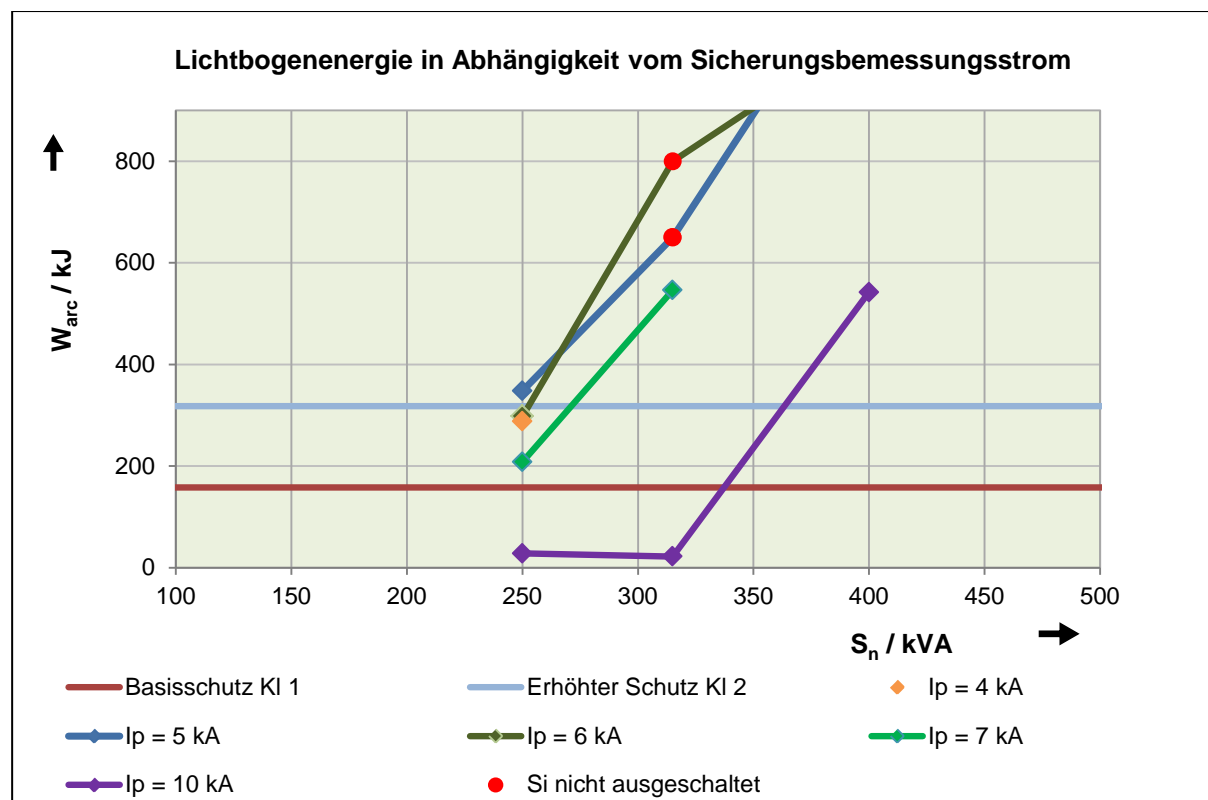


Bild 15 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

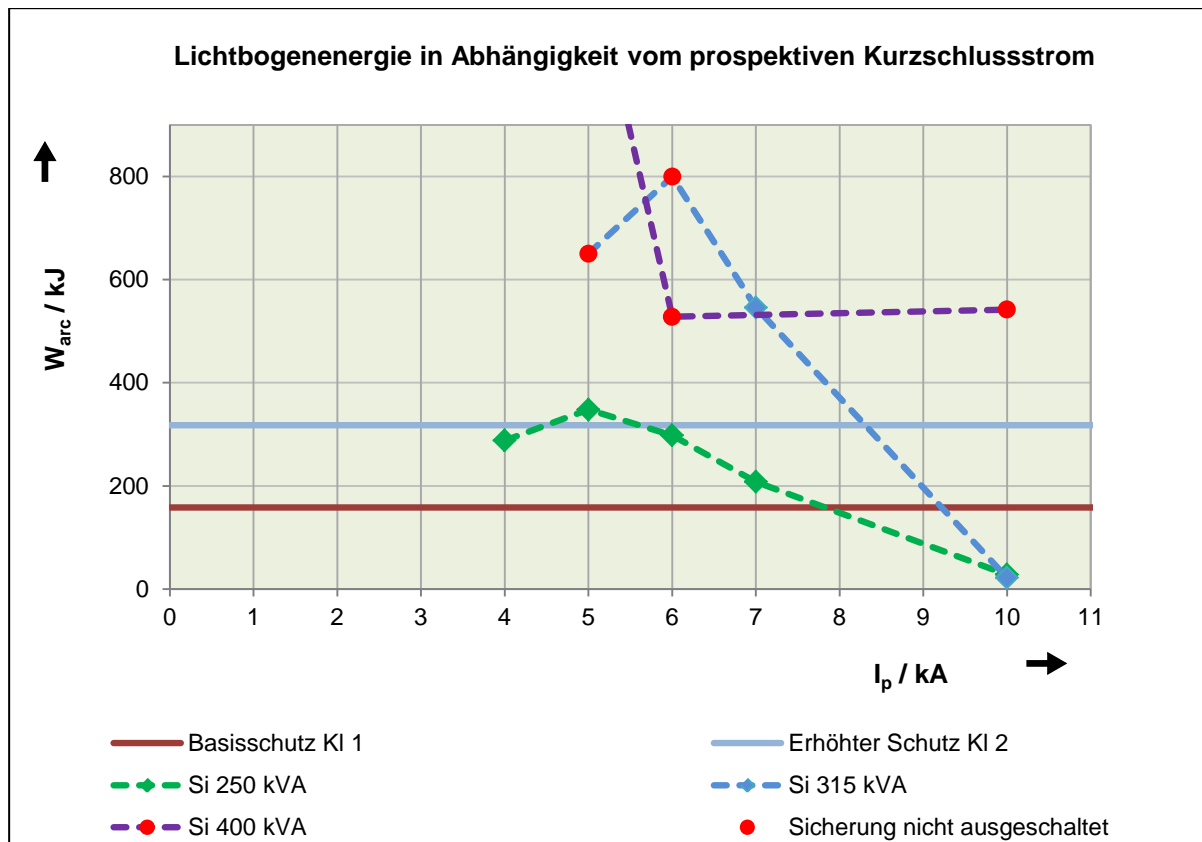


Bild 16 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

4.4.3 Berechnete Lichtbogenenergien für Arbeitsschutz - Sicherungen

In Tabelle 6 sind die ermittelten Lichtbogenenergien von den zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit den nach (2) berechneten Lichtbogenenergien für den dreipoligen Kurzschluss in Abhängigkeit von den Sicherungsbemessungsströmen für Arbeitsschutz – Sicherungen aufgeführt.

Der Sicherungseinsatz 315 A hat bei dem prospektiven Kurzschlussstrom von 1 kA nicht ausgeschaltet, deshalb kann dieser Wert nicht bewertet werden.

Tabelle 6 – Aus den Lichtbogenenergien zweipoliger Kurzschlussströme berechnete Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlussströme (Arbeitsschutz-Sicherungen)

Lichtbogenenergie W_{arc}								
Zweipoliger prospektiver Kurzschlussstrom				I_{nSi}	Dreipoliger prospektiver Kurzschlussstrom			
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>
1,6	-	-	-	160 A	3,2	-	-	-
8,2	-	-	-	200 A	16,4	-	-	-
79,6	3,1	-	1,5	250 A	159,2	6,2	-	3,0
78,3	4,0	-	2,8	315 A	156,6	8,0	-	5,6
-	9,8	5,8	5,2	350 A	-	19,6	11,6	10,4
-	58,6	7,0	5,3	400 A	-	117,2	14,0	10,6
-	893,7	21,6	8,6	500 A	-	1787,4	43,2	17,2

Legende: Klasse 1 Klasse 2 >Klasse 1 und 2

Für die Arbeitsschutz-Sicherungen sind die diskreten Werte in Abhängigkeit des Sicherungsbemessungsstromes zur Einhaltung der Klasse 1 und der Klasse 2 in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7 – Zusammenfassung über die Einhaltung der Schutzklassen berechneter Lichtbogenenergien für dreipolige Kurzschlüsse (Arbeitsschutz-Sicherungen)

Übersicht der Einhaltung der Kriterien für die Schutzklassen (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

In das Bild 17 wurde eine Trendlinie für den prospektiven Kurzschlussstrom von 1 kA (11) und in das Bild 18 Trendlinien für Sicherungsbemessungsströme 400 A (12) und 250 A (13) hinzugefügt.

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

$$W_{LBS4kA} = 1E-23 \cdot I_p^{10,337} \quad (11)$$

$$W_{LBSi250A} = 29,127 \cdot I_p^2 - 213,81 \cdot I_p + 343,88 \quad (12)$$

$$W_{LBSi400A} = 21,224 \cdot I_p^2 - 194,42 \cdot I_p + 452,09 \quad (13)$$

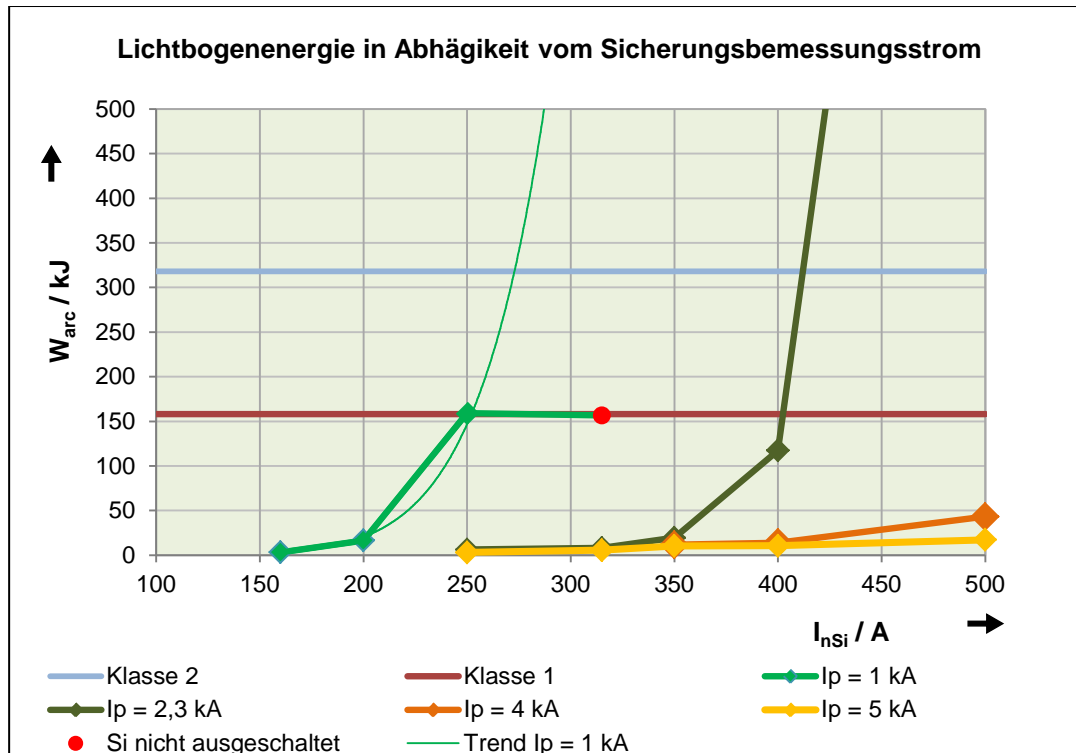


Bild 17 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Aus Bild 17 und Bild 18 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätze und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

- 1 kA / 160 A, 200 A
- 2,3 kA / 250 A, 315 A, 350 A, 400 A
- 4 kA / 350 A, 400 A, 500 A
- 5 kA / 250 A, 315 A, 355 A, 400 A, 500 A

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

und die Klasse 2

- 1 kA / 250 A

eingehalten wird.

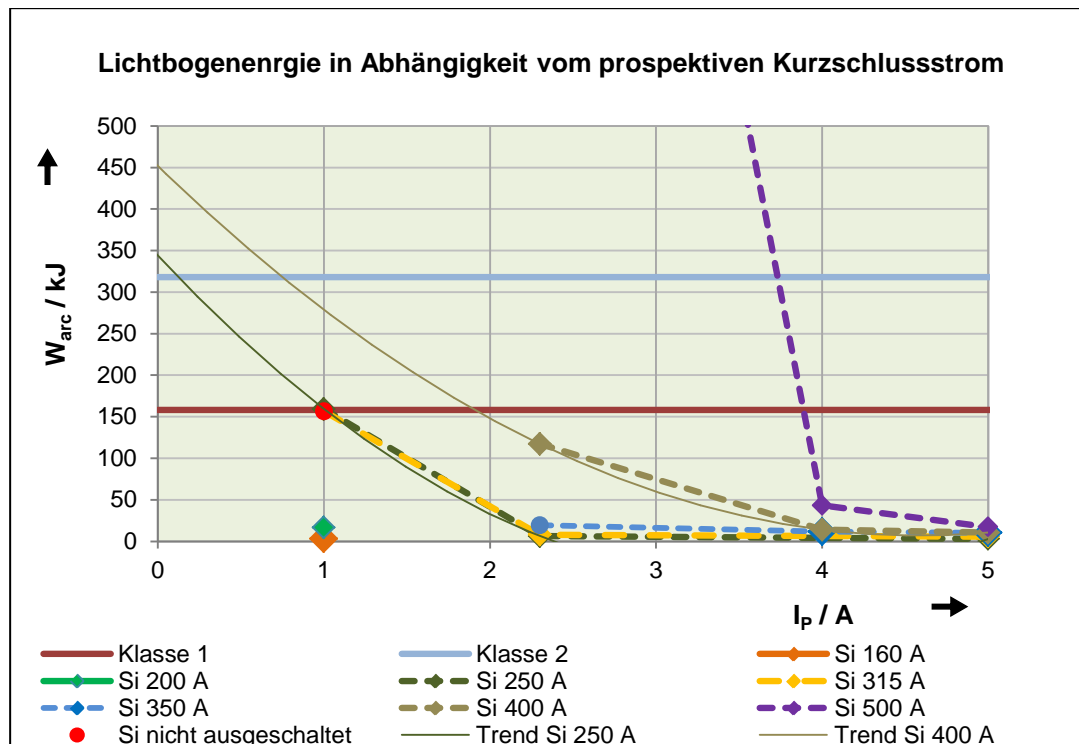


Bild 18 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Aus dem im Bild 19 dargestellten Verhältnisse der prospektiven Kurzschlussströme und Sicherungsbemessungsströme wurde der höchste Wert (Quotient) für die Klasse 1 (158 kJ) und die Klasse 2 (318 kJ) ermittelt.

Ermittelter Wert für die

Klasse 1 $I_P / I_{Si} = 6$

Klasse 2 $I_P / I_{Si} = 6$

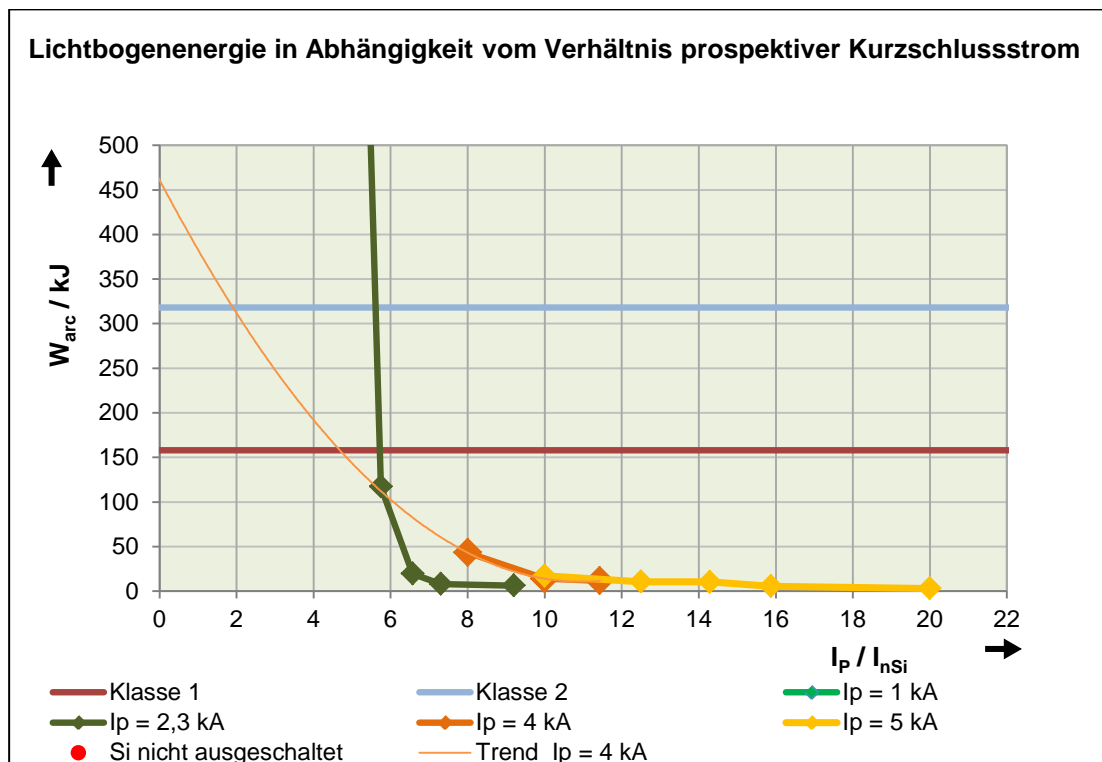


Bild 19 - Lichtbogenenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiven Kurzschlussstrom und Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

4.5 Berechnete direkte Einwirkenergien aus zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Vorsicherungen für dreipoligen Kurzschluss

4.5.1 Berechnete direkte Einwirkenergien für gG - Sicherungen

In der Tabelle 8 sind die ermittelten direkter Einwirkenergien zweipoliger Störlichtbogenprüfungen mit den nach (3) berechneten direkten Einwirkenergien für den dreipoligen Kurzschluss in Abhängigkeit von den Sicherungsbemessungsströmen für gG – Sicherungen angegeben.

Tabelle 8 – Aus den direkten Einwirkenergien zweipoliger Kurzschlussströme berechnete direkte Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlussströme (gG-Sicherungen)

Direkte Einwirkenergie E_{i0}														
Zweipoliger prospektiver Kurzschlussstrom							I_{nSi}	Dreipoliger prospektiver Kurzschlussstrom						
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
kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2		kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2
1,3	-	-	-	-	-	-	50 A	2,6	-	-	-	-	-	-
2,4	-	-	-	-	-	-	63 A	4,8	-	-	-	-	-	-
6,0	-	-	-	-	-	-	80 A	12,0	-	-	-	-	-	-
35,8	1,8	2,1	-	-	-	-	100 A	71,6	3,6	4,2	-	-	-	-
65,3	2,5	5,7	-	-	-	-	125 A	130,6	5,0	11,4	-	-	-	-
-	23,2	3,9	-	-	-	-	160 A	-	46,4	7,8	-	-	-	-
-	73,6	5,4	-	-	4,3	-	200 A	-	147,2	10,8	-	-	8,6	-
-	64,0	23,5	7,7	-	8,5	-	224 A	-	128,0	47,0	15,4	-	17,0	-
-	285,5	35,6	8,4	-	5,7	-	250 A	-	571,0	71,2	16,8	-	11,4	-
-	1340,0	179,2	108,2	30,1	11,7	-	315 A	-	2680,0	358,4	216,4	60,2	23,4	-
-	-	747,4	221,5	52,2	22,6	-	355 A	-	-	1494,8	443,0	104,4	45,2	-
-	-	-	1910,0	103,2	39,5	-	400 A	-	-	-	3820,0	206,4	79	-
-	-	-	776,1	65,3	65,1	7,6	425 A	-	-	-	1552,2	130,6	130,2	15,2
-	-	-	-	2360,0	1950,0	39,9	500 A	-	-	-	-	4720,0	3900,0	79,8

Legende: Klasse 1 Klasse 2 >Klasse 1 und 2

Tabelle 9 – Zusammenfassung über die Einhaltung der Schutzklassen berechneter direkter Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlüsse (gG-Sicherungen)

Übersicht der Einhaltung der Schutzklassen in Abhängigkeit des Bemessungsstromes (direkte Einwirkenergie)														
		gG – Sicherungseinsätze I_{nSi} / A												
		NH00					NH1			NH2				NH3
		50	63	80	100	125	160	200	224	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	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
$5 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 6 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
$6 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 7 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
$7 \text{ kA} \leq I''_{K3} < 10 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$I''_{K3} \geq 10 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Klasse 2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Legende + Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Die diskreten Werte für gG – Sicherungen zur Einhaltung der Klasse 1 und der Klasse 2 in Abhängigkeit des Sicherungsbemessungsstromes beinhaltet die Tabelle 9.

Die prospektiven Kurzschlussströme 1 kA (14), 7 kA (15) und 10 kA (16) im Bild 20 und der Sicherungsbemessungsstrom von 100 A (17) im Bild 21 sind zur Abschätzung der Kurvenverläufe mit Trendlinien versehen.

$$W_{LB1kA} = 0,0231 \cdot I_{nSi}^2 - 2,2656 \cdot I_{nSi} + 55,598 \quad (14)$$

$$W_{LB7kA} = 0,0037 \cdot I_{nSi}^2 - 1,8774 \cdot I_{nSi} + 242,58 \quad (15)$$

$$W_{LB10kA} = 0,8613 \cdot I_{nSi} - 350,87 \quad (16)$$

$$W_{LBSi100A} = 8,5763 \cdot I_p^2 - 103,61 \cdot I_p + 321,57 \quad (17)$$

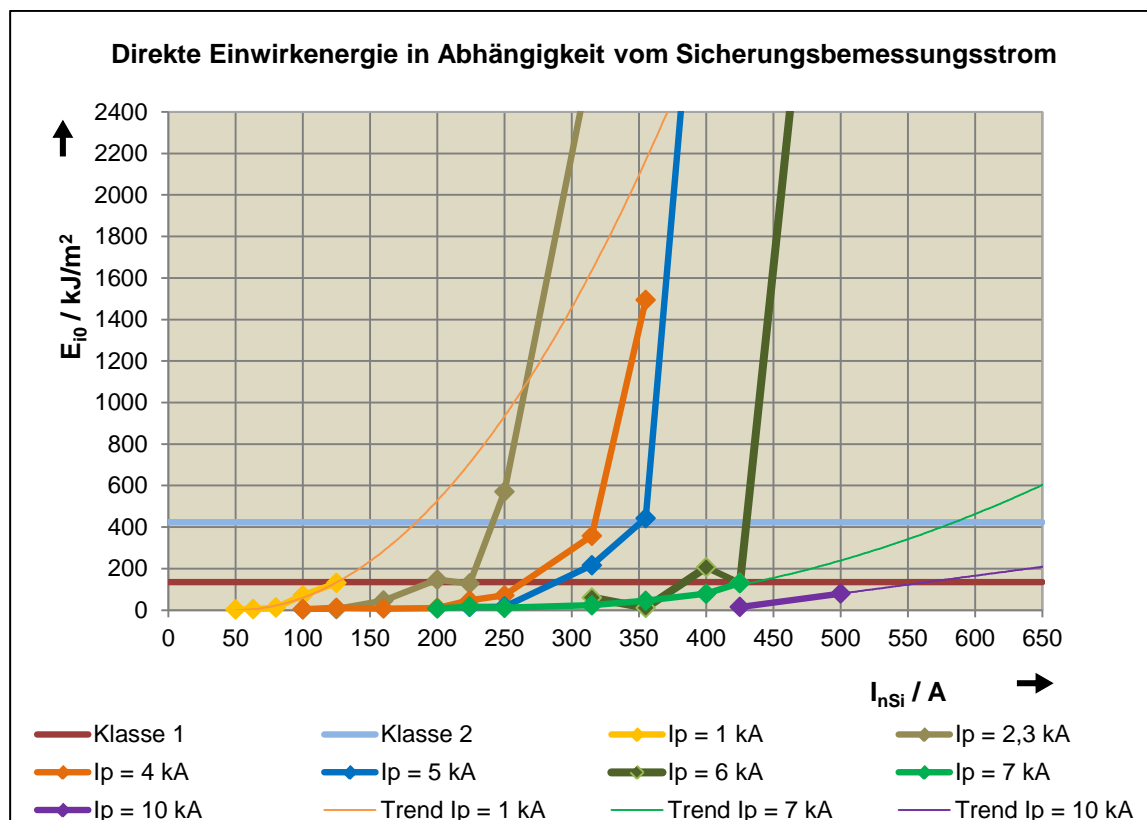


Bild 20 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Aus Bild 20 und Bild 21 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätze und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

- 1 kA / 50 A, 63 A, 80 A, 100 A, 125 A
- 2,3 kA / 100 A, 125 A, 160 A
- 4 kA / 100 A, 125 A, 160 A, 200 A, 224 A, 250 A
- 5 kA / 224 A, 250 A
- 6 kA / 315 A, 355 A, 425 A
- 7 kA / 200 A, 224 A, 250 A, 315 A, 355 A, 400 A, 425 A
- 10 kA / 425 A, 500 A

und die Klasse 2

- 1 kA / 200 A, 224 A
- 2,3 kA / 200 A, 224 A
- 5 kA / 315 A
- 6 kA / 400 A

eingehalten wird.

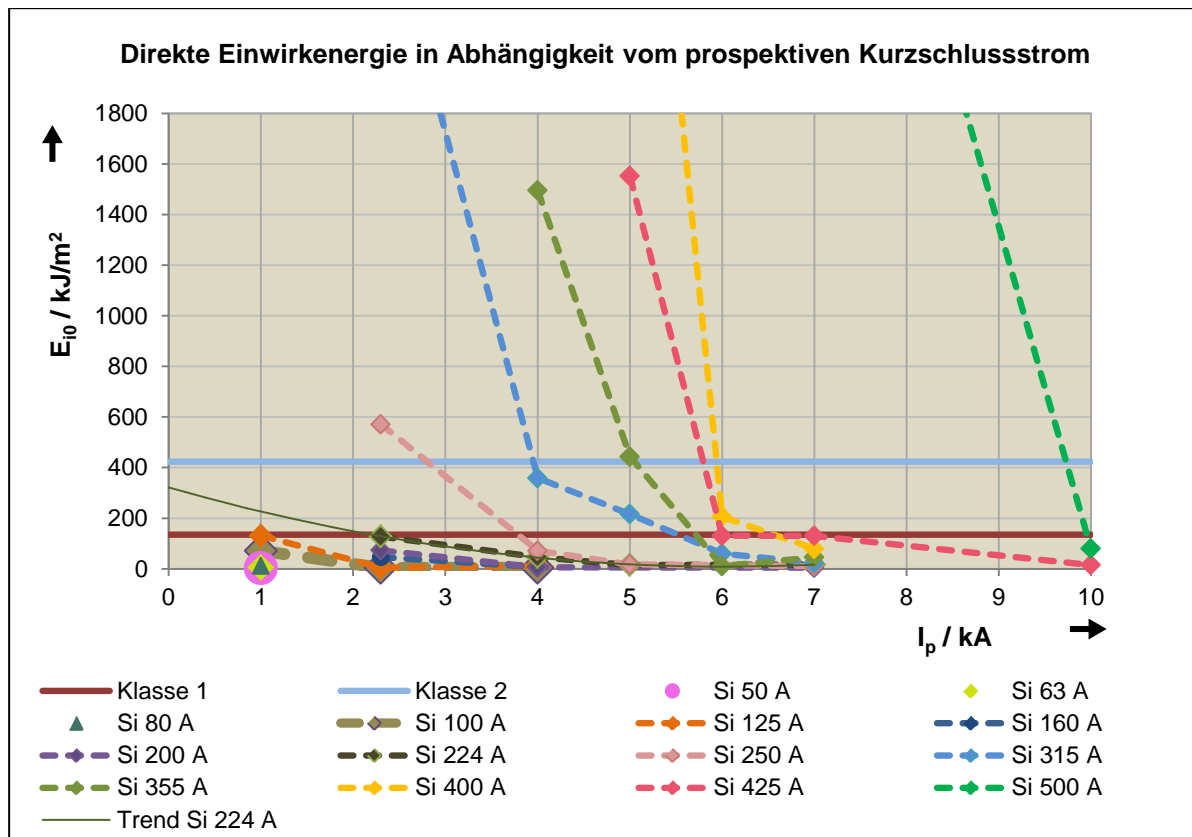


Bild 21 - Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

Aus dem im Bild 22 dargestellten Verhältnisse der prospektiven Kurzschlussströme und Sicherungsbemessungsströme wurde der höchste Wert (Quotient) für die Klasse 1 (135 kJ/m²) und die Klasse 2 (423 kJ/m²) ermittelt.

Ermittelter Wert für die

Klasse 1 $I_P / I_{Si} = 20$

Klasse 2 $I_P / I_{Si} = 19$

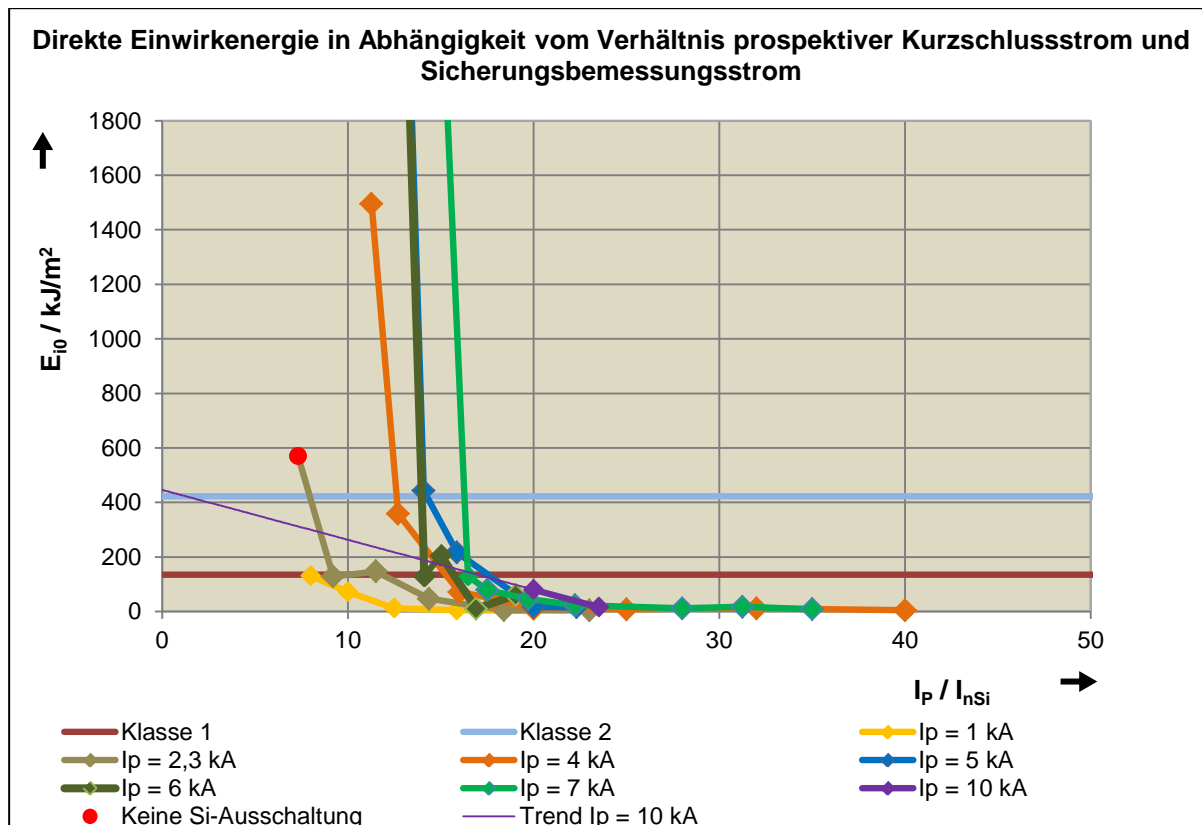


Bild 22 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiven Kurzschlussstrom und Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gG-Sicherungen)

4.5.2 Berechnete direkte Einwirkenergien für gTr - Sicherungen

Für die gTr – Sicherungen sind in Tabelle 10 die ermittelten direkten Einwirkenergien der zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit den nach (3) berechneten direkten Einwirkenergien für den dreipoligen Kurzschluss in Abhängigkeit von der Scheinleistung aufgeführt.

Bei den Sicherungseinsätzen 315 kVA und 400 kVA sind die Störlichtbögen während der Prüfungen mit prospektiven Kurzschlussströmen von 5 kA, 6 kA und 7 kA selbsttätig verlöscht und werden deshalb nicht bewertet.

Tabelle 10 – Aus den direkten Einwirkenergien zweipoliger Kurzschlussströme berechnete direkte Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlussströme (gTr-Sicherungen)

Direkte Einwirkenergie E_{i0}											
Zweipoliger prospektiver Kurzschlussstrom					S_n	I_{rat}	Dreipoliger prospektiver Kurzschlussstrom				
4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA			4 kA	5 kA	6 kA	7 kA	10 kA
kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2			kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2
129,8	128,7	121,0	93,2	7,4	250 kVA	361 A	259,6	257,4	242,0	186,4	14,8
-	291,0	544,3	329,5	10,2	315 kVA	455 A	-	582,0	1088,6	659,0	20,4
-	1370,0	1250,0	-	607,0	400 kVA	577 A	-	2740,0	2500,0	-	1214,0

Legende: Klasse 1 Klasse 2 >Klasse 1 und 2

Die diskreten Werte für "gTr" – Sicherungen zur Einhaltung der Klasse 1 und der Klasse 2 in Abhängigkeit des Sicherungsbemessungsstromes sind in der Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11 – Zusammenfassung über die Einhaltung der Schutzklassen berechneter 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)	315 kVA (455 A)	400 kVA (577 A)
$4 \text{ kA} \leq I_{K3}^n < 5 \text{ kA}$	Klasse 1			
	Klasse 2	+		
$5 \text{ kA} \leq I_{K3}^n < 6 \text{ kA}$	Klasse 1			
	Klasse 2	+		
$6 \text{ kA} \leq I_{K3}^n < 7 \text{ kA}$	Klasse 1			
	Klasse 2	+		
$7 \text{ kA} \leq I_{K3}^n < 10 \text{ kA}$	Klasse 1			
	Klasse 2	+		
$I_{K3}^n \geq 10 \text{ kA}$	Klasse 1	+	+	
	Klasse 2	+	+	

Legende + Einhaltung der Klasse 1 bzw. Klasse 2

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

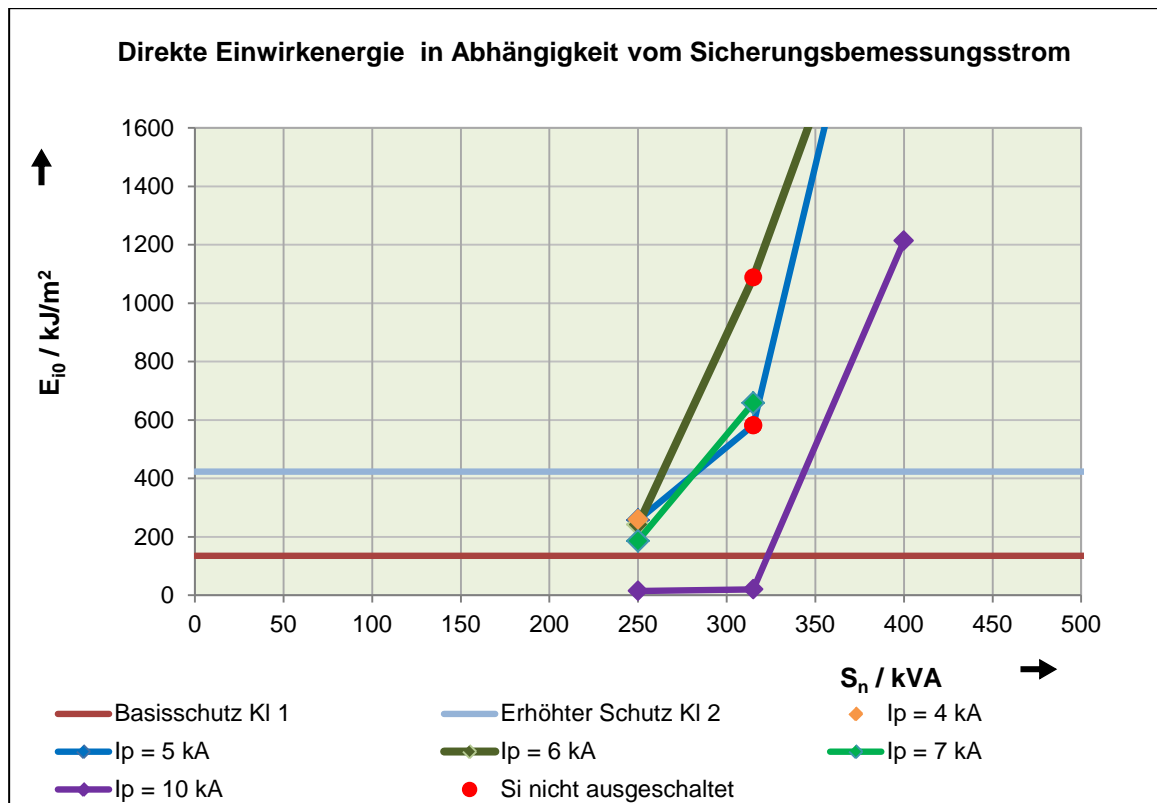


Bild 23 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungs Bemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

Aus Bild 23 und Bild 24 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätze und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Scheinleistung) die Klasse 1

- 10 kA / 250 kVA, 315 kVA

und die Klasse 2

- 4 kA / 250 kVA
- 5 kA / 250 kVA
- 6 kA / 250 kVA
- 7 kA / 250 kVA
- eingehalten wird.

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

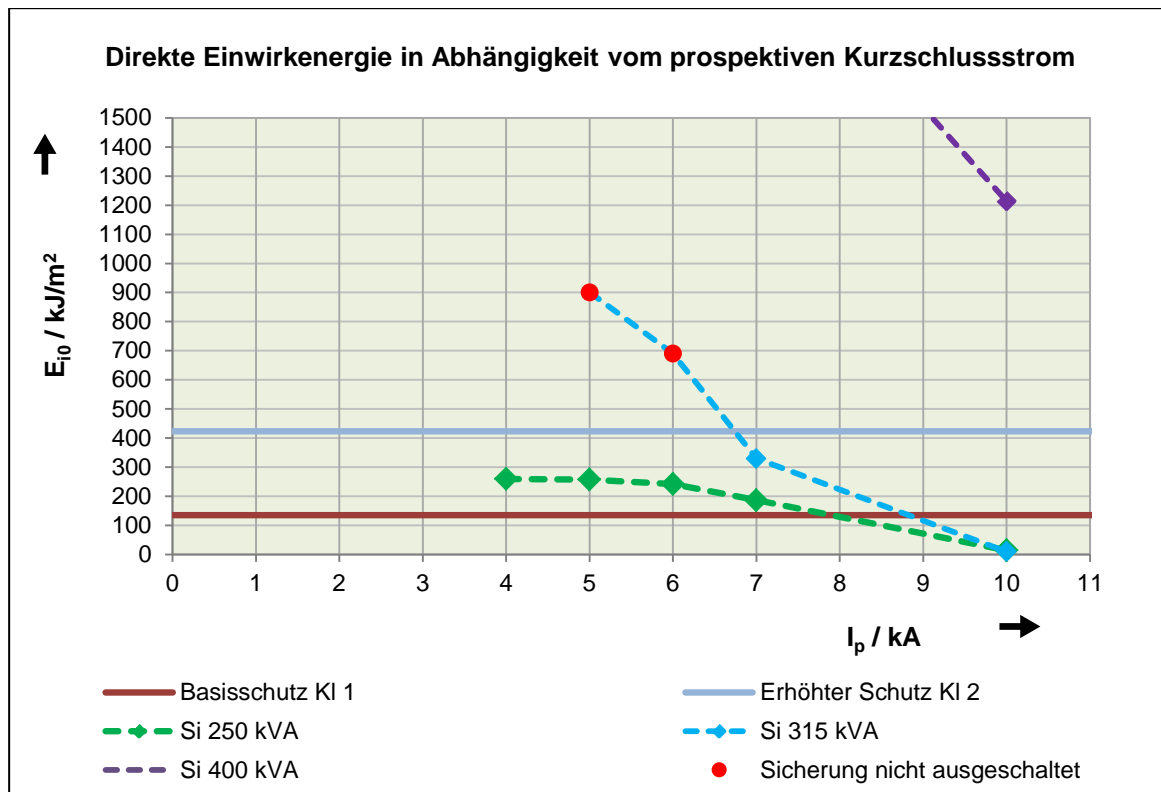


Bild 24 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit gTr-Sicherungen)

4.5.3 Berechnete Lichtbogenenergien für Arbeitsschutz - Sicherungen

In Tabelle 12 sind die ermittelten Lichtbogenenergien von den zweipoligen Störlichtbogenprüfungen mit den nach (3) berechneten Lichtbogenenergien für den dreipoligen Kurzschluss in Abhängigkeit von den Sicherungsbemessungsströmen für Arbeitsschutz – Sicherungen aufgeführt.

Der Sicherungseinsatz 315 A hat bei dem prospektiven Kurzschlussstrom von 1 kA nicht ausgeschaltet, deshalb kann dieser Wert nicht bewertet werden.

Tabelle 12 – Aus den direkten Einwirkenergien zweipoliger Kurzschlussströme berechnete direkten Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlussströme (Arbeitsschutz-Sicherungen)

Direkte Einwirkenergie E_{i0}								
Zweipoliger prospektiver Kurzschlussstrom				I_{nSi}	Dreipoliger prospektiver Kurzschlussstrom			
1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA		1 kA	2,3 kA	4 kA	5 kA
kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2		kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2	kJ/m^2
0,5	-	-	-	160 A	1,0	-	-	-
3,7	-	-	-	200 A	7,4	-	-	-
31,9	1,4	-	1,1	250 A	63,8	2,8	-	2,2
24,9	1,8	-	1,7	315 A	49,8	3,6	-	3,4
-	3,0	2,6	2,2	350 A	-	6,0	5,2	4,4
-	39,5	3,4	1,9	400 A	-	79	6,8	3,8
-	1094,4	10,6	4,1	500 A	-	2188,8	21,2	8,2

Legende: Klasse 1

Für die Arbeitsschutz-Sicherungen sind die diskreten Werte in Abhängigkeit des Sicherungsbemessungsstromes zur Einhaltung der Klasse 1 und der Klasse 2 in Tabelle 13 – Zusammenfassung über die Einhaltung der Schutzklassen angegeben.

Tabelle 13 – Zusammenfassung über die Einhaltung der Schutzklassen berechneter direkter Einwirkenergien für dreipolige Kurzschlüsse (Arbeitsschutz-Sicherungen)

Übersicht der Einhaltung der Kriterien für die Schutzklassen (direkte Einwirkenergie)								
		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

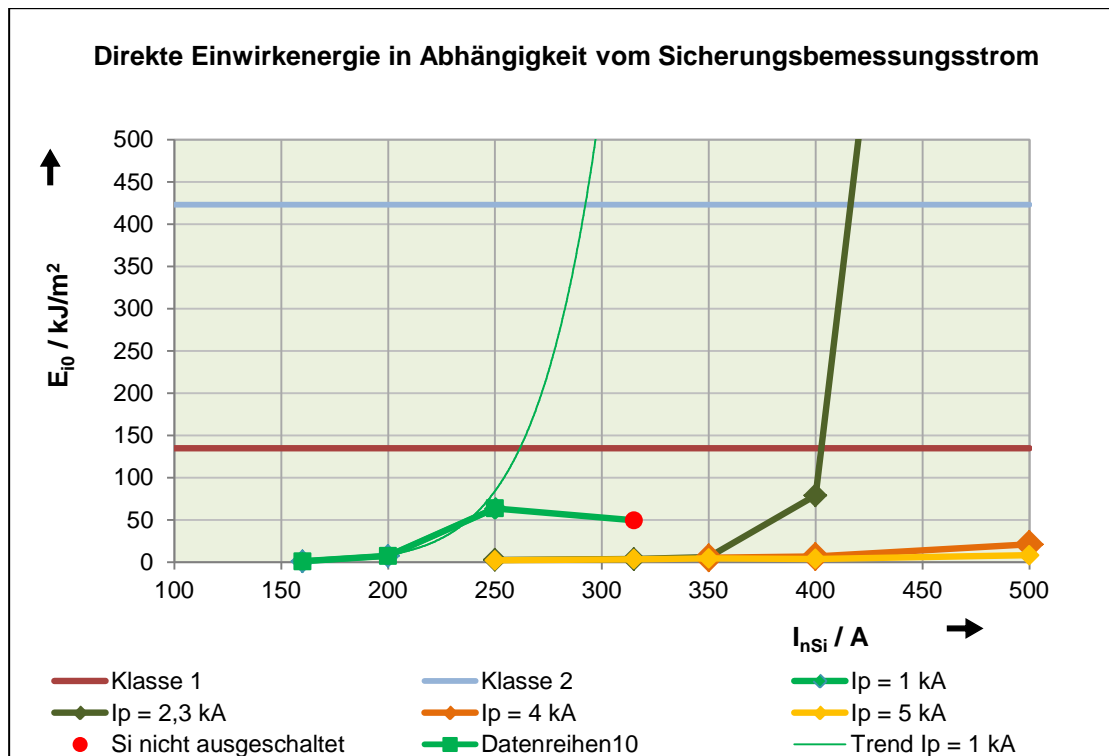


Bild 25 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Im Bild 25 wurde eine Trendlinie für den prospektiven Kurzschlussstrom von 1 kA (17) und im Bild 26 Trendlinien für Sicherungsbemessungsströme 400 A (18) und 315 A (19) hinzugefügt.

$$W_{LBS4kA} = 1E-23 \cdot I_p^{10,337} \quad (17)$$

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

$$W_{LBSi400A} = 14,619 \cdot I_p^2 - 134,57 \cdot I_p + 311,179 \quad (19)$$

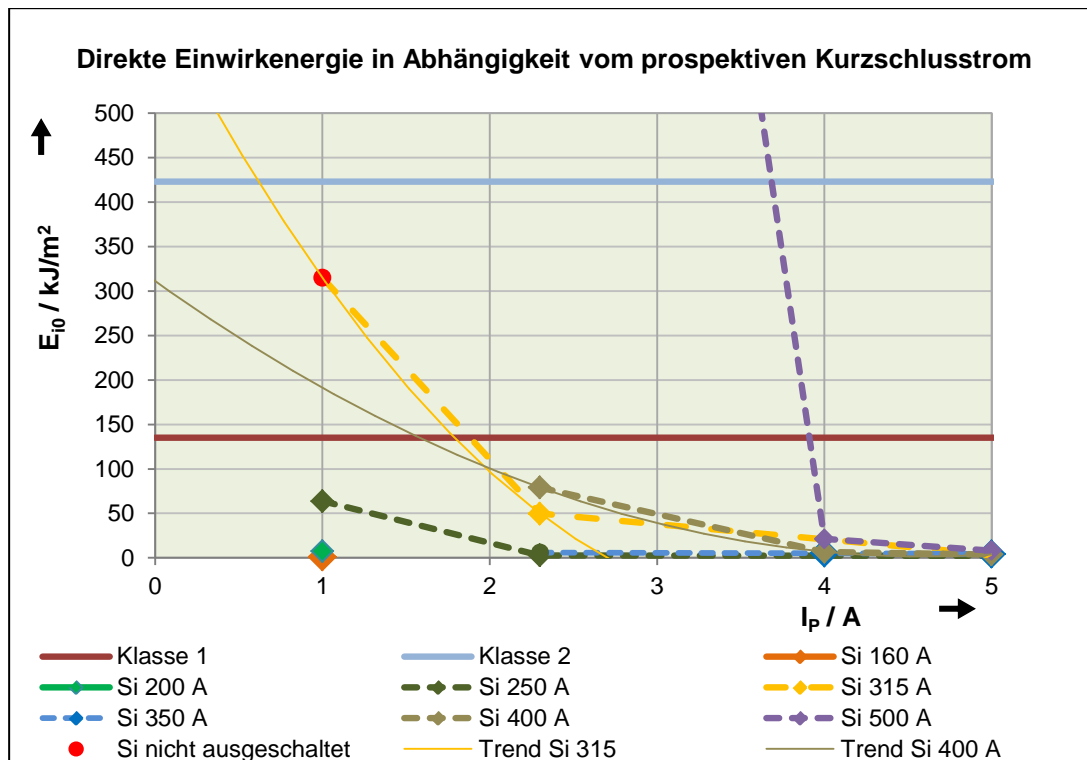


Bild 26 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom prospektiven Kurzschlussstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Aus Bild 25 und Bild 26 ist erkennbar, dass bei den folgenden Sicherungseinsätze und prospektivem Kurzschlussstrom (Angabe: Kurzschlussstrom / Bemessungsstrom) die Klasse 1

- 1 kA / 160 A, 200 A, 250 A
- 2,3 kA / 250 A, 315 A, 350 A, 400 A
- 4 kA / 350 A, 400 A, 500 A
- 5 kA / 250 A, 315 A, 355 A, 400 A, 500 A

eingehalten wird.

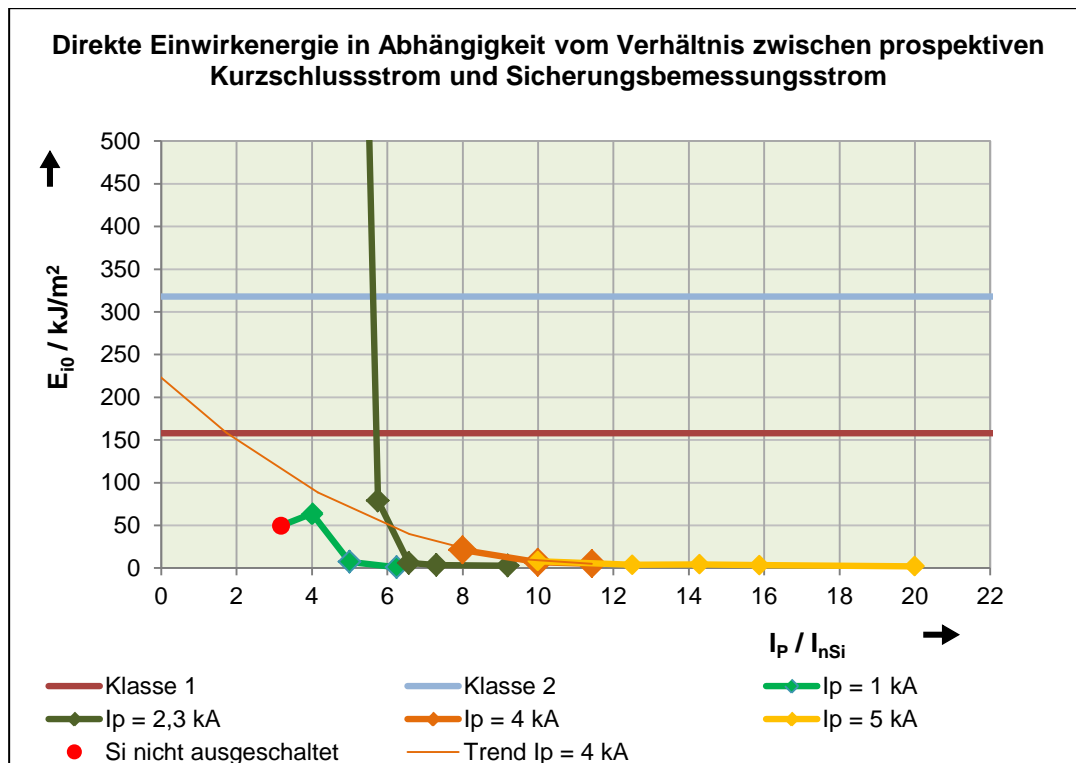


Bild 27 – Direkte Einwirkenergie in Abhängigkeit vom Verhältnis prospektiven Kurzschlussstrom und Sicherungsbemessungsstrom für dreipolige Kurzschlüsse (berechnet aus zweipoligen Kurzschlüssen mit Arbeitsschutz-Sicherungen)

Aus dem im Bild 27 dargestellten Verhältnisse der prospektiven Kurzschlussströme und Sicherungsbemessungsströme wurde der höchste Wert (Quotient) für die Klasse 1 (135 kJ/m^2) und die Klasse 2 (423 kJ/m^2) ermittelt.

Ermittelter Wert für die

Klasse 1 $I_P / I_{Si} = 6$

Klasse 2 $I_P / I_{Si} = 6$

5 Zusammenfassung

Ein qualifiziertes dreipoliges Prüfverfahren zur Erzeugung dreipoliger Störlichtbögen in Analogie zum zweipoligen Box-Test-Verfahren nach DIN IEC 61842-1-2 verfügbar.

Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse von zweipoligen und dreipoligen Kurzschlüssen ist gewährleisten.

Störlichtbogenprüfungen erfolgten mit unterschiedlichen Materialien für Prüfelektroden.

Bei gleichen Kurzschlussströmen sind dreipolige Energien annähernd das Zweifache von zweipoligen Energien.

Hochrechnung der Energiewerte zweipoliger Kurzschlüsse für die zu erwartenden Energiewerte für den Einsatz von Sicherungen bei dreipoligen Kurzschlüssen.

Hochgerechnete Energiewerte sind durch Störlichtbogenprüfungen mit Sicherungen auf der Basis ausgewählter Energiewerte nachzuweisen.

Fortführung der dreipoligen Störlichtbogenprüfungen mit Sicherungen im Teilprojekt 5-2 auf der Grundlage ausgewählter Energiewerte dreipoliger Kurzschlüsse ohne Sicherungen.

6 Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung

Hinweise für die praktische Anwendung der erzielten Ergebnisse aus den zweipoligen und dreipoligen Kurzschlussstromprüfungen in zweckmäßiger Form von

- Diagrammen
- Berechnungsverfahren (Formeln)
- Tabellen

sind in Bearbeitung.

Für die Bewertung der Ergebnisse aus dreipoligen Kurzschlüssen werden noch dreipolige Störlichtbogenprüfungen mit Sicherungen durchgeführt.

7 Vorschlag zur Fortführung dreipoliger Störlichtbogenprüfungen

(Teilprojekt 5 – 2)

Für die bisher erfolgten Untersuchungen sowie Hochrechnungen elektrischer Energiewerte auf der Grundlage von zweipoligen Kurzschlüssen ist der messtechnische Nachweis von Störlichtbogenprüfungen mit Sicherungen erforderlich.

Störlichtbogenprüfungen mit gG-Sicherungen:

1 kA	100 A	KI 1
	125 A	KI 2
2,3 kA	200 A	KI 1
	224 A	KI 2
4 kA	250 A	KI 1
5 kA	315 A	KI 2
6 kA	355 A	KI 1
	425 A	KI 2
7 kA	425 A	KI 2

Störlichtbogenprüfungen mit gTr-Sicherungen:

2,3 kA	250 kVA / 361 A	KI 1
4 kA	250 kVA / 361 A	KI 2
5 kA	250 kVA / 361 A	KI 2
6 kA	250 kVA / 361 A	KI 2
7 kA	250 kVA / 361 A	KI 2

Störlichtbogenprüfungen mit Arbeitsschutz-Sicherungen:

1 kA	250 A	KI 1
2,3 kA	400 A	KI 1
4 kA	500 A	KI 1
5 kA	500 A	KI 1

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen

Bei den dreipoligen Störlichtbogenprüfungen ist für jeden Leiter (L1, L2 und L3) eine Vorsicherung einzusetzen.

Für jede Stromeinstellung sind mindestens zwei Störlichtbogenprüfungen notwendig.

8 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}	Sicherungs bemessungsstrom
I_{rat}	Sicherungs bemessungsstrom 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
ΔT_K	Temperaturerhöhung am Kalorimeter
dT	Übertemperatur
T_0	Umgebungstemperatur
t_{max}	Zeitpunkt der Maximaltemperatur
$U_{arc} (U_{LB})$	Lichtbogenspannung
$W_{arc} (W_{LB})$	Lichtbogenenergie

Schutzwirkung von Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen