

Ermittlung der Lichtbogenenergie im Fehlerfall

Methode zur Bestimmung der Schutzklasse der PSAgS



[© BLS]

September 2025

Impressum



Autoren

Mathias Dürr, BLS
Andreas Jordi, SBB
Michel Lötscher, BLS
Stefan Hofmann, SOB
Uwe Schönherr, SBB

Herausgeber

Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, <https://allianz-fahrweg.ch>

ISBN

978-3-907456-04-0

Lizenz

Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz [CC-BY 4.0](#) freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

URL

<https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456040.pdf>

Citation

Mathias Dürr et al., «*Ermittlung der Lichtbogenenergie im Fehlerfall*», Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, 2025, ISBN 978-3-907456-04-0,
<https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456040.pdf>

Version

1.0.0

Interne Referenznummer

PRJ-200-028-301

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	5
2	Ausgangslage & Ziel	5
3	Herangehensweise	5
4	Ermittlung der Lichtbogenenergie im Fehlerfall	7
5	Diskussion & Schlussfolgerungen	12
6	Literaturverzeichnis	13

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Lichtbogenenergie und Kurzschlussstrom	9
Abbildung 2: Schutzpegel bei unterschiedlichen APC	10
Tabelle 1: Symbole und Einheiten.....	7
Tabelle 2: Risikofaktor bei unterschiedlichen APC.....	11
Tabelle 3: Bewertungskriterien zur Ermittlung der möglichen Verletzungsschwere	11

1 Management Summary

Die Projektgruppe hat eine Methode zur Bestimmung der Schutzklassen für persönliche Schutzausrüstung gegen die Gefahren eines Störlichtbogens (PSAgS) erarbeitet. Der Fokus liegt auf den Anforderungen die bei Arbeiten an und in der Nähe von 50Hz-Bahnstromanlagen relevant sind.

Ziel war es, eine Methode für Arbeiten an und in der Nähe von Bahnstromanlagen zu entwickeln. Dabei wurden ausschliesslich die thermischen Gefährdungen betrachtet, die von einem Störlichtbogen ausgehen. Weitere Gefährdungen wie z.B. Durchströmung wurden nicht betrachtet. Das Ergebnis zeigt, dass bei Arbeiten innerhalb der Annäherungszone nach R RTE 20600 [8] eine persönliche Schutzausrüstung der Schutzklasse 1¹ ausreichend ist, sofern ausschliesslich die thermischen Auswirkungen des Störlichtbogens berücksichtigt werden.

Für Arbeiten an oder in der Nähe von Bahnstromanlagen ist jedoch weiterhin eine individuelle Risikobewertung erforderlich, in die alle potenziellen Gefährdungen einfließen müssen.

2 Ausgangslage & Ziel

Zum Thema persönliche Schutzausrüstung gegen Störlichtbogen (PSAgS) existieren bereits zahlreiche Richtlinien und Auswahlhilfen. In der praktischen Umsetzung zeigen sich jedoch Herausforderungen, da sich die vorhandenen Dokumente hauptsächlich auf die Mittel- und Hochspannungsanlagen im 50-Hz-Bereich beziehen. Bahnstromanlagen (15 kV, 16.7 Hz) lassen sich aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften jedoch nicht ohne Weiteres dieser Anlagengattung zuordnen. Eine weitere Eigenheit betrifft die Zuständigkeit der Aufsichtsbehörde. Während für Mittel- und Hochspannungsanlagen das Eidgenössische Starkstrominspektorat (ESTI) zuständig ist, fällt die Aufsicht der Bahnstromanlagen in die Verantwortung des Bundesamtes für Verkehr (BAV).

3 Herangehensweise

Ursprüngliches Ziel des Projekts 200-028-301 «PSA Störlichtbogenfest vs. PSAgA» der Allianz Fahrweg Normalspur war es, eine Trageempfehlung für unterschiedliche Persönliche Schutzausrüstungen (PSA) und derer Kombination herauszugeben. Im Verlauf der Projektumsetzung wurde deutlich, dass in der Praxis Unsicherheiten bei der Auswahl geeigneter Schutzausrüstungen gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens bestehen.

Aufgrund dieser Erkenntnis hat das Projektteam mit Unterstützung vom Fachboard Bahnstrom der Allianz Fahrweg beschlossen, das ursprüngliche Ziel zu präzisieren: Der Fokus liegt nun auf der Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der PSAgS bei Arbeiten an und in der Nähe von Bahnstromanlagen.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse und Empfehlungen sollen der Projektgruppe R RTE 20600 des Verbands öffentlicher Verkehr (VöV) zur weiteren Nutzung und Diskussion zur Verfügung gestellt werden.

¹ Gemäss SN EN 61482-1-2 [5]

3.1 Literaturrecherche

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, existieren zahlreiche Richtlinien und Auswahlhilfen zur Bestimmung einer geeigneten Persönlichen Schutzausrüstung gegen Störlichtbögen (PSAgS).

3.1.1 ESTI-Weisung 407-0720

Die ESTI-Weisung 407, Version 0720, mit dem Titel «Tätigkeiten an oder in der Nähe von elektrischen Anlagen» [3], hat zum Ziel, Fachpersonen bei der Auswahl geeigneter Schutzmassnahmen zu unterstützen. Diese Weisung basiert auf der aktuell gültigen Gesetzgebung.

Im Kapitel 8 der Weisung wird auf Persönliche Schutzausrüstung eingegangen. Anhand von Beispielen werden Schutzstufen konkreten Arbeitstätigkeiten zugeordnet. Die Weisung bezieht sich dabei auch auf Massnahmen zum Schutz vor elektrischer Durchströmung sowie auf weitere Gefährdungen, die bei Arbeiten an elektrischen Anlagen auftreten können.

Für Arbeiten an oder in der Nähe von Bahnstromanlagen ist die Weisung jedoch nicht anwendbar. Sie enthält keine spezifischen Aussagen zu diesem Anlagentyp. Die in der Weisung empfohlenen Schutzmassnahmen gegen Durchströmung sind im Kontext von Bahnstromanlagen oft nicht umsetzbar – etwa wegen der Gefahr einer Überhitzung durch zusätzliche Isolationsschichten. Zudem unterscheidet sich der Aufbau von 50-Hz-Anlagen wesentlich von demjenigen von Bahnstromanlagen.

Insbesondere bei Fahrleitungsanlagen sind zusätzliche Einflussfaktoren wie mögliche Kurzschlussströme sowie die Entfernung zum nächstgelegenen Unterwerk (Ausschaltzeiten) zu berücksichtigen. Auch ist die Art der Arbeiten an Fahrleitungsanlagen nur begrenzt mit jenen an geschlossenen Innenraumschaltanlagen vergleichbar.

Aus diesen Gründen eignet sich die ESTI-Weisung Nr. 407 nicht als Grundlage für die Auswahl einer PSA bei Arbeiten an Fahrleitungsanlagen. Im vorliegenden Bericht wird daher auf eine Berücksichtigung dieser Weisung verzichtet.

3.1.2 DGUV Information 203-077

Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) erlässt zur Unfallprävention Regelwerke (Vorschriften, Regeln, Informationen und Grundsätze). DGUV-Informationen enthalten Hinweise und Empfehlungen, um die praktische Anwendung von Regelungen zu einem bestimmten Sachgebiet oder Sachverhalt zu erleichtern.

Die DGUV-Information 203-077 «Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen» [2] dient Unternehmen als Orientierungshilfe bei der Auswahl geeigneter Persönlicher Schutzausrüstung gegen die thermischen Auswirkungen von Störlichtbögen (PSAgS).

Der Anwendungsbereich der DGUV-Information umfasst Tätigkeiten an elektrischen Anlagen mit Spannungen über AC/DC 50 V. Ausgenommen sind dabei explizit Hochspannungsanlagen mit Spannungen ≥ 110 kV AC sowie Systeme der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Für Gleichstromsysteme bezieht sich der Geltungsbereich insbesondere auf Kurzschlusslichtbögen im Niederspannungsbereich ($U \leq 1500$ V DC).

Auch die DGUV-Information fokussiert im Wesentlichen auf Nieder- und Hochspannungsanlagen im 50-Hz-Bereich. Das darin beschriebene Verfahren zur Gefährdungsbeurteilung und Auswahl der

PSA lässt sich jedoch grundsätzlich auf andere elektrische Systeme übertragen. Im Anhang 5 «Beispiele» ist zudem das Arbeiten an einer DC-Anlage (Bahnnetz) aufgeführt.

Aufgrund der allgemeinen Übertragbarkeit des Verfahrens sowie der Anlehnung an die «Guideline for the selection of personal protective equipment when exposed to the thermal effects of an electric fault arc» [7] wird die DGUV-Information 203-077 im vorliegenden Bericht berücksichtigt.

4 Ermittlung der Lichtbogenenergie im Fehlerfall

4.1 Symbole und Einheiten

Symbole		Einheiten
a	Arbeitsabstand	mm
f	Sicherheitsfaktor	-
I_k	Kurzschlussstrom	kA
k_T	Transmissionsfaktor	-
l_B	Schlagweite	m
t_k	Kurzschlussdauer	s
U	Netznominalspannung	V
W_{LB}	Lichtbogenenergie	kJ oder kW
W_{LBP}	Schutzpegel der PSAGS (äquivalente Lichtbogenenergie)	kJ oder kW

Tabelle 1: Symbole und Einheiten

Die nachfolgende Berechnungsmethode wurde in Anlehnung an [2], Kapitel 4, erstellt. Im ersten Schritt wurde die Lichtbogenenergie W_{LB} , die im Fehlerfall an der Arbeitsstelle umgesetzt wird, berechnet. Dann wurde diese, unter Berücksichtigung der Geometrie der Anlage und des Arbeitsabstandes, mit dem Schutzpegel (äquivalente Lichtbogenenergie) W_{LBS} , bis zu der PSAGS einen Schutz bietet, verglichen.

4.2 Berechnung Lichtbogenenergie W_{LB}

Die Berechnung der Lichtbogenenergie erfolgt aus Gl. 1

$$W_{LB} = I_k^2 * R_{Libo} * t_k$$

Gl. 1

Zur Bestimmung der Kurzschlussströme I_k sowie des Lichtbogenwiderstands R_{Libo} , wurde die Rail-electric GmbH aus Bern beauftragt. Die Herangehensweise ist im Studienbericht erläutert. Im nachfolgenden Kapitel werden nur die Berechnungsgrundlagen und die Resultate beschrieben.

4.2.1 Lichtbogenwiderstand R_{Libo}

Gemäss Kapitel 5 des Berichts, wird zur Berechnung des Lichtbogenwiderstandes das Vorgehen nach «Doemeland» [1] empfohlen.

«Es wird angenommen, dass der Widerstand des Lichtbogens stromabhängig ist und 1800 Ohm/m beträgt. Aus der Gl. 2 ist ein praxisnaher Wert errechenbar, der die Schlagweite in m als Länge des Lichtbogens in m sieht, aber ein Sicherheitsfaktor f zwischen 2 und 4 benötigt.»

$$R_{Libo} = \frac{1800 * l_B * f}{I_k}$$

Gl. 2

Für die Berechnung wurde eine Lichtbogenlänge l_B von 400 mm angenommen. Dieser Wert entspricht der aufgerundeten Schlagweite des Silcosil-Stützisolators (vgl. Herstellerangaben PFISTERER). Ein Sicherheitsfaktor $f = 2$ erscheint angemessen im Vergleich zu den weiteren Berechnungsverfahren (siehe dazu [4], Kapitel 4).

4.2.2 Transmissionsfaktor t_k

Für den Transmissionsfaktor t_k wird gemäss [2], Abbildung 4-5, ein Wert von 2 angenommen («Lichtbogen brennt offen»). Laut [2] kann ein maximaler Transmissionsfaktor von 2,4 angesetzt werden. Unter Berücksichtigung eventueller Hindernisse, z.B. eine Überführung, wird der Faktor auf 2 festgelegt.

Kurzschlussstrom I_k

Zur Bestimmung der Kurzschlussströme wurden reale Störungsinformationen vom Fahrleitungsschutz (FLS) ausgewertet. Aus diesen Informationen konnten die Werte für den Kurzschlussstrom sowie die Fehlerdauer herausgelesen werden (vgl. [4], Abbildung 1). Um eine repräsentative Abbildung des gesamten Normalspurnetzes abzubilden, wurden weitere Orte anhand definierter Charakteristika bestimmt und mit dem Kurzschlussberechnungsprogramm μ PAS simuliert (vgl. [4], Kapitel 3).

4.2.3 Ergebnisse

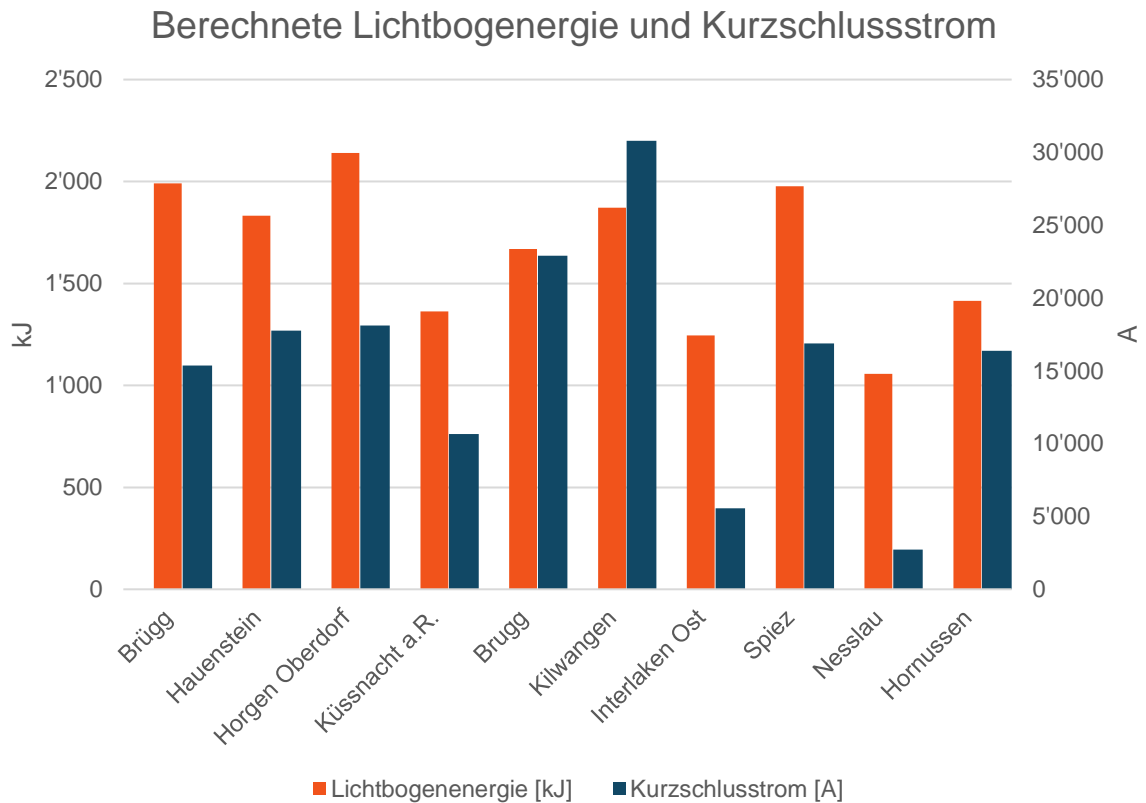


Abbildung 1: Lichtbogenenergie und Kurzschlussstrom

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Lichtbogenenergie an verschiedenen Kurzschlussorten. Die Standorte Brügg, Hauenstein, Horgen Oberdorf, Küssnacht a.R. sowie Brugg basieren auf der Auswertung realer Störschriebe. Die höchste Lichtbogenenergie wurde in Horgen Oberdorf ermittelt.

$$W_{LB,Max} = 2,14 MJ$$

Die Standorte Kilwangen ZH, Interlaken Ost, Spiez, Nesslau und Hornussen beruhen hingegen auf simulierten Fehlerszenarien. Abbildung 1 zeigt weiter, dass auch bei sehr unterschiedlichen Fehler-situationen die Lichtbogenenergie um max. den Faktor 2 auseinanderliegt. Zudem ist deutlich zu erkennen, dass die Lichtbogenenergie auch bei geringeren Kurzschlussströmen aufgrund der langen Fehlerdauer erhöhte Werte annehmen kann. Es besteht somit nur bedingt eine Abhängigkeit zwischen Lichtbogenenergie und Kurzschlussstrom.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass über das gesamte Normalspurnetz mit vergleichbaren Lichtbogenenergien zu rechnen ist. Es treten keine signifikanten Ausreisser auf, die eine abweichende sicherheitstechnische Bewertung erforderlich machen würden.

4.3 Schutzpegel W_{LBS}

Der Schutzpegel der PSAgS ist der Schutz, der die Ausrüstung gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens aufbringt. Nach [2], Kapitel 4.2.3, lässt sich aus der Lichtbogenenergie der Prüfklasse W_{LBP} der Schutzpegel für einen beliebigen Arbeitsabstand a ermitteln.

$$W_{LBS} = k_T * \left(\frac{a}{300mm}\right)^2 * W_{LBP}$$

Gl. 3

Die Werte für die Prüfklasse sind je nach Arc Protection Class (APC) nach [5], Tabelle 2, normiert. Somit ergeben sich folgende Werte für den Schutzabstand für Arbeitsabstände von 300 mm – 1'500 mm.

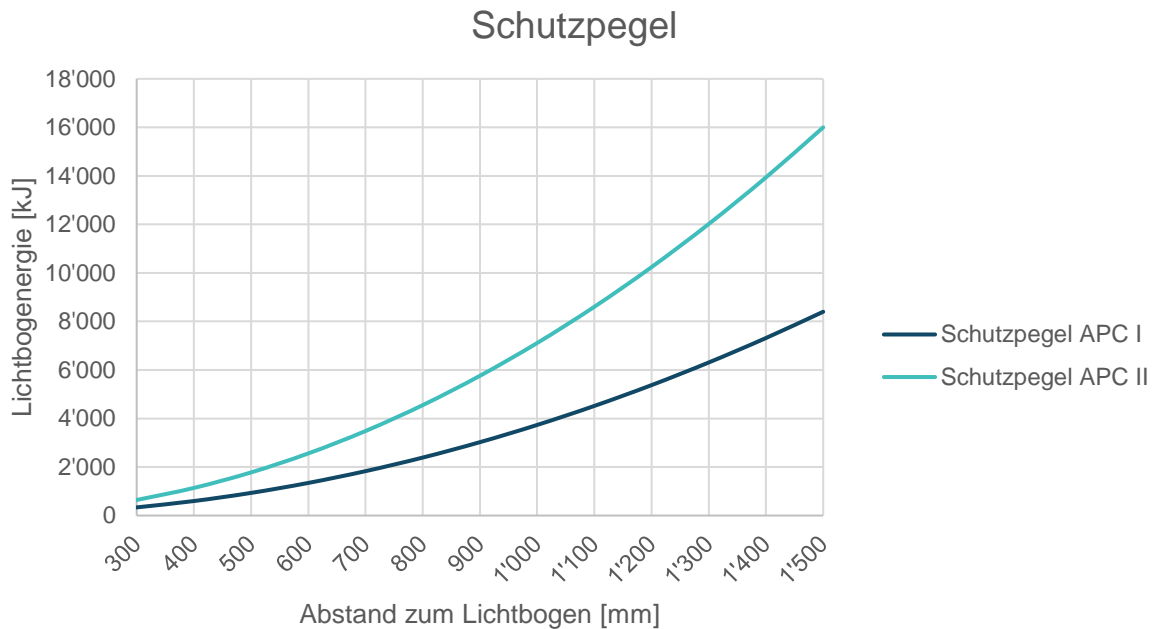


Abbildung 2: Schutzpegel bei unterschiedlichen APC

4.4 Risikofaktor

Der Risikofaktor Gl. 4 berechnet sich nach [2], Tabelle A 4-1, wie folgt.

$$f_R = W_{LB} \leq W_{LBS}$$

Gl. 4

Somit sind die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens abgedeckt, wenn der Risikofaktor $f_R \leq 1$ ist.

Abstand zum Lichtbogen [mm]	Risikofaktor APC I	Risikofaktor APC II
300	6.37	3.34
400	3.58	1.88
500	2.29	1.20
600	1.59	0.84
700	1.17	0.61
800	0.90	0.47
900	0.71	0.37
1000	0.57	0.30
1100	0.47	0.25
1200	0.40	0.21
1300	0.34	0.18
1400	0.29	0.15
1500	0.25	0.13

Tabelle 2: Risikofaktor bei unterschiedlichen APC

Bezeichnung	Beschreibung	Lichtbogenenergie / Schutzpegel
Leichte Verbrennung	Hautverbrennung < 2. Grades	$W_{LB} / W_{LBS} \leq 1$
Reversible Verletzung	Hautverbrennung 2. Grades; Blasenbildung, starke Schmerzen, vollständige Heilung oder mit Narbenbildung	$1 < W_{LB} / W_{LBS} \leq 3$
Irreversible Verletzung	Hautverbrennung 3. Grades; Verbrennung tieferer Hautschichten	$3 < W_{LB} / W_{LBS} \leq 10$
Tödliche Verletzung	Hautverbrennungen 3. Grades oder schwerer, grossflächig, irreversibel, mit tödlichen Folgen	$W_{LB} / W_{LBS} > 10$

Tabelle 3: Bewertungskriterien zur Ermittlung der möglichen Verletzungsschwere

Die Tabelle 2 verdeutlicht, dass der effektivste Schutz gegen die thermischen Gefahren, die von einem Störlichtbogen ausgehen, ein genügend grosser Abstand ist. Der Unterschied zwischen den Arc Protection Class (APC) I und II relativiert sich bei geringen Distanzen, da der Abstand exponentiell in die Berechnung der Wärmeeinwirkung eingeht. Bereits bei Abständen < 800 mm (APC I) und Abständen < 600 mm (APC II) muss mit Hautverbrennungen 2. Grades gerechnet werden.

Die Abstände zum Lichtbogen wurden gemäss SN EN 50488 [6] festgelegt. Nach Kapitel 7 beträgt der Wert $D_v = 1'400$ mm. Unter der Voraussetzung, dass es unmöglich ist, in die Annäherungszone zu gelangen, sind keine Massnahmen zum Schutz vor den Thermischen Gefahren eines Störlichtbogens erforderlich.

5 Diskussion & Schlussfolgerungen

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Berechnung der zu erwartenden Lichtbogenenergie mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist. Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Methode basiert jedoch auf dem aktuellen Stand der Technik und folgt einem in der Fachliteratur (vgl. [2]) anerkannten Vorgehen. Trotz der bestehenden Unsicherheiten ermöglicht sie eine nachvollziehbare Abschätzung der thermischen Gefährdung, die als Grundlage für die Auswahl geeigneter Persönlicher Schutzausrüstung herangezogen werden kann.

Aus physikalischer Sicht lässt sich die Lichtbogenenergie nicht mit absoluter Sicherheit bestimmen, da zahlreiche Einflussgrößen – wie Stromverlauf, Lichtbogenlänge, Umgebungsbedingungen und Materialeigenschaften – den Verlauf eines Störlichtbogens massgeblich beeinflussen. Diese komplexen Wechselwirkungen begrenzen die Genauigkeit jeder Berechnung.

Die im Rahmen dieser Arbeit getroffenen Annahmen sind jedoch im Kontext der Schutzklassenbestimmung als plausibel und fachlich vertretbar einzustufen. Die Wahl eines Sicherheitsfaktors berücksichtigt sowohl systematische als auch zufällige Unsicherheiten und trägt zu sicherheitsorientierten Bewertung bei.

Mit Sicherheit lässt sich festhalten, dass der wirksamste Schutz vor den thermischen Gefahren eines Störlichtbogens die Einhaltung eines ausreichenden Sicherheitsabstands zu unter Spannung stehenden Anlagenteilen ist. Alle weiteren technischen und organisatorischen Massnahmen – einschliesslich der Persönlichen Schutzausrüstung gegen Störlichtbögen – sind als Bestandteile eines ganzheitlichen Sicherheitskonzepts zu verstehen.

6 Literaturverzeichnis

[1] Wolfgang Doemeland, 8. Auflage (2007). Handbuch Schutztechnik: Grundlagen, Schutzsysteme, Inbetriebsetzung. Berlin: VDE-Verlag

[2] DGUV, Ausgabe: (2020). DGUV Information 203-077 Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen. Berlin: DGUV

[3] ESTI, Version 0720 (2020). ESTI Weisung Nr. 407 Tätigkeiten an oder in der Nähe von elektrischen Anlagen. Fehrltorf: ESTI

[4] Egon Basler, V01 (2025). Studienbericht Lichtbogenanalyse und Berechnungen. Bern: Railetric GmbH

[5] Electrosuisse, 2014. SN EN 61482-1-2 Arbeiten unter Spannung - Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines elektrischen Lichtbogens - Teil 1-2: Prüfverfahren - Verfahren 2: Bestimmung der Lichtbogen-Schutzklasse des Materials und der Kleidung unter Verwendung eines gerichteten Prüflichtbogens (Box-Test). Fehrltorf: Electrosuisse

[6] Electrosuisse, 2021. SN EN 50488 Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Schutzmaßnahmen bei Arbeiten an oder in der Nähe einer Oberleitungsanlage und/oder ihrer zugehörigen Rückleitung. Fehrltorf: Electrosuisse

[7] issa, 2nd Edition (2011). Guideline for the selection of personal protective equipment when exposed to the thermal effects of an electric fault arc. Köln: International Social Security Association Section for Electricity, Gas and Water

[8] VÖV, 2012. Regelwerk Technik Eisenbahn R RTE 20600 Sicherheit bei Arbeiten im Bereich von Bahnstromanlagen. Bern: Verband öffentlicher Verkehr.