

203-077

DGUV Information 203-077



Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen

Hilfe bei der Auswahl
der persönlichen Schutzausrüstung

Impressum

Herausgegeben von:

Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Glinkastraße 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
Fax: 030 13001-9876
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de

Sachgebiet Elektrotechnik und Feinmechanik des Fachbereichs Energie, Textil, Elektro,
Medienerzeugnisse (ETEM) der DGUV

Ausgabe: September 2020

DGUV Information 203-077
zu beziehen bei Ihrem zuständigen Unfallversicherungsträger oder unter
www.dguv.de/publikationen Webcode: p203077

Bildnachweis:

Titel, Abb. A 5–6, A 5–8, A 5–10, A 5–11, A 6–1, A 6–3, A 6–5 © Viktor Strasse;
Abb. A 2–1 © Dr. Holger Schau, TU Ilmenau;
Abb. A 2–2, A 2–4, A 5–2, A 6–6 © BSD GmbH;
Abb. 2–5 © Paulson Intl Ltd;
Abb. A 3–1, A 5–17, A 5–18, A 5–19, A 5–20, A 5–22 © Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG;
Abb. A 5–14 © Michael Schäfer;
Abb. A 6–2, A 6–4 © Thomas Lanzki

Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen

Hilfe bei der Auswahl
der persönlichen Schutzausrüstung

Inhaltsverzeichnis

	Seite		Seite
Vorbemerkungen.....	7	Anhang 1: Vorschriften, Regeln, Literatur.....	26
1 Anwendungsbereich.....	8	A 1.1 EU-Richtlinien und Verordnungen.....	26
2 Begriffsbestimmungen.....	9	A 1.2 Vorschriften, Regeln und Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit.....	26
3 Durchführung der Gefährdungsbeurteilung.....	13	A 1.3 Normen/VDE-Bestimmungen.....	26
3.1 Bewertungsphasen.....	13	A 1.4 Literatur.....	27
3.2 Einzelfallbewertung.....	16	Anhang 2: Normung der PSAgS gegen die thermischen Auswirkungen von Störlichtbögen.....	28
4 Verfahren zur Auswahl von PSAgS.....	17	A 2.1 Normung für Schutzkleidung.....	28
4.1 Übersicht über das Abschätzungs- verfahren.....	17	A 2.2 Normung mit Ursprung in Europa für die Prüfung von Schutzkleidung.....	28
4.2 Abschätzungsverfahren für AC-Anlagen.....	17	A 2.3 Normung mit Ursprung in Amerika für die Prüfung von Schutzkleidung.....	30
4.2.1 Parameter der Arbeitsumgebung.....	17	A 2.4 Normung für andere PSAgS-Arten.....	31
4.2.2 Ermittlung der Lichtbogenenergie der Anlage im Fehlerfall.....	17	A 2.4.1 Normung mit Ursprung in Europa.....	31
4.2.3 Ermittlung des Schutzpegels der PSAgS für die Arbeitssituation.....	18	A 2.4.2 Normung mit Ursprung außerhalb der EU.....	33
4.2.4 Auswahl der PSAgS.....	21	A 2.5 Anforderungen für bestimmungsgemäße Auswahl.....	34
4.3 Abschätzungsverfahren für DC-Anlagen.....	21	Anhang 3: Kenngrößen und Risikoanalyse der thermischen Lichtbogengefährdung von Personen.....	37
4.3.1 Allgemeines Berechnungsverfahren.....	21	A 3.1 Allgemeine Vorbemerkung.....	37
4.3.2 Grobabschätzung anhand von Richtwerten (Worst-Case-Betrachtung).....	23	A 3.2 Energetische Kenngrößen der thermischen Lichtbogengefährdung von Personen.....	37
5 Hinweise zur praktischen Umsetzung.....	24	A 3.3 Verfahren der Ermittlung von W_{LB} und W_{LBS}	37
		A 3.4 Arbeitsschritte.....	38
		A 3.4.1 Erfassung der allgemeinen Betriebs- bedingungen.....	38
		A 3.4.2 Berechnung der Kurzschlussströme an den betrachteten Arbeitsplätzen.....	39
		A 3.4.3 Bestimmung der Kurzschlussdauer (Lichtbogendauer).....	40
		A 3.4.4 Bestimmung des Erwartungswertes der elektrischen Lichtbogenenergie.....	41
		A 3.4.5 Bestimmung des Arbeitsabstandes.....	43
		A 3.4.6 Lichtbogenschutzpegel der PSAgS.....	44
		A 3.4.7 Berücksichtigung abweichender Expositionsverhältnisse.....	44
		A 3.4.8 Anwendung der Analyseergebnisse zur Gefährdungsbeurteilung.....	45
		A 3.5 Alternative Prüfverfahren.....	45

	Seite		Seite
Anhang 4: Anwendung der Risikomatrix	47	Anhang 6: Beispielhafte Arbeitsorte zur Festlegung des Transmissionsfaktors k_T	91
A 4.1 Allgemeines	47		
A 4.2 Bewertung der erwarteten Verletzungsschwere	48	Anhang 7: Koordination von PSAgS und Vorsicherung	94
A 4.3 Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit ..	48		
Anhang 5: Beispiele	53	A 7.1 Praktische Anwendungsregeln zur koordinierten Wahl von PSAgS und Vorsicherung	94
A 5.1 Beispiel 5.1: Niederspannungsverteilung in einer Transformatorstation (Arbeitsort 1)	54	A 7.2 Auswahlmatrix	94
A 5.2 Beispiel 5.2: Niederspannungskabel (Arbeitsort 2)	62	A 7.3 Leitungsschutzsicherungen	95
A 5.3 Beispiel 5.3: Hausanschlusskasten (Arbeitsort 3)	65	A 7.4 Transformatorschutzsicherungen	97
A 5.4 Beispiel 5.4: Elektroinstallation bei vorgesaltetem Hausanschlusskasten (Arbeitsort 4)	69	A 7.5 Arbeitsschutzsicherungen	97
A 5.5 Beispiel 5.5: Entfernen von NH-Sicherungseinsätzen	70	A 7.6 Mindestüberstromfaktor	98
A 5.6 Beispiel 5.6: Industrieverteiler	73	A 7.7 Zulässige Ausschaltzeit der Sicherung	99
A 5.7 Beispiel 5.7: Schalten an nicht störlichtbogengeprüften Anlagen älterer Bauart	76	Anhang 8: Formular zur Auswahlhilfe	100
A 5.8 Beispiel 5.8: Arbeiten an DC-Anlagen (USV)	83		
A 5.8.1 Arbeiten im Batteriebereich und direkt an den Batteriezellen (Arbeitsort 1)	83		
A 5.8.2 Arbeiten im Bereich des Wechselrichters (DC-Zwischenkreis, Arbeitsort 2)	85		
A 5.9 Beispiel 5.9: Arbeiten an DC-Anlagen (Bahnnetz)	87		

Vorbemerkungen

Diese DGUV Information soll den Unternehmer darin unterstützen, die geeignete persönliche Schutzausrüstung (Schutzkleidung, Kopf- und Gesichtsschutz, Handschutz) gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens (PSAgS) auszuwählen.

Personen, die an oder in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen elektrischer Anlagen arbeiten, sind grundsätzlich den Gefährdungen durch Störlichtbögen ausgesetzt. Störlichtbögen sind seltene, aber nicht vollständig ausschließbare Ereignisse im Arbeitsumfeld dieser Personen und fordern deswegen einen zuverlässigen Schutz. Sie entstehen nicht nur bei einem Kurzschluss, sondern sie können auch im Zusammenhang mit der Trennung stromführender Teile (z. B. Einsetzen/Entfernen von Sicherungen unter Last) entstehen.

Bei der Bewertung und Festlegung von Maßnahmen gegen thermische Gefährdungen durch Störlichtbögen ist das **TOP-Prinzip** anzuwenden. D. h. der Einsatz von personenbezogenen Mitteln (PSAgS) ist nachgeordnet zu technischen und organisatorischen Maßnahmen zu sehen. PSAgS soll das verbleibende Restrisiko **nach** Anwendung der ergriffenen technischen und organisatorischen Maßnahmen gegen das Auftreten von Störlichtbögen minimieren.

Ein Lichtbogen kann, je nach elektrischer Netz- und Anlagenkonfiguration, extreme Gefährdungen mit sich bringen:

- Hohe thermische Energie.
- Druckwelle und mitgeführte Fragmente, die durch die explosionsartige Ausbreitung des Störlichtbogens freigesetzt werden.
- Hohe Intensitäten elektromagnetischer Strahlung, insbesondere im Bereich ultravioletter (UV) und infraroter (IR) Strahlung, aber auch im Bereich des sichtbaren Lichts, die auch zu irreversiblen Schäden an Haut und Auge führen können.
- Hohe akustische Belastung (Knall).
- Giftige Gase und Partikel, die durch das Schmelzen und Verdampfen von Materialien im Umfeld des Störlichtbogens (einschließlich der Elektroden) hervorgerufen werden.

Jede dieser Auswirkungen kann für sich allein bereits Gesundheit und Leben sich im Umfeld befindender Personen gefährden.

Die gravierendsten Personenrisiken bestehen im Zusammenhang mit den thermischen Lichtbogenwirkungen.

In dieser DGUV Information wird ein PSAgS-Auswahlverfahren angewendet, das auf dem genormten Box-Test-Verfahren nach DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2) [11] basiert.

Anmerkung

Verfahren, die sich auf die Auswahl von PSAgS beziehen, die nach DIN EN 61482-1-1 (VDE 0682-306-1-1) [10] geprüft ist, sind unter anderem bereits in NFPA 70E [14] und IEEE 1584-2018 [15] beschrieben und deshalb nicht Gegenstand dieser DGUV Information.

Anmerkung

Eine Übersicht über die Auswahl von PSAgS wird darüber hinaus in der IVSS Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen eines Störlichtbogens (2. Ausgabe 2011) [26] gegeben.

Zur Bewertung der Gefährdung durch elektrische Störlichtbögen und der daraus folgenden Auswahl der erforderlichen PSAgS wird empfohlen, eine Risikobewertung durchzuführen. Hierbei wird neben der möglichen Schadensschwere auch die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung durch ein Störlichtbogenereignis berücksichtigt. Kapitel 3 dieser DGUV Information beschreibt eine Vorgehensweise, die im Hinblick auf die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens angewandt werden kann.

Umfangreiche Beispiele im Anhang 5 sowie Abbildungen von beispielhaften Arbeitsorten in Anhang 6 sollen die Personen, die diese DGUV Information anwenden, bei der Umsetzung der Risikobewertung und des Berechnungsverfahrens unterstützen. Die praktischen Anwendungsregeln zur koordinierten Wahl von PSAgS und Vorsicherung (Anhang 7) zeigen einen Weg auf, anhand der eingesetzten oder gewählten Sicherungen eine geeignete PSAgS zu finden.

1 Anwendungsbereich

Diese DGUV Information ist eine Handlungsanleitung für die Bewertung der möglichen thermischen Gefährdung durch Störlichtbögen bei elektrotechnischen Arbeiten in elektrischen Anlagen. Mit ihr soll dem Unternehmer eine Unterstützung für die Auswahl der notwendigen persönlichen Schutzausrüstung gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens (PSAgS, bestehend aus z. B. Schutzkleidung, Kopf- und Gesichtsschutz, Handschutz) zur Verfügung gestellt werden.

Diese DGUV Information findet Anwendung bei Arbeiten im Spannungsbereich $> AC/DC 50 V$, bei denen eine Personengefährdung durch Störlichtbögen besteht.

Vom Anwendungsbereich ausgenommen sind:

- Anwendungen im Hochspannungsbereich $\geq 110 kV AC$
- Anwendungen im Bereich der Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (HGÜ).

Für DC-Systeme bezieht sich der Anwendungsbereich praktisch auf Kurzschlusslichtbögen im Niederspannungsbereich ($U \leq 1500 V DC$).

Anmerkung:

Fehlerlichtbögen, die durch Kontaktfehler, Kontakttrennung u. ä. als Längslichtbögen entstehen (z. B. in Photovoltaikanlagen, an Klemmverbindern), sind ausgenommen. Im Allgemeinen bestehen dabei keine Personengefährdungen (Hautverbrennungen). Bei diesen Lichtbögen können vor allem Brände entstehen; Fehlerlichtbögen können auch Kurzschlüsse mit strom- und leistungsstarken bzw. energiereichen Störlichtbögen (z. B. in Batterieanlagen) nach sich ziehen, bei denen Personengefährdungen entstehen können.

Auf eine PSAgS kann bei Arbeiten in Niederspannungsanlagen verzichtet werden, wenn nicht mit einer thermischen Gefährdung durch Störlichtbögen zu rechnen ist. Dies ist z. B. der Fall:

- Bei Arbeiten an Mess-, Steuer- und Regelungsanlagen mit vorgelagerten Stromkreisabsicherungen bis 25 A.
- Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V mit vorgelagerter Absicherung bis einschließlich 63 A, wenn handelsübliche Arbeitskleidung bestehend aus langärmeliger Oberbekleidung und langer Hose getragen wird.

- Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V AC und einem Kurzschlussstrom $< 1 kA$. (Ein solcher Lichtbogen brennt nicht stabil und erlischt unmittelbar wieder.)

Andere Gefährdungen, z. B. elektrische Körperdurchströmung oder Partikelflug, können weitere Maßnahmen erfordern.

Im Rahmen der tätigkeitsbezogenen Gefährdungsbeurteilung können ggf. zusätzliche Anforderungen wie elektrostatische Ableitfähigkeit, Hitze- und Flammenschutz, Schutz gegen oberflächliche mechanische Verletzungen etc. an die weitere PSA notwendig werden.



Achtung

Diese DGUV Information gibt eine Hilfestellung bei der Auswahl der PSAgS sowohl für Arbeiten an Niederspannungs- als auch an Hochspannungsanlagen unterhalb 110 kV AC.

Beispielhafte Arbeitsplätze:

- Hausinstallationen,
- Verteilungsnetze,
- Industrienetze.

Diese DGUV Information betrachtet nicht die möglichen Gefährdungen durch weitere Effekte eines Störlichtbogens, z. B. durch Druck, Schall, wegfliegende Teile, Strahlung, geschmolzene Partikel oder Gase.

Sie gilt **nicht** beim Benutzen von elektrischen Anlagen, die den einschlägigen Richtlinien und Normen entsprechen und für den Gebrauch durch Laien konstruiert und errichtet wurden.

2 Begriffsbestimmungen

Persönliche Schutzausrüstung gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens PSAgS

Als Persönliche Schutzausrüstung gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens (PSAgS) gilt jedes Mittel, das dazu bestimmt ist, von einer Person getragen oder gehalten zu werden und das diese Person gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens schützen soll.

Arbeiten

Jede Form elektrotechnischer oder nichtelektrotechnischer Tätigkeit, bei der die Möglichkeit einer elektrischen Gefährdung besteht.

Arbeiten unter Spannung AuS

Jede Arbeit, bei der eine Person bewusst mit Körperteilen oder Werkzeugen, Ausrüstungen oder Vorrichtungen unter Spannung stehende Teile berührt oder in die Gefahrenzone nach VDE 0105-100 gelangt.

Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile

Alle Arbeiten, bei denen eine Person mit Körperteilen, Werkzeug oder anderen Gegenständen in die Annäherungszone nach VDE 0105-100 gelangt, ohne die Gefahrenzone nach VDE 0105-100 zu erreichen.

Arbeitsabstand a

Abstand zwischen Störlichtbogen und dem Körper der Person (Oberkörper), der bei Arbeitshandlungen im betrachteten Arbeitsumfeld wirksam wird.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Arbeitsabstand wird in mm angegeben.

Äquivalente Lichtbogenenergie

Schutzpegel der PSAgS W_{LBS} , der sich bei konkretem Arbeitsabstand a und Transmissionsfaktor k_T aus dem Prüfpegel W_{LBP} ergibt.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die äquivalente Lichtbogenenergie wird in kJ oder kWs angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff:

Die äquivalente Lichtbogenenergie wurde in der Ausgabe 2012 dieser DGUV Information mit $W_{LB\ddot{a}}$ bezeichnet.

Bezogene Lichtbogenleistung k_p

Verhältnis der Lichtbogenleistung zur Kurzschlussleistung des elektrischen Netzes am Fehlerort. k_p berücksichtigt die physikalischen Größen „Lichtbogenspannung“ und „Lichtbogenstrom“.

Dauerkurzschlussstrom I_{kDC}

stationärer Wert des Kurzschlussgleichstroms bei metallischem Kurzschluss an der Fehlerstelle.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Dauerkurzschlussstrom wird in kA angegeben.

Direkte Einwirkenergie E_{i0}

Je Flächeneinheit einwirkende Wärmeenergie, die vom Störlichtbogen direkt ausgeht.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die direkte Einwirkenergie wird in kJ/m² oder kWs/m² (cal/cm²) angegeben.¹

Durchgangsenergie E_{it}

Einwirkenergie, die bei der Lichtbogeneinwirkung die PSAgS durchdringt; Anteil der direkten Einwirkenergie.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die direkte Einwirkenergie wird in kJ/m² oder kWs/m² (cal/cm²) angegeben.¹

Einwirkenergie E_i

Wärmeenergie (Gesamtwärmemenge), die durch einen elektrischen Lichtbogen in einem Wirkabstand auf einer exponierten Oberfläche wirksam wird.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die direkte Einwirkenergie wird in kJ/m² oder kWs/m² (cal/cm²) angegeben.¹

Elektrische Anlage

Gesamtheit der elektrischen Betriebsmittel zur Erzeugung, Übertragung, Umwandlung, Verteilung und Anwendung elektrischer Energie.

Elektrodenabstand d

Abstand zwischen den Lichtbogenelektroden.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Elektrodenabstand wird in mm angegeben.

¹ Korrelation:

1 cal/cm² = 41,868 kJ/m², 1 kJ/m² = 0,023 885 cal/cm²

Kurzschlussdauer t_k

Zeitdauer des Kurzschlusses.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Kurzschlussdauer wird in s angegeben.

Kurzschlussleistung P_k (DC-Bereich) bzw. S_k'' (AC-Bereich)

Fiktive Größe, berechnet als Produkt aus prospektivem Kurzschlussstrom an einer Stelle des Netzes und der Nennspannung (bzw. vereinbarten Versorgungsspannung) des Netzes. Für Drehstromsysteme ist ein Faktor $\sqrt{3}$ zu berücksichtigen; der Kurzschlussstrom entspricht dem dreipoligen Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_k'' (VDE 0102 [8]).

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Kurzschlussleistung wird in kVA (AC), kW (DC) angegeben.

Lichtbogendauer t_{LB}

Zeitdauer des Störlichtbogens.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Lichtbogendauer wird in s angegeben.

Lichtbogenenergie W_{LB}

Elektrische Energie, die dem Lichtbogen zugeführt und im Lichtbogen umgesetzt wird.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Lichtbogenenergie wird berechnet als die Summe (Integral) über das Produkt aus Momentanwert der Lichtbogen Spannung, Momentanwert des Lichtbogenstroms und Zeitdifferential, gebildet über die Lichtbogendauer. Der Lichtbogen ist in Drehstromsystemen im Allgemeinen ein mehrpoliger (meist dreipoliger) Fehler; die Lichtbogenenergie ist hier die Gesamtenergie aller beteiligten Lichtbögen.

Anmerkung 2 zum Begriff:

Die Lichtbogenenergie wird in kJ oder kWh angegeben.

Lichtbogenkurzschlussstrom I_{kLB}

Strom, der während der Lichtbogendauer an der Fehlerstelle tatsächlich (durch den Lichtbogen) fließt.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Lichtbogenkurzschlussstrom wird als mittlerer Effektivwert über die Kurzschlussdauer (AC) bzw. Mittelwert über die quasistationäre Kurzschlussphase (DC) bestimmt.

Anmerkung 2 zum Begriff:

Der Lichtbogenkurzschlussstrom wird in kA angegeben.

Lichtbogenleistung P_{LB}

Wirkleistung, die im Lichtbogen umgesetzt wird; Produkt aus Lichtbogenstrom und Lichtbogen Spannung.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Lichtbogenleistung wird in kW angegeben.

Material

Textilien oder andere Materialien, aus denen die PSAgS hergestellt ist, welche aus einer Lage oder mehreren Lagen bestehen können.

Prospektiver Kurzschlussstrom

Zu erwartender Strom, der fließt, wenn die Fehlerstelle durch einen Leiter mit vernachlässigbarer Impedanz kurzgeschlossen ist (metallischer Kurzschluss der Stromversorgung).

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Prospektive Kurzschlussstrom wird in kA angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff:

Es gibt generell einen Unterschied zwischen dem tatsächlichen Lichtbogenkurzschlussstrom und dem prospektiven Kurzschlussstrom. Der tatsächliche Lichtbogenkurzschlussstrom, der während der Lichtbogendauer fließt, ist geringer und schwankt infolge der nicht-linearen Lichtbogenimpedanz, die sich zeitlich unbestimmt ändert.

Prüfpegel W_{LBP}

Elektrische Lichtbogenenergie, die bei einer Prüfung im Box-Test (VDE 0682-306-1-2 [11]) in einer der beiden Störlichtbogenprüfklassen eingestellt ist und zu einer direkten Einwirkenergie E_{iOP} führt.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Prüfpegel wird in kJ oder kWh angegeben.

Prüfstrom I_{APC}

Prospektiver Kurzschlussstrom des elektrischen Prüfstromkreises (zu erwartender Strom), der zum Einstellen einer Prüfklasse im Box-Test-Verfahren verwendet wird; Effektivwert (symmetrische Wechselstromkomponente).

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Prüfstrom wird in kA angegeben.

Restrisiko

Verbleibendes Risiko einer Personenverletzung durch Störlichtbogeneinwirkung – nach Anwendung der jeweils getroffenen Maßnahmen gegen das Auftreten oder die Auswirkungen von Störlichtbögen.

Das Restrisiko ergibt sich aus der Kombination von

- erwarteter Schwere einer Verletzung und der
- Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Verletzung jeweils nach Berücksichtigung der getroffenen Maßnahmen.

R/X-Verhältnis

Verhältnis des ohmschen Widerstands zum induktiven Blindwiderstand des elektrischen Kurzschlussstromkreises.

Schutzpegel der PSAgS W_{LBS}

Lichtbogenenergiepegel, bis zu welchem die PSAgS Schutz vor den thermischen Wirkungen eines Störlichtbogens bietet; Kennwert der PSAgS bei gegebenem Transmissionsfaktor k_T und Arbeitsabstand a ; entspricht der äquivalenten Lichtbogenenergie.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Schutzpegel wird in kJ oder kW angegeben.

Stoll-Kurve

Zusammenhang zwischen thermischer Einwirkenergie und Expositionszeit, der aus Daten für das Toleranzverhalten der menschlichen Haut bei Hitzeeinwirkung abgeleitet ist und die Grenzen für das Entstehen von Hautverbrennungen zweiten Grades angibt.

Strombegrenzungsfaktor k_B

Verhältnis zwischen tatsächlichem Lichtbogenkurzschlussstrom und prospektivem Kurzschlussstrom.

Störlichtbogen

Fehlerhafte Verbindung zwischen leitfähigen Teilen unterschiedlichen Potentials einer elektrischen Anlage in Form einer selbstständigen Gasentladung.

Anmerkung 1 zum Begriff:

In dieser DGUV Information wird der Störlichtbogen als unerwünschtes Fehlerereignis im Falle eines Kurzschluss betrachtet.

Störlichtbogenschutzklasse APC

Kategorie der thermischen Schutzwirkung von PSAgS gegen die thermischen Wirkungen eines Störlichtbogens, die im Box-Test (nach VDE 0682-306-1-2 [11]) geprüft ist. Die Klassen (APC: Arc Protection Class) sind durch energetische Prüfpegel (W_{LBP} und E_{iOP}) charakterisiert.

TOP Prinzip

Das TOP-Prinzip bestimmt die Rangfolge der vom Unternehmer zu treffenden Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen der Beschäftigten: erst technische, dann organisatorische und zuletzt persönliche Maßnahmen.

- Technische Maßnahmen
Sicherheitsgerechte Einrichtung und Unterhaltung von Maschinen und Geräten, Betriebseinrichtungen, Arbeits- und Sozialräumen.
- Organisatorische Maßnahmen
Regelungen, um Arbeitsvorgänge sicher zu gestalten, z. B. in Betriebsanweisungen und durch Informationen.
- Personenbezogene Maßnahmen
z. B. Persönliche Schutzausrüstung, Qualifikation (z. B. Spezialausbildung, Unterweisungen).

Transmissionsfaktor k_T

Faktor, der die räumliche Ausbreitung der thermischen Auswirkungen des Lichtbogens im Arbeitsumfeld beschreibt. Er wird durch die Geometrieverhältnisse der Anlage am Arbeitsort bestimmt.

Transmissions- und Expositionsbedingungen

Gesamtheit der Einflüsse auf die Wärmeübertragung durch einen Störlichtbogen.

Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_k''

Effektivwert der Wechselstromkomponente des Kurzschlussstroms zu Beginn des Kurzschlusses in einem Wechselstrom- oder Drehstromsystem (AC-System) bei metallischem Kurzschluss.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom wird in kA angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff:

In der standardisierten Kurzschlussstromberechnung wird ein maximaler Wert I_{kmax}'' und ein minimaler Wert I_{kmin}'' des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms bestimmt.

Netznenntension U_{Nn}

Spannung zwischen den Leitern, für die ein Netz bestimmt ist, durch die das Netz bezeichnet oder identifiziert wird und auf die sich bestimmte Betriebseigenschaften beziehen.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Netznenntension wird in V angegeben.

Lichtbogenspannung U_{LB}

Mittelwert der Spannung über einem Störlichtbogen, die sich zwischen den Elektroden (Leitern) einstellt.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Lichtbogenspannung wird in V angegeben.

Zeitkonstante τ

Maß für die Reaktionszeit des Stromes bei Änderung der Spannung in Abhängigkeit von Verhältnis L/R des Stromkreises.

Anmerkung 1 zum Begriff:

Die Zeitkonstante wird in ms angegeben.

Grenzenergie W_{LBmin}

Grenzwert der Lichtbogenenergie (50 kJ) bei dessen Überschreitung die Nutzung von PSAGS erforderlich ist.

Tabelle 2-1 Symbole und Einheiten

Symbole		Einheiten
a	Arbeitsabstand	mm
d	Elektrodenabstand	mm
E_i	Einwirkenergie	kJ/m ² oder kW _s /m ² + cal/cm ²
E_{i0}	direkte Einwirkenergie	kJ/m ² oder kW _s /m ² (cal/cm ²)
E_{it}	Durchgangsenergie	kJ/m ² oder kW _s /m ² (cal/cm ²)
I_{APC}	Prüfstrom	kA
I''_k	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	kA
I_{kDC}	Dauerkurzschlussstrom DC	kA
I_{kLB}	Lichtbogenkurzschlussstrom	kA
k_B	Strombegrenzungsfaktor	
k_P	Bezogene Lichtbogenleistung	
k_T	Transmissionsfaktor	
t_k	Kurzschlussdauer	s
t	Zeitkonstante	ms
R/X	Impedanzverhältnis	
U_{LB}	Lichtbogenspannung	V
U_{Nn}	Netznominalspannung	V
W_{LB}	Lichtbogenenergie	kJ oder kW _s
W_{LBmin}	Grenzenergie	kJ oder kW _s
W_{LBS}	Schutzpegel der PSAGS (äquivalente Lichtbogenenergie)	kJ oder kW _s
W_{LBP}	Prüfpegel	kJ oder kW _s
P_k	Kurzschlussleistung (DC)	kW
S''_k	Kurzschlussleistung (AC)	kVA

3 Durchführung der Gefährdungsbeurteilung

(thermische Auswirkung durch Störlichtbogen)

3.1 Bewertungsphasen

Im Rahmen der Beurteilung der Arbeitsbedingungen, die vom Unternehmer nach § 5 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) [2] und DGUV Vorschrift 1 „Grundsätze der Prävention“ [3] durchzuführen ist, muss eine **Gefährdungsbeurteilung** vorgenommen werden.

Eine sinnvolle Vorgehensweise im Hinblick auf die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens ist in dem Ablaufdiagramm in Abb. 3-1 dargestellt.

Die einzelnen Phasen der Risikobewertung sind:

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

Für die konkrete Arbeitssituation wird abgeschätzt, ob mit dem Entstehen eines Störlichtbogens gerechnet werden muss. Dabei sollten zum Beispiel der Aufbau, der Zustand und das Alter der Anlage, die beabsichtigte Tätigkeit, die Qualifikation der ausführenden Personen und Erfahrungswerte z. B. aus dem eigenen Unternehmen mitberücksichtigt werden.

Kommt man hier zu dem Ergebnis, dass keine Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen besteht, so ist auch keine PSAgS erforderlich.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs.

Ist eine Berechnung erforderlich?

Kann die Entstehung eines Störlichtbogens nicht ausgeschlossen werden, so gibt es Arbeits- oder Tätigkeitsbereiche in denen die zu erwartende Störlichtbogenenergie so gering ist, dass mit **keiner** Gefährdung durch die thermischen Auswirkungen zu rechnen ist.

Im Anwendungsbereich (Kapitel 1) dieser DGUV Information ist deshalb festgelegt, dass auf eine PSAgS in den folgenden Fällen verzichtet werden kann:

- Bei Arbeiten an Mess-, Steuer- und Regelungsanlagen mit vorgelagerten Stromkreisabsicherungen bis 25 A.
- Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V mit vorgelagerter Absicherung bis einschließlich 63 A, wenn handelsübliche Arbeitskleidung bestehend aus langärmeliger Oberbekleidung und langer Hose getragen wird.

- Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V AC und einem Kurzschlussstrom < 1 kA. (Ein solcher Lichtbogen brennt nicht stabil und erlischt unmittelbar wieder.) Trifft einer der genannten Anwendungsfälle zu, ist keine PSAgS oder Berechnung erforderlich.

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: Lichtbogenenergie W_{LB} , und Schutzpegel der PSAgS W_{LBS} ermitteln!

In dieser Phase wird das in Kapitel 4 beschriebene Berechnungsverfahren zur Auswahl der PSAgS angewandt.

Im Ergebnis sind 4 verschiedene Fälle möglich:

- $W_{LB} < W_{LBmin}$
Die zu erwartende Lichtbogenenergie ist kleiner als der Mindestwert von 50 kJ, bei dessen Überschreitung man eine Hautverbrennung bei direkter Exposition nicht ausschließen kann (W_{LBmin}). Das bedeutet, dass keine PSAgS notwendig ist.
- $W_{LB} \leq W_{LBS_APC 1}$
Die zu erwartende Lichtbogenenergie ist kleiner als der Schutzpegel W_{LBS} einer PSAgS der Klasse APC 1. Eine PSAgS der Störlichtbogenschutzklassen APC 1 oder APC 2 bietet dann ausreichenden Schutz vor den thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens.
- $W_{LB} \leq W_{LBS_APC 2}$
Die zu erwartende Lichtbogenenergie ist kleiner als der Schutzpegel W_{LBS} einer PSAgS der Klasse APC 2. Eine PSAgS der Störlichtbogenschutzklassen APC 2 bietet dann ausreichenden Schutz vor den thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens.
- $W_{LB} > W_{LBS_APC x}$
Die zu erwartende Lichtbogenenergie ist größer als der Schutzpegel $W_{LBS_APC x}$ (Störlichtbogenschutzklassen APC 1 oder APC 2) der zur Verfügung stehenden PSAgS. In diesem Fall muss mit Phase 4 fortgefahren werden.

Phase 4: Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen umsetzen

Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen müssen umgesetzt werden.

Durchführung der Gefährdungsbeurteilung

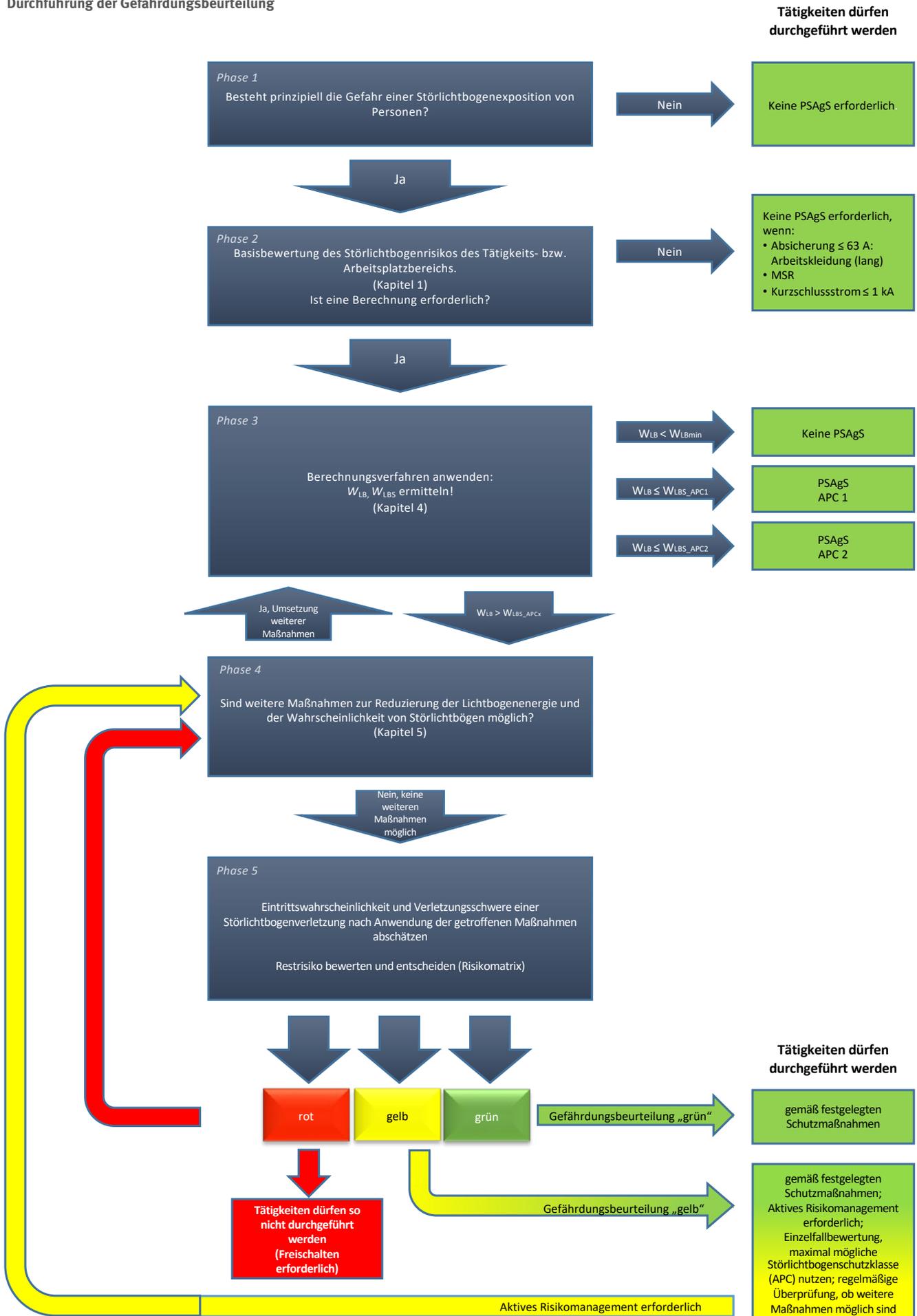


Abb. 3-1 Ablaufdiagramm Risikobewertung
(Dieses Flussdiagramm ist ebenfalls auf der Ausklappseite des Umschlags abgebildet.)

Hinweise zu möglichen Maßnahmen sind in Kapitel 5 „Hinweise zur praktischen Umsetzung“ beschrieben.

Anschließend muss die Gefährdungsbeurteilung ab Phase 3 erneut durchgeführt werden. Sollten keine weiteren Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen mehr möglich sein, muss mit Phase 5 fortgefahren werden.

Phase 5: Eintrittswahrscheinlichkeit und Verletzungsschwere einer Störlichtbogenverletzung nach Anwendung der getroffenen Maßnahmen abschätzen; Restrisiko bewerten und entscheiden (Risikomatrix)

Ist der Schutzpegel W_{LBS} der vorhandenen PSAGS geringer als die in Phase 3 ermittelte Lichtbogenenergie W_{LB} , kann die Gefährdungsbeurteilung um die Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit einer Personenverletzung erweitert werden. Damit kann eine Risikoeinschätzung vorgenommen werden.

Ausgangspunkt für die Risikoeinschätzung in der Phase 4 sollte immer die genaue Berechnung der zu erwartenden Lichtbogenenergie in Phase 3 sein, nicht die dort ebenfalls mögliche Worst-Case-Abschätzung auf der Grundlage von Richt- oder Extremwerten.

Zu bewerten ist dabei das Restrisiko einer Verletzung durch Störlichtbogeneinwirkung **nach** Anwendung der jeweils getroffenen Maßnahmen gegen das Auftreten oder die Auswirkungen von Störlichtbögen.

Dieses Restrisiko ergibt sich aus der Kombination von

- erwarteter Schwere einer Verletzung und der
- Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Verletzung jeweils **nach** Berücksichtigung der getroffenen Maßnahmen.

Eine Hilfestellung zur Festlegung der erwarteten Schwere einer Verletzung und der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Verletzung gibt Anhang 4 dieser DGUV Information.

Verwendung der Risikomatrix

Bei Anwendung der Risikomatrix (Abb. 3-2) sind die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung und die Schwere einer möglichen Verletzung durch Störlichtbogeneinwirkung – jeweils nach Berücksichtigung der getroffenen Maßnahmen – einzusetzen. Entsprechend dem Ablaufdiagramm Risikobeurteilung (Abb. 3-1) sind bei Einstufung in die Kategorie „Rot“ weitere Maßnahmen (Phase 4) zu treffen und zu bewerten oder die Arbeiten dürfen nur im freigeschalteten Zustand aller relevanten Anlagenteile durchgeführt werden. Benachbarte unter Spannung stehende Anlagenteile sind abzudecken oder abzuschränken.

	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung (Bewertungspunkte)	1 (0 ... 9)	2 (10 ... 19)	3 (20 ... 30)	4 (31 ... 45)	5 (46 ... 60)
Schadensschwere (Verletzungsschwere)		Praktisch unmöglich	Denkbar, aber sehr unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	selten	Gelegentlich bis häufig
1	Leichte Verletzung					
2	Reversible Verletzung					
3	Irreversible Verletzung					
4	Tödliche Verletzung					
Legende: Tätigkeiten dürfen durchgeführt werden aktives Risikomanagement notwendig; Einzelfallbewertung (siehe 3.2); regelmäßige Überprüfung, ob weitere Maßnahmen möglich sind (Frist muss festgelegt werden) Tätigkeiten dürfen so nicht durchgeführt werden (Freischalten erforderlich); wenn möglich, weitere Maßnahmen nach Phase 5 umsetzen						

Abb. 3-2 Risikomatrix: Verletzungsrisiko nach Anwendung der getroffenen Maßnahmen

3.2 Einzelfallbewertung

In der Einzelfallbewertung muss die konkrete Situation betrachtet werden. Es sind weitere Randbedingungen (z. B. Ergonomie, Akzeptanz) zu berücksichtigen und mögliche/sinnvolle technische und organisatorische Maßnahmen zu ergreifen, um so zum Beispiel folgende Festlegungen treffen zu können:

- dass eine PSAgS der Klasse APC 1, die im Unternehmen vorhanden ist, im Einzelfall für diese Tätigkeit an dieser Anlage zulässig ist.
- dass eine PSAgS der Klasse APC 2 dort zu verwenden ist, wo die zu erwartende Lichtbogenenergie höher als Klasse APC 2 ist.
- dass eine PSAgS der Klasse APC 2, die nachweislich vor einer höheren thermischen Belastung schützen kann (durch Prüfung mit höherem Prüfpegel im Boxtest nachgewiesen), dort zu verwenden ist, wo die zu erwartende Lichtbogenenergie höher als der Schutzpegel der Klasse APC 2 ist.

4 Verfahren zur Auswahl von PSAgS

4.1 Übersicht über das Abschätzungsverfahren

Im ersten Schritt wird die Lichtbogenenergie W_{LB} , die im Fehlerfall an der Arbeitsstelle umgesetzt wird, abgeschätzt. Dann wird diese unter Berücksichtigung der Geometrie der Anlage und des Arbeitsabstandes mit dem Schutzpegel (äquivalente Lichtbogenenergie) W_{LBS} , bis zu der die PSAgS einen Schutz bietet, verglichen.

Im Abschnitt 4.2 wird das Abschätzungsverfahren für AC-Anlagen beschrieben. Die Vorgehensweise aus 4.2 ist in übertragenem Sinne als Abschätzungsverfahren auch für DC-Anlagen anwendbar. Es bestehen jedoch Besonderheiten, die speziell für DC-Systeme zutreffen und im Abschnitt 4.3 beschrieben werden.

4.2 Abschätzungsverfahren für AC-Anlagen

4.2.1 Parameter der Arbeitsumgebung

Die Arbeitsumgebung der elektrischen Anlage ist durch folgende Parameter gekennzeichnet:

Tabelle 4-1 Parameter der Arbeitsumgebung

Arbeitsumgebung			
Überstromschutz-einrichtungen	Elektrisches Netz		Elektrische Anlage
t_k	U_{Nn} R/X	S''_k	d

4.2.2 Ermittlung der Lichtbogenenergie der Anlage im Fehlerfall

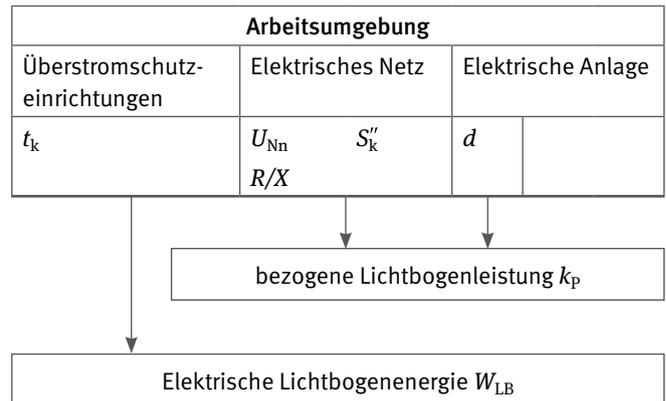


Abb. 4-2 Ermittlung der elektrischen Lichtbogenenergie

Der tatsächliche **Lichtbogenkurzschlussstrom** I_{kLB} in der Niederspannung ist durch die begrenzenden Eigenschaften des Störlichtbogens deutlich geringer, als der berechnete Kurzschlussstrom I''_{k3} der Anlage (hierbei ist vom minimalen Wert des dreipoligen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms auszugehen). Prinzipiell gilt der Zusammenhang:

$$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3min} \quad (\text{siehe auch A 3.4.2})$$

Der **Strombegrenzungsfaktor** k_B lässt sich nicht exakt bestimmen und kann z. B. aus einem Diagramm in [21] ermittelt werden. Für Richtwerte siehe Tabelle 4-2.

Im Bereich > 1 kV ist die begrenzende Eigenschaft des Störlichtbogens zu vernachlässigen. Hier gilt: $k_B = 1$.

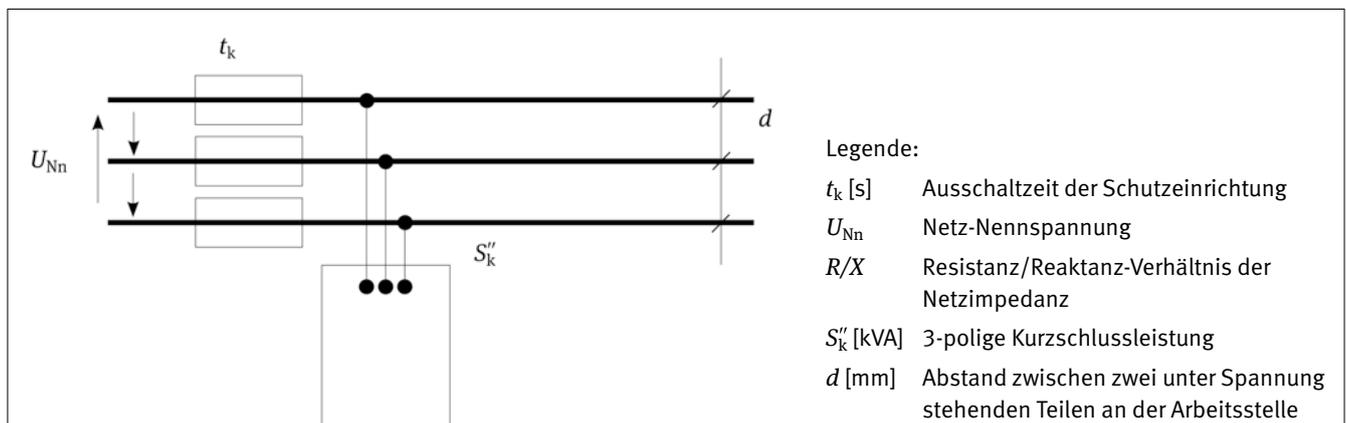


Abb. 4-1 Kenngrößen der elektrischen Anlage

Im Niederspannungs-Bereich liegt man im Allgemeinen im sicheren Bereich, wenn man von einer Strombegrenzung von 50 % ausgeht und mit diesem reduzierten Strom die Ausschaltzeit aus der Schutzkennlinie bestimmt. Der Strombegrenzungsfaktor beträgt dann $k_B = 0,5$; es folgt $I_{kLB} = 0,5 \cdot I''_{k3,min}$

Die Kurzschlussdauer t_k , die ebenfalls die Lichtbogendauer t_{LB} ist, wird nun mit Hilfe der Kennlinie der Überstromschutzzeitrichtung und dem ermittelten Lichtbogenkurzschlussstrom I_{kLB} ermittelt (siehe auch A 3.4.3).

Die Ausschaltzeit wird mit Hilfe des minimalen dreipoligen Kurzschlussstromes $I''_{k3,min}$ bestimmt (Worst-Case-Betrachtung) (siehe Abb. 4-3).

Bei Kurzschlussdauern über 1 s kann ggfs. davon ausgegangen werden, dass die Person sich aus dem unmittelbaren Gefahrenbereich zurückziehen kann und deshalb längere Zeiten nicht berücksichtigt werden brauchen. Dies gilt nicht, wenn das Arbeitsumfeld ein Entfernen der Person verhindert oder einschränkt (z. B. Arbeiten in engen Kabelgräben oder -kanälen, schmalen Arbeitsgängen, Arbeiten auf Leitern oder Hebeeinrichtungen).

Die Lichtbogenenergie W_{LB} wird durch die Lichtbogenleistung P_{LB} und die Lichtbogendauer t_{LB} bestimmt, die der Kurzschlussdauer t_k bis zum Ausschalten durch die Überstromschutzzeitrichtung entspricht:

$$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_{LB}$$

Die Lichtbogenleistung P_{LB} ist von der Art der Lichtbogenbildung und der Geometrie der unter Spannung stehenden Teile am Fehlerort abhängig. Sie wird mit Hilfe der bezogenen Lichtbogenleistung k_p aus der Kurzschlussleistung S''_k mit der Gleichung $P_{LB} = k_p \cdot S''_k$ bestimmt.

Die **bezogene Lichtbogenleistung** k_p lässt sich unter Berücksichtigung des wirksamen Elektrodenabstandes d (Leiterabstand der Anlage) z. B. nach „Schau, H.; Halinka, A.; Winkler, W.: Elektrische Schutzzeitrichtungen in Industriernetzen und -anlagen“ [21] ermitteln. Richtwerte zu k_p sind in Tabelle A 3-2 im Anhang 3 angegeben.

Tabelle 4-2 Richtwerte des Strombegrenzungsfaktors für eine Worst-Case-Berechnung

Spannungsbereich	Strombegrenzungsfaktor (Richtwerte) k_B
Niederspannung	0,5
Mittel- und Hochspannung	1,0

Somit ergibt sich generell für die Abschätzung der Lichtbogenenergie im Fehlerfall der Zusammenhang:

$$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$$

Mit der Kurzschlussleistung $S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$ folgt

$$W_{LB} = k_p \cdot \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max} \cdot t_k$$

Für Worst-Case-Betrachtungen kann k_p durch den maximalen Wert k_{pmax} ersetzt werden:

$$k_{pmax} = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$$

Der maßgebliche Kurzschlussstrom I''_{k3} ist der prospektive dreipolige Kurzschlussstrom am Arbeitsort (Fehlerort). Er ist das Ergebnis einer Kurzschlussstromberechnung (siehe Anhang A 3.4.2 und VDE 0102); dabei ist vom maximalen Wert des dreipoligen Anfangs-Kurzschlusswechselstroms auszugehen.

Die Brenndauer des Lichtbogens t_{LB} entspricht der Kurzschlussdauer t_k und wird durch die Überstromschutzzeitrichtungen bestimmt. Die Kurzschlussdauer kann im Allgemeinen aus Selektivitätsberechnungen und/oder den Ausschalt-Kennlinien (Strom-Zeit-Kennlinien) der Hersteller der Überstromschutzzeitrichtungen entnommen werden.

4.2.3 Ermittlung des Schutzpegels der PSaGS für die Arbeitssituation

Der Schutzpegel der PSaGS W_{LBS} wird bestimmt durch den Prüfpegel der PSaGS, durch den Arbeitsabstand a und die Geometrie der Anlage (Faktor k_T) (siehe Abb. 4-4).

Der **Arbeitsabstand** a ist der Abstand zwischen Störlichtbogen und dem Körper der Person (Oberkörper), der bei Arbeitshandlungen im betrachteten Arbeitsumfeld wirksam wird oder auch einzuhalten ist. Bei unterschiedlichen Handlungen in einem Arbeitsumfeld ist der geringste entstehende Abstand anzusetzen.



Abb. 4-3 Beispiel zur Ermittlung der Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung

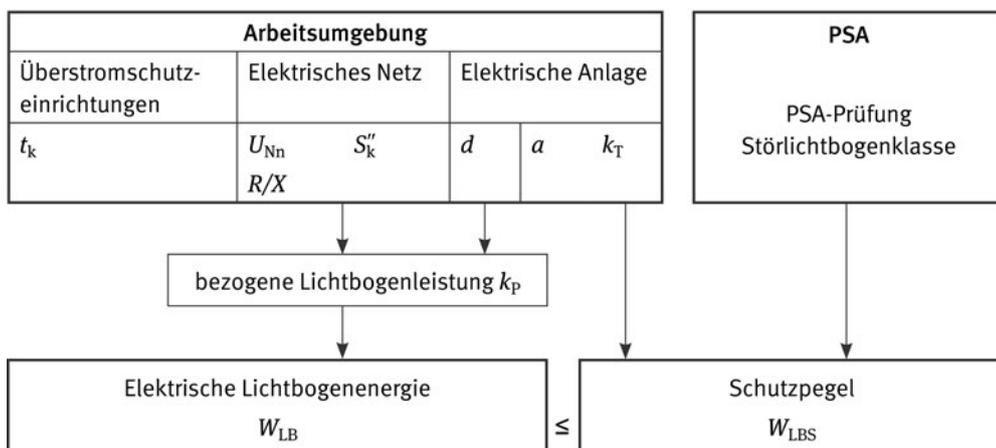


Abb. 4-4 Ermittlung des Schutzpegels

Man kann davon ausgehen, dass bei Arbeiten der Abstand von $a = 300$ mm zum Oberkörper einer Person nicht unterschritten wird. Abweichende Abstände für PSAgS für andere Körperpartien (z. B. Kopf, Beine) können berücksichtigt werden. Typische Werte sind im Anhang A 3.4.5, Tabelle A 3-3 genannt.

Der Schutz der Hände ist nur begrenzt möglich. Wenn sich die Hände direkt in der unmittelbaren Nähe des Störlichtbogens befinden, kann keine Aussage über den Schutz der Hände getroffen werden. Erfahrungen aus dem Unfallgeschehen zeigen jedoch, dass Verbrennungen der Hände immer dann zu beklagen sind, wenn keine Handschuhe getragen wurden. Im Fehlerfall werden die Hände in der Regel reflexartig zurückgezogen. Es werden Handschuhe empfohlen, die störlichtbogengeprüft sind.

Der **Transmissionsfaktor k_T** berücksichtigt die geometrische Anlagenkonfiguration der elektrischen Anlage und beschreibt die räumliche Ausbreitung der thermischen Auswirkungen des Lichtbogens im Raum.

Bei kleinräumigen Anlagen findet eine gerichtete Ausbreitung der thermischen Auswirkungen des Lichtbogens statt. Je offener und großräumiger die Anlage ist, desto ungerichteter ist die Ausbreitung der thermischen Auswirkungen des Lichtbogens (siehe Abb. 4-5).

Beispielhafte Abbildungen von realen Anlagensituationen sind in Anhang 6 dargestellt.

Das Prüfverfahren zum Nachweis der thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens ist in Abschnitt A 2.2 ausführlich beschrieben.

Im Prüfverfahren werden zwei Störlichtbogenschutzklassen APC (Arc Protection Classes) unterschieden, die die Schutzwirkung der PSAgS gegenüber den thermischen Auswirkungen von Lichtbögen festlegen. Diese beiden Störlichtbogenschutzklassen werden mit Lichtbögen mit den nachfolgenden Lichtbogenenergien (Prüfpegel) und Verwendung des im Prüfverfahren beschriebenen Prüfaufbaues nachgewiesen.

Störlichtbogenschutzklasse APC 1 $W_{LBP_APC1} = 168$ kJ
 Störlichtbogenschutzklasse APC 2 $W_{LBP_APC2} = 320$ kJ

Aus der elektrischen Lichtbogenenergie der Prüfklasse W_{LBP} lässt sich für einen beliebigen Arbeitsabstand a (≥ 300 mm) mit der nachfolgenden Formel eine äquivalente Lichtbogenenergie W_{LBS} ermitteln. Das ist der Schutzpegel W_{LBS} , bei dem der Schutz durch die PSAgS bei dem betreffenden Abstand a noch gegeben ist.² Außerdem lässt sich die Anlagenkonfiguration mit dem Faktor k_T

² Machbarkeitsuntersuchung zur Prüfung und Bewertung von Schutzhandschuhen gegen thermische Gefahren von Störlichtbögen (AG: BGFE; AN: STFI/TU Ilmenau), Abschlussbericht STFI v. 30.05.2005

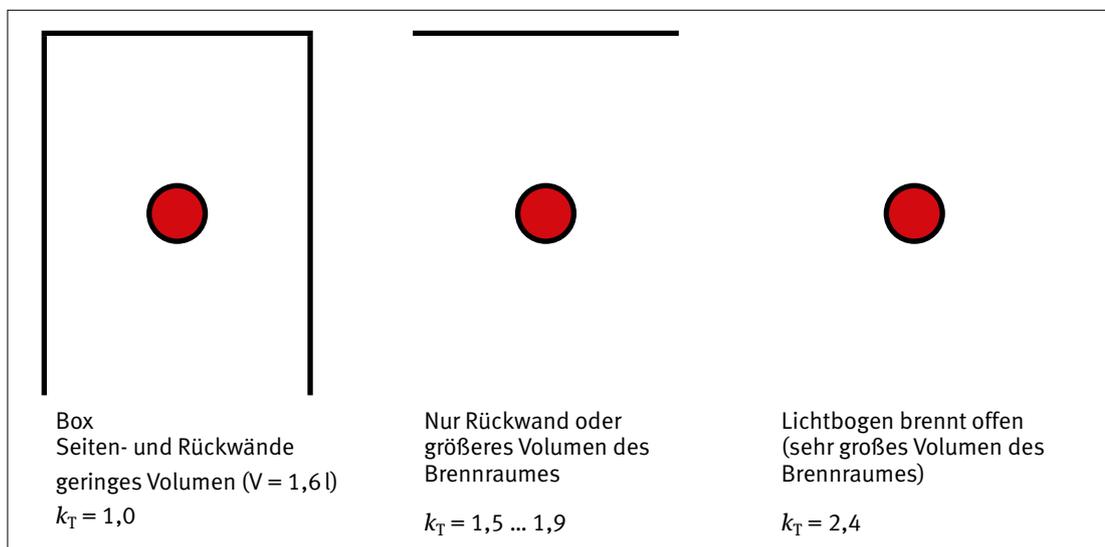


Abb. 4-5
Richtwerte für Transmissionsfaktoren für verschiedene Anlagenverhältnisse

berücksichtigen. Allgemein gilt ausgehend vom Prüfverfahren des Boxtests

$$W_{\text{LBS}} = k_{\text{T}} \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}} \right)^2 \cdot W_{\text{LBP}} \quad (\text{für } a \geq 300 \text{ mm})$$

Anmerkung:

Die Formel ist nur gültig für die Berechnung und Auswahl von PSAGS, die unter Normbedingungen (IEC 61482-1-2) geprüft wurden ($a = 300 \text{ mm}$, APC 1 bzw. 2).

4.2.4 Auswahl der PSAGS

Sofern der Erwartungswert der elektrischen Lichtbogenenergie W_{LB} den Wert 50 kJ nicht unterschreitet ist ausgehend vom Schutzpegel W_{LBS} für die Wahl der Störlichtbogenschutzklasse der PSAGS (Boxtest nach IEC 61482-1-2) die Relation zum Erwartungswert der elektrischen Lichtbogenenergie W_{LB} zu betrachten. Die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens sind abgedeckt, wenn $W_{\text{LB}} \leq W_{\text{LBS}}$ gilt.

Von dieser Relation ausgehend lassen sich mit den oben genannten Bestimmungsgrößen und -gleichungen auch die Grenzen für die Anwendbarkeit der PSAGS einer gewählten Störlichtbogenschutzklasse hinsichtlich

- des Kurzschlussstrombereichs,
- der erlaubten Kurzschlussdauer bzw. Ausschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (und damit der Überstromschutzeinrichtung selbst),
- des zulässigen Arbeitsabstandes ermitteln (siehe auch Anhang 7).

Eine Zusammenfassung der Abschätzungsverfahren für AC-Anlagen zeigt Abb. 4-6.

4.3 Abschätzungsverfahren für DC-Anlagen

4.3.1 Allgemeines Berechnungsverfahren

Die nachfolgenden Aussagen gelten für Niederspannungs-Gleichstromanlagen (LVDC).

Anmerkung:

Der Algorithmus gilt insbesondere für Gleichstromkreise, in denen sich quasistationäre Kurzschlussstromverhältnisse einstellen und/oder die Kurzschlussdauer deutlich größer als die Zeitkonstante des DC-Kreises $\tau = L/R$ ist. Fälle großer Zeitkonstanten und geringen Kurzschlussdauern sind durch die Berechnungsgrundlagen mit abgedeckt; die Ergebnisse besitzen dann jedoch u. U. größere Sicherheitsreserven.

Die Arbeitsumgebung ist in Gleichspannungsanlagen durch die elektrischen Parameter

U_{Nn}	Nennspannung des DC-Systems (Netzes)
R_{N}	ohmscher Gesamtwiderstand des DC-Systems
P_{k}	Kurzschlussleistung des DC-Systems (Fehlerstelle)
sowie	
d	Elektrodenabstand in der DC-Anlage
t_{k}	Ausschaltzeit der vorgeordneten Überstromschutzeinrichtung (Kurzschlussdauer)

gekennzeichnet. Der ohmsche Widerstand des DC-Netzes setzt sich aus dem Innenwiderstand der DC-Quelle (Gleichrichter mit vorgeordnetem AC-Netz, Wechselrichter, Batterie), den Leitungswiderständen und dem Widerstand weiterer Elemente des DC-Kreises (z. B. Drosseln etc.) zusammen.

Die Kurzschlussleistung des DC-Systems P_{k} ergibt sich aus der Nennspannung der DC-Quelle und dem Dauerkurzschlussstrom I_{kDC} (stationärer Wert des Kurzschlussstroms bei metallischem Kurzschluss an der Fehlerstelle):

$$P_{\text{k}} = U_{\text{Nn}} \cdot I_{\text{kDC}} = U_{\text{Nn}}^2 / R_{\text{N}}$$

Anmerkung:

Als Dauerkurzschlussstrom bei Gleichrichter gespeisten DC-Systemen ist der arithmetische Mittelwert des Stroms nach Abklingen des Ausgleichsvorgangs anzusehen.

Der Lichtbogenkurzschlussstrom I_{kLB} , der Strombegrenzungsfaktor k_{B} und die Lichtbogenleistung P_{LB} werden iterativ aus der Approximation der Strom-Spannungs-Charakteristik

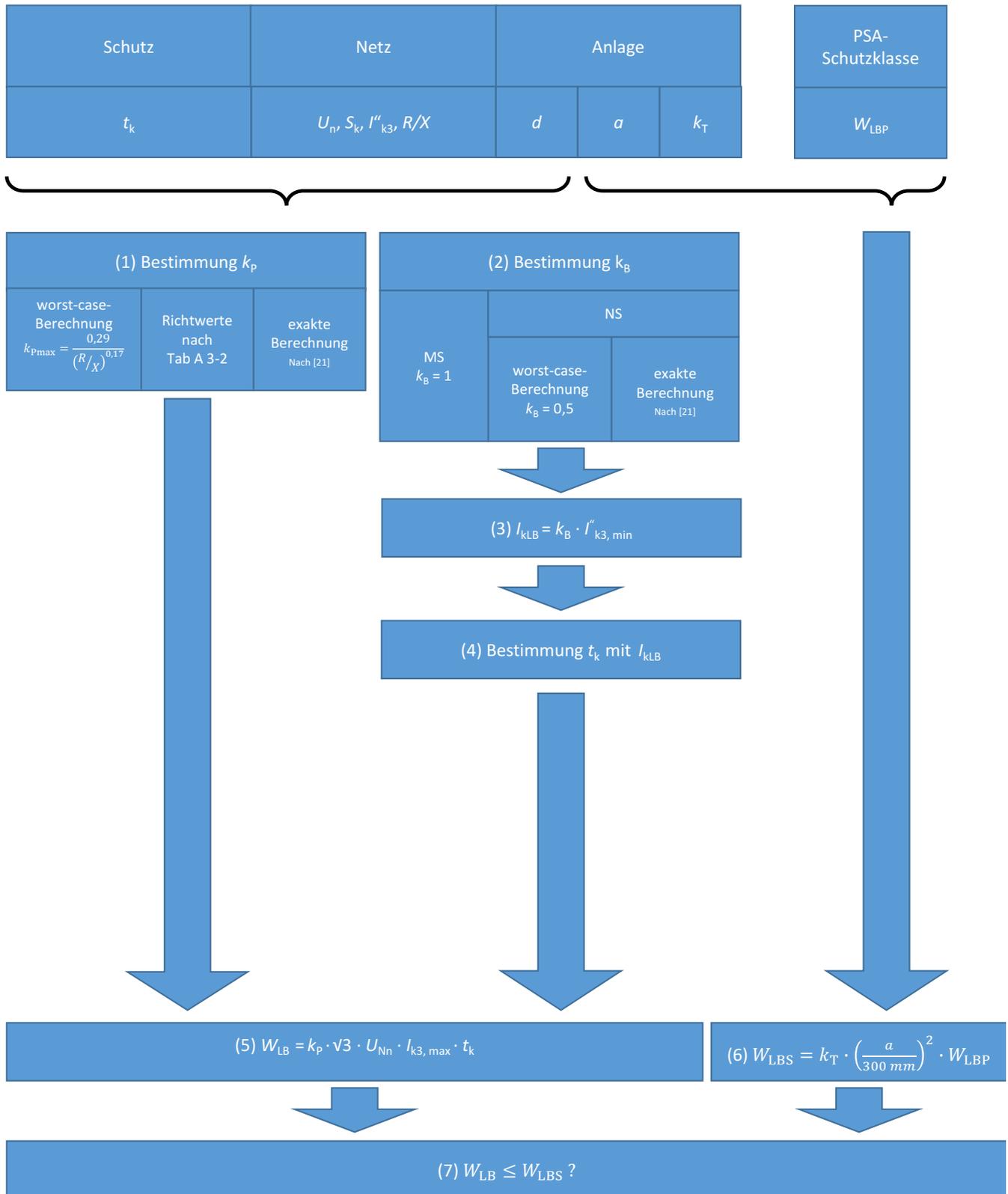


Abb. 4-6 Zusammenfassung Abschätzungsverfahren für AC-Anlagen

$$U_{LB} = (34 + 0,532 \cdot d) \cdot I_{kLB}^{0,12}$$

mit Hilfe des Elektrodenabstands d bestimmt (die Gleichung gilt für die Lichtbogenleistung in V, den Lichtbogenkurzschlussstrom I_{kLB} in A und den Elektrodenabstand d in mm). Für die Iteration gilt allgemein die Rekursionsvorschrift (i und $i+1$ sind aufeinander folgende Iterationsschritte):

$$I_{kLB(i+1)} = \frac{U_{Nn}}{R_{LB(i)} + R_N} = \frac{U_{Nn}}{\frac{(34 + 0,532 \cdot d)}{I_{kLB(i)}^{0,88}} + \frac{U_{Nn}}{I_{kDC}}}$$

Mit Vorgabe eines Anfangswerts mit $I_{kLB(0)}$ wird diese Iteration bis zu einem festgelegten Abbruchkriterium vorgenommen werden.

Für die Lichtbogenleistung gilt

$$P_{LB(i+1)} = U_{LB(i+1)} \cdot I_{kLB(i+1)} \\ = \frac{U_{Nn} \cdot (34 + 0,532 \cdot d) \cdot I_{kLB(i+1)}^{0,12}}{\frac{(34 + 0,532 \cdot d)}{I_{kLB(i)}^{0,88}} + \frac{U_{Nn}}{I_{kDC}}}$$

Anmerkung:

Zweckmäßigerweise geht man von einem Anfangswert $I_{kLB(0)} = 0,5 I_{kDC}$ aus. Die Iteration wird abgebrochen, wenn eine festgelegte Abweichung der Ergebnisse zweier aufeinanderfolgender Iterationsschritte (z. B. 0,5 %) unterschritten wird.

Die bezogene Lichtbogenleistung lässt sich aus

$$k_P = \frac{P_{LB}}{P_k} \text{ ableiten.}$$

Ausgehend von der Lichtbogenleistung bzw. bezogenen Lichtbogenleistung wird der Erwartungswert der Lichtbogenenergie nach

$$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_{LB} = k_P \cdot P_k \cdot t_{LB}$$

berechnet. Die Lichtbogendauer t_{LB} bzw. Kurzschlussdauer t_k wird aus den Schutzeinstellungen bzw. Schutzgeräte-Kennlinien in Analogie zum AC-Verfahren auf der Grundlage des Lichtbogenkurzschlussstroms I_{kLB} bestimmt.

Anmerkung:

Bei der Bestimmung der Kurzschlussdauer aus Kennlinienangaben von Herstellern (z. B. Sicherungen) ist ggfs. die Zeitkonstante L/R des DC-Systems zu beachten.

Die Schutzpegel der PSAGS werden in Analogie zur Verfahrensweise für AC-Anlagen (Abschnitt 4.2.3) ermittelt und bewertet.

4.3.2 Grobabschätzung anhand von Richtwerten (Worst-Case-Betrachtung)

Für sehr grobe Einschätzungen der Lichtbogenleistung kann im DC-Bereich der Richtwert $k_{P_{max}} = 0,25$ angewendet werden:

$$P_{LB} = k_{P_{max}} \cdot P_k = 0,25 \cdot P_k$$

Die Anwendung des Iterationsverfahrens ist dann nicht erforderlich.

Für den Niederspannungsbereich liegt man auch bei DC-Systemen meist auf der sicheren Seite, wenn man als Richtwert für den Strombegrenzungsfaktor $k_B = 0,5$ ansetzt.

5 Hinweise zur praktischen Umsetzung

Zur Unterstützung in der Anwendung des Verfahrens wurden Arbeitsblätter (Excel) entwickelt. Diese sind im **Downloadbereich** der Internetseite des Sachgebietes Elektrotechnik und Feinmechanik der DGUV bereitgestellt (www.dguv.de; Webcode: d1183022).



Folgende alternative Schritte können bei der Anwendung des Berechnungsverfahrens genutzt werden, um exaktere Ergebnisse zu erzielen.

- Wurde bei der Bestimmung der bezogenen Lichtbogenleistung k_p im ersten Ansatz mit dem Maximalwert k_{pmax} gerechnet, ist dies zwar die sicherere Rechnung, kann aber in der Praxis dazu führen, dass weit über das Ziel hinausgeschossen wird. Hier lohnt es sich, mit einem typischen Richtwert oder unter Berücksichtigung der praktischen Anlagenkonfiguration zu rechnen.
- Bei der Bestimmung des Strombegrenzungsfaktors k_B kann für Lichtbögen in Niederspannungsnetzen von einem Wert von 0,5 (Worst-Case) ausgegangen werden. Eine Berechnung des Strombegrenzungsfaktors nach dem genaueren Verfahren [21] ergibt in der Regel k_B -Werte $> 0,5$ und kann damit zu erheblich niedrigeren Lichtbogenenergien führen, z. B. wenn die Kurzschlussabschaltung durch Schmelzsicherungen mit Abschaltzeiten < 1 s erfolgt (siehe Beispiele im Anhang 5).
- Die Geometrie der realen Anlage geht in die Berechnung mit ein. Anhand der tatsächlichen geometrischen Gegebenheiten der Anlage und des Arbeitsumfeldes kann der Transmissionsfaktor k_T , der zu Beginn in der Regel in erster Näherung festgelegt wurde, angepasst werden. Wenn vom Transmissionsfaktor $k_T = 1$ abgewichen werden soll, muss die Festlegung begründet sein.

Ergibt die Anwendung der Gefährdungsbeurteilung in Phase 3, dass die Schutzwirkung der gewählten PSAgS für das betrachtete Arbeitsverfahren nicht ausreichend ist, können in Phase 4 zum Beispiel nachfolgende Maßnahmen näher betrachtet werden:

- Die Charakteristik und damit die Auslösezeit des Schutzorgans haben einen wesentlichen Einfluss auf die mögliche Lichtbogenenergie im Fehlerfall. Ein Austausch der vorgeschalteten Sicherung durch eine flinke Arbeitsschutzsicherung oder das Verstellen der Auslösecharakteristik eines Leistungsschalters für die Zeit der Arbeit ist hier denkbar.
- Eine separate Schutzeinrichtung für Störlichtbögen erfasst einen Störlichtbogen über ein Sensorsystem, leitet unverzüglich einen metallischen Kurzschluss ein und bringt so das vorgeordnete Schutzorgan zur Auslösung. Dadurch wird die Brenndauer des Lichtbogens bis auf wenige Millisekunden reduziert. Diese Einrichtungen können als Festeinbau bei der Projektierung der Anlage bereits berücksichtigt werden.
- Der Arbeitsabstand hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Schutzpegel der PSAgS. So ist es immer sinnvoll zu überlegen, ob mit zusätzlichen Hilfsmitteln eine Vergrößerung des Arbeitsabstandes realisiert werden kann.
- Je nach Anlagenkonfiguration kann die Kurzschlussleistung am Arbeitsort durch eine geänderte Schaltvariante reduziert werden (z. B. Auftrennen einer Maschennetzschaltung, Aufhebung einer Parallelschaltung). Dabei ist zu beachten, dass damit gegebenenfalls in Verbindung stehende Schalthandlungen ebenso hinsichtlich ihrer Störlichtbogenegefährdung berücksichtigt werden.
- Für höhere Einwirkenergien geprüfte PSAgS einsetzen.

Bei der praktischen Anwendung der PSaGS müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Die Anforderungen der DGUV Vorschrift 3 und 4 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ [4] sind insbesondere im Hinblick auf die Verwendung der weiteren PSA bei Arbeiten an und in der Nähe elektrischer Anlagen zu beachten.
- Das Verfahren berücksichtigt lediglich den Schutz vor den thermischen Auswirkungen eines Lichtbogens. Dies sind erfahrungsgemäß die gravierendsten Einflüsse. Bei Störlichtbögen in energiereichen Anlagen können zum Beispiel die Druckwelle, der Schall, die optische Strahlung oder die austretenden Lichtbogen-gase zu weiteren Gefährdungen führen.

- Damit diese PSaGS im Fehlerfall auch den richtigen Schutz geben kann, müssen die Hinweise des Herstellers beachtet werden. Hier ist insbesondere auf die richtige Benutzung einschließlich der vom Hersteller vorgeschriebenen Pflege, Instandhaltung und Austauschkriterien zu achten.



Achtung

Ergibt die Gefährdungsbeurteilung, dass das Restrisiko zu hoch ist (roter Bereich) und keine weiteren Maßnahmen erfolgen können, darf so an der Anlage nicht gearbeitet werden.
Die Anlage muss freigeschaltet werden.

Anhang 1

Vorschriften, Regeln, Literatur

A 1.1 EU-Richtlinien und Verordnungen

Bezugsquelle:

Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH,
Postfach 10 05 34, 50445 Köln

[1] VERORDNUNG (EU) 2016/425 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. März 2016 über persönliche Schutzausrüstungen und zur Aufhebung der Richtlinie 89/686/EWG des Rates

A 1.2 Vorschriften, Regeln und Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit

Bezugsquelle:

Bei Ihrem zuständigen Unfallversicherungsträger
und unter www.dguv.de/publikationen

- [2] Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)
- [3] DGUV Vorschrift 1 „Grundsätze der Prävention“
- [4] DGUV Vorschrift 3 und 4 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“

A 1.3 Normen/VDE-Bestimmungen

Bezugsquelle:

Beuth-Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin
und VDE-Verlag, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin

- [5] DIN EN ISO 14116: Schutzkleidung – Schutz gegen Hitze und Flammen – Materialien, Materialkombinationen und Kleidung mit begrenzter Flammenausbreitung (2015-11).
- [6] prENV 50354: Störlichtbogenprüfverfahren für Materialien und Kleidungsstücke für Anwender, die einer Störlichtbogengefährdung ausgesetzt sind (2000).
- [7] DIN EN 31010 (VDE 0050-1): Risikomanagement – Verfahren zur Risikobeurteilung (2010-11)
- [8] DIN EN 60909 (VDE 0102): Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme (2016-12)
- [9] DIN EN 61660-1 (VDE 0102-10) Kurzschlussströme – Kurzschlussströme in Gleichstrom-Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken und Schaltanlagen – Teil 1: Berechnung der Kurzschlussströme (1998-06)
- [10] DIN EN 61482-1-1 (VDE 0682-306-1-1): Arbeiten unter Spannung – Schutzkleidung gegen thermische Gefahren eines Lichtbogens – Teil 1-1: Prüfverfahren – Verfahren 1: Bestimmung der Lichtbogen-Kennwerte (ELIM, ATPV und/oder EBT) von Bekleidungsstoffen und Schutzkleidung mithilfe eines offenen Lichtbogens (2020-08).
- [11] DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2): Arbeiten unter Spannung – Schutzkleidung gegen thermische 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) (2015-08).
- [12] IEC 61482-2: Arbeiten unter Spannung – Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines Lichtbogens – Teil 2: Anforderungen (2018-05).
- [13] RfU CNB/P/03.024: RECOMMENDATION FOR USE “Eye and face protection against electrical arc; additional requirements” (2013-03)
- [14] NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace (2018).
- [15] IEEE 1584: Guide for performing arc-flash hazard calculations (2018).
- [16] ASTM F2178 – 12: Standard Test Method for Determining the Arc Rating and Standard Specification for Face Protective Products.
- [17] ASTM F2178 – 17b: Standard Test Method for Determining the Arc Rating and Standard Specification for Eye or Face Protective Products
- [18] ASTM F2675/F2675M – 13: Standard Test Method for Determining Arc Ratings of Hand Protective Products Developed and Used for Electrical Arc Flash Protection
- [19] IEC 63232-1-1 ED1 Live Working – Hand Protective Devices Against The Thermal Hazards Of An Electric ARC – Part 1-1: Test methods – Method 1: Determination of the arc rating (ELIM, ATPV and/or EBT) of hand protective devices using an open arc; CD 2020
- [20] IEC 63232-1-2 ED1 Live Working – Hand Protective Devices Against The Thermal Hazards of an Electric ARC – Part 1-2: Test methods – Method 2: Determination of arc protection class hand protective devices by using a constrained and directed arc (box test); CD 2020

A 1.4 Literatur

- [21] Schau, H.; Halinka A.; Winkler, W.: Elektrische Schutzeinrichtungen in Industrienetzen und -anlagen. Hüthig & Pflaum Verlag München/ Heidelberg 2008.
- [22] Schau, H.: Schutzausrüstung gegen Störlichtbögen auswählen. Schutz von Personen vor Störlichtbögen. Elektropraktiker, Berlin 69 (2015)1, S. 44–51
- [23] GS-ET-29, Zusatzanforderungen für die Prüfung und Zertifizierung von Elektriker-Gesichtsschutz, Stand 2010-02, Prüf- und Zertifizierungsstelle im DGUV Test, www.bgetem.de, Webcode: pruefstelle-et.
- [24] GS-ET-42-1, Zusatzanforderungen für die Prüfung und Zertifizierung von elektrisch isolierenden Handschuhen mit zusätzlichem Schutz vor den thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens, Stand 2019-02, Prüf- und Zertifizierungsstelle Elektrotechnik im DGUV Test, www.bgetem.de, Webcode: pruefstelle-et
- [25] GS-ET-42-2, Zusatzanforderungen für die Prüfung und Zertifizierung von Hitzeschutzhandschuhen mit zusätzlichem Schutz vor den thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens, Stand 2019-02, Prüf- und Zertifizierungsstelle Elektrotechnik im DGUV Test, www.bgetem.de Webcode: pruefstelle-et
- [26] IVSS Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen eines Störlichtbogens (2. Ausgabe 2011)
- [27] Machbarkeitsuntersuchung zur Prüfung und Bewertung von Schutzhandschuhen gegen thermische Gefahren von Störlichtbögen (AG: BGFE; AN: STFI/TU Ilmenau), Abschlussbericht STFI v. 30.05.2005
- [28] Literatur-Referenz zu Vortragsveranstaltung Elektrotechnik 2018 der BG ETEM

Weitergehende Literaturangaben werden kontinuierlich auf der Internetseite des Sachgebietes Elektrotechnik und Feinmechanik des Fachbereichs ETEM der DGUV (www.dguv.de; Webcode: d1183022) bereitgestellt.



Anhang 2

Normung der PSAgS gegen die thermischen Auswirkungen von Störlichtbögen

A 2.1 Normung für Schutzkleidung

Zur Prüfung und Bewertung der in einem Störfall möglicherweise lebensrettenden Kleidung existiert die Norm IEC 61482-2 [12], die die Anforderungen an Schutzkleidung und -materialien zum Schutz gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens festlegt. Diese Norm fordert, dass eine Prüfung unter Störlichtbogenbedingungen stets an Materialien und Kleidung durchzuführen ist. Dazu sind international zwei Prüfverfahren normativ beschrieben.

A 2.2 Normung mit Ursprung in Europa für die Prüfung von Schutzkleidung

Der Bereich der Störlichtbogenprüfung von PSAgS in Europa begann in den 1990er Jahren mit ausführlichen Untersuchungen schwerentflammbarer Textilien hinsichtlich ihres möglichen Schutzvermögens gegenüber den thermischen Wirkungen eines elektrischen Störlichtbogens.

Am Beginn der Normungsarbeiten stand der Wunsch, vorerst insbesondere Schutzkleidung zum Einsatz gegen die Wirkungen eines Störlichtbogens sicher und reproduzierbar prüfen und bewerten zu können. Dazu wurde auf Basis eines damals vorliegenden Normenentwurfs prENV 50354 [6] (Störlichtbogenprüfverfahren für Materialien und Kleidungsstücke für Anwender, die einer Störlichtbogensgefährdung ausgesetzt sind) begonnen, die



Abb. A 2-1 Prüfaufbau Box-Test Verfahren

Schutzwirkung von textilen Flächen und Erzeugnissen in zwei Störlichtbogenschutzklassen zu untersuchen. Dieses Verfahren benutzte bereits die nur an einer Seite offene Box zur Erzeugung einer gerichteten Lichtbogenexposition auf das in 300 mm Abstand positionierte Prüfmuster einer textilen Fläche oder Jacke.

Ebenso definierte dieser Entwurf bereits die Verwendung von Aluminium- und Kupferelektroden, um den realen Gegebenheiten weitmöglichst zu entsprechen. Als Beurteilungskriterien waren enthalten:

- keine Nachbrennzeit der Probe > 5 s,
- keine Lochbildung > 5 mm,
- kein Durchschmelzen auf die Innenseite,
- Funktionsfähigkeit des Verschlusssystems nach Exposition.

Größter Nachteil des Verfahrens war jedoch die fehlende Zielstellung, Aussagen zur tatsächlichen Schutzwirkung gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens treffen zu wollen. Wie schon aus den Beurteilungskriterien ersichtlich sollte die Methode lediglich bestätigen, dass im Störlichtbogenfall nicht bereits durch die Kleidung schädigende Auswirkungen auf die Person, die diese trägt, zu erwarten sind (z. B. durch Entflammen, Lochbildung etc.). Dementsprechend waren auch keine Beurteilungsmöglichkeiten für das Risiko von Hautverbrennungen enthalten, wie sie bei ungenügender thermischer Isolation der Schutzkleidung auftreten.

Diese sicherheitsrelevante Lücke bei der Prüfung und Bewertung von Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens wurde 2007 mit der Veröffentlichung des international harmonisierten Standards IEC 61482-1-2 geschlossen. Dieser Prüfstandard wurde auch als DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2) [11]) publiziert und 2014 erstmals erfolgreich überarbeitet. Als konsequente Weiterentwicklung der Idee einer gerichteten Störlichtbogenprüfung mittels einer nur in Richtung der Probe geöffneten Prüfbox beinhaltet die Norm die Prüfung von Flächenmaterialien und Erzeugnissen für zwei Schutzklassen, die sich in Größe der Lichtbogen- und der Einwirkenergie unterscheiden.

Die folgende Tabelle A 2-1 gibt einen Überblick zu den relevanten Parametern jeder Prüfklasse.

Tabelle A 2-1 Parameter des Box-Test Verfahrens

Störlichtbogenschutzklasse (Arc Protection Class)	Mittelwert der Lichtbogenenergie W_{arc} [kJ]	Mittelwert der Einwirkenergie [kJ/m ²]	Prospektiver Prüfstrom [kA]	Lichtbogenzeit [ms]
APC 1	168	146	4	500
APC 2	320	427	7	500

Die Grundphilosophie des Verfahrens besteht in der objektiven Prüfung und Bewertung des Störlichtbogenschutzes schwerentflammbarer Materialien bzw. Materialkombinationen sowie einer Überprüfung dieser Schutzwirkung am Fertigerzeugnis. Sowohl die Materialproben als auch die Erzeugnisse werden dabei in einem Abstand von 300 mm zur Lichtbogenachse positioniert, was einem vorstellbaren Arbeitsabstand unter realen Einsatzbedingungen entspricht. Die Lichtbogenachse wird durch die beiden vertikalen Elektroden definiert, die einen Abstand von 30 mm zueinander aufweisen. Als Elektrodenmaterial wird dabei Aluminium (oben) und Kupfer (unten) eingesetzt, um auch hier die Praxisbedingungen in einer Anlage so weit wie möglich nachbilden zu können. Die gewünschte Fokussierung der extremen thermischen Wirkung einer Lichtbogenexposition wird durch die parabolische Form der Prüfbox gewährleistet, welche die Elektrodenanordnung dreiseitig umschließt. Ober- und Unterteil der aus Gips gefertigten Box werden mittels isolierenden Platten verschlossen. Entsprechend des Prüfstromes der jeweiligen Lichtbogenschutzklasse wird der Lichtbogen in einem Prüfkreis mit der Spannung AC 400 V gezündet und nach einer Brenndauer von 500 ms gelöscht.

Das Boxtestverfahren besitzt eine sehr gute Reproduzierbarkeit. Im Rahmen der Überarbeitung der Prüfnorm wurde auf der Grundlage der ISO 5725-2 ein Vergleichstest, an dem 4 Testlabors in Italien, Spanien und Deutschland beteiligt waren, durchgeführt und ausgewertet. Für das Materialprüfverfahren wurden die Standardabweichungen der Wiederholbarkeit innerhalb eines Labors s_r und der Vergleichspräzision s_R des Verfahrens (Reproduzierbarkeit bzw. Gesamtstreuung) ermittelt, wie nachfolgende Tabelle A 2-2 zeigt.

Die bewerteten Parameter sind die Kontrollgrößen elektrische Lichtbogenenergie W_{LBP} und direkte Einwirkenergie E_{iOP} sowie die Differenz $E_{it} - E_{iSTOLL}$, die das quantitative Prüfkriterium Durchgangsenergie E_{it} (in

Bezug auf den Grenzwert E_{iSTOLL} für das Einsetzen von Hautverbrennungen 2. Grades, d. h. Blasenbildung der Haut mit oder ohne Narbenbildung) charakterisiert.

Für die Reproduzierbarkeit der Kontrollgrößen ergeben sich Standardabweichungen kleiner 5,3 % für die Lichtbogenenergie und kleiner 11 % für die Einwirkenergie, was angesichts der Stochastik der Lichtbogenvorgänge als sehr gut anzusehen ist.

Im Aufbau des Boxtestverfahrens wird als Probenhalterung für textile Flächen eine Prüfplatte verwendet, in die zwei Kalorimeter zur Messung der Durchgangsenergie integriert sind. Dies ermöglicht eine Messung des Wärmedurchgangs auf die Hautoberfläche (Probenrückseite) und damit eine Aussage zum Risiko von Verbrennungen zweiten Grades im Vergleich zu den Grenzwerten des Stoll/Chianta-Kriteriums. Zusätzlich erfolgt eine visuelle Beurteilung jeder Probe anhand der Kriterien Nachbrennzeit, Lochbildung und Durchschmelzen auf die Innenseite. Fertigerzeugnisse wie Jacken, Mäntel, Parkas, etc. werden auf einem standardisierten Mannequin geprüft. Neben den visuell zu bewertenden Kriterien analog einer Flächenprüfung erfolgt hier zusätzlich noch der Funktionstest des Verschlusssystems der Kleidung. Dies ist erforderlich, da nur ein funktionsfähiger Verschluss ein möglichst schnelles Ablegen der Kleidung nach einem Lichtbogenunfall ermöglicht. Darüber hinaus dient der Erzeugnistest einer Überprüfung ggf. vorhandener Accessoires, wie Reflexstreifen, Logos oder Emblemen hinsichtlich ihrer Störlichtbogenfestigkeit.

Dieser Prüfstandard ist seit Jahren etabliert und dient als Basis zahlreicher Zertifizierungen für Störlichtbogenschutzkleidung im Geltungsbereich der für Europa verbindlichen Verordnung für Persönliche Schutzausrüstung (EU) 2016/425 (vormals: Richtlinie 89/686/EWG) [1].

Tabelle A 2-2 Auswertung des Vergleichstests

Parameter		Störlichtbogen- schutzklasse APC	Wiederholbarkeit S_T	Reproduzierbarkeit S_R
W_{LBP}		1	3,5 kJ	5,0 kJ
		2	4,0 kJ	17,1 kJ
E_{iOP} (Kalibrierungstest)		1	15,7 kJ/m ²	16,0 kJ/m ²
		2	22,8 kJ/m ²	31,1 kJ/m ²
$E_{it} - E_{iStoll}$	Materialtest, 2 Materialien	1	10,2 kJ/m ²	12,0 kJ/m ²
	Materialtest, 1 Material *	2	14,5 kJ/m ²	14,5 kJ/m ²

* 2. Material nicht bewertbar

Neueste Erkenntnisse zeigen, dass die Lichtbogenschutzklassen auch die Expositionswirkungen in adäquaten Gleichstromsystemen energetisch abbilden.

A 2.3 Normung mit Ursprung in Amerika für die Prüfung von Schutzkleidung

Außerhalb Europas kommt für die Beurteilung des Störlichtbogenschutzes vorwiegend eine andere Prüfmethode zum Einsatz. Hier dominiert die Bestimmung des Lichtbogenkennwertes ATPV (Arc Thermal Performance Value) gemäß IEC 61482-1-1. Dieses auch als DIN EN 61482-1-1 (VDE 0682-306-1-1) [10] publizierte Verfahren erfordert eine Mittelspannungsquelle und basiert auf einem offenen, ungerichteten Lichtbogen zur Exposition von jeweils drei kreisförmig (120° Versatz) angeordneten Materialproben. Die Fixierung der textilen Flächenproben erfolgt auf Panels, in denen jeweils zwei Kalorimeter zur Messung der Durchgangsenergie eingebaut sind.

Zusätzlich verfügt jedes Panel über zwei rechts und links von der Probe angebrachte ungeschützte Kalorimeter, die gleichzeitig die direkte Einwirkenergie aufzeichnen. Im Abstand von 300 mm zu jedem Panel bilden 2 Elektroden aus Edelstahl (Elektrodenabstand 300 mm) das Zentrum des Kreises. Im Gegensatz zum Box-Test Verfahren verfügt die IEC 61482-1-1 nicht über definierte Störlichtbogenschutzklassen. Bei einem Prüfstrom von 8 kA und



Abb. A 2-2 ATPV-Testaufbau

über Variation der Lichtbogendauer bestimmt die Methode aus einer Menge von mindestens 20 Einzelwerten sowie einem logistischem Regressionsverfahren für jedes schwerentflammbare Material den jeweiligen Lichtbogenkennwert (ATPV oder EBT). Dieser Kennwert repräsentiert eine auf das Material einwirkende Energie, welche mit 50 % Wahrscheinlichkeit zur Überschreitung des Stoll-Grenzwertes (ATPV) bzw. zum Aufbrechen des Materials bis zur Körperoberfläche (EBT) führt.

Beurteilungskriterien für jedes einzelne Prüfmuster sind:

- Lochbildung/Aufbrechen des Materials in allen Lagen,
- Wärmedurchgang überschreitet Grenzwert für Hautverbrennung (Stoll-Kurve).

Nach Bestimmung des Kennwertes für das Material erfolgt unter Nutzung der gleichen Lichtbogendauer eine Beständigkeitsprüfung für das Erzeugnis auf einem dafür an Stelle eines Panels montierten Mannequins.

Um eine dem Lichtbogenkennwert entsprechende Einsatzentscheidung für die Kleidung treffen zu können, muss der Anwender die Methoden der Gefährdungsbeurteilung und Risikoabschätzung, z. B. gemäß NFPA 70E (Standard for Electrical Safety in the Workplace) [14] oder IEEE 1584 (Guide for performing arc-flash hazard calculations) [15], sicher und erfolgreich anwenden können. Andernfalls lässt sich aus dem Kennwert keine Auswahlempfehlung für Arbeiten in oder in der Nähe von elektrischen Anlagen ableiten.

Ebenso gibt es bislang keine gesicherte Möglichkeit einer Vergleichbarkeit oder Umrechnung zwischen dem ATPV-Wert und dem zur Prüfung und Zertifizierung von Schutzkleidung in Europa hauptsächlich verwendeten Box-Test Verfahren gemäß IEC 61482-1-2.

Das Verfahren gemäß IEC 61482-1-1 ist überarbeitet worden und im Juni 2019 mit Ausgabe 2 erschienen. In Deutschland ist diese Norm als DIN EN 61482-1-1 (VDE 0682-306-1-1:2020-08) [10] veröffentlicht worden. Neben einer Vielzahl technischer Präzisierungen und Änderung ist die Ausgabe 2 maßgeblich durch die Einführung eines weiteren Parameters ELIM (Energie-limit) gekennzeichnet. Neben den bekannten Größen ATPV und EBT soll dieser neue Parameter das Problem der 50 %-igen Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Grenzwertes der thermischen Durchgangsenergie lösen. Dies wird erreicht, indem als Ergebnis nur noch der Mittelwert der drei größten Messwerte direkt unterhalb des als Mixzone bezeichneten Übergangsbereiches betrachtet wird.

Allerdings unterscheiden sich die Kriterien zur Beurteilung des Materials bei Lichtbogenbeschuss insbesondere hinsichtlich Nachbrennzeit und Lochbildung noch immer erheblich vom Box-Test Verfahren. So existiert auch in der überarbeiteten Fassung der IEC 61482-1-1 kein Limit für die Nachbrennzeit eines durch die Lichtbogeneinwirkung entzündeten Materials. Setzt der Box-Test diesem als kritisch zu bewertenden Materialverhalten mit maximal 5 Sekunden Nachbrennzeit klare Grenzen, findet sich in der IEC 61482-1-1 keine entsprechende Festlegung. Auch die Definition eines Loches (Materialdurchbruch durch alle

Lagen) ist mit 25 mm fünfmal größer als im Box-Test. Hier zeigt sich die unterschiedliche Herangehensweise zwischen europäischen Prüf- und Bewertungsstandards entwickelt für gesetzliche geregelte PSA (gemäß PSA-Verordnung) und dem überwiegend amerikanisch dominierten Ansatz der Störlichtbogenprüfung und -bewertung.

A 2.4 Normung für andere PSAgS-Arten

National wie international arbeiten Fachleute der Standardisierungsgremien an der Normung weiterer PSAgS-Arten, hier vor allen an Ausrüstung zum Schutz von Kopf, Gesicht, Augen und Händen. Allen diesen Arbeiten ist gemein, dass sie weitmöglichst auf den bereits international genormten Prüfgrundlagen Box-Test oder Open-Arc-Test für Schutzkleidung aufbauen. Dem Anwender kann damit eine weitestgehend vollständige Schutzausrüstung zur Verfügung gestellt werden, deren Störlichtbogenschutz jeweils nach gleichen Grundsätzen geprüft und beurteilt wurde.

A 2.4.1 Normung mit Ursprung in Europa

A 2.4.1.1 Kopf, Augen- und Gesichtsschutz

Die europäische Grundnorm für Augen- und Gesichtsschutz ist die EN 166 in deren Abschnitt 7.2.7 „Schutz gegen Störlichtbogen“ jedoch nur Anforderungen beschrieben sind, die aus Versuchsreihen mit verschiedenen Werkstoffen im Störlichtbogen mit anschließender visueller Prüfung abgeleitet wurden. Dabei ist man davon ausgegangen, dass eine PSAgS für Augen und Gesicht, die bei einem Störlichtbogenversuch nicht schmilzt, brennt oder andere schwerwiegende Schädigungen zeigt, auch den Träger dieser PSAgS ausreichend schützt. Spätere Versuche mit Sensoren, die hinter dem entsprechenden Gesichtsschutz angebracht wurden, haben jedoch belegt, dass diese Vermutung nicht gerechtfertigt war. Denn, je nach Material und Design der Gesichtsschutzkomponenten, kann ohne zusätzliche Prüfungen nicht ausgeschlossen werden, dass Strahlung die optischen Komponenten der PSAgS für Augen und Gesicht durchdringt ohne dabei an dieser PSAgS selbst relevanten Schaden anzurichten oder dass Störlichtbogenenergie seitlich oder unterhalb dieser PSAgS vorbei Schäden an Augen und Gesicht verursachen.

Deshalb wurde seitens der Prüf- und Zertifizierungsstelle Elektrotechnik des DGUV Test mit dem GS-ET-29 [23] ein Prüfgrundsatz entwickelt, der alle thermischen Gefahren eines Störlichtbogens und weitere arbeitssicherheitsrelevante Anforderungen, wie z. B. Lichttransmission, berücksichtigt. Für die hierin beschriebene Störlichtbogenprüfung wurde der Prüfaufbau nach IEC 61482-1-2 grundsätzlich übernommen, die Sensoren jedoch in einen speziell dafür entwickelten Prüfkopf eingesetzt, zwei in Höhe der Augen, ein Sensor in der Höhe des Mundes und ein weiterer Sensor unter dem Kinn des Prüfkopfes. Dieser Prüfkopf wird auf eine vertikale angeordnete Platte so montiert, dass sich der Mundsensor in Höhe des Lichtbogensfokus befindet.

Seit 2013 sind die in diesem Prüfgrundsatz formulierten Zusatzerfordernungen für die Prüfung und Zertifizierung von Elektriker-Gesichtsschutz für in Europa zertifizierte Produkte verbindlich (s. RfU ,CNB/P/03.024' [13]). Damit ist sichergestellt, dass trotz noch ausstehender harmonisierter Normen in Europa zertifizierte Produkte tatsächlich sowohl eine Störlichtbogenfestigkeit als auch einen Störlichtbogenschutz nachgewiesen haben.

Die Störlichtbogenprüfung des Gesichtsschutzes gilt als bestanden, wenn für vier zu prüfende Muster die Nachbrennzeit ≤ 5 s ist, kein Durchschmelzen des Prüflings oder eine Lochbildung auftritt sowie die Wertepaare aller Kalorimeter des Prüfkopfs über die gesamte Messdauer von 30 s unterhalb der für das Risiko von Hautverbrennungen nach dem Stoll/Chiante-Kriterium definierten Grenzwerte liegen.

In Kürze wird die EN 166 und untergeordnete Normen durch die internationalen Normen ISO 16321-1, ISO 16321-2 und ISO 16321-3 abgelöst in denen jedoch nunmehr keine besonderen Anforderungen zum Störlichtbogenschutz enthalten sind. Parallel zu diesen Normen entsteht mit der IEC 62819 (VDE 0682-341) eine internationale Anforderungs- und Prüfnorm speziell für den Kopf-, Augen- und Gesichtsschutz gegen die thermischen, optischen und mechanischen Gefahren eines Störlichtbogens. Neben grundsätzlichen Anforderungen an jeden Augen- und Gesichtsschutz sind dort spezielle Anforderungen an thermischen, optischen und mechanischen Schutzeigenschaften einer PSAgS für Augen und Gesicht festgelegt und entsprechende Prüfverfahren beschrieben oder es wird mit Bezug auf die ISO 16321-1 und ISO 16321-2 auf entsprechende Prüfverfahren verwiesen.

So wie für den Augen- und Gesichtsschutz der Prüfgrundsatz GS-ET-29 [23] das Box-Test-Pendant der Störlichtbogenprüfnorm IEC 61482-1-2 darstellt, ist das nordamerikanische Prüfverfahren ASTM F2178 [16] das Pendant der IEC 61482-1-1 zur Bestimmung des ATPV, bzw. EBT. Beide Verfahren sind in der internationalen Fassung der IEC 62819 beschrieben, wegen der bei der Bestimmung des ATPVs tolerierten 50 %-igen Wahrscheinlichkeit einer Verbrennung 2. Grades, wird in der harmonisierten Fassung der EU neben dem Box-Test-Verfahren sicherlich nur der dort ebenfalls beschriebene ELIM zur Anwendung kommen.

A 2.4.1.2 Handschutz

Für die Prüfung und Bewertung von Störlichtbogenfestigkeit und -schutz von Handschuhen liegt ebenfalls kein international harmonisierter Prüf- und Bewertungsstandard vor. Daher wurde von der Prüf- und Zertifizierungsstelle Elektrotechnik des Fachbereichs ETEM im DGUV Test die Erarbeitung der Prüfgrundsätze GS-ET-42-1 „Zusatzerfordernungen für die Prüfung und Zertifizierung von elektrisch isolierenden Handschuhen mit zusätzlichem Schutz vor den thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens“ [24] und GS-ET-42-2 „Zusatzerfordernungen für die Prüfung und Zertifizierung von Hitzeschutzhandschuhen mit zusätzlichem Schutz vor den thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens“ [25] basierend auf einen vorangegangenen Forschungsprojekt [27] angestrengt.

Diese Prüfgrundsätze sind seit Februar 2019 verfügbar und enthalten nicht nur die Prüfung von Störlichtbogenfestigkeit und -schutz, sondern auch weitere sicherheitsrelevante Zusatzerfordernungen an einen anforderungsgerechten Störlichtbogen-Schutzhandschuh. Sie verwenden die grundlegenden Anlagengegebenheiten der gerichteten Exposition des Box-Test Verfahrens entsprechend IEC 61482-1-2 unter Nutzung einer speziell für Handschuhe konzipierten Probenhalterung. Die drei halbkreisförmig im gleichen Abstand von der Prüfbox angeordneten Panels ermöglichen die Prüfung kompletter Handschuhe und sind jeweils mit einem horizontal und vertikal zur Lichtbogenachse zentrierten Kalorimeter versehen.

Als Prüfprogramm sind, neben den Störlichtbogenschutzklassen APC 1 und 2 der Kleidung, zwei zusätzliche Störlichtbogenschutzklassen APC 1_150 und APC 2_150 möglich. Sie dienen der Beurteilung der Produkte bei deutlich

höherer direkter Einwirkenergie, was für Handschuhe allein durch den zu erwartenden geringeren Abstand zur Störquelle gerechtfertigt erscheint. Erreicht werden diese zusätzlichen Prüfklassen durch einen um 50 % verringerten Abstand der Proben vom Lichtbogen (150 statt 300 mm) bei einer der Störlichtbogenschutzklassen APC 1 bzw. APC 2 entsprechenden Lichtbogenenergie (168 kJ bzw. 320 kJ).

Die Anwendung ist nicht auf elektrisch isolierende Schutzhandschuhe beschränkt. GS-ET-42-2 kann auch bei anderen Handschuhtypen, z. B. Lederhandschuhen, wichtige sicherheitsrelevante Informationen liefern. Maßgeblich für eine PSAgS ist jedoch ein guter thermischer Schutz, weshalb diese Handschuhe grundsätzliche Anforderungen der DIN EN 407 „Schutzhandschuhe gegen thermische Risiken (Hitze und/oder Feuer)“ erfüllen müssen. Dafür wird nicht nur das Brennverhalten des Materials, sondern auch die thermische Stabilität der Nähte bei direkter Beflammung (Nahtöffnung) geprüft. Hinsichtlich des Störlichtbogenschutzes sieht das Verfahren die Prüfung von mindestens 3 Paar Handschuhen (6 Einzelprüflinge) vor, von denen nach Lichtbogeneinwirkung keiner eine Nachbrennzeit > 5 s, Durchschmelzen zur Innenseite, Lochbildung oder ein Überschreiten der Grenzwerte für Hautverbrennungen entsprechend des Stoll/Chianta-Kriteriums aufweisen darf.

Unter diesen Bedingungen kann man von einem nach aktuellen Erkenntnissen geprüften und bewerteten Schutzhandschuh ausgehen.

Ausgehend von diesen Arbeiten hat man sich Ende 2018 auch auf internationaler Ebene entschlossen, eine Projektgruppe zur Erarbeitung eines Prüfstandards für alle Formen von Handschutzausrüstungen gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens (Handschuhe, Stulpen, etc.) zu bilden. Unter der Bezeichnung IEC 63232-1-2 [20] wird in den nächsten Jahren auf Basis des Box-Tests ein internationaler Prüfstandard entstehen, welcher nach Kleidung sowie Kopf, Augen- und Gesichtsschutz den vollständigen Personenschutz auf den Bereich der Hände ausdehnt.

A 2.4.2 Normung mit Ursprung außerhalb der EU

Auch für ergänzende Schutzausrüstung einer Kleidung, welche nach dem in IEC 61482-1-1 beschriebenen Lichtbo-

genkennwert ATPV geprüft wurde, liegen international nicht harmonisierte Prüf- und Bewertungsmöglichkeiten vor.

Kopf- und Gesichtsschutz kann entsprechend des nur in Amerika publizierten Standards ASTM F2178 – 17b [17] geprüft werden. Dieses Verfahren nutzt die Anlagentechnik für die Bestimmung des ATPV an Textilien, wobei die Prüfmuster aus Helm und Visier auf einem mit vier Kalorimetern versehenen Kopf fixiert werden. Dazu wird dieser auf einem der Beständigkeitsprüfung von Kleidung vergleichbaren Mannequin befestigt und das mittig angeordnete Kalorimeter im Gesichtsbereich des Kopfes vertikal und horizontal zentriert gegenüber der Lichtbogenachse positioniert. In Analogie zum Test mit Textilien messen die an den Seiten des Kopfes positionierten ungeschützten Kalorimeter für jeden Prüfzyklus die direkte Einwirkenergie. Im Zusammenspiel mit der gemessenen Durchgangsenergie wird so schrittweise der Lichtbogenkennwert errechnet.

Zur Prüfung und Bewertung von Handschuhen existiert der nur in Amerika veröffentlichte Standard ASTM F2675/ F2675M – 13 [18]. Mit ihm wurde ein ringförmiger Aufbau mit Viertelkreisöffnung konzipiert, auf dem sich vier Panels zur Fixierung der Prüfmuster befinden. Jedes Handschuh-Panel ist mit einem Kalorimeter versehen, welches horizontal und vertikal zur Mitte der Lichtbogenachse ausgerichtet ist und zur Messung der Durchgangsenergie verwendet wird. Je zwei seitlich neben den Panels angeordnete ungeschützte Kalorimeter dienen, wie bei der Prüfung von Textilien, zur Ermittlung der direkten Einwirkenergie jedes einzelnen Prüfzyklus. Die Ermittlung des ATPV erfolgt dann analog zu den bereits beschriebenen Verfahren. Auf internationaler Ebene erfolgt die Normenarbeit für das Arc Rating von Handschutzausrüstungen gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens (Handschuhe, Stulpen, etc.) seit Ende 2018 innerhalb der Projektgruppe IEC 63232-1-1 [19].

Allerdings gelten auch für den ermittelten Lichtbogenkennwert eines Gesichtsschutzes oder Handschuhs die gleichen Einschränkungen wie für die Kleidung. Die Nutzung erfordert Erfahrung in der Anwendung amerikanischer Richtlinien zur Gefährdungsbeurteilung von Störlichtbogenrisiken am Arbeitsplatz.

A 2.5 Anforderungen für bestimmungsgemäße Auswahl

Für den anforderungsgerechten Störlichtbogenschutz ist es erforderlich, sich die durch den Störlichtbogen generierten thermischen Risiken stets in ihrer möglichen Gesamtwirkung auf Kopf- und Gesicht, Rumpf und Extremitäten bis zu den Händen zu vergegenwärtigen. Auch wenn die internationale Normung noch nicht für alle diese Bereiche den gleichen Stand erreicht hat, müssen die verschiedenen PSAgS immer als Gesamtsystem betrachtet, bestimmungsgemäß ausgewählt und aufeinander abgestimmt werden.

Störlichtbogenschutzrüstungen sind High-Tech Erzeugnisse mit oftmals multifunktionellem Schutz. Bei der Auswahl derartiger PSAgS ist daher nicht nur die Durchführung einer entsprechenden Störlichtbogen-Beständigkeitsprüfung erforderlich. Vielmehr muss erkannt und berücksichtigt werden, dass keines der bislang beschriebenen Verfahren in der Lage ist, die an eine derartige PSAgS zu stellenden Anforderungen in der Gesamtheit abzubilden.

Alle bisher hier angeführten Normen sind reine Prüfstandards, die zwar die wesentlichsten, aber eben nicht alle Eigenschaften einer sicheren PSAgS bestätigen. So können z. B. ein Innenfutter einer Kleidung aus nicht schwerentflammbarem Material oder eine Naht aus 100 % Polyesternähfaden im Ernstfall erheblich schädigende Auswirkungen auf den Träger haben. Ebenso bietet ein zu geringer Durchgangswiderstand, z. B. beim Einsatz von oberflächenleitfähigen Fasern für die elektrostatische Ableitfähigkeit der Kleidung, u. U. keinen Berührungsschutz gegenüber stromführenden Teilen und kann damit sogar weitere Sekundärgefährdungen hervorrufen. Bei geschlossenen Hauben ohne Belüftung können schon nach relativ kurzer Tragedauer hohe CO₂-Konzentrationen nachgewiesen werden, die wiederum Einfluss auf die Konzentrationsfähigkeit oder gar das Bewusstsein zur Folge haben können. Bei Visieren ist die optische Qualität der Sichtscheibe und die Bewegungsfreiheit des Kopfes zu berücksichtigen. Ein freies Blickfeld nach unten verhindert Stolpern, etc..

Darüber hinaus sind natürlich auch die klassischen textilspezifischen Anforderungen, wie z. B. Maßbeständigkeit beim Waschen sowie Höchst- und Weiterreißfestigkeit, für einen Anwender nicht nur qualitäts-, sondern auch sicherheitsrelevant. Und letztendlich werden auch nur geeignete und entsprechend geprüfte Accessoires, wie schwerentflammbare Reflexstreifen, Embleme oder Logos, die Schutzfunktion einer Kleidung nicht negativ beeinflussen. Hier gilt es für den potentiellen Anwender der Kleidung Sicherheit zu erlangen, dass sowohl der Hersteller als auch die einbezogene Zertifizierungsstelle diese Risiken beachtet und durch Festlegung geeigneter Materialien und eines entsprechenden Designs weitmöglichst ausgeschlossen haben.

Als gegenwärtig bestes Mittel einer möglichst umfassenden Prüfung und Bewertung von Störlichtbogenschutzkleidung ist die internationale Norm IEC 61482-2 [12] anzusehen.

Wesentlicher Bestandteil dieser Produktnorm ist der Nachweis eines Störlichtbogenschutzes durch die eingesetzten Textilmaterialien, wie er nach DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2) [11] erbracht werden kann.

Eine entscheidende Grundforderung ist aber auch die ausschließliche Verwendung von schwerentflammbaren Ausgangsmaterialien (Index 3 gemäß DIN EN ISO 14116 [5]) für die Außen- und ggf. Innenlage der Kleidung. Schutzkleidungstypische Forderungen an die Maßhaltigkeit sowie mechanische Beständigkeit im Gebrauch durch Mindestanforderungen an Höchstzug- und Weiterreißkraft ergänzen das materialspezifische Anforderungsprofil.

Die IEC 61482-2 [12] regelt aber auch wichtige sicherheitsrelevante Anforderungen an die Gestaltung der Kleidung selbst. Möglicherweise aus Gründen des Tragekomforts gewählte unterschiedliche Störlichtbogenschutzklassen im Front- und Rückenbereich werden ebenso eindeutig reglementiert, wie der ausschließliche Einsatz von schwerentflammbarem Nähfaden für alle Hauptnähte. Wurden zusätzlich zur Norm noch spezielle Designanforderungen, wie verschließbare Taschen, zum wirksamen Schutz gegen die im Störfall zahlreich entstehenden Spritzer geschmolzenen Metalls berücksichtigt, kann der Anwender von einer umfassend geprüften und bewerteten Schutzkleidung gegen die thermischen Risiken eines Störlichtbogenunfalls ausgehen.

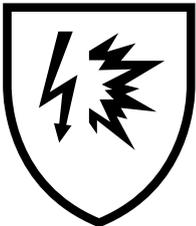


Abb. A 2-3
Piktogramm IEC 60417-6353 zur Kennzeichnung störlichtbogengeprüfter PSAgS
[Copyright © 2016 IEC Geneva, Switzerland. www.iec.ch]¹

Dies gilt auch für entsprechende Bund- oder Latzhosen eines vollständigen Schutzanzuges. Obwohl die vorgestellten Methoden ursprünglich und hauptsächlich zur Prüfung konfektionierter Jacken, Hemden, Parkas o. ä. vorgesehen sind, wird die Zertifizierungsstelle auch Hosen einer intensiven Beurteilung der Schutzwirkung unterziehen. Hierfür sind die Verwendung identischen Einsatzmaterials für Hose und Jacke sowie die Umsetzung der in IEC 61482-2 [12] getroffenen Festlegungen für das Design maßgebend. Entscheidet sich der Anwender im Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung auf den Einsatz eines kompletten Schutzanzuges oder Overalls zu verzichten, muss die Eignung der zur Störlichtbogenjacke separat ausgewählten Hose immer durch ihn selbst überprüft werden. Um damit einhergehende Unsicherheiten und ggf. Risiken zu vermeiden, ist die Auswahl eines kompletten Anzugs aus Jacke und Hose zu empfehlen.

Für spezielle Gefahrenbereiche sehr hoher Lichtbogenenergien aber auch zur Schaffung eines besonders guten Tragekomforts eignen sich Bekleidungskonzepte, bei denen der Störlichtbogenschutz durch Kombination mehrerer übereinander getragener Kleidungsstücke, z. B. Jacke über Hemd, gewährleistet wird. Dieses aus dem Sport-, Freizeit- und Outdoorbereich bekannte „Zwiebelschalen-Prinzip“ kann auch bei PSAgS einen wertvollen Beitrag für Schutz und Sicherheit leisten. In Zusammenarbeit mit einem verantwortungsvollen und erfahrenen Zulieferer lassen sich so optimale Konzepte gestalten, die oftmals einen deutlichen Mehrwert gegenüber klassischen Standardlösungen bieten. Wesentliche Voraussetzungen sind



Abb. A 2-4
Schutzhandschuh mit Kennzeichnung störlichtbogengeprüfter PSAgS

jedoch, dass die Materialien der einzelnen Bekleidungsstücke und auch die Kleidungsstücke selbst ordnungsgemäß geprüft wurden, zusammen zertifiziert sind und selbstverständlich auch getragen werden.

Es ist anzumerken, dass es in Kürze auch einen harmonisierten Standard DIN EN 61482-2 geben wird. Um dies zu erreichen, muss zunächst die bevorstehende Veröffentlichung der Ausgabe 2 des Prüfstandards DIN EN 61482-1-1 erfolgen (siehe A 2.2), da in diesem Standard erstmalig der Parameter ELIM enthalten ist. Dieser wird das Problem der 50 %-igen Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Stoll/Chianta-Kriteriums lösen, was eine Voraussetzung für die Konformitätsvermutung der EN 61482-2 zur PSA-Verordnung (EU) 2016/425 darstellt. Die Norm EN 61482-2 ist 05-2020 erschienen und basiert auf der IEC 61482-2: 2018 mit den entsprechenden Modifizierungen (IEC 61482-2:2018, modified).

Für einen möglichst umfassenden Störlichtbogenschutz sollte der Anwender also darauf achten, dass ihm der Hersteller die Einhaltung der IEC 61482-2 [12] bestätigt und nicht nur eine Prüfung von Material oder Erzeugnis durchgeführt hat. Ab 05-2018 ist dies gemäß der Ausgabe 2 der IEC 61482-2 durch das neue Piktogramm für PSAgS auf dem Etikett sichtbar (s. Abb. A 2-3).

Das gleiche Symbol findet sich auch auf der Kennzeichnung (Etikett) von Störlichtbogen-Schutzhandschuhen, die gemäß GS-ET-42-1/-2 geprüft und zertifiziert wurden. Sie geben dem Anwender damit die Gewähr, dass sie als Bestandteil eines ganzheitlichen Schutzkonzeptes ausgewählt und bestimmungsgemäß eingesetzt werden können.

¹ “The author thanks the International Electrotechnical Commission (IEC) for permission to reproduce Information from its International Standard. All such extracts are copyright of IEC, Geneva, Switzerland. All rights reserved. Further information on the IEC is available from www.iec.ch. IEC has no responsibility for the placement and context in which the extracts and contents are reproduced by the author, nor is IEC in any way responsible for the other content or accuracy therein”.



Abb. A 2-5 Kopf- und Gesichtsschutz

Größte Herausforderung bleibt dabei die Definition und Entscheidung über die jeweilige Prüfklasse (Störlichtbogenschutzklasse APC 1, 2, 1_150 und 2_150), welche die Handschuhe bestanden haben müssen. Hierbei sollte der Anwender nicht nur die entsprechend dem Verfahren zur Auswahl von PSAgS ermittelte Störlichtbogenschutzklasse der Schutzkleidung (APC 1 oder APC 2) berücksichtigen. Vergleichbares Gewicht ist auf die risikobeeinflussenden ergonomischen Eigenschaften zu legen, da besonders bei Schutzhandschuhen hoher Prüfklassen eine Einschränkung der taktilen Eigenschaften (Beweglichkeit) erwartet werden muss.

Ein umfassender Störlichtbogenschutz wird komplett, wenn auch ein gemäß GS-ET-29 [23] geprüfter und zertifizierter Kopf- und Gesichtsschutz ausgewählt und getragen wird (s. a. A 2.4.1.1). Auch diese Produkte sind an der Kennzeichnung mit dem Piktogramm für störlichtbogengeprüfte PSA erkennbar und gewährleisten dem Träger in der Gesamtheit Schutz und Sicherheit von Kopf bis Fuß.

Anhang 3

Kenngrößen und Risikoanalyse der thermischen Lichtbogensgefährdung von Personen

A 3.1 Allgemeine Vorbemerkung

Die Aussagen dieses Anhangs sind auf Drehstromsysteme zugeschnitten. Für Gleichstromsysteme gelten die Aussagen im übertragenen Sinne. Auf Besonderheiten für DC-Systeme wird im Anschluss an den jeweiligen Abschnitt hingewiesen.

A 3.2 Energetische Kenngrößen der thermischen Lichtbogensgefährdung von Personen

Die elektrische Energie, die in einen Störlichtbogen eingespeist wird, wird dort nahezu vollständig umgewandelt und in unterschiedlichen Formen abgegeben bzw. wieder freigesetzt. Die Auswirkungen von Störlichtbögen werden deshalb primär von der elektrischen Lichtbogenenergie W_{LB} bestimmt. Die elektrische Lichtbogenenergie kennzeichnet die Verhältnisse bei einem Lichtbogenkurzschluss in einer Anlage eindeutig. Für unterschiedliche Netz- und Anlagenbedingungen ergeben sich verschiedene Lichtbogenenergien.

Die für eine Person infolge thermischer Wirkungen maßgebliche Expositions- bzw. Gefährdungsgröße ist die Energiedichte, die an der exponierten Oberfläche der Haut auftritt. Das ist die Einwirkenergie E_i , die bei unmittelbarer thermischer Lichtbogeneinwirkung als direkte Einwirkenergie E_{i0} vorliegt. Trägt die Person eine PSAgS dann ist die Einwirkenergie als Durchgangsenergie E_{it} zu betrachten. In der Prüfung von PSAgS wird festgestellt, ob die Durchgangsenergie die Grenze für das Einsetzen von Hautverbrennungen 2. Grades (Stoll/Chianta-Kriterium) übersteigt. Die erfolgreiche Prüfung erbringt damit den Nachweis, dass diese PSAgS bis zu dem Niveau der direkten Einwirkenergie, das in dieser Prüfung eingestellt ist, lichtbogenbeständig ist und schützt.

Zwischen der elektrischen Lichtbogenenergie und der direkten Einwirkenergie gibt es einen komplexen nicht-linearen Zusammenhang, der durch die konkreten Transmissions- und Expositionsverhältnisse einschließlich der Anlagenkonfiguration und des Wirkabstandes zwischen dem Lichtbogen und der Person (Übertragungsverhältnisse) bestimmt wird. Die Transmissions- und Expositionsbedingungen für die thermischen Wirkungen können sehr vielfältig sein. Eine Gefährdungsbeurteilung muss

alle diesbezüglichen Fälle einschließen bzw. abdecken und erfordert eine Worst-Case-Betrachtung.

Für den Box-Test von PSAgS (Schutztextilien und Schutzkleidung) nach DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2) [11] ist der Zusammenhang zwischen elektrischer Lichtbogenenergie und direkter Einwirkenergie für die beiden Störlichtbogenschutzklassen bekannt. Sie sind die Kenngrößen für die Prüfeinstellung und charakterisieren die Übertragungsverhältnisse des Prüfaufbaus.

Beim Box-Test bestehen insbesondere infolge der durch den kleinräumigen Boxaufbau realisierten Lichtbogen-Richtwirkung (Gasströmung), die Strahlungseinwirkung (einschließlich Reflexionen) und durch die Elektrodenmaterialauswirkungen Worst-Case-Übertragungsbedingungen. Vergleichende Untersuchungen zu anderen Anordnungen zeigen, dass sich bei gleicher eingespeister elektrischer Lichtbogenenergie im Box-Test-Aufbau die höchsten thermischen Einwirkenergien ergeben.

A 3.3 Verfahren der Ermittlung von W_{LB} und W_{LBS}

Mit nachfolgend beschriebenen Verfahren ist deshalb die elektrische Lichtbogenenergie W_{LB} , die im Anwendungsbereich zu erwarten ist, zu bestimmen. Es wird der maximale Wert der zu erwartenden elektrischen Lichtbogenenergie, angegeben in kJ, ermittelt. Auf dieser Basis ist dann nachzuweisen, dass die maximal auftretenden Beanspruchungen (thermischen Wirkungen) das Schutz- und Festigkeitsniveau der PSAgS nicht übersteigen. Die diesbezügliche Kenngröße ist die Lichtbogenenergie der Prüfklasse des Boxtests, der Prüfpegel. Das Niveau der äquivalenten Lichtbogenenergie der PSA-Prüfung muss diesen Pegel abdecken. Im Anwendungsfall vorliegende Abweichungen von den Abstands-, Geometrie- und Transmissionsverhältnissen der Prüfung können in der Bestimmung der äquivalenten Lichtbogenenergie, dem Schutzpegel W_{LBS} berücksichtigt werden.

Ausgehend vom Schutzpegel (äquivalente Lichtbogenenergie) ist bei der Wahl der Prüf- oder Störlichtbogenschutzklasse der PSAgS die Relation zum Erwartungswert für die elektrische Lichtbogenenergie zu betrachten.

Die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens sind abgedeckt, wenn $W_{LB} \leq W_{LBS}$ gilt.

Die Prüfströme der Prüfklassen des Boxtests entsprechen nicht den Einsatzgrenzen der PSAGS im Hinblick auf das Kurzschlussstromniveau!

Die Risikoanalyse umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Bestimmung des Erwartungswertes der elektrischen Lichtbogenenergie,
- Betrachtung des Lichtbogenschutzpegels der PSAGS,
- Berücksichtigung abweichender Expositionsbedingungen.

Innerhalb der Arbeitsschritte sind für den zu analysierenden Arbeitsplatz bzw. -bereich zu bestimmen:

- Die Nennspannung bzw. Vereinbarungsspannung des Netzes.
- Der prospektive (metallische) Kurzschlussstrom (AC: Anfangs-Kurzschlusswechselstrom bzw. DC: Dauerkurzschlussstrom).
- Das R/X -Verhältnis der Netz- bzw. Kurzschlussstromkreisimpedanz (AC) bzw. der ohmsche Widerstand R und die Induktivität L des Stromkreises (DC).
- Die Anlagengeometrie (Elektrodenabstände und Volumenverhältnisse an möglichen Fehlerorten).
- Die Arbeitsabstände (mögliche Entstehungs- und Brennrorte für Störlichtbögen, minimale Wirkabstände zu Lichtbögen).
- Art, Typ, Einstellung und Charakteristika der Schutzeinrichtung(en) (dem Arbeitsbereich vorgeordnete Leistungsschalter, Sicherungen oder andere spezielle Schutzeinrichtungen).
- Die Schutzpegel der Prüfklassen der PSAGS.

Anmerkung:

Es wird darauf hingewiesen, dass verschiedene Schaltzustände des Verteilungsnetzes bzw. speisenden Energieversorgungssystems zu unterschiedlichen Kurzschlussleistungen und Energiewerten führen können. Es kann deshalb erforderlich sein, für eine Anlage mehrere solcher Fälle zu analysieren, um dann den Fall zu ermitteln, bei dem die höchste Lichtbogengefährdung besteht.

Die Analyse des Energieversorgungssystems muss für alle relevanten Arbeitsbereiche, d. h. im Allgemeinen vom Einspeisepunkt des betreffenden Netzes bis in den Abnehmerbereich, erfolgen.

A 3.4 Arbeitsschritte

Unter A 3.4 sind Betrachtungen für Wechsel- und Drehstromsysteme dargestellt, die im Wesentlichen auch auf Gleichstromsysteme übertragbar sind. Besonderheiten für Gleichstromsysteme sind in den Abschnitten A 3.4.3.1, A 3.4.4.1, A 3.4.6.1 und A 3.4.7.1 beschrieben.

A 3.4.1 Erfassung der allgemeinen Betriebsbedingungen

Ausgangspunkt ist die Betrachtung der allgemeinen Betriebsbedingungen. Zuerst ist eine Liste der Netzspannungsebenen, Anlagenarten und Anlagenorte im Netz sowie der Arbeitsaufgaben aufzustellen.

Anmerkung:

Dabei ist zu beachten, dass sich für unterschiedliche Schaltzustände des Netzes und des vorgeordneten Versorgungssystems verschiedene prospektive Kurzschlussströme ergeben. Der Kurzschlussstrom ist am höchsten, wenn der Netzknotenpunkt (die Sammelschiene einer Schaltanlage oder eines Verteilers) durch mehrere Einspeisungen oder Transformatoren gespeist wird. Für die gleiche Anlage müssen die unterschiedlichen Werte des Kurzschlussstroms bei verschiedenen Schaltzuständen dennoch berücksichtigt werden, da die Lichtbogenenergie bei dem kleineren Kurzschlussstrom infolge der längeren Ausschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung durchaus größer als für den höheren Strom sein kann.

Hinsichtlich der Arbeitsaktivitäten (elektrotechnische Arbeiten, Schalthandlungen) spielen alle Tätigkeiten eine Rolle, die an offenen elektrischen Anlagen ausgeführt werden oder bei denen die Anlagen geöffnet werden (Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile, Arbeiten unter Spannung).

Anmerkung:

Im Falle bauartgeprüfter Schaltanlagen, für die der prüftechnische Nachweis der Lichtbogenfestigkeit vorliegt (Mittelspannung: Lichtbogenprüfung nach

DIN EN 62271-200, Niederspannung: Lichtbogenprüfung Kriterium 1-5 nach EN 61439-2 Beiblatt 1) kann beim Bedienen und Arbeiten an einer geschlossenen Anlage immer ein Personenschutz vorausgesetzt werden; sie brauchen nicht in die weitere Analyse einbezogen werden.

Bei nichtgeprüften Anlagen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Anlagen im Falle eines inneren Lichtbogenfehlers geschlossen bleiben und/oder dass keine unzulässigen Lichtbogenwirkungen außerhalb der Anlage auftreten (z. B. durch austretende heiße Gase, berstende Teile etc.); hier muss eine Behandlung wie im Falle geöffneter Anlagen erfolgen bzw. eine gesonderte Betrachtung der Gefährdungssituation erfolgen.

A 3.4.2 Berechnung der Kurzschlussströme an den betrachteten Arbeitsplätzen

Voraussetzung für die Risikoanalyse und Auswahl der PSAgS ist die Kenntnis der prospektiven Kurzschlussströme bzw. Kurzschlussleistungen in den Anlagen (bzw. Netzknotenpunkten), die als Arbeitsorte in Frage kommen.

Anmerkung:

In der Regel ist die Risikoanalyse für verschiedene Arbeitsplätze in einem Netz oder Versorgungssystem vorzunehmen. Oft ist es in größeren Systemen zweckmäßig, struktur- und parametergleiche oder ähnliche elektrische Grundkonfigurationen (Schaltungen) zu bilden und zu betrachten.

Die Kurzschlussstromberechnung ist nach den Standardverfahren der Normen DIN EN 60909-0 (VDE 0102) [8] oder DIN EN 61660-1 (VDE 0102-10) [9] durchzuführen. Dafür steht in der Regel Berechnungssoftware zur Verfügung.

In Drehstromsystemen sind für jeden Arbeitsplatz/Anlagenbereich die maximalen und minimalen prospektiven dreipoligen Anfangs-Kurzschlusswechselströme

$I''_{k3,max}$ und

$I''_{k3,min}$

für die möglichen/relevanten Schaltzustände des Netzes zu bestimmen. Diese Ströme werden standardgemäß für metallischen, d. h. impedanzlosen Kurzschluss (Fehlerstellenimpedanz ist Null) ermittelt. Angaben zum Kurzschlussstrom bzw. der Kurzschlussleistung können auch durch den Versorgungsnetzbetreiber zur Verfügung ge-

stellt werden. Wichtig ist, dass die Kurzschlussströme für den Fehlerort gelten, der dem betrachteten Arbeitsort entspricht.

Anmerkung:

Sollte für Niederspannungsnetze vom Versorgungsnetzbetreiber nur der Kurzschlussstrom (bzw. die Kurzschlussleistung) am speisenden Abspanntransformator bereitgestellt werden, dann muss der Kurzschlussstrom für Arbeitsorte (Fehlerorte), die entfernt vom Transformator im Niederspannungsnetz liegen, eine Berechnung auf der Grundlage der technischen Daten des Einspeisetransformators von Mittelspannung auf Niederspannung und unter Berücksichtigung der verwendeten Niederspannungskabelbauarten und -längen erfolgen. Es muss ggf. eine Mehrfachspeisung des Fehlerortes beachtet werden.

Im Falle eines realen Kurzschlusses (mit Störlichtbogen) fließt infolge der Störlichtbögen (Fehlerstellenimpedanzen) ein reduzierter Strom, der Lichtbogenkurzschlussstrom (Fehlerstrom bei Lichtbogenkurzschluss).

Steht Software zur Verfügung, die auch die Bestimmung des Kurzschlussstroms bei Lichtbogenkurzschluss I_{kLB} vornimmt, so ist dieser Strom ebenfalls für die relevanten Schaltzustände zu ermitteln.

Der Lichtbogenkurzschlussstrom lässt sich ausgehend von $I''_{k3,min}$ auch mit Hilfe eines Strombegrenzungsfaktors k_B berechnen. Es gilt

$$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$$

Der Faktor k_B wird auf der Grundlage der Lichtbogen-spannung U_{LB} in Abhängigkeit von der Nennspannung des Netzes U_{Nn} , dem R/X -Verhältnis der Impedanz des Kurzschlussstromkreises und des Elektrodenabstandes d (Abstand benachbarter Leiter in der elektrischen Anlage) ermittelt.

Anmerkung:

Die Reduzierung bzw. Begrenzung des Fehlerstroms infolge der Störlichtbögen an der Fehlerstelle hat praktisch nur in Niederspannungssystemen Einfluss. Für Mittelspannungs- oder Hochspannungs-Netze kann die Strombegrenzung vernachlässigt werden ($k_B = 1$).

A 3.4.2.1 Besonderheiten bei der Berechnung der Kurzschlussströme für DC-Systeme

In DC-Systemen ist der prospektive Dauerkurzschlussstrom I_{kDC} (metallischer Kurzschluss) zu bestimmen. Der Lichtbogenkurzschlussstrom wird iterativ bestimmt.

A 3.4.3 Bestimmung der Kurzschlussdauer (Lichtbogendauer)

Die Lichtbogendauer t_{LB} bzw. Kurzschlussdauer t_k ist eine wesentliche Größe, die für die Risikoanalyse benötigt wird. Sie wird durch die Überstromschutzeinrichtungen bestimmt und kann im Allgemeinen aus Selektivitätsberechnungen und/oder den Ausschalt-Kennlinien (Strom-Zeit-Kennlinien) der Hersteller der Überstromschutzeinrichtungen entnommen werden.

Es ist zu beachten, dass die Ausschaltzeit bei stromzeitabhängigen Überstromschutzeinrichtungen, z. B. Schmelzsicherungen von der Höhe des tatsächlichen Kurzschlussstroms und damit von der Strombegrenzung durch die Störlichtbögen selbst beeinflusst wird.

Im Niederspannungsbereich entspricht der tatsächliche Kurzschlussstrom nicht dem prospektiven Kurzschlussstrom, sondern dem Lichtbogenkurzschlussstrom I_{kLB} , und kann deutlich begrenzt sein. Der tatsächliche Kurzschlussstrom I_{kLB} lässt sich unter Berücksichtigung einer Reihe von Einflussgrößen nur näherungsweise und mit gewissen Unsicherheiten bestimmen (siehe A 3.4.2). Man liegt im Allgemeinen im sicheren Bereich, wenn man von einer Strombegrenzung von 50 % ausgeht und mit diesem reduzierten Strom die Ausschaltzeit aus der Strom-Zeit-Kennlinie bestimmt. Der Strombegrenzungsfaktor beträgt dann $k_B = 0,5$; es folgt:

$$I_{kLB} = 0,5 \cdot I''_{k3,min}$$

Bei Angabe von Streubereichen für die Strom-Zeit-Kennlinie einer Überstromschutzeinrichtung (z. B. Sicherung) ist der Wert der oberen Bereichsgrenze für die Kurzschlussdauer anzusetzen.

Anmerkung 1:

Zur Bestimmung der Ausschaltzeit ist als relevante Überstromschutzeinrichtung die dem jeweiligen Arbeitsbereich vorgeordnete heranzuziehen. Das können auch Überstromschutzeinrichtungen sein, die an dieser Stelle für die Zeit der Arbeiten eingesetzt oder aktiviert werden, z. B. sogenannte Arbeitsschutzsicherungen. Bei Mehrfachspeisung des Arbeitsbereichs ist die Überstromschutzeinrichtung mit der längsten Ausschaltzeit zur Bestimmung der Kurzschlussdauer zugrunde zu legen.

Anmerkung 2:

Bei Nutzung von Softwaretools (Selektivitätsberechnungen) ist darauf zu achten, dass die Berechnung auf der Grundlage des begrenzten Lichtbogenkurzschlussstroms I_{kLB} erfolgt.

Hinsichtlich der Überstromschutzeinrichtungen sind Schutzbereiche und Selektivitätsstufungen zu beachten. Bei nicht-strombegrenzenden Sicherungen und Leistungsschaltern mit Direktauslöser kann die Kurzschlussdauer direkt aus der Strom-Zeit-Kennlinie bzw. den zeitlichen Abstufungen der Selektivität (Staffelplan) entnommen werden. Bei Leistungsschaltern ist dabei gegebenenfalls die Einstellung von Zeitverzögerungsstufen oder Staffelzeiten zu beachten. Für die Ausschaltzeit von Leistungsschaltern ohne Zeitverzögerung können folgende Richtwerte als typisch angesehen werden:

Tabelle A 3-1 Typische Ausschaltzeiten von Leistungsschaltern

Leistungsschalter	Unverzögerte Ausschaltzeit
Niederspannung (< 1000V)	60 ms
Mittelspannung (1 bis 35 kV)	100 ms
Hochspannung (> 35 kV)	150 ms

Herstellerinformationen können diesbezüglich genauere Daten liefern.

Bei strombegrenzend wirkenden Sicherungen liegt die Kurzschlussdauer unter 10 ms. Die Strom-Zeit-Kennlinien dieser Sicherungen weisen die virtuelle Schmelzzeit aus, so dass die tatsächliche Ausschaltzeit damit nicht übereinstimmen muss. Bei Sicherungen im Strombegren-

zungsfall sollte aus Sicherheitsgründen eine Kurzschlussdauer von $t_k = 10$ ms angesetzt werden. Dieser Wert liegt auf der sicheren Seite.

Anmerkung:

Bei Kurzschlussdauern von über 1 s kann ggf. davon ausgegangen werden, dass die Person sich aus dem unmittelbaren Gefahrenbereich zurückziehen kann und deshalb längere Zeiten nicht berücksichtigt werden müssen. Dies gilt nicht, wenn das Arbeitsumfeld ein Entfernen der Person verhindert oder einschränkt, z. B. Arbeiten in engen Kabelgräben oder -kanälen, schmalen Arbeitsgängen, Arbeiten auf Leitern oder Hebeeinrichtungen.

A 3.4.3.1 Besonderheiten bei der Bestimmung der Kurzschlussdauer für DC-Systeme

Die von den Herstellern von Sicherungen angegebenen Ausschaltkennlinien geben in der Regel die virtuellen Schmelzzeiten für einen Stromkreis mit einer Zeitkonstante von $\tau = 0$ an. In den meisten praktischen Fällen kann die Verlängerung der Schmelz- bzw. Ausschaltzeit für $\tau \neq 0$ vernachlässigt werden, weil die Kurzschlussdauer groß im Vergleich zur Zeitkonstante ist. Generell ist den Hinweisen der Hersteller der Sicherungen zur Umrechnung zu folgen. Analoges gilt für Leistungsschalter.

A 3.4.4 Bestimmung des Erwartungswertes der elektrischen Lichtbogenenergie

Es ist die maximal zu erwartende elektrische Lichtbogenenergie für den betreffenden Fehlerort bzw. die betrachtete Arbeitssituation zu ermitteln.

Die elektrische Lichtbogenenergie hängt von den Netzbedingungen ab, d. h. von der Kurzschlussleistung S_k'' des Netzes an den in Frage kommenden Fehlerorten und der Kurzschlussdauer t_k , die durch die elektrischen Überschutzsicherungen (Ausschaltzeiten der Leistungsschalter und Sicherungen, ggf. von gesonderten Schutzsicherungen) bestimmt wird und aus den Schutzkennlinien zu ermitteln ist:

$$\begin{aligned} W_{LB} &= P_{LB} \cdot t_{LB} \\ &= k_p \cdot S_k'' \cdot t_k \\ &= k_p \cdot \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I_{k3,max}'' \cdot t_k \end{aligned}$$

Die Kurzschlussleistung des Netzes am Fehlerort ergibt sich aus der Nennspannung bzw. vereinbarten Versor-

gungsspannung des Netzes U_{Nn} und dem maximalen prospektiven dreipoligen Kurzschlussstrom $I_{k3,max}''$ für die relevanten Netzschtzustände.

Bei Mehrfachspeisung der Fehlerstelle setzt sich der Kurzschlussstrom $I_{k3,max}''$ aus den entsprechenden Teilströmen zusammen. Gegebenenfalls sind Kurzschlussstromanteile von Motoren, die auf die Fehlerstelle rückspeisen können, zu beachten.

Bei Fehlerorten in Schaltanlagen und Verteilungen sind im Allgemeinen die Leitungsimpedanzen zwischen Speisequelle (meist Transformator) und Anlage zu berücksichtigen.

Die Lichtbogenenergie ist außerdem von den Anlagenbedingungen abhängig, die durch einen Faktor k_p charakterisiert werden, der die Art der Lichtbogenausbildung und die Elektrodengeometrie am Fehlerort berücksichtigt. Dieser Faktor lässt sich mit Hilfe der Lichtbogenspannung näherungsweise ermitteln. Für Lichtbogenspannungen gibt es empirische Bestimmungsgleichungen, die – neben den elektrischen Stromkreisparametern – die Kenntnis der Leiterabstände der Anlagen erfordert. Man kann dann von der Bestimmung der 50%-Lichtbogen Spannungswerte ausgehen [21].

Für eine sehr grobe Abschätzung ohne Berücksichtigung der Anlagengeometrie können auch die theoretischen Maxima der Größe k_p benutzt werden, die sich mit nachfolgender Gleichung bestimmen lassen:

$$k_{pmax} = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$$

R ist dabei der Wirkanteil, X der Blindanteil der Impedanz des Kurzschlussstromkreises.

Diese Worst-Case-Berechnung ist immer anzuwenden bei Elektrodenanordnungen, die direkt auf die arbeitende Person gerichtet sind (siehe Abb. A 3-1).

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass für die praktisch üblichen Anlagenkonfigurationen die nachfolgend angegebenen k_p -Wertebereiche typisch sind und als Richtwerte angewendet werden können (Tabelle A 3-2).

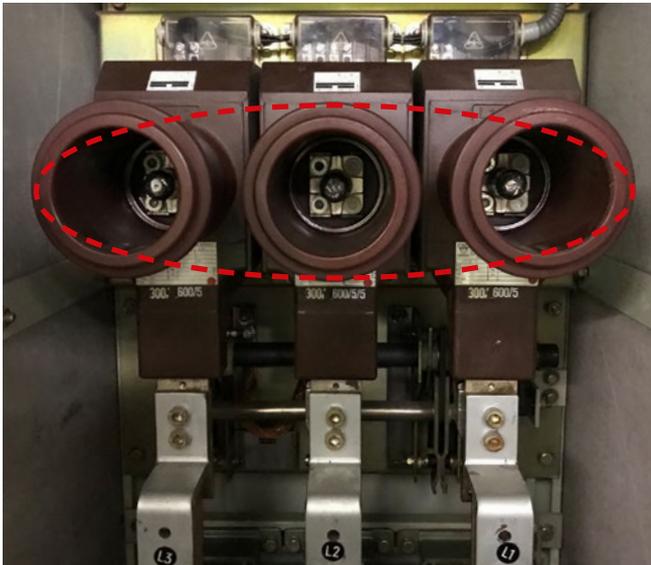


Abb. A 3-1 Elektrodenanordnung, die direkt auf die dort arbeitende Person gerichtet ist

A 3.4.4.1 Besonderheiten bei der Bestimmung des Erwartungswertes der elektrischen Lichtbogenenergie für DC-Systeme

Im Gegensatz zur Lichtbogenenergieermittlung in Wechsel- und Drehstromsystemen wird für DC-Systeme ein iterativer Ansatz zur Bestimmung des Lichtbogenkurzschlussstroms und der Lichtbogenleistung benutzt, mit deren Hilfe dann die Lichtbogenenergie zu ermitteln ist. Ausgangspunkt ist die Strom-Spannungs-Charakteristik des DC-Lichtbogens, die durch die Gleichung $U_{LB} = (34 + 0,532 \cdot d) \cdot I_{kLB}^{0,12}$

Anmerkung:
In der angegebenen Gleichung ist der Lichtbogenkurzschlussstrom in A einzusetzen. Mit dem Elektrodenabstand in mm ergibt sich dann die Lichtbogenleistung in V.

Tabelle A 3-2 Richtwerte für bezogene Lichtbogenleistung

Netz-Nennspannung U_{Nn}	Abstand d	Resistanz/Reaktanz-Verhältnis R/X	Bezogene Lichtbogenleistung k_p
400V	30 mm	0,2	0,229
		0,5	0,215
		1,0	0,199
		$\geq 2,0$	0,181
	45 mm	0,2	0,289
		0,5	0,263
		1,0	0,240
		$\geq 2,0$	0,222
	60 mm	0,2	0,338
		0,5	0,299
		1,0	0,270
		$\geq 2,0$	0,253
10 ... 20 kV	120 ... 240	0,1	0,04 ... 0,08

Anmerkung:
Bei Anwendung der Maximalwerte oder der Richtwerte umgeht man die Ermittlung der Geometrieverhältnisse auf Kosten der Genauigkeit. Gerade bei der Anwendung der Maximalwerte entsteht u. U. ein deutlicher Sicherheitsabstand.

angenähert wird. Diese Näherungsgleichung ist aus messtechnischen Untersuchungen abgeleitet worden und beschreibt den wechselseitigen Strom-Spannungs-Zusammenhang am Lichtbogen für den sich im DC-Ersatzstromkreis bei Lichtbogenkurzschluss einstellenden Arbeitspunkt. Zur Vereinfachung wird der Ersatzstromkreis linearisiert, indem der Lichtbogen als linearer ohmscher Widerstand R_{LB} betrachtet wird. Für den linearisierten Stromkreis gilt

$$U_{Nn} = I_{kLB} \cdot (R_{LB} + R_N).$$

Der Widerstand R_N ist der ohmsche Widerstand des DC-Systems bei kurzgeschlossenem Lichtbogen und ergibt sich folglich aus der Nennspannung des Netzes U_{Nn} und dem prospektiven (metallischen) Kurzschlussstrom I_{kDC} nach $R_N = U_{Nn} / I_{kDC}$.

Mit Hilfe des Ansatzes für die Lichtbogenspannung U_{LB} wird der lineare Lichtbogenwiderstand $R_{LB} = U_{LB} / I_{kLB}$ bestimmt, der anschließend zur Bestimmung des Lichtbogenkurzschlussstroms I_{kLB} auf der Grundlage der Stromkreisgleichung benutzt wird:

$$I_{kLB} = U_{Nn} / (R_{LB} + R_N).$$

Hierfür ist folglich ein iteratives Verfahren erforderlich.

Im ersten Iterationsschritt wird ein Wert für den Lichtbogenkurzschlussstrom vorgegeben. Zweckmäßig ist ein Wert von 50 % des metallischen Kurzschlussstroms des Stromkreises: $I_{kLB} = 0,5 \cdot I_{kDC}$. Damit werden die Lichtbogenspannung und anschließend der zugehörige Lichtbogenwiderstand errechnet. Mit diesem Lichtbogenwiderstand wird der korrigierte Lichtbogenkurzschlussstrom bestimmt, der dann in nächsten Iterationsschritt wieder zur Ermittlung der Lichtbogenspannung dient. Aus den korrelierenden Werten von Lichtbogenspannung und Lichtbogenkurzschlussstrom des betreffenden Iterationsschritts i ergibt sich die Lichtbogenleistung zu $P_{LB(i)} = U_{LB(i)} \cdot I_{kLB(i)}$. Die Iteration wird beendet, wenn ein geeignetes Abbruchkriterium erreicht ist. Als geeignet kann eine Abweichung von kleiner als 0,5 % angesehen werden.

Für grobe Abschätzungen kann die Lichtbogenleistung näherungsweise auch als Maximum der in einem linearen Widerstand umsetzbaren Leistung bestimmt werden. Für lineare DC-Stromkreise beträgt diese Maximalleistung 25 % der Kurzschlussleistung $P_k = U_{Nn} \cdot I_{kDC} = U_{Nn}^2 / R_N$.

Die bezogene Lichtbogenleistung beträgt dann $k_{p,max} = 0,25$. Die Lichtbogenleistung bestimmt sich dann nach $P_{LB,max} = 0,25 \cdot P_k$.

Die Lichtbogenenergie wird in Analogie zu den AC-Systemen aus der resultierende Lichtbogenleistung und der Kurzschlussdauer errechnet. Die Kurzschlussdauer bestimmt sich aus den Ausschaltkennlinien der Überstromschutzeinrichtungen mit Hilfe des Lichtbogenkurzschlussstroms.

A 3.4.5 Bestimmung des Arbeitsabstandes

Der Arbeitsabstand a ist der Abstand zwischen dem Störlichtbogen und dem Körper der Person (Oberkörper), der bei Arbeitshandlungen im betrachteten Arbeitsumfeld wirksam wird oder auch einzuhalten ist. Bei unterschiedlichen Handlungen in einem Arbeitsumfeld ist der geringste entstehende Abstand anzusetzen. Für die Fehlerstelle (Ort eines Störlichtbogens) ist die Anordnung der potentiellen Elektroden des Lichtbogens in der Anlage (Leiteranordnung) maßgebend.

Als Arbeitsumfeld und Arbeitsplätze gelten die elektrischen Anlagen, an denen Personen elektrotechnische Arbeiten bei geöffneter Anlage (Reparaturen, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten, Montage, Prüfen, Messen etc.) ausführen. Das sind Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile (AiN) oder Arbeiten unter Spannung (AuS).

Typische Arbeitsabstände, die sich aus den Arbeitshaltungen der Personen und den charakteristischen Konstruktionen bzw. Geometrien und Abmessungen von elektrischen Anlagen ergeben, betragen:

Tabelle A 3-3 Typische Arbeitsabstände

Anlagentyp	Typische Arbeitsabstände
Niederspannungs-Verteiler, Hausanschlusskästen, MCC	300 ... 450 mm
Niederspannungs-Schaltanlagen	300 ... 600 mm
MS-Schaltanlagen	≥ 825 mm

Es sind möglichst die genauen Abstandsverhältnisse zu bestimmen und der Bestimmung des Arbeitsabstands zu-

grunde zu legen. Man kann jedoch grundsätzlich davon ausgehen, dass bei Arbeiten der Abstand von $a = 300$ mm zum Oberkörper einer Person nur selten unterschritten wird und insbesondere im Niederspannungsbereich als Richtwert angesetzt werden kann.

Anmerkung:

Bei Arbeiten an geschlossenen Anlagen, die eine Bauartprüfung auf Lichtbogenfestigkeit bestanden haben, kann Personenschutz vorausgesetzt werden; ein Arbeitsabstand braucht folglich nicht bestimmt zu werden (siehe Abschnitt 3.4.1). Im Falle nichtgeprüfter Anlagen muss von Lichtbogenwirkungen außerhalb der Anlage, z. B. durch sich öffnende Türen, gerechnet werden. Der dann zu berücksichtigende Arbeitsabstand setzt sich aus dem Abstand zur Anlagenhülle und den o. g. typischen Arbeitsabständen (Werte der unteren Grenze) zusammen.

Die Festlegung eines Sicherheitsabstandes, der bei Arbeiten nicht unterschritten werden darf, ist eine mögliche Maßnahme, Arbeitshandlungen mit der PSAGS eines bestimmten Schutzniveaus (Prüf- bzw. Störlichtbogen-schutzklasse) zu ermöglichen.

A 3.4.6 Lichtbogenschutzpegel der PSAGS

Für den Prüfaufbau des Box-Tests nach DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2) [11] ist sichergestellt, dass die thermischen Übertragungsverhältnisse (einschließlich Wirkung Elektrodenmaterial) Worst-Case-Bedingungen entsprechen. Für die Anwendungsgrenzen der PSAGS kann man von den elektrischen Lichtbogenenergien W_{LBP} der Prufeinstellung ausgehen, die den jeweiligen Einwirkenergien E_{iOP} im Test entsprechen:

Tabelle A 3-4 Parameter des Box-Tests

Box-Test DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2)	Statistische Mittelwerte	
	Störlichtbogenschutz- klasse	Elektrische Lichtbogen- energie W_{LBP}
APC 1	168 kJ	146 kJ/m ²
APC 2	320 kJ	427 kJ/ m ²

Anmerkung:

Die angegebenen direkten Einwirkenergiewerte E_{iOP} , die die Störlichtbogenschutzklassen des Box-Test-Verfahrens kennzeichnen, entsprechen nicht den ATPV-Werten, die in Tests nach DIN EN 61482-1-1 (VDE 0682-306-1-1) [10] oder in daran anschließenden Verfahren nach NFPA 70E [14] und IEEE 1584 [15] bestimmt werden; es sind weder die zugrunde liegenden Transmissions- und Expositionsbedingungen vergleichbar noch sind analytische Umrechnungen oder mathematische Überführungen in diese Werte möglich.

Die Lichtbogenenergiewerte W_{LBP} führen im Wirkabstand von $a = 300$ mm (dem Prüfaufbau entsprechend) zu den betreffenden Einwirkenergien. Die Lichtbogenenergie W_{LBP} , die die Störlichtbogenschutzklasse des Box-Tests kennzeichnet, wird als Vergleichsgröße W_{LBS} für die ermittelte Lichtbogenenergie W_{LB} des Anwendungsbereichs benutzt.

Dabei ist vorausgesetzt, dass die PSAGS-Anwendung für Arbeitsabstände von $a = 300$ mm und Anlagen vorgesehen wird, die analog zum Box-Test-Aufbau (mit einem Volumen von rund $V = 1,6 \cdot 10^{-3}$ m³) kleinräumig und durch Seiten-, Rück- und Schottwände begrenzt sind (siehe Abb. 4-5). Bei abweichenden Bedingungen sind Korrekturen möglich.

A 3.4.6.1 Lichtbogenschutzpegel der PSAGS für DC-Systeme

Auch für DC-Anwendungen ergeben sich die Schutzpegel der PSAGS aus den AC-Prüfpegeln des Boxtests W_{LBP} .

Anmerkung:

Durch Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die Energieverhältnisse in DC-Systemen durch die für AC-Systeme geltenden Bedingungen abgedeckt werden [28].

A 3.4.7 Berücksichtigung abweichender Expositionsverhältnisse

Aus der elektrischen Lichtbogenenergie der Prüfklasse W_{LBP} lässt sich für einen beliebigen Arbeitsabstand a über die experimentell nachgewiesene umgekehrte quadratische Abstandsproportionalität ein Schutzpegel (äquivalente Lichtbogenenergie) W_{LBS} ermitteln, bei dem der Schutz durch die PSAGS bei dem betreffenden Abstand a noch gegeben ist. Außerdem lässt sich die

Anlagenkonfiguration berücksichtigen. Allgemein gilt für den Box-Test

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

Der Transmissionsfaktor k_T für die Lichtbogenenergie beträgt für die Box-Test-Bedingungen $k_T = 1$. Für abweichende Brenn- und Transmissionsbedingungen kann der Transmissionsfaktor k_T auch mit folgenden Werten angesetzt werden:

Tabelle A 3-5 Transmissionsfaktor k_T

Art der Anlage	Transmissionsfaktor k_T
(sehr) kleinräumige Anlagen mit Seiten-, Rück- und Schottwänden	1
Großräumige Anlagen, Raumbegrenzung vor allem durch Rückwand	1,5 ... 1,9
Offene Anlagen ohne wesentliche Begrenzungen des Elektrodenraumes	2,4

A 3.4.7.1 Berücksichtigung abweichender Expositionsverhältnisse für DC-Systeme

Die Transmissionsfaktoren k_T aus Tabelle A 3-5 können auch für DC-Anwendungen angewendet werden. Die Bestimmung der Schutzpegel der PSAGS erfolgt ebenfalls in gleicher Weise wie für AC-Systeme mit den AC-Prüfpegeln des Boxtests W_{LBP} .

Durch Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die thermischen Übertragungsverhältnisse in DC-Systemen durch die für AC-Systeme geltenden Bedingungen abgedeckt werden.

A 3.4.8 Anwendung der Analyseergebnisse zur Gefährdungsbeurteilung

In der Gefährdungsbeurteilung bzw. Wahl der Prüf- oder Störlichtbogenschutzklasse der PSAGS (Box-Test) ist ausgehend von der äquivalenten Lichtbogenenergie die Relation zum Erwartungswert für die elektrische Lichtbogen-

energie zu betrachten. Der Schutz vor den thermischen Gefahren eines Störlichtbogens ist gegeben, wenn die elektrische Lichtbogenenergie W_{LB} kleiner oder gleich des Schutzpegels (äquivalente Lichtbogenenergie) W_{LBS} ist. $W_{LB} \leq W_{LBS}$

Von dieser Relation ausgehend lassen sich mit den oben genannten Bestimmungsgrößen und -gleichungen die Grenzen für die Anwendbarkeit der PSAGS einer gewählten Prüf- und Störlichtbogenschutzklasse hinsichtlich des Kurzschlussstrombereichs, der erlaubten Kurzschlussdauer bzw. Ausschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (und damit der Überstromschutzeinrichtung selbst) und des zulässigen Arbeitsabstandes ermitteln.

A 3.5 Alternative Prüfverfahren

Bei alternativen Prüfverfahren zum Box-Test-Verfahren ist die beschriebene Vorgehensweise nicht anwendbar. Es ist dann notwendig, den Zusammenhang zwischen elektrischer Energie und direkter Einwirkenergie (Übertragungsfunktion) allgemeingültig für den betreffenden Testaufbau zu bestimmen oder die direkte Einwirkenergie zu ermitteln, die im Anwendungsfall bei einem Unfall zu erwarten ist, und sie mit dem Einwirkenergiepegel der PSA-Prüfung zu vergleichen.

Neben dem Box-Test wird auch ein Prüfverfahren nach DIN EN 61482-1-1 (VDE 0682-306-1-1) [10] verwendet (Open-Arc-Test). Im Gegensatz zum Box-Test-Verfahren, bei dem ein gerichteter Prüflichtbogen erzeugt wird, ähnlich eines Störlichtbogens wie er z. B. bei einem Störlichtbogenunfall bei der Arbeit an einem Schaltschrank oder einer Verteilung zu erwarten ist, wird beim Open-Arc-Verfahren der Störlichtbogen offen und ungerichtet, also quasi im Freifeld erzeugt. Beide Verfahren sind nicht direkt vergleichbar und nicht ineinander überführbar oder umrechenbar. Dies liegt einerseits an der Art der durch den Prüfaufbau vorgegebene Länge und Ausbreitung des Störlichtbogens, am verwendeten Elektrodenmaterial und vielen anderen physikalisch-technischen Unterschieden. Die Wärmeübertragung erfolgt beim Open-Arc-Test hauptsächlich strahlungsbedingt.

Andererseits führt der Open-Arc-Test im Ergebnis zum so genannten „Arc Thermal Performance Value“, dem ATPV. Hierbei wird nach einem statistischen Verfahren die Ein-

wirkenergie bestimmt, bei der eine 50 %-ige Wahrscheinlichkeit besteht, hinter der PSA eine Verbrennung 2. Grades zu erleiden. Auch wenn ein Störlichtbogen-Unfall relativ unwahrscheinlich ist, erlaubt die PSA-Verordnung der EU keine PSA-Auslegung, die eine solche Verletzung toleriert. Deshalb konnte das Prüfverfahren innerhalb der EU bis 07-2019 grundsätzlich keine Anwendung finden. Erst mit der 2. Ausgabe der IEC 61482-1-1: 07-2019 wird mit der Bestimmung eines zusätzlichen Ergebnisparameters ELIM die Voraussetzung geschaffen, dass mit Open-Arc-Prüfungen die Konformitätsvermutung zur EU-Verordnung erfüllt werden können (siehe auch A 2.3).

Der ATPV ist die direkte Einwirkenergie, die bei den speziellen Übertragungsverhältnissen des Tests entsteht. Es ist anzumerken, dass weder der ATPV noch der ELIM mit den Pegeln der direkten Einwirkenergie der Prüfklassen des Box-Tests übereinstimmen. Die Einwirkenergielevel des Box-Test-Verfahrens sind keine ATPV- oder ELIM-Werte bzw. Grenzen des ATPV- oder ELIM-Bereichs.

Produkte, die auf internationalen Märkten erhältlich sind, sind u. U. nach beiden Verfahren, also Box-Test und Open-Arc-Test geprüft. Auch wenn die Prüfergebnisse nicht direkt vergleichbar sind, so können sie dennoch bei der Auswahl einer geeigneten PSAGS helfen, insbesondere dann, wenn die maximal zu erwartende Lichtbogenenergie über der in A 3.4.4 beschriebenen Lichtbogenenergie der Störlichtbogenschutzklasse W_{LBP} (Prüfpegel) bzw. der äquivalenten Lichtbogenenergie W_{LBS} (Schutzpegel) liegt.

Ein Hersteller, der seine Produkte nach beiden Verfahren getestet hat, kann deshalb auch für EU-Märkte die erzielten ELIM-Werte angeben, um dem Anwender bei der Auswahl geeigneter PSAGS ein weiteres Auswahlkriterium an die Hand zu geben.

Für die Anwendung von ATPV und ELIM bei der Auswahl der PSAGS muss allerdings eine Risikoanalyse vorgenommen werden, in der die zu erwartende Einwirkenergie ermittelt wird. Hierfür geben u.a. NFPA 70E [14] und IEEE 1584 [15] entsprechende Algorithmen an.

Es ist allerdings anzumerken, dass die ATPV-basierte Prüfung und PSAGS-Auswahl an die Beschränkungen des Verfahrens gebunden sind.

Anhang 4

Anwendung der Risikomatrix

A 4.1 Allgemeines

In der Praxis hat sich in vielen Jahren Einsatzerfahrung von PSAgS gezeigt, dass bei Störlichtbogenereignissen, bei denen PSAgS fachgerecht getragen wurde, in der Regel keine Verletzungen aufgetreten sind – zum Teil auch bei Überschreitung des rechnerischen Schutzpegels der PSAgS. Dies zeigt, dass das Berechnungsverfahren (Kapitel 3 Phase 3) in der Regel ausreichend Sicherheitsreserven enthält, zumal die dort teilweise angenommenen Worst-Case-Bedingungen in vielen Fällen nicht alle zeitgleich vorliegen.

Darüber hinaus können aber auch nicht direkt quantifizierbare Einflussfaktoren wie z. B. die Qualifikation des Personals, der Einsatz von überbrückungssicherer Ausrüstung oder fehlende Ausbreitungsmöglichkeiten eines Störlichtbogens das Eintrittsrisiko einer Störlichtbogenverletzung deutlich verringern, ohne dass diese Faktoren im Berechnungsverfahren bislang abgebildet werden konnten.

Mit dem hier beschriebenen erweiterten Ansatz einer Risikobewertung können über die bisher bewerteten numerischen Rechenparameter hinaus nun auch weitere Maßnahmen (technische, organisatorische, persönliche) und Einflussfaktoren (statistische, ergonomische) bei der Beurteilung einer Gefährdung durch Störlichtbögen berücksichtigt werden (Abb. A 4-1).

Die Risikobewertung eröffnet damit die Möglichkeit, unter bestimmten Voraussetzungen Überschreitungen des rechnerischen Schutzpegels von PSAgS in festgelegten Grenzen zu erlauben, wenn das daraus resultierende Verletzungsrisiko hinreichend klein ist. Dies wird mit der Anwendung der Risikomatrix (Kapitel 3, Abb. 3-2) und dem im Folgenden beschriebenen Anwendungsverfahren erreicht. Das Restrisiko einer Verletzung durch Störlichtbogen ist die Verknüpfung der erwarteten **Verletzungsschwere** und der erwarteten **Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung** – jeweils nach Berücksichtigung aller getroffenen Maßnahmen.

Die Risikomatrix kann erst angewandt werden, wenn das Berechnungsverfahren (Kapitel 3, Phase 3) eine Überschreitung des rechnerischen Schutzpegels der PSAgS ergibt. Es ist dann die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Verletzungsschwere einer Störlichtbogenverletzung nach Anwendung der getroffenen Maßnahmen abschätzen. Das sich ergebende Restrisiko ist zu bewerten (Risikomatrix):

- „grün“: Tätigkeiten dürfen durchgeführt werden
- „gelb“: Tätigkeiten dürfen durchgeführt werden, aber aktives Risikomanagement ist notwendig:
 - Risiko nach DIN EN 31010 (VDE 0050-1) so gering wie vernünftigerweise praktikabel (ALARP – as low as reasonably practicable) halten,

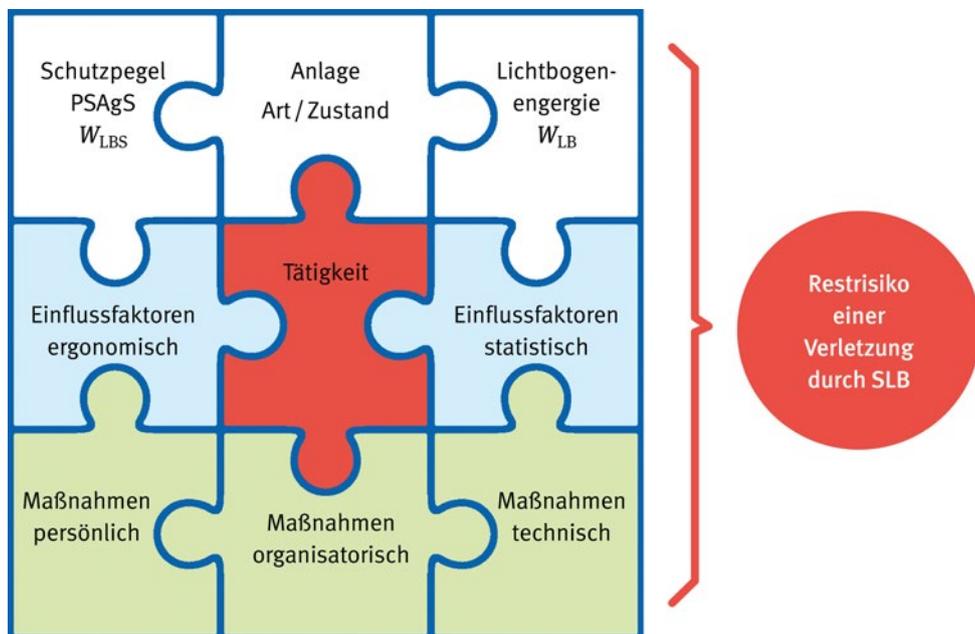


Abb. A 4-1
Gesamtbewertung der
Einflussfaktoren ergibt
Störlichtbogenrisiko

- Einzelfallbewertung,
- regelmäßige Überprüfung, ob weitere technische, organisatorische oder persönliche Maßnahmen möglich sind,
- ggf. Turnusfestlegung

„rot“: Tätigkeiten dürfen so nicht durchgeführt werden;

- ggf. weitere Maßnahmen nach Phase 5 durchführen,
- ggf. ist die Anlage freizuschalten

Anmerkung 1:

Die in Tabelle A 4-1 angegebenen Werte basieren auf Literaturlauswertungen und Festlegungen der AG Störlichtbogen und beinhalten einen Sicherheitsabstand, der aus Expertensicht als ausreichend angesehen wird.

Anmerkung 2:

Diese DGUV Information betrachtet *nicht* die möglichen Gefährdungen durch weitere Effekte eines Störlichtbogens, z. B. durch Druck, Schall, wegfliegende Teile, Strahlung, geschmolzene Partikel oder Gase. Diese Gefährdungen müssen ggf. gesondert betrachtet werden.

A 4.2 Bewertung der erwarteten Verletzungsschwere

Es ist die erwartete Verletzungsschwere bei Eintritt eines Störlichtbogens unter Berücksichtigung aller getroffenen Schutzmaßnahmen zu bewerten. Die gravierendsten Auswirkungen bestehen im Zusammenhang mit den thermischen Lichtbogenwirkungen.

Der Schweregrad einer Verbrennung ist grundsätzlich abhängig von einer Vielzahl komplexer Faktoren, wie z. B. der Intensität und der Dauer des einwirkenden Wärmeflusses auf die Hautoberfläche und der daraus bedingten Temperaturerhöhung in verschiedenen Tiefen der Haut. Die erwartete Verletzungsschwere wird in diesem Verfahren über das Verhältnis der erwarteten Lichtbogenenergie (W_{LB}) des Störlichtbogens und dem rechnerischen Schutzpegel der PSAgS (W_{LBS}) entsprechend der nachfolgend angegebenen Tabelle A 4-1 vereinfacht abgeschätzt.

A 4.3 Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit

Es ist bei der Anwendung der Risikomatrix die erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit (EW) einer Verletzung durch Störlichtbogen (SLB) unter Berücksichtigung aller getroffenen Maßnahmen abzuschätzen. Dabei beeinflussen sowohl die Maßnahmen gegen das Auftreten eines Störlichtbogens wie auch die Maßnahmen gegen die Auswirkungen eines möglichen Störlichtbogens die erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung (Abb. A 4-2).

Die möglichen Kategorien für die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störlichtbogenverletzung sind in Tabelle A 4-2 aufgeführt.

Tabelle A 4-1 Bewertungskriterien zur Ermittlung der möglichen Verletzungsschwere

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

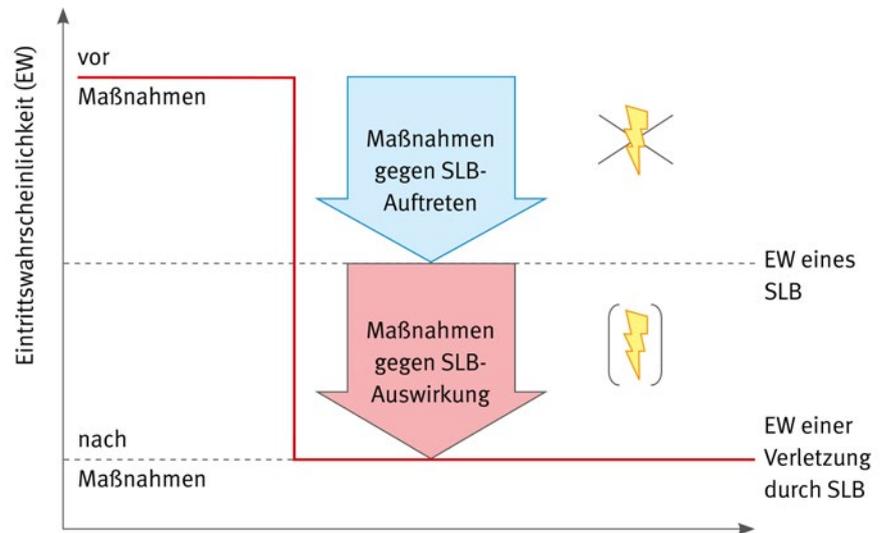


Abb. A 4-2
Einfluss von Maßnahmen gegen Auftreten
und Auswirkung von Störlichtbögen

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung durch Störlichtbögen kann auf Basis von detaillierten Bewertungskriterien (Tabelle A 4-3) auch differenzierter abgeschätzt werden. Dabei kommen Bewertungspunkte zum Einsatz, die für die nachfolgenden Bewertungskriterien vergeben werden können:

- Art/Zustand der Anlage
- Technische Maßnahmen
- Organisatorische Maßnahmen
- Persönliche Maßnahmen
- Statistische Einflussfaktoren
- Ergonomische Einflussfaktoren

Die Summe der Bewertungspunkte ergibt einen Wert mit dessen Hilfe die Eintrittswahrscheinlichkeit festgelegt werden kann (siehe Abb. A 4-3).

Jedes betrachtete Kriterium ist in Bezug auf die ausgeführte Tätigkeit/Tätigkeitsgruppe und die vorliegende Anlage/auf den vorliegenden Anlagentyp sowie im Zusammenwirken mit den anderen Kriterien nach Tabelle A 4-3 zu bewerten.

Die Bewertungspunkte 0 bis 10 sind dahingehend zu vergeben, wie weit das jeweilige Kriterium die Verletzungswahrscheinlichkeit beeinflusst:

Einfluss führt zu Verletzungswahrscheinlichkeit:

- | | |
|----|--------------------------------------|
| 0 | praktisch unmöglich; |
| 2 | denkbar, aber sehr unwahrscheinlich; |
| 4 | unwahrscheinlich; |
| 7 | selten; |
| 10 | gelegentlich bis häufig. |

Ist ein Kriterium nicht zutreffend (z. B. es ist keine entsprechende Maßnahme möglich, es liegen keine statistischen Daten vor), ist der Wert der Bewertungspunkte für dieses Kriterium auf den Durchschnittswert der anderen bewerteten Kriterien zu setzen, damit das Ergebnis nicht verzerrt wird.

Beispiel:

- | | |
|--------------|--|
| Kriterium a) | ... 4 Punkte |
| Kriterium b) | ... nicht zutreffend
⇒ Wert wird auf 3,5 Punkte gesetzt |
| Kriterium c) | ... 2 Punkte |
| Kriterium d) | ... 4 Punkte |
| Kriterium e) | ... nicht zutreffend
⇒ Wert wird auf 3,5 Punkte gesetzt |
| Kriterium f) | ... 4 Punkte |

Die Bewertung der Kriterien a, c, d und f ergeben zusammen 14 Punkte. Die Werte der nicht zutreffenden Kriterien b und e werden auf den Wert 3,5 (=14/4: Mittelwert der 4 anderen Kriterien) gesetzt.

Tabelle A 4-2 Erwartete, durchschnittliche Verletzungshäufigkeit eines Beschäftigten nach Maßnahmen

	Bezeichnung	Beschreibung	Häufigkeit
1	Praktisch unmöglich	Mit einer Verletzung muss nicht gerechnet werden.	< 1x in 100 Jahren
2	Denkbar, aber sehr unwahrscheinlich	Unter theoretischen Betrachtungen könnte es zu einer Verletzung kommen. Dies ist in der Praxis unter vernünftig vorhersehbaren Voraussetzungen nicht zu erwarten.	1x in 100 Jahren
3	Unwahrscheinlich	In der Branche sind Unfälle bekannt, die nicht ausgeschlossen werden können, aber sehr selten sind.	1x in 50 Jahren
4	Selten	Eine Verletzung durch einen Störlichtbogen ist durchaus möglich	1x in 10 Jahren
5	Gelegentlich bis häufig	Eine Verletzung durch einen Lichtbogen ist zu erwarten.	monatlich ... jährlich

Tabelle A 4-3 Kriterien zu Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung

	Bezeichnung	Beschreibung	mögliche Bewertungspunkte (Einfluss auf EW)
a)	Art/Zustand der Anlage	<p>Art/Zustand der Anlage hinsichtlich überbrückungsfähiger Potenziale (Lichtbogenentstehung) oder der Begrenzung von Lichtbogenauswirkung, z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Offene, überbrückbare Potenziale (Potentialabstände, Überbrückbarkeit, z. B. durch Werkzeuge/Hilfsmittel oder ggf. herabfallende leitfähige Teile) • Schottung zu Nachbarfeldern/Trennung von Potenzialen (z. B. Zwischenstege) • Verschmutzung, Feuchtigkeit, Bewuchs • Wartung und Prüfung • Alter der Anlage • Besondere Umgebungsbedingung (z. B. klimatische Bedingungen) • Anlage mit geschlossenen Türen • Berührungsschutz (z. B. VDE 0660-514) • Niederspannungs-Anlage gemäß VDE 0660-600-2 Beiblatt 1 (Störlichtbogengeprüfte Anlagen) • Fußpunktfreie Niederspannungs-Anlage • Mittelspannungs-Anlagen gemäß VDE 0671-200 (Störlichtbogengeprüfte Anlagen) • Schaltfehlerschutz 	<p>0 ... praktisch unmöglich 2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich 4 ... unwahrscheinlich 7 ... selten 10 ... gelegentlich bis häufig</p>
b)	Technische Maßnahmen	<p>Technische Maßnahmen zur Vermeidung von Potenzialüberbrückungen (Lichtbogenentstehung) oder zur Begrenzung von Lichtbogenauswirkungen, z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von Werkzeugen und Ausrüstungen (hinsichtlich Überbrückungssicherheit, Abstand) • Einsatz von Schutz- und Hilfsmitteln • Zustand der Arbeitsmittel • Einsatz von Messgeräten (z. B. passende Messkategorie) • Aktives Störlichtbogenschutzsystem • Arbeitsschutzsicherungen • Kontrolle der Wirksamkeit technischer Maßnahmen 	<p>0 ... praktisch unmöglich 2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich 4 ... unwahrscheinlich 7 ... selten 10 ... gelegentlich bis häufig nicht zutreffend</p>

	Bezeichnung	Beschreibung	mögliche Bewertungspunkte (Einfluss auf EW)
c)	Organisatorische Maßnahmen	<p>Organisatorische Maßnahmen zur Vermeidung von Potenzialüberbrückungen (Lichtbogenentstehung) oder zur Begrenzung von Lichtbogenauswirkungen, z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> Organisatorische Regelungen (z. B. Betriebs-/Arbeitsanweisungen): Verantwortlichkeiten Schutzmaßnahmen gegen SLB (z. B. Prüfung auf Fehlerfreiheit) Unterweisung/Schulung Überprüfung der Wirksamkeit Anlagendokumentation Zutrittsregelung zu elektrischen Anlagen Einweisung in elektrische Anlagen Umgang mit elektrischen Unfällen/Beinaheunfällen: Auswertung/Kommunikation Maßnahmen/Wirksamkeitskontrolle von Maßnahmen Bei Durchführung von Schalthandlungen: Betriebliche Regelungen/Organisation von Schalthandlungen Dokumentation von Schalthandlungen Schaltbefähigung/Schaltberechtigung Erhalt der Qualifikation Bei Durchführung AuS: AuS-Arbeitsanweisungen (Maßnahmen zum Störlichtbogenschutz) Anweisende Elektrofachkraft Spezialausbildung Erhalt der Qualifikation Kontrolle (Qualitätssicherung) Umgang mit Fremdpersonal: Anforderungen/Präqualifizierung Einweisung/Schulung Erhalt der Qualifikation Kontrolle (Qualitätssicherung) 	<p>0 ... praktisch unmöglich 2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich 4 ... unwahrscheinlich 7 ... selten 10 ... gelegentlich bis häufig nicht zutreffend</p>
d)	Persönliche Maßnahmen	<p>Persönliche Maßnahmen zur Vermeidung von Potenzialüberbrückungen (Lichtbogenentstehung) oder zur Begrenzung von Lichtbogenauswirkungen, z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> Nutzung von PSAGs: Auswahl der PSAGs (z. B. Störlichtbogenschutzklasse) Verwendung/Prüfung (z. B. Sichtprüfung) Pflege, Wartung und Reparatur Überprüfung der Anwendung/Qualitätssicherung Qualifikation der ausführenden Personen: Tätigkeitsspezifische/anlagenspezifische Kenntnisse Arbeitsweise und Erfahrung Unterweisungen Spezielle Befähigungen (z. B. Schaltbefähigung, AuS) Erhalt der Qualifikation Überprüfung der Qualifikation 	<p>0 ... praktisch unmöglich 2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich 4 ... unwahrscheinlich 7 ... selten 10 ... gelegentlich bis häufig nicht zutreffend</p>

	Bezeichnung	Beschreibung	mögliche Bewertungspunkte (Einfluss auf EW)
e)	Statistische Einflussfaktoren	Statistische Einflussfaktoren, die bei der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Lichtbogens oder einer Verletzung durch Lichtbogen eine Rolle spielen, z. B. <ul style="list-style-type: none"> • Unfallstatistik (z. B. Unfallhäufigkeit auf Basis eigener Betriebserfahrungen oder bekannter Unfallereignisse und Statistikdaten) • Weitere stochastische Faktoren (z. B. Häufigkeit/Dauer der Tätigkeiten mit Störlightbogengefährdung, tätigkeitsbezogen: z. B. Spannungsprüfen an bereits freigeschalteten Anlagen) 	
f)	Ergonomische Einflussfaktoren	Ergonomische Einflussfaktoren, die bei der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Lichtbogens oder einer Verletzung durch Lichtbogen eine Rolle spielen, z. B. <ul style="list-style-type: none"> • PSAgS Tragekomfort (z. B. Passform, Hygiene, Taktilität) Trageakzeptanz • Arbeitsumgebung (z. B. Bewegungsfreiheit, Zwangshaltung, Beleuchtung, klimatische Bedingungen) Psychische Belastung (z. B. Zeitdruck, Ablenkung) 	0 ... praktisch unmöglich 2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich 4 ... unwahrscheinlich 7 ... selten 10 ... gelegentlich bis häufig nicht zutreffend

Die Summe der Bewertungspunkte für die Kriterien a) bis f) führt zur Einstufung der erwarteten Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung in der Risikomatrix (Abb. A 4-3):

Summe Bewertungspunkte

	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung (Bewertungspunkte)	1 (0 ... 9)	2 (10 ... 19)	3 (20 ... 30)	4 (31 ... 45)	5 (46 ... 60)
Schadensschwere (Verletzungsschwere)		Praktisch unmöglich	Denkbar, aber sehr unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	selten	Gelegentlich bis häufig
1	Leichte Verletzung					
2	Reversible Verletzung					
3	Irreversible Verletzung					
4	Tödliche Verletzung					

Abb. A 4-3 Risikomatrix mit Summe der Bewertungspunkte

Anhang 5

Beispiele

In den nachfolgenden Beispielen werden Arbeiten an verschiedenen Arbeitsorten eines typischen städtischen Niederspannungs-Versorgungssystems betrachtet.

Hinweis:

Die nachfolgenden Beispiele wurden aus Sicht der Experten, die an dieser DGUV Information mitgearbeitet haben, erstellt. Sie sollen dem Anwender dieser Auswahlhilfe als Unterstützung bei der Anwendung bieten. In der betrieblichen Praxis können einzelne Bewertungen unter Berücksichtigung zum Beispiel der örtlichen Gegebenheiten oder der konkreten Arbeitsverfahren unterschiedlich ausfallen.

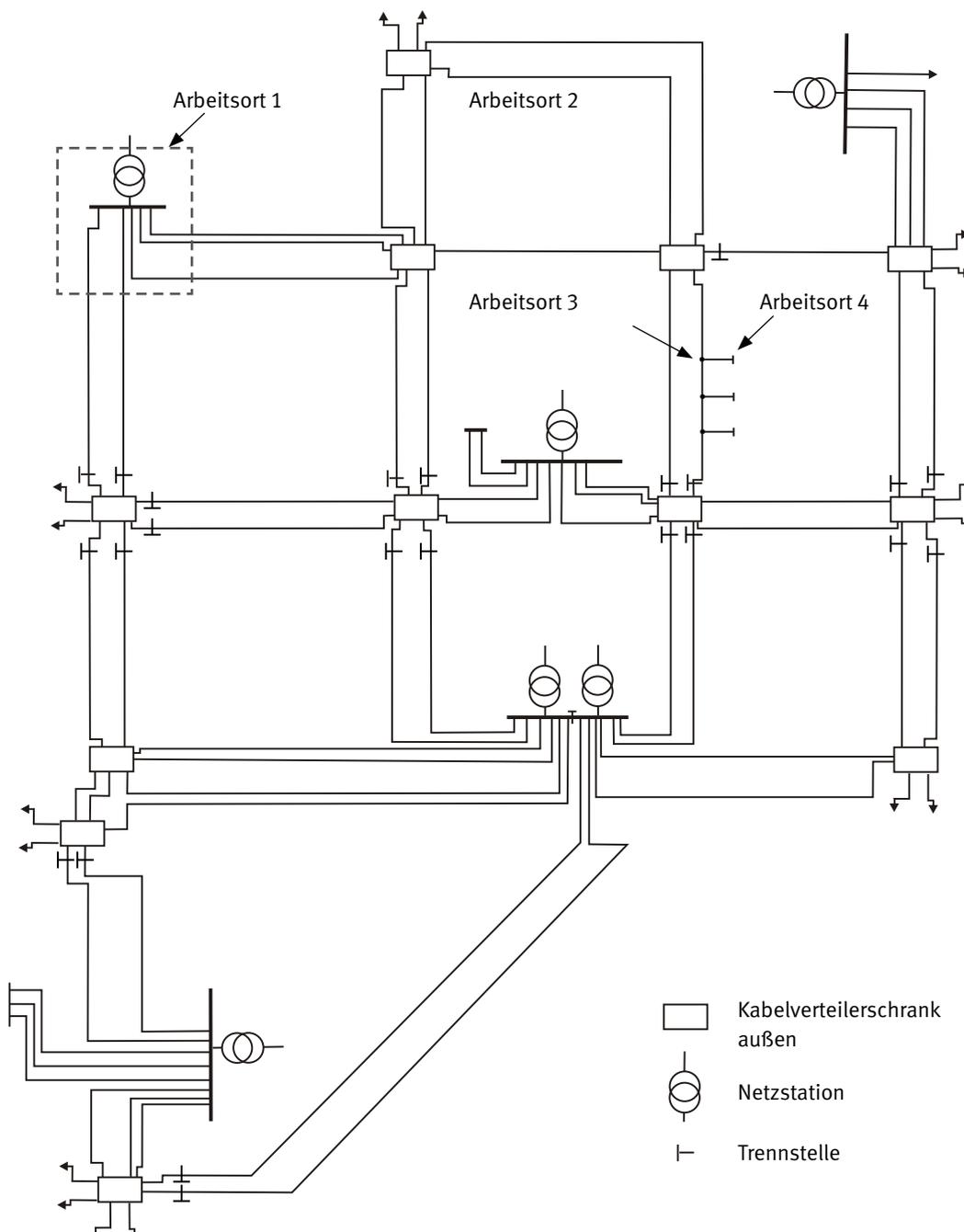


Abb. A 5-1
Betrachtetes städtisches
Niederspannungs-
Versorgungssystem

A 5.1 Beispiel 5.1: Niederspannungsverteilung in einer Transformatorstation (Arbeitsort 1)

Häufig werden Tätigkeiten an Niederspannungs-Verteilungen von Transformatorstationen durchgeführt. Dies sind zum Beispiel das Entfernen oder Einsetzen von NH-Sicherungseinsätzen, An- und Abklemmen von Abgängen, Reinigungsarbeiten oder das Messen und Prüfen an aktiven Teilen.



Abb. A 5-2
Ersatzschaltbild Arbeitsort 1

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja
- Es werden Arbeiten mit Kontakt zu einer offenen unter Spannung stehenden Anlage durchgeführt, bei denen ein Störlichtbogen entstehen kann.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja
- Auf eine PSAgS kann **bei Arbeiten in Niederspannungsanlagen** in den folgenden Fällen verzichtet werden:
 - Bei Arbeiten an Mess-, Steuer- und Regelungsanlagen mit vorgelagerten Stromkreisabsicherungen bis 25 A.
→ nicht zutreffend
 - Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V mit vorgelagerter Absicherung bis einschließlich 63 A, wenn handelsübliche Arbeitskleidung be-

stehend aus langärmeliger Oberbekleidung und langer Hose getragen wird.

→ nicht zutreffend

- Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V AC und einem Kurzschlussstrom < 1 kA. (Ein solcher Lichtbogen brennt nicht stabil und erlischt unmittelbar wieder.)

→ nicht zutreffend

Bei den betrachteten Arbeiten besteht eine erhöhte Gefährdung, da am Arbeitsort im Fehlerfall die Kurzschlussleistung maßgeblich ist, die sich unmittelbar hinter dem Transformator ergibt. Entscheidend für die in einem Störlichtbogen freigesetzten Energien sind die Transformatorleistungen und die Ausschaltzeiten der Transformatorsicherungen bzw. der Leistungsschalter der Speiseweige. Ein wichtiger Einfluss resultiert aus der Struktur bzw. dem Schaltzustand des Niederspannungs-Netzes im Zusammenhang mit der Art der Speisung der Niederspannungs-Stationen (Stationsvermaschung oder stationsweise gespeiste Niederspannungs-Netze). Die Kurzschlussleistung und der prospektive Kurzschlussstrom am Arbeitsort werden davon mitbestimmt, ob eine ein- oder mehrseitige Speisung besteht.

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Schritt 1: Daten der betrachteten Arbeitsstelle

Im Beispielfall handelt es sich um ein städtisches Versorgungssystem (Abb. A 5-3), in dem der Arbeitsort 1 betrachtet wird. In den Netzstationen sind Transformatoren 20/0,4 kV mit Bemessungsscheinleistungen S_{Tr} von 630 kVA oder 400 kVA und Kurzschlussspannungen u_k von 4 % vorhanden. Die Standardquerschnitte der 1-kV-Aluminiumkabel betragen 150 mm² bei den Netzkabeln und 35 mm² bei den Hausanschlusskabeln. In Abb. A 5-1 sind die Trennstellen im Netz eingezeichnet, die bei AuS geöffnet werden, um jeweils einseitige Speisungen in den betreffenden Netzbereichen herzustellen. Der Arbeitsort 1 wird von einem 630-kVA-Transformator über eine NH-Transformator-sicherung 630 kVA der Betriebsklasse gTr AC 400 V gespeist. Die Strom-Zeit-Kennlinie der Sicherung ist in Abb. A 5-4 dargestellt.

Schritt 2: Bestimmung I''_{k3} , R/X

Aus der Kurzschlussstromberechnung gemäß VDE 0102 [7] ergibt sich für den Schaltzustand einseitiger Speisung für den Arbeitsort ein prospektiver Kurzschlussstrom (Anfangskurzschlusswechselstrom) I''_{k3} von

$$I''_{k3,max} = 24,5 \text{ kA} \quad (c = 1,05)$$

$$I''_{k3,min} = 21,6 \text{ kA} \quad (c = 0,95)$$

Das R/X -Verhältnis der Netzimpedanz im Fehlerstromkreis beträgt ca. 0,27.

Schritt 3: Bestimmung Lichtbogenstrom

Der für die Ausschaltzeit der NH-Sicherung relevante minimale Fehlerstrom bei einem Lichtbogenkurzschluss ergibt sich aus dem minimalen prospektiven Kurzschlussstrom $I''_{k3,min}$ mit Hilfe des Begrenzungsfaktors k_B , der die strombegrenzenden Wirkungen der Störlichtbögen im Fehlerstromkreis charakterisiert. Da es sich um eine Niederspannungs-Anlage handelt und im ersten Ansatz eine Worst-Case-Betrachtung vorgenommen wird, wird nach Abschnitt 4.2.2 ein Strombegrenzungsfaktor von $k_B = 0,5$ angenommen. Für den minimalen Fehlerstrom folgt daraus

$$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min} = 0,5 \cdot 21,6 \text{ kA} = 10,8 \text{ kA}$$

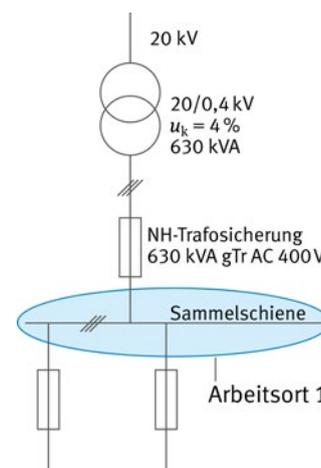
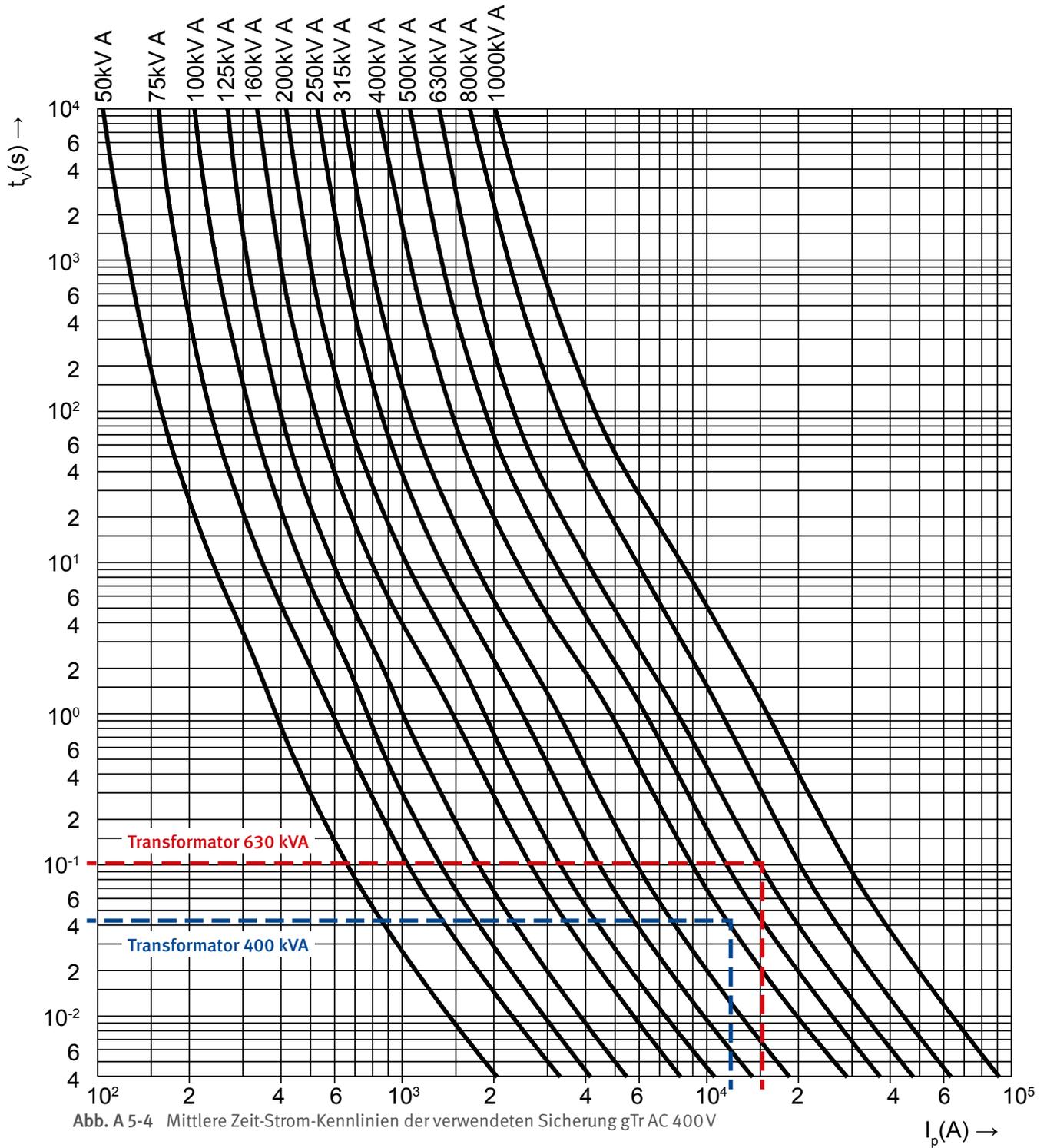


Abb. A 5-3

Arbeiten an einer Niederspannungs-Verteilung



Für diesen Strom ergibt sich aus der Sicherungskennlinie in Abb. A 5-4 eine Ausschaltzeit von $t = 0,113$ s. Diese Zeit entspricht der Kurzschlussdauer t_k .

Anmerkung:

In der praktischen Anwendung ist die Kennlinie der tatsächlich verwendeten Überstromschutzeinrichtung zu benutzen.

Schritt 4: Lichtbogenleistung am Arbeitsort

Mit dem maximalen prospektiven Kurzschlussstrom $I''_{k3,max}$ folgt für die Kurzschlussleistung am Arbeitsort

$$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 24,5 \text{ kA} = 16,97 \text{ MVA}$$

Unter Worst-Case-Bedingungen kann mit der Formel der maximal mögliche Wert der bezogenen Lichtbogenleistung ermittelt werden. Für dieses Beispiel ergibt die Berechnung $k_{P,max} = 0,36$.

Daraus resultiert eine Lichtbogenenergie W_{LB} :

$$W_{LB} = k_P \cdot S''_k \cdot t_k = 0,36 \cdot 16,974 \text{ MVA} \cdot 0,113 \text{ s} = 690,3 \text{ kJ}$$

Diese Energie ist der Erwartungswert der Lichtbogenenergie im Fehlerfall am Arbeitsort 1.

Schritt 5: Arbeitsabstand festlegen

Für die Arbeiten in der Niederspannungs-Verteilung wird ein Arbeitsabstand von $a = 300 \text{ mm}$ angesetzt. Das entspricht einem Minimalabstand vom Oberkörper zur Vorderfront der geöffneten Anlage.

Schritt 6: Prüfpegel für PSA

Die Prüfpegel für PSA unter den Normbedingungen des Boxtests nach VDE 0682-306-1-2 betragen

Störlichtbogenschutzklasse APC 1: $W_{LBP1} = 168 \text{ kJ}$

Störlichtbogenschutzklasse APC 2: $W_{LBP2} = 320 \text{ kJ}$

Schritt 7: Transmissionsfaktor, Schutzpegel der PSAgS

Bei Arbeiten an Niederspannungs-Verteilungen in Transformatorstationen soll von großräumigen Anlagen, deren Raumbegrenzung hauptsächlich durch die Rückwand gegeben ist, ausgegangen werden. Es wird hier ein Transmissionsfaktor von $k_T = 1,5$ angenommen. Mit dem Arbeitsabstand $a = 300 \text{ mm}$ folgt für die äquivalente Lichtbogenenergie mit

$$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}} \right)^2 \cdot W_{LBP} = 1,5 \cdot \left(\frac{300 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} \right)^2 \cdot W_{LBP}$$

$W_{LBS_APC1} = 252 \text{ kJ}$ bei Störlichtbogenschutzklasse APC 1

$W_{LBS_APC2} = 480 \text{ kJ}$ bei Störlichtbogenschutzklasse APC 2

Schritt 8: Auswahl der Störlichtbogenschutzklasse

Es gilt $W_{LB} = 690,3 \text{ kJ} > W_{LBS_APC2} = 480 \text{ kJ}$.

Die zu erwartende Lichtbogenenergie ist größer als der Schutzpegel W_{LBS_APC2} einer PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2. In diesem Fall muss mit Phase 4 der Gefährdungsbeurteilung fortgefahren werden.

In der Abarbeitung der erforderlichen Arbeitsschritte ergeben sich folgende Ergebnisse (siehe Tabelle A 5-1).

Phase 4: Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen umsetzen

Für die betrachtete Anlage und die Arbeitssituation ist keine geeignete Maßnahme zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen möglich. Folglich wird mit Phase 5 weiter verfahren.

Tabelle A 5-1 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.1 (Transformatorstation 630 kVA)

Arbeitsort	Niederspannungs-Verteilung 630 kVA	Erstellt von:	M. Mustermann	
Arbeitsauftrag	An-/Abklemmen von Abgängen, Reinigungsarbeiten; Messen und Prüfen	Datum:	29.11.2019	

Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berech- nung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	60 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	24,5 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	21,6 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	0,27	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,633
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	10,8 kA	13,67 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,113 s	0,045 s
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$	$S''_k =$	16,97 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,36	0,338
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	6,1 MW	5,7 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	690,3 kJ	258 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,5	
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{\alpha}{300\text{mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	480 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	252 kJ	

Vergleich	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	NEIN	JA
	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	NEIN	NEIN

Ergebnis Rechnung:	Freischalten oder weitere Maßnahmen	APC 2
---------------------------	--	--------------

*Phase 5: Eintrittswahrscheinlichkeit und Verletzungsschwere einer Störlichtbogen-
verletzung nach Anwendung der getroffenen Maßnahmen abschätzen; Restrisiko
bewerten und entscheiden (Risikomatrix)*

In dieser Phase wird die mögliche Schadensschwere (Verletzungsschwere) und die Ein-
trittswahrscheinlichkeit einer Verletzung durch einen Störlichtbogen abgeschätzt und
damit das Restrisiko bestimmt.

Abschätzung der Verletzungsschwere

Es wird für dieses Beispiel angenommen, dass die Berechnung (nach Kapitel 4) für die betrachteten Arbeitsbedingungen folgende Ergebnisse liefert:

Schutzpegel für PSAgS APC 2: $W_{LBS} = 480 \text{ kJ}$ ($k_T = 1,5$; $a = 30 \text{ cm}$)

Lichtbogenenergie: $W_{LB} = 690,3 \text{ kJ}$

Aus dem Verhältnis $W_{LB}/W_{LBS} = 1,44$ ergibt sich dann entsprechend Tabelle A 4-1 eine erwartete Verletzungsschwere von „reversible Verletzung“.

Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung

Tabelle A 5-2 Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung für 5.1

	Bezeichnung	Bewertungspunkte	Erläuterung
a)	Art/Zustand der Anlage	4 ... unwahrscheinlich	offene Bauweise in einer abgeschlossenen elektrischen Betriebsstätte; Anlage in ordnungsgemäß gewartetem sauberen Zustand Zustandsbewertung durch Sichtprüfung
b)	Technische Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Einsatz überbrückungssicherer Ausrüstung (AuS-Werkzeug; Spannungsprüfer, NH-Sicherungsaufsteckgriff mit Stulpe)
c)	Organisatorische Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Beschreibung der organisatorischen Maßnahmen Anwendung betrieblicher Regeln: Arbeits- und Betriebsanweisungen liegen vor Qualifikation Personal: Einsatz von für diese Tätigkeiten qualifiziertem Personal (Elektrofachkraft)
d)	Persönliche Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Einsatz PSAgS Störlichtbogenschutzklasse APC 2, Einsatz mit NH-Sicherungsaufsteckgriff mit Stulpe
e)	Statistische Einflussfaktoren	4 ... unwahrscheinlich	Begrenzter räumlicher Umfang kritischer Bereiche: übersichtliche Bauweise; kritische Bereiche sind klar erkennbar Häufigkeit und Dauer von Tätigkeiten in Bereichen, in denen der Schutz durch PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 nicht gegeben ist: begrenzt auf wenige Tätigkeiten von kurzer Dauer Mögliche zusätzliche Schutzwirkung durch langärmelige schwerentflammbare Unterbekleidung: nein Erkenntnisse aus statistisch belastbaren und vergleichbaren Störlichtbogenereignissen in der Vergangenheit: Erkenntnisse über Störlichtbogenereignisse bekannt
f)	Ergonomische Einflussfaktoren	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Erfahrungen im Unternehmen mit verschiedener PSAgS oder Werkzeugen: PSAgS und AuS Werkzeug wurde unter Beteiligung der ausführenden Personen ausgewählt
	Summe:	16 liegt im Bereich (10 ... 19)	Ergebnis: die erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Verletzung durch Störlichtbogen liegt bei „denkbar, aber sehr unwahrscheinlich“

	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung (Bewertungspunkte)	1 (0 ... 9)	2 (10 ... 19)	3 (20 ... 30)	4 (31 ... 45)	5 (46 ... 60)
Schadensschwere (Verletzungsschwere)		Praktisch unmöglich	Denkbar, aber sehr unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	selten	Gelegentlich bis häufig
1	Leichte Verletzung					
2	Reversible Verletzung		APC 2			
3	Irreversible Verletzung					
4	Tödliche Verletzung					

Abb. A 5-5 Anwendung der Risikomatrix für Beispiel 5.1

Die Risikobewertung mit Verletzungsschwere $W_{LB} / W_{LBS} = 1,3$ „reversible Verletzung“ und Eintrittswahrscheinlichkeit 16 Punkte „denkbar, aber sehr unwahrscheinlich“ ergibt in der Risikomatrix (Abb. A 5-5) den grünen Bereich. Die Durchführung der Arbeiten mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 auf Basis der getroffenen Bewertungsansätze ist somit zulässig.

Im Falle einer Station mit einem **400-kVA-Transformator** (Kurzschlussspannung 4 %; NH-Sicherung 400 kVA gTr AC 400 V) liegen – unter sonst gleichen Bedingungen wie oben – die prospektiven Kurzschlussströme im Bereich $I''_{k3} = 12,7 \dots 14,1$ kA. Das R/X -Verhältnis beträgt 0,27. Aus der Strom-Zeit-Kennlinie der NH-Sicherung (Abb. A 5-4) ergibt sich für $k_B = 0,5$ und $I_{kLB} = 6,9$ kA eine Kurzschlussdauer von $t_k = 0,04$ s. Die Kurzschlussleistung beträgt $S''_k = 10,8$ MVA. Mit der bezogenen Lichtbogenleistung $k_p = 0,356$ folgt für die Lichtbogenleistung $P_{LB} = 3,8$ MW und der Erwartungswert der Lichtbogenenergie $W_{LB} = 152$ kJ. Für gleichen Arbeitsabstand $\alpha = 300$ mm und gleichen Transmissionsverhältnisse ($k_T = 1,5$) wie zuvor bedeutet dies, dass PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 erforderlich ist.

Ergebnis der Berechnung siehe Tabelle A 5-3.

Tabelle A 5-3 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.1 (Transformatorstation 400 kVA)

Arbeitsort	Niederspannungs-Verteilung 400 kVA	Erstellt von:	M. Mustermann	
Arbeitsauftrag	An-/Abklemmen von Abgängen, Reinigungsarbeiten; Messen und Prüfen	Datum:	29.11.2019	
Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berech- nung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	60 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	15,5 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	13,7 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	0,30	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,64
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	6,9 kA	8,8 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,04 s	0,02 s
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$	$S''_k =$	10,8 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,356	0,326
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	3,8 MW	3,5 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	152,0 kJ	122,7 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,5	
Schutzpegel der PSAgS am Licht- bogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	480 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	252 kJ	
Vergleich		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA	JA
		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	JA	JA
Ergebnis Rechnung:			APC 1	APC 1

A 5.2 Beispiel 5.2: Niederspannungskabel (Arbeitsort 2)

Häufig werden Arbeiten im Kabelnetz an Muffen durchgeführt (siehe Abb. A 5-6). Der beispielhaft betrachtete Arbeitsort 2 (Kabelmuffe nach ca. 100 m Netzkabel) ist Abb. A 5-1 zu entnehmen. Die Höhe der Fehlerströme und Lichtbogenenergien ist stark von der Entfernung des Arbeitsortes zur speisenden Netzstation (Transformator) und damit von der diesbezüglichen Netzkabellänge abhängig.



Abb. A 5-6
Arbeiten an einer Kabelmuffe

Im Beispiel wird der Arbeitsort durch ein Netzkabel aus einer Station mit einem 630-kVA-Transformator gespeist. Maßgeblich für die Ausschaltung des Störlichtbogenfehlers ist die NH-Sicherung im Kabelabzweig der speisenden Station. Hierbei handelt es sich um eine Leitungs-Ganzbereichssicherung NH 250 A Betriebsklasse gG bzw. gL AC 400 V. Die Strom-Zeit-Kennlinie ist in Abb. A 5-7 dargestellt.

Gefährdungsbeurteilung

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja
- Es werden Arbeiten mit Kontakt zu unter Spannung Leitern durchgeführt, bei denen ein Störlichtbogen entstehen kann.

Phase 2: Basisbewertung des Störlichtbogenrisikos des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja
- Keine der in Kapitel 1 aufgezählten Bedingungen, in denen auf eine PSAgS verzichtet werden kann, ist erfüllt.

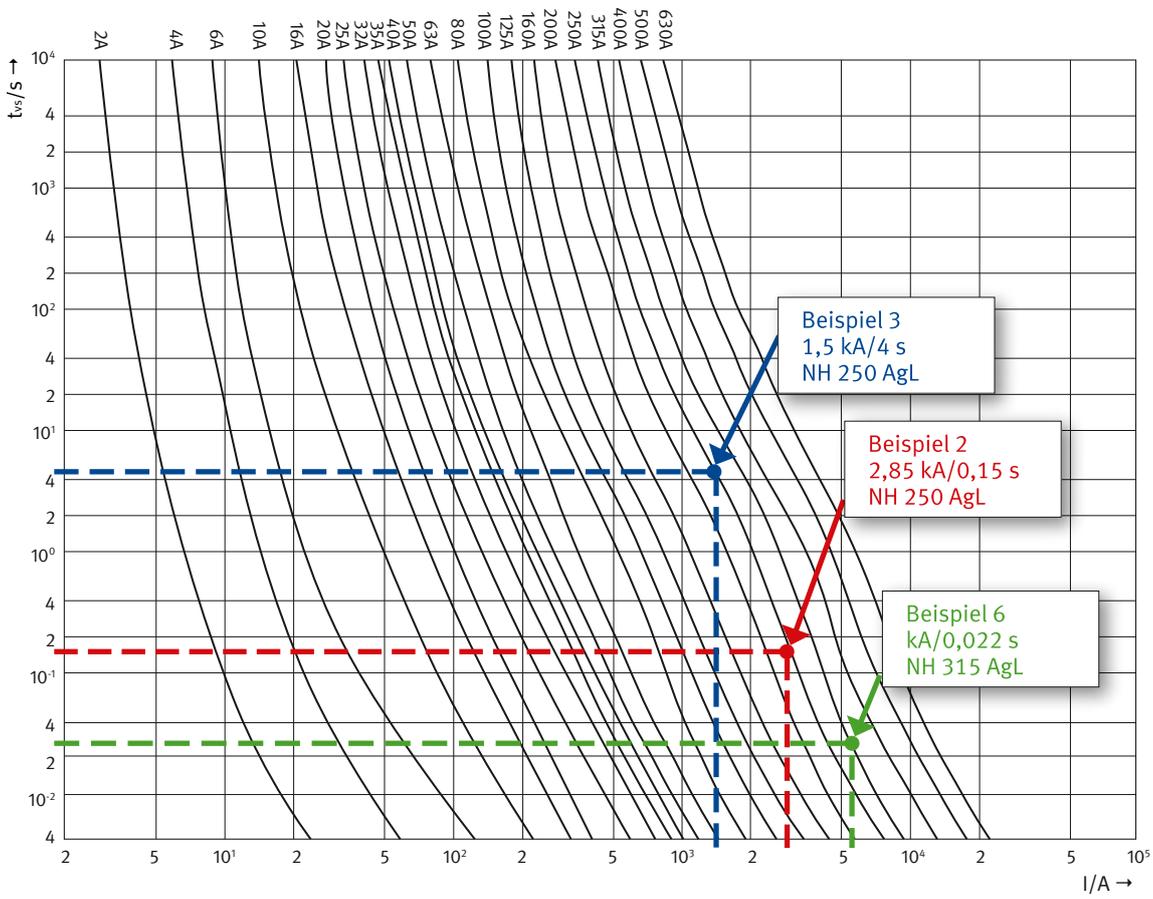


Abb. A 5-7 Mittlere Zeit-Strom-Kennlinien der betrachteten Leitungssicherungen NH gL/gG AC 400 V

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

In der Abarbeitung der erforderlichen Arbeitsschritte ergeben sich folgende Ergebnisse.

Tabelle A 5-4 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.2 (Muffen in Kabelnetzen)

Arbeitsort	Kabelgraben	Erstellt von:	M. Mustermann	
Arbeitsauftrag	Muffenmontage	Datum:	29.11.2019	
Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berechnung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400 V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	45 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	8,3 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	7,5 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	1,3	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,57
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	3,7 kA	4,3 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,107 s	0,049 s
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$	$S''_k =$	5,8 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,28	0,24
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	1,6 MW	1,4 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	170,6 kJ	68,9 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,9	
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	608 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	319 kJ	
Vergleich		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA	JA
		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	JA	JA
Ergebnis Rechnung:			APC 1	APC 1

Die Arbeiten am betrachteten Arbeitsort 2 (Kabelmuffe) erfordern bei Abschätzung nach Kapitel 3 und bei genauer Berechnung PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1.

A 5.3 Beispiel 5.3: Hausanschlusskasten (Arbeitsort 3)

Häufige Arbeiten unter Spannung sind das Wechseln von Hausanschlusskästen (Abb. A 5-8; innen/außen). Im Beispielfall wird der Arbeitsort 3 nach Abb. A 5-1 betrachtet. Die Speisung des Arbeitsortes erfolgt wiederum aus einer vorgeordneten Netzstation mit 630-kVA-Transformator. Im Vergleich zu Beispiel 2 ergeben sich noch deutlich geringere Kurzschlussströme, da die Hausanschlusskabel nur vergleichsweise geringe Querschnitte besitzen. Im Beispiel beträgt die Länge des Hausanschlusskabels ca. 15 m.

Für die Kurzschlussausschaltung ist die Abzweigsicherung im vorgeordneten Kabelverteilerschrank maßgeblich; es handelt sich um eine Sicherung NH 250 A Betriebsklasse gG AC 400 V.



Abb. A 5-8
Arbeiten am
Hausanschlusskasten

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja.
- Es werden Arbeiten mit Kontakt zu einer offenen unter Spannung stehenden Anlage durchgeführt, bei denen ein Störlichtbogen entstehen kann.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja.
- Keine der in Kapitel 1 aufgezählten Bedingungen, in denen auf eine PSaGS verzichtet werden kann, ist erfüllt.

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Die Abarbeitung der erforderlichen Arbeitsschritte ergibt folgende Ergebnisse (siehe Tabelle A 5-5).

Beispiele

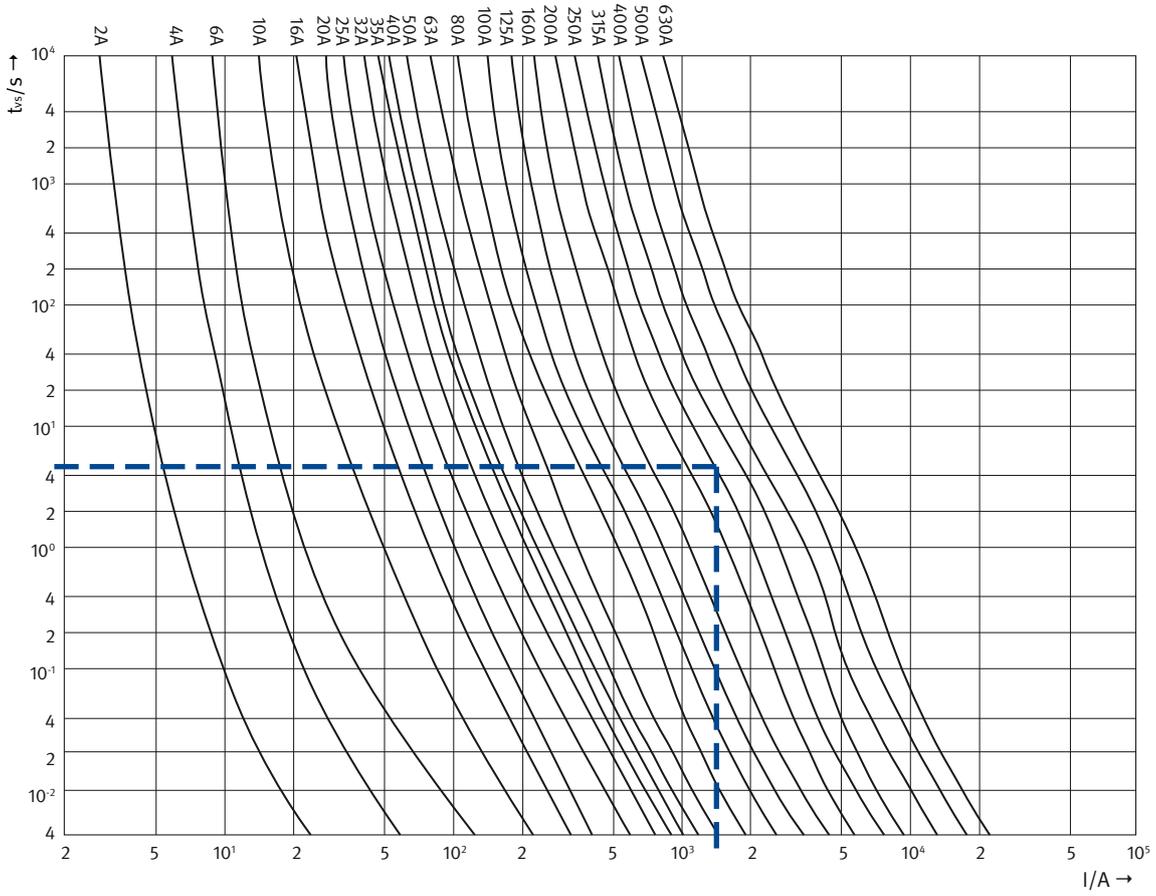


Abb. A 5-9 Mittlere Zeit-Strom-Kennlinien der betrachteten Leitungssicherungen NH gL/gG AC 400 V

Tabelle A 5-5 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.3 (geöffneter Hausanschlusskasten)

Arbeitsort		Erstellt von: M. Mustermann		
Arbeitsauftrag		Datum: 29.11.2019		
Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berechnung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	45 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	3,4 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	3,0 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	2,0	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,554
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	1,5 kA	1,66 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	1,0 s*	1,0 s*
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$	$S''_k =$	2,353 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,26	0,24
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	0,61 MW	0,56 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	607 kJ	565 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{WLBP_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{WLBP_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,0	
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	168 kJ	
Vergleich		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	NEIN	NEIN
		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	NEIN	NEIN
Ergebnis Rechnung:			Freischalten oder weitere Maßnahmen	Freischalten oder weitere Maßnahmen

* Aus der Strom-Zeit-Kennlinie (Abb. A 5-10) ergibt sich eine Ausschaltzeit $t > 1$ s, so dass davon auszugehen ist, dass die für die Exposition relevante Höchstzeit $t_k = 1$ s beträgt (siehe auch Anmerkung am Ende des Abschnittes 4.2.2).

Phase 4: Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen umsetzen

Im Ergebnis zeigt sich, dass im Beispielfall für die Arbeiten am Hausanschlusskasten PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 nicht ausreichend ist. Der hohe Erwartungswert der Lichtbogenenergie kommt durch die große Kurzschlussdauer zustande, aus der eine lange Expositionszeit resultiert.

Um das Arbeiten in diesem Fall zu ermöglichen, können z. B.

- Überstromschutzeinrichtungen, die eine definierte ausreichend schnelle Ausschaltung garantieren, angewendet oder
- die Einhaltung eines ausreichenden Mindestabstandes gefordert oder
- für höhere Einwirkenergien geprüfte PSA eingesetzt werden.

Für die nachfolgende Betrachtung wird die erstgenannte Option ausgewählt. Dazu ist zu fordern, dass die im Kabelabzweig der speisenden Netzstation vorhandene Abzweigsicherung NH 250 A gG für die Dauer der Arbeiten gegen eine Arbeitssicherung mit geringerer Bemessungsstromstärke und/oder einer flinken oder superflinken Betriebscharakteristik ausgetauscht wird, so dass sich vor Beginn der Arbeiten ein Sicherheitswechsel und nach Abschluss der Arbeiten ein Sicherheitswechsel erforderlich machen. Setzt man eine Arbeitssicherung NH 160 A Betriebsklasse aR (flink: üf2; überflink: üf1; superflink: üf01; hyperflink: üf02) ein, ergibt sich in jedem Fall eine strombegrenzende Ausschaltung. Für die Berechnungen ist in diesem Fall eine Kurzschlussdauer von $t_k = 0,01$ s anzusetzen. Im Beispielfall wird eine Sicherung NH 160 A aR/690 V – üf01 eingesetzt, woraus eine Ausschaltzeit von 6,87 ms resultiert.

Tabelle A 5-6 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.3 bei Einsatz einer Arbeitsschutzsicherung (geöffneter Hausanschlusskasten)

Arbeitsort		Erstellt von: M. Mustermann		
Arbeitsauftrag		Datum: 29.11.2019		
Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berechnung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	45 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	3,4 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	3,0 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	2,0	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,554
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	1,5 kA	1,66 kA
Abschaltzeit der Überstromsicherung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,01 s	0,01 s
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$	$S''_k =$	2,353 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,26	0,24
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	0,61 MW	0,56 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	6,1 kJ	5,2 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{LBS_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,0	
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBP_APC\ 1} =$	320 kJ	
		$W_{LBP_APC\ 2} =$	168 kJ	
Vergleich		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA	JA
		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	JA	JA
Ergebnis Rechnung:			APC 1	APC 1

Die Berechnung ergibt, dass die zu erwartende Lichtbogenenergie kleiner 50 kJ ist. Damit ist für die betrachtete Tätigkeit keine besondere PSAgS erforderlich. Eine

handelsübliche Arbeitskleidung, bestehend aus langärmeliger Oberbekleidung und langer Hose ist ausreichend.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass zum Einsetzen der Arbeitsschutz-Sicherung eine PSAgS (APC 1 oder APC 2) benötigt wird.

A 5.4 Beispiel 5.4: Elektroinstallation bei vorgeschaltetem Hausanschlusskasten (Arbeitsort 4)

Werden Arbeiten unter Spannung oder Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile in der elektrischen Hausinstallation (400 V), die über eine Sicherung mit maximal 63 A Nennstrom abgesichert ist, durchgeführt, ist handelsübliche Arbeitskleidung bestehend aus langärmeliger Oberbekleidung und langer Hose ausreichend (siehe Anwendungsbereich).

Anmerkung:

Der Vollständigkeit halber wird dieses Beispiel aus der ersten Auflage dieser DGUV Information (Ausgabe Oktober 2012) hier aufgeführt. Die Berechnungen der ersten Auflage zeigen, die abgeschätzten Werte für W_{LB} deutlich (Faktor >27) unterhalb des Schutzpegels einer PSAgS der Störlichtbogenenschutzklasse APC 1 liegen.



Abb. A 5-10
Arbeiten hinter der
Hauseinspeisung

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja
- Bei Arbeiten an einer Verteilung wie z. B. das Wechseln eines Stromzählers unter Spannung kann zu einem Störlichtbogenereignis kommen.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Nein
- Auf eine PSAgS kann bei Arbeiten in Niederspannungsanlagen in den folgenden Fällen verzichtet werden:

- Bei Arbeiten an Mess-, Steuer- und Regelungsanlagen mit vorgelagerten Stromkreisabsicherungen bis 25 A.
☞ nicht zutreffend
- Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V mit vorgelagerter Absicherung bis einschließlich 63 A, wenn handelsübliche Arbeitskleidung bestehend aus langärmeliger Oberbekleidung und langer Hose getragen wird.
☞ zutreffend
- Bei Arbeiten an Stromkreisen mit Nennspannungen bis 400 V AC und einem Kurzschlussstrom < 1 kA. (Ein solcher Lichtbogen brennt nicht stabil und erlischt unmittelbar wieder.)
☞ nicht zutreffend

A 5.5 Beispiel 5.5: Entfernen von NH-Sicherungseinsätzen

Das Tätigkeitsfeld von Zählermonteuren kann Arbeitsbereiche mit unterschiedlicher Störlichtbogengefährdung umfassen:

- a) Arbeiten an Anlagen (Zähler) hinter einer Hausanschlussicherung (vgl. Beispiel Arbeitsort 4):
Diese Tätigkeiten umfassen z. B. Spannung prüfen, Wechsel von Zählern (im spannungsfreien Zustand oder unter Spannung). Entsprechend der Rechenergebnisse ist dazu PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 ausreichend.
- b) Arbeiten am geöffneten Hausanschlusskasten (vgl. Beispiel Arbeitsort 3):
Zur Vorbereitung von Arbeiten am Zähler müssen ggf. Hausanschlussicherungen entfernt oder wieder eingesetzt werden. Entsprechend der Rechenergebnisse wird hier der rechnerische Schutzpegel der PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 1 überschritten ($W_{LB} / W_{LBS} = 1,3$).

Zählermonteure sind im Regelfall mit PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 ausgerüstet. Es ergibt sich die Frage, ob für das Entfernen und das Einsetzen von Hausanschlussicherungen eine Ausrüstung mit PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 2 zwingend erforderlich ist, oder ob diese Tätigkeit auch mit PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 ausgeführt werden kann?



Abb. A 5-11
Entfernen und Einsetzen
von NH-Sicherungen
am Hausanschlusskasten

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja.
- Es werden Arbeiten mit Kontakt zu einer offenen unter Spannung stehenden Anlage durchgeführt.

Phase 2: Erste Bewertung des Störlichtbogenrisikos des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja.
- Keine der in Kapitel 1 aufgezählten Bedingungen, in denen auf eine PSAgS verzichtet werden kann, ist erfüllt.

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Die Berechnung von W_{LB} ergibt 607 kJ (vgl. Tabelle A 5-5, Hausanschlusskasten).

Ausgehend von einem Arbeitsabstand von $a = 500$ mm beträgt der Schutzpegel der

PSAgS Störlichtbogenschutzklasse APC 1 467 kJ (bei $k_T = 1$).

Da bei diesen Arbeiten mit fast gestrecktem Arm gearbeitet wird, wird von einem Arbeitsabstand von 500 mm ausgegangen.

Damit überschreitet W_{LB} den Schutzpegel der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 um den Faktor 1,3.

Phase 4: Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen umsetzen

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen wäre der Einsatz einer PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2. Zur Untersuchung, ob diese Tätigkeit auch mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 ausgeführt werden kann, wird diese Abschätzung mit Phase 5 weiter betrachtet.

Phase 5: Eintrittswahrscheinlichkeit und Verletzungsschwere einer Störlichtbogenverletzung nach Anwendung der getroffenen Maßnahmen abschätzen; Restrisiko bewerten und entscheiden (Risikomatrix)

Abschätzung der Verletzungsschwere

Es wird für dieses Beispiel angenommen, dass die Berechnung (nach Kapitel 4) für die betrachteten Arbeitsbedingungen folgende Ergebnisse liefert:

Schutzpegel für PSAgS APC 1: $W_{LBS} = 467$ kJ ($k_T = 1$; $a = 500$ mm)

Lichtbogenenergie: $W_{LB} = 607$ kJ

Aus dem Verhältnis $W_{LB} / W_{LBS} = 1,3$ ergibt sich dann entsprechend Tabelle A 4-2 eine erwartete Verletzungsschwere von „reversible Verletzung“.

Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung

Tabelle A 5-7 Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung für 5.5

	Bezeichnung	Bewertungspunkte	Erläuterung
a)	Art/Zustand der Anlage	4 ... unwahrscheinlich	offene Bauweise in einer abgeschlossenen elektrischen Betriebsstätte; Anlage in ordnungsgemäß gewartetem sauberen Zustand Zustandsbewertung durch Sichtprüfung
b)	Technische Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Einsatz überbrückungssicherer Ausrüstung (AuS-Werkzeug; Spannungsprüfer, NH-Sicherungsaufsteckgriff mit Stulpe)
c)	Organisatorische Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Anwendung betrieblicher Regeln: Arbeits- und Betriebsanweisungen liegen vor Qualifikation Personal: Einsatz von für diese Tätigkeiten qualifiziertem Personal (Elektrofachkraft)
d)	Persönliche Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Einsatz PSAgS Störlichtbogenschutzklasse APC 1, Einsatz NH-Sicherungsaufsteckgriff mit Stulpe
e)	Statistische Einflussfaktoren	4 ... unwahrscheinlich	Begrenzter räumlicher Umfang kritischer Bereiche: übersichtliche Bauweise; kritische Bereiche sind klar erkennbar Häufigkeit und Dauer von Tätigkeiten in Bereichen, in denen der Schutz durch PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 nicht gegeben ist: begrenzt auf wenige Tätigkeiten von kurzer Dauer Mögliche zusätzliche Schutzwirkung durch langärmelige schwerentflammbare Unterbekleidung: nein Erkenntnisse aus statistisch belastbaren und vergleichbaren Störlichtbogenereignissen in der Vergangenheit: Erkenntnisse über Störlichtbogenereignisse bekannt
f)	Ergonomische Einflussfaktoren	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Erfahrungen im Unternehmen mit verschiedener PSAgS oder Werkzeugen: PSAgS und AuS Werkzeug wurde unter Beteiligung der ausführenden Personen ausgewählt
	Summe:	16 liegt im Bereich (10 ... 19)	Ergebnis: die erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Verletzung durch Störlichtbogen liegt bei „denkbar, aber sehr unwahrscheinlich“

	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung (Bewertungspunkte)	1 (0 ... 9)	2 (10 ... 19)	3 (20 ... 30)	4 (31 ... 45)	5 (46 ... 60)
Schadensschwere (Verletzungsschwere)		Praktisch unmöglich	Denkbar, aber sehr unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	selten	Gelegentlich bis häufig
1	Leichte Verletzung					
2	Reversible Verletzung		APC 1			
3	Irreversible Verletzung					
4	Tödliche Verletzung					

Abb. A 5-12 Anwendung der Risikomatrix für Beispiel 5.5

Die Risikobewertung mit Verletzungsschwere $W_{LB} / W_{LBS} = 1,3$ „reversible Verletzung“ und Eintrittswahrscheinlichkeit 16 Punkte „denkbar, aber sehr unwahrscheinlich“ ergibt in der Risikomatrix (Abb. A 5-12) den grünen Bereich. Die Durchführung der Arbeiten mit PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 auf Basis der getroffenen Bewertungsansätze ist somit zulässig.

A 5.6 Beispiel 5.6: Industrierverteiler

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Berechnung für eine typische Konfiguration hinter einer NH 315 A gG Sicherung. An dieser Beispielanlage werden hinter der NH Sicherung unterschiedliche Tätigkeiten durchgeführt (siehe Abb. A 5-13). Dies geht vom Austausch von Betriebsmitteln bis hin zu einfachsten Einstellarbeiten an Schutzorganen und Betriebsmitteln.

Der Arbeitsort ist die elektrotechnische Ausrüstung der Kältemaschine und liegt hinter einem Kabel von 86 m.

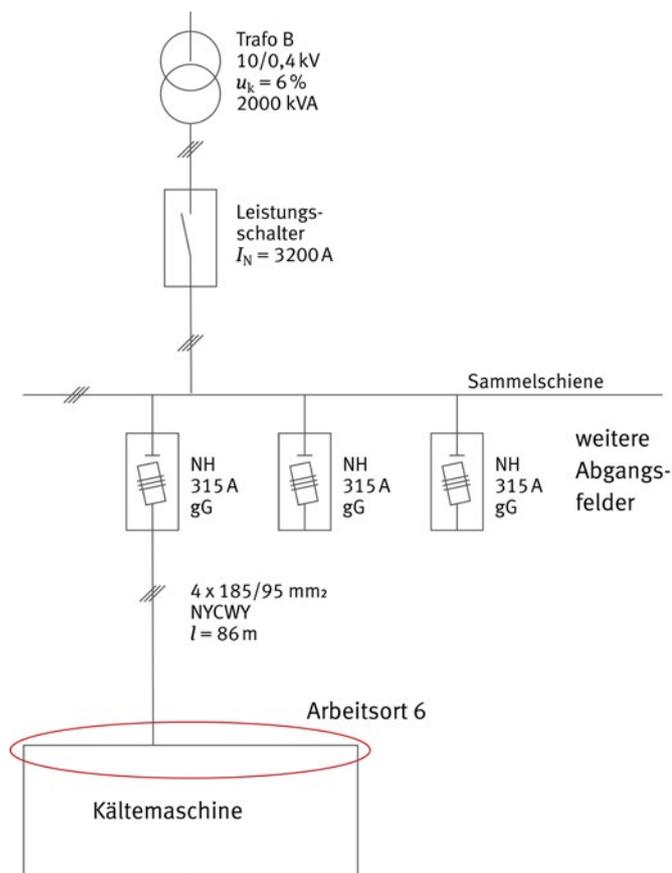


Abb. A 5-13 Anlagenübersicht Industrieanlage

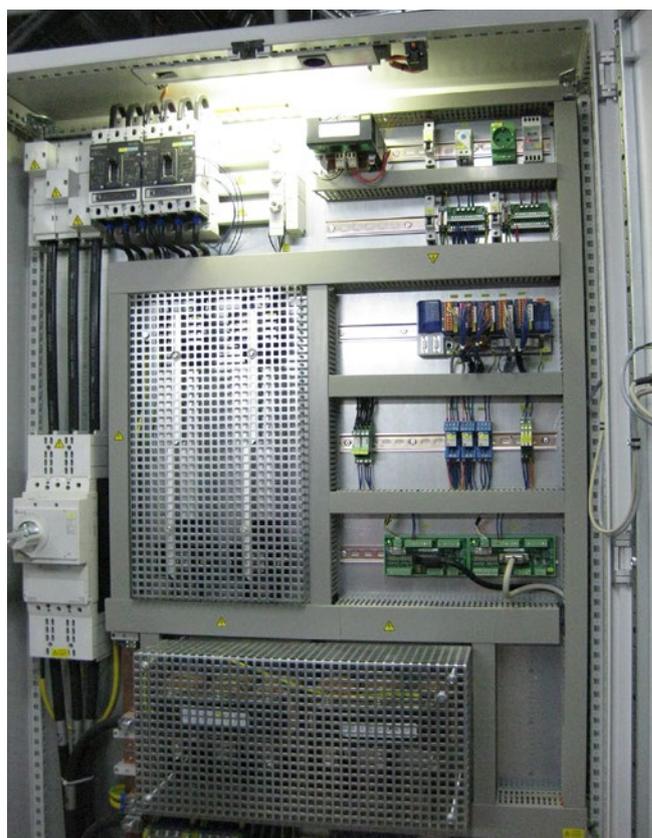


Abb. A 5-14 Niederspannungsanlage in der Industrie (Schaltschrank Kältemaschine)

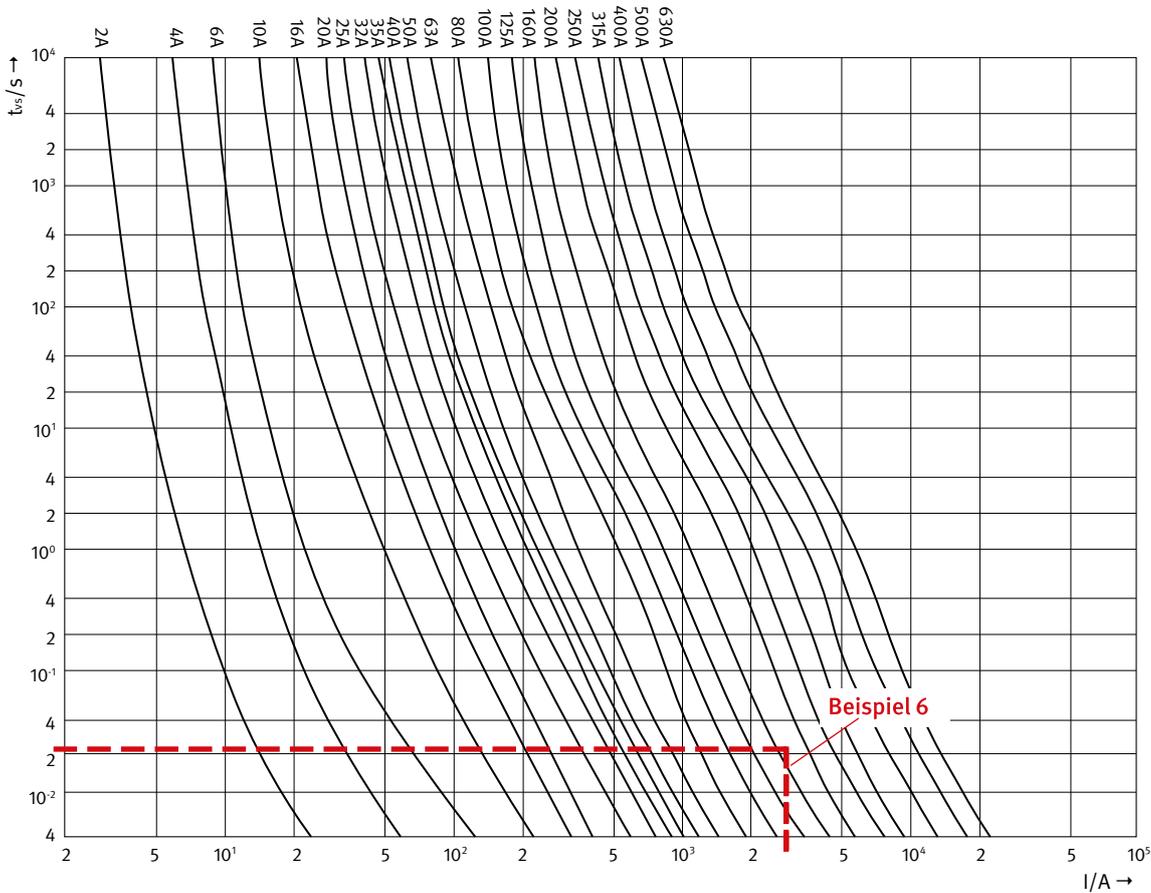


Abb. A 5-15 Mittlere Zeit-Strom-Kennlinien der betrachteten Leitungssicherungen NH gL/gG AC 400V

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja
- Es werden Arbeiten mit Kontakt zu einer offenen unter Spannung stehenden Anlage (AuS) oder in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen der Anlage durchgeführt, bei denen ein Störlichtbogen entstehen kann.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja
- Keine der in Kapitel 1 aufgezählten Bedingungen, in denen auf eine PSAgS verzichtet werden kann, ist erfüllt.

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

In der Abarbeitung der erforderlichen Arbeitsschritte ergeben sich folgende Ergebnisse (siehe Tabelle A 5-8).

Anmerkung: Bei genauer Berechnung ergibt sich aus der Kennlinie der Schutzeinrichtung eine Zeit < 10 ms; die Kurzschlussdauer wird deshalb auf 10 ms festgelegt.

Tabelle A 5-8 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.6 (Niederspannungs-Anlage in der Industrie)

Arbeitsort		Erstellt von: M. Mustermann		
Arbeitsauftrag		Datum: 29.11.2019		
Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berechnung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	20 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	16,4 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	14,7 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	0,81	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,761
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	7,4 kA	11,4 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,013 s	0,01 s
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3p,max}$	$S''_k =$	11,4 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,3	0,17
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	3,5 MW	1,9 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	45,2 kJ	19,1 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,5	
Schutzpegel der PSAGS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	480 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	252 kJ	
Vergleich		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA	JA
		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	JA	JA
Ergebnis Rechnung:			APC 1	APC 1

Anmerkung:

Bei genauer Berechnung ergibt sich aus der Kennlinie der Schutzeinrichtung eine Zeit $< 10\text{ ms}$; die Kurzschlussdauer wird deshalb auf 10 ms festgelegt.

Die Berechnung ergibt, dass die zu erwartende Lichtbogenenergie kleiner als $W_{LB,min} = 50\text{ kJ}$ ist. Damit ist für die hier betrachtete Arbeit keine besondere PSAGS erforderlich. Eine handelsübliche Arbeitskleidung bestehend aus langärmeliger Oberbekleidung und langer Hose ist ausreichend. Eine Schutzkleidung der Störlichtbogen-schutzklasse APC 1 wird jedoch empfohlen.

A 5.7 Beispiel 5.7: Schalten an nicht störlichtbogengeprüften Anlagen älterer Bauart

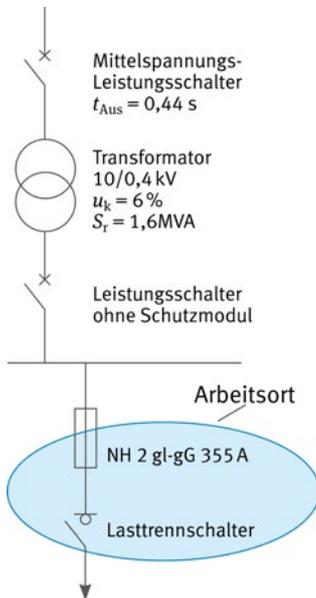


Abb. A 5-16 Ersatzschaltbild Schaltanlage

Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs im industriellen Bereich findet man dort häufig Anlagen mit hohen Kurzschlussleistungen. Gängige Transformatorgrößen für die Umspannung von Mittel- auf Niederspannung sind 1,0 MVA, 1,6 MVA, 2,0 MVA sowie 2,5 MVA, teilweise auch bis zu 4 MVA. Damit einhergehend treten sehr hohe Kurzschlussströme auf. Teilweise bestehen auch relativ lange Abschaltzeiten.

Im Weiteren wird der Fall betrachtet, wie ein Schaltfeld (Strahlennetz) freigeschaltet wird, damit z. B. an der unterlagerten Verteilung gearbeitet werden kann.

Hierzu wird zunächst von außen, mittels eines Hebels, der dem Abgang zugeordnete Lasttrennschalter betätigt (Betrachtung a). Danach werden die NH-Sicherungen entfernt (Betrachtung b) und die Spannungsfreiheit festgestellt (Betrachtung c).

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja.
- Infolge des Versagens des Schaltorgans, sowie später beim Entfernen der NH-Sicherung an der unter Spannung stehenden Anlage, kann ein Störlichtbogen nicht ausgeschlossen werden.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja.
- Keine der in Kapitel 1 aufgezählten Bedingungen, in denen auf eine PSAgS verzichtet werden kann, ist erfüllt.



Abb. A 5-17 Leistungsstarke Schaltanlage älterer Bauart; eingesetzt in der Industrie



Abb. A 5-18 Geöffnetes Feld

A 7.7.1 Betrachtung a – Öffnen des Lasttrennschalters



Abb. A 5-19
Öffnen des Lasttrennschalters
bei geschlossener Tür mittels
Bedienhebel

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Die Berechnung in Tabelle A 5-9 zeigt, dass für das Öffnen des Lasttrennschalters Schutzkleidung APC 1 ausreichend ist. Bei der Berechnung wird die Schutzwirkung der Tür beim Auftreten eines Lichtbogens nicht berücksichtigt, da diese nicht quantifizierbar ist.

Anmerkung:

Lichtbogenversuche an realen Schaltanlagen haben eine große Schutzwirkung von Türen ergeben. Im Falle eines starken Lichtbogens wird die Tür voraussichtlich öffnen und die Lichtbogenenergie durch die entstehende Öffnung entweichen (Richtwirkung). Daher ist es sinnvoll, sich so vor der Anlage zu positionieren, dass man sich nicht im Bereich der entstehenden Öffnung befindet (seitliches Stehen). Hierdurch kann ein zusätzlicher Schutz für den Ausführenden erreicht werden. Bei den Versuchen hat sich ebenfalls gezeigt, dass normalerweise die Bänder der Tür halten und die Öffnung im Bereich der Verriegelung entsteht.

Tabelle A 5-9 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.7.1 (Öffnen des Lasttrennschalters)

Arbeitsort	Schaltanlage (ältere Bauart)	Erstellt von:	M. Mustermann	
Arbeitsauftrag	Öffnen des Lasttrennschalters	Datum:	29.11.2019	

Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berechnung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	20 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	36 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	29 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	0,12	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,9
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	14,5 kA	26,1 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,01 s	0,01 s
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$	$S''_k =$	24,9 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,42	0,19
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	10,4 MW	4,7 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	103,7 kJ	47,4 kJ
Arbeitsabstand		a	600 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,9	
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	2432 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	1277 kJ	

Vergleich	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA	JA
	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	JA	JA

Ergebnis Rechnung:	APC 1	APC 1
---------------------------	--------------	--------------

A 7.7.2 Betrachtung b – Entnehmen der NH-Sicherungen



Abb. A 5-20
Entnehmen der
NH-Sicherungseinsätze,
zusätzlich mobile Trennstege
um Potentiale gegeneinander
zu isolieren

Phase 3 (Betrachtung b): Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Das Ergebnis der Berechnung zeigt Tabelle A 5-10.

Phase 4: Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen umsetzen

Für die betrachtete Anlage und die Arbeitssituation ist keine geeignete Maßnahme zur Reduzierung der Lichtbogenenergie und der Wahrscheinlichkeit von Verletzungen durch Störlichtbögen möglich. Folglich wird mit Phase 5 weiter verfahren.

Phase 5: Eintrittswahrscheinlichkeit und Verletzungsschwere einer Störlichtbogenverletzung nach Anwendung der getroffenen Maßnahmen abschätzen; Restrisiko bewerten und entscheiden (Risikomatrix)

Abschätzung der Verletzungsschwere

Es wird für dieses Beispiel angenommen, dass die Berechnung (nach Kapitel 4) für die betrachteten Arbeitsbedingungen folgende Ergebnisse liefert:

Schutzpegel für PSAgS APC 2: $W_{LBS_APC2} = 1689 \text{ kJ}$ ($k_T = 1,9$; $a = 500 \text{ mm}$)

Lichtbogenenergie: $W_{LB} = 3512 \text{ kJ}$

Aus dem Verhältnis $W_{LB} / W_{LBS} = 2,1$ ergibt sich dann entsprechend Tabelle A 5-11 eine erwartete Verletzungsschwere von „reversible Verletzung“.

Tabelle A 5-10 Ergebnis der Berechnung W_{LB} und W_{LBS} für Beispiel 5.7.2 (Entnehmen NH-Sicherungseinsätze)

Arbeitsort	Schaltanlage (ältere Bauart)	Erstellt von:	M. Mustermann	
Arbeitsauftrag	Entnehmen der NH-Sicherungseinsätze	Datum:	29.11.2019	

Rechnung		Kenngroße	Resultat (Worst-Case)	Resultat bei genauer Berechnung nach [21]
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V	
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	60 mm	
Kurzschlussstromberechnung	Max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$	36 kA	
	Min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$	29 kA	
	Verhältnis R/X	R/X	0,12	
Strombegrenzung		k_B	0,5	0,67
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$	14,75 kA	19,4 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,424 s	0,44 s
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{Nn} \cdot I''_{k3,max}$	$S''_k =$	24,9 MVA	
Bezogene LB-Leistung	$k_p = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$	$k_p =$	0,42	0,32
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S''_k$	$P_{LB} =$	10,4 MW	8,0 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S''_k \cdot t_k$	$W_{LB} =$	4564 kJ	3512 kJ
Arbeitsabstand		a	500 mm	
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ	
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ	
Transmissionsfaktor		k_T	1,9	
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	1689 kJ	
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	887 kJ	

Vergleich		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	NEIN	NEIN
		$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	NEIN	NEIN

Ergebnis Rechnung:	Freischalten oder weitere Maßnahmen	Freischalten oder weitere Maßnahmen
---------------------------	--	--

Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung

Tabelle A 5-11 Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung für 5.7

	Bezeichnung	Bewertungspunkte	Erläuterung
a)	Art/Zustand der Anlage	4 ... unwahrscheinlich	Anlage leicht verstaubt (keine leitfähigen Ablagerungen); Zustandsbewertung durch Sichtprüfung
b)	Technische Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Einsatz überbrückungssicherer Ausrüstung (NH-Sicherungsaufsteckgriff mit Stulpe, mobile Trennstege zwischen Sicherungsträgern ; Spannungsprüfer CAT IV)
c)	Organisatorische Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Anwendung betrieblicher Regeln: Arbeits- und Betriebsanweisungen liegen vor Qualifikation Personal: Einsatz von für diese Tätigkeiten qualifiziertem Personal – speziell geschultes Schaltpersonal (Elektrofachkraft) Übersichtsschaltpläne vorhanden und aktuell
d)	Persönliche Maßnahmen	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Einsatz PSAgS Störlichtbogenschutzklasse 2
e)	Statistische Einflussfaktoren	4 ... unwahrscheinlich	Begrenzter räumlicher Umfang kritischer Bereiche: übersichtliche Bauweise; kritische Bereiche sind klar erkennbar Häufigkeit und Dauer von Tätigkeiten in Bereichen, in denen der Schutz durch PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 nicht gegeben ist: begrenzt auf Entfernen der NH-Sicherung – kurze Arbeitsdauer Erkenntnisse aus statistisch belastbaren und vergleichbaren Störlichtbogenereignissen in der Vergangenheit: in der Organisationseinheit bisher beim Ausführen der Tätigkeit nicht aufgetreten
f)	Ergonomische Einflussfaktoren	2 ... denkbar, sehr unwahrscheinlich	Erfahrungen im Unternehmen mit verschiedener PSAgS oder Werkzeugen: PSAgS und AuS Werkzeug wurde unter Beteiligung der ausführenden Personen ausgewählt
	Summe:	16 liegt im Bereich (10 ... 19)	Ergebnis: die erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Verletzung durch Störlichtbogen liegt bei „denkbar, aber sehr unwahrscheinlich“

	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung (Bewertungspunkte)	1 (0 ... 9)	2 (10 ... 19)	3 (20 ... 30)	4 (31 ... 45)	5 (46 ... 60)
Schadensschwere (Verletzungsschwere)		Praktisch unmöglich	Denkbar, aber sehr unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	selten	Gelegentlich bis häufig
1	Leichte Verletzung					
2	Reversible Verletzung		APC 2			
3	Irreversible Verletzung					
4	Tödliche Verletzung					

Abb. A 5-21 Anwendung der Risikomatrix für Beispiel 5.7

Die Risikobewertung mit Verletzungsschwere $W_{LB} / W_{LBS} = 2,1$ „reversible Verletzung“ und Eintrittswahrscheinlichkeit 16 Punkte „denkbar, aber sehr unwahrscheinlich“ ergibt in der Risikomatrix (Abb. A.5-21) den grünen Bereich. Die Durchführung der Arbeiten mit PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 auf Basis der getroffenen Bewertungsansätze ist somit zulässig.

A 7.7.3 Betrachtung c – Spannungsfreiheit feststellen



Abb. A 5-22
Feststellen der Spannungsfreiheit

Zum Abschluss der Freischaltung muss nun noch die Spannungsfreiheit festgestellt werden. Hierbei muss im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung in der Phase 1 geprüft werden, ob eine Gefährdung durch Störlichtbogenexposition gegeben ist. Im vorliegenden Fall erfolgt die Prüfung mit einem Spannungsprüfer CAT IV mit verlängerten Spitzen. Diese sind hier nicht zwangsweise erforderlich, in dem Unternehmen für das Schaltpersonal aber Standard, da mit ihnen ein größerer Arbeitsabstand erreicht wird. Die Spitzen haben an ihren Enden nur einen sehr kurzen metallischen Teil, wodurch im vorliegenden Fall keine Überbrückung der potentiell unter Spannung stehender Teile erfolgen kann. Da somit das Entstehen eines Störlichtbogens ausgeschlossen werden kann, könnte das Feststellen der Spannungsfreiheit ohne PSaGS erfolgen. Da im vorherigen Arbeitsschritt (Entnehmen NH-Sicherungen) aber ohnehin PSaGS erforderlich war, wird der kurze Vorgang des Feststellens der Spannungsfreiheit ebenfalls mit dieser ausgeführt.

Da im Arbeitsschritt b – „Entnehmen der NH-Sicherungen“ PSaGS APC 2 erforderlich ist, werden letztlich alle drei Arbeitsschritte mit dieser PSaGS durchgeführt. Durch die kurze Zeitdauer der gesamten Arbeiten von 5–10 Minuten ist das Tragen der PSaGS auch ergonomisch unproblematisch.

A 5.8 Beispiel 5.8: Arbeiten an DC-Anlagen (USV)

Arbeiten an einer USV-Anlage

Im Beispiel handelt es sich um Arbeiten an einer USV-Anlage (unterbrechungsfreie Stromversorgung) 200 kVA (Verschiebungsfaktor $\cos \varphi = 0,9$, Wirkungsgrad DC/AC = 0,9) mit einer leistungsstarken Batterie im Zwischenkreis des Wechselrichters. Die Zwischenkreisspannung beträgt 400 V (siehe Abb. A 5-23).

Aus der Ausgangsleistung des Wechselrichters, einer Entladeschlussspannung von 350 V und der vorgegebenen Entladezeit (Überbrückungszeit) von 15 min ergibt sich der Batterieentladestrom (maximaler Betriebsstrom) von 571 A. Für den Schutz der Batterie ist ein Sicherungslasttrennschalter mit DC-Batteriesicherung NH gR Bat 500 A (500 V, Baugröße NH3) vorgesehen.

Die Batterie besteht aus einer Reihenschaltung von 100 Batteriezellen 4 V. Der Hersteller gibt im Datenblatt dafür einen Innenwiderstand von 97,9 m Ω (0,98 m Ω /Zelle) an, woraus sich ein prospektiver Kurzschlussstrom von $I_{kDC} = 4,086$ kA ergibt.

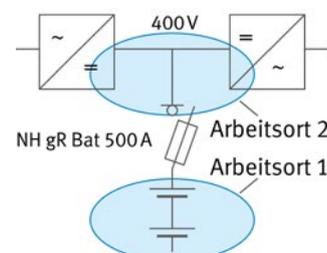


Abb. A 5-23
Prinzipschaltbild der USV-Anlage mit den Arbeitsorten 1 und 2 (Fehlerorte)

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja.
- Bei Arbeiten am Wechselrichter oder im Bereich der Batterien kann ein Störlichtbogen nicht ausgeschlossen werden.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja.
- Keine der in Kapitel 1 aufgezählten Bedingungen, in denen auf eine PSaGS verzichtet werden kann, ist erfüllt.

A 5.8.1 Arbeiten im Batteriebereich und direkt an den Batteriezellen (Arbeitsort 1)

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Bei Arbeiten im Batteriebereich und direkt an den Batteriezellen ist bei Einleitung eines Lichtbogenkurzschlusses am Fehlerort von einem Leiterabstand von $d = 30$ mm auszugehen, woraus sich ein Strombegrenzungsfaktor von $k_B = 0,677$ und ein tatsächlicher Fehlerstrom (Lichtbogenkurzschlussstrom) $I_{kLB} = 2,76$ kA ergibt. Da der Arbeitsort nicht im Schutzbereich der Sicherung NH gR Bat liegt, ist vom ungünstigsten Fall der Einwirkzeit von $t_k = 1$ s auszugehen (maximale Einwirkzeit bzw. Zeitdauer, in der sich die Person aus dem unmittelbaren Gefahrenbereich zurückziehen kann).

Aus der Iterationsrechnung ergibt sich für die Lichtbogenleistung $P_{LB} = 358$ kW, was einer bezogenen Lichtbogenleistung von $k_P = 0,219$ entspricht. Mit der Kurzschlussdauer von $t_k = 1000$ ms resultiert daraus ein Erwartungswert für die am Arbeitsort (Fehlerort) umgesetzte Lichtbogenleistung von $W_{LB} = 358$ kJ.

Rechnet man die Lichtbogenleistung aus der Worst-Case-Abschätzung (ohne Berücksichtigung eines Elektrodenabstandes) über die Beziehung $P_{LB} = 0,25 P_K$ mit den Netzkenngrößen Netzspannung und prospektiver Kurzschlussstrom und der Kurzschlussleistung $P_K = U_N \cdot I_{kDC}$ aus, so folgt $P_{LBmax} = 0,25 \cdot 1,634$ MVA = 0,408 MW. Für den Erwartungswert der Lichtbogenenergie ergibt sich dann $W_{LBmax} = 408,5$ kJ.

Der Schutzpegel der PSAgS wird aus den Prüfpegeln der Lichtbogenenergie unter Berücksichtigung der Transmissionsverhältnisse und des Arbeitsabstandes a ermittelt. Geht man hier entsprechend des Anlagenvolumens von Bedingungen aus, bei denen hauptsächlich eine Rückwandwirkung besteht, was einem Transmissionsfaktor von $k_T = 1,5$ entspricht, und einem Abstand von $a = 300$ mm aus, so ergeben sich die Schutzpegel der PSAgS W_{LBS} aus den Prüfpegeln W_{LBP} gemäß $W_{LBS} = k_T \cdot (a / 300 \text{ mm})^2 \cdot W_{LBP}$. Für Störlichtbogenschutzklasse APC 1 gilt $W_{LBS_APC1} = 252$ kJ und für Störlichtbogenschutzklasse APC 2 $W_{LBS_APC2} = 480$ kJ. Für die Arbeiten sind folglich PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 notwendig.

Die Berechnungen sind in der Übersicht Tabelle A 5-12 in Form der Arbeitsschritte dargestellt.

Tabelle A 5-12 Zusammenfassung für das Beispiel Arbeiten an USV-Anlage Arbeitsort 1

Arbeitsort	Arbeiten an Wechselrichter	Erstellt von:	M. Mustermann
Arbeitsauftrag	USV-Anlage 200 kVA	Datum:	29.11.2019
Rechnung		Kenngroße	Resultat
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400V
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	30 mm
Kurzschlussstromberechnung	Dauerkurzschlussstrom	I_{kDC}	4,0 kA
	Zeitkonstante τ	τ	0,002 s
Strombegrenzung		k_B	0,677
Lichtbogenstrom (Fehlerstrom)	$I_{kLB(i+1)} = \frac{U_{Nn}}{(34 + 0,532 \cdot d) + \frac{U_{Nn}}{I_{kLB(i)}^{0,88}}} + \frac{U_{Nn}}{I_{kDC}}$	$I_{kLB} =$	2,76 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	1,000 s
Kurzschlussleistung	$P_k = U_{Nn} \cdot I_{kDC}$	$P_k =$	1,6 MW
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{kLB}$	$P_{LB} =$	0,36 MW
Bezogene LB-Leistung	$k_p = P_{LB} / P_k$	$k_p =$	0,219
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_k$	$W_{LB} =$	357,46 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC2} =$	320 kJ
		$W_{LBP_APC1} =$	168 kJ
Transmissionsfaktor		k_T	1,5
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC2} =$	480 kJ
		$W_{LBS_APC1} =$	252 kJ
Vergleich		$W_{LB} < W_{LBS_APC2}$	JA
		$W_{LB} < W_{LBS_APC1}$	NEIN
Ergebnis Rechnung:			APC 2

A 5.8.2 Arbeiten im Bereich des Wechselrichters (DC-Zwischenkreis, Arbeitsort 2)

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Am Fehlerort ist von einem Leiterabstand von $d = 20$ mm auszugehen, woraus sich ein Strombegrenzungsfaktor von $k_B = 0,710$ und ein tatsächlicher Fehlerstrom (Lichtbogenkurzschlussstrom) $I_{kLB} = 2,9$ kA ergibt. Da der Fehler im Schutzbereich der Sicherung entsteht, wird er durch die Sicherung ausgeschaltet. Ausgehend vom Datenblatt des Herstellers ergibt sich für die Sicherung NH gR Bat 500 A für den Fehlerstrom von 2,9 kA eine Ausschaltzeit von $t_k = 210$ ms aus (siehe Abb. A 5-24).

Aus der Iterationsrechnung ergibt sich für die Lichtbogenleistung $P_{LB} = 337$ kW, was einer bezogenen Lichtbogenleistung von $k_P = 0,206$ entspricht. Mit der Kurzschlussdauer von $t_k = 210$ ms resultiert daraus ein Erwartungswert für die am Arbeitsort (Fehlerort) umgesetzte Lichtbogenleistung von $W_{LB} = 70,7$ kJ.

Rechnet man die Lichtbogenleistung aus der Worst-Case-Abschätzung (ohne Berücksichtigung eines Elektrodenabstandes) über die Beziehung $P_{LB} = 0,25 P_K$ mit den Netzkenntgrößen Netzspannung und prospektiver Kurzschlussstrom und der Kurzschlussleistung $P_K = U_N \cdot I_{kDC}$ aus, so folgt $P_{LBmax} = 0,25 \cdot 1,634$ MVA = 408,5 kW. Für den Erwartungswert der Lichtbogenenergie ergibt sich dann $W_{LBmax} = 85,8$ kJ.

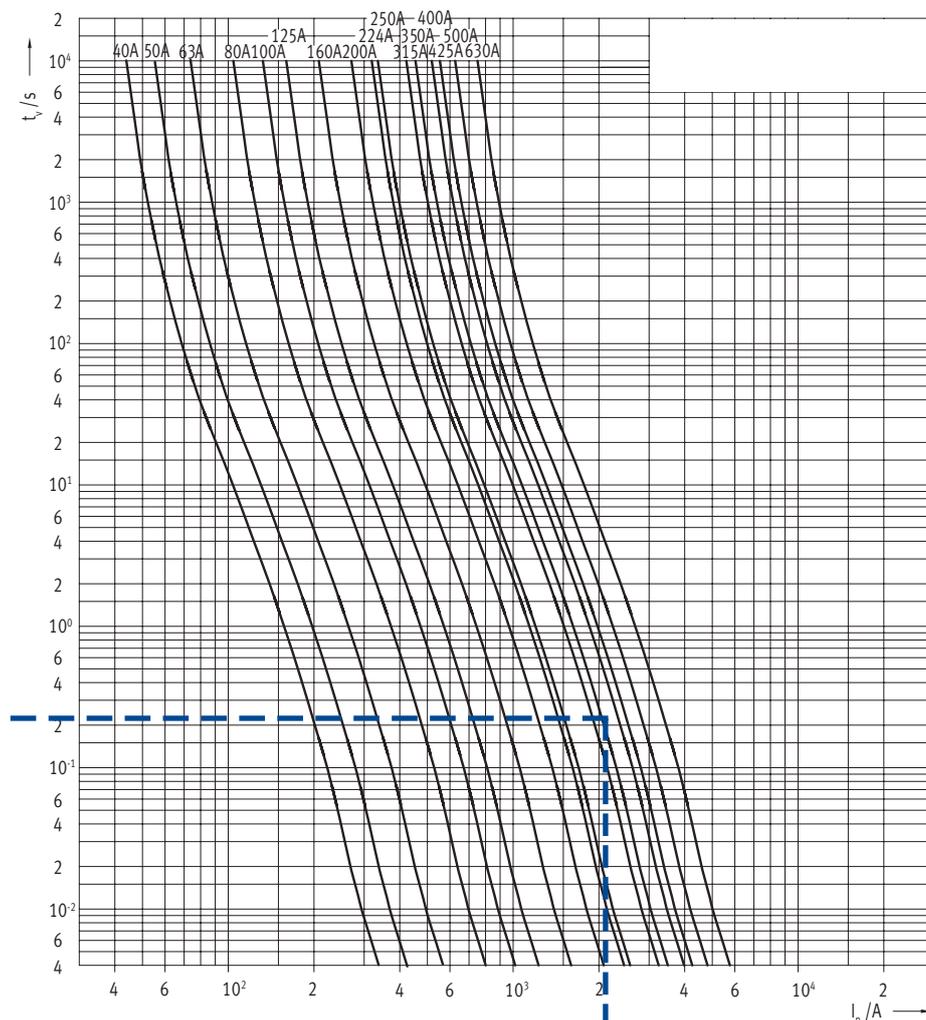


Abb. A 5-24 Mittlere Zeit-Strom-Kennlinien der betrachteten Sicherungen NH gR Bat

Der Schutzpegel der PSAgS wird aus den Prüfpegeln der Lichtbogenenergie unter Berücksichtigung der Transmissionsverhältnisse und des Arbeitsabstandes a ermittelt. Geht man hier von den Standardbedingungen eines kleinräumigen Anlagenvolumens (mit Seiten- und Rückwänden), was einem Transmissionsfaktor von $k_T = 1,0$ entspricht, und einem Abstand von $a = 300$ mm aus, so ist der Schutzpegel W_{LBS} mit dem Prüfpegel W_{LBP} identisch. Der Schutzpegel beträgt unter diesen Bedingungen für PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 $W_{LBP} = 168$ kJ, so dass Arbeiten am betrachteten Arbeitsort mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 ausgeführt werden können.

Im Falle abweichender Anlagenbedingungen würden sich größere Werte für den Transmissionsfaktor und für den Arbeitsabstand ergeben, sodass der Schutzpegel gemäß $W_{LBS} = k_T \cdot (a / 300 \text{ mm})^2 \cdot W_{LBP}$ ebenfalls höhere Pegel besitzt. Die Arbeiten sind folglich auch für diese Verhältnisse mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 möglich.

Die Berechnungen sind in der Übersicht Tabelle 5-13 in Form der Arbeitsschritte dargestellt.

Tabelle A 5-13 Zusammenfassung für das Beispiel Arbeiten an USV-Anlage Arbeitsort 2

Arbeitsort	Arbeiten an Batterieanlage	Erstellt von:	M. Mustermann
Arbeitsauftrag	USV-Anlage 200 kVA	Datum:	29.11.2019

Rechnung		Kenngroße	Resultat
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	400 V
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	20 mm
Kurzschlussstromberechnung	Dauerkurzschlussstrom	I_{kDC}	4,09 kA
	Zeitkonstante τ	τ	0,002 s
Strombegrenzung		k_B	0,71
Lichtbogenstrom (Fehlerstrom)	$I_{kLB (i+1)} = \frac{U_{Nn}}{(34 + 0,532 \cdot d) \cdot \frac{I_{kLB (i)}^{0,88}}{I_{kDC}} + \frac{U_{Nn}}{I_{kDC}}}$	$I_{kLB} =$	2,90 kA
Abschaltzeit der Überstromsicherung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,210 s
Kurzschlussleistung	$P_k = U_{Nn} \cdot I_{kDC}$	$P_k =$	1,6 MW
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{kLB}$	$P_{LB} =$	0,34 MW
Bezogene LB-Leistung	$k_p = P_{LB} / P_k$	$k_p =$	0,206
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_k$	$W_{LB} =$	70,72 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ
Transmissionsfaktor		k_T	1,0
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	320 kJ
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	168 kJ

Vergleich	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA
	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	JA

Ergebnis Rechnung:	APC 1
---------------------------	--------------

A 5.9 Beispiel 5.9: Arbeiten an DC-Anlagen (Bahnnetz)

Arbeiten in einem Gleichrichter-Unterwerk im Abgang nach dem Speise-Leistungsschalter

In dem DC-Versorgungssystem wird jeder Fahrleitungsabschnitt aus einer Parallelschaltung versorgt (siehe Abb. A 5-25). Es sind Arbeiten im Abgang in einem Unterwerk A vorgesehen. Das Unterwerk wird demnach zweiseitig gespeist: über die Speiseleitung SL A sowie mit der Leitung SL B über das Unterwerk B und die Fahrleitung FL.

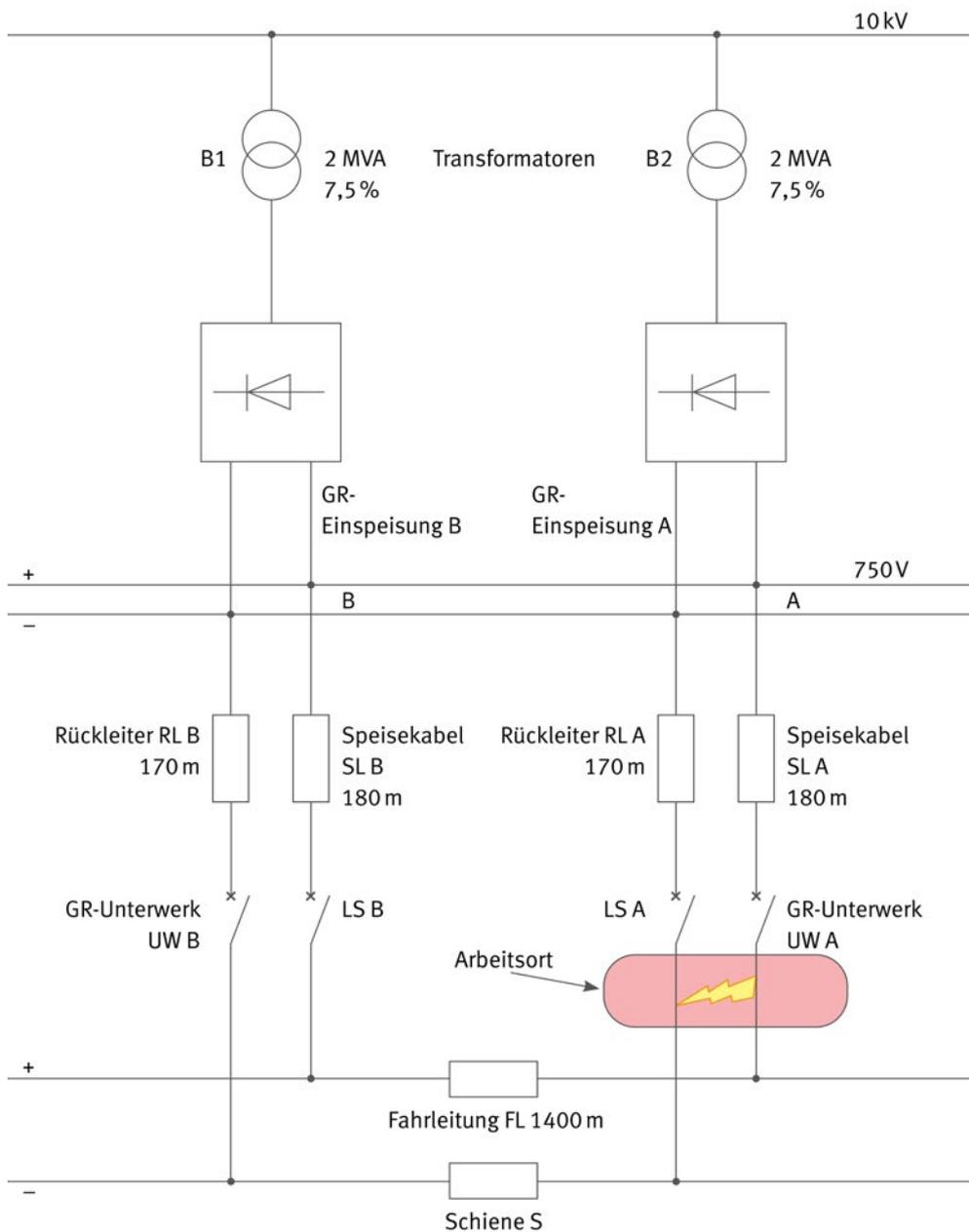


Abb. A 5-25 Ersatzschaltbild Arbeitsort DC-Bahnstromversorgung

Gefährdungsbeurteilung der geplanten Tätigkeit

Phase 1: Besteht prinzipiell die Gefahr der Störlichtbogenexposition von Personen?

- Ja.
- Bei Arbeiten Bereich der Unterwerke A oder B kann ein Störlichtbogen nicht ausgeschlossen werden.

Phase 2: Erste Bewertung der Störlichtbogenenergie des Tätigkeits- bzw. Arbeitsplatzbereichs. Ist eine Berechnung erforderlich?

- Ja.
- Keine der in Kapitel 1 aufgezählten Bedingungen, in denen auf eine PSAgS verzichtet werden kann, ist erfüllt.

Phase 3: Berechnungsverfahren anwenden: W_{LB} , W_{LBS} ermitteln!

Betrachtet wird das arbeitsbedingte Einleiten eines Kurzschlusses im Abgangsbereich des UW A hinter dem Speiseschalter LS A. Bei beidseitiger Einspeisung entsteht ein Fehlerstromkreis, der über die Parallelschaltung des Zweiges mit Speiseleitung SL A und Leistungsschalter LS A und des Zweiges mit Speiseleitung SL B, Unterwerk B mit Leistungsschalter LS B, die Fahrleitung FL, die Fehlerstelle im UW A und die Parallelschaltung des Zweiges aus Rückleitung RL A des UW A und des Zweiges mit Rückleitung RL B des UW B und der Bahnschiene S führt.

Für Arbeiten im Unterwerk wird zunächst ein geeigneter Schaltzustand hergestellt, indem eine einseitige Einspeisung gewählt wird. In den Parallelschaltungen besitzen die Zweige mit Speiseleitung SL A und mit Rückleitung RL A des UW A jeweils den geringeren Widerstand. Vor Beginn der Arbeiten wird deshalb der Speiseschalter im UW A ausgeschaltet. Die Höhe des Stroms bei Kurzschluss wird damit herabgesetzt, so dass im Fehlerfall eine geringere Leistung und Energie in einem Störlichtbogen umgesetzt werden.

Die Speisung der Fehlerstelle am Arbeitsort wird dann bei Entstehen eines Kurzschlusses nur noch über das UW B vorgenommen (Kurzschlussstromkreis über Speiseleitung SL B, geschlossenen Leistungsschalter LS B und Fahrleitung FL, Fehlerort, Schiene S und Rückleitung RL B. Die Ausschaltung des Fehlers erfolgt durch den Leistungsschalter LS B im Unterwerk UW B.

Für den genannten Arbeits- bzw. Fehlerort ist ein prospektiver Kurzschlussstrom von $I_{kDC} = 6,54$ kA bei einer Netzspannung von 807 V ermittelt worden, was auch durch einen durchgeführten Kurzschlussversuch messtechnisch bestätigt wurde. Am Fehlerort ist von einem Leiterabstand von $d = 30$ mm auszugehen, woraus sich ein Strombegrenzungsfaktor von $k_B = 0,826$ und ein tatsächlicher Fehlerstrom (Lichtbogenkurzschlussstrom) $I_{kLB} = 5,4$ kA ergibt. Der Leistungsschalter LS B im UW B (Einstellung statischer Auslöser 5 kA) schaltet den Fehlerstromkreis in der Kurzschlussdauer $t_k = 100$ ms aus (bei einem di/dt-Schutz schaltet der Leistungsschalter im Allgemeinen noch schneller aus).

Aus der Iterationsrechnung ergibt sich für die Lichtbogenleistung $P_{LB} = 760$ kW, was einer bezogenen Lichtbogenleistung von $k_p = 0,143$ entspricht. Mit der Kurzschlussdauer von $t_k = 100$ ms resultiert daraus ein Erwartungswert für die am Arbeitsort (Fehlerort) umgesetzte Lichtbogenenergie von $W_{LB} = 75,7$ kJ.

Rechnet man die Lichtbogenleistung aus der Worst-Case-Abschätzung (ohne Berücksichtigung eines Elektrodenabstandes) über die Beziehung $P_{LB} = 0,25 P_K$ mit den Netzkenngrößen Netzspannung und prospektiver Kurzschlussstrom und der Kurzschlussleistung $P_K = U_N \cdot I_{kDC}$ aus, so folgt $P_{LBmax} = 0,25 \cdot 5,3 \text{ MVA} = 1,325 \text{ MW}$. Für den Erwartungswert der Lichtbogenenergie ergibt sich dann $W_{LBmax} = 133 \text{ kJ}$.

Der Schutzpegel der PSAgS wird aus den Prüfpegeln der Lichtbogenenergie unter Berücksichtigung der Transmissionsverhältnisse und des Arbeitsabstandes a ermittelt. Geht man hier von den Standardbedingungen eines kleinräumigen Anlagenvolumens (mit Seiten- und Rückwänden), was einem Transmissionsfaktor von $k_T = 1,0$ entspricht, und einem Abstand von $a = 300 \text{ mm}$ aus, so ist der Schutzpegel W_{LBS} mit dem Prüfpegel W_{LBP} identisch. Der Schutzpegel beträgt unter diesen Bedingungen für PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 $W_{LBP} = 168 \text{ kJ}$, so dass Arbeiten am betrachteten Arbeitsort mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 ausgeführt werden können.

Im Falle abweichender Anlagenbedingungen würden sich größere Werte für den Transmissionsfaktor und für den Arbeitsabstand ergeben, sodass der Schutzpegel gemäß $W_{LBS} = k_T \cdot (a / 300 \text{ mm})^2 \cdot W_{LBP}$ ebenfalls höhere Pegel besitzt. Die Arbeiten sind folglich auch für diese Verhältnisse mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 möglich.

Die Berechnungen sind in der Übersicht Tabelle A 5-14 in Form der Arbeitsschritte dargestellt.

Tabelle A 5-14 Zusammenfassung für das Beispiel Arbeiten im Abgangsbereich eines GR-Unterwerkes der Bahnstromversorgung

Arbeitsort	GR-Unterwerk A Abgangsbereich	Erstellt von:	M. Mustermann
Arbeitsauftrag	Reinigungsarbeiten	Datum:	29.11.2019

Rechnung		Kenngröße	Resultat
Netzparameter	Nennspannung	U_{Nn}	807 V
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d	30 mm
Kurzschlussstromberechnung	Dauerkurzschlussstrom	I_{kDC}	6,54 kA
	Zeitkonstante τ	τ	0,030 s
Strombegrenzung		k_B	0,826
Lichtbogenstrom (Fehlerstrom)	$I_{kLB (i+1)} = \frac{U_{Nn}}{(34 + 0,532 \cdot d) \cdot \frac{I_{kLB (i)}^{0,88}}{I_{kDC}} + I_{kDC}}$	$I_{kLB} =$	5,40 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalters / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k	0,100 s
Kurzschlussleistung	$P_k = U_{Nn} \cdot I_{kDC}$	$P_k =$	5,3 MW
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{kLB}$	$P_{LB} =$	0,76 MW
Bezogene LB-Leistung	$k_p = P_{LB} / P_k$	$k_p =$	0,143
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_k$	$W_{LB} =$	75,71 kJ
Arbeitsabstand		a	300 mm
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP_APC\ 2} =$	320 kJ
		$W_{LBP_APC\ 1} =$	168 kJ
Transmissionsfaktor		k_T	1,0
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	320 kJ
		$W_{LBS_APC\ 1} =$	168 kJ

Vergleich	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA
	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	JA

Ergebnis Rechnung:	APC 1
---------------------------	--------------

Anhang 6

Beispielhafte Arbeitsorte zur Festlegung des Transmissionsfaktors k_T



Abb. A 6-1 Arbeiten am Hausanschlusskasten: $k_T = 1,0$



Abb. A 6-2 Wechsel einer Sicherungsleiste im Schaltschrank (nahe der Seitenwand): $k_T = 1,0$



Abb. A 6-3 Arbeiten am Kabelverteilerschrank: $k_T = 1,5$



Abb. A 6-4 Arbeiten an einer Kompaktstation: $k_T = 1,7$



Abb. A 6-5 Muffenmontage: $k_T = 1,9$



Abb. A 6-6 Arbeiten auf dem Mast: $k_T = 2,4$

Anhang 7

Koordination von PSAgS und Vorsicherung

A 7.1 Praktische Anwendungsregeln zur koordinierten Wahl von PSAgS und Vorsicherung

Nachfolgend sind Anwendungsregeln für einen koordinierten Einsatz von PSAgS in Verbindung mit Kurzschlusschutzeinrichtungen in Form von Schmelzsicherungen für den Niederspannungsbereich in AC-Systemen dargestellt.

Die Anwendungsregeln sind für 400-V-Anlagen (Drehstromsystem) und Standardexpositionsbedingungen gültig:

Arbeitsabstand: $a = 300 \text{ mm}$

Transmissionsfaktor: $k_T = 1$ (kleines Anlagenvolumen).

Anwendungsregeln existieren in 3 verschiedenen Formen, die optional genutzt werden können:

A1: Auswahlmatrix

A2: Mindestüberstromfaktor

A3: Zulässige Ausschaltzeit der NH-Sicherung.

Sie unterscheiden sich im Vereinfachungsgrad, der Genauigkeit und der Art der manuellen Handhabung. Betrachtungen sind getrennt für dreipolige und für zweipolige Kurzschlüsse (Lichtbogenfehler) möglich.

Als Ausgangsgröße dient jeweils lediglich der prospektive, vom Störlichtbogen unbeeinflusste Kurzschlussstrom (metallischer Kurzschluss), der aus der Kurzschlussstromberechnung resultiert; es ist der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom $I''_{k,max}$ anzusetzen¹.

A 7.2 Auswahlmatrix

Die nachfolgenden Auswahldiagramme gelten für unterschiedliche Betriebsklassen von NH-Sicherungen für zweipolige und dreipolige Kurzschlüsse:

- Abb. A 7-1 ... A 7-4 Sicherungen für den Leitungsschutz, Betriebsklasse NH gG
- Abb. A 7-5 ... A 7-6 Sicherungen für den Transformatorschutz, Betriebsklasse NH gTr
- Abb. A 7.7 für Arbeitsschutzsicherungen (Betriebsklasse aR, gR, ...).

Die Auswahl oder Überprüfung der Sicherung erfolgt anhand der Zuordnung von Sicherungsbemessungsströmen und Kurzschlussstrombereichen in Matrixform (Bedingung: Standardexpositionsbedingungen). Es kann jeweils der kleinste Wert des zulässigen Kurzschlussstroms (Mindestkurzschlussstroms) abgelesen werden, der erforderlich ist, um mit einer bestimmten Sicherung Schutz mit der betreffenden PSAgS zu erreichen. Zulässige Bedingungen (Schutz gewährleistet) sind jeweils „grün“ gekennzeichnet; rote Felder zeigen dagegen unzulässige Verhältnisse (Schutz besteht nicht) an.

Generell ist anzumerken, dass Personenschutz (Verhinderung von Hautverbrennungen) unter Standardexpositionsbedingungen bei Kurzschlussströmen unter 1 kA unabhängig vom Bemessungsstrom als gegeben angesehen werden kann.

¹ die tatsächlich fließenden Lichtbogenkurzschlussströme besitzen kleinere Werte.

A 7.3 Leitungsschutzsicherungen

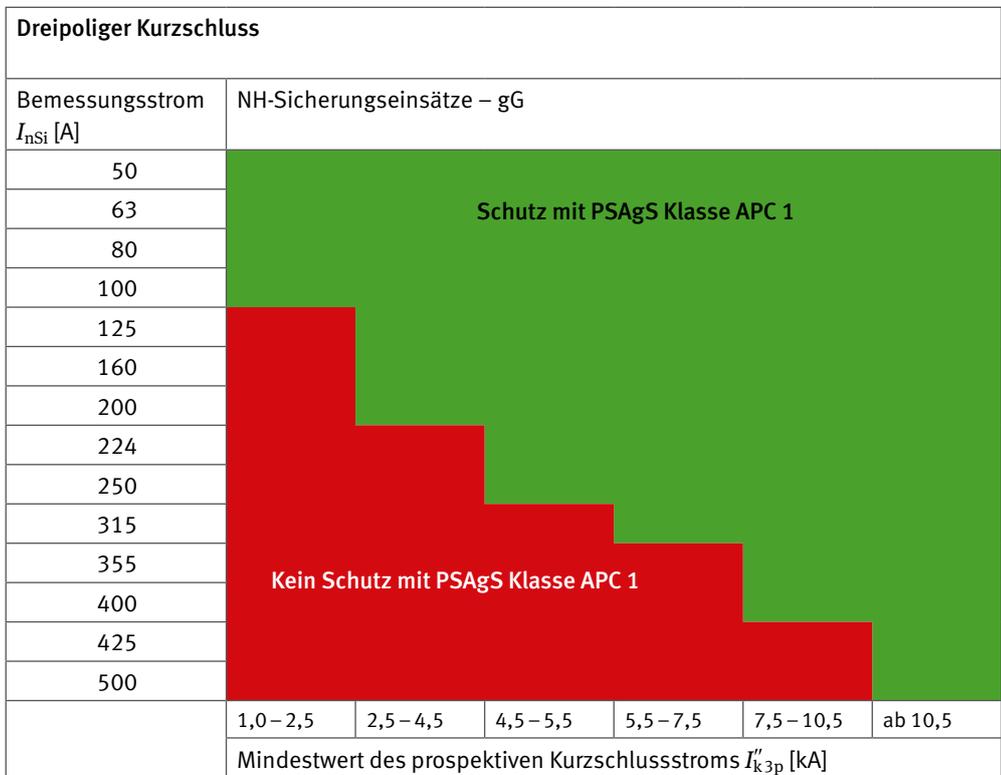


Abb. A 7-1
Auswahl NH gG-Sicherungen mit PSAgS-Störlichtbogen-schutzklasse APC 1 für dreipolige Kurzschlüsse

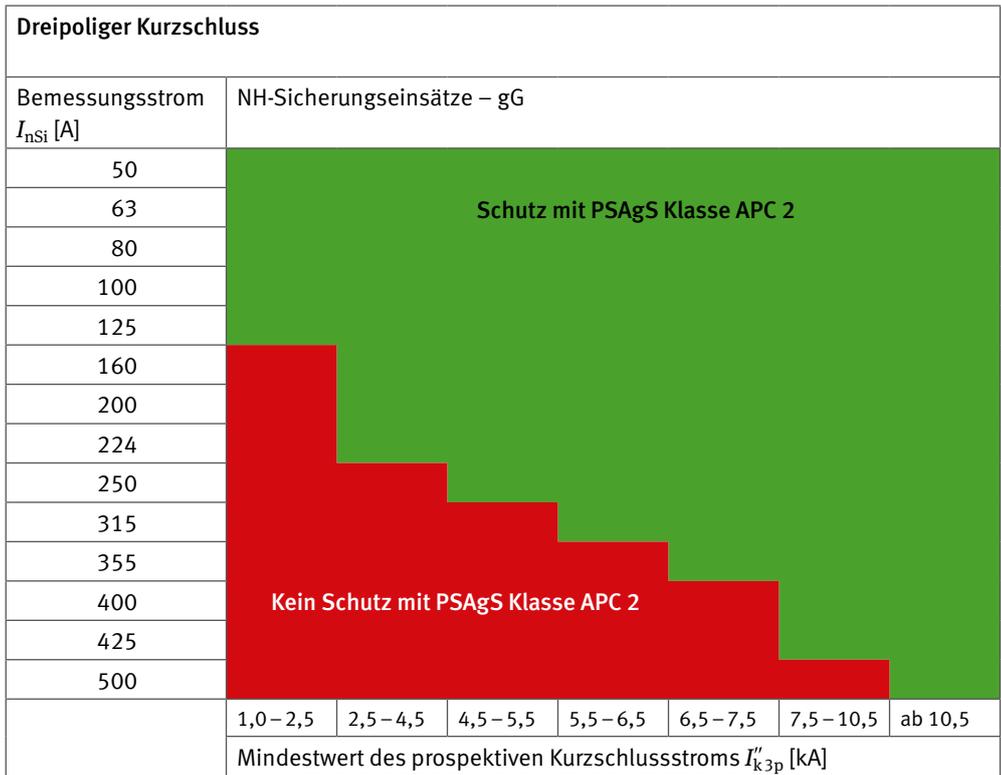


Abb. A 7-2
Auswahl NH gG-Sicherungen mit PSAgS-Störlichtbogen-schutzklasse APC 2 für dreipolige Kurzschlüsse

Zweipoliger Kurzschluss												
Bemessungsstrom von gG-Sicherungen												
Bemessungsstrom I_{nSi} [A]	NH-Sicherungseinsätze – gG											
50												
63												
80												
100												
125												
160												
200												
224												
250												
315												
355												
400												
425												
500												
							1,0 – 2,5	2,5 – 4,5	4,5 – 5,5	5,5 – 6,5	6,5 – 10,5	ab 10,5
							Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms I''_{k2p} [kA]					

Abb. A 7-3
Auswahl NH gG-Sicherungen mit PSAgS-Störlichtbogen-schutzklasse APC 1 für zweipolige Kurzschlüsse

Zweipoliger Kurzschluss												
Bemessungsstrom von gG-Sicherungen												
Bemessungsstrom I_{nSi} [A]	NH-Sicherungseinsätze – gG											
50												
63												
80												
100												
125												
160												
200												
224												
250												
315												
355												
400												
425												
500												
							1,0 – 2,5	2,5 – 4,5	4,5 – 5,5	5,5 – 6,5	6,5 – 10,5	ab 10,5
							Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms I''_{k2p} [kA]					

Abb. A 7-4
Auswahl NH gG-Sicherungen mit PSAgS-Störlichtbogen-schutzklasse APC 2 für zweipolige Kurzschlüsse

Beispiel für Leitungsschutzsicherungen NH gG:

Der prospektive dreipolige Kurzschlussstrom beträgt 3,614 kA. Der Bereich von 2,5 ... 4,5 kA ist zutreffend; gemäß Abb. A 7-1 bietet PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 1 Schutz mit Sicherungen mit Bemessungsströmen von bis zu maximal 200 A. Liegt eine Sicherung 224 A vor, dann besteht mit PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 1 kein Schutz mehr (gemäß Abb. A 7-2 ist Schutz dann mit PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 2 gegeben).

A 7.4 Transformatorschutzsicherungen

Bei dreipoligen Kurzschlüssen (unter Standardexpositionsbedingungen):

- Schutz ist bei gTr-Sicherungen ≤ 250 kVA (361A) nur gewährleistet
 - durch PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 2 und
 - wenn der Kurzschlussstrom mindestens 7 kA beträgt.
- Schutz kann bei gTr-Sicherungen > 250 kVA (361 A) weder durch PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 1 noch durch PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 2 erreicht werden.

Für zweipolige Kurzschlüsse gelten die Aussagen in Abb. A 7-5 und Abb. A 7-6.

Zweipoliger Kurzschluss	
Bemessungsstrom von gTr-Sicherungen	
Scheinleistung S_n [kVA] (I_{rat} [A])	NH-Sicherungseinsätze – gTr
250 (361)	Schutz mit PSaGS Klasse APC 1
315 (455)	Schutz mit PSaGS Klasse APC 1
400 (577)	Kein Schutz mit PSaGS Klasse APC 1
	4,5 – 10,5 ab 10,5
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms I''_{k2p} [kA]

Abb. A 7-5
Auswahl NH gTr-Sicherungen mit PSaGS-Störlichtbogenschutzklasse APC 1 für zweipolige Kurzschlüsse

Zweipoliger Kurzschluss	
Bemessungsstrom von gTr-Sicherungen	
Scheinleistung S_n [kVA] (I_{rat} [A])	NH-Sicherungseinsätze – gTr
250 (361)	Schutz mit PSaGS Klasse 2
315 (455)	Schutz mit PSaGS Klasse 2
400 (577)	Kein Schutz mit PSaGS Klasse 2
	4,5 – 7,5 ab 7,5
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms I''_{k2p} [kA]

Abb. A 7-6
Auswahl NH gTr-Sicherungen mit PSaGS-Störlichtbogenschutzklasse APC 2 für zweipolige Kurzschlüsse

A 7.5 Arbeitsschutzsicherungen

Die Grenzen für die Bedingungen, unter denen Schutz durch PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 und PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 sowohl bei dreipoligen als auch bei zweipoligen Kurzschlüssen besteht, sind identisch. Das bedeutet, dass in den zulässigen Bereichen PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 ausreichend schützt und sich durch PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 2 keine Erweiterung der Anwendungsbereiche ergibt. Das Auswahldiagramm ist sowohl für zweipolige als auch dreipolige Kurzschlüsse zutreffend. Es ist hierbei anzumerken, dass sich die

Kurzschlussströme für ein- und dieselbe Anlage bei dreipoligem und zweipoligen Kurzschluss in der Höhe um den Faktor $2/\sqrt{3} \approx 1,155$ unterscheiden.

Dreipoliger Kurzschluss / Zweipoliger Kurzschluss			
Bemessungsstrom I_{nSi} [A]	NH-Sicherungseinsätze – Arbeitsschutz		
160	Schutz mit PSaGS Klasse APC 1 (und PSaGS-Klasse APC 2)		
200			
250			
315			
355			
400	Kein Schutz mit PSaGS Klasse APC 1 und PSaGS Klasse APC 2		
500			
	1,0 – 2,5	2,5 – 4,5	ab 4,5
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms I''_{k2p} [kA]		
	Mindestwert des prospektiven Kurzschlussstroms I''_{k3p} [kA]		

Abb. A 7-7
Auswahl NH Arbeitsschutz-
Sicherungen mit
PSaGS-Störllichtbogenschutz-
klasse APC 1 und APC 2 für
zweipolige und dreipolige
Kurzschlüsse

A 7.6 Mindestüberstromfaktor

Tabelle A 7-1 Mindestüberstromfaktor

NH-Sicherung Betriebsklasse	PSaGS Störllichtbogen- schutzklasse	Mindestüberstromfaktor $k_{Ü,min}$	
		Zweipoliger Kurzschluss	Dreipoliger Kurzschluss
gG	APC 1	20	
	APC 2	18	19
gTr	APC 1	28	
	APC 2	25	
Arbeitsschutz	APC 1	6	8
	APC 2		

Mit Hilfe des Mindestüberstromfaktors $k_{Ü,min}$ und des prospektiven Kurzschlussstromes I''_k lässt sich für Standardexpositionsbedingungen eine sehr grobe Bestimmung des (maximal) zulässigen Bemessungsstroms $I_{nSi,max}$ der Versicherung vornehmen, die in Verbindung mit PSaGS zu Personenschutz führt:

$$I_{nSi,max} = \frac{I''_k}{k_{Ü,min}}$$

mit

$I_{nSi,max}$ Maximalwert des Sicherungs Bemessungsstroms in A

I''_k prospektiver Kurzschlussstrom (2-polig oder 3-polig) in A

$k_{Ü,min}$ Mindestüberstromfaktor

Der Bemessungsstrom der Versicherung darf diesen Wert nicht übersteigen, dann ist der Personenschutz durch die PSaGS der betreffenden Störllichtbogenschutzklasse gegeben.

Beispiel:

Bei einem prospektiven Kurzschlussstrom von $I''_{k3p} = 5,472$ kA ergibt sich für die Einhaltung des Personenschutzes durch PSaGS Störlichtbogenschutzklasse APC 1 für den Einsatz von gG-NH-Sicherungen ein Maximalwert für den zulässigen Bemessungsstrom von

$$I_{nSi,max} = \frac{I''_{k3p}}{k_{Ü,min}} = \frac{5472}{20} = 273,6 \text{ A}$$

Es ist eine Sicherung mit $I_{nSi} \leq 273,6$ A auszuwählen; die größtmögliche Sicherung ist folglich NH gG 250 A.

A 7.7 Zulässige Ausschaltzeit der Sicherung

Für Standardexpositionsbedingungen wird anhand des prospektiven Kurzschlussstroms mit Hilfe des Kennlinienfaktors f_{KL} (siehe Tabelle A 7-2) die zulässige Ausschaltzeit t_{kzul} der Sicherung.

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

mit

t_{kzul} zulässige Ausschaltzeit in s

f_{KL} Kennlinienfaktor in As

I''_k zweipoliger oder dreipoliger Kurzschlussstrom in A

a Arbeitsabstand in mm

k_T Transmissionsfaktor

bestimmt.

Tabelle A 7-2 Kennlinienfaktor von Sicherungseinsätzen

Kennlinienfaktor f_{KL} in As		
PSaGS Störlichtbogenschutzklasse	Zweipolige Kurzschlüsse	Dreipolige Kurzschlüsse
APC 1	1000	500
APC 2	2000	1000

Beispiel:

Unter der Voraussetzung eines zweipoligen Kurzschlusses, bei dem der Kurzschlussstrom 5 kA beträgt, ergibt sich bei PSaGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 für die zulässige Ausschaltzeit der Sicherung $t_{kzul} = 1000 \text{ A s} / 5000 \text{ A} = 0,2 \text{ s} = 200 \text{ ms}$.

Die Sicherung ist so zu wählen, dass ihre Ausschaltzeit 200 ms nicht übersteigt².

Weitere Informationen zur Koordination von PSaGS und Vorsicherungen können [22] entnommen werden.

² Zur praktischen Anwendung ist der Vergleich der zulässigen Ausschaltzeit mit der zu erwartenden Ausschaltzeit der ausgewählten bzw. vorhandenen NH-Sicherung vorzunehmen. Die zu erwartende Ausschaltzeit ist anhand des tatsächlichen Fehlerstroms (Lichtbogenkurzschlussstrom, nicht prospektiver Kurzschlussstrom, siehe 4 bzw. Anhang 3) aus der Strom-Zeit-Kennlinie des Herstellers der Sicherung zu bestimmen.

Anhang 8

Formular zur Auswahlhilfe

Unter der Internetadresse www.dguv.de; Webcode: d1183022 werden zwei Excel-Dateien zur Unterstützung der Gefährdungsbeurteilung zum Download zur Verfügung gestellt. Nachfolgend sind die einzelnen Reiter der beiden Dateien dargestellt.



Formular zur Berechnung der PSA-Störlichtbogenklasse

		AC
Arbeitsort:	NS-Verteilung	Bearbeiter: M. Mustermann
Arbeitsauftrag:	An-/Abklemmen von Abgängen; Reinigungsarbeiten; Messen und Prüfen	Datum: 29.11.19
Netzspannung:	400 V	
Max. Kurzschlußstrom:	24,50 kA	
Min. Kurzschlußstrom:	21,60 kA	
Leiterabstand:	60,0 mm	
Verhältnis R/X: <small>(Abschnitt 4.2.2)</small>	0,27	Begründung: keine
Strombegrenzungsfaktor k_B : <small>(Abschnitt 4.2.2)</small>	0,50	Begründung: keine
Schutzorgan:	Sicherungen gTr AC 400 V (...Hersteller...)	
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung t_k :	0,113 s	Hinweis: Einstellwert des Leistungsschalter / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie
Transmissionsfaktor k_T : <small>(Abschnitt 4.2.3)</small>	1,50	Begründung: keine
Abstand der Person zum Lichtbogenentstehungsort a:	300 mm	
Ergebnis:	Freischalten oder weitere Maßnahmen ergreifen	Risikobewertung durchführen
<p>Folgende Maßnahmen würden ein Arbeiten ermöglichen:</p> <p>Verringerung der Abschaltzeit des vorgelagerten Schutzorgans auf $< 0,041$ s für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 oder auf $< 0,079$ s für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2.</p> <p>Vergrößerung des Arbeitsabstandes auf ≥ 497 mm für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 oder auf ≥ 360 mm für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2.</p>		

Abb. A 8-1 Eingabeformular zur Berechnung (AC)

Rechnung AC		Kenngröße	Resultat
Netzparameter	Netzspannung	U_{hn}	400,0 V
	Leiterabstand	d	60 mm
Berechnung	max. Kurzschlussstrom	$I_{k3, max}^*$	24,5 kA
	min. Kurzschlussstrom	$I_{k3, min}^*$	21,6 kA
	Verhältnis R/X	R/X	0,27
Strombegrenzung nach [1]		k_B	0,500
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B \cdot I_{k3, min}^*$	I_{kLB}	10,80 kA
Kennlinie NH-Sicherung (Bild 5)		t_k	0,113 s
Kurzschlussleistung	$S_k^* = \sqrt{3} \cdot U_{hn} \cdot I_{k3, max}^*$	S_k^*	16,97 MVA
Bezogene LB-Leistung [1]	$k_p = 0,29 / (R/X)^{0,17}$	k_p	0,36
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_p \cdot S_k^*$	P_{LB}	6,1 MW
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_p \cdot S_k^* \cdot t_k$ (Annahme: $k_p = k_{pmax}$)	W_{LB}	690,3 kJ
Lichtbogenschutzklassen der Kleidung (gemäß Box-Test-Parameter)		$W_{LBP, APC 2}$	320,0 kJ
		$W_{LBP, APC 1}$	168,0 kJ
Anlagenparameter	Transmissionsfaktor	k_T	1,5
Arbeitsverfahren	Abstand Person zu Lichtbogenentstehungsort	a	300 mm
Schutzpegel der Kleidung am Lichtbogenort (Hochrechnung der Boxtestparameter auf den Lichtbogenort)	$W_{LBS} = k_T \cdot (a/300 \text{ mm})^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS, APC 2}$	480,0 kJ
		$W_{LBS, APC 1}$	252,0 kJ
Hochrechnung max. Abschaltzeit für Klasse APC 2		$t_{k, APC 2}$	0,079 s
		Hochrechnung max. Abschaltzeit für Klasse APC 1	
		$t_{k, APC 1}$	0,041 s
		Hochrechnung min. Abstand für Klasse APC 2	
		$a_{APC 2}$	360 mm
		Hochrechnung min. Abstand für Klasse APC 1	
		$a_{APC 1}$	497 mm
Verhältnis	Verhältnis W_{LB} / W_{LBS} für Klasse APC 2	$W_{LB} / W_{LBS, APC 2}$	1,44
	Verhältnis W_{LB} / W_{LBS} für Klasse APC 1	$W_{LB} / W_{LBS, APC 1}$	2,74

AC

Risikobewertung durchführen
 Freischalten oder weitere Maßnahmen ergreifen
 Folgende Maßnahmen würden ein Arbeiten ermöglichen:
 Verringerung der Abschaltzeit des vorgelagerten Schutzorgans auf < 0,041 s für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 oder auf < 0,079 s für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2.
 Vergrößerung des Arbeitsabstandes auf ≥ 497 mm für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 1 oder auf ≥ 360 mm für PSAGS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2.

Abb. A 8-2 Darstellung der einzelnen Berechnungsergebnisse (AC)

Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung durch Störlichtbogen						AC	
Beurteilungsschema							
Bearbeiter: M. Mustermann Ort / Art der Tätigkeit: NS-Verteilung / An-/Abklemmen von Abgängen; Reinigungsarbeiten; Messen und Prüfen		Klasse: APC 2		Datum: 29.11.19		Einfluss führt zu Verletzungswahrscheinlichkeit (0 = praktisch unmöglich, 2 = denkbar, aber sehr unwahrscheinlich, 4 = unwahrscheinlich, 7 = selten, 10 = gelegentlich bis häufig) Erläuterung: Lichtbogenpotenzial: 1. Abmanteln Hauptkabel, 2. Fehler (Kurzschluss) auf Abzweig Erläuterung: Einsatz Abmantelungsgerät (alternativ: Kabelmesser mit nicht leitfähiger Schneide) Erläuterung: AuS-NS-Richtlinie/AuS-NS-Arbeitsanweisung: Prüfung auf Fehlerfreiheit des Abzweigkabels z. B. durch Isolationsprüfung Erläuterung: AuS-NS-Spezialausbildung, Einsatz PSAGS APC 2 Erläuterung: SLB-Verletzungen bei Einsatz von PSAGS nicht bekannt, Ausbildung mehrpoliger SLB nur sehr eingeschränkt/kaum möglich Erläuterung: Tragekomfort PSAGS APC 2 ggf. eingeschränkt (Gesichtsschutz: Hitzestau, Beschlag), Arbeiten ggf. in Zwangshaltung Ergebnis: Durchführung der Arbeiten mit PSAGS APC 2 auf Basis der getroffenen Bewertungsansätze und gemäß der festgelegten Schutzmaßnahmen zulässig	
a) Art/Zustand der Anlage		4					
b) Technische Maßnahmen		2					
c) Organisatorische Maßnahmen		2					
d) Persönliche Maßnahmen		2					
e) Statistische Einflussfaktoren		4					
f) Ergonomische Einflussfaktoren		2					
Summe Bewertungspunkte:		16,0					
	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung	0 ...	10 ...	20 ...	31 ...		46 ...
Verletzungsschwere W_{LB} / W_{LBS}		Praktisch unmöglich	Denkbar, sehr unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	selten		Gelegentlich bis häufig
0 ...	Leichte Verletzung						
1 ...	Reversible Verletzung		APC 2				
3 ...	Irreversible Verletzung						
10 ...	Tödliche Verletzung						
APC 1		2,7					
APC 2		1,4					

Abb. A 8-3 Eingabeformular zur Beurteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit (AC)

Arbeitsort: NS-Verteilung	Bearbeiter: M. Mustermann
Arbeitsauftrag: An-/Abklemmen von Abgängen; Reinigungsarbeiten; Messen und Prüfen	Datum: 29.11.19

Rechnung		Kenngroße
Netzparameter	Netzspannung	U_{Nn}
Anlagengeometrie	Leiterabstand	d
Kurzschlußstromberechnung	max. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,max}$
	min. Kurzschlussstrom	$I''_{k3,min}$
	Verhältnis R/X	R/X
Strombegrenzung		k_B
Minimaler Fehlerstrom	$I_{kLB} = k_B * I''_{k3,min}$	$I_{kLB} =$
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalter / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)		t_k
Kurzschlussleistung	$S''_k = \sqrt{3} * U_{Nn} * I''_{k3,max}$	$S''_k =$
Bezogene LB-Leistung	$k_P = 0,29 / (R/X)^{0,17}$	$k_P =$
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = k_P * S''_k$	$P_{LB} =$
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = k_P * S''_k * t_k$ (Annahme: $k_P = k_{Pmax}$)	$W_{LB} =$
Arbeitsabstand		a
PSA Normprüfpegel		$W_{LBP,APC 2} =$
		$W_{LBP,APC 1} =$
Transmissionsfaktor		k_T
Schutzpegel der Kleidung am Lichtbogenort (Hochrechnung der Boxtestparameter auf den Lichtbogenort)	$W_{LBS} = k_T * \left(\frac{a}{300\text{ mm}}\right)^2 * W_{LBP}$	$W_{LBS,APC 2} =$
		$W_{LBS,APC 1} =$

Vergleich	$W_{LB} < W_{LBS,APC 2}$
	$W_{LB} < W_{LBS,APC 1}$

Ergebnis Rechnung:	Freischalten oder weitere Maßnahmen ergreifen
Ergebnis Risikobewertung:	Durchführung der Arbeiten mit PSAgS APC 2 auf Basis der getroffenen Bewertungsansätze und gemäß der festgelegten Schutzmaßnahmen zulässig

Begründung zum Verhältnis R/X: keine
Begründung zum Strombegrenzungsfaktor k_B : keine
Begründung zum Transmissionsfaktor k_T : keine
Schutzorgan: Sicherungen gTr AC 400 V (...Hersteller...)

Abb. A 8-4 Ergebnisausdruck (AC)

DC

Arbeitsort:	USV-Anlage 200 kVA	Bearbeiter:	M. Mustermann
Arbeitsauftrag:	Arbeiten an Wechselrichter	Datum:	11.10.19
Netzspannung:	400 V		
Dauerkurzschlussstrom:	4,00 kA		
Leiterabstand:	30,0 mm		
Zeitkonstante $\tau = L/R$:	2 ms	Begründung:	keine
Schutzorgan:	ohne		
Ergebnis Lichtbogenstrom I_{kLB} : (Abschnitt 4.3)	2,71003 kA		
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung t_k :	1,000 s	Hinweis:	Einstellwert des Leistungsschalter / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie mithilfe I_{kLB}
Transmissionsfaktor k_T : (Abschnitt 4.2.3)	1,50	Begründung:	keine
Abstand der Person zum Lichtbogenentstehungsort a:	300 mm		
Ergebnis:	Arbeiten mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 möglich		

Abb. A 8-5 Eingabeformular zur Berechnung (DC)

Rechnung DC		Kenngroße	Resultat
Netzparameter	Netzspannung	U_{NB}	400,0 V
	Leiterabstand	d	30 mm
Berechnung	Dauerkurzschlussstrom	I_{kDC}	4,0 kA
	Zeitkonstante $\tau = L/R$	τ	0,002 s
Lichtbogenstrom (Fehlerstrom)	$I_{kLB}^{(1+1)} = \frac{U_{NB}}{\frac{34 + 0,532 \cdot d}{I_{kLB}^{(0)}} + \frac{U_{NB}}{I_{kDC}}}$	$I_{kLB} =$	2,71 kA
Lichtbogenspannung	$U_{LB} = (34 + 0,532 \cdot d) \cdot I_{kLB}^{1,2}$	$U_{LB} =$	129,0 V
Strombegrenzungsfaktor	$k_B = I_{kLB} / I_{kDC}$	$k_B =$	0,678
Kennlinie NH-Sicherung (Bild 5)		$t_k =$	1,000 s
Kurzschlussleistung	$P_k = U_{NB} \cdot I_{kDC}$	$P_k =$	1,6 MW
Lichtbogenleistung	$P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{LB}$	$P_{LB} =$	0,3 MW
Bezogene LB-Leistung	$k_P = P_{LB} / P_k$	$k_P =$	0,218
Lichtbogenenergie (Erwartung)	$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_k$	$W_{LB} =$	349,6 kJ
Lichtbogenschutzklassen der PSAgS		$W_{LBP_APC2} =$	320,0 kJ
		$W_{LBP_APC1} =$	168,0 kJ
Anlagenparameter	Transmissionsfaktor	$k_T =$	1,5
Arbeitsverfahren	Abstand Person zu Lichtbogenentstehungsort	$a =$	300 mm
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort	$W_{LBS} = k_T \cdot (a/300 \text{ mm})^2 \cdot W_{LBP}$	$W_{LBS_APC2} =$	480,0 kJ
		$W_{LBS_APC1} =$	252,0 kJ
	Hochrechnung max. Abschaltzeit für Klasse APC 2	$t_k_{APC2} =$	1,373 s
	Hochrechnung max. Abschaltzeit für Klasse APC 1	$t_k_{APC1} =$	0,721 s
	Hochrechnung min. Abstand für Klasse APC 2	$a_{APC2} =$	256 mm
	Hochrechnung min. Abstand für Klasse APC 1	$a_{APC1} =$	353 mm
Verhältnis	Verhältnis W_{LB} / W_{LBS} für Klasse APC 2	$W_{LB} / W_{LBS_APC2} =$	0,73
	Verhältnis W_{LB} / W_{LBS} für Klasse APC 1	$W_{LB} / W_{LBS_APC1} =$	1,39
Arbeiten mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 möglich			



Abb. A 8-6 Darstellung der einzelnen Berechnungsergebnisse (DC)

Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung durch Störlichtbogen							DC
Beurteilungsschema							
Bearbeiter:	M. Mustermann	Klasse:	APC 2	Datum:	11.10.19	Einfluss führt zu Verletzungswahrscheinlichkeit (0 = praktisch unmöglich, 2 = denkbar, aber sehr unwahrscheinlich, 4 = unwahrscheinlich, 7 = selten, 10 = gelegentlich bis häufig)	
Ort / Art der Tätigkeit:	USV-Anlage 200 kVA /	Arbeiten an Wechselrichter					
a) Art/Zustand der Anlage					2		
Art/Zustand der Anlage hinsichtlich überbrückungsfähiger Potenziale (Lichtbogenentstehung) oder der Begrenzung von Lichtbogenauswirkung							
b) Technische Maßnahmen					2		
Technische Maßnahmen zur Vermeidung von Potenzialüberbrückungen (Lichtbogenentstehung) oder zur Begrenzung von Lichtbogenauswirkungen							
c) Organisatorische Maßnahmen					nicht zutreffend		
Organisatorische Maßnahmen zur Vermeidung von Potenzialüberbrückungen (Lichtbogenentstehung) oder zur Begrenzung von Lichtbogenauswirkungen							
d) Persönliche Maßnahmen					nicht zutreffend		
Persönliche Maßnahmen zur Vermeidung von Potenzialüberbrückungen (Lichtbogenentstehung) oder zur Begrenzung von Lichtbogenauswirkungen							
e) Statistische Einflussfaktoren					nicht zutreffend		
Statistische Einflussfaktoren, die bei der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Lichtbogens oder einer Verletzung durch Lichtbogen eine Rolle spielen							
f) Ergonomische Einflussfaktoren					nicht zutreffend		
Ergonomische Einflussfaktoren, die bei der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Lichtbogens oder einer Verletzung durch Lichtbogen eine Rolle spielen							
Summe Bewertungspunkte:						12,0	
	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung	0 ...	10 ...	20 ...	31 ...	46 ...	
Verletzungs-schwere W_{LB} / W_{LBS}		Praktisch unmöglich	Denkbar, sehr unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	selten	Gelegentlich bis häufig	
0 ...	Leichte Verletzung		APC 2				
1 ...	Reversible Verletzung						
3 ...	Irreversible Verletzung						
10 ...	Tödliche Verletzung						
APC1		1,4					
APC2		0,7					
Ergebnis:							Durchführung der Arbeiten mit PSAgS APC 2 auf Basis der getroffenen Bewertungsansätze und gemäß der festgelegten Schutzmaßnahmen zulässig

Abb. A 8-7 Eingabeformular zur Beurteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit (DC)

DC

Arbeitsort: USV-Anlage 200 kVA	Bearbeiter: M. Mustermann
Arbeitsauftrag: Arbeiten an Wechselrichter	Datum: 11.10.19

Rechnung	KenngroÙe	Resultat
Netzparameter Netzspannung	U_{Nn}	400,0 V
Anlagengeometrie Leiterabstand	d	30 mm
Kurzschlußstromberechnung Dauerkurzschlussstrom	I_{kDC}	4,00 kA
	Zeitkonstante τ	0,002 s
Strombegrenzung	k_B	0,678
Lichtbogenstrom (Fehlerstrom)	$I_{kLB} = \frac{U_{Nn}}{\frac{34 + 0,532 \cdot d}{I_{kDC}} + \tau \cdot I_{kDC}}$	2,71 kA
Abschaltzeit der Überstromschutzeinrichtung (Einstellwert des Leistungsschalter / Abschaltzeit aus der Sicherungskennlinie)	t_k	1,000 s
Kurzschlussleistung $P_k = U_{Nn} \cdot I_{kDC}$	$P_k =$	1,6 MW
Lichtbogenleistung $P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{kLB}$	$P_{LB} =$	0,35 MW
Bezogene LB-Leistung $k_p = P_{LB} / P_k$	$k_p =$	0,218
Lichtbogenenergie (Erwartung) $W_{LB} = P_{LB} \cdot t_k$	$W_{LB} =$	349,59 kJ
Arbeitsabstand	a	300 mm
PSA Normprüfpegel	$W_{LBP_APC\ 2} =$	320,0 kJ
	$W_{LBP_APC\ 1} =$	168,0 kJ
Transmissionsfaktor	k_T	1,50
Schutzpegel der PSAgS am Lichtbogenort $W_{LBS} = k_T \times \left(\frac{a}{300\ mm}\right)^2 \times W_{LBP}$	$W_{LBS_APC\ 2} =$	480,0 kJ
	$W_{LBS_APC\ 1} =$	252,0 kJ

Vergleich	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 2}$	JA
	$W_{LB} < W_{LBS_APC\ 1}$	NEIN

Ergebnis Rechnung:	Arbeiten mit PSAgS der Störlichtbogenschutzklasse APC 2 möglich
Ergebnis Risikobewertung:	-

Begründung zur Zeitkonstante τ : keine
Begründung zum Transmissionsfaktor k_T : keine
Schutzorgan: ohne

Abb. A 8-8 Ergebnisausdruck (DC)

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Glinkastraße 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
Fax: 030 13001-9876
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de