Schutz durch Schmelzsicherungen bei Störlichtbögen im Niederspannungs-bereich

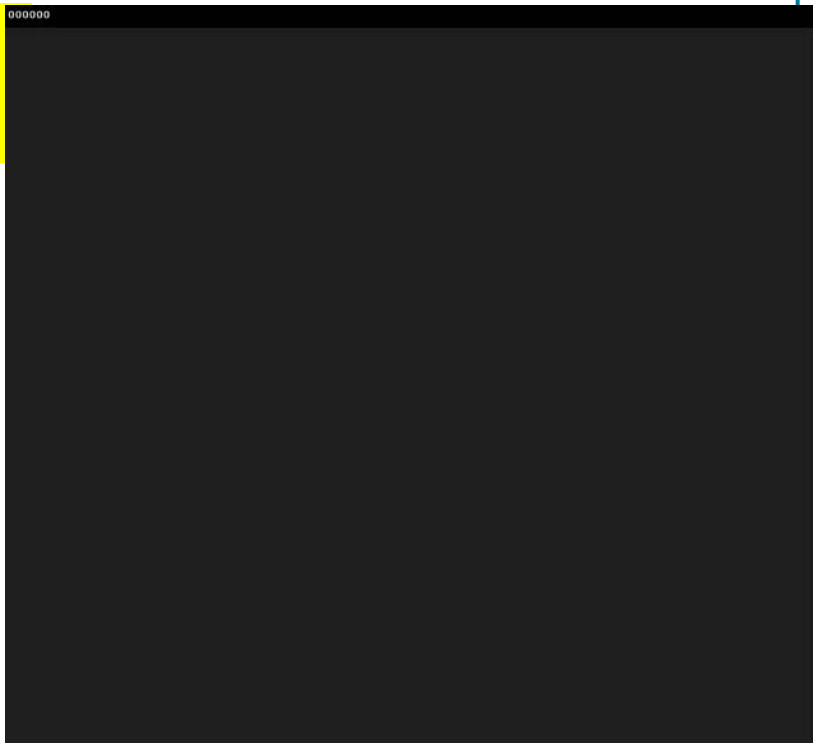
Holger Schau

VDE - Ilmenau/Germany

4. Sicherungstag
des NH/HH-Recyclingvereins
14. Mai 2025
Regensburg

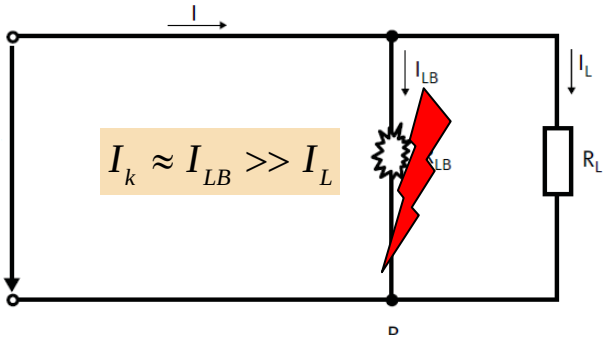
Übersicht

- Störlichtbögen in NS-Anlagen – Gefahren, Verhalten, Einflussfaktoren
- Personenschutz durch Auswahl von Sicherungen und PSAgS
- Laboruntersuchungen an AC- und DC-Lichtbögen
- Ausschaltverhalten von NH-Sicherungen (AC, DC)
- Praktische Schlussfolgerungen: Diagramme und Algorithmen für koordinierte Auswahl von PSAgS und Vorsicherung
- Fazit und Ausblick



Ausgewählte Ergebnisse von Forschungsarbeiten

Gefahren durch Störlichtbögen



$$I_k \approx I_{LB} >> I_L$$

- Wirksamer Schutz von Anlagen und Personen bei Arbeiten notwendig

Fokus: v.a. stromstarke Störlichtbögen bei Kurzschlüssen in NS-Systemen

Gefahren durch Störlichtbögen

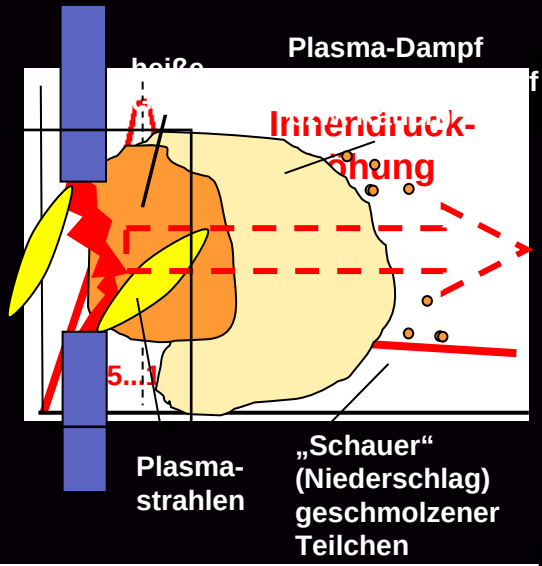
Y3 Camera 15.10.2013 16:47:26 000216 57 ms 3750 fps 29 µs

Analogien in AC- und DC-Bereich

Stromfluss im Entladungskanal

5.000-20.000 K im Kern der Entladungssäule

Leistungsumsatz bei Kurzschlüssen im MW-Bereich



Druckwelle, Überdruck

Kraftwirkung, Bersten

Schallemission

optische Strahlung: UV, intensives Licht und Wärme

Wärmestrom: konvektive Wärme (Plasma, heiße Gase)

heiße Metallteile, -spritzer und -dämpfe

Toxische Gase

Hauptrisiken für Personen:

thermische Gefahren

Hautverbrennungen, Augenschädigungen,…

v.a. bei direkter, gerichteter Einwirkung

Direkte Störlichtbogeneinwirkung

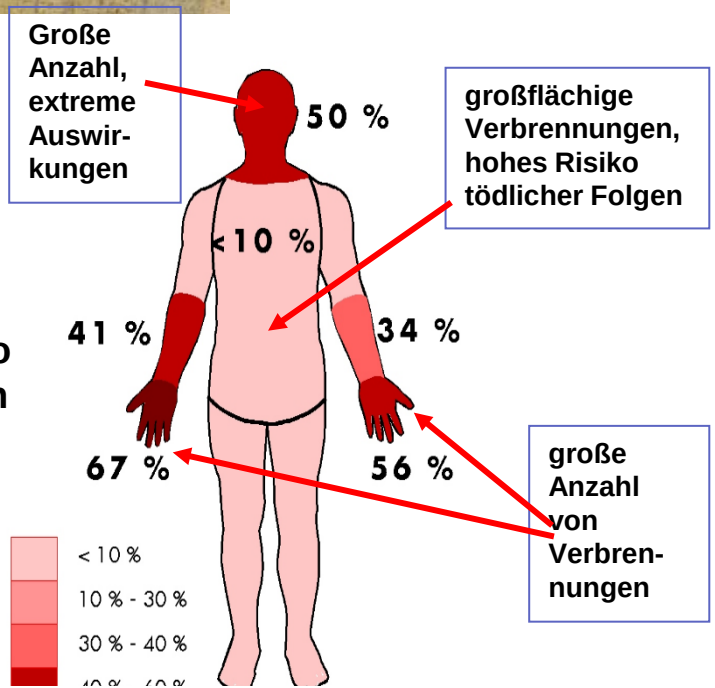
Gefahr für Personen

- besonders bei direkter Exposition
  - Arbeiten unter Spannung
  - Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile
- besonders durch thermische Wirkungen (v.a. bei gerichteter Einwirkung)

Beispiel: Arbeiten am offenen Verteiler

Höchstes Verletzungsrisiko in ungeschützten Bereichen

→ Hautverbrennungen



Schutz von Personen durch PSAgS

Störlichtbogenwirkungen und -gefahren

- Generell abhängig von
  - Leistungsumsatz P
  - Einwirkdauer (Kurzschlussdauer) t
  - Wirkabstand (Arbeitsabstand) a
  - Einwirkenergie (direkt und Durchgangsenergie) E

Elektrische Lichtbogenenergie

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

Wärmeenergie

$$E_{i0} \rightarrow E_{it}$$

Einfluss Schutzeinrichtungen → Sicherungen

Störlichtbogenschutz Anlagen und Personen (bei Arbeiten)

Maßnahmen

Schnelle, selektive Ausschaltung durch Kurzschlussschutz

Schmelzsicherungen
NH-Sicherungen

Untersuchung

Ausschaltverhalten
Sicherungen (bei Störlichtbögen im Stromkreis)

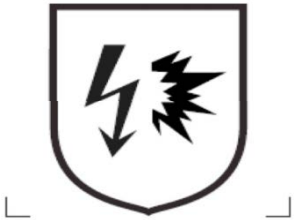
Koordinierung:

Einhaltung Energiegrenzwerte

Persönlicher Schutz bei direkter Einwirkmöglichkeit

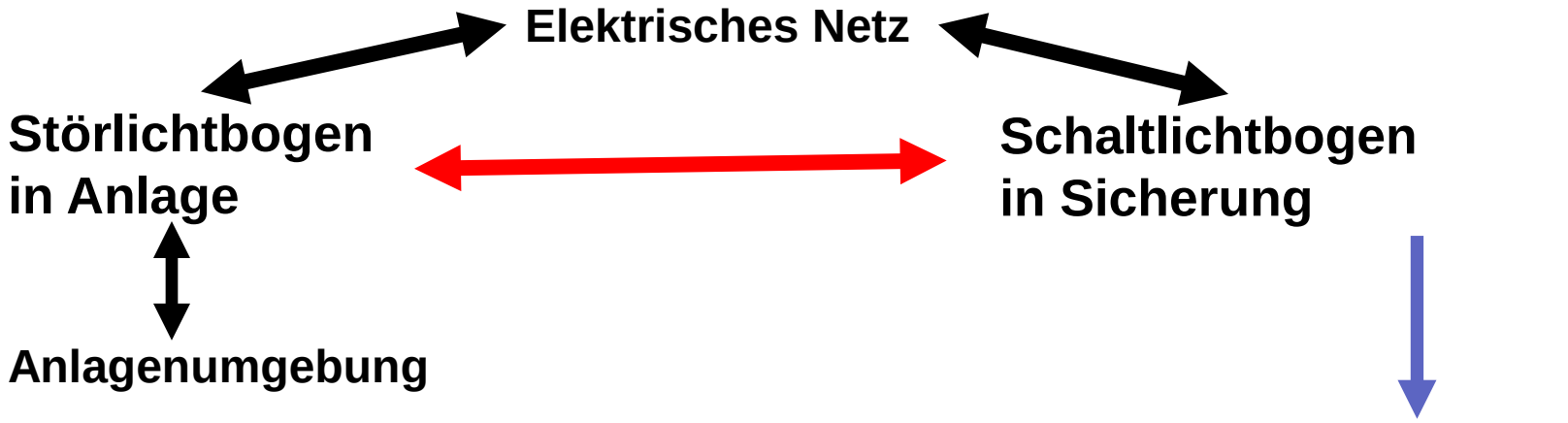
Persönliche Schutzausrüstungen
PSAgS

Einhaltung der Schutzpegel der PSAgS



Zusammenhänge

- Komplizierte Wechselwirkungen



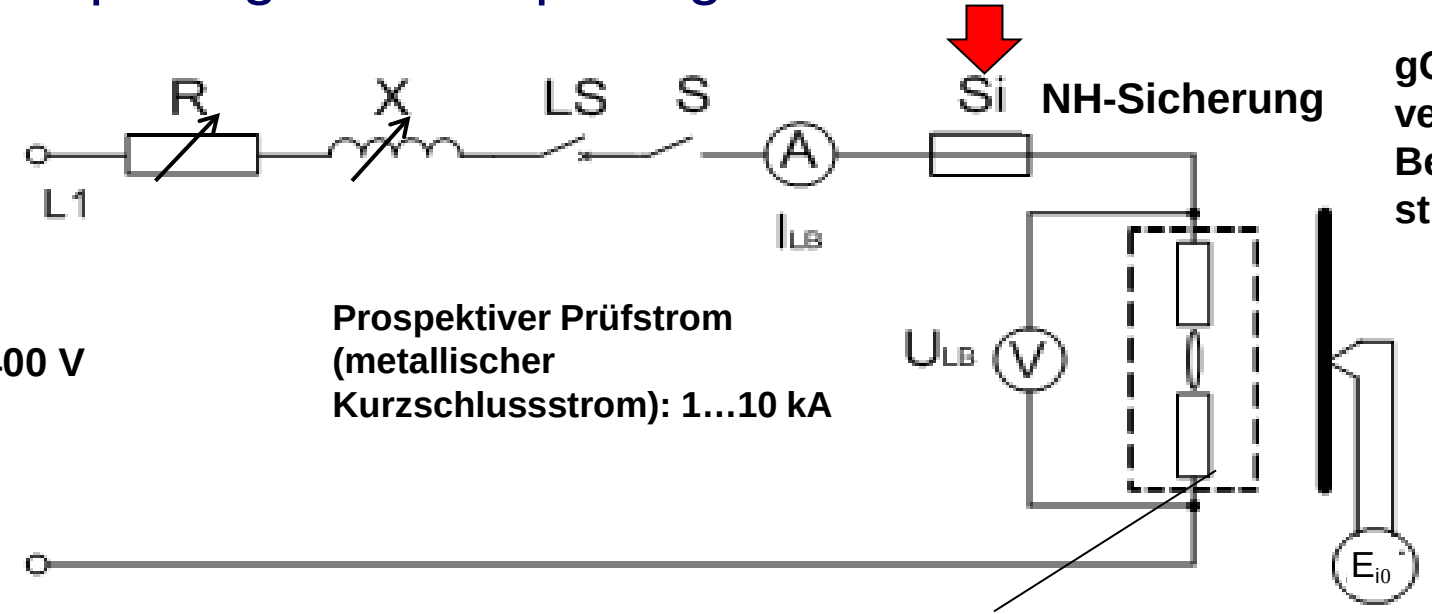
- Messtechnische Untersuchungen
  - Netz mit Störlichtbogen (Ausschalten Prüfkreis)
  - Netz mit metallischem Kurzschluss und Sicherung
  - Netz mit Störlichtbogen und Sicherung

Untersuchungen im Prüflabor

- Haben mit Untersuchungen zum AC-Störlichtbogen begonnen
- Sicherungsverhalten im AC-Kreis
  - AC-Ws: 2-poliger Lichtbogen
  - AC-Ds: 3-poliger Lichtbogen

Messungen an Störlichtbögen mit NH-Vorsicherungen

- 2-phasiger und 3-phasiger Prüfkreis



gG, gTr, gR/aR, verschiedene Bemessungs-ströme

400 V

Prospektiver Prüfstrom (metallischer Kurzschlussstrom): 1…10 kA

10/0.4 kV Prüftransformator 800 kVA

Elektrodenanordnung nach EN 61482-1-2 (Box Test), auch modifiziert für 3-polige Lichtbögen

Kalorimeter Messung der Einwirkenergie

Allgemeine Wirkung von Schmelzsicherungen (AC)

- Streuung; Wechselwirkungen zwischen Schalt- und Störlichtbogen, Stromdämpfungswirkung
- Ausschaltverhalten
  - Strombegrenzendes Schalten $t_{aus} < 10$ ms

    bei Ganzbereichssicherungen (gG): wenn $I''_k/I_{nSi} > 18\ldots25$

    bei Arbeitsschutzsicherungen, überflink (aR): wenn $I''_k/I_{nSi} > 6\ldots10$

    keine Gefahr von Hautverbrennungen 2. Grades durch verbleibende thermische Lichtbogenwirkungen

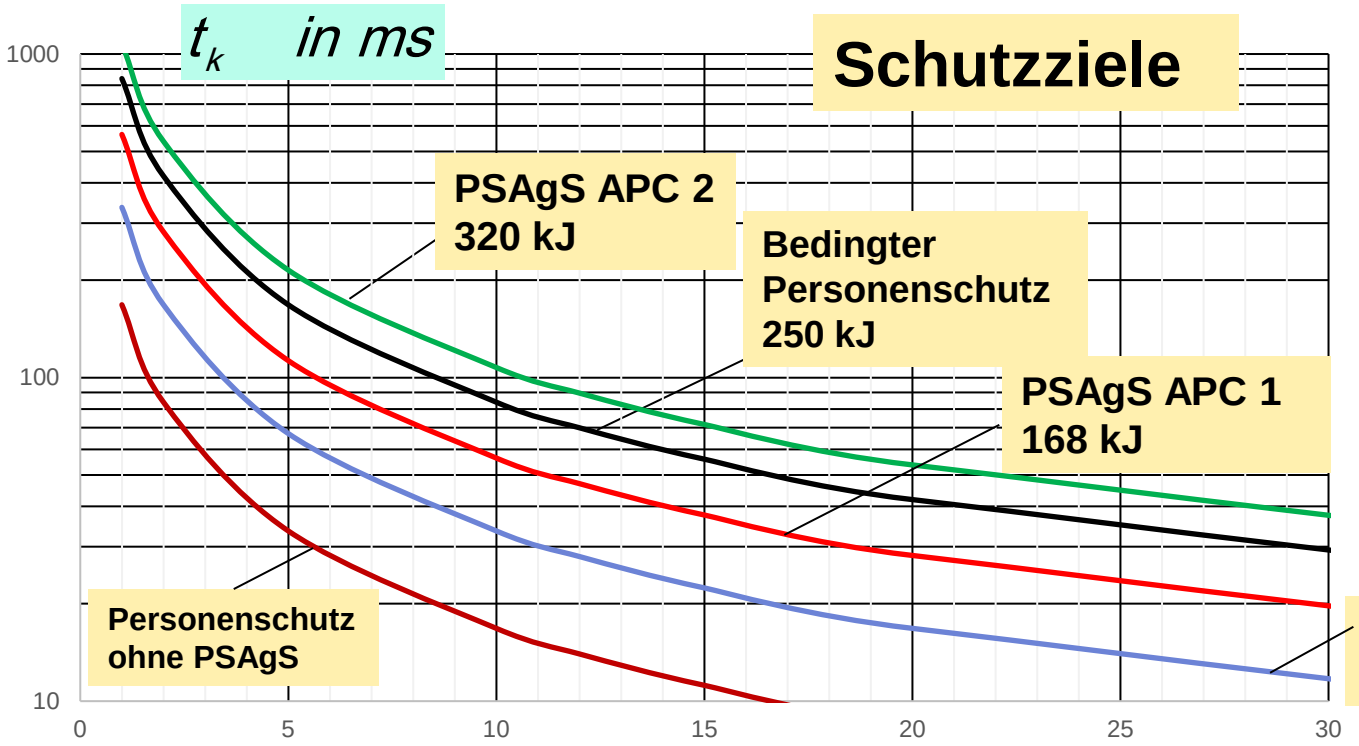
    keine weitere Betrachtung für Personenschutz notwendig
  - Nicht strombegrenzendes Schalten

    Ausschaltzeit der Sicherung (d.h. Schmelzzeit) bestimmt die Störlichtbogenenergie und Einwirkenergie

Auswertung der Messungen

- Ermittlung der resultierenden Störlichtbogenenergien und Einwirkenergien in systematischen Messreihen
- Berechnung der zu erwartenden Lichtbogenenergien aus den Lichtbogenleistungen mit Hilfe der gemessenen Ausschaltzeiten (Schmelzzeiten) – Verifizierung des Modells
- Bestimmung der zulässigen Ausschaltzeiten aus den Grenzwerten der Lichtbogenenergie (Prüf- und/oder Schutzpegel der PSAgS, Grenzwerte für Anlagenfunktionsschutz und bedingten Personenschutz)
- Ableitung von Anwenderleitlinien (Tools für Auswahl von PSAgS, Auswahlmatrix für die Vorsicherung etc.)

Zulässige Kurzschlussdauer für verschiedene Schutzziele



AC-Bereich

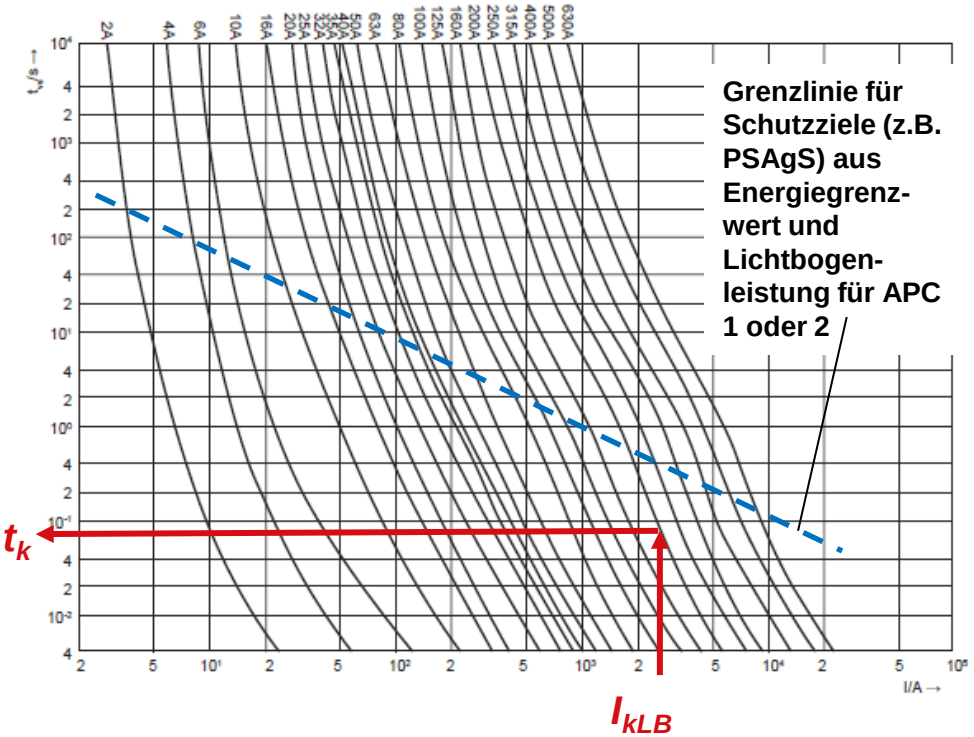
PSAgS der Lichtbogenschutz-klassen APC 1 und 2 nach IEC 61482-1-2

Schutzpegel entspricht Prüfpegel

Beispiel: Worst case Bedingungen im 400 V-NS-Netz (Arbeitsabstand a = 300 mm, kleinräumige Anlage: kT = 1)

Bestimmung der tatsächlichen Kurzschlussdauer

- Ausschaltzeit NH-Sicherung (virtuelle Schmelzzeit)



Generell:

- bei sehr kleiner Kurzschlussdauer ($t < 10…15$ ms):

  kaum gefährliche Störlichtbogenwirkungen
- bei kleinen Kurzschlussströmen (und kleinen Verhältnissen I_k/I_{nSi}):

  große Ausschaltzeit (Schmelzzeit), große Lichtbogenenergie
- oft Gefahr bei kleinen Kurzschlussströmen

Bestimmung der Ausschaltzeit mit Strom, der tatsächlich fließt: Störlichtbogenstrom

Aufbereitung der Ergebnisse für Anwenderleitlinien

- Vereinfachtes Tools für die Sicherungsauswahl

  Auswahlmatrix

  Korrelation von minimalen Kurzschlussstrom (metallisch) und Sicherungsbemessungsstrom

  Guter Überblick, leicht anwendbar

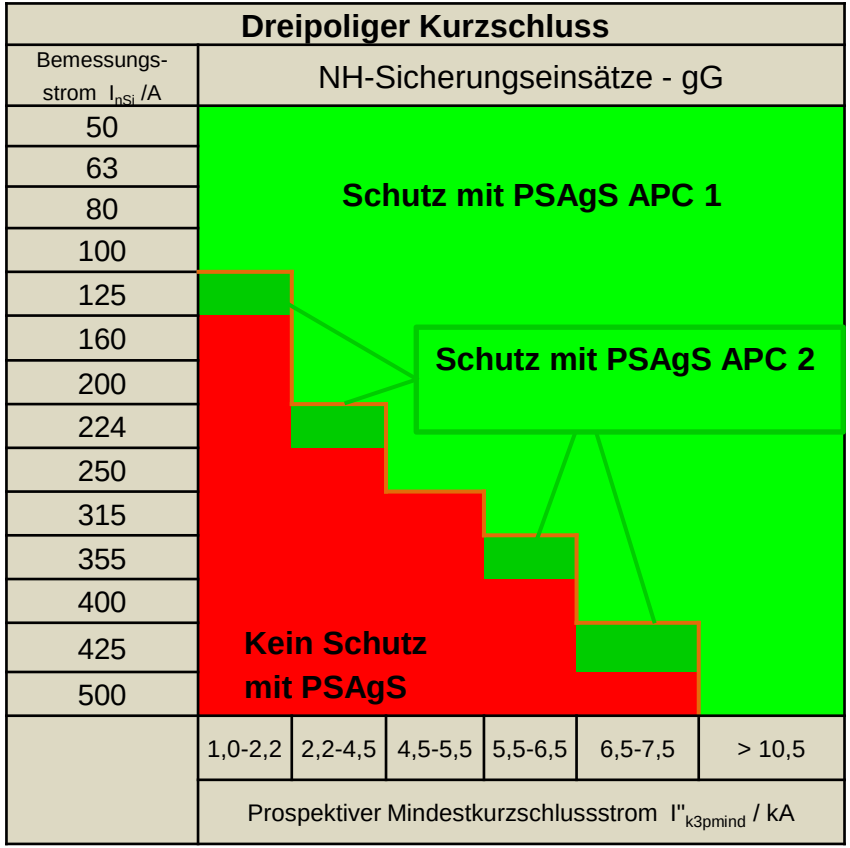
  Gilt für Standardexpositionsbedingungen

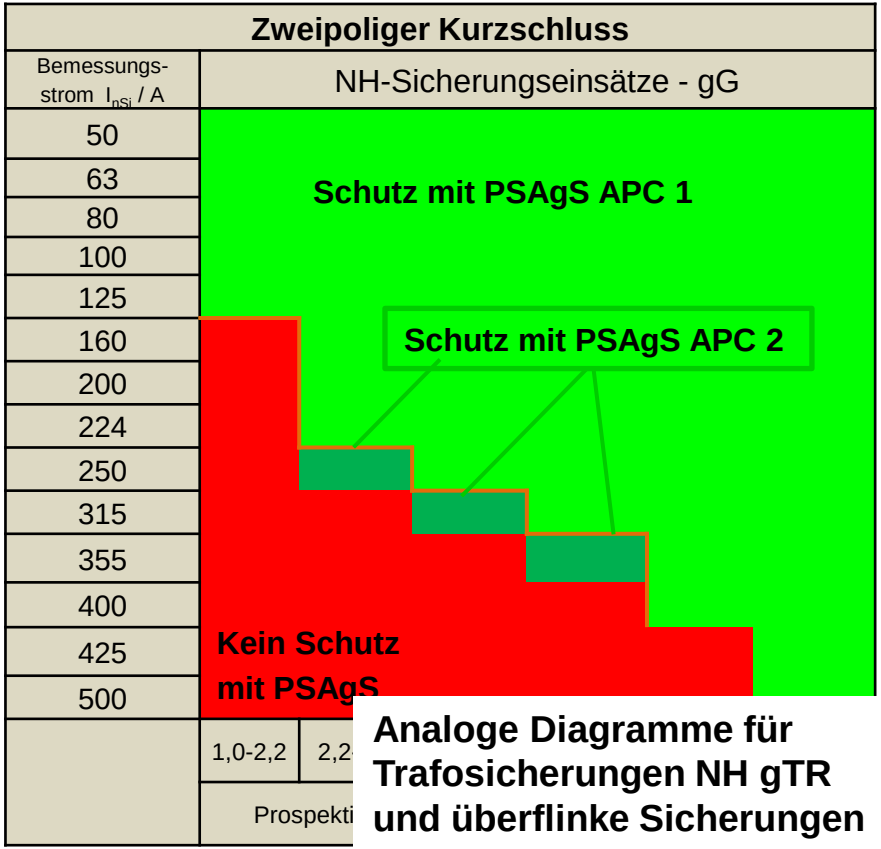
  Basis: PSAgS Box-Test APC 1 und APC 2

- Einführung in die DGUV-I 203-077, 2. Ausgabe, 09/2020

www.dguv.de; **Webcode: d1183022**

Auswahldiagramm – Schutzbereich Sicherungen NH gG





Analoge Diagramme für Trafosicherungen NH gTR und überflinke Sicherungen NH aR bzw. NH gR

- 400 V; Standardexpositionsbedingungen: a = 300 mm, k_T = 1

DGUV-I 203-077, 2. Ausgabe 09/2020

abrufbar unter: https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-informationen/786/thermische-gefaehrdung-durch-stoerlichtboegen?c=15

DGUV
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
Spitzenverband

Publikationen | Anmelden

Regelwerk | Prävention | Versicherung/Leistungen | Forschung | Zahlen & Fakten | Übergreifende Themen | Filme

- DGUV Vorschriften
- DGUV Regeln
- DGUV Informationen
- DGUV Grundsätze
- Publikationen nach Fachbereich
- Fachbereich AKTUELL

Regelwerk › DGUV Informationen

zurück zur Übersicht

(PDF, barrierefrei)

DGUV Information 203-077

Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen – Hilfe bei der Auswahl der persönlichen Schutzausrüstung

9,43 €
inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten
Sofort versandfertig, Lieferzeit ca. 1-3 Werktage

Ausgabedatum:	2020.09
Herausgeber:	DGUV
Seitenzahl:	108
Format:	DIN A4
Sprache:	Deutsch
Webcode:	p203077
Bisherige Nummer:	BGI/GUV-I 5188
Fachbereich:	Energie, Textil, Elektro, Medienerzeugnisse (ETEM)
Sachgebiet:	Elektrotechnik und Feinmechanik

Weitere Broschüren aus dem Sachgebiet

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.

Verwandte Produkte

DGUV I
Therm
in Überarbeitung. Die aktualisierte Version ist in Kürze verfügbar.

Anwendertools (Excel-Sheets) für AC und für DC

- Telekommunikation
- Abwasser
- Ionisierende Strahlung
- Nichtionisierende Strahlung

Auswahl und Verwendung von PSAgS gegen die thermischen Auswirkungen von Störlichtbögen

Personen, die an oder in der Nähe von unter Spannung stehenden elektrischen Geräten arbeiten, sind im Allgemeinen den Gefahren durch Lichtbögen ausgesetzt. Lichtbogenfehler sind seltene Ereignisse im Arbeitsumfeld dieser Personen, die nicht vollständig ausgeschlossen werden können und daher einen zuverlässigen Schutz erfordern. Sie treten nicht nur im Kurzschlussfall auf, sondern können auch im Zusammenhang mit der Trennung von spannungsführenden Teilen (z.B. Einsetzen/Entfernen von Sicherungen unter Last) auftreten.

- Die DGUV Information 203-077 beschreibt ein Verfahren, mit dessen Hilfe eine geeignete PSAgS zum Schutz gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens ausgewählt werden kann.

Diese DGUV Information finden Sie im Bereich "Regelwerke"

- Zur Unterstützung der Anwendung des Verfahrens der DGUV Information 203-077 können die beiden nachfolgenden Excel- Dateien (AC und DC) verwendet werden:
  - Arbeitshilfe zur Auswahl von PSAgS bei AC-Störlichtbögen (Excel-Datei) (XLSX, 214 kB)
  - Arbeitshilfe zur Auswahl von PSAgS bei DC-Störlichtbögen (Excel-Datei) (XLSX, 158 kB)
- Antworten auf häufig gestellte Fragen erhalten Sie im Bereich "FAQ" (in Arbeit).

Ansprechperson:

Störlichtbogenschutz

Dipl.-Ing. Martin Mehlem
Berufsgenossenschaft Energie Textil
Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)
Gustav-Heinemann-Ufer 130
50968 Köln
Tel.: 0221 3778-6300
Fax: 0221 3778-196300
E-Mail

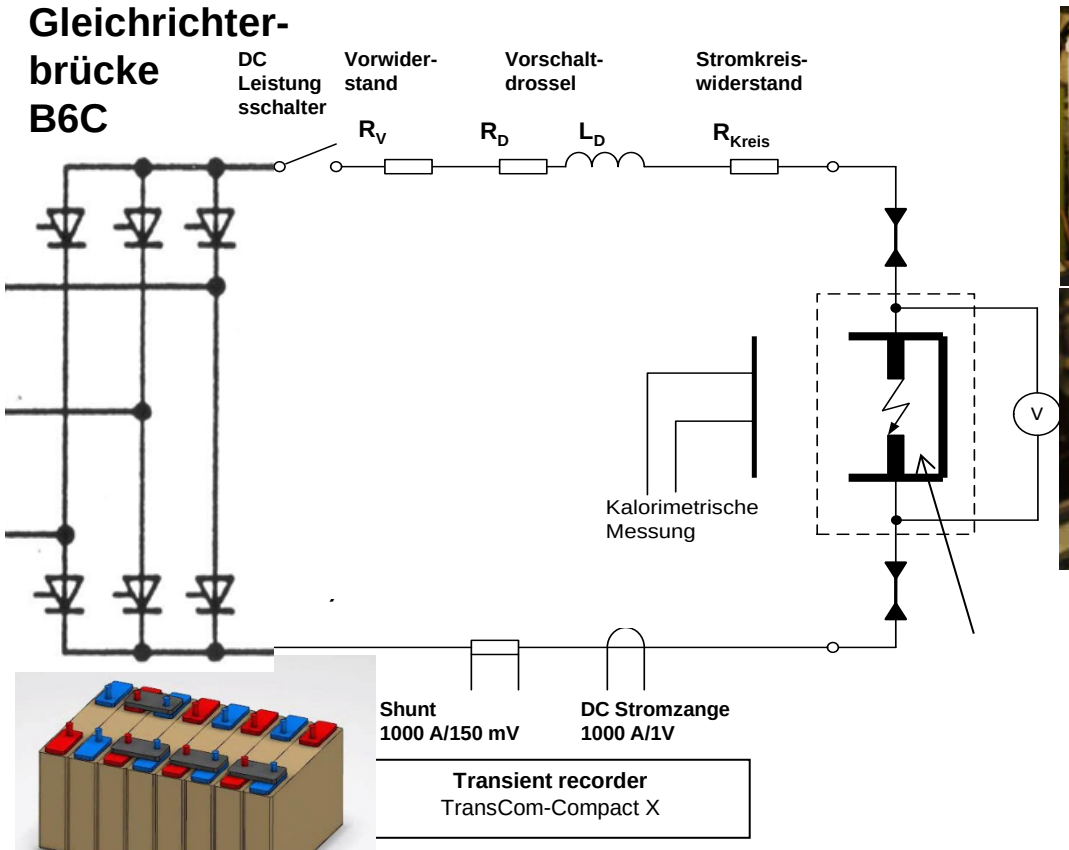
Berechnung der Lichtbogen-energie und PSAgS-Auswahl

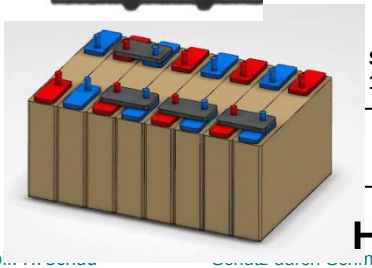
abrufbar unter: https://www.dguv.de/fb-etem/sachgebiete/elektro_feinmechanik/themenfeld-el.-anlagen/stoerlichtbogenschutz/index.jsp

Untersuchung an DC-Störlichtbögen

- Untersuchungen auf den Gleichstrombereich erweitert
- Immer mehr DC-Anwendungen mit Systemspannungen und Kurzschlussströmen, bei denen sich leistungsstarke DC-Störlichtbögen ausbilden können

DC-Prüf- und Messkreis





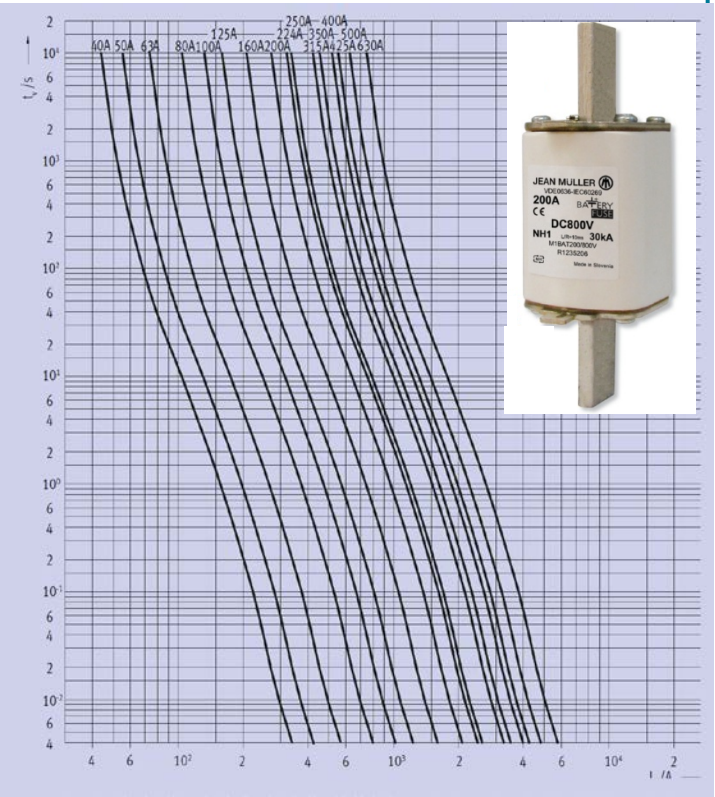
Hochvolt-Lithium-Ionen-Batterie

**Elektroden-
anordnung mit
Box gemäß IEC
61482-1-2**

100…1000 V
1…20 kA
T = 1…12 ms

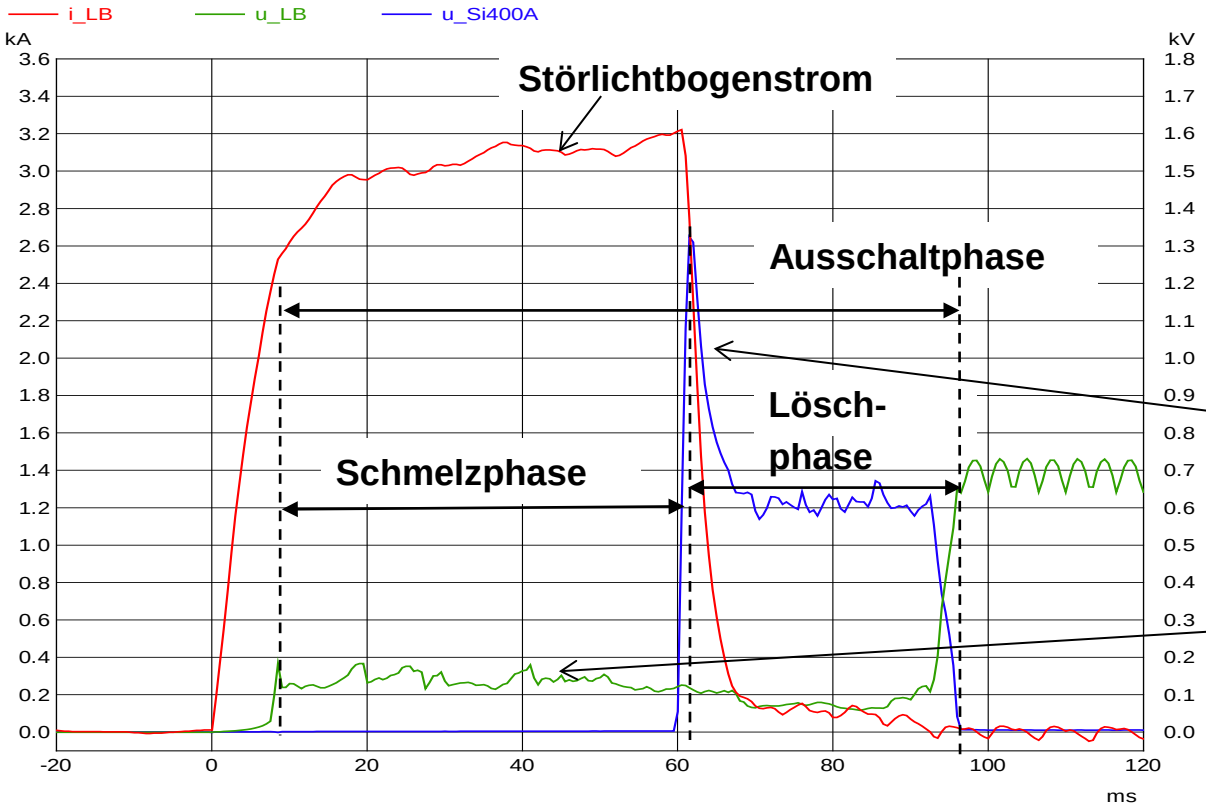
Koordination PSAgS - Schmelzsicherungen

- Untersuchung der Ausschaltung von DC-Störlichtbögen durch Schmelzsicherungen
- NH gG, gR bzw. aR (z.T. genormt), Sicherungen für den Einsatz in Batterieanlagen (NH-Bat) und Photovoltaikanlagen (NH gPV)
- Begrenzung der Störlichtbogenenergie durch Ausschaltung



Beispiel : NH Bat 800 V DC

Typisches Ausschaltoszillogramm

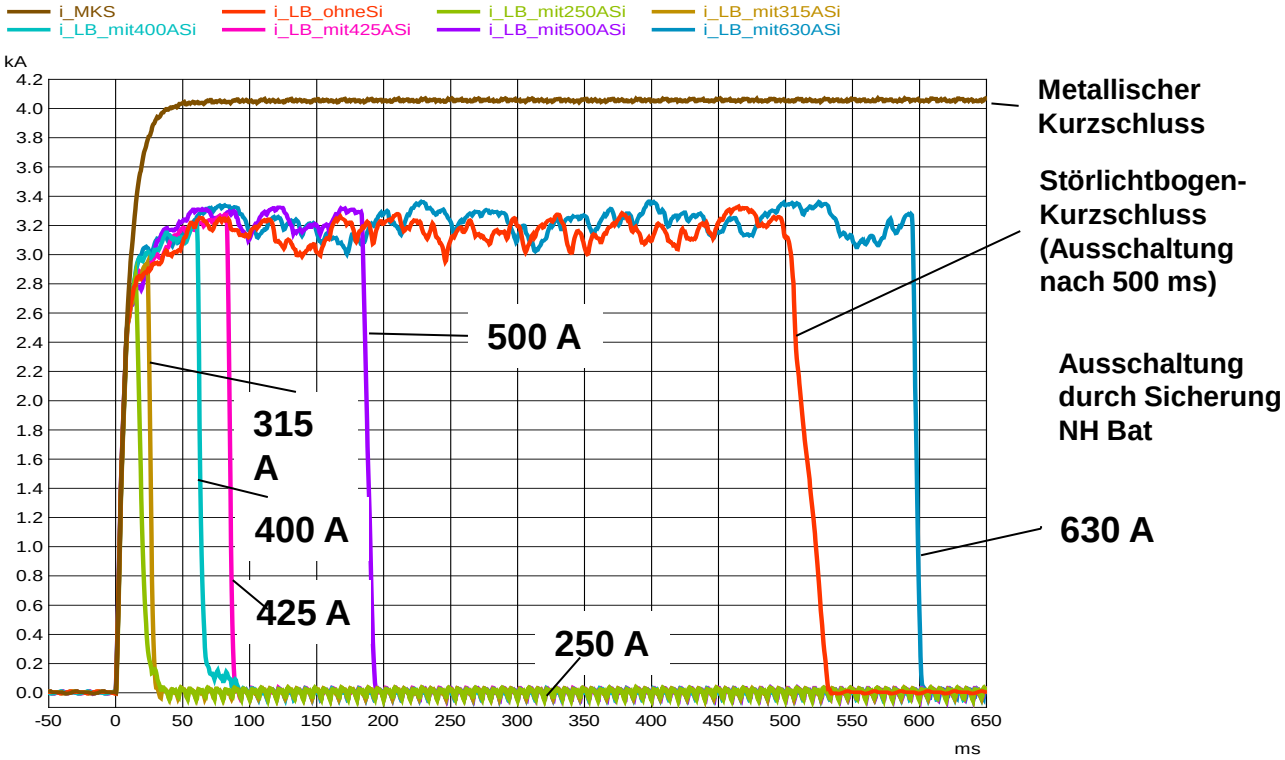


Beispiel:
Kurzschlussstrom I_P = 4 kA,
Leerlaufspannung U_P = 700 V,
Zeitkonstante τ = 8,57 ms,
Sicherung $I_{n\ Si}$ = 400 A

Spannung über Schmelzsicherung (blau)

Störlichtbogen-spannung (grün)

Fehlerstromverläufe bei Zeitkonstante 8,6 ms



Beispiel NH-Bat

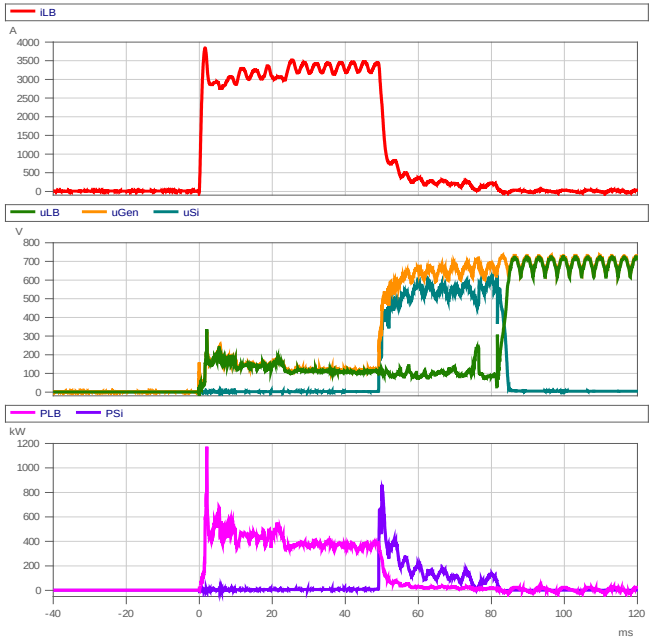
Deutliche Strom-dämpfung durch Störlichtbögen

größere Zeitkonstante: spätere Ausschaltung (längere Schmelzzeit)

Oszillogramme des Stromverlaufs für den metallischen Kurzschluss, für Störlichtbogenkurzschluss ohne Vorsicherung (500 ms) und Störlichtbögen mit Vorsicherungen unterschiedlicher Bemessungsströme (für Netz 400 V, 4 kA, τ = 8,57 ms)

Messergebnisse Aufgenommene Oszillogamme - Beispiel

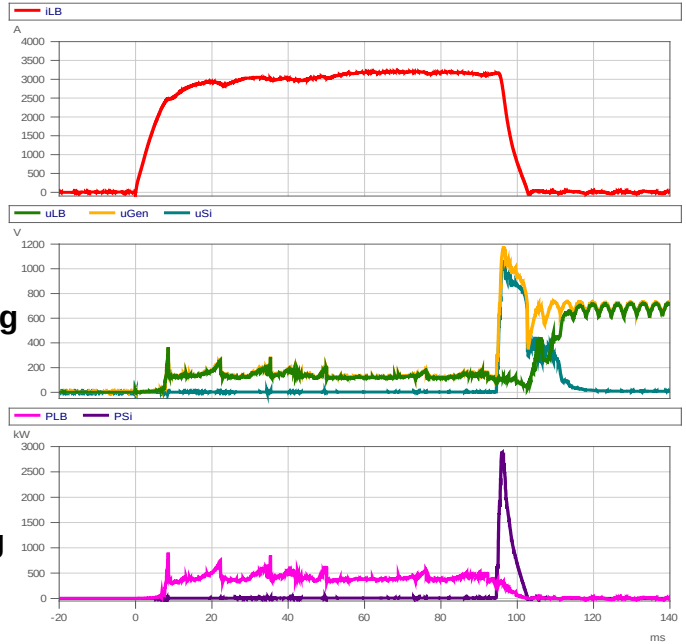
Störlichtbogenversuch mit Vorsicherung **NH gPV** 350 A bei 700 V, 7 kA



Lichtbogenstrom (rot)

Lichtbogenspannung (grün), Spannung über der Sicherung (blau), Klemmenspannung (gelb)

Lichtbogenleistung (pink), Schaltleistung der Sicherung (violett)



Zeitkonstante 0,2 ms

Zeitkonstante 8,6 ms

Ausschaltverhalten im DC-Bereich

- Verhältnis Fehlerstrom/Bemessungsstrom der Sicherung I_k/I_{nSi} bzw. I_{LB}/I_{nSi}:
  - groß: kurze Schmelzdauer t_S
  - klein: kurze Löschdauer t_L
- Generell: Störlichtbogenenergie

  in Gesamtausschaltzeit ≈ in Schmelzzeit

  $W_{LBta} \approx W_{LB\,tS}$

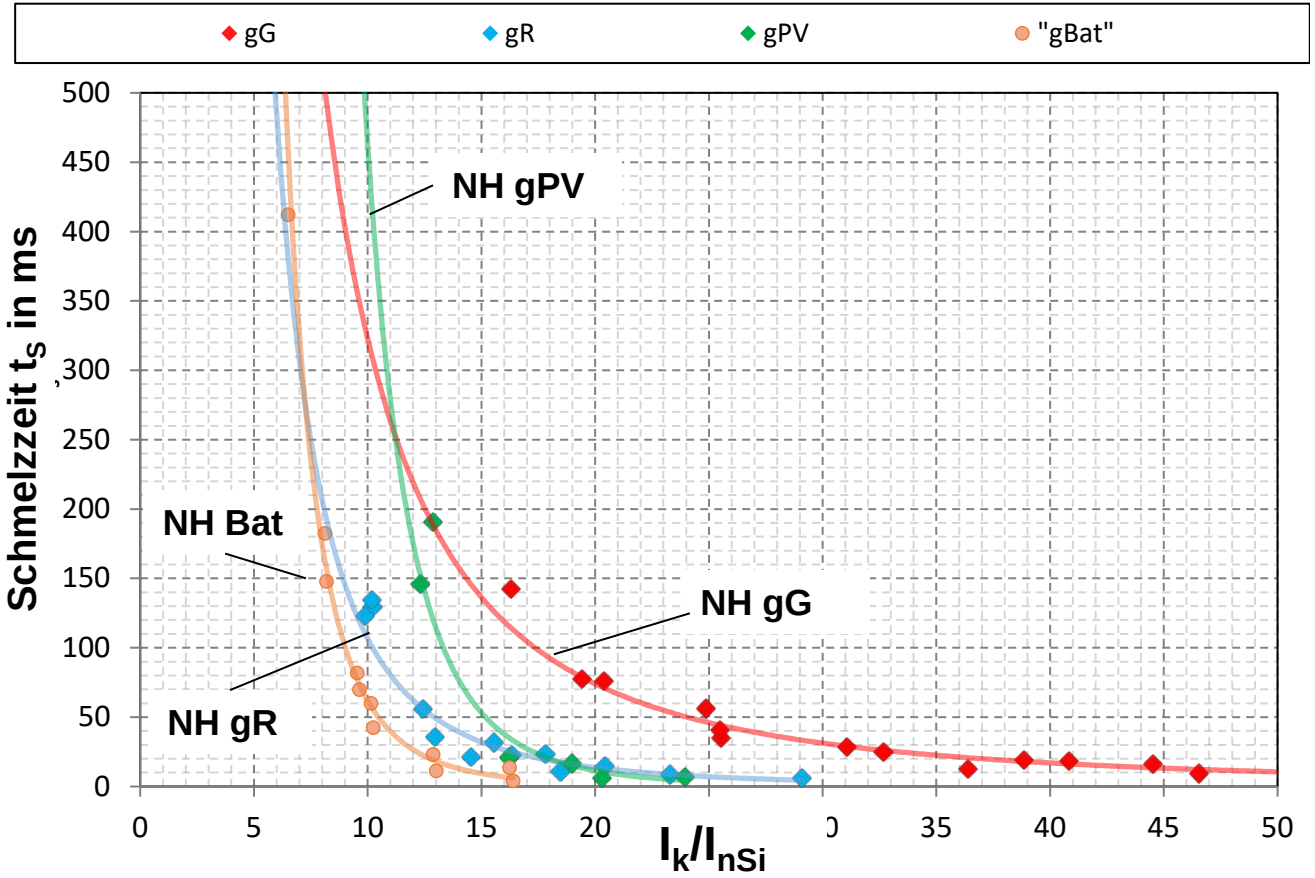
  → Schmelzzeit ≈ Ausschaltzeit

  → **Virtuelle Schmelzzeit aus Kennlinie bestimmen**
- Kennlinie oft für bestimmte Zeitkonstante (z.B. T = 0), v.a. bei kurzzeitigen Störlichtbögen

  → **reale Schmelzzeit unter Berücksichtigung von T bestimmen**
- Hersteller-Kennlinien oft unterschiedlich oder nicht genormt (obere Grenze des Streubandes)

  → **Konkrete Kennlinie benutzen**

Gemessene Schmelzzeiten von Sicherungen

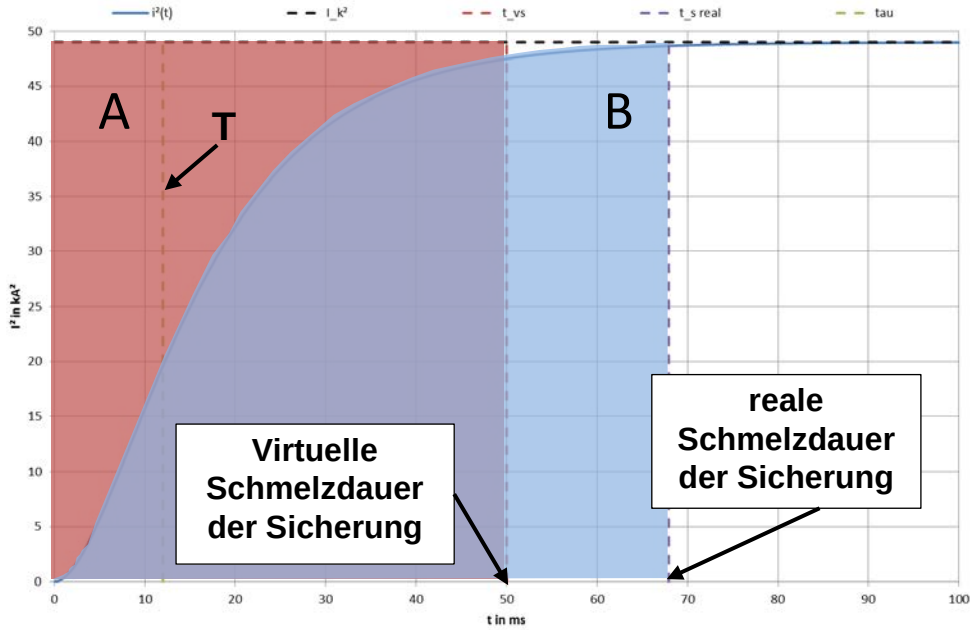


Energieumsatz im Störlichtbogen fast vollständig in der Schmelzphase →

Bestimmung der Schmelzdauer

Berücksichtigung der Zeitkonstante

- Bestimmung der realen Schmelzzeit aus virtueller Schmelzzeit (Kennlinienangabe)



Schmelzintegrale

$$\int i^2 dt$$

Fläche A = $I_k^2 \cdot t_{vs}$

Virtuelle Schmelzdauer bei sprungförmigem Stromanstieg (T = 0)

Fläche B = $\int_0^{t_{S\ real}} i^2 dt$

Reale Schmelzdauer bei tatsächlichem Strom-anstieg (Zeitkonstante T)

Gleiche Schmelzintegrale:
Fläche A = Fläche B

$$t_{s\ real} = 0{,}5\tau \cdot e^{-2t_{s\ real}/\tau} - 2\tau \cdot e^{-t_{s\ real}/\tau} + t_{v\ s} + 1{,}5 \cdot \tau$$

$$t_{s\ real\ (i+1)} = 0{,}5\tau \cdot e^{-2t_{s\ real\ (i)}/\tau} - 2\tau \cdot e^{-t_{s\ real\ (i)}/\tau} + t_{v\ s} + 1{,}5 \cdot \tau$$

Iterative Berechnung erforderlich

Auswertung der Messergebnisse

für Gefährdungsbeurteilung und Auswahl von PSAgS (DGUV-I 203-077)

- Bestimmung
  - der elektrischen Kennwerte
    - Lichtbogenspannung
    - Lichtbogenstrom (gedämpfter Kurzschlussstrom)
    - Lichtbogenleistung

Iterative Berechnung von Lichtbogenstrom (Stromdämpfung) und Lichtbogenleistung

$$I_{kLB\,(i+1)} = \frac{U_N}{\left(\frac{34 + 0{,}532 \cdot d}{I_{kLB(i)}^{0{,}88}}\right) + \frac{U_N}{I_k}}$$

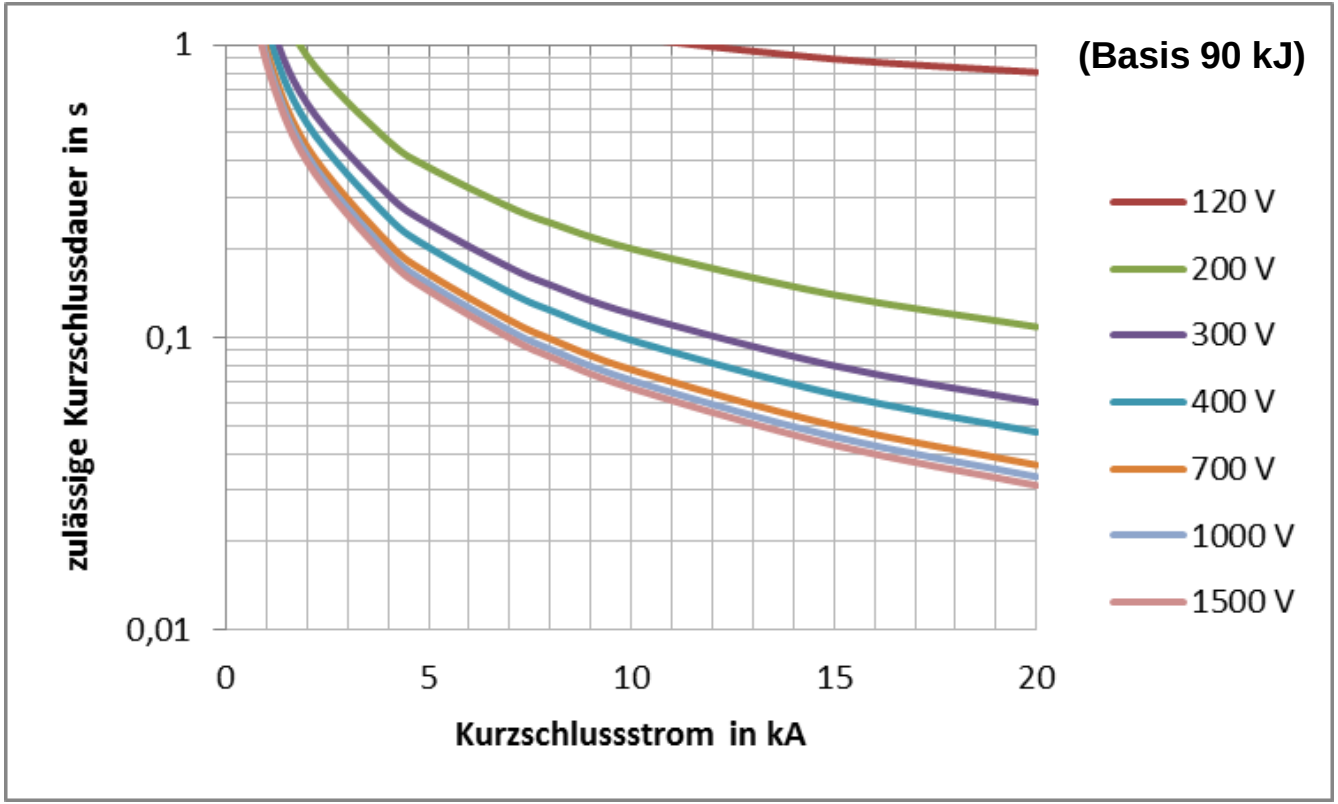
$$U_{LB\,(i+1)} = \left(34 + 0{,}532 \cdot d\right) \cdot I_{kLB(i+1)}^{0{,}12}$$

$$P_{LB\,(i+1)} = U_{LB\,(i+1)} \cdot I_{LB\,(i+1)}$$

  - der Erwartungswerte der Lichtbogenenergie W_{LB} im DC-System aus Anlagenparametern

Gefährdungsgrenzen für Hautverbrennungen

Zulässige Lichtbogendauer t_{LB} (Kurzschlussdauer t_k)



Bedingungen/Voraus-setzungen:

Elektrodenabstand d = 30 mm
Wirkabstand a = 300 mm
kleinräumiges Anlagenvolumen (Box)

Bestimmung/Auswahl von Sicherung und PSAgS

- Iterative Berechnung von Lichtbogenstrom (Stromdämpfung) und Lichtbogenleistung

$$I_{kLB\,(i+1)} = \frac{U_N}{\left(\frac{34 + 0{,}532 \cdot d}{I_{kLB(i)}^{0{,}88}}\right) + \frac{U_N}{I_k}}$$

$$U_{LB\,(i+1)} = \left(34 + 0{,}532 \cdot d\right) \cdot I_{kLB(i+1)}^{0{,}12}$$

$$P_{LB\,(i+1)} = U_{LB\,(i+1)} \cdot I_{LB\,(i+1)}$$

- Iterative Berechnung der realen Schmelzzeit aus virtueller Schmelzzeit der Kennlinie (Berücksichtigung Zeitkonstante)

$$t_{s\,real\,(i+1)} = 0{,}5\,\tau \cdot e^{-\frac{2t_{s\,real\,(i)}}{\tau}} - 2\,\tau \cdot e^{-\frac{t_{s\,real\,(i)}}{\tau}} + t_{vs} + 1{,}5 \cdot \tau$$

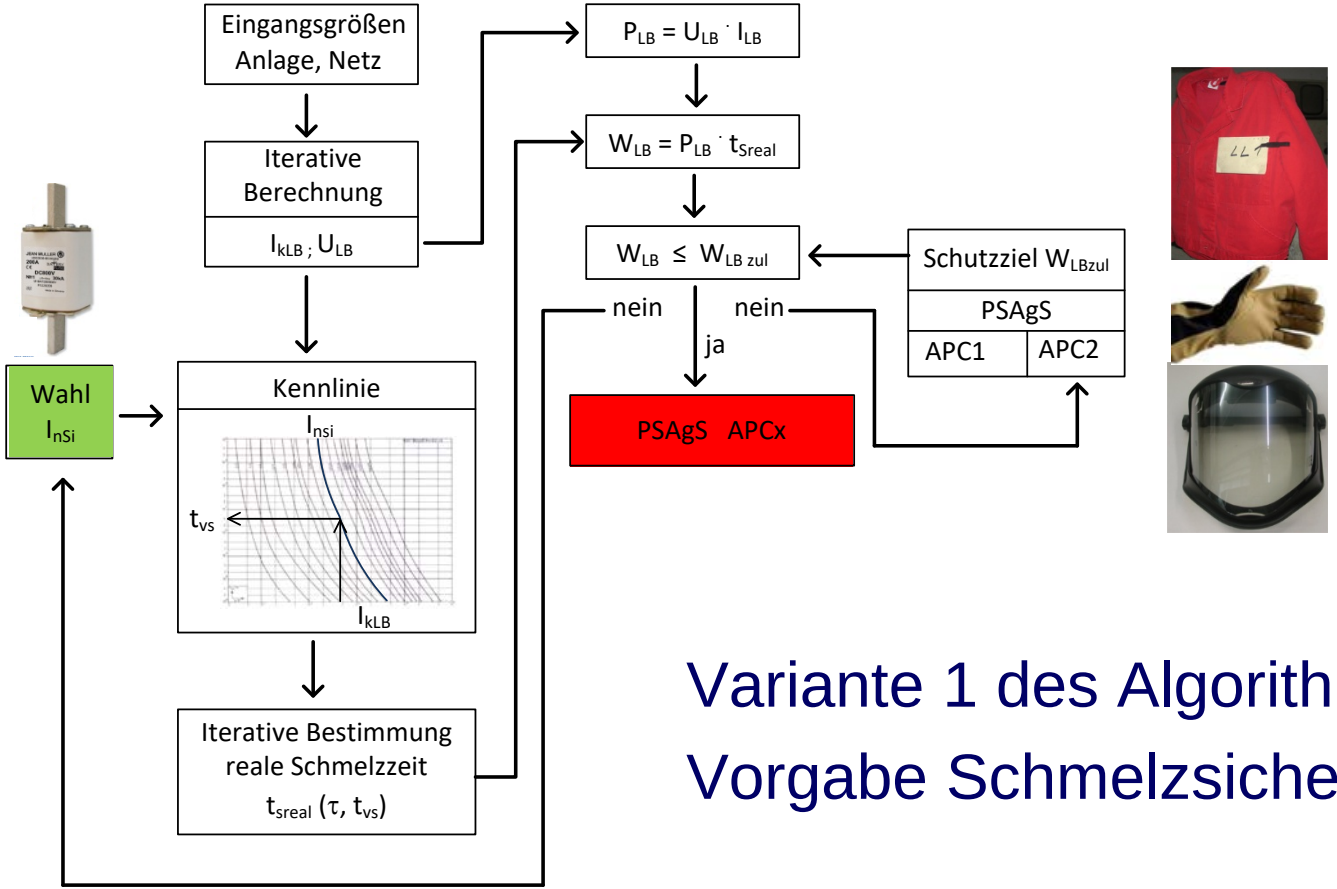
- Berechnung der Lichtbogenenergie

$$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_{S\,real}$$

- Berechnung der virtuellen Schmelzzeit aus zulässiger Lichtbogendauer (realer Schmelzzeit)

$$t_{vs} = 2\tau \cdot e^{-\frac{t_{k\,zul}}{\tau}} - 0{,}5\,\tau \cdot e^{-\frac{2\,t_{k\,zul}}{\tau}} + t_{k\,zul} - 1{,}5 \cdot \tau = t_{vs\,zul}$$

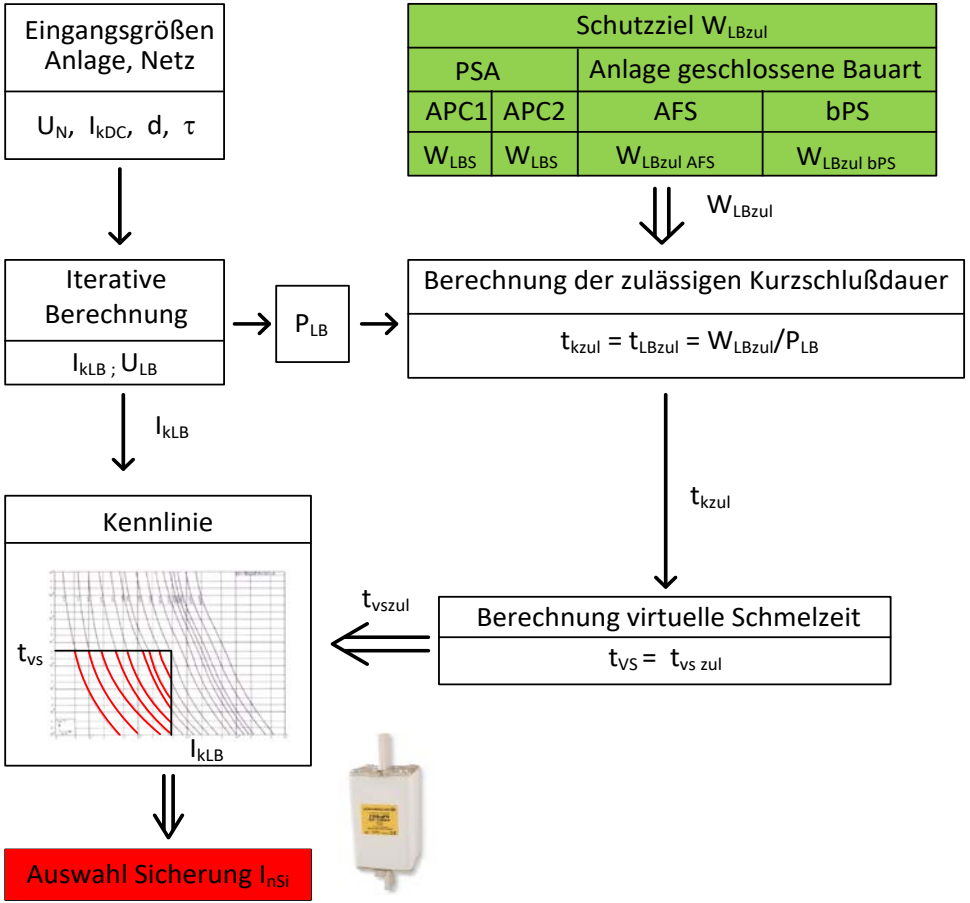
Flowchart zur Auswahl von PSAgS (1)



Variante 1 des Algorithmus:

Vorgabe Schmelzsicherung

Flowchart zur Sicherungswahl (2)



Variante 2 des Auswahl-Algorithmus:

Vorgabe des Schutzziels (PSAgS)

auch für weitere Schutzziele anwendbar

Auswahldiagramm für Sicherungseinsätze

I_{nSi} [A]	PSAgS-Schutzklasse für I_{kDC} [kA]					
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	ab 5,0
40	1	1	1	1	1	1
50	1	1	1	1	1	1
63	1	1	1	1	1	1
80	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1
125	1	1	1	1	1	1
160	2	1	1	1	1	1
200	-	2	1	1	1	1
224	-	2	1	1	1	1
250	-	2	1	1	1	1
315	-	2	1	1	1	1
350	-	-	2	1	1	1
400	-	-	2	1	1	1
425	-	-	2	1	1	1
500	-	-	-	2	1	1
630	-	-	-	2	1	1

Beispiel:

Sicherung NH Bat eines Herstellers,

gültig für: U_N = 400 V,
Zeitkonstante τ = 12 ms,
Elektrodenabstand
d = 30 mm,
kleinräumige Anlage,
Arbeitsabstand
a = 300 mm

Auswahldiagramm für Sicherungseinsätze (2)

I_{nSi} [A]	PSAgS-Schutzklasse für I_{kDC} [kA]					
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	ab 5,0
63	1	1	1	1	1	1
80	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1
125	1	1	1	1	1	1
160	2	1	1	1	1	1
200 (2XL)	-	2	1	1	1	1
200 (1XL)	-	2	1	1	1	1
250	-	-	2	1	1	1
315	-	-	-	2	1	1
350	-	-	-	2	1	1
400	-	-	-	-	2	1

Beispiel:

Sicherung NH gPV eines Herstellers,

gültig für:
U_N = 400 V,
Zeitkonstante τ = 12 ms,
Elektrodenabstand
d = 30 mm,
kleinräumige Anlage,
Arbeitsabstand
a = 300 mm

Fazit und Ausblick

- Langjährig Untersuchungen zu AC- und DC-Störlichtbögen durchgeführt, Grundlagenuntersuchungen und Schlussfolgerungen für praktische Ingenieuranwendung
- Sicherungsverhalten und Ausschaltbedingung der Sicherungen untersucht
- Berechnung der Störlichtbogenkennwerte als Grundlage für Gefährdungsbeurteilung und für Auswahl PSAgS
- Ergebnisse sind in DGUV-I 203-077 eingeflossen: fundierte Anwenderhilfe für die Auswahl von PSAgS
- Koordinierte Auswahl von PSAgS und Schmelzsicherungen, Verfahren und Regeln abgeleitet
- Zukünftige Untersuchungen fokussiert auf konkrete Betrachtung wichtiger Anwendungsfälle

Weitere Information und Hilfsmittel im Internet

Neue Seite zum Thema Störlichtbogenschutz

- Download der Excel-Tools für AC und DC Lichtbögen
- Download von weiteren Beispielen (im Aufbau)
- FAQs (im Aufbau)
- Literaturangaben (im Aufbau)

www.dguv.de; **Webcode: d1183022** **oder**

Anerkennung

Der Beitrag basiert auf Untersuchungen, die mit Unterstützung und in enger Zusammenarbeit mit den Partnern

- **BG ETEM**

  (Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse)

- **NH/HH-Recycling e.V.**

  (Verein zur Förderung des umweltgerechten Recycling von abgeschalteten NH/HH-Sicherungseinsätzen e.V.)

- **DEHN + Söhne + Co. KG Neumarkt**
- **AUDI AG Ingolstadt**

sowie **BSD, STFI Chemnitz** und **VDE/DKE (UK 214.3)**

durchgeführt wurden. Der Autor möchte sich dafür bedanken.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Ihre Fragen, bitte…