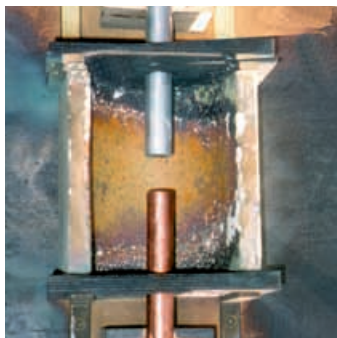


# Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen eines Störlichtbogens



issa

INTERNATIONAL SOCIAL SECURITY ASSOCIATION

Sektion für *Elektrizität*

Die überarbeitete Ausgabe wurde von einer internationalen Arbeitsgruppe erstellt:

**Holger Schau**, TU Ilmenau, Deutschland – Leitung  
**Jens Jühling**, IVSS, Sektion Elektrizität, Deutschland  
**Hendrik Beier**, STFI, Deutschland  
**Jaroslav Bek**, PRE A.S., Tschechien  
**Mike Doherty**, IHSA, Kanada  
**Bogumil Dudek**, EPC S.A., Polen  
**Helmut Eichinger**, DuPont, Genf, Schweiz  
**Jürgen Haase**, Ingenieurbüro Haase, Deutschland  
**Angel Pérez Herranz**, UNESA, Spanien  
**Hugh Hoagland**, ArcWear, USA  
**Hocine Krizou**, Hydro-Québec, Kanada  
**Nicole Lachmann**, IVSS, Sektion Elektrizität, Deutschland  
**Helena Mäkinen**, FIOH, Finnland  
**Martin Mehlem**, BG ETEM, Deutschland  
**Joshua D. Moody**, Westex Inc., USA  
**Paul Smith**, ENA, Großbritannien  
**Hans-Peter Steimel**, BG ETEM, Deutschland  
**Christian Troger**, AUVA, Österreich  
**Dominique Vacher**, EDF – DRVT, Frankreich  
**Zdenek Václavek**, ČSZE, Tschechien

2. Auflage 2011

ISBN 978-3-937824-09-3

Herausgeber:

**Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit**

Sektion Elektrizität, Gas und Wasser

c/o Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse

Gustav-Heinemann-Ufer 130, D-50968 Köln

Alle Rechte bleiben dem Herausgeber vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung. Dies betrifft auch die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte durch alle Verfahren der Speicherung und Übertragung auf Papier, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

**Leitlinie  
für die Auswahl von  
persönlicher Schutzausrüstung  
gegen thermische Auswirkungen  
eines Störlichtbogens**



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Was ist ein Störlichtbogen – Arten der Einwirkung</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Auswirkungen von Störlichtbögen</b>	<b>11</b>
3.1	Physikalische und technische Auswirkungen	11
3.2	Auswirkungen auf den Menschen	12
<b>4</b>	<b>Thermische Lichtbogenkenngrößen und deren Bestimmung</b>	<b>14</b>
4.1	Wesentliche Lichtbogenparameter	14
4.2	Berechnung und Messung der thermischen Gefährdungsparameter	15
<b>5</b>	<b>Standardisierte Prüfverfahren für PSA-Produkte gegen die thermischen Gefahren eines Lichtbogens</b>	<b>16</b>
5.1	Allgemeines	16
5.2	Arc-Rating-Prüfverfahren nach IEC 61482-1-1	18
5.3	Box-Test-Prüfverfahren nach IEC 61482-1-2	20
<b>6</b>	<b>Textilmaterial und Schutzkleidung</b>	<b>24</b>
6.1	Thermische Lichtbogenschutzanforderungen – IEC 61482-2	24
6.2	Beurteilungskriterien	25
6.3	Entflammbarkeit von Textilien	27
6.4	Empfehlungen für die Auswahl des Materials	27
6.5	Qualitätssicherung	28
6.6	Tragehinweise und Empfehlungen zur Reinigung	29
<b>7</b>	<b>Weitere PSA-Produkte: Handschuhe, Gesichtsschutz</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>Risikobeurteilung und Berechnung der Lichtbogengefährdungen</b>	<b>33</b>
8.1	Auswahl der PSA und der Prüfmethode für PSA	33
8.2	Bestimmung der Einwirkenergie für die Wahl des ATPV	35
8.3	Berechnung der zu erwartenden und äquivalenten Lichtbogenenergie für die Auswahl der Boxtest-Schutzklasse	36
8.4	Empirische Beziehung zwischen ATPV und Box-Test-Schutzklasse	39
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>

<b>Anhang 1:</b> Bestimmung der Lichtbogenleistung und Lichtbogenenergie	<b>43</b>
<b>Anhang 2:</b> Thermische Lichtbogenkenngrößen – Definitionen und Begriffe	<b>46</b>
<b>Anhang 3:</b> Prüfbericht eines Arc-Rating-Tests – Bestimmung des ATPV für ein Materialbeispiel	<b>50</b>
<b>Anhang 4:</b> Prüfbericht eines Box-Tests – Bestimmung der Schutzklasse für ein Materialbeispiel	<b>52</b>
<b>Anhang 5:</b> Lichtbogenprüfung von Handschuhen und Gesichtsschutz mit Hilfe des Box-Tests	<b>56</b>
<b>Anhang 6:</b> Algorithmus zur Berechnung der Lichtbogenegefährdung für die Auswahl von PSA, die im Box-Test geprüft ist	<b>60</b>
<b>Anhang 7:</b> Matrix der Tätigkeiten/Anlagen und der erforderlichen PSA	<b>68</b>
<b>Verwendete Symbole</b>	<b>70</b>

# 1 Vorwort

Täglich werden weltweit elektrotechnische Arbeiten ausgeführt, bei denen die Gefahr besteht, dass durch eine Fehlhandlung oder durch eine technische Ursache ein Störlichtbogen ausgelöst wird.

Der Schutz von Personen gegen die Wirkungen eines Lichtbogens muss auf verschiedenen Ebenen erfolgen. An erster Stelle stehen technische Maßnahmen an der elektrischen Anlage wie die konstruktive Gestaltung und elektrische Schutzeinrichtungen sowie die Schaffung sicherer Arbeitsbedingungen (Freischalten, fünf Sicherheitsregeln). Des Weiteren sind Training und Schulung des Personals erforderlich. Häufig kann eine Personengefährdung durch einen Störlichtbogen jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Zum Schutz der Personen müssen dann Persönliche Schutzausrüstungen (PSA) ausgewählt werden.

Seit der ersten Veröffentlichung dieser Broschüre im Jahre 2001 wurden große Fortschritte gemacht. Die Auswirkungen eines Störlichtbogens sind inzwischen genauer einschätzbar; die dabei auftretenden Energien können besser abgeschätzt werden. Zwar lassen sich die Wirkungsrichtung des Lichtbogens durch das vom Kurzschlussstrom selbst verursachte Magnetfeld und die sich daraus ergebende Wanderung des Lichtbogenplasmas und der Lichtbogenfußpunkte in einer elektrischen Anlage nur schlecht vorherbestimmen. Die Vorgänge sind nunmehr aber besser bekannt.

Die Auswirkungen eines Störlichtbogens sind vielfältig: thermische Wirkungen, elektrischer Schlag, Schall- und UV-Emissionen, Druck- und Berstwirkungen, die Folgen eines physischen und mentalen Schocks sowie toxische Stoffe. Normen und Prüfverfahren beschäftigen sich nur mit den thermischen Effekten. Auch diese Broschüre legt ihren Schwerpunkt ausschließlich auf die thermischen Wirkungen, da diese die größte Gefahr für Personen darstellen.

Einen mit absoluter Sicherheit wirkenden Personenschutz gegen einen Störlichtbogen wird es insofern kaum geben können. Jedoch lassen sich mit geeigneten Maßnahmen die Auswirkungen des Lichtbogens reduzieren und oftmals eliminieren.

Sind Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile einer elektrischen Anlage oder unter Spannung erforderlich, befindet sich die Person grundsätzlich in einem Bereich, der der allgemeinen Bevölkerung nicht zugänglich ist. In diesen Fällen müssen die allgemeinen technischen Schutzmaßnahmen, wie Abdeckungen und Türen, zum Zwecke dieser Arbeiten vorübergehend geöffnet oder entfernt werden. Da es sich bei diesen Tätigkeiten um Wartungs- bzw. Reparaturarbeiten an der elektrischen Installation handelt, kann auch zukünftig eine Gefährdung durch Störlichtbögen nicht völlig ausgeschlossen werden.

Bei der Beurteilung der Gefahren muss auch an andere Arbeiter gedacht werden,

die sich in der Nähe der Arbeitsstelle aufhalten oder auf sonstige Weise von einem Störlichtbogen betroffen sein könnten.

Im Auftrag der IVSS-Sektion Elektrizität hat eine internationale Arbeitsgruppe die aktuelle Situation analysiert und die neuesten Informationen zusammengestellt. Diese überarbeitete Leitlinie trägt den gegenüber der ersten Ausgabe gewonnenen neuen Erkenntnissen Rechnung; es wurde eine vollständige Überarbeitung vorgenommen.

Als wesentliche Neuerung beinhaltet die Broschüre nunmehr Informationen zur Risikobeurteilung und zur Anwendung der standardisierten Prüfverfahren in der Praxis. Die Arbeitsgruppe berichtet von ihren Erfahrungen und der verbesserten Situation bei den Prüfverfahren. Die Betrachtungen können heute auf bewährte Lichtbogenprüfverfahren für PSA zurückgreifen, die international standardisiert und harmonisiert sind.

Diese Leitlinie folgt den Anforderungen der EU-Richtlinie über *persönliche Schutzausrüstungen* (89/686/EWG) [1]. Nachfolgend werden ausschließlich PSA entsprechend dieser Direktive betrachtet; alle Ausrüstungsstücke in dieser Broschüre sind als PSA im Sinne der PSA-Richtlinie anzusehen.

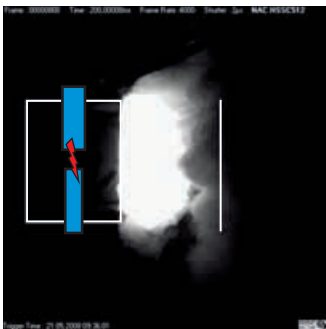
Die Leitlinie soll Arbeitgebern helfen, ihren Verpflichtungen aus der EU-Ratsrichtlinie 89/391/EWG über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit (Arbeitsschutz-Richtlinie) gerecht zu werden.



## 2 Was ist ein Störlichtbogen – Arten der Einwirkung

Ein Lichtbogen ist eine sich selbst erhaltende Entladung in einem Gas. Sie entsteht durch Gasionisation und stellt eine elektrisch leitende Verbindung zwischen Elektroden unterschiedlichen Potentials mit unterschiedlicher Leiterbeteiligung oder zwischen einem dieser Leiter und Erde her. Ein Störlichtbogen in einer elektrischen Anlage ist ein unbeabsichtigtes Ereignis; man spricht von einem Störlichtbogen, wenn ein Lichtbogen in einer elektrischen Anlage bzw. an einem elektrischen Betriebsmittel nicht betriebsmäßig, sondern durch eine Störung auftritt. Ursache ist entweder ein technischer Fehler oder – wie in den meisten Fällen belegt – eine menschliche Fehlleistung. Fast jeder Kurzschluss in einer elektrischen Anlage ist mit dem Auftreten von Störlichtbögen verbunden, wobei riesige Energiemengen freigesetzt werden.

Lichtbögen treten nicht nur bei Kurzschlüssen, sondern auch bei Schaltvorgängen unter Last auf (Sicherungen, Trenner, Kabel, Kabelanschlüssen, Klemmstellen), wenn keine speziellen Vorkehrungen getroffen wurden. Auch diese Schaltlichtbögen können zu Störlichtbögen führen und für Menschen gefährlich werden. Die größte Energie wird jedoch bei Kurzschluss-Störlichtbögen freigesetzt.



**Bild 2.1:**  
Austritt einer heißen Plasma- und  
Gaswolke bei einem Lichtbogen in  
einer Box (Gehäuse, Quelle: Schau)

Im Niederspannungsbereich ist zum Auslösen eines Lichtbogens zuvor ein galvanischer Kurzschluss erforderlich. Im Hochspannungsbereich genügt dagegen schon das Unterschreiten des entsprechenden Luftabstandes zu den unter Spannung stehenden Teilen (elektrischer Durchbruch oder Überschlag).

Abhängig von der Spannungsebene, dem Anlagenaufbau und der durchgeführten Arbeiten können verschiedene Arten von Lichtbögen auftreten und auf eine Person einwirken:

## 2 Was ist ein Störlichtbogen – Arten der Einwirkung

- offener Lichtbogen – Lichtbogen in einer offenen Anlage; Gefahr droht ab einer gewissen Distanz hauptsächlich von der Strahlung.
- gerichteter Lichtbogen – Lichtbogen in einem teilweise umschlossenen Bereich; Gefahr besteht durch die Bündelung der thermischen Effekte im Austrittsbereich von der Strahlung, dem Hitzestrom (Konvektion) und Metallspritzern (siehe Bild 2.1).
- austretender Lichtbogen – Plasmastrahlen werden ausgestoßen und treffen Personen.
- gleitender Lichtbogen – Lichtbogen, der in Hochspannungssystemen an der Oberfläche des Körpers in Verbindung mit einer Körperdurchströmung entsteht.

Infolge der extrem hohen Energien, die bei Störlichtbögen im Fall eines Kurzschlusses umgesetzt werden, bestehen hohe Risiken, dass Menschen schwer verletzt werden, die Betriebsmittel beschädigt oder zerstört werden und es zu Versorgungsunterbrechungen (Stromausfälle) kommt.

## 3 Auswirkungen von Störlichtbögen

### 3.1 Physikalische und technische Auswirkungen

Je nach Leistung und Brennzeit eines Störlichtbogens können sehr differenzierte physikalische Wirkungen entstehen, die hauptsächlich aus der extrem hohen Temperatur in der Lichtbogensäule resultieren. Es sind Temperaturen über 5.000° C in einem Lichtbogen möglich. Bei der Ausbildung des Lichtbogens wird ein Teil des Metalls der Elektroden verdampft und ionisiert. Es bildet dabei eine leitfähige Verbindung zwischen den Elektroden. Durch den sich verstärkenden Stromfluss erhöht sich die Temperatur weiter und es kommt zur Ausbildung eines Plasmas zwischen den Elektroden. Dieses Plasma gibt Strahlung ab.

Ein Plasma zeichnet sich dadurch aus, dass in ihm alle chemischen Verbindungen aufgebrochen sind und die Elemente in ionisierter Form vorliegen. Diese Plasma- wolke besitzt deshalb eine sehr hohe chemische Aggressivität. Mit der Verdampfung von Metall und der nachfolgenden starken Erhitzung kommt es zu einer Massenerpansion und Gasausdehnung, die die metallischen Dämpfe und Spritzer explosionsartig von den Fußpunkten des Lichtbogens abtransportiert. Durch Abkühlung und Reaktion mit dem Luftsauerstoff entstehen dann Metalloxide, die mit weiterer Abkühlung als schwarzer bzw. grauer Rauch sichtbar werden. Solange die Dämpfe und der Rauch noch ausreichend heiß sind, bilden sie bei Ablagerung eine sehr gut haftende Kontamination (vgl. Bild 3.1).

Eine weitere physikalische Wirkung während des Aufbaus eines Lichtbogens ist der hohe Druckanstieg, der innerhalb von 5-15 ms einen ersten Maximalwert von bis zu 0,3 MPa erreichen kann. Dies entspricht einem Druck von 20 bis 30 t/m<sup>2</sup>. Soweit sich die **Druckwelle** nicht ungehindert ausbreiten kann, besteht für die umgebenden baulichen Anlagen die Gefahr einer mechanischen Zerstörung. Das kann zum Wegschleudern von Türen oder Abdeckungen, Bersten von Gehäusen oder dem Einbrechen von Zwischenwänden führen.

Die **optische Strahlung**, der konvektive Wärmestrom der **heißen Plasma- und Gasströmung** und die Plasmastrahlen, die an den Fußpunkten des Lichtbogens auftreten, führen zu thermischen Beanspruchungen und Schäden. In Abhängigkeit von der Intensität des Lichtbogens entzündet und entflammt der starke Wärmestrom in der näheren Umgebung befindliche brennbare Materialien. Die von dem Lichtbogen ausgehenden flüssigen Metallspritzer verstärken zusätzlich die Gefahr einer **Brandentstehung**.

#### 3.2 Auswirkungen auf den Menschen

Aus den gerade beschriebenen physikalischen Auswirkungen ergibt sich, dass Personen, die an oder in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen arbeiten, einem erhöhten Risiko ausgesetzt sind, da bei solchen Arbeiten die Anlagen offen sind oder geöffnet werden und dadurch direkte Einwirkungen bestehen können.

Die Verletzungsgefahr ergibt sich insbesondere durch:

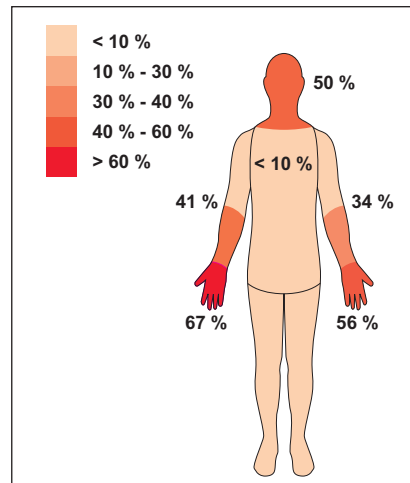
- Druckwellen, Krafteinwirkungen auf den Körper und weggeschleuderte Teile, die sich bei der raschen Erwärmung des Gases rund um den Lichtbogen ergeben
- Gehör gefährdende Schallimmissionen
- elektromagnetische Strahlung, insbesondere optische Strahlung (sichtbar, ultraviolett, infrarot), die zu irreversibler Schädigung von Haut und Augen führen kann
- schwere Hitzeschäden infolge optischer Strahlung, der heißen Plasmawolke und der Gasströmung (Wärmestrom)
- toxische Gase und heiße Partikel, die bei der Verbrennung und Pyrolyse der umgebenden Materialien (inklusive der Elektroden) entstehen.

Mit dem schlagartigen Druckaufbau beim Zünden des Lichtbogens entstehen durch den **explosionsartigen Knall** auch Schalldruckpegel über 140 dB (unbewertet), die zu gesundheitlichen Schäden des menschlichen Gehörs führen können.

Für in der Nähe eines Lichtbogens befindliche Personen besteht eine hohe Gefährdung durch die bei dem Lichtbogen freigesetzten



**Bild 3.1:** Zerstörungen in einer Anlage nach einem Störlichtbogenunfall (Quelle: Schau)



**Bild 3.2:** Verteilung der thermischen Schädigungen

toxischen Zersetzungsprodukte. Diese können neben einer Schädigung der äußerlichen Hautflächen, durch Inhalation auch zu einer schweren Lungenschädigung führen.

Die hauptsächliche Gefahr geht von den **thermischen Wirkungen** aus. Durch die Entzündung von Kleidungsstücken und anderen Ausrüstungsgegenständen, die von Menschen am Körper getragen werden, kann es zu schweren Verletzungen kommen. Unabhängig von der Kleidung bzw. Schutzausrüstung, die ein Verunfallter bei der Störlichtbogeneinwirkung trägt, ist zur Erarbeitung von präventiven Maßnahmen auch die Verteilung der äußerlichen Verbrennungen von Interesse. Zu dieser Thematik führte das Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle (Deutschland) eine Studie durch. Ausgewertet wurden schwere Störlichtbogenunfälle der Elektrizitätswirtschaft, die sich im Jahre 1998 in Deutschland ereigneten. Für die Erhebung standen medizinische Unterlagen von 61 Fällen zur Verfügung. Die Auswertung bezog sich auf die Verteilung der thermischen Schädigungen auf die einzelnen Körperteile.

Als Schädigungen wurden hier Verbrennungen ersten und höheren Grades einbezogen. Das Ergebnis ist in Bild 3.2 zu sehen. Stark betroffen bei Störlichtbogenunfällen sind besonders die Hände und der Kopf einschließlich Halsbereich. In mehr als 2/3 der Unfälle wurde die rechte Hand und in ca. der Hälfte aller Unfälle die Gesichts- und Halspartie verletzt. Aber auch die Unterarme (41 % rechts und 34 % links) werden relativ oft geschädigt. Alle weiteren Körperteile sind mit Anteilen unter 10 % beteiligt. Gerade im Falle großflächiger Hautverbrennungen am Körper sind jedoch schwerwiegende Folgen oder Verletzungen mit tödlichem Ausgang zu befürchten.

# 4 Thermische Lichtbogenkenngrößen und deren Bestimmung

## 4.1 Wesentliche Lichtbogenparameter

Die direkten und indirekten Auswirkungen eines Störlichtbogens werden in erster Linie von folgenden Faktoren beeinflusst:

- der elektrischen Lichtbogenenergie  $W_{\text{arc}} = W_{\text{LB}}$
- der Lichtbogen-Wirkleistung  $P_{\text{arc}} = P_{\text{LB}}$
- der Lichtbogendauer  $t_{\text{arc}} = t_k$
- dem Abstand vom Lichtbogen  $a$ .

Die Lichtbogenenergie ist eine klar definierte Größe, die die speziellen Bedingungen an einer Fehlerstelle eindeutig kennzeichnet. Sie hängt von den elektrischen Netzparametern und dem Aufbau der betreffenden elektrischen Anlage ab.

Für die thermischen Auswirkungen muss außerdem die Energiedichte betrachtet werden, die auf der exponierten Oberfläche auftritt, also die Einwirkenergie  $E_i$ . Dabei kann es sich um die direkte Einwirkenergie  $E_{i0}$  oder die hinter einer Schutz-ausrüstung wirksame Durchgangsenergie  $E_{it}$  handeln.

Die für die thermische Gefährdung maßgeblichen Lichtbogenparameter sind deshalb die Lichtbogenleistung, die Lichtbogenenergie und die Einwirkenergie.

Zwischen der elektrischen Lichtbogenenergie und der direkten Einwirkenergie besteht ein sehr komplexer und komplizierter Zusammenhang. Es liegt zwar prinzipiell Proportionalität vor; die Übertragungsfunktion  $f_T$  ist jedoch nichtlinear:

$$E_i = f_T \cdot W_{\text{arc}} \text{ mit } f_T = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6).$$

Die Transmissionsfunktion  $f_T$  ist hauptsächlich von folgenden Einflussgrößen abhängig:

- $x_1$ – Abstand  $a$  zur Achse des Lichtbogens (annähernd umgekehrt proportional zum Quadrat)
- $x_2$ – räumliche Umgebung des Lichtbogens (offen, Gehäuse, Wände, ...)
- $x_3$ – Elektrodenkonfiguration (vertikal, horizontal, Barrieren, 2-polig/3-polig)
- $x_4$ – Elektrodenabstand  $d$
- $x_5$ – Elektrodenmaterial
- $x_6$ – Spannungs- und Stromniveau des elektrischen Systems (Netz).

Diese Variablen bestimmen, welche Art des Lichtbogens entsteht, und repräsentieren die Wärmeübertragungsbedingungen.

Weitere wichtige Definitionen und Begriffe finden sich in Anhang 2.

#### 4.2 Berechnung und Messung der thermischen Gefährungsparameter

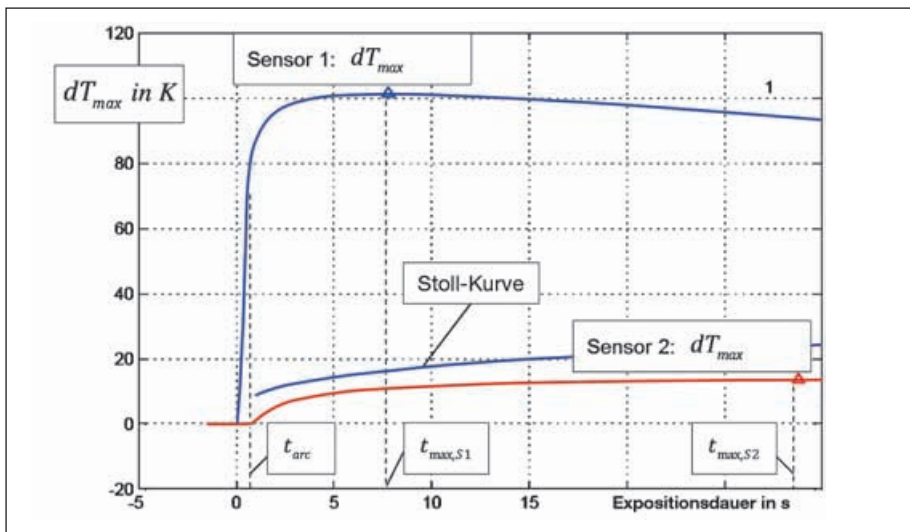
In den standardisierten Lichtbogenprüfmethoden werden Kupferkalorimeter eingesetzt, um die Einwirkenergie zu messen. Diese Energie  $E_i$  ist proportional zum Maximalwert des Temperaturverlaufs  $dT_{max}$  (Maximalwert der Temperaturerhöhung) der definierten Kupferscheibe des Kalorimeters (siehe Bild 4.1):

$$E_i = \frac{m \cdot c_p}{A} \cdot dT_{max}$$

mit

- $m$  – Masse der Kupferscheibe des Kalorimeters
- $A$  – Oberfläche der Kupferscheibe des Kalorimeters
- $c_p$  – spezifische Wärmekapazität von Kupfer
- $dT_{max}$  – Maximalwert der Temperaturerhöhung des Kalorimeters.

Der Maximalwert der Temperaturerhöhung ist die Differenz zwischen der maximalen Temperatur, die in der 30 Sekunden währenden Expositionszeit auftritt, und der Anfangstemperatur des Sensors.



**Bild 4.1:** Temperaturverläufe während einer Lichtbogenprüfung (Beispiel, bei dem Sensor 1 direkt exponiert ist und Sensor 2 sich hinter einer PSA befindet)

# 5 Standardisierte Prüfverfahren für PSA-Produkte gegen die thermischen Gefahren eines Lichtbogens

## 5.1 Allgemeines

Den Grundstein für die Bewertung und die Auswahl von PSA stellen reproduzierbare Produktprüfungen dar. In diesen Prüfungen müssen die Beständigkeit sowie die Schutzwirkung der PSA gegen die thermischen Auswirkungen eines Störlichtbogens nachgewiesen werden (siehe Bild 5.1).

Qualifizierte PSA muss diese beiden Anforderungen bezüglich der Lichtbogengefährdung erfüllen. In der Vergangenheit konzentrierten sich die Schutzüberlegungen und Prüfverfahren ausschließlich auf die Hitzebeständigkeit und lieferten den Nachweis, dass die PSA die Auswirkungen des Lichtbogens nicht verschlimmert. Es ist sehr wichtig, dass PSA flammhemmende Eigenschaften aufweist. Dies allein reicht allerdings noch nicht aus. Die Komponenten der PSA, wie Stoffe, Kleidung, Handschuhe und Schutzschirme müssen auch die Einwirkenergie auf ein ungefährliches Ausmaß reduzieren. Somit sind Prüfungen der Produkte und Systeme erforderlich, bei denen die Einwirkenergie gemessen wird.



**Bild 5.1:** Testpuppe mit einer Jacke, die einem Lichtbogen im Box-Text ausgesetzt wurde

Derzeit gibt es zwei standardisierte Prüfverfahren für Textilien und Kleidung, die den oben beschriebenen Anforderungen entsprechen:

- der Arc-Rating-Test nach IEC oder EN 61482-1-1 [3] und
- der Box-Test nach IEC oder EN 61482-1-2 [4].

Beide Prüfverfahren verwenden unterschiedliche Testaufbauten, Lichtbogenkonfigurationen und -typen, Testparameter, Testabläufe und Ergebnisparameter. Die Ergebnisse können weder physikalisch verglichen noch mathematisch ineinander überführt



werden. PSA muss entweder nach dem einen oder dem anderen Prüfverfahren bewertet und ausgewählt werden.

	<b>IEC 61482-1-1</b>	<b>IEC 61482-1-2</b>
<b>Prüfaufbau</b>	Langer offener Lichtbogen	Prüflichtbogen im Gehäuse
<b>Prüfenergie</b>	Schrittweise verändert durch Einstellung der Lichtbogendauer bei konstantem Prüfstrom	Konstant, zwei mögliche Werte (Klassen)
<b>Wärmeübertragung</b>	Alle Richtungen: hauptsächlich Strahlung	Gerichtet: Strahlung, Konvektion, Metallspritzer
<b>Prüfergebnis</b>	Lichtbogenkennwert (ATPV oder $E_{BT50}$ )	Störlichtbogen-Schutzklasse: ja/nein

**Tabelle 5.1:** Spezifika der beiden optional anwendbaren standardisierten Prüfverfahren

Aus den Prüfungen ergeben sich Energiewerte, bis zu denen PSA einem Lichtbogen widersteht und Schutz bietet. Früher verglichen Hersteller und Kunden getestetes Material und Kleidungen oft nur auf Basis des prospektiven Kurzschlussstroms (8 kA beim ATPV-Test und 4 kA bzw. 7 kA beim Box-Test) und beurteilten die Verwendung, ohne die anderen wichtigen Einflussfaktoren des Prüfaufbaus zu berücksichtigen, die das Prüfenergieniveau (und folglich den Schutzpegel) ebenfalls mitbestimmen.

Im Prüfverfahren nach IEC 61482-1-1 (Methode A und B) [3] wird ein Kennwert quantitativ ermittelt, der die thermischen Schutzeigenschaften des Materials oder der Kleidung charakterisiert: der thermische Lichtbogenschutzwert (Arc Thermal Performance Value – ATPV) bzw. Aufbrechenergie (Break Open Energy –  $E_{BT50}$ ). Diese Werte (Materialkenngrößen) erlauben einen direkten Vergleich verschiedener Materialien. Sie können aber auch der zu erwartenden direkten Einwirkenergie gegenübergestellt werden, die entsprechenden Risikoanalysen für einen möglichen Lichtbogen an einer konkreten Arbeitsstelle entnommen werden (z.B. nach IEEE 1584 oder NFPA 70E, siehe Kapitel 8).

Material oder Kleidung, das den mit konstanten Prüfparametern durchgeführten Box-Test nach IEC 61482-1-2 bestanden hat, schützt mindestens bis zu einem Energiewert, der dem Prüfpegel der jeweiligen Störlichtbogenklasse entspricht. Die tatsächliche Schutzwirkung kann auch bei höheren Energien noch gegeben sein.

## 5 Standardisierte Prüfverfahren für PSA-Produkte gegen die thermischen Gefahren eines Lichtbogens

Die Prüfparameter (z.B. Prüfstrom) stellen in der Regel nicht die Anwendungsgrenzen der PSA dar. Ein zuverlässiger Schutz ist dann gegeben, solange durch Netzspannung, Kurzschlussstrom, Lichtbogendauer und Wirkabstand der energetische Schutzpegel der Störlichtbogenklasse nicht überschritten wird. Die erforderliche Störlichtbogenklasse muss über eine Risikoanalyse ermittelt werden. Es müssen dazu andere als die oben genannten Verfahren benutzt werden, da die Erwartungswerte der elektrischen Lichtbogenenergie zu ermitteln sind (siehe Kapitel 8).

### 5.2 Arc-Rating-Prüfverfahren nach IEC 61482-1-1

#### Durchführung der Prüfung

Diese Prüfung wird an schwer entflammaren Textilien vorgenommen, die in Kleidungsstücken zum Schutz gegen kurzzeitige Lichtbogeneinwirkung vorgesehen sind. Die Prüfanordnung besteht aus zwei senkrecht angeordneten Stabelektroden (rostfreier Stahl) mit einem Abstand von 300 mm, zwischen denen der Lichtbogen gezündet wird. Das zu prüfende Material wird an drei Probenhaltern angebracht, die sich im Umkreis der Elektrodenanordnung befinden und geometrisch jeweils um einen Winkel von  $120^\circ$  gegenseitig versetzt sind. Jeder Probenhalter ist mindestens 550 mm x 200 mm (Höhe x Breite) groß und mit zwei Kupfer-Kalorimetern (Elektrolytkupfer) ausgestattet. Zur Lichtbogenachse besteht ein Abstand von jeweils 300 mm. Die Prüfanordnung bedingt eine stabile Ausbildung und Wirkung des Lichtbogens in alle Richtungen (siehe Bild 5.2).

Vor der Prüfung werden die Prüflinge entweder gemäß ISO 6330 Methode 2A, einschließlich Trocknung nach Prozedur E (Trockner) fünfmal oder entsprechend der Gebrauchsanweisung des Herstellers gewaschen.

Die Materialprüflinge werden an jedem der drei senkrecht stehenden Probenhaltern eng anliegend befestigt, was die gleichzeitige Prüfung von drei Proben in jedem



**Bild 5.2:** Prüfanordnung für den Arc-Rating-Test (mit Elektrodenanordnung sowie Probenhalterungen und Kalorimetern im Umkreis)

Lichtbogen-„Schuss“ ermöglicht. Mit den Kalorimetern der Probenhalter, die von den Stoffproben bedeckt sind, wird die Durchgangsenergie auf Basis der Temperaturerhöhung direkt gemessen. Jeweils zusätzliche angeordnete, gleichartige Kalorimeter außerhalb der probenbedeckten Fläche dienen der gleichzeitigen Messung der direkten Einwirkenergie. Mit Hilfe spezieller Software werden alle Temperaturdaten nach dem Zünden des Lichtbogens über eine Zeitspanne von 30 s aufgenommen.

Das Prüfverfahren verlangt aus statistischen Gründen mindestens 20 Prüfwerte. Da bei jedem „Schuss“ von drei Proben Werte erzielt werden, bedeutet dies, dass eine Prüfreihe mindestens sieben Lichtbogen-„Schüsse“ (Prüfschritte) umfasst. Der Pegel der direkten Einwirkenergie wird dabei bei einem konstanten Prüfstrom von 8 kA von Prüfschritt zu Prüfschritt durch Einstellung unterschiedlicher Lichtbogendauern verändert. Die Variation der Lichtbogendauer bewirkt unterschiedliche Einwirkenergien, wobei angestrebt wird, dass sich resultierende Einwirkenergien abwechselnd ober- und unterhalb der Grenzkurve nach Stoll ergeben.

Der elektrische Prüfkreis muss die Existenz eines Lichtbogens bis zu einem Elektrodenabstand von 305 mm gewährleisten, was praktisch eine Prüfquelle im Mittelspannungsbereich (z.B. 3 kV oder höher) voraussetzt. Diese treibende Spannung garantiert das Zünden und Bestehen eines stabilen Lichtbogens während der gesamten Prüfdauer.

## Prüfergebnis

Dieses Prüfverfahren verwendet ein logistisches Regressionsmodell, um die Lichtbogenkennwerte für Materialien und Kleidungsstücke zu bestimmen. Diese Kennwerte (entweder ATPV oder  $E_{BT50}$ ) werden in  $\text{kJ/m}^2$  (oder  $\text{cal/cm}^2$ ) angegeben. Der thermische Lichtbogenschutzwert ATPV eines Materials ist jene Einwirkenergie auf das Material oder mehrlagige System von Materialien, bei der ohne Aufbrechen mit 50%iger Wahrscheinlichkeit so viel Hitze durch den Prüfling dringt, dass mit einer Verbrennung zweiten Grades zu rechnen ist. Anhang 3 zeigt einen Prüfbericht als Beispiel.

Entstehen während der Prüfung im Prüfling Löcher oder Öffnungen, durch die die Probenhalterung oder eine nicht flammbeständige Unterschicht dem Lichtbogen ausgesetzt wird, spricht man von einem Aufbrechen. In diesem Fall muss eine Bestimmung der Aufbrechenergie durchgeführt werden, indem die logistische Regression in Analogie zur ATPV-Ermittlung angewendet wird. Wenn die 50%ige Wahrscheinlichkeit für das Aufbrechen des Materials ( $E_{BT50}$ ) bei einer Energie unter dem ATPV auftritt, dann muss  $E_{BT50}$  als Lichtbogenkennwert angegeben werden.

Des Weiteren misst das Prüfverfahren den Wärmedämmfaktor (Heat Attenuation Factor – HAF). Der HAF gibt an, wie viel Prozent der Energie vom Material oder Materialsystem abgehalten wird.

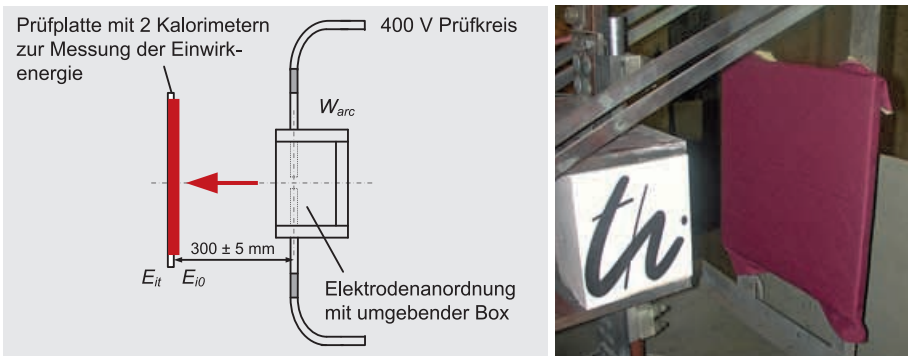
## Anwendung der Prüfergebnisse

Das Prüfverfahren liefert die Eigenschaften der Testmaterialien im Hinblick auf den Wärmedurchgang und ermöglicht leicht einen Materialvergleich. Die Lichtbogen-schutzwerte können herangezogen werden, um zweckmäßige Schutzkleidung entsprechend der Risikoabschätzung auszusuchen.

### 5.3 Box-Test-Prüfverfahren nach IEC 61482-1-2

#### Prüfaufbau

Beim Box-Test [4] werden Lichtbogenbeständigkeit und -schutzwirkung über zwei Schutzklassen beurteilt. Ein elektrischer Lichtbogen wird in einem 400-V-Wechselspannungsprüfkreis zwischen zwei vertikal angeordneten Elektroden gezündet, die von einer Gipsbox umgeben sind (siehe Bild 5.3).



**Bild 5.3:** Boxtest-Anordnung für die Prüfung von Textilmaterial für Schutzkleidung: schematisch (links) und im Prüflabor (rechts, entgegengesetzter Blickwinkel)

#### Durchführung der Prüfung

Die Störlichtbogenklassen sind durch verschiedene Pegel der elektrischen Lichtbogenenergie und der daraus resultierenden Einwirkenergie gekennzeichnet. Diese sind in Tabelle 5.2 angegeben. Die Einwirkenergie ist die Energiedichte, die in einem Abstand  $a = 300$  mm von der senkrechten Lichtbogenachse auftritt.

Für die Messung der Einwirkenergie werden zwei Kalorimeter verwendet. Vor einer Testreihe wird die direkte Einwirkenergie  $E_{i0}$  ohne Prüfling gemessen, um die Prüfanordnung zu validieren (Gültigkeit der Prüfbedingungen). Bei der Testreihe selbst messen die Kalorimeter die Durchgangsenergie  $E_{it}$  hinter dem Prüfling.

	$W_{\text{arcP}} = W_{\text{LBP}}$ in kJ	$E_{\text{io}}$ in kJ/m <sup>2</sup>
<b>Klasse 1</b>	158	135
<b>Klasse 2</b>	318	423

**Tabelle 5.2:** Prüfpegel der Störlichtbogenklassen

Im Prüfverfahren wird zwischen Materialprüfung und Kleidungsprüfung zur Produktbeurteilung und Zertifizierung unterschieden.

Die **Materialprüfung des Boxtests** wird angewandt, um das Verhalten von Textilmaterialien in einer ebenen Anordnung bei Lichtbogeneinwirkung zu ermitteln und zu messen. Die quantitative Messung der thermischen Lichtbogenschutzeigenschaften erfolgt über die Durchgangsenergie Energie  $E_{\text{it}}$ . Die Prüfung wird anhand der Kriterien in Tabelle 5.3 vorgenommen.

Parameter	Kriterium
<b>Nachbrenndauer</b>	$\leq 5$ s
<b>Schmelzen</b>	Kein Durchschmelzen bis zur Innenseite
<b>Lochbildung</b>	Keine Löcher größer als 5 mm in jeder Richtung (in der innersten Schicht)
<b>Wärmestrom</b>	Alle acht Wertepaare ( $E_{\text{it}} - t_{\text{max}}$ ) der beiden Kalorimeter liegen für 4 von 5 „Schüssen“ einer Prüfung (Serie) unter den entsprechenden Grenzen der STOLL-Kurve

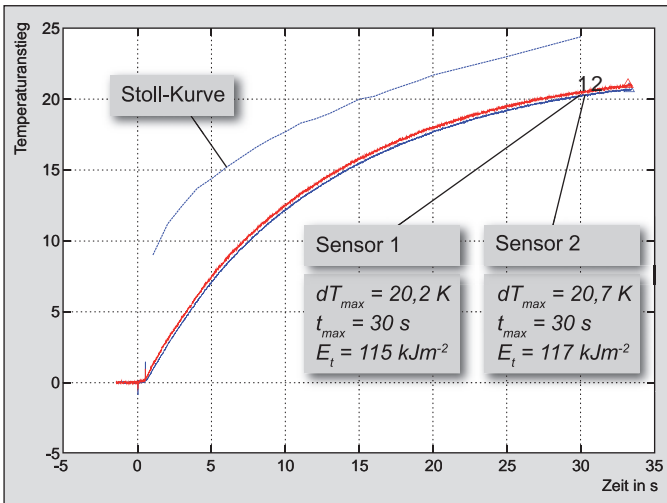
**Tabelle 5.3:** Kriterien für eine bestandene Prüfung

Das Ergebnis der Prüfung ist die Zuordnung des Prüflings zu einer Störlichtbogenklasse (Nachweis des Bestehens der Prüfung unter den Prüfbedingungen der jeweiligen Klasse). Die Prüfung bescheinigt dem Prüfling, dass er je nach eingestellten Prüfbedingungen die Bedingungen der betreffenden Klasse erfüllt (oder nicht erfüllt). Die Prüfung ist bestanden, wenn alle in Tabelle 5.3 genannten Kriterien erfüllt sind. Für einen kompletten Prüfablauf müssen in einer Serie von fünf unter gleichen Bedingungen gezündeten Lichtbögen (Lichtbogen-„Schüsse“) vier Tests bestanden werden.

5 Standardisierte Prüfverfahren für PSA-Produkte gegen die thermischen Gefahren eines Lichtbogens

Bild. 5.4 zeigt als Beispiel das Ergebnis eines Tests der Materialprüfung eines zweilagigen Materialsystems mit einem Gesamtflächengewicht von  $460 \text{ g/m}^2$ . Das Material hat den Boxtest für Klasse 2 bestanden. Anhang 4 zeigt den vollständigen Prüfbericht einer zertifizierten Prüfstelle für ein anderes Textilmaterial, das den Boxtest für Klasse 1 bestanden hat. Es handelt sich dabei um dasselbe Material, das im Arc-Rating-Test des Beispiels im Anhang 3 verwendet wurde.

Die Kleidungsprüfung des Boxtests wird verwendet, um Verhalten, Wirksamkeit und Funktion von Kleidungsstücken einschließlich allen Zubehörs, Nähgarn, Verschlüssen und anderer Ausstattungsteile nach Lichtbogeneinwirkung zu bewerten, ohne den Wärmestrom zu messen. Das Textilmaterial der Kleidung muss zuvor



**Bild 5.4:** Messergebnis einer Prüfung des Boxtests für Klasse 2 eines 2-lagigen Textilmaterialsystems (oben) und Prüflinge vor (links unten) und nach dem Test (rechts unten)

den Material-Boxtest bestehen, und das Kleidungsstück muss die Kriterien für Nachbrennen, Schmelzen und Lochbildung der Tabelle 5.3 erfüllen. Verschlüsse müssen nach dem Test noch funktionstüchtig sein. Zubehör darf keine negativen Auswirkungen auf das Nachbrennen, das Schmelzverhalten und die Lochbildung haben. Die Einwirkenergie wird wegen des Einflusses des Designs der Bekleidung (z.B. Taschen, Klappen, etc.) nicht gemessen.

### **Anwendung der Prüfergebnisse**

Die erforderliche Störlichtbogenklasse der PSA muss durch eine Gefährdungsbeurteilung ermittelt werden. Dazu sind der Erwartungswert der elektrischen Lichtbogenenergie und der Lichtbogenenergie-Schutzpegel für die konkreten Arbeitsplatzverhältnisse zu bestimmen (siehe Kapitel 8).

Im Boxtest wird die PSA – zusätzlich zur Strahlung – auch der Wärmeeinwirkung durch Konvektion (Plasma- und Gaswolke) und Metallspritzer (Elektroden bestehen aus Aluminium und Kupfer) ausgesetzt. Folglich wird die PSA für das betreffende Energieniveau auch im Hinblick auf diese dynamischen und thermischen Auswirkungen geprüft und Schutzwirkung besitzen.

# 6 Textilmaterial und Schutzkleidung

## 6.1 Thermische Lichtbogenschutzanforderungen – IEC 61482-2

Störlichtbögen können vor allem bei elektrotechnischen Arbeiten an oder in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen auftreten und stellen eine generelle Gefahr für Arbeiternehmer dar. Schutzkleidung nach IEC 61482-2 [5] verringert die thermischen Gefährdungen durch Störlichtbögen und trägt so zum Arbeitnehmerschutz bei.

Die Produktnorm IEC 61482-2 beinhaltet Anforderungen und Prüfverfahren für Material und Kleidungsstücke, die als Schutzausrüstung gegen die thermischen Gefahren durch Störlichtbogen zum Einsatz kommen, und legt

- die relevanten allgemeinen Eigenschaften von Textilien, die mit ausgewählten Textilprüfverfahren zu testen sind, und
- die thermischen Lichtbogenschutzeigenschaften wie
  - die Lichtbogenkennwerte des Materials nach IEC 61482-1-1, oder
  - die Störlichtbogen-Schutzklasse des Material und der Kleidung (Klasse 1 oder Klasse 2) nach IEC 61482-1-2

fest.

Die Anforderungen beziehen sich nicht auf die Gefahr eines elektrischen Schlags. Der Standard kann jedoch gemeinsam mit Normen zur Anwendung kommen, die solche Gefährdungen abdecken. Die Norm enthält des Weiteren keine Anforderungen an den Schutz von Kopf, Händen und Füßen.

Textilien und Kleidung, die dem Produktstandard IEC 61482-2 genügen, sind in einem Prüfverfahren getestet worden, in dem ein realer Lichtbogen als Wärmequelle benutzt wird. Das heiße Plasma und Gas in und um die Lichtbogensäule sind die Ursache für den Wärmestrom und die thermischen Einwirkungen. Details zur Wärmeübertragung und den Prüfverfahren nach IEC 61482-1-1 und IEC 61482-1-2 sind in Kapitel 5 zu finden.

Die Norm IEC 61482-2 bezieht sich auf Störlichtbogen-Schutzkleidung im Allgemeinen, unabhängig vom Spannungsniveau, wenngleich die Prüfverfahren mit genau festgelegten Prüfspannungen ablaufen. Die Art und Weise sowie die Intensität der Wärmeübertragung unterscheidet sich bei Störlichtbögen in Nieder-, Mittel- und Hochspannungsanlagen nur in bestimmtem Maße. Für die Hitzequelle sind die elektrische Leistung und die Lichtbogendauer die primären Einflussfaktoren. Kleidung, die der Einwirkenergie der Prüfverfahren widersteht, zeigt in Nieder-, Mittel- und Hochspannungsanlagen eine ähnliche Schutzwirkung gegen Störlichtbögen.



## 6.2 Beurteilungskriterien

### Entflammbarkeit und Flammenausbreitung

Kleidungsstücke, die vor den thermischen Auswirkungen eines Lichtbogens schützen sollen, dürfen die Gefährdung nicht durch Entflammen erhöhen. Daher sollten alle Textilgewebe, die den Anspruch auf Erfüllen der Norm 61482-2 erheben, einen bestimmten Index der Flammenausbreitung (FSI) gemäß ISO 15025 Prozedur A besitzen und nach ISO 14116 klassifiziert sein. Dabei wird nachgewiesen, dass nach einem 10 Sekunden langen direktem Kontakt des Materials mit einer Flamme weder brennende Abbrandpartikel entstehen noch Flammen die Ober- oder Seitenkanten der Probe erreicht haben. Außerdem ist ein mögliches Nachglimmen im unbeschädigten Bereich ausgeschlossen.

Bei einlagigen Kleidungsstücken soll das Material dem FSI 3 genügen. Das heißt, dass über die oben angegebenen Anforderungen hinaus, die Bildung von Löchern ausgeschlossen wird und die Nachbrennzeiten unter 2 Sekunden liegen.

Bei mehrlagigen Kleidungsstücken müssen

- die äußerste und die innerste Schicht des Materials einen FSI 3,
- alle dazwischen liegenden Schichten einen FSI 1 besitzen.

Alle Hauptnähte müssen ein ausreichendes flammhemmendes Verhalten aufweisen. Dazu müssen alle Nähfäden für diese Nähte nach ISO 17493 mit einer Temperatur von 260 °C getestet sein. Des Weiteren dürfen weder von Ausrüstungsteilen noch Verschlüssen ernste Gefahren für den Träger bei Auftreten eines kurzzeitigen Lichtbogens ausgehen. Im Allgemeinen sollten alle Teile des Kleidungsstücks aus thermisch beständigem Material sein.

### Weiterreißfestigkeit und Maßänderung

Neben dem flammhemmenden Verhalten entscheiden auch andere allgemeine textile Eigenschaften über die Sicherheit und Langzeitbeständigkeit der Kleidung. Daher werden in der Norm Minimalanforderungen an die äußeren Materialien der Kleidung gestellt.

Die äußeren Gewebe müssen in der betreffenden Prüfung nach ISO 13937-2 eine Weiterreißfestigkeit von mindestens 15 N (für ein Gewicht über 220 g/m<sup>2</sup>) oder 10 N (für ein Gewicht zwischen 150 g/m<sup>2</sup> und 220 g/m<sup>2</sup>) aufweisen. Die Zugfestigkeit nach ISO 13934-1 muss mindestens 400 N (für ein Gewicht über 220 g/m<sup>2</sup>) oder 250 N (für ein Gewicht zwischen 150 g/m<sup>2</sup> und 220 g/m<sup>2</sup>) betragen. Bei Strickwaren, wie z.B. Polo-Shirts oder Pullovern sind diese Prüfverfahren nicht anwendbar; hier muss die Berstfestigkeit nach ISO 13938-1 mindestens 200 kPa betragen.

Um eine ausreichende Passform bei Einhaltung der Pflegehinweise des Herstellers zu garantieren, wird auch die Formbeständigkeit des äußeren Materials festgelegt. In Übereinstimmung mit ISO 5077 darf das äußere Gewebe eine maximale Formänderung von  $\pm 3\%$  in Maschinenlängs- und -querrichtung erfahren; bei Strickwaren beträgt die Anforderung  $\pm 5\%$ .

### Thermische Lichtbogenbeständigkeit

Da Schutzkleidung nach IEC 61482-2 thermische Lichtbogenschutzeigenschaften besitzen muss, ist das thermische Verhalten bei Lichtbogenexposition die wichtigste Materialanforderung. Um der Norm zu entsprechen, muss ein Prüfstück den Test nach IEC 61482-1-1 und/oder IEC 61482-1-2 bestehen. Die beiden internationalen Prüfverfahren, die in Kapitel 6 beschrieben sind, geben auf unterschiedliche Art und Weise Auskunft über die Schutzwirkung der Kleidung bei einem Lichtbogen. Je nach Bedarf wird sich der Anwender für das eine oder das andere Prüfverfahren entscheiden, wobei sowohl das Material als auch das Kleidungsstück zu testen sind. Für die Zertifizierung von Kleidungsstücken muss sowohl das Material als auch das Kleidungsstück die Anforderungen erfüllen.

Bei Prüfung nach IEC 61482-1-1 wird der Schutzkleidung der ATPV des verwendeten Materials zugeordnet. Eine Schutzkleidung muss mindestens einen ATPV von  $167,5 \text{ kJ/m}^2$  ( $4 \text{ cal/cm}^2$ ) besitzen. Je höher der ATPV desto besser schützt die Ausrüstung gegen die Störlichtbögen mit höherer Einwirkenergie (höhere Ströme, längere Lichtbogendauer). Wenn ein ATPV nicht ermittelt werden kann, ist der Parameter  $E_{BT50}$  zu bestimmen. Der Wert muss ebenfalls mindestens  $167,5 \text{ kJ/m}^2$  ( $4 \text{ cal/cm}^2$ ) betragen.

Bei Prüfung nach IEC 61482-1-2 wird der Kleidung je nach Prüfenergiepegel die Schutzklasse 1 oder 2 des in der Kleidung verwendeten Materials zugeordnet. Die Kleidung muss mindestens die Schutzklasse 1 besitzen; Kleidung der Klasse 2 bietet einen besseren Schutz bei höheren Einwirkenergien.

Neben den gewebebezogenen Anforderungen regelt die IEC 61482-2 auch wichtige Sicherheitsaspekte für die Kleidung. Jedes Kleidungsstück, das den Oberkörper schützen soll, muss lange Ärmel haben. An der exponierten Außenseite sind keine Metallteile erlaubt. Arbeitnehmer müssen den gesamten Körper schützen.

Besteht das Kleidungsstück aus Komfortgründen vorne und hinten (Front und Rücken) aus Materialien unterschiedlicher Lichtbogenschutzeigenschaft, ist die genaue Lage der schlechter schützenden Bereiche anzugeben. Dies kann z.B. durch eine bemaßte Skizze des Kleidungsstücks und einen Warnhinweis in der Bedienungsanweisung erfolgen. Es ist zu beachten, dass solche Kleidungsstücke in allen Bereichen zumindest Schutzklasse 1 nach IEC 61482-1-2 entsprechen oder einen minimalen ATPV von  $167,5 \text{ kJ/m}^2$  ( $4 \text{ cal/cm}^2$ ) nach IEC 61482-1-1 aufweisen. Die

Frontseite der Kleidung und die gesamten Ärmel (rund um den Arm und über die ganze Länge des Arms) müssen die gleiche Schutzwirkung aufweisen.

Es gilt zu beachten, dass die Norm IEC 61482-2 nicht verpflichtend ist. Insbesondere in Europa, wo für den Arbeitnehmerschutz die Anforderungen an jegliche PSA in der Richtlinie 89/686/EEC geregelt sind, bedeutet die Einhaltung der Norm nicht automatisch Konformität zur Richtlinie. Solange jedoch keine andere Beurteilung verfügbar ist, sind die Anforderungen in IEC 61482-2 als die derzeit beste Option anzusehen.

### 6.3 Entflammbarkeit von Textilien

Es ist voranzustellen, dass alle Natur- und auch Chemiefasern brennen können. In der Normung wird deshalb der Begriff „schwer entflammbar“ verwendet. Die Materialien werden vor allem danach charakterisiert, wie sie nach Beendigung einer Beflammung reagieren.

Die thermische Schutzwirkung eines Materials besteht einerseits in der Isolation des Trägers vor der einwirkenden Wärmeenergie und andererseits in einem möglichst schnellen Verlöschen der während der Beflammung entzündeten Materialbereiche (Nachbrennzeit). Letztlich soll die zu schützende Person nicht zusätzlich durch das verwendete Kleidungsmaterial geschädigt werden. Allerdings kann Schutzkleidung keinen absoluten Schutz gegen jede Störlichtbogeneinwirkung bieten. Eine spezielle Kleidung wird immer nur bis zu einem bestimmten Grade schützen.

### 6.4 Empfehlungen für die Auswahl des Materials

Arbeitskleidung aus schwer entflammbarem Material ist grundsätzlich immer dann zu tragen, wenn am Arbeitsplatz ein Störlichtbogen auftreten kann.

Der erforderlichen Schutzkleidung ist auf der Grundlage einer Gefährdungsbeurteilung (siehe Kapitel 8) und der Kenntnis der Schutzpegel der verschiedenen Textilsysteme (thermische Lichtbogenschutzeigenschaften), die nach einer der beiden oben beschriebenen Prüfverfahren getestet sind, auszuwählen.

Als Mindestanforderung gilt, dass an Arbeitsplätzen, an denen Störlichtbogenwirkungen möglich sind, durch die betreffenden Personen Schutzkleidung mit einem ATPV von  $167.5 \text{ kJ/m}^2$  ( $4 \text{ cal/cm}^2$ ), sofern diese nach IEC 61482-1-1 geprüft ist, bzw. der Störlichtbogenklasse 1, sofern nach IEC 61482-1-2 geprüft, zu tragen ist. Das entspricht einem Basisschutz.

Für Arbeiten mit erhöhter Störlichtbogengefährdung sind Kleidungen mit höherem ATPV oder der Störlichtbogenklasse 2 zu wählen (erhöhter Lichtbogenschutz).

Sollten die zu erwartenden Einwirkenergien die Schutzpegel der Kleidung übersteigen, dann ist Schutzkleidung allein nicht ausreichend, den erforderlichen Schutz zu gewährleisten.

Es muss betont werden, dass geprüfte Materialien nicht vor jeder Lichtbogeneinwirkung schützen können. Ein Störlichtbogen ist ein unerwarteter Fehler, dessen Intensität anhand der Netzparameter nur abgeschätzt werden kann. Unsicherheitsfaktoren und zusätzliche Risiken entstehen beispielsweise durch den Abstand oder die Arbeitshaltung, die eine Person beim Arbeiten einnimmt. Die erforderlichen Lichtbogenschutzigenschaften müssen generell durch eine Risikoanalyse bestimmt werden. Anleitung für die richtige Wahl des ATPV wird in separaten Standards, wie z.B. IEEE 1584 [6] und NFPA 70E [7], oder Produktinformationen (z.B. [8]) gegeben. Zur Auswahl von Schutzkleidung, die gemäß IEC 61482-1-2 im Boxtest geprüft ist, wird die zukünftige deutsche BGI/GUV 5188 [9] (wird gegenwärtig erarbeitet) praktische Unterstützung geben (siehe auch 8.3).

Wegen der enormen Vielfalt existierender Gewebe und Maschenware, Laminaten und deren Kombinationen in Materialsystemen ist es schwierig, Mindestmaterialgewichte festzulegen. Auch hat sich in Prüfungen gezeigt, dass gerade bei Materialien mit höheren Schutzigenschaften das Flächengewicht nicht der einzige Einflussparameter ist. Bedeutung besitzen vor allem die Parameter der optimalen Faserauswahl, der Gewebeaufbau und die Anordnung im Materialsystem (siehe auch 6.6). Deshalb muss das gewählte textile System geprüft werden, um den konkreten Lichtbogenschutzpegel festzustellen.

### 6.5 Qualitätssicherung

Die Schutzwirkung eines Textilgewebes gegen die thermischen Wirkungen eines Störlichtbogens hängt von verschiedenen Parametern ab. Die größte Bedeutung kommt der flammhemmenden Eigenschaft zu. Außerdem sind der Gewebeaufbau und das Flächengewicht relevant. Auch bei anderen Serienproduktionen lassen sich in der Herstellung Abweichungen zur geprüften „Musterprobe“ nicht völlig eliminieren. Besonders bei flammhemmend ausgerüsteten Naturfasern kann die Qualität des Gewebes von Produktionsabschnitt zu Produktionsabschnitt variieren.

Gewebe, die einmal die Lichtbogenprüfung bestanden haben, dürfen nicht negativ abschneiden, wenn Proben aus einer anderen Produktion getestet werden. Folglich muss bei schwer entflammaren Materialien kurz nach der Herstellung überprüft werden, ob sich ihre flammhemmenden Eigenschaften verschlechtert haben oder nicht.

Es gibt keine realen alternativen Tests für die Lichtbogenfestigkeit (zerstörende Prüfung), um am Ende der Produktionsphase die Konformität mit den entsprechen-

den Anforderungen überprüfen zu können. Unabhängig davon müssen Gewebe- und auch Kleidungshersteller nachweisen, dass sie bei der Herstellung den gleichen dokumentierten Fertigungsprozess und Materialaufbau verwendet haben, wie bei dem Material und Kleidungsstück, das geprüft wurde.

Die Hersteller müssen dafür geeignete Stichprobenprüfungen entwickeln, so dass eine gleichbleibende Qualität gesichert werden kann. Ebenfalls zu beachten ist die Materialalterung, die im praktischen Gebrauch und durch zahlreiche Waschbehandlungen entsteht. Als entscheidender Parameter der Schutzeigenschaften ist die begrenzte Flammenausbreitung durch den Materialhersteller zu beurteilen und für eine Losgröße zu dokumentieren. Die Losgröße entspricht mindestens der Materialmenge, die an einen Kleidungshersteller geliefert wird; das Minimum ist eine Materialtrommel.

Es muss angemerkt werden, dass es in vielen Ländern sehr restriktive Vorschriften für die Herstellung und den Gebrauch von persönlicher Schutzkleidung gibt. In der Europäischen Gemeinschaft ist zwingend vorgeschrieben, dass persönliche Schutzausrüstungen Typprüfungen (Baumusterprüfung) zu unterziehen sind, bevor sie am Markt platziert werden können. PSA gegen Störlichtbogengefahren sind als Ausrüstungen der Kategorie 3 gemäß PSA-Richtlinie 89/686/EWG anzusehen. Deshalb sind ein Qualitätssicherungssystem oder Stichprobenprüfungen durch ein zertifiziertes Prüflabor gefordert, um die definierten Produkteigenschaften während der Herstellung zu sichern.

### 6.6 Tragehinweise und Empfehlungen zur Reinigung

Schutzkleidung kann nur dann wirksam sein, wenn sie korrekt benutzt und getragen wird. Beim Tragen der Schutzkleidung müssen alle Knöpfe und Verschlüsse geschlossen sein, um potentiellen thermischen Gefahren zu begegnen. Wenn keine schwer entflammare Unterwäsche getragen wird, sollte diese aus Naturfasern bestehen. Schmelzende synthetische nicht-flammfeste Unterwäsche soll nicht erlaubt werden. Unterwäsche, die bei Lichtbogeneinwirkung schmilzt, darf nicht getragen werden.

Alle Teile nicht-flammfester Kleidung müssen durch Lichtbogenschutzkleidung bedeckt sein. Außerdem muss die außen liegende Kleidung schwer entflammbar sein. Nicht-flammfeste Kleidungsstücke (wie Regenkleidung, Jacken, Kälteschutzkleidung etc.) können sich bei Lichtbogeneinwirkung entzünden und nachbrennen, wodurch die Schutzwirkung der Schutzkleidung, die darunter getragen wird, verloren gehen kann.

Oft sind Tragekomfort und ergonomische Aspekte Gründe dafür, dass Schutzkleidung nicht oder nicht korrekt getragen wird. Deshalb sollten die Mitarbeiter möglichst weitgehend in die Auswahl der Kleidung durch Trageversuche bereits vor dem Kauf einbezogen werden. Eine Einbeziehung der Mitarbeiter hat sich sowohl für die Wahl

geeigneter Schutzkleidung als auch im Hinblick auf die Mitarbeiterzufriedenheit als vorteilhaft erwiesen.

Nicht nur der obere Teil des Körpers muss durch Kleidung geschützt werden. Obwohl die beschriebenen Prüfverfahren nicht explizit darauf ausgerichtet sind, Hosen zu prüfen, ist dennoch eine intensive Bewertung der Schutzeigenschaften dieser Kleidungsstücke erforderlich. Dazu ist es wichtig, zum einen das gleiche Material für Hosen und für Jacken zu benutzen. Zum anderen sind die Design-Forderungen der IEC 61482-2 zu erfüllen. Ergibt die Risikoanalyse, dass für den betrachteten Arbeitsplatz eine Schutzkleidung für den oberen Körperbereich ausreichend ist, dann ist der Nutzer für eine geeignete Wahl der Hose selbst verantwortlich. Um Unsicherheiten und mögliche Gefährdungen zu vermeiden, wird empfohlen, einen kompletten Anzug aus Jacke und Hose oder einen Overall zu wählen.

Es kann empfehlenswert sein, auch den Hals durch Kleidung mit Kragen zu schützen.

Schutzkleidung und andere PSA muss vor dem Gebrauch kontrolliert werden. Die Ausrüstungen sind aus dem Verkehr zu ziehen, wenn sie als fehlerhaft befunden werden. Die Schutzwirkung von Lichtbogenschutzkleidung kann durch entflammare Verschmutzungen reduziert oder aufgehoben werden. Es ist unerlässlich, Kleidung regelmäßig zu reinigen, um alle möglichen Verunreinigungen zu entfernen. Die empfohlenen Waschverfahren sind auf den Schutzkleidungsstücken angegeben. Es ist wichtig, dass diese Empfehlungen befolgt werden, um die Schutzeigenschaften des Kleidungsstücks zu erhalten. Darüber hinaus, sollten bei der Reparatur von Kleidungsstücken nur Komponenten verwendet werden, die den Originalbestandteilen mindestens gleichwertig sind. Zusätzliche Reinigungs- und Reparaturhinweise sind von den Herstellern erhältlich.

Die Europäische Richtlinie 89/686/EWG [1] fordert, dass der Hersteller dem Anwender Produktinformationen zur Verfügung stellt. Die Kleidung muss z.B. mit der Herstelleranschrift, der Nummer der Norm, dem Schutzpegel, der Kleidungsgröße, der Wasch- und/oder Reinigungsvorschrift und Hinweisen zu speziellem Komfort und zur Alterung gekennzeichnet sein. Zusätzlich muss jedes Produkt mit einer Gebrauchsanweisung für den Kunden ausgestattet werden, um relevante Informationen zur Art des Gebrauchs, zu Schutzwert oder Schutzklasse, zu Gebrauchseinschränkungen, zu Warnhinweisen, zur Lagerung, zu Reinigung, Dekontamination, Reparatur etc. zu geben.

Es ist wichtig hervorzuheben, dass die Kleidungen normalerweise keine elektrisch isolierende Schutzkleidung nach EN 50286:1999 sind. Darüber hinaus muss der Anwender berücksichtigen, dass ein vollständiger Schutz gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens zusätzlich zur Kleidung geeignete Schutzausrüstungen für den Kopf (Gesichts- und Augenschutz) und die Hände erfordert. Die Ausrüstungen sind ebenfalls mit den gegenwärtig verfügbaren Methoden nach IEC 61482-1-1 oder IEC 61482-1-2 zu prüfen.

## 7 Weitere PSA-Produkte: Handschuhe, Gesichtsschutz



**Bild 7.1:** Prüfaufbau für Schutzhandschuhe in Anlehnung an den Arc-Rating-Test (Quelle: Dehn + Söhne GmbH + Co. KG Neumarkt/Deutschland)

Für andere Komponenten der PSA, wie Schutzhandschuhe, Helme, Gesichtsschirme oder Visiere etc., existieren bisher keine international harmonisierten Normen für Produkthanforderungen und Prüfverfahren.

Prinzipiell eignen sich sowohl der Arc-Rating-Test als auch der Boxtest für die Prüfung von Schutzhandschuhen und Helm-Visier-Kombinationen. Dafür sind Modifikationen im Prüfaufbau (Halterung für die Prüfstücke, Sensoranordnung) erforderlich. Bild 7.1 zeigt den Aufbau, wie er für den Arc-Rating-Test für Schutzhandschuhe verwendet wird. Es wird bereits seit einiger Zeit der Entwurf eines entsprechenden ASTM-Standards diskutiert, der allerdings



**Bild 7.2:** Boxtest-Aufbau für die Handschuhprüfung mit Handschuhhalterungen mit Kalorimetern

noch nicht verabschiedet worden ist [10]. Die Modifikationen im Prüfaufbau des Boxtests für Handschuhe, der ebenfalls bereits angewendet wird, sind in Bild 7.2 zu sehen.

Für die Prüfung von Gesichtsschutzausrüstungen gibt es den ASTM-Standard F 2178 [11], der auf dem Arc-Rating-Test nach IEC 61482-1-1 beruht und den ATPV liefert. In Europa fehlt bisher eine vergleichbare Norm. Mit dem Prüfgrundsatz GS ET-29 [12] ist in Deutschland allerdings eine Grundlage für die Prüfung und Zertifizierung von PSA entstanden; die Lichtbogenprüfung beruht auf dem Boxtest. Die Grundsätze sind darüber hinaus in den deutschen Standardentwurf E DIN 58118 [13] eingeflossen, der die europäische Norm EN 166 [14] ergänzen soll.

PSA sollten auf der Grundlage der international harmonisierten Standards, also entweder in Anlehnung an den Arc-Rating-Test oder den Boxtest, geprüft werden. Dadurch entsteht auch der Vorteil, dass eine komplette PSA zur Verfügung steht, die nach gleichen Prinzipien geprüft und bewertet ist.

Anhang 5 beinhaltet zusätzliche Informationen und Beispiele zur Prüfung von Handschuhen und Gesichtsschutz im Boxtest.



# 8 Risikobeurteilung und Berechnung der Lichtbogengefährdungen

## 8.1 Auswahl der PSA und der Prüfmethode für PSA

Ausgehend von den allgemeinen Präventionsregeln der EU-Richtlinie 89/391/EWG gibt es grundsätzlich eine Hierarchie von Schutzmaßnahmen, die bei der Gefährdungsbeurteilung zu beachten ist. Die Verwendung von PSA steht dabei am Ende dieses hierarchischen Maßnahmenkatalogs; die Schutzmaßnahmen bestehen in folgenden Schritten:

- 1. Vermeidung:** Wenn die Gefährdung beseitigt wird, sind alle anderen organisatorischen Maßnahmen, wie Beurteilung, Dokumentation, Schulung, Überprüfung nicht mehr erforderlich.
- 2. Ersatz:** Wenn die Gefährdung nicht beseitigt werden kann, ist eine geringere Gefährdung anzustreben. Hierzu können Veränderungen im elektrischen System (Aufbau Netz, Anlage) und der Absicherung, der Einsatz anderer Schutzeinrichtungen etc. gehören.
- 3. Reduzierung:** Um gefährdende Einwirkungen auf die Person zu verringern, ist die Zeit zu minimieren, während der sich der Arbeiter im Gefahrenbereich befindet.
- 4. Anpassung:** Wenn möglich, ist die Arbeit an die persönlichen Fähigkeiten anzupassen, indem die individuellen geistigen und körperlichen Fähigkeiten berücksichtigt werden.
- 5. Technischer Fortschritt:** Die Vorteile des technischen Fortschritts, wie Fernsteuerung von Anlagen, z.B. Geräte zur Wiederauswahl nach Fehlern, Überbrückungsgeräte, Fernbedienung von Schaltanlagen/Trennern etc. sind zu nutzen.
- 6. Trennung:** Personen sind räumlich von den Gefahrenquellen zu trennen, entweder durch physikalische Mittel (Schutzvorrichtungen, Schirme, Abdeckungen, Bedienung aus einem getrennten Kontrollraum) oder durch Einhalten eines Schutzabstands.
- 7. Mehrfachmaßnahmen:** Es können mehrere der zuvor genannten technischen und organisatorischen Maßnahmen gleichzeitig genutzt werden. Werden Maßnahmen richtig kombiniert, dann lässt sich das Gefährdungsniveau abschwächen.

- 8. Instandhaltung:** Durch die Einführung bzw. Entwicklung geplanter Wartungs- und Inspektionsabläufe an Anlagen und Ausrüstungen lässt sich ein störungsfreier Betrieb der Komponenten und von Betriebsmitteln wie Schaltern, Leistungsschaltern, Trennern etc. sicherstellen. Dies kann die Entwicklung/ Einführung eines risikobasierten Instandhaltungsprogramms einschließen.
- 9. Schulung:** Allen Mitarbeitern muss bewusst gemacht werden, welche Gefahren beim Betrieb der Anlagen existieren, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um das Risiko zu mindern. Sie müssen über ausreichende Kompetenz verfügen, die erforderlichen Arbeiten auszuführen, und vollständig verstehen, wie Sicherheitsstandards/Richtlinien und Schutzausrüstungen einschließlich PSA einzusetzen und wirksam anzuwenden sind. Das schließt ein, dass Mitarbeiter wissen, wie die eigene PSA zu handhaben ist.
- 10. Persönliche Schutzausrüstung:** Dies sollte das letztes Mittel sein, das eingesetzt wird, nachdem alle anderen Maßnahmen in Betracht gezogen und/oder umgesetzt wurden. Sämtliche PSA muss nach den jeweils gültigen Normen gestaltet und in der Lage sein, den Einzelnen in angemessener Weise vor Verletzungen zu schützen. PSA muss in Übereinstimmung mit der Gebrauchsanweisung des Herstellers getragen, gepflegt und gereinigt werden.
- 11. Notmaßnahmen:** Wie Alarmsysteme und Reserveschutzmaßnahmen. Sie treten in Kraft, wenn alles andere versagt, und sind auf die Schritte zu richten, die beim Eintreten eines Ereignisses zu tun sind, damit die Folgen des Ereignisses auf die Person minimiert werden.

Bei Arbeiten unter Spannung oder bei Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile ist PSA erforderlich.

Die Bereitstellung von PSA durch den Arbeitgeber ist ebenso wie deren Nutzung durch den Arbeitnehmer durch nationale oder internationale Gesetze vorgeschrieben. Dementsprechend muss die bereit gestellte PSA Schutz gegen die abzuwendende Gefahr bieten, ohne dabei ein noch größeres Risiko zu verursachen. PSA muss sich für die am Arbeitsplatz bestehenden Bedingungen eignen, und die ergonomischen und gesundheitlichen Anforderungen des Mitarbeiters abdecken. Die Mitarbeiter sind verpflichtet, die bereitgestellte persönliche Schutzausrüstung korrekt anzuwenden.

Als Ergebnis der PSA-Prüfverfahren werden Schutzpegel in Form der Einwirkenergie (ATPV) oder der elektrischen Lichtbogenenergie (Störlichtbogenklasse) bestimmt, auf deren Grundlage PSA ausgewählt werden muss. Der Anwender von PSA ist folglich mit der Notwendigkeit konfrontiert, mit diesen Energiewerten umzugehen. Um diesbezüglich Unterstützung zu schaffen, sind verfügbare Informationen in Verfahren umgesetzt worden, die nachfolgend beschrieben werden.

Entsprechend den beiden unterschiedlichen Lichtbogenprüfverfahren gibt es folglich auch zwei getrennte Wege der Auswahl der PSA: PSA, geprüft im

- Arc-Rating-Test: wird auf Basis der Bestimmung der Einwirkenergie ausgewählt
- Box-Test: wird auf Basis der Bestimmung der elektrischen Lichtbogenenergie ausgewählt,

die an den betrachteten Arbeitsplätzen zu erwarten ist. Die Methoden zur Ermittlung dieser Erwartungswerte sind entweder auf die eine oder die andere Art der Lichtbogenprüfung zugeschnitten und für die jeweils zugehörige Art der Wärmeübertragung parametrisiert. Deshalb kann es zu Fehlinterpretationen kommen, wenn die Zusammenhänge nicht beachtet werden und beispielsweise die Bestimmung der Einwirkenergie benutzt wird, um PSA auszuwählen, die im Boxtest geprüft ist.

In Abschnitt 8.2 sind die Verfahren zur Auswahl von PSA dargestellt, die im Arc-Rating-Test geprüft wurden. Die Methode, die anzuwenden ist für PSA, die auf der Grundlage des Boxtests klassifiziert wurde, wird im Abschnitt 8.3. betrachtet.

### 8.2 Bestimmung der Einwirkenergie für die Wahl des ATPV

Es sind international anerkannte Standards geschaffen worden, um Unternehmen sowohl in der Ermittlung der Gefährdungen, die mit einem Lichtbogen verbunden sind, als auch in der Wahl der richtigen PSA für den Arbeitnehmer zu unterstützen.

#### **NFPA 70E** – *Standard für elektrische Sicherheit am Arbeitsplatz*

NFPA 70E definiert sichere Arbeitsverfahren für Elektriker. In diesem Standard werden die Methoden der Gefahren- und Risikoanalyse und Schutzmaßnahmen diskutiert. Der Standard verlangt, dass eine Lichtbogen-Gefährdungsanalyse für Arbeiten an oder in der Nähe unter Spannung stehender Anlagen durchgeführt wird. Diese Analyse ist darauf ausgerichtet, sowohl die erforderliche persönliche Schutzausrüstung als auch den Lichtbogenschutzbereich um die Anlage zu bestimmen, in dem die PSA zu tragen ist.

Es gibt im Wesentlichen drei Methoden der Risikoanalyse, die diskutiert werden.

1. Eine detaillierte Risikoanalyse, die die Einwirkenergie berechnet, die durch einen Störlichtbogen verursacht wird:  
Bei dieser Methode werden zunächst die Netz- und Anlagenparameter und die Art des Betriebs ermittelt. Als nächstes werden die prospektiven (metallischen) Kurzschlussströme berechnet und die zugehörigen Lichtbogenströme abgeschätzt. Dabei ist zu beachten, dass die Lichtbogenströme stark von den Schutzeinrichtun-

gen und den resultierenden Lichtbogendauern abhängig sind. Ausgehend davon wird zusammen mit der Netzspannung, der Anlagenkonfiguration und den Arbeitsabständen die entstehende Einwirkenergie (in  $\text{cal}/\text{cm}^2$ ) berechnet. Die Berechnungsmethoden und Gleichungen sind sowohl im Standard NFPA 70E als auch im Leitfaden IEEE 1584 verfügbar. Die richtige PSA wird so ausgewählt, dass die Lichtbogenkennwerte der PSA gleich oder größer als die daraus resultierenden berechneten Einwirkenergien sind.

2. Beispiele für Arbeitsaufgaben sind in tabellarischer Form angegeben: Die Arbeitsaufgaben sind sowohl nach der Art der Anlage als auch nach der Netzspannung unterteilt. Für jede Aufgabe ist eine damit verbundene Gefährdungskategorie (Hazard Risk Category HRC) angegeben. Der HRC-Pegel entspricht dem Mindestlichtbogenkennwert der Schutzkleidung, die für die betreffende Arbeitsaufgabe zu tragen ist. Für andere PSA wird ebenfalls spezifische Anleitung in Form zusätzlicher Tabellen gegeben, wie die HRC zu erreichen sind.
3. Ein vereinfachter Zwei-Kategorien-Ansatz basierend auf der Arbeitsaufgaben-Matrix, in der die PSA-Auswahl ausschließlich auf Grundlage der Netzspannung erfolgt: Mit wenigen Ausnahmen kann HRC-2-Kleidung für Netzspannungen unter 1000 Volt und HRC-4-Kleidung für Arbeitsaufgaben über 1000 Volt empfohlen werden.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Grenze des Lichtbogen-Schutzbereichs in jeder der 3 optionalen Methoden bestimmt werden muss. Wenn in der Lichtbogen-Schutzzone gearbeitet wird, muss Schutzkleidung getragen werden. Die Methoden 2 und 3 sind sehr nützlich für Unternehmen mit sehr unterschiedlichen elektrischen Anlagen.

### **IEEE 1584 – IEEE-Leitfaden für die Durchführung von Berechnungen der Lichtbogengefährdung**

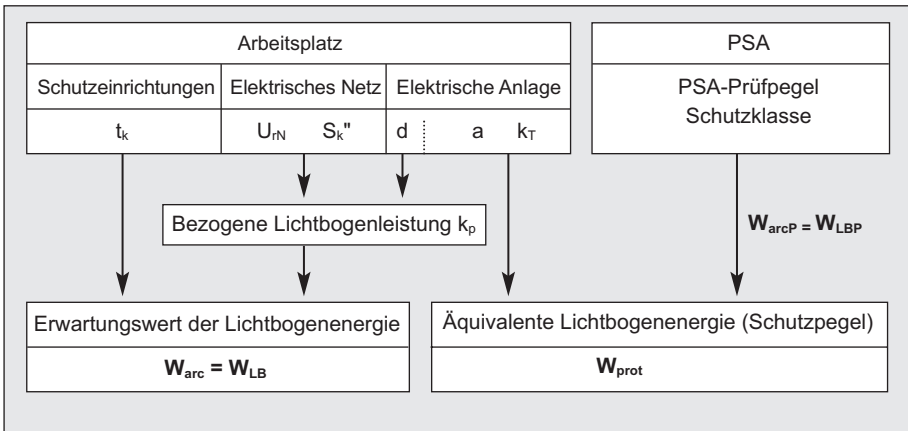
Dieser Standard definiert eine Methodik zur Durchführung einer detaillierten Lichtbogen-Gefährdungsanalyse. Für jeden Teil der Anlagen eines elektrischen Netzes müssen Angaben, wie z.B. die Netzspannung, die Kurzschlussströme, die mögliche Kurzschlussdauer und die Arbeitsabstände ermittelt werden, um die zu erwartende Einwirkenergie (in  $\text{cal}/\text{cm}^2$ ) und den Lichtbogen-Schutzbereich zu bestimmen.

### **8.3 Berechnung der zu erwartenden und äquivalenten Lichtbogenenergie für die Auswahl der Boxtest-Schutzklasse**

Die Auswahl der PSA oder der Boxtest-Klasse für entsprechende Prüfungen erfordert eine Risikoanalyse, in der die elektrische Lichtbogenenergie  $W_{arc}$ , die am betrachteten Arbeitsplatz zu erwarten ist, ebenso zu bestimmen ist, wie die äquivalente

Lichtbogenenergie  $W_{prot}$ , die den Schutzpegel der PSA unter den Bedingungen der betreffenden Arbeitshandlungen kennzeichnet (siehe Ablaufschema in Bild 8.1).

Die zu erwartende Lichtbogenenergie  $W_{arc} = W_{LB}$  ist von den Netzverhältnissen abhängig, d.h. von der Kurzschlussleistung des Netzes  $S_k$  an den möglichen Fehlerstellen und von der Kurzschlussdauer  $t_k$ , die durch die elektrischen Schutzeinrichtungen (Ausschaltzeit der Schalter, von Sicherungen, von gegebenenfalls vorhandenen speziellen Schutzgeräten) bestimmt wird und den Ausschaltkennlinien zu entnehmen ist. Darüber hinaus hängt sie von den Schaltanlagen-Bedingungen ab, die durch den Faktor  $k_p$  charakterisiert werden. Der Faktor drückt die bezogene Lichtbogenleistung aus und berücksichtigt die Art der Brennverhältnisse des Störlichtbogens und die Elektrodengeometrie am Fehlerort. Der Faktor kann näherungsweise ausgehend von der Lichtbogenspannung anhand von Bild A1 im Anhang 1 ermittelt werden [15]. Für eine sehr grobe Abschätzung kann auf eine Betrachtung der Anlagengeometrie verzichtet werden, indem die Maximalwerte der Kurven für  $k_p$  benutzt werden. Außerdem sind in Bild A1 Wertebereiche angegeben, die für viele typische Anlagenkonfigurationen zutreffend sind und ebenfalls als Richtwerte angewendet werden können. In den beiden letztgenannten Fällen wird der erhöhte Aufwand der Berücksichtigung von Parametern der Anlagengeometrie auf Kosten der Genauigkeit umgangen.



**Bild 8.1:** Überblick über die Parameter und die Verfahrensweise zur Risikoanalyse im Zusammenhang mit im Boxtest geprüfter PSA

Der maximale Wert der Lichtbogenenergie, die im betrachteten Fall zu erwarten ist, wird mit dem Schutzpegel  $W_{prot}$  (äquivalente Lichtbogenenergie) verglichen. Die äquivalente Lichtbogenenergie ist der Energielevel, bei dem der Schutzeffekt der PSA bei definiertem Arbeitsabstand  $a$  noch besteht (siehe Tabelle 8.1).

Klasse	Grad des Schutzes	Prüfpegel $W_{arcP}$	Schutzpegel $W_{prot}$
1	Basisschutz	158 kJ	$(1 \dots 2,4) \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2 \cdot 158 \text{ kJ}$
2	Erhöhter Schutz	318 kJ	$(1 \dots 2,4) \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2 \cdot 318 \text{ kJ}$

**Tabelle 8.1:** Schutzpegel von PSA, die im Box-Test geprüft ist

Die PSA-Prüfpegel  $W_{arcP} = W_{LBP}$  gelten für die Wärmeübertragungsbedingungen und den Wirkabstand von  $a = 300 \text{ mm}$  des Prüfaufbaus des Boxtests. Für abweichende Verhältnisse lässt sich eine äquivalente Lichtbogenenergie mit Hilfe von

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

als Schutzpegel bestimmen.  $W_{arcP}$  ist der Prüfpegel der Lichtbogenenergie nach Tabelle 5.2. Der Faktor  $k_T$  berücksichtigt den Aufbau der elektrischen Anlage, vor allem das Volumen des geöffneten Bereichs (Fach), in dem der Störlichtbogen voraussichtlich brennt. Als Standardwert und besonders für kleinräumige Konstruktionen mit Seiten- und Rückwänden und geringem Volumen (Hausanschlusskästen, Verteiler etc.) beträgt dieser Faktor  $k_T = 1$ , für größere potentielle Brennräume (z. B. einer Begrenzung hauptsächlich durch Rückwände) kann er zwischen 1,5 und 1,9 angenommen werden und im Fall von offenen Lichtbögen als 2,4.

Der Anhang 6 enthält eine detaillierte Anleitung für die Risikoanalyse. Ferner sind praktische Beispiele dargestellt.

Ein **Basisschutz gegen Störlichtbögen** ist grundsätzlich immer notwendig und bereitzustellen, wenn bei elektrotechnischen Arbeiten im Arbeitsumfeld die Gefahr eines Störlichtbogens und einer Lichtbogeneinwirkung besteht. In den Fällen, in denen Arbeiten mit Störlichtbogenrisiko häufiger ausgeführt werden oder an Anlagen höheren Leistungsniveaus stattfinden, ist ein **erhöhter Lichtbogenschutz** notwendig. Die Entscheidung für den einen oder den anderen Grad des Schutzes ist auf der Grundlage des Vergleichs der Lichtbogenenergien zu treffen.

Anhang 7 enthält eine Übersicht über Tätigkeiten in verschiedenen Niederspannungsanlagen ( $U_n = U_{rn} \leq 1000 \text{ V}$ ) mit den Verweisen auf die erforderliche PSA.

Klasse 1	$a = 300 \text{ mm} \sqrt{\frac{k_p \cdot U_n \cdot I_{k3p} \cdot t_k}{(1 \dots 2, 4) \cdot 91 \text{ kJ}}}$
Klasse 2	$a = 300 \text{ mm} \sqrt{\frac{k_p \cdot U_n \cdot I_{k3p} \cdot t_k}{(1 \dots 2, 4) \cdot 184 \text{ kJ}}}$

**Tabelle 8.2:** Die Mindestarbeitsabstände (Störlichtbogen-Grenzen)

Andererseits muss im Falle bestimmter Arbeitshandlungen und extremen Lichtbogenrisiken und/oder Anlagenleistungen der konkrete Anwendungsfall dahingehend beurteilt werden, ob Arbeiten unter Spannung oder Arbeiten an geöffneten Anlagen zulässig sind oder die PSA spezielle Anforderungen erfüllen muss. Wird der Schutzpegel der PSA für erhöhten Schutz durch die erwarteten Lichtbogenenergien überschritten, dann gibt es folgende praktische Alternativen:

- Reduzierung der Lichtbogendauer mit geeigneten Schutzeinrichtungen (z.B ultra-schnellen Sicherungen, speziellen Lichtbogenerkennungs- und Löscheinrichtungen)
- Arbeitsanweisungen zur Einhaltung von Mindestarbeitsabständen (siehe Tab. 8.2)
- Prüfung der PSA auf höhere Energieniveaus
- Verbieten der betreffenden Arbeitshandlungen bzw. Tätigkeiten.

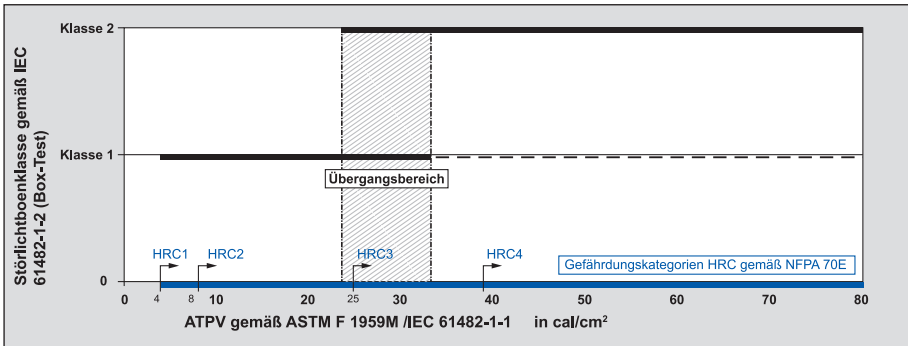
#### 8.4 Empirische Beziehung zwischen ATPV und Box-Test-Schutzklasse

Die Prüfverfahren nach IEC 61482-1-1 und IEC 61482-1-2 unterscheiden völlig in ihren Prinzipien und technischen Eigenschaften. Es gibt allerdings einen gemeinsamen Punkt: die Messung der Einwirkenergie mit Hilfe von Kalorimetern und deren Bewertung anhand des Stoll-Chianta-Kriteriums für Hautverbrennungen zweiten Grades [2].

Es gibt keine mathematisch-physikalische Umrechnungsmöglichkeit der Ergebnisse der beiden Prüfverfahren wegen der technischen Verfahrensunterschiede. Eine Korrelation kann jedoch empirisch erfolgen.

Eine rein empirische Korrelation von Prüfergebnissen wurde für typische Gewebe vorgenommen, die sowohl im Arc-Rating-Test als auch im Boxtest geprüft wurden. Bild 8.2 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang für typische Aramid-Gewebe und schwer entflammbare Baumwolle. Verallgemeinernd lässt sich diesbezüglich festhalten, dass die Störlichtbogenklasse 2 des Boxtests sicher nur durch Gewebe erreicht wird, die einen ATPV > 30 cal/cm<sup>2</sup> besitzen.

Störlichtbogenklasse 1 bedeutet, dass ein ATPV = 4 ... 30 cal/cm<sup>2</sup> erforderlich ist. Der Bereich zwischen ca. 24 ... 34 cal/cm<sup>2</sup> ist ein Übergangsbereich, wo Klasse 2 je nach den spezifischen Gewebeeigenschaften bestanden oder auch nicht bestanden wird. Beide Störlichtbogenklassen des Boxtests decken jeweils große ATPV-Bereiche ab.



**Bild 8.2:** Empirische Beziehung zwischen ATPV und der Störlichtbogenklasse für typische Gewebe und Gewebesysteme zum Schutz gegen Störlichtbögen aus Aramidfasern und schwer entflammbarer Baumwolle (basierend auf [8] und Testergebnisse von Kinectrics, Toronto, und STFI, Bonn)

Die Informationen des Bildes 8.2 dürfen nicht dazu verwendet werden, Materialien einzustufen, die nicht geprüft wurden. Die Korrelationsbetrachtungen sind ausschließlich zu einer groben Abschätzung und Orientierung gedacht, nicht jedoch als Ersatz tatsächlicher Prüfungen oder zur Ableitung von Entscheidungen zur PSA-Auswahl. Wenn ein Textilprodukt tatsächlich bewertet werden muss, so ist die entsprechende Prüfung durchzuführen.

Verschiedene Textilmaterialien besitzen natürlich auch ihre spezifische Korrelation. Die „Verallgemeinerung“ in Bild 8.2 bezieht sich nur auf einen begrenzten Umfang von Textilmaterialien der bezeichneten Art und stellt den gegenwärtigen Erkenntnisstand dazu dar. Er ist insbesondere nicht übertragbar auf andere PSA. Im Falle von Gesichtsschutzschirmen bestehen beispielsweise völlig andere Verhältnisse.



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Direktive 89/686/EWG – Richtlinie des Europäischen Rates für die Harmonisierung der Bestimmungen der EU-Länder für Persönliche Schutzausrüstungen (PSA-Richtlinie)
- [2] STOLL, A.M.; CHIANTA, M.A.: Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection, Aerospace Medicine, Bd. 40, 1968, S. 1232-1238
- [3] IEC 61482-1-1:2009: Live working – Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc – Part 1 Test methods, Part 1-1 Determination of the arc rating (ATPV or EBT50) of flame-resistant textile materials. (ebenfalls veröffentlicht als EN 61482-1-1:2009 und VDE 0682-306-1-1: Arbeiten unter Spannung – Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines elektrischen Lichtbogens – Teil 1 Prüfverfahren, Teil 1-1 Bestimmung der Lichtbogenkennwerte (ATPV oder EBT50) von schwer entflammaren Textilmaterialien)
- [4] IEC 61482-1-2:2007 Live working – Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc – Part 1 Test methods, Part 1-2 Determination of the arc protection class of textile material and clothing by using a directed and constrained arc (box test). (ebenfalls veröffentlicht als EN 61482-1-2:2007 und VDE 0682-306-1-2: Arbeiten unter Spannung – Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines elektrischen Lichtbogens – Teil 1 Prüfverfahren, Teil 1-2 Bestimmung der Lichtbogenschutzklasse von Textilmaterialien und Kleidung mit Hilfe eines gerichteten Prüflichtbogens)
- [5] IEC 61482-2:2009: Live working – Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc – Part 2 Requirements (Arbeiten unter Spannung – Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines elektrischen Lichtbogens – Teil 2 Anforderungen)
- [6] IEEE 1584-2002: Guide for Arc Flash Hazard Calculations
- [7] NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace, National Fire Protection Association, Ausgabe 2009
- [8] Superior Protection against Thermal Hazards – DuPont™ Nomex® Applications for Industrial Workers, Firmenschrift DuPont, 2008
- [9] BGI/GUV-I 5188: Unterstützung bei der Auswahl der Persönlichen Schutzausrüstung bei Arbeiten in elektrischen Anlagen. Berufsgenossenschaftliche Information (in Vorbereitung, Veröffentlichung 2011 vorgesehen 2011)

- [10] Arbeitsentwurf ASTM WK14928: New Test Method for Determining the Arc Rating of Gloves 1 (in Diskussion)
- [11] ASTM F2178–2008: Standard Test Method for Determining the Arc Rating and Standard Specification for Face Protective Products
- [12] GS-ET-29: Prüfgrundsatz „Elektriker-Gesichtsschutz“ – Ergänzende Anforderungen an die Prüfung und Zertifizierung von Gesichtsschutz für elektrische Arbeiten. Herausgeber: BG-PRÜFZERT Köln 2008-02 und 2010-02
- [13] E DIN 58118: Augen- und Gesichtsschutz gegen Störlichtbögen, Entwurf 2010-12
- [14] EN 166: 2001: Personal eye protection – Requirements (Persönlicher Augenschutz – Anforderungen)
- [15] SCHAU, H.; HALINKA, A.; WINKLER, W.: Elektrische Schutzeinrichtungen in Industrienetzen und -anlagen. Hüthig & Pflaum Verlag München/Heidelberg 2008

# Anhang 1

## Bestimmung der Lichtbogenleistung und Lichtbogenenergie

Die elektrische Lichtbogenenergie wird durch den Leistungsumsatz in allen Teillichtbögen bestimmt, die an dem Fehler beteiligt sind:

$$W_{\text{arc}} = W_{\text{LB}} = \int_0^{t_k} \sum_V u_{\text{LB}} \cdot i_{\text{LB}} \cdot dt = P_{\text{LB}} \cdot t_k.$$

Sie hängt von der Gesamtwirkleistung  $P_{\text{LB}}$  und der Lichtbogendauer  $t_k$  ab. Im Falle eines 3-poligen Lichtbogenfehlers beträgt die Lichtbogen-Wirkleistung

$$P_{\text{arc}} = P_{\text{LB}} = k_P \cdot S_k''$$

und ist einerseits von der Kurzschlussleistung (3-polig) des elektrischen Netzes

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3p}$$

abhängig. Andererseits wird die Lichtbogenleistung durch

- den elektrischen Stromkreis (Netz)
  - Netzspannung  $U_n = U_{rN}$ ,
  - Kurzschlussstrom  $I''_{k3p}$ ,
  - Verhältnis Resistanz/Reaktanz der Netzimpedanz  $R/X$
- und die elektrische Anlage (Aufbau): Leiterabstand  $d$

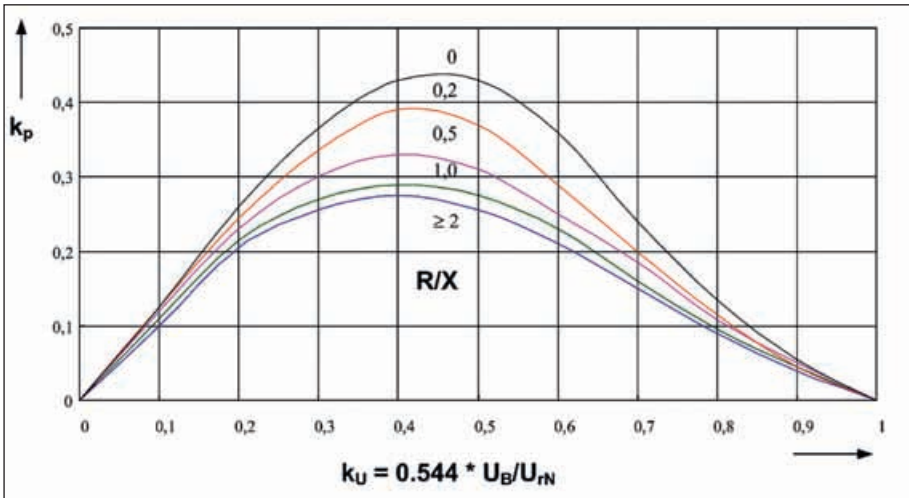
bestimmt. Dies wird durch den Parameter

$$k_P = P_{\text{LB}} / S_k''$$

ausgedrückt. Der Parameter  $k_P$  ist die bezogene Lichtbogenleistung, der vereinfacht durch die Kurvenverläufe in Bild A1.1 angenähert werden kann. Er stellt eine Funktion der Lichtbogenspannung

$$U_B = f(d; I''_k; U_{rN}; R/X)$$

dar, und ist somit eine Funktion des Elektrodenabstands, der durch den Leiterabstand  $d$  und die Gestaltung der elektrischen Anlage bestimmt wird. Empirische Gleichungen zur Bestimmung der Lichtbogenspannung sind in der Fachliteratur gegeben, z. B. in [15]; es sind spezielle Kenntnisse erforderlich, unter anderem in Bezug auf den Anlagenbau.



**Bild A1.1:** Bezogene Lichtbogenleistung  $k_p$  für 3-polige Lichtbogenkurzschlüsse

Für eine grobe Abschätzung ohne Berücksichtigung der Schaltanlagegeometrie können die Maximalwerte der  $k_p$ -Kurven verwendet werden. Die maximalen Werte der normierten Lichtbogenleistung  $k_{pmax}$  lassen sich mit

$$k_{pmax} = 0.29 \cdot (R/X)^{-0.17}$$

berechnen. Tab. A1.1 zeigt diese Werte für eine Worst-Case-Betrachtung. Praktische Erfahrungen haben darüber hinaus gezeigt, dass die bezogene Lichtbogenleistung oft in Wertebereichen liegt, die ebenfalls in Tab. A1.1 angegeben sind und als Richtwerte dienen können. Im Falle von Niederspannungsanlagen ist der betreffende Bereich der Richtwerte für Anlagen mit kleineren Leiterabständen  $d$  typisch ( $d \leq 40$  mm für Anlagen in der Nähe der Trafostation und  $d \leq 70$  mm für Anlagen in Abnehmernähe).

Folglich kann die Bestimmung der Lichtbogenleistung

- unter Berücksichtigung der Anlagegeometrie (relevante Elektrodenabstände  $d$ ),
- auf der Grundlage von Richtwerten oder
- mit Hilfe der Maximalwerte der bezogenen Lichtbogenleistung

erfolgen. Die Annäherung an die tatsächlichen Werte wird in der Reihenfolge dieser Aufzählung schlechter, es erhöhen sich die Sicherheitsabstände. Bei Anwendung sowohl der Maximalwerte als auch der Richtwerte werden die Probleme, Kenntnis

von den Geometrieverhältnissen der Anlagen besitzen zu müssen, auf Kosten der Genauigkeit umgangen.

Die Anwendung des Berechnungsverfahrens wird in 8.5. gezeigt.

Maximalwerte		Richtwerte		
R/X	$k_{Pmax}$	Netzspannung	$k_P$	Gültigkeitsbereich
< 0.1	0.45	NS ( $\leq 1000$ V)	0.22...0.27	Für $d \leq 40$ mm bei Anlagen in der Nähe von Transformatoren; für $d \leq 70$ mm bei Anlagen in Abnehmernähe
0.1	0.43			
0.2	0.38			
0.5	0.33			
1.0	0.29			
2.0	0.26	MS ( $> 1000$ V)	0.04...0.10	
$\geq 0.2$	0.25			

**Tabelle A1.1:** Maximalwerte und Richtwerte der bezogenen Lichtbogenleistung

# Anhang 2

## Thermische Lichtbogenkenngrößen – Definitionen und Begriffe

### Lichtbogenleistung $P_{LB}$

ist die Gesamtwirkleistung aller Lichtbögen, die während der Lichtbogendauer am Fehler beteiligt sind und von den betreffenden Lichtbogenströmen und Lichtbogen-  
spannungen bestimmt wird. Sie ist der Mittelwert des Produktes aus Lichtbogenstrom  
und Lichtbogenspannung. Als normierte Größe  $k_P$  ist sie auf die Kurzschlussleistung  
bezogen und kann mit Hilfe der elektrischen Stromkreisparameter Netzennspannung  
 $U_{rN}$  und prospektiver Kurzschlussstrom  $I_{K'}$  (siehe Anhang 1) ermittelt werden<sup>1</sup>.

### Lichtbogenenergie $W_{LB}$

ist die elektrische Energie (in kW<sub>s</sub> oder kJ), die während des Fehlers eingespeist und  
in den Störlichtbögen umgesetzt wird. Sie ist das Produkt aus Lichtbogenwirkleistung  
 $P_{LB}$  und Lichtbogendauer  $t_{arc}$  (Kurzschlussdauer  $t_K$ ), das als Integral (Summe) des  
Produktes der Momentanwerte der Lichtbogenspannung  $u_{arc}$ , des Lichtbogenstroms  
 $i_{arc}$  und des Zeitschritts  $d_t$  über die Lichtbogendauer bestimmt wird.

### Einwirkenergie $E_i$

ist die gesamte Wärmeenergie pro Flächeneinheit (in kJ/m<sup>2</sup> oder kW<sub>s</sub>/m<sup>2</sup> oder  
cal/cm<sup>2</sup>)<sup>2</sup> die infolge eines elektrischen Lichtbogens an einer Oberfläche auftritt. Es  
ist zwischen direkter Einwirkenergie und Durchgangsenergie zu unterscheiden. In  
Prüfungen wird sie mit Hilfe von Kupferkalorimetern gemessen.

Die **direkte Einwirkenergie  $E_{i0}$**  ist die Wärmeenergie, die direkt vom Licht-  
bogen ausgeht, ohne dass Einflüsse durch PSA bestehen. Sie wird wirksam, wenn  
keine PSA verwendet wird. Die zur Messung eingesetzten Kalorimeter sind dem  
Lichtbogen direkt ausgesetzt.

Die **Durchgangsenergie  $E_{it}$**  ist die Wärme, die in der Prüfung auf der Rückseite der  
PSA gemessen wird und wirksam ist, wenn PSA verwendet wird. Sie ist jener Teil der  
gesamten frei gesetzten Wärmeenergie (direkte Einwirkenergie), die durch die PSA  
hindurch geht.

1 Der tatsächlich während der Lichtbogendauer durch den Lichtbogen fließende Lichtbogenstrom ist wegen der nichtlinearen  
Lichtbogenimpedanz auch stochastischen zeitlichen Änderungen unterworfen. Wegen dieser Impedanz gibt es einen Unter-  
schied zwischen Lichtbogenstrom und dem prospektiven Kurzschlussstrom  $I_{K'}$ ; der Effektivwert des Lichtbogenstroms  $I_{arc}$  ist  
kleiner als  $I_{K'}$ . Der prospektive Kurzschlussstrom fließt, wenn die Lichtbogenelektroden durch eine metallische Verbindung von  
vernachlässigbarer Impedanz überbrückt sind (metallischer Kurzschluss). Der prospektive Kurzschlussstrom kennzeichnet die  
elektrische Umgebung des Störlichtbogens (Netz) eindeutig. Der Prüfstrom  $I_P$ , der bei Prüfungen von PSA im elektrischen  
Prüfkreis eingestellt wird, ist ebenfalls als prospektiver Kurzschlussstrom angegeben, da nur auf diese Weise reproduzierbare  
Testbedingungen definiert und hergestellt werden können.

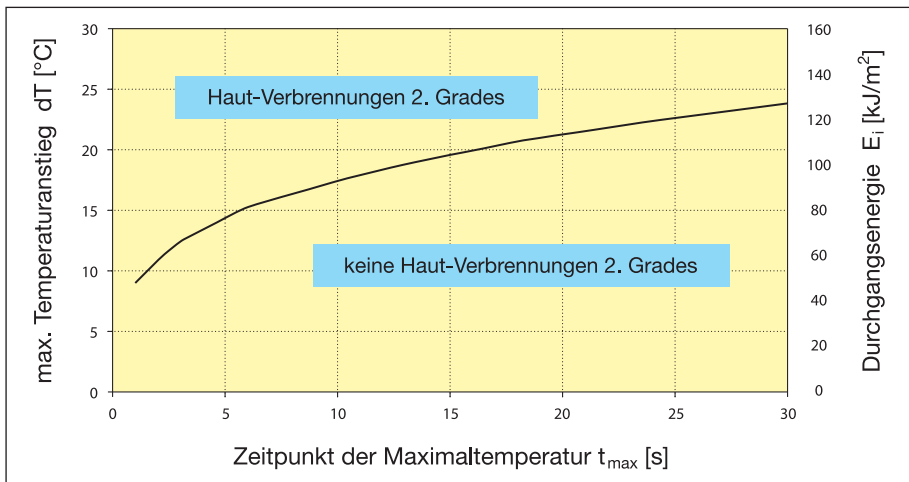
2 kJ/m<sup>2</sup> und kW<sub>s</sub>/m<sup>2</sup> sind äquivalente Einheiten. Die Umrechnung in cal/cm<sup>2</sup> erfolgt über: 1 cal/cm<sup>2</sup> = 41.868 kJ/m<sup>2</sup>; 1 kJ/m<sup>2</sup> =  
0,0023885 cal/cm<sup>2</sup>.

### Stoll-Kriterium/Stoll-Kurve

ist eine Grenzkurve für den Zusammenhang zwischen thermischer Energie und Zeitdauer, der aus Daten für das Verhalten der menschlichen Haut bei Hitzeeinwirkung abgeleitet ist und verwendet wird, um das Entstehen einer Verbrennung zweiten Grades vorherzusagen [2]. Die Beziehung wird beschrieben durch

$$E_{i\text{Stoll}} = 50.204 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot t_{\text{max}}^{0,2901}$$

(siehe Bild A2.1). Die Grenzkurve wird als Kriterium verwendet, ob eine Person gegen unzulässige Hautverbrennungen geschützt ist oder nicht, und dient somit der Beurteilung, ob eine PSA-Prüfung aus Sicht des Wärmedurchgangs bestanden ist oder nicht.



**Bild A2.1:** Stoll-Kurve - Kriterium für das Auftreten von Hautverbrennungen zweiten Grades nach [2]

### Thermische Lichtbogenschutzwirkung

ist die nachgewiesene Eigenschaft der PSA, thermische Lichtbogenbeständigkeit (thermische Lichtbogenfestigkeit) zu besitzen und Hautverbrennungen 2. Grades zu verhindern. Er ist der Grad des thermischen Schutzes gegen elektrische Lichtbögen, der unter bestimmten Prüfbedingungen geboten wird. Prüfungen können in Form des Arc-Rating-Tests mit offenem Prüflichtbogen [3] oder als Box-Test mit gerichtetem Prüflichtbogen [4] erfolgen.

### **Thermische Lichtbogenbeständigkeit**

ist die Fähigkeit der PSA, den thermischen Wirkungen eines elektrischen Störlichtbogens zu widerstehen. Kriterien sind: Entflammen und Nachbrennen (Nachbrennzeit), Aufbrechen und Lochbildung, Schmelz- und Durchschmelzen, Verkohlen, Schrumpfen, Abtropfen, Versprödung.

### **Lichtbogenkenngröße**

ist das Ergebnis des Arc-Rating-Tests. Sie wird als ATPV oder  $E_{BT50}$  bestimmt und gibt den Einwirkenergiepegel an, bis zu dem PSA, die mit einem offenen Lichtbogen geprüft wurde, thermischen Lichtbogenschutz bietet.

### **ATPV**

ist eine thermische Lichtbogenkenngröße. Sie ist eine Materialeigenschaft der PSA, die das Ergebnis eines PSA-Tests mit einem offenen Prüflichtbogen (Arc Rating-Test) darstellt. Sie ist die direkte Einwirkenergie eines offenen Lichtbogens, die infolge der PSA eine Durchgangsenergie bewirkt, die dem Stoll-Grenzwert für das Auftreten von Hautverbrennungen 2. Grades entspricht. Im Fall von Lichtbogenprüfungen ist sie gemäß der Definitionen in [3], die direkt Einwirkenergie auf ein Material oder ein mehrschichtiges Materialsystem, die mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit von 50 % zu einem Wärmedurchgang führt, in dessen Folge Hautverbrennungen 2. Grades gemäß Stoll-Kurve auftreten können, ohne dass das Material aufbricht.

### **Aufbrechen**

ist das Materialverhalten, bei dem das Material aufbricht und sich ein oder mehrere Öffnungen bilden, wodurch Flammen das Material durchdringen können. Es ist das Ergebnis von Arc-Rating-Tests mit offenem Lichtbogen in solchen Fällen, in denen das Material der PSA aufbricht, bevor die Durchgangsenergie die Stollgrenze überschritten hat. Der Schwellwert der Aufbrechenergie  $E_{BT50}$  ist die direkte Einwirkenergie auf ein Gewebe oder Material, die mit 50%iger Wahrscheinlichkeit zu einer Durchgangsenergie führt, bei der die geprüfte Probe aufbricht.

### **Störlichtbogen-Schutzklasse**

ist eine Kategorie der Lichtbogenschutzwirkung von PSA, die im Box-Test geprüft worden ist. Sie ist durch das Energieniveau gekennzeichnet, das in der Prüfung eingestellt wird. Geprüfte PSA bietet thermischen Lichtbogenschutz mindestens bis zu dem Prüfenergiepegel der betreffenden Klasse<sup>3</sup>. Im Boxtest sind 2 Klassen definiert. Klasse 1 bedeutet Basisschutz, Klasse 2 einen erhöhten Schutz für Personen.

### **Prüfpegel**

ist das Niveau der elektrischen Lichtbogenenergie  $W_{LBP}$  und der sich daraus ergebenden direkter Einwirkenergie  $E_{IOP}$ , die im Box-Test in der gewählten Störlichtbogen-

<sup>3</sup> Das tatsächliche Energieniveau, bis zu welchem Lichtbogenschutz besteht, ist im allgemeinen höher.



Schutzklasse eingestellt wird und mit der die PSA in der betreffenden Prüfung beaufschlagt wird. Dieser Prüfpegel charakterisiert das Mindestenergieniveau, bis zu dem die PSA in praktischen Arbeitssituationen mit vergleichbaren Wärmeübertragungsbedingungen Schutz bietet<sup>4</sup>.

### **PSA-Schutzpegel (äquivalente Lichtbogenenergie) $W_{\text{prot}}$**

Ist die äquivalente elektrische Lichtbogenenergie, die zu dem gleichen Prüfpegel der direkten Einwirkenergie des Boxtests auch unter Wärmeübertragungsverhältnissen führt, die sich hinsichtlich des Wirkabstandes  $a$  und des Transmissionsfaktors  $k_T$  vom Aufbau des Boxtests unterscheiden. Liegen die gleichen Wärmeübertragungsverhältnisse wie im Boxtest vor, dann entspricht die äquivalente Lichtbogenenergie dem Prüfpegel  $W_{\text{LBP}}$ .


### **Transmissionsfaktor $k_T$**

ist ein Parameter, der zwischen 1,0 und 2,4 liegt. Er berücksichtigt den Einfluss der Anlagengestaltung im Umkreis der Lichtbogenelektroden. Im Falle von kleinen Fächern oder kleinräumigen Anlagen, in denen wegen eng angeordneten Seiten- und Rückwänden um die Lichtbogenelektroden sehr kleine Volumina vorliegen, beträgt der Faktor 1,0.

<sup>4</sup> Da im Boxtest infolge des Prüfaufbaus Extrembedingungen für die Wärmeübertragung bestehen, wird die energetische Grenze der Schutzwirkung in vielen praktischen Anwendungsfällen höher sein.

# Anhang 3

## Prüfbericht eines Arc-Rating-Tests – Bestimmung des ATPV für ein Materialbeispiel

Date: Wed, Jan 12, 2011	High Current Test Laboratory Kinectrics Inc., Canada Test Summary	
Report # PO # XYZ		
<b>Client</b> Client name address		
<b>Fabric description</b> 340 g/m <sup>2</sup> Navy Sateen - 87% cotton / 12% nylon / 1% antistat		
<b>Reference Standard</b> IEC 61482-1-1:2009 Live working- Flame resistant materials for clothing, Thermal hazards of an electric arc.		
<b>Test Parameters:</b> Test current: 8kA    Number of samples analysed: 21 Distance to Fabric: 30 cm    Incident Energy Range: 12 to 18 cal/cm <sup>2</sup> Arc Gap: 30 cm		
<b>Summary</b> The arc rating of this material is intended for use as flame resistant clothing for workers exposed to electric arcs. The material used in this test method are in the form of flat specimens, actual performance of the complete garment may vary depending on the final design and assembly of the garment. This test method does not apply to the electrical contact or electrical shock hazard.  Based on the data obtained and analysed in accordance with the latest version of the applicable standards, the following Arc Rating was calculated.  <b>Arc Thermal Performance Value, ATPV = 14.2 Cal/cm<sup>2</sup></b> <b>Heat Attenuation Factor, HAF = 81.8%</b>  Data and observations of the fabric samples after the arc exposure were collected and summarized in the attached table. The graphs and statistics on the attached sheets provide more detailed information to better understand the Arc Rating assigned to this material. The client shall review this full report, the video recordings of the arc exposure and the photographs of the samples after the test to determine if the material meets the intended specification.		
<b>Test performed by:</b> Laboratory Name Address		<b>Client contact information</b> Client information Address

IEC 61482-1-1:2009

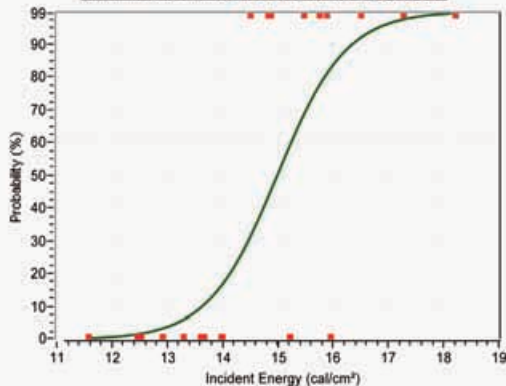
Live working- Flame resistant materials for clothing, Thermal hazards of an electric arc.



**Client:** Client name  
address

**Fabric:** 340 g/m<sup>2</sup> Navy Sateen - 87% cotton / 12% nylon / 1% antistat  
**Description:**

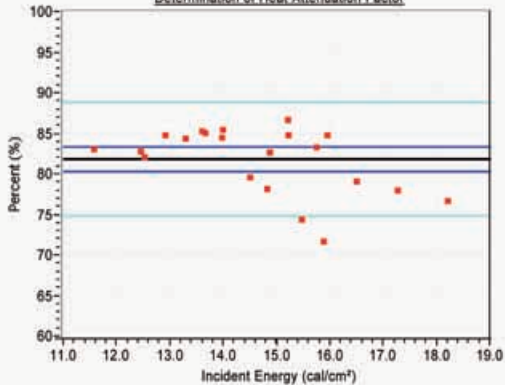
Determination of ATPV, 50% Probability of 2nd Degree Burn

ATPV = 14.2 cal/cm<sup>2</sup>

Probability of Burn	Ei
5%	13.2
10%	13.6
20%	14.1
30%	14.5
40%	14.7
50%	15.0
60%	15.2
70%	15.5
80%	15.9
90%	16.4





# Pts = 21  
 # Pts above Stoll = 9  
 # Pts Break-Open = 1  
 # Pts always <STOLL = 3  
 # Pts always >STOLL = 9  
 # Pts within 20% = 19  
 # Pts in mix zone = 9

Determination of Heat Attenuation Factor



HAF = 81.8 %

Confidence Intervals  
 95% CI = 80.3 , 83.3

Data pts   
 Best Fit   
 95% CI   
 95% CI pts 

Kinectrics WO: PO # XYZ

Wed, Jan 12, 2011

# Anhang 4

## Prüfbericht eines Box-Tests – Bestimmung der Schutzklasse für ein Materialbeispiel

### Auszug aus einem Zertifikat

Enclosure 1 to Certificate Report No. Z 37090XX-47910XX		 <b>SÄCHSISCHES TEXTIL FORSCHUNGS INSTITUT e.V.</b>
<b>PRÜFSTELLE TEXTIL</b>		
Durch die DGA Deutsche Gesellschaft für Abkühlung (DGA) – vertreten im Deutschen Abkühlungsrat – akkreditierte Prüfstellenbetrieb. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.		
Durch die Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik (ZLS) akkreditierte Prüfstelle für Produkte im Sinne der EG-Richtlinie für Persönliche Schutzausrüstungen (89/686/EWG) und des §9 Abs. 2 Gerätesicherheitsgesetz		 <b>ZLS</b> ZLS-Prüfstelle
Von der Fédération Internationale de l'Automobile (FIA) Paris zugelassene Stelle zur Prüfung von hitze- und flammresistenter Schutzkleidung für Auto-Rennfahrer gemäß Standard FIA 8856-2000		
<b>UNTERSUCHUNGSBERICHT   TESTREPORT</b>		
<b>Order No. STFI:</b>	<b>1083/XX</b>	
<b>Order No applicant :</b>		
<b>Date of Test Report:</b>	<b>01 January 2011</b>	
<b>Testing officer:</b>	<b>Mehner</b>	
<b>Manufacturer:</b>		
<b>Applicant:</b>		
<b>Testing application:</b>		
<b>of</b>	<b>01 January 2011</b>	
<b>order receipt on</b>	<b>01 January 2011</b>	
<b>sample receipt on</b>	<b>taken from order A 0713/XX</b>	
<small>Das Prüfprotokoll STFI e.V. ist immer ein separates Dokument zum Prüfprotokoll nach DIN EN ISO 17025. Das Untersuchungsprotokoll des Prüfers des STFI e.V. ist im Internet unter <a href="http://www.stfi.de/abkuehlung/pruefprotokoll.html">http://www.stfi.de/abkuehlung/pruefprotokoll.html</a>.</small>		<a href="http://www.stfi.de">www.stfi.de</a>
<small>Verantwortungsbereich: Prof. Dr.-Ing. Helmut Fackler</small>	<small>Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. Am Röntgen Str. 340 · D-10719 Chemnitz, Germany</small>	<small>Leiter der Prüfstelle: Dr.-Ing. Matthias Meißel</small>
		<small>Telefon +49 (0) 371 32 74 1 70 Telefax +49 (0) 371 32 74 1 33</small>
		<small>E-Mail: stfi@stfi-norge.de</small>



**Test specimen:** fabric for protective clothing

Marking by applicant	Coding in Test House	Coding for arc testing
<b>fabric:</b> Ref. S/853 87% cotton / 12% nylon / 1% antistat, approx. 340 g/m <sup>2</sup> royal blue or other colours of the same dye stuff class	sample 01	08-DU1 / 08-DU2 08-DU4 / 08-DU5

The sampling was carried out by applicant. In the testing house are no knowledge's about method of sampling.

**Test program/Test conditions:**

Technical type examination in accordance with EN 61482-1-2:2007-01 in connection with IEC 61482-2 Ed.1 2009-04.

Implementation of the pre-treatment:

5 washing treatments according to ISO 6330:2000, method 2A/+E, Wascator

Property	Test method
<u>according to IEC 61482-2:</u>	
Dimensional change after 5 washing cycles	EN 25077:1993/ EN ISO 3759:1995/ EN ISO 6330:2000
Limited flame spread after 5 washing cycles	EN ISO 15025:2002 surface ignition, flaming time 10s
Tear strength	EN ISO 4674-1:2003, method B
Tensile strength	EN ISO 13934-1:1999
Arc thermal resistance requirements	EN 61482-1-2, material box test method <sup>1)</sup> class 1...4 kA class 2...7 kA

**1) Arc thermal resistance test according to EN 61482-1-2**

Testing of fabrics according to EN 61482-1-2:2007-01, "Live working - Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc - Part 1: Test methods - Method 2: Determination of arc protection class of material and clothing by using a constrained and directed arc (box test)".

**Test conditions:**

- prospective electric arc current: **4 kA** (corresponding to **Class 1** of EN 61482-1-2)
- Arc duration: 500 ms
- Voltage of open test circuit: 400 V AC (50 Hz)
- Copper- / aluminium electrodes: electrodes gap 30 mm
- Electrodes distance to sample: 300 mm

The tests were carried out in co-operation with High Current Testing Thomas v. Freyberg at the International Institute for Product Safety in Bonn/ Germany. The Sub-lab works on basis of quality management system for the test method. A representative of STFI was present during the tests.



## Test results:

Property - fabric		Dimension	Test results fabric [redacted]	
			S/853	
<i>IEC 61482-2:</i>			S/853	
Dimensional change	lengthwise	%	-2,2	
	across	%	-1,2	
Limited flame spread			<i>lengthwise</i>	<i>across</i>
further flaming to top or sides			no	no
hole formation			no	no
flaming, melting debris			no	no
afterflame time		s	0	0
afterglow time		s	0	0
Tear strength	lengthwise	N	36	
	across	N	34	
Tensile strength	lengthwise	N	1082	
	across	N	615	

Arc thermal resistance requirements	Measure	Test results fabric [redacted]			
		S/853			
		08-DU1	08-DU2	08-DU4	08-DU5
<b>class 1 / 4kA</b>					
Burning time	visual	0 s	0 s	0 s	0 s
Hole formation	visual	no	no	no	no
Melting through to the inside	visual	no	no	no	no
Maximum temperature rise $dT_{max}$ at the backside of the specimen	calorimeter 1	10,6 K	9,7 K	10,0 K	9,4 K
	calorimeter 2	8,9 K	9,4 K	9,7 K	8,5 K
Maximum time $t_{max}$	Computer data				
	calorimeter 1	18,5 s	14,7 s	14,7 s	19,5 s
	calorimeter 2	22,3 s	25,6 s	25,3 s	23,2 s
Comparison: allowed temperature rise to avoid burning 2nd degree (STOLL-values at time $t_{max}$ )		20,7 K	19,4 K	19,4 K	21,0 K
		21,9 K	22,8 K	22,7 K	22,1 K
Acceptance criteria		met	met	met	met

Test results refer to the delivered specimen. Test protocols and statistical information about test data can be viewed in the test house. This Test Report consists of 3 pages with 1 enclosure and should not be published in parts.

  
Dr.-Ing. Matthias Mägel  
Head of the testing department



## Zertifikat über einen Box-Test für ein Textilprodukt (Beispiel)

### Prüf- und Textilprodukt-Zertifikat mit Lichtbogen-Schutzklasse und Anforderungen gemäß IEC 61482-2

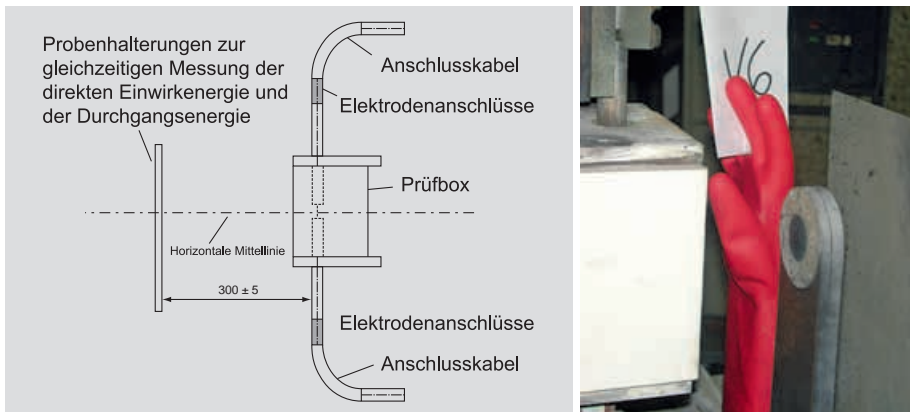
<b>ZERTIFIZIERUNGSSTELLE PSA</b>		 ZLS-ZE-893/09	 SÄCHSISCHES TEXTIL FORSCHUNGS INSTITUT e.V.
<p>Durch die Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik (ZLS) akkreditierte Zertifizierungsstelle für Produkte im Sinne der EG-Richtlinie für Persönliche Schutzausrüstungen 89/686/EWG und des §9 Abs. 2 Gerätesicherheitsgesetz, Kenn-Nr. 0516</p>			
<b>Certificate</b>			
Technical type-examination No. Z 3709/XX-4791/XX			
Date: 01 January 2011			
<b>Applicant:</b>			
<b>Manufacturer:</b>			
<b>Application of:</b>	01 January 2011		
<b>Test specimen:</b>	Fabric  , Ref. S/853		
<b>Type and designation:</b>	87% cotton / 12% nylon / 1% antistat, approx. 340 g/m <sup>2</sup>		
<b>Intended use:</b>	fabric for protective clothing against thermal hazards of an electrical arc		
<b>Results of the technical type examination:</b>	Test Report STFI No. 1083/XX of 01 January 2011 Certification Report STFI No. Z 3709/XX-4791/XX of 01 January 2011		
<p><u>This Certificate applies the suitability of tested fabric s/853 with essential requirements of document Council Directive 89/686/EEC. The fabric is suitable for using for protective clothing against thermal risk of an electrical arc and meets the requirements of Class 1 - 4kA according to EN 61482-1-2:2007.</u></p>			
<p>This Certificate is not a proof for norm conformity of protective clothing produced from it with regard to processibility and design. This is not an entitlement to use the CE- or GS-Mark. It is valid - in dependence on the validity of the test and certification foundations - by 01 January 2014. To renew the validity of the certificate is possible on application.</p>			
<p>This document consists of Certificate and Certificate Report with 3 pages and 2 enclosures.</p>			
			
Dipl.-Ing.-Ök. Andreas Berthel Managing Director STFI e.V.	Dipl.-Ing. Hendrik Beier Head of Certification Department Notified Body No. 0516		
<p><small>Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen des STFI e.V. und der ITC 02099. The general terms of business of STFI e.V. and ITC 02099 are valid.</small></p>			
<small>Vorstandsmitglied Prof. Dr.-Ing. Holger Fuchs</small>	<small>Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. Amelanger Str. 245   09126 Chemnitz, Germany</small>	<small>Leiter der Zertifizierungsstelle Dipl.-Ing. Hendrik Beier</small>	<small>Telefon +49 371 32 79 1 89 Telefax +49 371 32 79 1 80 E-Mail hendrik.beier@stfi.de</small>

# Anhang 5

## Lichtbogenprüfung von Handschuhen und Gesichtsschutz mit Hilfe des Box-Tests

### Prüfung von Handschuhen

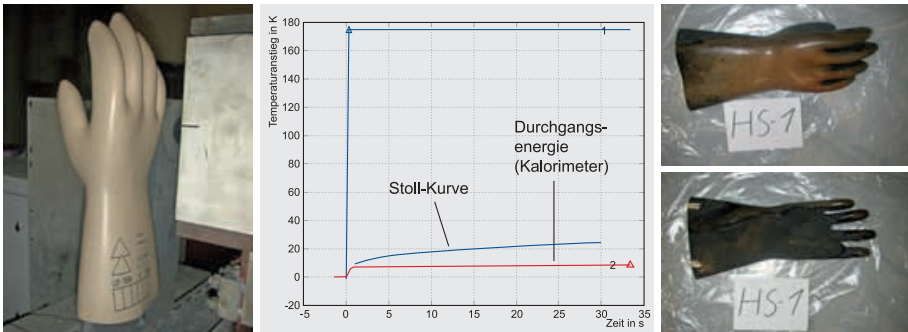
Der grundsätzliche Prüfaufbau des Box-Tests ist gemäß Bild A5.1 zu modifizieren. Für Handschuhprüfungen werden zwei parallele Halterungen mit Sensoren benutzt. Eine Halterung nimmt die Probe auf; das Kalorimeter dieser Halterung misst die Durchgangsenergie. Der andere Halter ist nicht abgedeckt, so dass das Kalorimeter bei jedem Schuss gleichzeitig auch die direkte Einwirkenergie misst.



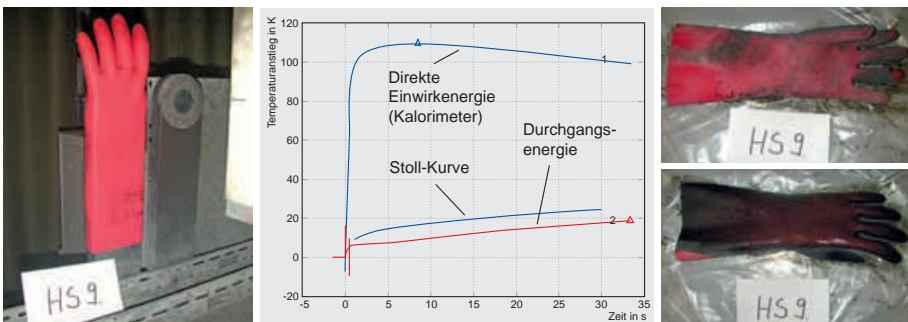
**Bild A5.1:** Boxtest-Aufbau für Handschuhprüfungen mit Kalorimeter bestückten Handschuhhalterungen

Für die Prüfung von Handschuhen kann eine zusätzliche Schutzklasse 3 angewendet werden, die ein höheres Niveau der Lichtbogenbeanspruchung darstellt. Dieses Niveau wird durch eine Reduzierung des Prüfabstandes zwischen den Probenhalterungen und dem Lichtbogen auf  $a = 150$  mm bei einem Lichtbogenenergiepegel der Klasse 1 erreicht. Die Störlichtbogenklasse 3 ist wegen des kleineren Abstands zum Lichtbogen von Bedeutung, den die Hände bzw. Handschuhe bei praktischen Arbeitshandlungen haben (im Vergleich zum Körper oder Gesicht einer Position). Beispiele für Prüfergebnisse sind in den Bildern A5.2 und A5.3 gezeigt.





**Bild A5.2:** Ergebnis der Prüfung eines Isolierhandschuhs (Latex) der Spannungsstufe 1 unter den Bedingungen der Störlichtbogenklasse 3 (Test bestanden)



**Bild A5.3:** Ergebnis der Prüfung eines Isolierhandschuhs (Latex mit textiler Innenbeschichtung) der Spannungsstufe 0 unter den Bedingungen der Störlichtbogenklasse 2 (Test bestanden)

## Prüfung von Gesichtsschutz

Für die Prüfung von Visieren wird ein Prüfkopf verwendet, der mit mehreren Kalorimetern zur Messung der Durchgangsenergie (für die Beurteilung von Verbrennungen der Haut hinter dem Visier) bestückt ist.

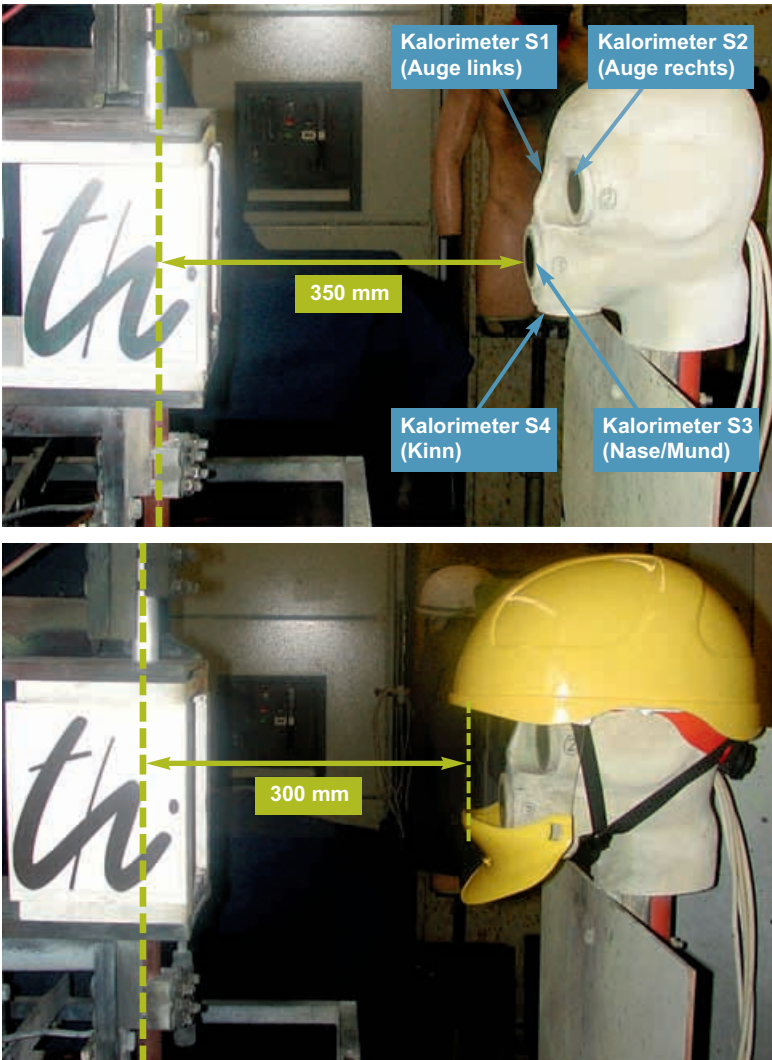
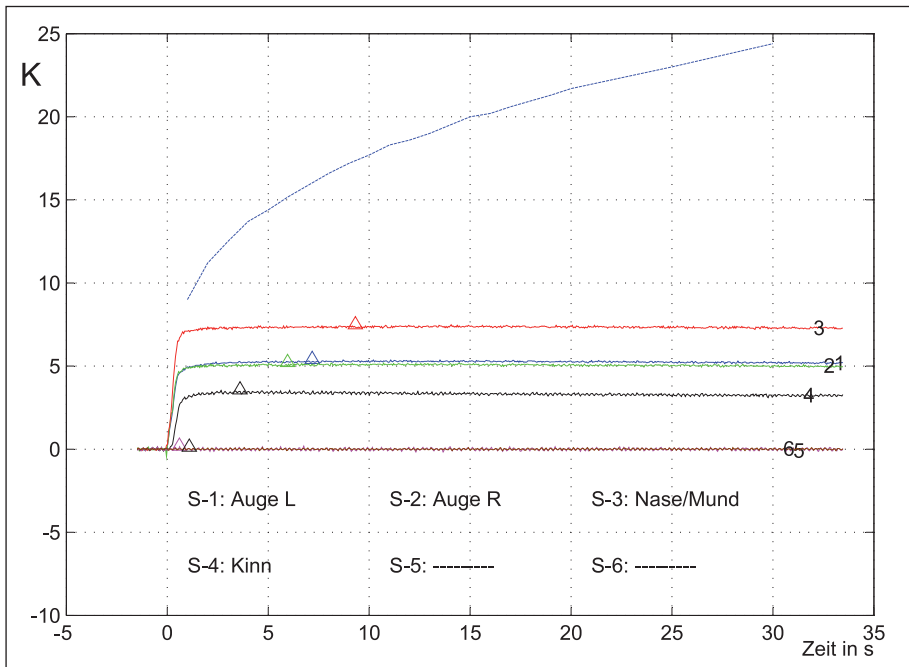


Bild A5.4: Prüfaufbau mit Prüfkopf für die Visierprüfung

Die Kalorimeter messen die Wärmeeinwirkung in verschiedenen Gesichtsräumen. Die geringste Entfernung (zur Lichtbogenachse) besitzt das Kalorimeter in der Mund/Nase-Region. Es ist in einem Abstand von 350 mm platziert, zentriert auf die horizontale und die vertikale Lichtbogenachse. Sehr wichtig ist auch das Kinn-Kalorimeter, das die Wärmeeinwirkung im unteren Bereich des Kopfes anzeigt. Der Prüfaufbau, der in Bild A5.4 dargestellt ist, eignet sich, das Verhalten und die Wirkung von Visieren in der üblichen Trageposition zu beurteilen, da die Visiere an den Helmen angebracht werden. In dieser Konfiguration wird allerdings nicht der Extremfall im Hinblick auf die thermische Beanspruchung der Helme geprüft. Um eine größtmögliche Lichtbogeneinwirkung auf den Helm zu erreichen, sollte der Prüfling in separaten Prüfungen auch horizontal auf die Lichtbogenachse zentriert werden.

Bild A5.5 zeigt ein Beispiel für das Ergebnis einer Visierprüfung der Störlichtbogenklasse 1.



**Bild A5.5:** Messwerte der Kalorimeter in einem Boxtest Klasse 1 an einer Helm-Visier-Kombination (Prüfung ist bestanden)

# Anhang 6

## Algorithmus zur Berechnung der Lichtbogengefährdung für die Auswahl von PSA, die im Box-Test geprüft ist

### A6.1 Allgemeine Hinweise

Lichtbogenvorgänge und -kennwerte entziehen sich grundsätzlich einer exakten Berechnung.

Komplexeste nichtlineare Zusammenhänge und Wechselwirkungen sowie nicht definierbare oder zeitlich stark veränderliche Parameter, Einflüsse und Randbedingungen lassen eine genaue Berechnung praktisch nicht zu. Das zu beurteilende äußere Verhalten eines Störlichtbogens ist stochastisch und unterliegt starken statistischen Streuungen. Grundsätzlich ist die Ermittlung von Kenngrößen deshalb auf empirische Betrachtungen angewiesen, die immer nur mehr oder weniger gute Annäherungen an die Realität darstellen.

Im Interesse der Praktikabilität wird nachfolgend von einfachsten empirischen Berechnungsgrundlagen ausgegangen. Dennoch erfordern solche Ansätze eine Reihe von Grunddaten des Netzes, der elektrischen Anlage und der elektrischen Schutzeinrichtungen. Es werden für den Anwender deshalb folgende drei mögliche Betrachtungsstufen zur Bestimmung der Energiewerte angeboten, die von unterschiedlichen Voraussetzungen an Eingangsdaten ausgehen und damit verschiedene Analyseaufwendungen erfordern, allerdings auch eine differenzierte Abbildgenauigkeit mit sich bringen:

- **EW** – die Nutzung von Extremwerten („Worst-case“-Betrachtung), die von Anlagenspezifika völlig abstrahiert und eine vollständige Abdeckung möglicher Einflüsse bedeutet, damit jedoch für den konkreten Einzelfall einen u.U. sehr deutlichen Sicherheitsabstand enthält
- **RW** – die Nutzung von Richtwerten, die detaillierte Anlagenanalysen erübrigt und einen großen Teil praktischer Fälle abdeckt
- **DW** – die Berücksichtigung von Anlagendaten zu einer genaueren Betrachtung mit der Konsequenz vermehrter Bewertungsaufwendungen.

Der Bedarf an Eingangsdaten bzw. Berechnungsaufwand steigt prinzipiell mit höheren Ansprüchen an die Genauigkeit bzw. den Verzicht auf Sicherheitsmargen für den Einzelfall. „Worst-case“-Betrachtungen sind für Anwender ohne Detailkenntnisse und/oder eine Grobabschätzung notwendiger Maßnahmen bzw. Grobüberprüfung der Schutzerfordernisse nützlich; sie setzen keinerlei Detailkenntnisse und Bewertungserfahrungen voraus, können wegen der Unschärfe der Einschätzungen u.U. aber auch dazu führen, dass sich praktische Lösungsmöglichkeiten für den Schutz mit PSA nicht finden lassen. Für die Richtwertanwendung hingegen besteht keine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Treffsicherheit.

Für die genaueren Betrachtungen sind Erfahrungen und Zusatzkenntnisse zu den Störlichtbogensgefährdungen wichtig; sie stellen die genaueste Alternative dar, legen u.U. jedoch die Einbeziehung von diesbezüglichen Erfahrungsträgern nahe oder rechtfertigen die Analysetätigkeit von Experten.

## A6.2 Arbeitsschritte des Algorithmus

Ausgehend von spezifischen Bedingungen am Arbeitsplatz sind die folgenden Schritte auszuführen:

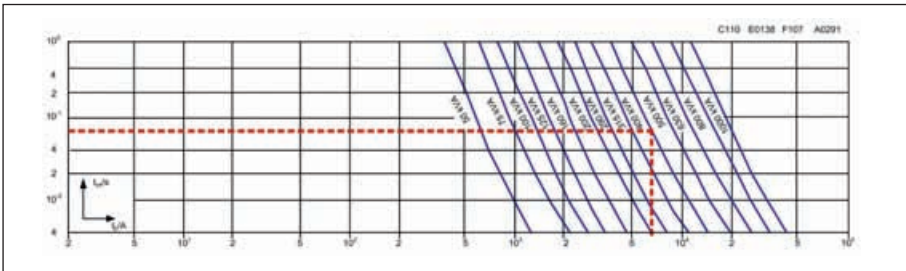
Schritt	Bestimmung/Verfahren	Ergebnis-Parameter	Ergebnis
1	<p><b>Analyse der Netz- und Anlagenverhältnisse</b> Systemspannung (Netz-Nennspannung)</p> <p>Analyse der elektrischen Anlage Leiter-Abstand (Elektrodenabstand)</p>	<p><math>U_{rN}</math></p> <p>d</p>	
2	<p><b>Kurzschlussstromberechnung (gem. IEC 60909)</b> Maximaler Kurzschlussstrom Minimaler Kurzschlussstrom Impedanz-Verhältnis</p>	<p><math>I''_{k3p \max}</math> <math>I''_{k3p \min}</math> R/X</p>	
3	<p><b>Störlichtbogendauer</b> Fehlerstrombegrenzung: DW: <math>k_B</math> gemäß [15] oder GW: <math>k_B = 0,5</math> Minimaler Fehlerstrom: <math>I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3p \min}</math></p> <p>Ausschaltzeit: Aus der I-t-Kennlinie der Schutzeinrichtung für <math>I_{kLB}</math></p>	<p><math>k_B</math></p> <p><math>I_{kLB}</math></p> <p><math>t_K</math></p>	
4	<p><b>Erwartete Lichtbogenenergie am Arbeitsplatz</b> Kurzschlussleistung: <math>S''_k = \sqrt{3} \cdot U_{rN} \cdot I''_{k3p \max}</math></p> <p>Bezogene Lichtbogenleistung: DW: <math>k_P</math> gemäß [15] oder GW: <math>k_P</math> gemäß Tab. A1.1 oder EW: <math>k_{Pmax} = 0.29 \cdot (R/X) - 0.17</math> (oder Tab. A1.1)</p>	<p><math>S''_k</math></p> <p><math>K_P</math></p>	

Schritt	Bestimmung/Verfahren	Ergebnis-Parameter	Ergebnis
	Lichtbogenleistung $P_{LB} = k_P \cdot S_k'' \cdot P_{arc}$  Lichtbogenenergie $W_{LB} = W_{arc} = k_P \cdot S_k'' \cdot t_k$	$W_{arc}$	
5	<b>Arbeitsabstand</b>	a	
6	<b>Standard-Box-Test-Prüfpegel der Lichtbogenenergie <math>W_{arcP}</math></b>	$W_{arcP1}$ $W_{arcP2}$	158 kJ 318 kJ
7	<b>Schutzpegel der PSA <math>W_{prot}</math></b>  Transmissionsfaktor DW: 1...2,4 gemäß Anlagenvolumen GW: 1 EW: 1  Äquivalente Lichtbogenenergie (Schutzpegel) $W_{prot} = k_T \cdot \left( \frac{a}{300 \text{ mm}} \right)^2 \cdot W_{arcP}$	$k_T$        $W_{prot}$	
8	<b>Ergebnis</b> Vergleich: $W_{arc} ? W_{prot}$ PSA: $W_{arc} \leq W_{prot1}$ PSA: $W_{arc} \leq W_{prot2}$		Klasse 1 Klasse 2

### A6.3 Beispiele und Fallstudien

#### A6.3.1 Arbeiten in der NS-Hauptverteilung einer Transformatorstation

In einem ersten Beispiel soll die Risikoanalyse für Arbeiten in der NS-Verteilung einer Transformatorstation 20 kV/0,4 kV vorgenommen werden. Typische Arbeiten unter Spannung sind Einsetzen und Ziehen von Sicherungen oder Reinigungsarbeiten. Es soll davon ausgegangen werden, dass ein Schaltzustand mit nur einem speisenden Transformator vorliegt. Der Transformator hat eine Bemessungsscheinleistung von 400 kVA und eine bezogene Kurzschlussspannung von 4 %. Die Schutzeinrichtung, die zur Ausschaltung von Fehlern im Bereich des Arbeitsplatzes vorgesehen ist, ist eine Transformatorsicherung NH 400 kVA (400 V AC, Betriebscharakteristik gTr) mit der Strom-Zeit-Kennlinie gemäß des Diagramms in Bild A6.1.



**Bild A6.1:** Strom-Zeit-Kennlinien von NH-Sicherungen gTr 400 V AC

Die Risikoanalyse wird auf der Grundlage der Extremwerte (EW) durchgeführt. Dies ist die „worst case“-Betrachtung, die alle möglichen Einflüsse einschließt und Sicherheitsabstände beinhaltet. Nach den Arbeitsschritten in A6.2 ergeben sich folgende Berechnungen:

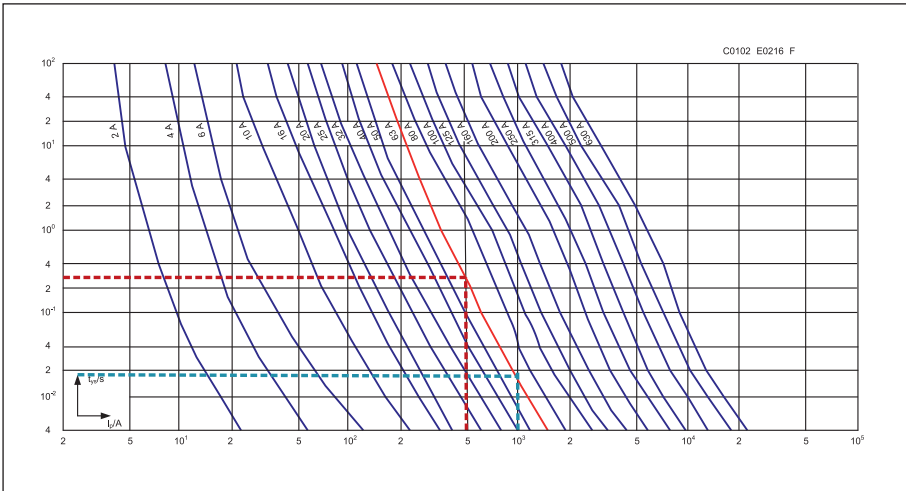
Schritt	Bestimmung/Verfahren	Ergebnis-Parameter	Ergebnis
1	<b>Analyse der Netz- und Anlagenverhältnisse</b> Systemspannung (Netz-Nennspannung)	$U_{fN}$	400 V
	<b>Analyse der elektrischen Anlage</b> Leiter-Abstand (Elektrodenabstand)	d	Nicht erforderlich (da EW)
2	<b>Leiter-Abstand (Elektrodenabstand)</b>		
	Maximaler Kurzschlussstrom	$I''_{k3p \max}$	14.1 kA
	Minimaler Kurzschlussstrom	$I''_{k3p \min}$	12.7 kA
	Impedanz-Verhältnis	R/X	0.16
3	<b>Störlichtbogendauer</b>		
	Fehlerstrombegrenzung: DW: $k_B$ gemäß [15] oder GW: $k_B = 0,5$ (auch EW)	$k_B$	0.5
	Minimaler Fehlerstrom: $I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k3p \min} = 0.5 \cdot 12.7 \text{ kA} = 6.35 \text{ kA}$	$I_{kLB}$	6.35 kA
	Ausschaltzeit: Aus der I-t-Kennlinie der Sicherung NH gTr 400 kVA gemäß Bild A6.1 für $I_{kLB} = 6,35 \text{ kA}$	$t_K$	0.072 s

Schritt	Bestimmung/Verfahren	Ergebnis-Parameter	Ergebnis
4	<b>Erwartete Lichtbogenenergie am Arbeitsplatz</b>		
	Kurzschlussleistung: $S_k^* = \sqrt{3} \cdot U_{RN} \cdot I_{k3p\ max} = \sqrt{3} \cdot 400\text{ V} \cdot 14.1\text{ kA} = 9.77\text{ MVA}$	$S_k^*$	9.77 MVA
	Bezogene Lichtbogenleistung: DW: $k_p$ gemäß [15] oder GW: $k_p$ gemäß Tab. A1.1 oder EW: $k_{p\ max} = 0.29 \cdot (R/X)^{-0.17}$ (or Tab. A1.1)	$K_p$	0.396
	Lichtbogenleistung $P_{LB} = k_p \cdot S_k^* = 0.396 \cdot 9.77\text{ MVA} = 3.869\text{ MW}$	$P_{arc}$	3.869 MW
	Lichtbogenenergie $W_{arc} = k_p \cdot S_k^* \cdot t_k = 0.396 \cdot 9.77\text{ MVA} \cdot 0.072\text{ s} = 279\text{ kJ}$	$W_{arc}$	279 kJ
5	<b>Arbeitsabstand</b>	a	300 mm
6	<b>Prüfpegel der Lichtbogenenergie <math>W_{arcP}</math></b>	$W_{arcP1}$ $W_{arcP2}$	158 kJ 318 kJ
7	<b>Schutzpegel der PSA <math>W_{prot}</math></b>		
	Transmissionsfaktor DW: 1...2,4 gemäß Anlagenvolumen GW: 1 EW: 1	$k_T$	1
	Äquivalente Lichtbogenenergie Schutzpegel) $W_{prot} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300\text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{arcP} = 1 \cdot \left(\frac{300\text{ mm}}{300\text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{arcP}$	$W_{prot1}$ $W_{prot2}$	158 kJ 318 kJ
8	<b>Ergebnis</b> Vergleich: $W_{arc} ? W_{prot}$ PSA: $W_{arc} = 279\text{ kJ} > W_{prot1} = 158\text{ kJ}$ PSA: $W_{arc} = 279\text{ kJ} < W_{prot2} = 318\text{ kJ}$		<b>Klasse 2</b>

Der Erwartungswert der Lichtbogenenergie am Arbeitsplatz beträgt maximal 279 kJ. Für die betrachteten Arbeiten kann eingeschätzt werden, dass der Arbeitsabstand nicht weniger als  $a = 300\text{ mm}$  ist. Das ist der Mindestabstand zwischen Oberkörper und Störlichtbogen in der normalen Arbeitshaltung einer Person. Da außerdem „worst case“- Wärmeübertragungsbedingungen angenommen werden, ist der Schutzpegel der PSA für diesen Arbeitsplatz (äquivalente Lichtbogenenergie) gleich



dem Prüfpegel der PSA. Folglich ist PSA der Schutzklasse 2 des Box-Tests erforderlich und bietet Schutz.



**Bild A6.2:** Strom-Zeit-Kennlinie von NH-Sicherungen gG 400 V AC

### A6.3.2 Arbeiten an der Hausinstallation

Als weiteres Beispiel werden Arbeiten unter Spannung in der Hausinstallation hinter den Sicherungen des Hausanschlusskastens betrachtet.

Die Installation wird durch einen Hausanschlusskasten mit einem Bemessungsstrom von  $I_N = 63 \text{ A}$  bei  $U_{rN} = 400 \text{ V}$  gespeist. Die Kurzschlussstromberechnung ergibt einen prospektiven Kurzschlussstrom von  $I_{k3P} = 4 \text{ kA}$ . In der Einspeisung ist eine Sicherung NH gG 63 A vorhanden.

Zunächst wird die Ausschaltzeit der Sicherung bestimmt. Dies muss auf der Grundlage des Lichtbogen-Kurzschlussstroms erfolgen. Es wird der Richtwert von 0,5 für den Strombegrenzungsfaktor angesetzt<sup>1</sup>; das bedeutet, dass der Lichtbogenstrom nur die Hälfte des prospektiven Kurzschlussstroms, d.h. 2 kA beträgt. Aus der Sicherungskennlinie (Bild A6.2) ergibt sich für einen Strom von 2 kA eine Ausschaltzeit  $t_k$  unter 10 ms. Die Sicherung verhält sich dann strombegrenzend, so dass eine exakte

<sup>1</sup> Wie oben erwähnt, zeigt die Erfahrung, dass die Strombegrenzung in NS-Anlagen in den meisten Fällen Werte zwischen 0,5 und 1,0 annimmt.

Ausschaltzeit nicht bestimmt werden kann. Aus Sicherheitsgründen wird die Kurzschlussdauer in solchen Fällen auf  $t_k = 10 \text{ ms}$  festgelegt.

Die bezogene Lichtbogenleistung wird ebenfalls auf der Grundlage der Richtwerte für Niederspannungsanlagen (0,22 bis 0,27) bestimmt. Es wird ein Wert  $k_P = 0,25$  gewählt<sup>2</sup>. Nach Gleichung

$$W_{\text{arc}} = k_P \cdot \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{k3p} \cdot t_k$$

$$\begin{aligned} W_{\text{arc}} &= 0,25 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 4 \text{ kA} \cdot 0,01 \text{ s} \\ &= 6,928 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ist eine elektrische Lichtbogenenergie von rund 6,9 kJ im Falle eines Störlichtbogenfehlers in den Anlagen hinter dem Hausanschlusskasten zu erwarten.

Im nächsten Schritt wird der Schutzpegel der PSA am betrachteten Arbeitsplatz (äquivalente Lichtbogenenergie, bis zu der die PSA Schutz bietet) bestimmt. In Hausinstallationen haben wir es mit Kleinanlagen mit Seiten-, Rück- und Trennwänden zu tun, die der Geometrie des Boxtest-Aufbaus ähnlich sind. Folglich ist von einem Übertragungsfaktor  $k_T = 1$  auszugehen<sup>3</sup>.

Als Arbeitsabstand  $a$  wird  $a = 300 \text{ mm}$  angenommen. Daher entsprechen die Schutzpegel den Prüfpegeln:  $W_{\text{arcP1}} = 158 \text{ kJ}$  (für Klasse 1) und  $W_{\text{arcP2}} = 318 \text{ kJ}$  (für Klasse 2).

Schließlich ergibt sich aus dem Vergleich mit der zu erwartenden Lichtbogenenergie  $W_{\text{arc}} = 6,93 \text{ kJ}$ , dass PSA der Klasse 1 den notwendigen Schutz bietet.

Tab. A6.1 fasst die Rechenschritte zusammen. Für die Untersuchung ähnlicher Fälle werden hier zusätzlich auch noch andere prospektive Kurzschlussströme für den Arbeitsplatz (2 kA, 1 kA) betrachtet.

<sup>2</sup> Die Erfahrung zeigt, dass die bezogene Lichtbogenleistung bei den Leiterabständen, die in den Anlagen in Abnehmersnähe vorliegen, in diesem Bereich liegt;  $k_P = 0,25$  deckt deshalb die meisten praktischen Fälle sehr gut ab.

<sup>3</sup> Der Wert von  $k_T$  beträgt für offene Systeme 2,4. Praktisch bedeutet dies, dass auf die PSA unter solchen Bedingungen durch den offenen Lichtbogen nur eine 2,4-mal geringere thermische Energieeinwirkung am Arbeitsplatz besteht (im Vergleich zu einem kleinräumigen Boxaufbau).

Arbeitsplatz	Nach Hausanschlusskästen		
Elektrische Daten:			
$U_{nN}$	400 V		
$I_N$	63 A		
$I''_{k3p}$	4 kA	2 kA	1 kA
$S''_k$	2.771 MVA	1.386 MVA	0.693 MVA
Schutzeinrichtung	Sicherung NH 63 A gG		
Strombegrenzungsfaktor $k_B$	0.50		
Fehlerstrom $I_{kLB} = k_B * I''_{k3}$	2 kA	1 kA	0.5 kA
Ausschaltzeit aus der Strom-Zeit-Kennlinie $I_{kLB}$ (Fig. A6.2) $t_k$	10 ms	18 ms	300 ms
bezogene Lichtbogenleistung $k_p$ (LV: 0,22 ... 0,27)	0.25		
<b>Erwartungswert der Lichtbogenenergie</b> $W_{arc} = k_p * 1.73 * U_{rN} * I''_{k3p} * t_k$	<b>6.93 kJ</b>	<b>6.24 kJ</b>	<b>51.96 kJ</b>
<b>Bestimmung der äquivalenten Lichtbogenenergie</b>	<b>Klasse 1</b>	<b>Klasse 2</b>	
Prüfpegel der Lichtbogenenergie Transmissionsfaktor $k_T$ $k_T = 1$ für kleine Fächer oder engen Seiten- und Rückwänden $k_T = 2.4$ für offene Lichtbögen	158 kJ 1	318 kJ	
Arbeitsabstand $a$ zu den aktiven Teilen	300 mm		
<b>PSA Schutzpegel am Arbeitsplatz</b> $W_{prot} = k_T * (a/300 \text{ mm})^2 * W_{arcP}$	<b>158 kJ</b>	<b>318 kJ</b>	
<b>Entscheidung für die PSA</b> $(W_{arc} \leq W_{prot})$	6.93 kJ < 158 kJ <b>Klasse 1</b>	6.24 kJ < 158 kJ <b>Klasse 1</b>	51.96 kJ < 318 kJ <b>Klasse 1</b>

Tabelle A6.1: Berechnung der Lichtbogenegefährdung für Hausinstallationen (Varianten)

# Anhang 7

## Matrix der Tätigkeiten/Anlagen und der erforderlichen PSA

Arbeiten* \ Art der Anlage*	Mess-, Steuer- und Regelungsanlagen bei Stromkreisabsicherung bis 16 A	Energiezähl-, Steuer- und Verrechnungsanlagen bei Stromkreisabsicherung bis 100 A	Gebäudeinstallationen bei Stromkreisabsicherung bis 63 A	Kabel- und Schalt- und Verteilungsanlagen	Freileitungen
Heranführen von Spannungsprüfern und Phasenvergleichen	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie
Heranführen von Prüf-, Mess- und Justiereinrichtungen	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie
Herausnehmen und Einsetzen von nicht gegen direktes Berühren geschützten NH-Sicherungseinsätzen	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie
Prüfarbeiten bei der Fehlerengrenzung in Hilfsstromkreisen	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie	-

Funktionsprüfungen an Geräten und Schaltungen, Inbetriebnahme und Erprobung	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie	Klasse 1 oder 2 je nach Lichtbogenenergie
Kontroll-, Wartungs- und Austauscharbeiten	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 on arc energy	Klasse 1 oder 2 on arc energy
Durchführen von Schalthandlungen nach den 5 Sicherheitsregeln	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 on arc energy	Klasse 1 oder 2 on arc energy
Arbeiten unter Spannung, wie Verbinden, Montieren, Ein- und Ausbauen, Ölen und Fetten, Abdecken oder Reinigen**	-	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1 oder 2 on arc energy	Klasse 1 oder 2 on arc energy

\* gilt für elektrische Anlagen im Niederspannungsbereich (Nennspannungen UrN bis 1000 V AC)

\*\* zu diesen Arbeiten zählen das Montieren einer Abzweigmuße für einen Hausanschluss, Montage/ Demontage von einzelnen Sicherungsleisten und Sicherungslastschaltleisten in Kabelverteilerschränken, Auswechseln von Zählern und Schaltuhren und das Sperren von Kundenanlagen, Montagearbeiten bei der Fehlereingrenzung in Hilfsstromkreisen, das Überbrücken von Teilstromkreisen, Wartungsarbeiten in Anlagen, das Abdecken von unisolierten Niederspannungsfreileitungen.

# Verwendete Symbole

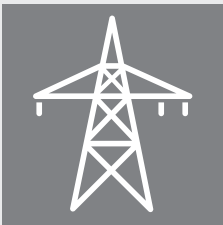
a	mm	Wirkabstand, Arbeitsabstand
ATPV	cal/cm <sup>2</sup> or kJ/m <sup>2</sup>	Arc Thermal Performance Value (thermischer Lichtbogenschutz-Kennwert)
c <sub>p</sub>	Ws*m <sup>2</sup> /kg*K	Spezifische Wärme
d	mm	Elektrodenabstand
dT <sub>max</sub>	K	Maximalwert der Temperatur (maximale Temperaturerhöhung)
E <sub>BT50</sub>	cal/cm <sup>2</sup> or kJ/m <sup>2</sup>	Aufbrechenergie (50%-Wert)
E <sub>i</sub>	kJ/m <sup>2</sup> or cal/cm <sup>2</sup>	Einwirkenergie
E <sub>i0</sub>	kJ/m <sup>2</sup> or cal/cm <sup>2</sup>	Direkte Einwirkenergie
E <sub>it</sub>	kJ/m <sup>2</sup> or cal/cm <sup>2</sup>	Durchgangsenergie
f <sub>T</sub>		Übertragungsfunktion
I'' <sub>k</sub>	A	Prospektiver Anfangskurzschlusswechselstrom (Effektivwert)
I'' <sub>k3p</sub>	A	Prospektiver dreipoliger Kurzschlussstrom (Anfangskurzschlusswechselstrom)
I'' <sub>k3pmax</sub>	A	Maximaler prospektiver dreipoliger Kurzschlussstrom (Anfangskurzschlusswechselstrom)
I'' <sub>k3pmin</sub>	A	Minimaler prospektiver dreipoliger Kurzschlussstrom (Anfangskurzschlusswechselstrom)
I <sub>kLB</sub>	A	Tatsächlicher Kurzschlussstrom bei Störlichtbogenfehler (Lichtbogenfehlerstrom)
i <sub>LB</sub>	A	Lichtbogenstrom, Augenblickswert
I <sub>N</sub>	A	Sicherungsbemessungsstrom
k <sub>B</sub>		Strombegrenzungsfaktor
k <sub>P</sub>		Bezogene Lichtbogenleistung
k <sub>Pmax</sub>		Maximalwert der bezogenen Lichtbogenleistung
k <sub>T</sub>		Übertragungsfaktor, Transmissionsfaktor
k <sub>U</sub>		Spannungsfaktor
m	kg	Masse
P <sub>arc</sub> = P <sub>LB</sub>	kW	Lichtbogen-Wirkleistung
R	Ohm	Ohmscher Widerstand, Wirkwiderstand (Resistanz der Netzimpedanz)
R/X		Impedanzverhältnis, Resistanz-zu-Reaktanz-Verhältnis
S'' <sub>k</sub>	MVA	Kurzschlussleistung
t	s	Zeit
t <sub>arc</sub> = t <sub>k</sub>	s	Lichtbogendauer, Kurzschlussdauer (Ausschaltzeit)

$t_{\max}$	s	Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur, Zeitdauer der Wärmeübertragung
$U_B$	V	Lichtbogenspannung (arithmetischer Mittelwert)
$U_{LB}$	V	Lichtbogenspannung, Augenblickswert
$U_{rN} = U_n$	V	Nennspannung des elektrischen Netzes
$W_{\text{arc}} = W_{LB}$	kJ	Elektrische Lichtbogenenergie
$W_{\text{arcP}} = W_{LBP}$	kJ	Lichtbogenenergie der Störlichtbogenschutzklasse, Prüfpegel
$W_{\text{prot}}$	kJ	Äquivalente Lichtbogenenergie, Schutzpegel
$X$	Ohm	Induktiver Blindwiderstand, Reaktanz (der Netzimpedanz)
$x_i$		Einflussparameter









**IVSS Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit**

c/o Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse

Gustav-Heinemann-Ufer 130 | 50968 Köln | Germany

Tel.: +49 (0)221 3778-6007 | Fax: +49 (0)221 3778-196007

E-Mail: [electricity@bgetem.de](mailto:electricity@bgetem.de)

[www.issa.int/prevention-electricity](http://www.issa.int/prevention-electricity)