



ISSA AISS
IVSS

INTERNATIONALE VEREINIGUNG
FÜR SOZIALE SICHERHEIT

INTERNATIONAL SOCIAL
SECURITY ASSOCIATION

ASSOCIATION INTERNATIONALE
DE LA SÉCURITÉ SOCIALE

ASOCIACIÓN
INTERNACIONAL
DE LA SEGURIDAD
SOCIAL

Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen durch einen Störlichtbogen



**Internationale
Sektion der IVSS
für die Verhütung
von Arbeitsunfällen und Berufs-
krankheiten durch
Elektrizität – Gas –
Fernwärme – Wasser**

**International
Section of the ISSA
on Prevention
of Occupational
Risks due to
Electricity – Gas –
Long-Distance Heating
– Water**

**Comité International
de l'AISS
pour la Prévention
des Risques
Professionnels dus
à l'Électricité – Gaz –
Chauffage Urbain –
Eau**

**Comité internacional
de la AISS
para la Prevención
de Riesgos
Profesionales Debidos
a la Electricidad – Gas –
Calefacción Urbana –
Agua**

Die IVSS-Sektion Elektrizität dankt den Mitgliedern der internationalen Arbeitsgruppe für die aktive Unterstützung bei der Erstellung dieser Leitlinie.

Jens Jühling, IVSS Sektion Elektrizität , Deutschland – Convenor
Jean-Jaques Seryes, EDF, Frankreich
Patrick Brousse, EDF, Frankreich
Hocine Krizou, Hydro-Quebec, Kanada
Ernest A. Jones, E.A.Jones Associates Ltd., Kanada
Hugh Hoagland, Nasco Industries, USA
Angel Pérez Herranz, AMYS, Spanien
Geniève Laverty, DuPont, Schweiz
Sanna Mustonen, Finnisches Institut für Arbeitsmedizin, Finnland
Gerhard Rabitsch, AUVA, Österreich
Jaroslav Bek, PRE A.S., Tschechische Republik
Zdenek Václawek, ČSZE, Tschechische Republik
Erich Brenner, Tempex GmbH, Deutschland
Jürgen Haase, Sächsisches Textil-Forschungsinstitut, Deutschland
Malte Bähme, RWE Eurotest, Deutschland
Holger Schau, TU Ilmenau, Deutschland
Eberhard Müller-Steineck, Schümer GmbH, Deutschland
Günter Brose, Berufsgenossenschaft der Lederindustrie, Deutschland
Joydeep Mukherjee, IVSS Sektion Elektrizität, Deutschland

ISBN-Nr. 3-9807576-2-5

Herausgeber:

Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit

Sektion Elektrizität – Gas – Fernwärme – Wasser

c/o Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik

Gustav-Heinemann-Ufer, 50968 Köln

Alle Rechte vorbehalten

IVSS 1 D

**Leitlinie
für die Auswahl von
persönlicher Schutzausrüstung
gegen thermische Auswirkungen
durch einen Störlichtbogen**

1 Inhaltsverzeichnis

1 Inhaltsverzeichnis	5
2 Vorwort	7
3 Was ist ein Störlichtbogen?	9
4 Auswirkungen von Störlichtbögen	10
4.1 Technische Auswirkungen	10
4.2 Auswirkungen auf den Menschen	12
5 Beurteilungskriterien für Kleidungsmaterialien	14
5.1 Begriffe und Kenngrößen zur kalorimetrischen Messung	14
5.2 Kriterien zur Bewertung bei Tests von Materialien	15
6 Berechnung der Hitzedruck-Parameter	17
6.1 Berechnung der einfallenden Energie	17
6.2 Berechnung des Wärmestroms	19
7 Störlichtbogenprüfverfahren	21
7.1 Allgemeines	21
7.2 Prüfverfahren nach IEC	23
Prüfablauf	23
Prüfergebnis	26
Anwendbarkeit der Prüfergebnisse	26
7.3 Prüfverfahren nach CENELEC	27
7.3.1 CENELEC-Methode (ENV 50354:2000)	27
Prüfablauf	27
Prüfergebnis	29
Anwendbarkeit der Prüfergebnisse	31
7.3.2 Erweitertes CENELEC-Prüfverfahren	31
Prüfablauf	33
Prüfergebnis	33
Anwendbarkeit der Prüfergebnisse	33
7.4 Prüfverfahren mit dreiphasigem Kurzschluss an einem Hausanschluss (RWE Eurotest, Deutschland)	34
Prüfablauf	34
Prüfergebnis	37
Anwendbarkeit der Prüfergebnisse	38

7.5 Prüfverfahren mit Messung des Wärmedurchgangs mit Infrarot-Kamera (AMYS, Spanien)	38
Prüfablauf	38
Prüfergebnis	40
Anwendbarkeit der Prüfergebnisse	44
<hr/>	
8 Brennbarkeit von Textilien	45
<hr/>	
9 Einstufung der störlichtbogenfesten Kleidung als Schutzkleidung	46
<hr/>	
10 Empfehlungen für die Auswahl von textilen Materialien	48
<hr/>	
11 Qualitätskontrolle	50
<hr/>	
12 Tragehinweise	51
<hr/>	
13 Literaturverzeichnis	53
<hr/>	
14 Weitere Literaturquellen	54
<hr/>	
15 Prüfergebnisse spezieller Bekleidungsmaterialien	55
<hr/>	
Anhang 1 Wertetabelle der Stoll-Kurve	66

2 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. Die dabei auftretenden Wirkungen des Lichtbogens können im vorhinein aber nur annähernd bestimmt werden. Auch nach der Lichtbogeneinwirkung sind Angaben über die freigesetzte Wärmeenergie nur schwer möglich, da vielfach nur unzureichende Angaben über die Höhe des geflossenen Stromes und der Brenndauer des Lichtbogens vom Netzbetreiber angegeben werden können. Des weiteren kann die Richtwirkung des Lichtbogens durch das vom Kurzschlussstrom selbst verursachte Magnetfeld und sich daraus ergebenden Wanderungen des Plasmabogens und der Lichtbogenfußpunkte in einer elektrischen Anlage nur schlecht vorherbestimmt werden. Ein mit absoluter Sicherheit wirkender Personenschutz gegen einen Störlichtbogen wird es in sofern kaum geben können. Jedoch lassen sich mit geeigneten Maßnahmen nur die Auswirkungen des Lichtbogens reduzieren.

Eine Personengefährdung ist an erster Stelle durch technische Maßnahmen an der elektrischen Installation zu verhindern. Sind aber Arbeiten in der Nähe einer elektrischen Installation oder unter Spannung erforderlich, befindet sich die Person im Allgemeinen in einem Bereich, der der allgemeinen Bevölkerung nicht zugänglich ist. In diesen Fällen müssen die Allgemeinen technischen Schutzmaßnahmen, wie Abdeckungen und Türen, zwecks dieser Arbeiten vorübergehend geöffnet oder entfernt werden. Der Monteur steht dann vor einer geöffneten Anlage, bei der im günstigsten Fall nur die Gehäusetür geöffnet wurde und weitere Abdeckungen nicht abgenommen wurden. Da es sich bei diesen Tätigkeiten um Wartungs- bzw. Reparaturarbeiten an der elektrischen Installation handelt, wird auch zukünftig weiterhin eine Gefährdung durch Störlichtbogen nicht ausgeschlossen werden können.

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Problematik und der jährlich zu verzeichneten Zahlen für Störlichtbogenunfälle hat der Vorstand der IVSS-Sektion Elektrizität im Jahre 1998 beschlossen, eine internationale Arbeitsgruppe zu dieser Thematik einzuberufen. Nach Sichtung der international auf diesem Gebiet bestehenden Aktivitäten beschloss die Arbeitsgruppe, sich intensiv mit dem Vergleich der bestehenden Prüfverfahren für Arbeitskleidungen für elektrotechnische Arbeiten zu befassen. Dabei sollte auf die Erfahrungen und ersten Ergebnisse der Normung von Prüfverfahren mit Störlichtbogen zurückgegriffen werden, eine Parallelarbeit zur Normung aber vermieden werden. Die Arbeitsgruppe hatte auf ihrer ersten Sitzung beschlossen, die Arbeitsergebnisse in Form der nunmehr vorliegenden Leitlinie für die Auswahl von Arbeitskleidungen für elektrotechnische Arbeiten zu veröffentlichen. Die Leitlinie folgt den Anforderungen und Empfehlungen der „Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaften zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für persönliche Schutzausrüstungen“ (89/686/EEC) /1/.

3 Was ist ein Störlichtbogen?

Ein Lichtbogen ist eine durch Gasionisation entstandene leitende elektrische Verbindung zwischen Elektroden unterschiedlichen Potentials, unterschiedlicher Phasenlage oder eines dieser und Erde. Tritt ein Lichtbogen an einer elektrischen Anlage bzw. in einem elektrischen Betriebsmittel nicht betriebsmäßig, sondern durch eine Störung auf, spricht man von einem Störlichtbogen. Verursacht werden kann ein Störlichtbogen durch einen technischen Fehler oder – wie in den meisten Fällen – durch eine Fehlhandlung.

Ist im Niederspannungsbereich zum Auslösen eines Lichtbogens zuvor ein galvanischer Kurzschluss erforderlich, so genügt im Hochspannungsbereich schon das Unterschreiten des entsprechenden Luftabstandes zu den unter Spannung stehenden Teilen.

4 Auswirkungen von Störlichtbögen

4.1 Technische Auswirkungen

Je nach der Leistung und der Brennzeit eines Störlichtbogens können sehr differenzierte physikalische Wirkungen entstehen. Das resultiert aus dem großen Temperaturbereich, den ein Lichtbogen annehmen kann. Temperaturen bis zu 10.000°C sind bei einem Lichtbogen möglich, am Fußpunkt sogar bis zu 20.000°C. Das an den Fußpunkten befindliche Material wird dabei verdampft und bildet somit 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.

Ein Plasma zeichnet sich dadurch aus, dass in ihm alle chemischen Verbindungen aufgebrochen sind und die Elemente in ionisierter Form vorliegen. Diese Plasmawolke besitzt deshalb eine sehr hohe **chemische Aggressivität**. Mit der Verdampfung von Metall und der nachfolgenden starken Erhitzung kommt es durch die Ausdehnung zu einer Massenexpansion, die die **metallischen Dämpfe und Spritzer** explosionsartig vom Fußpunkt 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 1).

Eine weitere physikalische Wirkung während des Aufbaus des 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/m². Soweit sich die **Druckwelle** nicht ungehindert ausbreiten kann, besteht für die umgebenden baulichen Anlagen die Gefahr einer



Bild 1 Zerstörungen nach einem Störlichtbogenunfall

mechanischen Zerstörung. Das kann zum Wegschleudern von Türen oder Abdeckungen, Bersten von Gehäusen oder Einbrechen von Zwischenwänden führen.

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.

In Abhängigkeit von der Intensität des Lichtbogens entzündet und entflammt die starke Wärmestrahlung in der näheren Umgebung befindliche brennbare Materialien. Die von dem Lichtbogen ausgehenden flüssigen Metallspritzer verstärken zusätzlich die Gefahr einer **Brandentstehung**.

Letztlich besteht auch für in der Nähe befindliche Personen eine hohe Gefährdung durch die bei dem Lichtbogen freigesetzten **toxischen Zersetzungsprodukte**. Diese können neben einer Schädigung der äußerlichen Hautflächen, durch Inhalation auch zu einer schweren Lungenschädigung führen.

4.2 Auswirkungen auf den Menschen

Unabhängig von der Kleidung bzw. Schutzausrüstung, die ein Verunfallter bei der Störlichtbogeneinwirkung trägt, sind bei der 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 einbe-

zogen. Stark betroffen bei Störlichtbogenunfällen sind besonders die Hände und der Kopf mit Halsbereich, in mehr als 2/3 der Unfälle die rechte Hand und mit ca. der Hälfte die Gesichts- und Halspartie. Aber auch die Unterarme werden mit 41% bei dem rechten und 34% bei dem linken relativ oft geschädigt. Alle weiteren Körperteile sind nur mit Anteilen unter 10% beteiligt. Das Ergebnis ist in der Abbildung zu sehen (vgl. Bild 2).

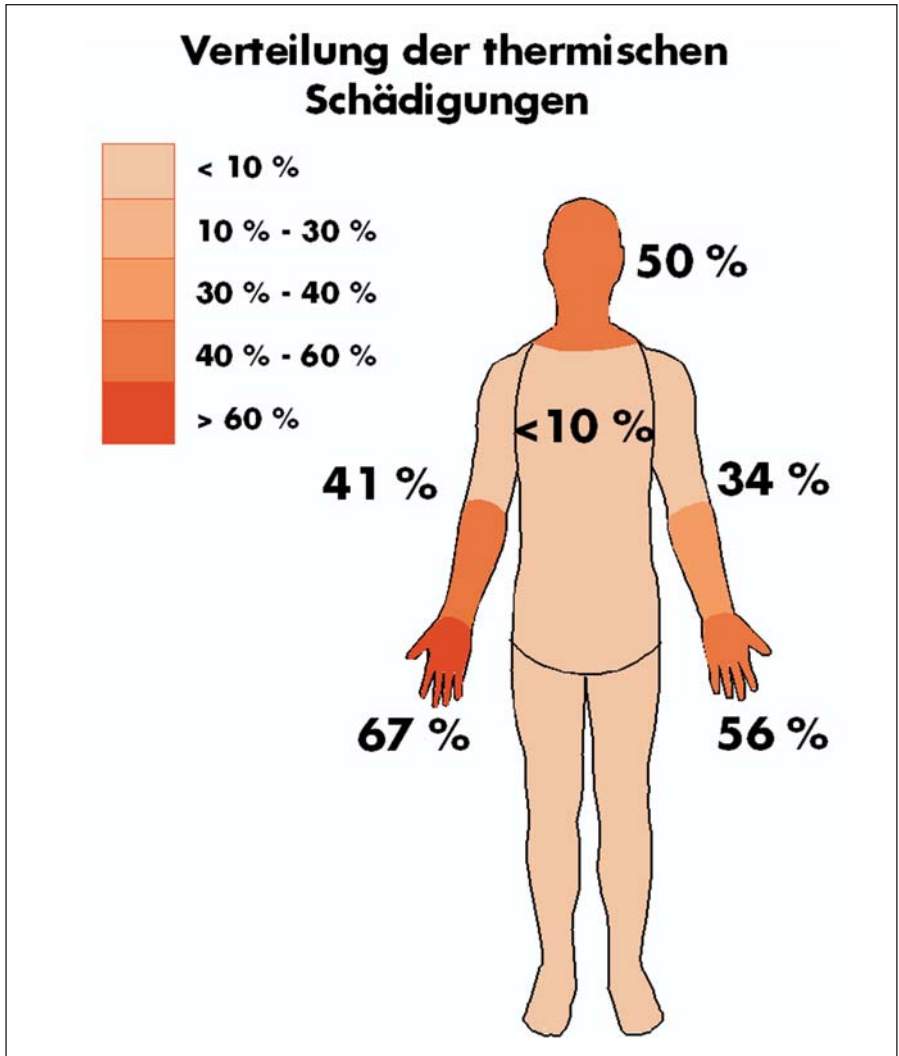


Bild 2 Verteilung der thermischen Schädigungen

5 Beurteilungskriterien für Kleidungsmaterialien

5.1 Begriffe und Kenngrößen zur kalorimetrischen Messung

Wärmestrom Q

Die thermische Intensität, die die pro Zeiteinheit und Fläche übertragene Energiemenge angibt (kW/m^2 or $\text{cal/cm}^2 \times \text{s}$).

Prospektiver Strom I_{pros}

Strom, der vor einer Prüfung bei galvanischem Kurzschluss des Prüfkreises eingestellt wird (A).

Lichtbogenstrom I_{arc}

Strom, der als Effektivwert während der Prüfung gemessen wird (A). Anmerkung: Dieser Strom ist immer geringer als der prospektive Strom.

Lichtbogenspannung U_{arc}

Spannung, die sich zwischen den Elektroden bzw. Fußpunkten eines Lichtbogens ausbildet und damit über dem Lichtbogen abfällt (V).

Lichtbogendauer t_p

Dauer des Lichtbogens (s).

Energieeinwirkung E_i

Die Energieeinwirkung bezeichnet die Gesamtwärmeenergie, die als Ergebnis einer Entladung eines elektrischen Lichtbogens auf dem Material auftrifft (kWs/m^2 , kJ/m^2 oder cal/cm^2).

Lichtbogenleistung P_{arc}

Effektivwert der elektrischen Leistung, welche im Lichtbogen umgewandelt wird (kW).

Lichtbogenenergie W_{arc}

Elektrische Energie, die im Lichtbogen umgewandelt wird (kWs oder kJ).

Maximale Temperaturdifferenz dT_{max}

Maximale Änderung der Temperatur (Differenz zwischen Maximaltemperatur und Anfangstemperatur bei $t_p = 0$) (K).

Zeitpunkt der Scheitelwerttemperatur t_{max}

Zeit, bei der die Scheitelwerttemperatur erreicht wird (s).

5.2 Kriterien zur Bewertung bei Tests von Materialien

Stoll-Kurve

Vergleichskurve, die verwendet wird, um eine beginnende Verbrennung zweiten Grades vorherzusagen.

ATPV (Arc Thermal Performance Value)

Einwirkende Wärmeenergie bei einer Störlichtbogenprüfung von Stoffen oder Materialien, die auf einen begrenzten Wärmedurchgang durch den Stoff oder das Material zurückzuführen ist und den Beginn einer Verbrennung zweiten Grades hervorruft (kWs/m²).

Elektrodenabstand

Abstand zwischen den Elektroden (in der Elektrodenlängsachse), auf denen sich die Lichtbogenfußpunkte ausbilden (mm).

Prüfabstand

Abstand des Prüflings zu den Elektroden (senkrechte Achse der Elektroden) (mm).

Materialbeständigkeit

Die Materialbeständigkeit gegenüber einem Lichtbogen wird mit folgenden Begriffen angegeben: Aufbrechen, Schmelzen, Abtropfen, Verkohlen, Versprödung, Schrumpfen, Entzündung und Nachbrennen.

Aufbrechen

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Aufbrechen die Materialbeständigkeit, bei der die Aus-

bildung eines oder mehrerer Löcher in spezifischer Größe bewertet wird.

Schmelzen

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Schmelzen die Materialbeständigkeit, bei der das Erweichen der Polymerfasern bewertet wird.

Abtropfen

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Abtropfen die Materialbeständigkeit, bei der das Flüssigwerden der Polymerfasern bewertet wird.

Verkohlen

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Verkohlen die Materialbeständigkeit, bei der die Ausbildung eines kohlenstoffhaltigen Rückstandes als Ergebnis einer thermischen Zersetzung oder einer unvollständigen Verbrennung bewertet wird.

Versprödung

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Versprödung die Materialbeständigkeit, bei der die Ausbildung eines brüchigen Rückstandes als Ergebnis einer thermischen Zersetzung oder einer unvollständigen Verbrennung bewertet wird.

Schrumpfen

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Schrumpfen die Materialbeständigkeit, bei der die Abnahme der Größe des Prüflings bewertet wird.

Entzündung

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Entzündung die Einleitung der thermischen Verbrennung.

Nachbrennen

In Bezug auf die Prüfung von thermischer Schutzkleidung beschreibt Nachbrennen die Materialbeständigkeit, bei der die Nachbrennzeit des Prüflings bewertet wird.

6 Berechnung der Hitzedruck-Parameter

6.1 Berechnung der einfallenden Energie

Die mit dem Lichtbogen während der Prüfung abgestrahlte Energie ist mit der verbrauchten elektrischen Energie identisch und wird wie folgt berechnet:

$$P_{arc} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} u \cdot i \, dt$$

$$W_{arc} = P_{arc} \cdot t_p$$

Die Mehrzahl der Störlichtbogenprüfverfahren arbeiten mit Kupferkalorimetern (Detektoren), bei denen in Abhängigkeit von dem Wärmeenergie transport und der Intensität der Energieeinwirkung E_i ein Temperaturanstieg gemessen wird (vgl. Bild 3).

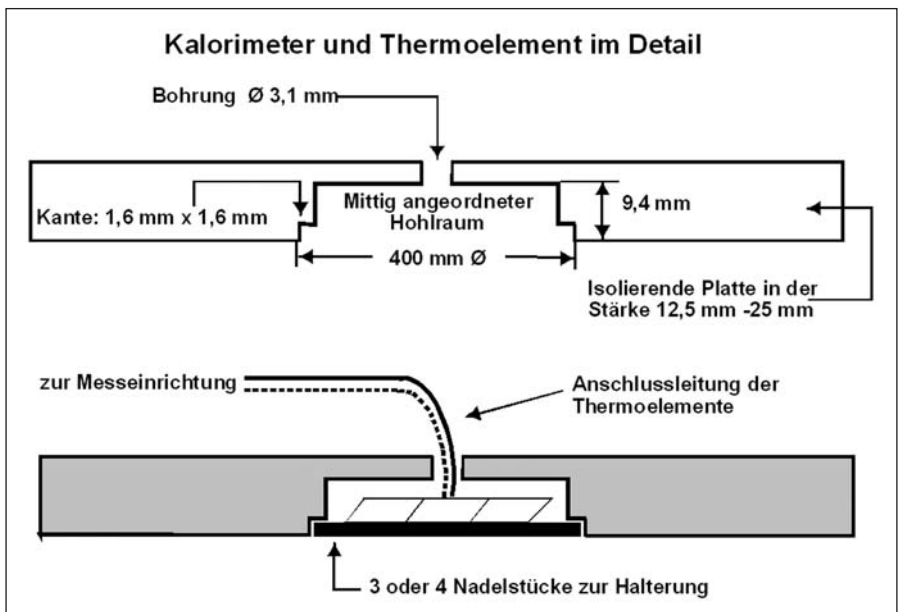


Bild 3 Aufbau eine Kalorimeters

Nach EN 367, Abschnitt 9 berechnet sich die Einwirkenergie wie folgt /2/:

$$E_i = \frac{m \cdot C_p}{A} \cdot dT_{max} \quad \left[\frac{\text{kWs}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right]$$

mit $m = 18 \text{ g}$
 $A = 1256 \text{ mm}^2$
 $C_p = 0,385 \frac{\text{kWs}}{\text{kg K}}$

m – Masse des Kupferkalorimeters
 A – Fläche des Kupferkalorimeters
 C_p – Wärmekoeffizient für Kupfer

$$E_i = 5,54 \cdot \frac{\text{kWs}}{\text{m}^2} \cdot \frac{dT_{max}}{\text{K}}$$

oder

$$E_i = 0,132 \cdot \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{dT_{max}}{^\circ\text{C}}$$

Nach IEC 61 482-1 berechnet sich unter Ansetzung eines anderen Wärmekoeffizienten für Kupfer in Übereinstimmung mit der entsprechenden ASTM-Vorschrift die Einwirkenergie wie folgt /3/:

$$C_p = 0,394 \frac{\text{kWs}}{\text{kg K}} = 0,094 \frac{\text{cal}}{\text{g } ^\circ\text{C}}$$

$$E_i = 5,67 \frac{\text{kWs}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{dT_{max}}{^\circ\text{C}}$$

$$= 0,135 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{dT_{max}}{^\circ\text{C}}$$

6.2 Berechnung des Wärmestroms

Der Wärmestrom wird analog zu der Energieeinwirkung berechnet. Jedoch wird anstatt der Maximaltemperaturdifferenz die Temperaturanstiegsrate R benutzt.

$$\begin{aligned} Q &= \frac{m \cdot C_p}{A} \cdot R \\ &= 5,54 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{s}}{\text{K}} \cdot R \end{aligned}$$

$$R = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Um den Temperaturanstieg zu bestimmen, wird generell ein linearer Verlauf zwischen $T(0)$ und $T(t_{max})$ zugrunde gelegt. Dieser Anstieg entspricht dem mittleren Gradienten der realen Funktion $dT(t)$ während der Erwärmungsphase t_{max} (vgl. Bild 4):

$$dT(0) = 0$$

$$T(t_{max}) = dT_{max}$$

$$\Delta T = T(t_{max}) - dT(0)$$

$$\Delta t = dt_{max} - 0 = t_{max}$$

$$R = \frac{dT_{max}}{t_{max}} = \frac{dT(t_{max})}{t_{max}}$$

Im Ergebnis entsteht die folgende Gleichung zur Berechnung des Wärmestroms:

$$Q = \Phi_p = 5,54 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \cdot \frac{dT_{max} [\text{K}]}{t_{max} [\text{s}]}$$

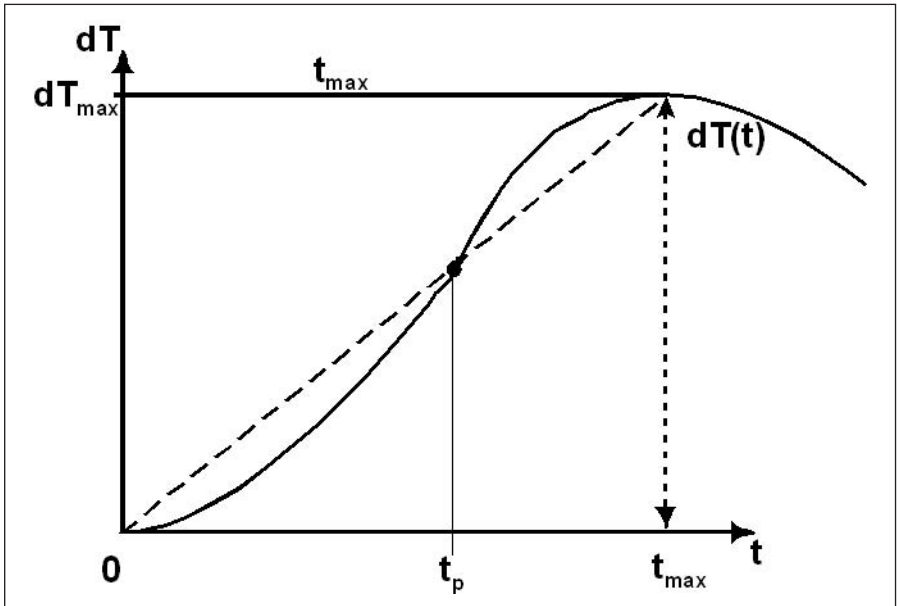


Bild 4 Temperaturverlauf während der Störlichtbogenprüfungen

7 Störlichtbogenprüfverfahren

7.1 Allgemeines

Schon seit längerer Zeit bestehen Bestrebungen, die Anforderungen an Kleidungsmaterialien festzulegen, die den Träger gegen Auswirkungen von Störlichtbögen schützen sollen. Hinsichtlich der qualitativen Bewertung der Prüfergebnisse der einzelnen Materialien treten im Allgemeinen keine relativ großen Meinungsverschiedenheiten auf. Anders sieht das bei der quantitativen Festlegung der Forderungen zur Dimensionierung der Prüfparameter und der zusätzlichen Bewertung des thermischen Flusses für den elektrischen Lichtbogen aus. Diskussionen in diesem Zusammenhang werden nicht nur auf internationaler sondern auch auf europäischer und sogar auf nationaler Ebene geführt. Folglich entstanden im Ergebnis verschiedene Entwicklungen zum Aufbau von Störlichtbogen-Prüfeinrichtungen.

Die Vergleichbarkeit der Prüfungen an Kleidungsmaterialien war auf Grund der unterschiedlichen Prüfparameter nicht gegeben. Hersteller und Anwender verglichen vielfach nur auf Basis des Wertes für den prospektiven Prüfstrom, ohne die anderen wesentlichen Parameter wie Prüfdauer und Probenabstand zu berücksichtigen. Auch das Verhältnis des tatsächlich während der Prüfung geflossenen Stromes I_{arc} zum prospektiven Prüfstrom I_{pros} wurde vernachlässigt.

Heute greift man prinzipiell auf zwei Prüfverfahren zurück. Die erste Methode basiert auf den Vorgehensweisen, die in IEC 61482-1 (Verfahren A und B) beschrieben werden /3/. Die Prüfung wird gleichermaßen für textile Materialien und Kleidungsstücke vorgesehen. Im Ergebnis wird eine Bewertungszahl ermittelt, die angibt, wie stark die flammhemmenden textilen Materialien eine Wärmeübertragung zur Haut verringern (heat attenuation factor). Außerdem wird die Energieeinwirkung oder

Durchgangsenergie (incident energy in cal/cm bzw. kW/m²) bestimmt, bei der es bei diesem Material noch nicht zu Verbrennungen zweiten Grades kommt (ATPV-Wert: arc thermal performance value). Als Maß dafür wird die sogenannte Stoll-Kurve benutzt, die die Energiegrenzwerte für das Einsetzen von Hautverbrennungen zweiten Grades als Zeitfunktion angibt.

Das zweite Verfahren steht in Übereinstimmung mit ENV 50 354 /4/, ist aber für diese Leitlinie um die Wärmestrommessung erweitert worden. Diese erweiterte Vorgehensweise könnte zukünftig als ergänzendes Prüfverfahren in der bereits oben erwähnten IEC 61 482-1 mit einfließen /3/.

Die Hauptunterschiede zwischen der CENELEC- und IEC-Methode sind:

1. Bei der CENELEC-Prüfung basieren die Kriterien zum Bestehen/Durchfallen des Tests auf festgelegte Stromstärke und Auslösezeit
2. Bei der IEC-Prüfung basieren die Kriterien zum Bestehen/Durchfallen des Tests eben nicht auf festgelegte Stromstärke und Auslösezeit (das zu testende Material muß vorab jedoch die sog. vertikale Flammprüfung (vertical flame test) bestehen).

Nachfolgend werden auch andere Prüfverfahren beschrieben, die als Ergänzung anzusehen sind und für bestimmte Anforderungen entwickelt wurden.

Die beiden gängigsten Prüfverfahren, das CENELEC- und das IEC-Verfahren, wurden unter den Voraussetzungen der nachfolgend aufgeführten Parameter gegenüber gestellt. Diese Werte verdeutlichen letztlich, dass die Parameter prospektiver Strom, Lichtbogendauer und Testabstand beider Verfahren miteinander vergleichbar sind:

CENELEC-Prüfparameter: 7 kA, 500 ms, 300 mm (Klasse 2, siehe 7.3)

IEC-Prüfparameter: 8 kA, 167 ms, 300 mm.

In beiden Fällen wurde eine Energieeinwirkung von ca. **423 kWs/m²** ermittelt.

In Bezug auf andere Prüfverfahren und Prüfparameter müssen entsprechende Vergleichswerte noch ermittelt werden.

7.2 Prüfverfahren nach IEC

Prüfablauf

Wie bereits erwähnt, ist diese Prüfung gleichermaßen für textile Materialien und Kleidungsstücke vorgesehen. Die Prüfanordnung besteht aus zwei senkrecht angeordneten Stabelektroden (Vollelektroden aus Stahl oder einem anderen gewählten Material) mit einem Abstand von 300 mm, zwischen denen der Lichtbogen gezündet wird. Das zu prüfende Material wird an drei Probenhaltern angebracht, die jeweils um einen Winkel von 120° gegenseitig versetzt sind. Jeder Probenhalter ist mindestens 550 mm x 200 mm (Höhe x Breite) groß und mit Wärmedetektoren aus Elektrolytkupfer ausgestattet. Zur Lichtbogenachse besteht jeweils ein Abstand von 300 mm, dieser ist aber variabel zwischen 200 und 600 mm. Die Prüfanordnung bedingt eine allseitig ungehinderte Ausbildung bzw. Ausbreitung des Lichtbogens und seiner Auswirkungen, insbesondere Strahlungs- und Strömungswirkungen ohne Richtcharakteristik (siehe Bild 5).

Vor der Prüfung werden die Prüflinge (textiles Material oder Kleidungsstück) fünfmal oder entsprechend der Gebrauchsanweisung des Herstellers gewaschen.

Im Falle der Prüfung von Stoffproben werden die Materialien jeweils an den drei senkrecht stehenden Probenträgern eng-



Bild 5 IEC-Prüfaufbau

anliegend befestigt, damit die gleichzeitige Prüfung von drei Proben je „Schuss“ möglich ist. Die Probenträger sind jeweils mit Kupferkalorimetern bestückt, die von den Stoffproben bedeckt sind. Mit deren Hilfe wird die Durchgangsenergie auf Basis der

Temperaturerhöhung direkt gemessen. Jeweils zusätzliche angeordnete, gleichartige Kalorimeter außerhalb der probenbedeckten Fläche dienen zur Vergleichsmessung. Durch Vergleich der Kalorimetermesswerte kann die Wärmeenergie ermittelt werden, die das Material durchdringt. Durch spezielle Software ist es möglich, alle Temperaturdaten für bis zu 30 Sekunden nach dem Zünden des Lichtbogens aufzuzeichnen.

Im Falle der Prüfung von Kleidungsstücken treten an die Stelle der Probenträger entsprechende Prüfpuppen (bzw. Körper- oder Oberkörpervachbildungen), die analog mit Detektoren bestückt sind.

Das Prüfverfahren verlangt für eine ausreichende statistische Sicherheit 20 Prüfwerte. Da bei jedem „Schuss“ von drei Proben Werte erzielt werden, bedeutet dies, dass eine Prüfreihe mindestens sieben „Schüsse“ (Prüfschritte) umfasst. Die Prüfbedingungen werden dabei durch Einstellung unterschiedlicher Parameterwerte von Prüfschritt zu Prüfschritt verändert. Prinzipiell verändert werden die Höhe des Prüfstromes (prospektiver Strom) und die Lichtbogenzeit (Dauer der Lichtbogenexistenz). Von der Durchführung realer Prüfungen ist bekannt, dass zur einfacheren Handhabung u.U. nur die Lichtbogenzeit verändert wird, während dann die Stromeinstellung unverändert bleibt (8 kA). Von Prüfschritt zu Prüfschritt werden die Prüf- und Lichtbogen-Beanspruchungsbedingungen verändert. Angestrebt ist dabei, dass sich die resultierenden Temperaturerhöhungen bzw. Einwirkenergien abwechselnd ober- und unterhalb des Grenzkriteriums nach Stoll befinden.

An den elektrischen Prüfkreis werden darüber hinaus keine direkten Forderungen gestellt. Praktisch gesehen ist in Anbetracht des großen Elektrodenabstandes von bis zu 305 mm allerdings eine Prüfquelle im Mittelspannungsbereich (6 – 15 kV beispielsweise) erforderlich. Diese treibende Spannung garantiert das Zünden und Bestehen eines stabilen Lichtbogens während der gesamten Prüfdauer.

Prüfergebnis

Diese Methode ermöglicht es, eine Bewertungszahl zu bestimmen, welche beschreibt, bis zu welchem Maß ein spezifisches schwer entflammables Material eine Hitzeübertragung an die Haut verringern oder aufhalten kann (heat attenuation factor, HAF). Weiterhin wird mit 95%iger Wahrscheinlichkeit der Grenzwert für das Einsetzen von Hautverbrennungen zweiten Grades auf der Basis der Stoll-Kurve ermittelt und bestimmbar. Dieser Grenzwert für das Einsetzen von Hautverbrennungen wird ATPV oder „Arc Thermal Performance Value“ genannt (vgl. Bild 6 und Anhang 1).

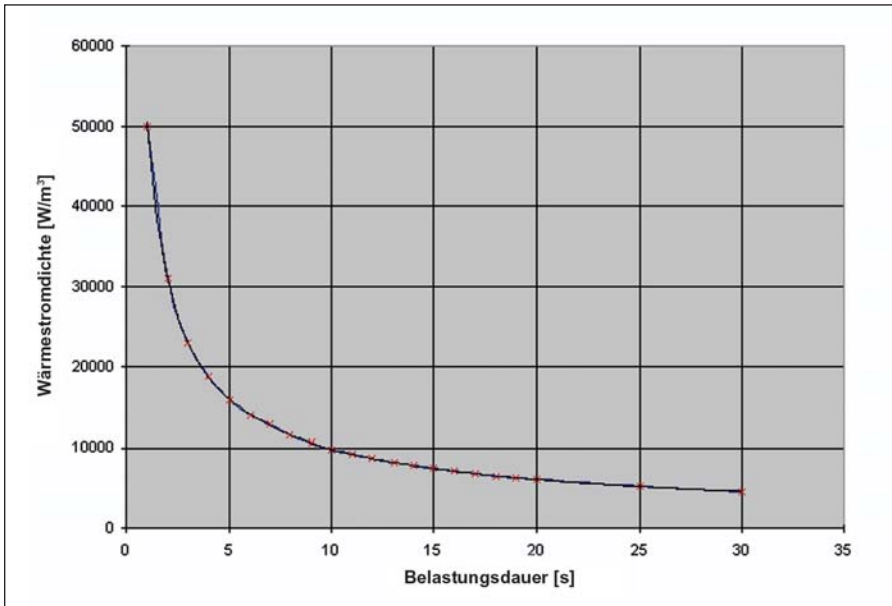


Bild 6 Verbrennungen 2. Grades gemäß Stoll, A.M. and Chianta, M.A. (Aerospace Medicine, Vol. 40, 1968, Seiten 1232-1238)

Anwendbarkeit der Prüfergebnisse

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

7.3 Prüfverfahren nach CENELEC

7.3.1 CENELEC-Methode (ENV 50354:2000)

Prüfablauf

Das bei CENELEC entwickelte Prüfverfahren ENV 50354:2000 /4/ kann für Textilmaterial und ganze Anzüge genutzt werden. Es basiert auf einem fixiertem Prüfaufbau und Prüfkreis. Der Prüfkreis besitzt eine treibende Spannung bzw. Leerlaufspannung von 400 V (50 Hz). Die Prüfdauer Lichtbogenzeit beträgt 500 ms.

Die Norm legt zwei Textilklassen fest, für die die Prüfbedingungen exakt definiert sind. Die Klassen unterscheiden sich im Hinblick auf den Prüfstrom I_{pros} :

Klasse 1: 4 kA, 500 ms

Klasse 2: 7 kA, 500 ms.

Um reale, vom Kunden vordefinierte Praxisbedingungen in den Test zu projizieren, wird ein Strom in Abhängigkeit von der Prüfklasse eingestellt.

Es ist anzumerken, dass der Strom I_{eff} , der während der Lichtbogenzeit im Prüfkreis fließt, kleiner ist als dieser prospektive Wert. Der Lichtbogen besitzt eine nichtlineare und zeitveränderliche Resistanz, die prinzipiell eine Verminderung gegenüber dem Kurzschlusswert (Kurzschluss der Elektroden) bewirkt. Bei den Lichtbogenspannungen von 100...130 V, die gegenüber einer treibenden Spannung von 400 V auftreten, ist dieser Einfluss merklich (15...20%).

Die Prüfanordnung besteht ebenfalls aus einer vertikalen Elektrodenanordnung, zwischen denen der Lichtbogen gezündet wird (siehe Bild 7). Der Abstand der Elektroden beträgt jedoch nur 30 mm. Die oberen Elektroden bestehen aus Kupfer, die unteren aus Aluminium und sind mit Innenbohrungen verse-

hen, um die Stabilität des Lichtbogens über die geforderte Lichtbogenzeit von 500 ms gewährleisten bzw. erhöhen zu können. Im 400 V-Kreis ist das Bestehenbleiben eines stabilen Lichtbogens sehr viel komplizierter als bei Stromkreisen mit Spannungen deutlich über 1000 V.

1: Prüfplatte oder Prüfpuppe

2: Prüfbox

3: Anschlußkabel

4: Elektrodenabstand

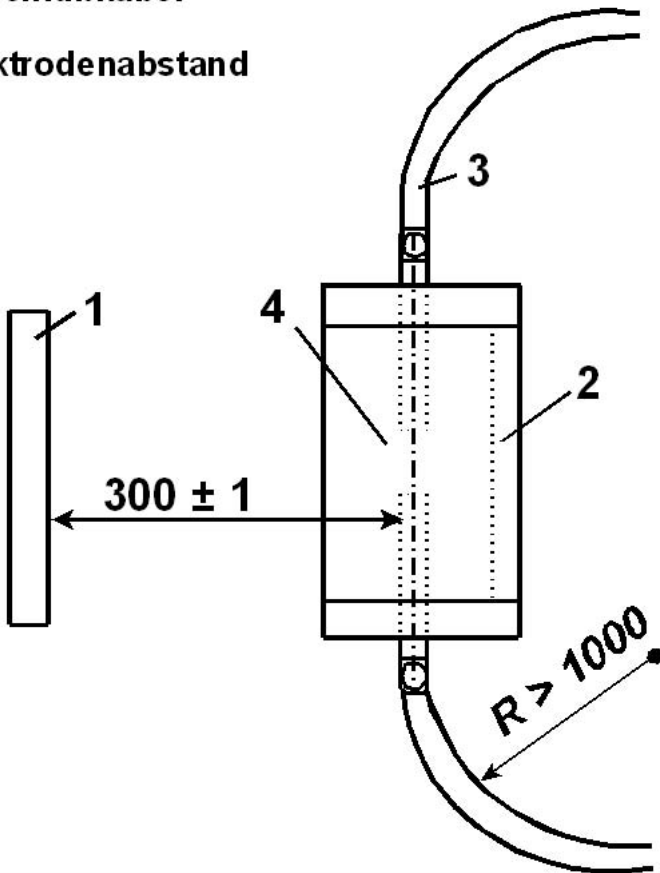


Bild 7 CENELEC-Prüfaufbau (Seitenansicht, Angaben in mm)

Die Elektroden sind umgeben von einer Prüfbox, die den Elektrodenraum durch ihre parabolische Querschnittsform dreiseitig abschließt und nur eine Öffnung in Richtung der Probenanordnung bietet (vgl. Bild 8). Die Box ist mit Gips ausgekleidet und nach oben und unten durch Isolierstoffplatten abgeschlossen. Sie bildet die Wirkung von Rück- und Seitenwänden von Anlagen nach und besitzt den Effekt der Lichtbogenprüfung und Richtcharakteristik, indem die Lichtbogenwirkungen in Richtung Textilprobe konzentriert werden.

Das zu prüfende Material wird auf einer 400 mm x 400 mm großen, senkrecht stehenden Platte aufgespannt; der horizontale Abstand zur Lichtbogenachse beträgt 300 mm, was dem Oberkörper-Störlichtbogen-Abstand für einen Menschen bei Arbeiten an einer Anlage entspricht, wenn dieser den Lichtbogen auslöst (vgl. Bild 9).

Das Prüfverfahren verlangt eine Vorbehandlung der zu prüfenden Materialien zum Nachweis der Beständigkeit der Eigenschaften. Diese besteht in der Durchführung von 5 Industriegewaschen und Trocknungen gemäß der entsprechenden Norm oder den Gebrauchsanweisungen des Herstellers.

Wie bereits beschrieben, werden bei Materialprüfungen die Prüflinge auf einer 400 mm x 400 mm großen, senkrecht stehenden Platte aufgespannt. Im Falle einer Prüfung von Anzügen, werden diese – statt auf einer Platte – auf einer Prüfpuppe/Dummy befestigt.

Mit dieser Prüfung werden zwei Prüfstücke eines Materials benötigt. Diese werden unter gleichen Prüfbedingungen jeweils mit einem Lichtbogen „beschossen“.

Prüfergebnis

Die Bewertung der Prüfungen erfolgt in Form einer visuellen Einschätzung der Proben nach den Kriterien

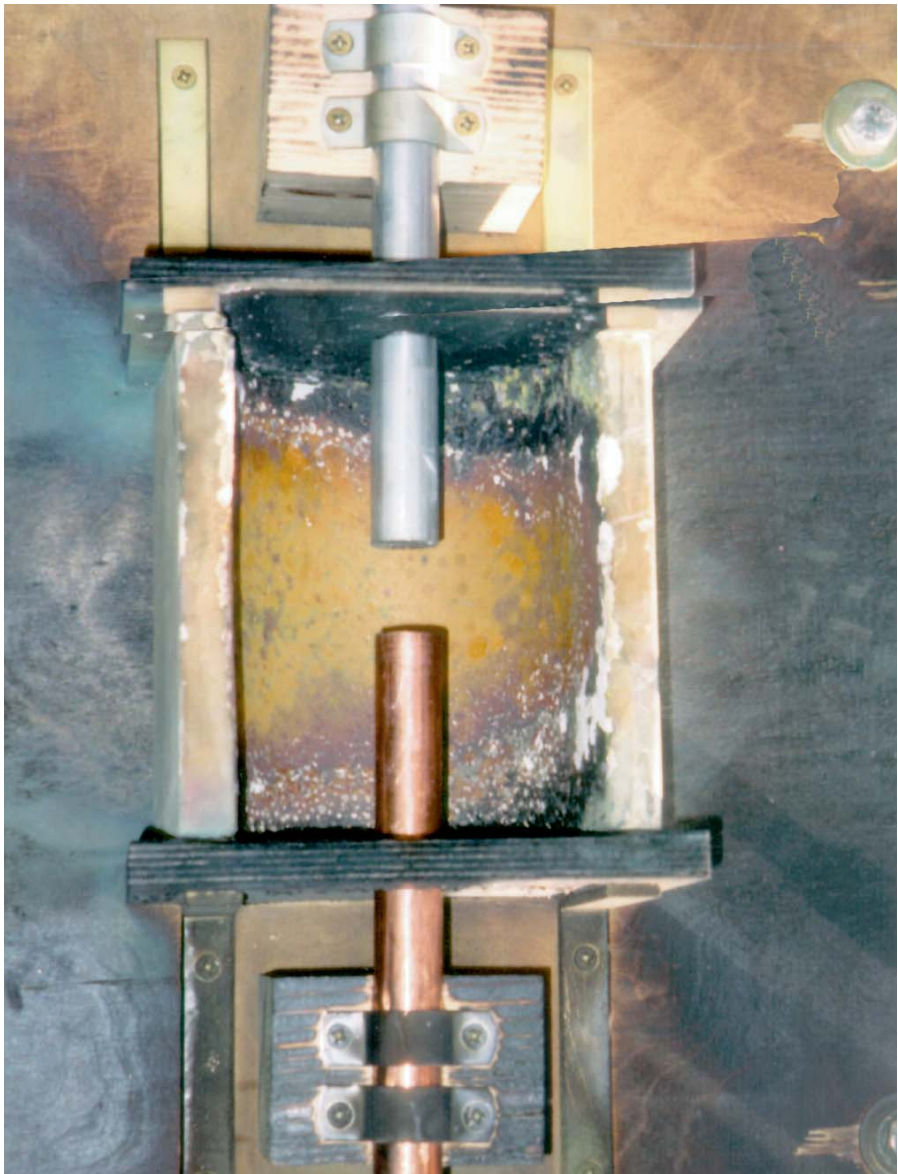


Bild 8 Prüfbox der CENELEC-Methode

- kein Nachbrennen der Probe bzw. Nachbrenndauer kleiner gleich 5 s nach Lichtbogenbeanspruchung;
- kein Durchschmelzen der Proben bis auf die Innenseite;

- keine Lochbildung mit Ausdehnungen von mehr als 5 mm (in jede Richtung);
- Funktionserhalt aller Zubehörteile bei konfektionierter Kleidung.

Die Prüfung gilt als bestanden, sofern diese Bedingungen erfüllt sind.

Bei dieser Testmethode wird kein Energiefluß oder „ATPV-Wert“ gemessen. Prüfaufbauten bzw. -parameter und vor allem auch die erforderliche Probenanzahl ermöglichen jedoch deutlich preisgünstigere Prüfungen. Dies betrifft auch die Prüfspannung von 400 V.

Anwendbarkeit der Prüfergebnisse

Die Prüfbedingungen orientieren sich an praktisch realen und relevanten Verhältnissen im Bereich der Niederspannungsanlagen bzw. -netze. Der praktische Gültigkeitsbereich der Prüfergebnisse ergibt sich direkt aus den Prüfparametern (4 kA/500 ms oder 7 kA/500 ms), deren Werte die Grenzen hinsichtlich der Netzkurzschlussströme bzw. -kurzschlussleistungen darstellen.

Eine spezifische Anwendung mit höheren Lichtbogenintensitäten ist – extrapoliert auf die vorgenannten Prüfparameter – nicht möglich. Es ist jedoch möglich den CENELEC-Prüfaufbau für höhere Prüfströme und/oder längeren Expositionszeiten zu nutzen.

7.3.2 Erweitertes CENELEC-Prüfverfahren

Die derzeitige CENELEC-Prüfverfahren ist relativ einfach praktikabel und ermöglicht in hohem Maße eine Vergleichbarkeit von Prüflingen. Es ist jedoch weder möglich, den quantitativen Hitze- fluß, noch die thermische Schutzbeschaffenheit zu messen. Um auch dieses zu ermöglichen, hat man an der Technischen

Universität Ilmenau zusammen mit dem Sächsischen Textil Forschungsinstitut in Chemnitz auf der Grundlage der CENELEC Methode eine Möglichkeit gefunden, auch dieses zu bewerkstelligen.



Bild 9 Störlichtbogenprüfung nach CENELEC – Klasse 2 – Prüfung an einer Arbeitsjacke

Prüfablauf

Bei der erweiterten Testmethode werden zwei Wärmemesser gemäß EN 367 /2/, und somit auch entsprechend der IEC-Methode, mit der senkrecht stehenden Platte verbunden, um den Hitzedurchgang unmittelbar am Material feststellen zu können. Bei diesem Verfahren sind vier „Schüsse“ für die Prüfung eines Materials vorgesehen.

Prüfergebnis

Der Hitzefluss, welcher das zu testende Material oder Anzug durchdringt, wird mit Hilfe der beiden o.g. Wärmemesser an der Testplatte gemessen. Diese nunmehr gewonnenen Daten werden mit den Kriterien der Stoll-Kurve verglichen, d. h. ob gemäß der „neuen“ Daten eine Verbrennung zweiten Grades zu erwarten ist oder nicht.

Die Prüfung ist bestanden, wenn – zusätzlich zu den vorgeannten qualitativen Kriterien (Inaugenscheinnahme) – alle 4 ermittelten Hitzefluss-Kurven unter der Stoll-Kurve liegen, d. h. eine Verbrennung zweiten Grades nicht zu erwarten ist.

Anwendbarkeit der Prüfergebnisse

Diese erweiterte Methode erlaubt eine mehr „quantitativ“ orientierte Bewertung von Schutzkleidung innerhalb des vorgeschriebenen Meßbereiches, welches durch den Prüfaufbau abgedeckt ist, also entweder Klasse 1: 4 kA/500 ms oder Klasse 2: 7 kA/500 ms.

Diese erweiterte CENELEC-Testmethode wird nun schon seit einigen Jahren in dieser Form praktiziert und könnte zukünftig als zusätzliche Prüfmethode in die o.g. IEC 61482-1 /3/ mit einfließen.

7.4 Prüfverfahren mit dreiphasigem Kurzschluss an einem Hausanschluss (RWE Eurotest, Deutschland)

Prüfablauf

Das Prüfverfahren nach RWE Eurotest ist anwendbar für konfektionierte Schutzkleidung, die bei Arbeiten an Niederspannungsanlagen getragen werden sollen, zur Vermeidung von schweren Verletzungen infolge von Störlichtbögen in Höhe des Brustbereiches. Anforderungen an Hand- und Kopfschutz können bei diesem Prüfverfahren nicht berücksichtigt werden.

Bei diesem Prüfverfahren wird die Störlichtbogenprüfung in Hinblick auf eine natürliche Nachbildung dreiphasig ausgeführt. Die Spannung des Prüfkreises beträgt hierbei 400 V (AC) und der Effektivwert des unbeeinflussten Kurzschlussstromes hat den Wert 10 kA; in jeder Phase muss der Strom innerhalb einer Grenzabweichung von 0 bis +5 % liegen. Die Prüfung wird mit einer Nennfrequenz von 50Hz oder 60Hz durchgeführt. Die Lichtbogenbrenndauer von 500 ms bzw. 1000 ms wird vom Hersteller festgelegt.

Für den Prüfaufbau wird ein Hausanschlusskasten Typ KH 00 100-A nach DIN 43627 mit der baulichen Ausführung nach DIN VDE 0660-505 mit drei zu den unteren Enden konisch verlaufenden Sammelschienen aus warmgewalztem Flachstahl 40x5 DIN 1017-Ust 37-2 benötigt. Der Deckel ist zu entfernen (vgl. Bild 10).

Der Prüfling für diese Störlichtbogenprüfung kann ein zweiteiliger Anzug, ein Overall oder ein Mantel (Schutzkittel) sein. Für die Prüfung ist eine Schutzkleidung der Körpergröße 176 bis 186 cm (entsprechend der deutschen Konfektionsgröße 52) zu unterziehen. Die Anzahl der „Schüsse“ ist nicht festgelegt, jedoch werden zwei bis vier empfohlen.

Die Schutzkleidung muss durch 40 Industriewäschen gemäß EN ISO 10528 /5/ oder 40-malige chemische Reinigung nach ISO 3175 /6/ vorbehandelt werden.

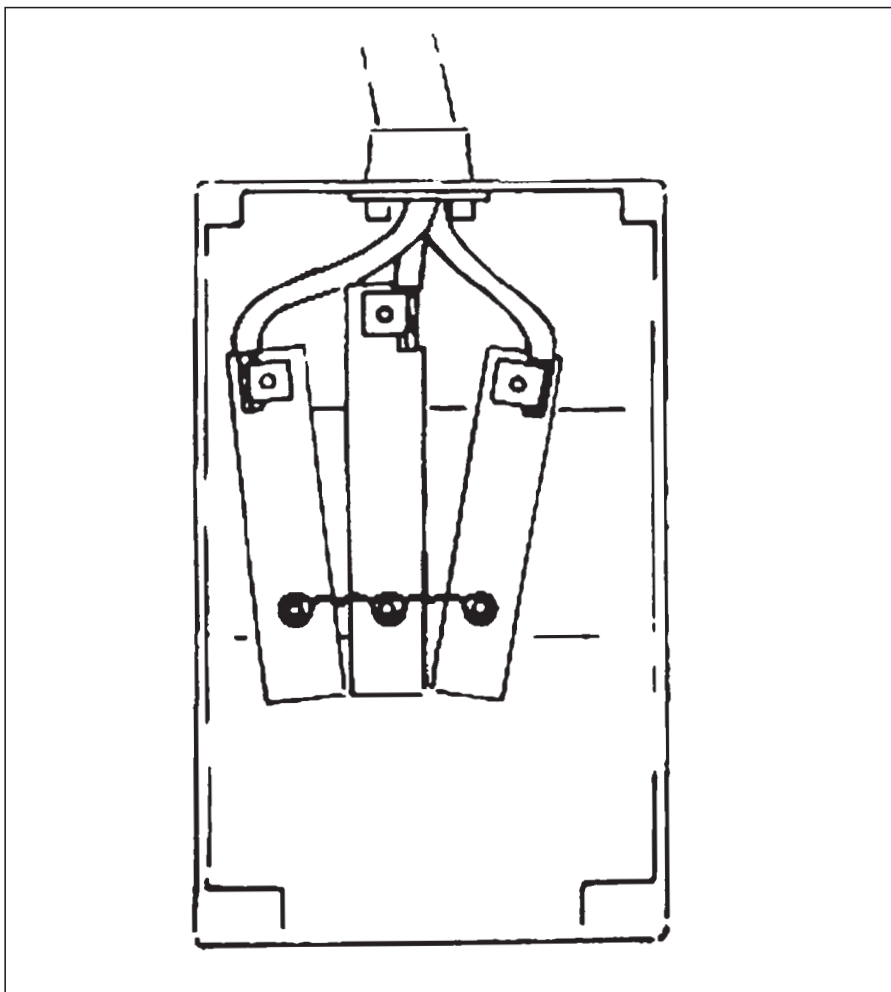


Bild 10 Prüfaufbau mit Sammelschienen und einer Kupferdrahtbrücke in einem Hausanschlusskasten vom Typ KH 00 100-A

Für die Positionierung der Schutzkleidung vor dem Lichtbogen dient eine Versuchspuppe der Größe 176 cm bis 186 cm aus nicht entflammarem Material, die im Bereich des Oberkörpers mit 8 und an den Armen mit jeweils 2 Wärmesensoren zur Wärmestromdichtemessung bestückt ist (vgl. Bild 11). Der Wärmesensor ist ein Kupferplättchen, welches auf wärmeisolierenden Träger in Anlehnung an EN 367 aufgeklebt wird /2/.

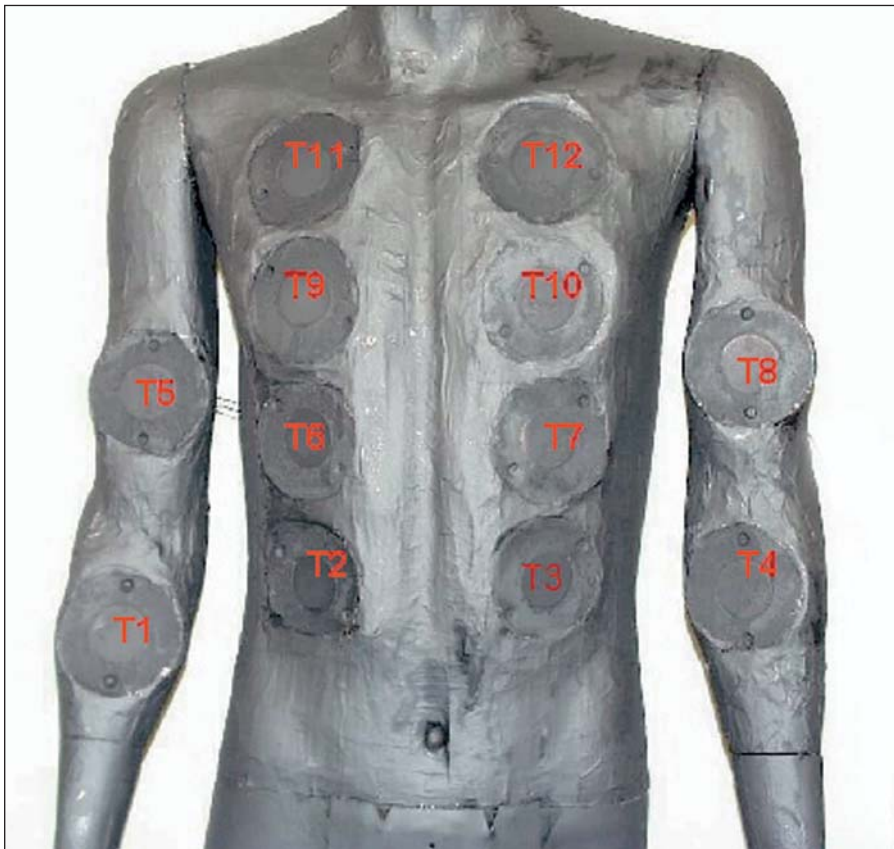


Bild 11 Anordnung der Kalorimeter beim RWEurotest-Prüfaufbau

Die Versuchspuppe ist vor dem Hausanschlusskasten, der in einer nachgebildeten Raumecke angebracht ist, aufzustellen. Die ungefähre Mitte des Brustbereichs ist hierbei 300 mm von der Entstehungsstelle des Lichtbogens entfernt anzuordnen (vgl. Bild 12).

Zur zeitlichen Erfassung der Oberflächentemperatur der Versuchspuppe ist ein Messerfassungssystem mit einer Bandbreite von mindestens 10 kHz einzusetzen. Die Temperatur muss in einen Bereich bis 400 °C aufgezeichnet werden können. Die Aufzeichnungen der Temperaturverläufe erfolgt mit Zündung des Lichtbogens und muss über mindestens 20 s fortgeführt werden.



Bild 12 Hausanschlusskasten vom Typ KH 00100-2 und Schutzkleidung vor Störlichtbogenprüfung

Prüfergebnis

Die Wärmestromdichte (kW/m^2) lässt sich aus folgenden Parametern bestimmen:

- aus der Masse, der Fläche und der spezifischen Wärmekapazität der Kupferplatte;
- der Temperaturänderung während des Versuchs (höchste aufgetretene Temperatur abzüglich der Anfangstemperatur der Kalorimeter)
- der Zeitdifferenz vom Beginn des Störlichtbogens bis zu dem Zeitpunkt, an dem die höchste Temperatur erreicht wird.

Die Schutzkleidung muss in Höhe des Brustbereiches bei Einwirkung des dreiphasigen Störlichtbogens mit jeweils 10 kA/1 s bzw. 10 kA/0,5 s in einem Abstand von 300 mm den menschlichen Körper vor thermischen Schäden schützen. Hierbei soll die Körperoberfläche die nach Stoll/Chianta ermittelten Werte für Verbrennung zweiten Grades nicht erreichen.

Die Prüfung der Schutzkleidung gilt als bestanden, wenn

- bei jeder Schutzkleidung die ermittelte Wärmestromdichte nach Stoll/Chianta nicht überschritten wird
- sich die Verschlüsse der Schutzkleidung öffnen lassen
- durch Besichtigung festgestellt wird, dass Risse oder Löcher (die unterste Lage ist entscheidend) infolge der Flammenwirkung nicht größer als 10 mm im Durchmesser sind
- die Schutzkleidung nicht länger als 5 Sekunden nachbrennt.

Anwendbarkeit der Prüfergebnisse

Mit Hilfe der durch diese Methode ermittelten Prüfergebnisse soll die Auswahl von zweckmäßiger Schutzkleidung für die Arbeitsbereiche 10 kA/1000 ms oder 500 ms/dreiphasig/300 mm vereinfacht werden.

7.5 Prüfverfahren mit Messung des Wärmedurchgangs mit Infrarot-Kamera (AMYS, Spanien)

Prüfablauf

Jedes Objekt, das eine Temperatur über 0 K Kelvin aufweist, emittiert eine Wärmestrahlung. Für einen perfekten Emitter oder

„schwarzen Körper“ lässt sich die Emission gemäß der Planckschen Formel berechnen.

Grundsätzlich verhält sich ein Objekt nicht als ein perfekter Emittierer oder „schwarzer Körper“. Gleiches gilt für die Methode der Thermographie, deshalb ist es notwendig seine Emissionsstärke ε zu kennen. Dieser Koeffizient ε wird definiert als Korrekturfaktor zwischen der emittierten Strahlung durch ein Objekt und der Strahlung, die ein „schwarzer Körper“ bei gleicher Temperatur emittieren würde. Daher ergeben sich Werte für den Korrekturfaktor zwischen 0 und 1.

Bei poliertem Metall beträgt die Emissionsstärke ca. 0,005, während der Koeffizient ε für andere Objekte, wie z.B. die menschliche Haut, Kohle etc. (also sog. „gute Emittierer“) nahezu 1 beträgt. Generell gesagt, ist die Emissionsstärke als eine Funktion der Wellenlänge der emittierten Strahlung zu sehen.

Thermographische Infrarotmesssysteme sind Ausrüstungen, die die emittierte Strahlung empfangen und diese in ein Signal umwandeln, im allgemeinen elektrischer Strom bzw. Spannung.

Diese Systeme beinhalten Temperatur- oder Quantumdetectoren. Temperaturdetektoren basieren auf dem Prinzip, dass sie Temperaturveränderungen des Detektors in ein Messsignal umwandeln (z.B. Bolometer/Thermowandler). Quantumdetectoren basieren auf dem Prinzip des durch Infrarotstrahlen entstehenden photoelektrischen Effektes, der – normalerweise – an halbleitenden Materialien entsteht. Dieser Detektortyp wird bei standardmäßigen thermographischen Infrarotkameras genutzt.

Die Methode der Sichtbarmachung der Wärmestrahlung im Infrarotbereich bietet sehr viele Möglichkeiten. Eine der weitverbreitetsten Anwendungen sind die Nachtsichtgeräte zum Sichtbarmachen von Objekten, die einen Temperaturunterschied zur Umgebung aufweisen (militärische und medizinische Anwendung).

Praktische Anwendungen sind die Sichtbarmachung des Ausströmens von warmen Gasen (Umweltschutz), Erhitzung von Maschinenteilen (Motorenbau), Fehler in der (thermischen) Isolierung (Bauwesen), Studien über vulkanische Phänomene etc.

Prüfergebnis

Die gewonnenen Abbildungen werden durch das Informationssystem der thermographischen Ausstattung analysiert, so dass ein „Schnappschuss“ eines jeden Momentes möglich ist, in dem die Maximaltemperatur erreicht wird mit (gleichzeitiger) Spezifizierung des Wärmedurchgangs. Für jeden Schuss aus jeder Sequenz wird die Durchschnittstemperatur eines kleinen Bereiches errechnet. (vgl. Bilder 13 und 14).

Die Durchschnittstemperatur ist mit T bezeichnet. Der gezeigte Bereich ist der „heißeste Punkt“ aus jeder Sequenz. Dieser „heißeste Bereich“ beinhaltet ebenfalls die Temperaturmerkmale aus den heißesten Punkten und dessen Umgebung aus jeder Sequenz.

Danach kann der durchschnittliche Wärmedurchgang berechnet werden. Dieser Durchgang bezieht sich darauf, dass bei Bestrahlung die Temperatur des jeweiligen Materials steigt.



Bild 13 Thermographische Momentaufnahmen von Störlichtbogenprüfungen

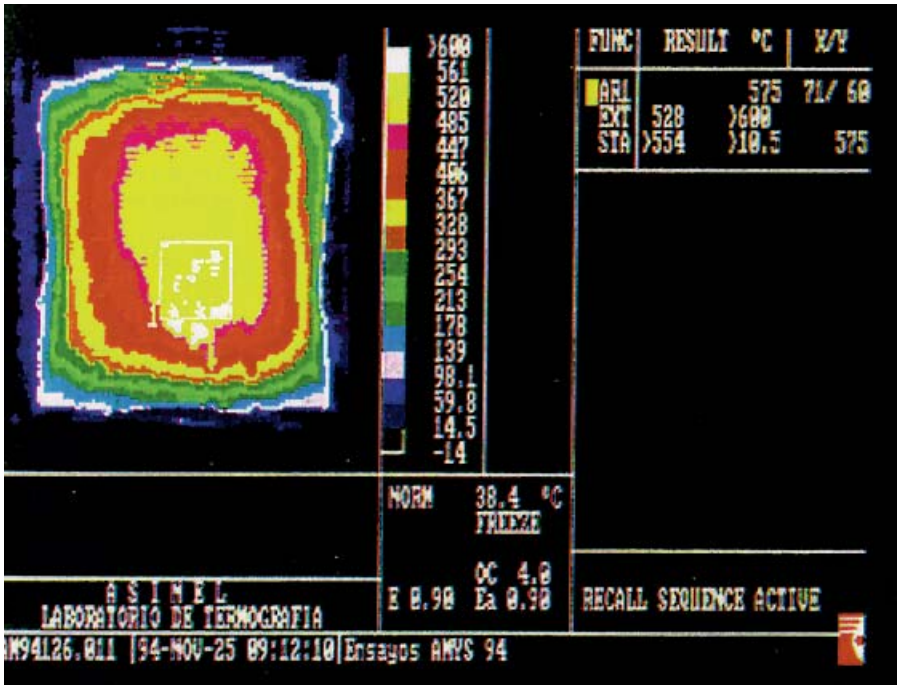


Bild 14 Bewertung des „heißesten“ Punktes mit dem Thermographieverfahren

Die Größe dieser Bereiche bezieht sich auf eine Standardabweichung des „heißesten Punktes“ von ungefähr 20 Schüssen.

Die Grafiken (vgl. Bilder 15.1 und 15.2) zeigen die Temperaturänderungen der Durchgangsmessungen für diese Bereiche in ° Celsius auf. Sie beziehen sich auf die Zeit und die Maximaltemperatur, die auf dem getesteten Material zum jeweiligen Zeitpunkt erreicht wurde.

Vor jeder AMYS-Sequenz wurde ein Wärmeschuss durchgeführt, bei dem auch auf den „heißesten Punkt“ Bezug genommen wurde.

Die Emissionsstärke eines Materials wurde im Labor mit einem Wert von 0,90 (bei einem max. Fehler von 0,03) gemessen. Es zeigt sich, dass Fehler bei der Temperaturmessung eben genau

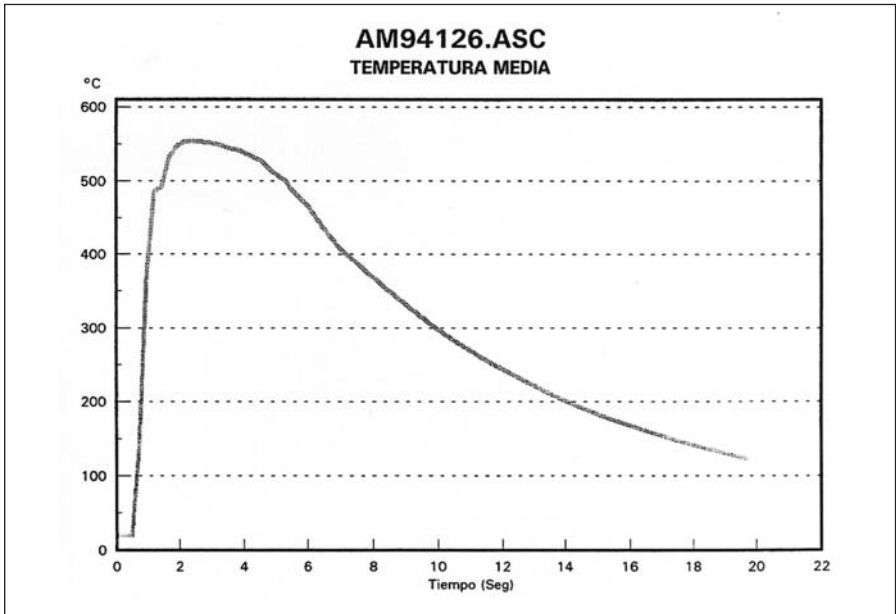


Bild 15.1 Temperaturverlauf während der Prüfung

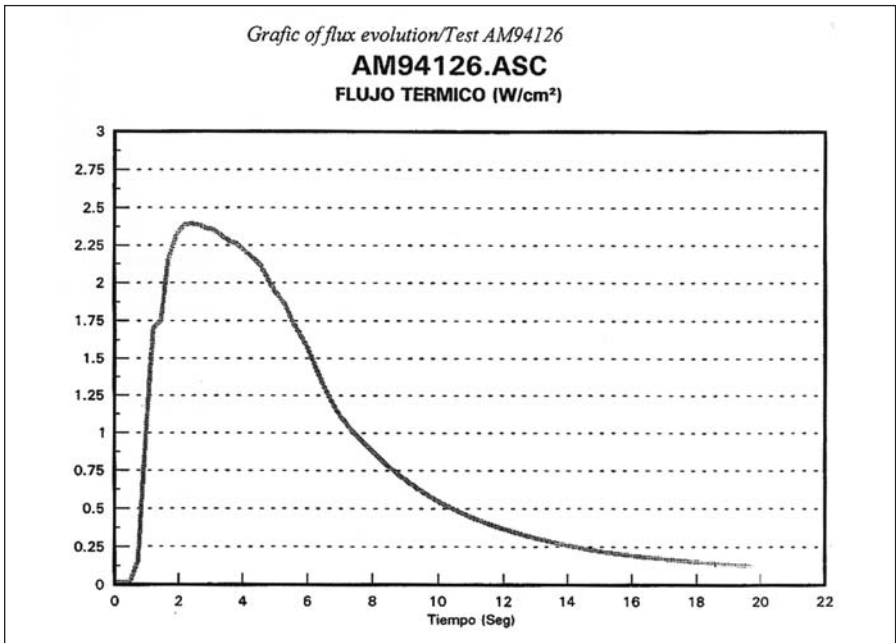


Bild 15.2 Wärmestromverlauf während der Prüfung

von der Temperatur selbst und nicht noch zusätzlich von der Emissionsstärke abhängig sind:

Bei 150° C liegt die maximale Fehlerquote bei 3°

Bei 350° C liegt die maximale Fehlerquote bei 13°

Um die Wärmedurchgangsdaten über die Temperaturdaten zu berechnen, genügt es die vierte Potenz von T (°K) mit der Stephen-Boltzmann-Konstante ($5,7 \times 10^{-8}$) und der Emissionsstärke (0,9) zu multiplizieren, um den Wärmefluss W/m^2 zu ermitteln:

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

wobei

$\varepsilon = 0,9$ für das Material

$\sigma = 5,7 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

Der Bereich, an dem der durchschnittliche Wert des Wärmedurchgangs ermittelt worden ist, beschreibt den heißesten Punkt eines jeden Schusses und legt damit ein konzentrisches Quadrat von 8,72 cm fest. Das ergibt eine Fläche von 76,04 cm².

Die Messgeschwindigkeit beläuft sich auf etwas mehr als vier Schüsse pro Sekunde, das entspricht ungefähr 90 Schüssen für eine Sequenz. Die Anzahl der Schüsse ergab sich aufgrund der beschränkten Speicherkapazität des eingesetzten Rechners. Diese entspricht 21,42 s.

Jede Sequenz beinhaltet eine variierende Anzahl an nicht verwertbaren Daten. Diese gehören zu den erstermittelten Daten und entsprechen der Raumtemperaturmessung. Diese Daten liegen in dem Temperaturmessverfahren begründet. Die thermografische Ausrüstung speichert bereits Daten, bevor überhaupt

ein Lichtbogen ausgelöst wurde. Dies dient der Absicherung, dass schon vor dem Auslösen des Lichtbogens die Daten gespeichert werden.

Die Lichtbogensteuerung konnte nicht zur automatischen Synchronisation der thermografischen Messeinrichtung eingesetzt werden. Daher müssen einige der registrierten Anfangsdaten verworfen werden, sinnvollerweise für eine Sequenz von ca. 20 s.

Die durch die Methode der Thermographie erhaltenen Daten werden in drei Spalten aufgelistet. Die erste Spalte zeigt die Zeit in Sekunden auf, die zweite beschreibt die Temperatur des heißesten Punktes auf dem Material für jede Zeiteinheit und in der dritten Spalte ist der Wärmedurchgang im beschriebenen Bereich W/cm^2 (in der ersten Testeinheit mit kW/m^2) für jede Zeiteinheit aufgelistet.

Anwendbarkeit der Prüfergebnisse

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die höchsten Wärmedurchgangsdaten gemessen werden. Dadurch kann aufgezeigt werden, dass sie den ungünstigsten Moment im Hinblick auf Personenschutz darstellen. Die Daten der anderen Spalten werden als ergänzende Informationen herangezogen, um außergewöhnliche und besondere Fälle herauszuheben.

Derzeit ist eine Prüfung nach dem zuvor beschriebenen Verfahren nicht möglich, da keine Einrichtung mit einem entsprechenden Prüfaufbau verfügbar ist.

8 Brennbarkeit von Textilien

Es ist voranzustellen, dass alle Natur- und 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 Beflammlung reagieren.

Die thermische Schutzwirkung eines Materials besteht einerseits in der Isolation des Trägers vor der einwirkenden Wärmeenergie und in einem möglichst schnellen Verlöschen der während der Beflammlung in Brand geratenen Materialbereiche (s. Nachbrennzeit). Letztlich soll die zu schützende Person nicht zusätzlich durch das verwendete Kleidungsmaterial geschädigt werden. Einen vollständigen Schutz gegenüber der Einwirkung wird die Kleidung aber nur immer bis zu einem gewissen Grade bieten können.

9 Einstufung der störlichtbogenfesten Kleidung als Schutzkleidung

Immer wieder wird die Frage gestellt, ob eine Arbeitskleidung für elektrotechnische Arbeiten nicht der Schutzkleidung zugeordnet werden muss.

Das Arbeitsschutzgesetz fordert mit § 5 eine Gefährdungsbeurteilung für jeden Arbeitsplatz. Dies gilt auch für Arbeitsplätze, an denen elektrotechnische Arbeiten ausgeführt werden. Wird eine Gefährdungsbeurteilung für diese Arbeiten durchgeführt, so zeigt das Ergebnis eine mehr oder weniger große Gefahr der Störlichtbogenbildung. Soweit möglich, sind durch technische Maßnahmen die Gefahren an der Quelle zu beseitigen. Das heißt: Freischalten!

Nicht in allen Fällen ist das möglich, so dass unter bestimmten Voraussetzungen „Arbeiten in der Nähe“ oder „Arbeiten unter Spannung“ durchgeführt werden. Diese speziellen Arbeitsverfahren dürfen aber nur angewandt werden, wenn Maßnahmen zur Vermeidung einer Störlichtbogenbildung getroffen wurden. Der Schutz der Person durch persönliche Schutzausrüstungen darf erst die letzte Maßnahme sein.

Die Gefahr der Auslösung eines Störlichtbogens im normalen Versorgungsnetz – hier fällt der Großteil der elektrotechnischen Arbeiten an – kann nicht vollständig beseitigt werden. Vorsichtsmaßnahmen zum Schutz der Personen sollten also in jedem Falle getroffen werden, auch wenn für spezielle Arbeiten das Risiko sehr klein erscheint. Letztlich erscheint die Frage, ob eine Kleidung als Arbeits- oder Störlichtbogenkleidung bezeichnet wird nebensächlich, wenn die Prüfanforderungen an die Kleidung die zu erwartende Intensität der Einwirkungen beinhalten. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass diese Anforderungen von jedem Endprodukt erfüllt werden.

Wer allerdings glaubt, die geprüften Materialien würden jedem Störlichtbogen standhalten, der täuscht sich. Der Störlichtbogen ist ein unerwartetes Ereignis, dessen Intensität an Hand der Netzparameter abgeschätzt werden kann, der jedoch von vielen weiteren Einflussfaktoren abhängig ist (z.B.: Abstand der Person zum Lichtbogen). Hierbei sei angemerkt, dass bei den meisten Störlichtbogenprüfverfahren ein Standardabstand von ca. 300 mm zugrunde gelegt wird.

10 Empfehlungen für die Auswahl von textilen Materialien

Kann an Arbeitsplätzen eine Lichtbogenegefährdung nicht ausgeschlossen werden, so sollte nur eine Kleidung aus flammhemmenden Material eingesetzt werden. Mischgewebe oder reine Baumwolle ohne zusätzliche Ausrüstung kann nur in gewissem Maße und auch nur bis zu einem bestimmten Grad durch ein höheres Flächengewicht die fehlende flammhemmende Ausrüstung kompensieren.

Nicht unwesentlich ist auch die Materialkonstruktion. So brennt ein leichtes Material in einer weniger dichten Konstruktion und aus wenig gedrehtem, flusigen Garn viel leichter. Ein sehr dicht geschlagenes Material, dass auch noch aus scharf gedrehten und gezwirnten Garnen hergestellt wurde, wird wesentlich schlechter brennen.

In vielen Staaten weltweit werden aufgrund von Sicherheitsvorschriften die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung für jeden Arbeitsplatz gefordert, z.B. mit den Europäischen Richtlinien 89/391/EEC /7/ und 89/686/EEC /1/. Die geeignete Schutzkleidung sollte im Ergebnis einer Gefährdungsbeurteilung und den mit Hilfe des einen oder anderen Prüfverfahrens ermittelten thermischen Eigenschaften von verschiedenen textilen Materialsystemen ausgewählt werden. Bei Arbeitsplätzen mit erhöhter Gefährdung durch einen Störlichtbogen ist als Mindestanforderung Schutzkleidung der Klasse 1 oder 2 gemäß des CENELEC-Verfahrens einzusetzen, und das entspricht ungefähr einer Einwirkungsenergie von 248 kW/m² oder 423 kW/m² (5,8 cal/cm² oder 10,2 cal/cm²). In Bild 16 sind Anhaltswerte für erforderliche Flächengewichte angegeben. Aufgrund der verschiedenen Verfahren bis zur Fertigstellung des Endproduktes können die zuvor genannten Werte während des Produktionsprozesses abweichen. Bei der Auswahl eines Materialsystems sollte deshalb der jeweilige „ATPV-Wert“ nochmals überprüft werden.

CENELEC Klassifizierung	Baumwolle, flammhemmend	Aramid Gewebe
Klasse 1 4 kA	300g/m ²	250 g/m ²
Klasse 2 7 kA	550 g/m ² oder 2 x 320 g/m ²	450 g/m ² oder 2 x 250 g/m ²

Bild 16 Erforderliche Mindestflächengewichte (Anhaltswerte, da die Materialeigenschaften im Produktionsprozess variieren)

11 Qualitätskontrolle

Wie Tests immer wieder gezeigt haben, schwankt das Niveau flammhemmend ausgerüsteter Gewebe von Produktionscharge zu Produktionscharge und oft auch innerhalb einer Produktionscharge erheblich. Dies gilt besonders für Gewebe aus flammhemmend ausgerüsteten Naturfasern, aber auch für Gewebe aus Chemiefasern.

Gewebe, die einen Lichtbogentest bestanden haben, könnten ihn bei der nächsten Produktionscharge schon nicht mehr bestehen. Deshalb muss die Produktion flammhemmender Gewebe in kurzen Abständen daraufhin überprüft werden, ob sich das Niveau der flammhemmenden Ausrüstung nicht verschlechtert hat.

Zu diesem Zweck muss der Hersteller geeignete Stichprobenverfahren entwickeln, die eine gleichbleibende Qualität sicherstellen können. Dabei ist auch besonders die in der Praxis durch mehrere Waschzyklen einsetzende Abnutzung zu berücksichtigen.

Eine kostengünstige Überprüfung der Lichtbogeneigenschaften eines Gewebes könnte in Zukunft auch über den Einsatz eines Lasers möglich sein. Diese Überlegungen befinden sich jedoch noch in der Anfangsphase.

Es soll darauf hingewiesen werden, daß in vielen Staaten besonders strenge Vorschriften für die Herstellung von persönlichen Schutzausrüstungen gelten. In der Europäischen Union ist die Durchführung einer Baumusterprüfung für persönliche Schutzausrüstungen zwingend erforderlich. Zur Sicherstellung der vorgegebenen Eigenschaften des Produktes ist ein Qualitätssicherungssystem oder die Entnahme von Stichproben durch ein zertifiziertes Prüflabor vorgeschrieben.

12 Tragehinweise

Die Arbeits- oder Schutzkleidung kann ihre Schutzwirkung nur erfüllen, wenn sie auch getragen wird. Viele schwere Unfälle entstehen, weil die Kleidung entweder gar nicht getragen, die Jacke nicht geschlossen oder z.B. die Ärmel hochgekrempelt wurden. Oft sind hier ergonomische Gesichtspunkte als Ursache zu finden; deshalb sollten die Mitarbeiter möglichst weitgehend bei der Auswahl der Kleidung durch Trageversuche eingebunden werden.

Die flammhemmende Wirkung der Kleidung kann beim Tragen von weiteren leicht brennbaren Kleidungsstücken schnell aufgehoben werden. Deshalb sollte darauf geachtet werden, dass auch Wetter- und Kälteschutz die gleichen Anforderungen erfüllt. Hinsichtlich der Unterwäsche hat sich ein Material aus reiner Baumwolle bei den durchgeführten Störlichtbogenprüfungen als geeignet erwiesen.

Ein weiteres Problem ist verschmutzte Kleidung. Flammhemmende Eigenschaften von Kleidungsmaterialien können schnell durch Verunreinigungen reduziert, wenn nicht sogar aufgehoben werden. Auf eine regelmäßige Reinigung entsprechend der Herstellerhinweise ist deshalb unbedingt zu achten. Jedes Kleidungsstück enthält nach EN 340 /8/ eine Kennzeichnung, auf der das verarbeitete Material und empfohlene Waschverfahren angegeben sind (vgl. Bild 17).



Bild 17 Pflegehinweise des Herstellers

Die Europäische Richtlinie 89/686/EEC /1/ fordert vom Hersteller, daß er dem Anwender eine Produktinformation zur Verfügung stellt. So muß z.B. die Kleidung mit der Anschrift des Herstellers, der jeweiligen Norm, der Schutzklasse, der Kleidungsgröße, dem Reinigungsverfahren und Alterungsangaben gekennzeichnet werden. Zusätzlich muß jedem Produkt eine Informationsbroschüre für den Anwender beigelegt werden. Diese erläutert den Anwendungsbereich, empfohlener Grad oder Klasse, Einschränkungen für die Benutzung, Warnhinweise und Informationen zur Lagerung, Reinigung, Desinfizierung, Instandsetzung usw.

13 Literaturverzeichnis

- /1/ Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für persönliche Schutzausrüstungen, 89/686/EEC
- /2/ EN 367:1992 Schutzkleidung – Schutz gegen Hitze und Flammen – Prüfverfahren zur Bestimmung des Wärmedurchgangs bei Flammeinwirkung
- /3/ IEC 61482-1:2002 Arbeiten unter Spannung – Thermische Schutzkleidung – Thermische Gefahren eines Lichtbogens – Teil 1: Prüfverfahren
- /4/ ENV 50354:2000 Störlichtbogenprüfverfahren für Materialien und Kleidungsstücke für Anwender die einer Störlichtbogensgefährdung ausgesetzt sind
- /5/ EN ISO 10528:1995 Textiles – Gewerbliche Waschverfahren für Textilien vor der Entflammbarkeitsprüfung
- /6/ ISO 3175-2:1998 Textilien – Chemische Reinigung und Nachbehandlung – Teil 2 Verfahren für Perchloroethylen (Tetrachlorethylen)
- /7/ Richtlinie des Rates über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit, 89/391/EEC
- /8/ EN 340:1993 Schutzkleidung - Allgemeine Anforderungen
- /9/ A.M. Stoll and Chianta „Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection“ Aerospace Medicine, Vol. 40, 1968, pp.1232-1238

14 Weitere Literaturquellen

IEEE-Guide „Maintenance, Operation, and Safety of Industrial and Commercial Power Systems“, 1998, pp. 51–73 „Introduction to electrical safety“, chapter 7

IEEE-Guide „Maintenance, Operation, and Safety of Industrial and Commercial Power Systems“, 1998, pp. 75–84 – „Establishing an electrical safety program“, chapter 7

15 Prüfergebnisse spezieller Bekleidungsmaterialien



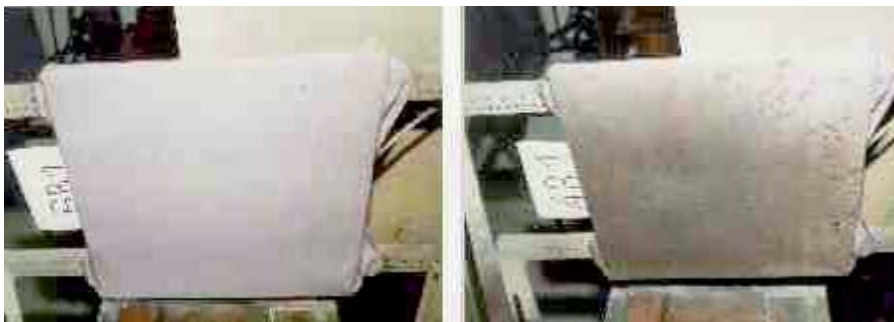
Prüfung 1 CENELEC I7 kA I0,5 s / Meta-Aramid, 3-lagig, 630 g/m²
Obere Lage zerstört / Kein Nachbrennen / Stoll-Kriterium erfüllt



Prüfung 2 CENELEC I7 kA I0,5 s / Meta-Aramid, 2-lagig 420 g/m²
Obere Lage zerstört / Kein Nachbrennen / Stoll-Kriterium überschritten



Prüfung 3 GENELEC/7 kA/0,5 s/Cotton FR, 2-lagig 650 g/m²
Keine Lochbildung/Kein Nachbrennen/Stoll-Kriterium erfüllt



Prüfung 4 GENELEC/7 kA/0,5 s/Cotton FR, 1-lagig 330 g/m²
Keine Lochbildung/Kein Nachbrennen/Stoll-Kriterium überschritten



Prüfung 5 CENELEC/4 kA/0,5 s/Cotton FR, 2-lagig 650 g/m²
Keine Lochbildung/Kein Nachbrennen/Stoll-Kriterium erfüllt

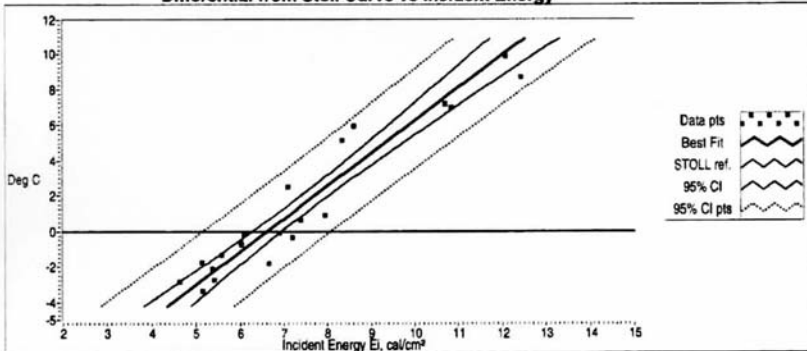
The Institute for the Investigation of Electrical Accidents

267 g/m² NOMEX Delta A, Navy

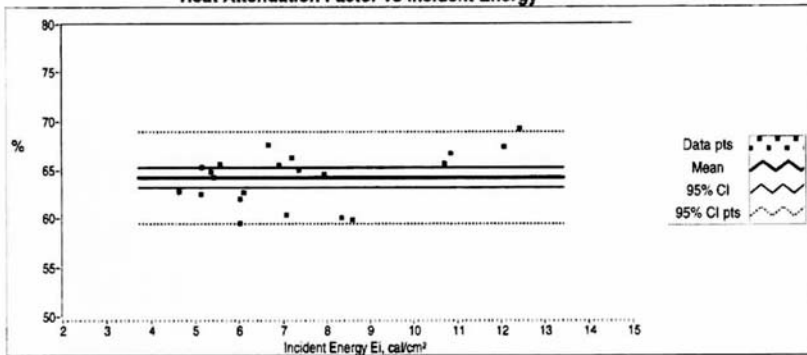
The following tests were performed on flat panels spaced 12 inches from the arc and an electrode spacing of 12 inches with an average current of 8.0kA and an energy range of 4.6 to 12.4 cal/cm². The tests were done at Ontario Power Technologies High Current Lab in Toronto, Canada on Thu, May 04, 2000.

These tests were conducted in accordance with: ASTM F1959-99

Differential from Stoll Curve vs Incident Energy



Heat Attenuation Factor vs Incident Energy



ATPV Value(cal/cm ²) = 6.6	HAF (%) = 64.2
ATPV 95% Confidence Interval = 6.3, 7.0	HAF 95% Confidence Interval = 63.2, 65.3
Pts 95% Confidence Interval = 5.2, 8.1	Pts 95% Confidence Interval = 59.5, 69.0
% Above STOLL = 42.9	
# Points = 21	
r ² = 0.92	

Prüfung 6.1 ATPV-Prüfergebnisse gemäß IEC für NOMEX® Delta A, 267 g/m², navy



Prüfung 6.2 Prüfergebnis NOMEX® Delta A, 267 g/m², navy
IEC18 kAl0,15 s mit $\bar{E}_i = 27,9 \text{ Ws/cm}^2$

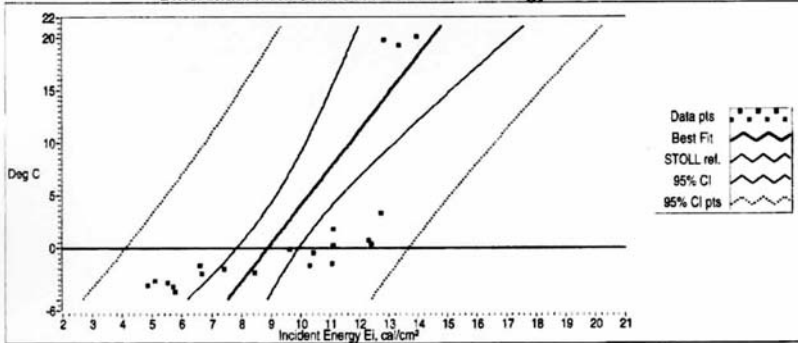
The Institute for the Investigation of Electrical Accidents

350 g/m² SECAN® 100% FR Cotton (Proban®), royal blue twill, ES 322 FK 3850

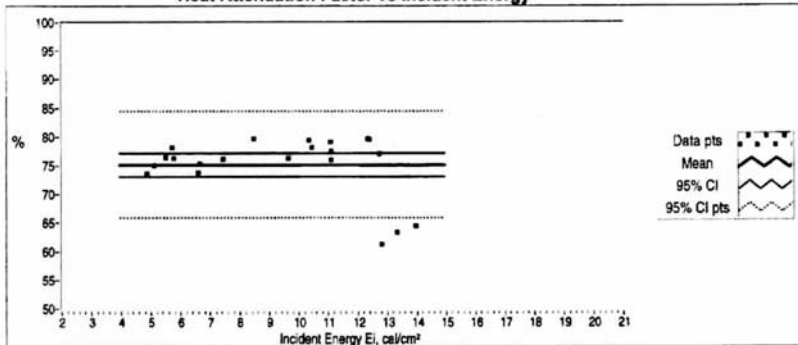
The following tests were performed on flat panels spaced 12 inches from the arc and an electrode spacing of 12 inches with an average current of 8.06kA and an energy range of 4.8 to 13.3 cal/cm². The tests were done at Ontario Power Technologies High Current Lab in Toronto, Canada on Thu, May 04, 2000.

These tests were conducted in accordance with: ASTM F1959-99

Differential from Stoll Curve vs Incident Energy



Heat Attenuation Factor vs Incident Energy



ATP Value(cal/cm ²) = 8.9	HAF (%) = 75.2
ATPV 95% Confidence Interval = 7.8, 9.9	HAF 95% Confidence Interval = 73.2, 77.2
Pts 95% Confidence Interval = 4.1, 13.7	Pts 95% Confidence Interval = 65.9, 84.5
% Above STOLL = 38.1	
# Points = 21	
r ² = 0.50	

Prüfung 7.1 ATPV-Prüfergebnisse gemäß IEC für Schümer-SECAN® 100% Cotton FR, 330 g/m², royal blue



Prüfung 7.2 Prüfergebnis Schümer-SECAN® 100% Cotton FR, 330 g/m², royal blue
IEC/8 kA/0,17 s mit $\bar{E}_i = 21,5 \text{ Ws/cm}^2$

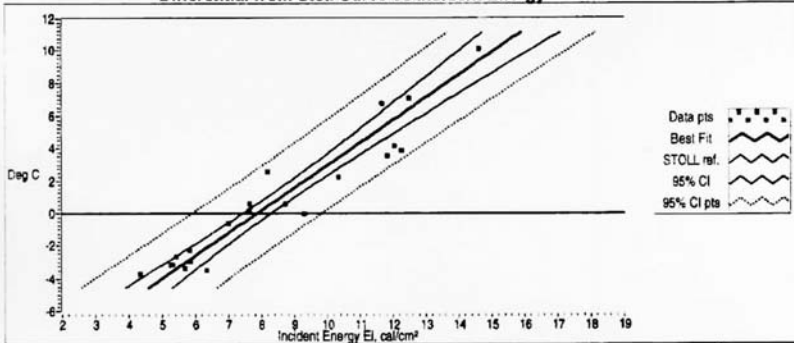
The Institute for the Investigation of Electrical Accidents

360 g/m² Nomex® IIIA, forest green

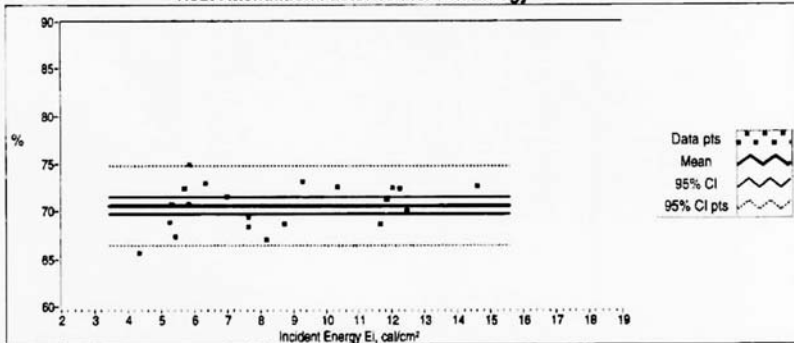
The following tests were performed on flat panels spaced 12 inches from the arc and an electrode spacing of 12 inches with an average current of 8.11kA and an energy range of 4.3 to 14.6 cal/cm². The tests were done at Ontario Power Technologies High Current Lab in Toronto, Canada on Thu, May 04, 2000.

These tests were conducted in accordance with: ASTM F1959-99

Differential from Stoll Curve vs Incident Energy

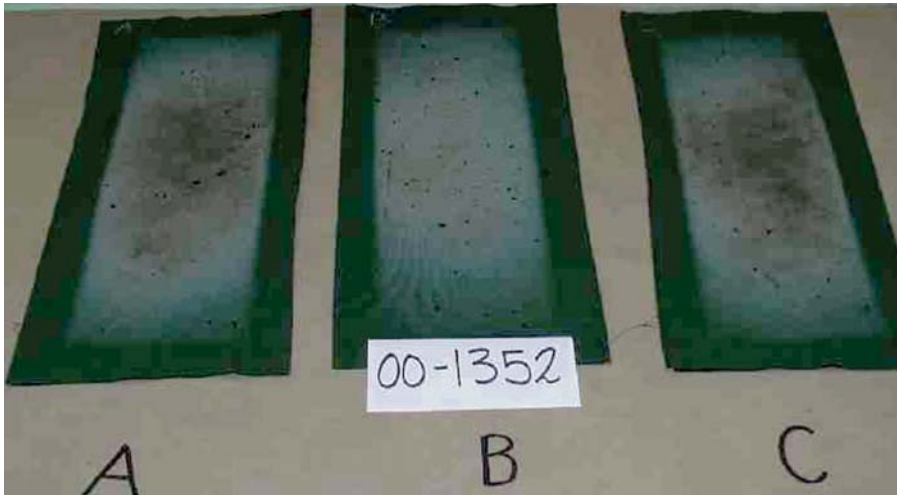


Heat Attenuation Factor vs Incident Energy



ATPV Value(cal/cm ²) = 7.9	HAF (%) = 70.6
ATPV 95% Confidence Interval = 7.4, 8.3	HAF 95% Confidence Interval = 69.7, 71.5
Pts 95% Confidence Interval = 5.9, 9.8	Pts 95% Confidence Interval = 66.5, 74.8
% Above STOLL = 52.4	
# Points = 21	
r ² = 0.91	

Prüfung 8.1 ATPV-Prüfergebnisse gemäß IEC für NOMEX® IIIA, 360 g/m², forest green



Prüfung 8.2 Prüfergebnis NOMEX® IIIA, 360 glm², forest green
IEC18 kAl0,17 s mit $\bar{E}_i = 31,77 \text{ Wslcm}^2$

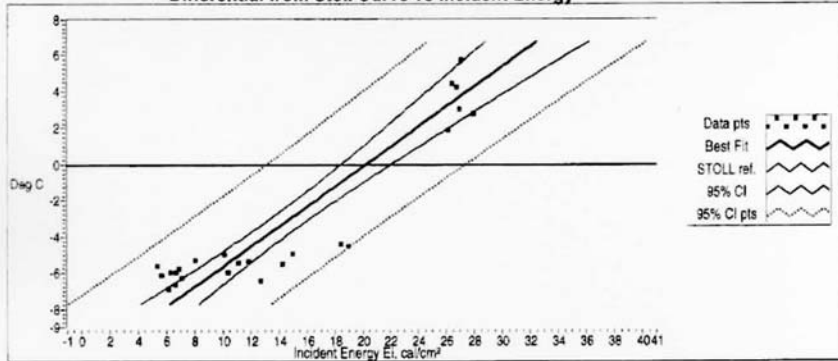
The Institute for the Investigation of Electrical Accidents

511 g/m² SECAN® 100% FR cotton (Proban®), royal blue, B 86 FK 5762

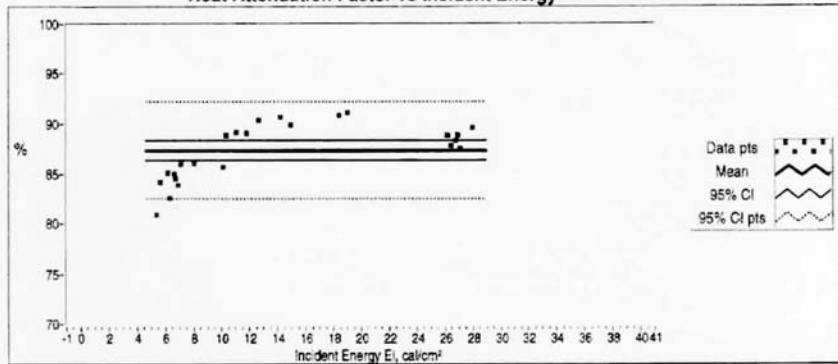
The following tests were performed on flat panels spaced 12 inches from the arc and an electrode spacing of 12 inches with an average current of 8.01kA and an energy range of 5.3 to 27.9 cal/cm². The tests were done at Ontario Power Technologies High Current Lab in Toronto, Canada on Thu, May 04, 2000.

These tests were conducted in accordance with: ASTM F1959-99

Differential from Stoll Curve vs Incident Energy



Heat Attenuation Factor vs Incident Energy



ATPV Value(cal/cm²) = 20.2
 ATPV 95% Confidence Interval = 18.4, 22.0
 Pts 95% Confidence Interval = 13.1, 27.4
 % Above STOLL = 25.0
 # Points = 24
 r² = 0.85

HAF (%) = 87.4
 HAF 95% Confidence Interval = 86.4, 88.4
 Pts 95% Confidence Interval = 82.5, 92.2

Prüfung 9.1 ATPV-Prüfergebnisse gemäß IEC für SECAN® FR 100%,
 511 g/m², royal blue



Prüfung 9.2 Prüfergebnis SECAN® FR, 100% Cotton, 511 g/m², royal blue
IEC18 kA/0,39 s mit $\bar{E}_i = 73,01 \text{ W/s/cm}^2$

Anhang 1 Wertetabelle der Stoll-Kurve

Thermische Belastbarkeit der menschlichen Haut, Verbrennung 2. Grades¹

Exposi- tionszeit	Wärmestrom		Einwirkenergie		Kalorimeter mit Eisen/ Konstantan Temperatur- detektoren	
	KW/m ²	Cal/cm ² /s	KWs/m ²	Cal/cm ²	ΔT °C	ΔmV
1	50	1.2	50	1.2	8.9	0.46
2	31	0.73	61	1.46	10.8	0.57
3	23	0.55	69	1.65	12.2	0.63
4	19	0.45	75	1.80	13.3	0.69
5	16	0.38	80	1.90	14.1	0.72
6	14	0.34	85	2.04	15.1	0.78
7	13	0.30	88	2.10	15.5	0.80
8	11.5	0.274	92	2.19	16.2	0.83
9	10.6	0.252	95	2.27	16.8	0.86
10	9.8	0.233	98	2.33	17.3	0.89
11	9.2	0.219	101	2.41	17.8	0.92
12	8.6	0.205	103	2.46	18.2	0.94
13	8.1	0.194	106	2.52	18.7	0.97
14	7.7	0.184	108	2.58	19.1	0.99
15	7.4	0.177	111	2.66	19.7	1.02
16	7.0	0.168	113	2.69	19.8	1.03
17	6.7	0.160	114	2.72	20.2	1.04
18	6.4	0.154	116	2.77	20.6	1.06
19	6.2	0.148	118	2.81	20.8	1.08
20	6.0	0.143	120	2.86	21.2	1.10
25	5.1	0.122	128	3.05	22.6	1.17
30	4.5	0.107	134	3.21	23.8	1.23

1- Literaturquelle: A.M. Stoll and M.A. Chianta, "Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection". Aerospace Medicine, Vol. 40, 1968, pp. 1232-1238