

Verfahren zur Prüfung von Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen

Prof. Dr.-Ing. Ralf-Dieter Rogler, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden; Heida M. Leonhardi, BG ETEM

Das Arbeiten an elektrotechnischen Anlagen und Betriebsmitteln erfordert Maßnahmen, die die Sicherheit der Elektrofachkraft gewährleisten sollen.

Aus diesem Grund sind folgende fünf Sicherheitsregeln einzuhalten:

- Freischalten,
- gegen Wiedereinschalten sichern,
- Spannungsfreiheit feststellen,
- Erden und Kurzschließen* und
- benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschranken*.

Eine Sicherheitsregel ist das Erden und Kurzschließen, das die Spannungsfreiheit für die Dauer der Arbeit gewährleistet und dadurch die Elektrofachkraft vor ungewollten Netzrückwirkungen sowie beim unbeabsichtigten Wiedereinschalten der Anlage schützt. Zu diesem Zweck werden gemäß DIN VDE 0105-100 bei Arbeiten an elektrotechnischen Anlagen und Betriebsmitteln Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen (EuK-Vorrichtungen) nach DIN EN 61230 eingesetzt.

Die Schutzfunktion der EuK-Vorrichtung wird von der Gewährleistung der Eigenschaften der Vorrichtung und der sachgerechten Montage der Vorrichtung vor Ort bestimmt. In /1/ wird explizit auf den Wunsch hingewiesen, durch ein zerstörungsfreies Messverfahren die Einsatzbereitschaft der EuK-Vorrichtung nicht mehr wie bisher ausschließlich optisch, sondern durch eine objektive Messung zu beurteilen. In /2/ wurden die zur Verfügung stehenden Ansätze grundsätzlich diskutiert.

Für die Beurteilung einer Erdungs- und Kurzschließvorrichtung sind grundsätzlich mehrere Verfahren denkbar:

- Thermographische Untersuchung,
- Computertomographie,
- Ultraschall-Untersuchung,
- Widerstandsmessung.

Der hier gewählte grundsätzliche Ansatz zur Beurteilung soll die Widerstandsmessung sein, da sie folgende Vorteile bietet:

- primäres Verfahren (Widerstand entscheidend),
- Verfahren der Elektrotechnik (Vorbildung),
- etabliert (z. B. Schutzleiterprüfung VDE 0100-100),
- reproduzierbar und transportierbar und
- finanziert.

* Nicht zwingend erforderlich bei Spannungen unter 1000 V.

Typische Schadensbilder von EuK-Vorrichtungen

Aus praktischen Messungen an EuK-Vorrichtungen aus der betrieblichen Praxis können folgende Schadensbilder und deren Wahrscheinlichkeit an EuK-Vorrichtungen benannt werden (s. Tab. 1).

Schaden	Anteil an Gesamtschäden	Mögliche Ursache	Optisches Erscheinungsbild	Elektrischer Diagnoseansatz
Lokaler Seilschaden	7 %*	Biegewechselbeanspruchung	Bruch einzelner Drähte schwer zu erkennen	Widerstandsmessung beim manuellen Bewegen des Leiters
Globaler Seilschaden	21 %*	Chemische Beanspruchung (Korrosion und Oxidation)	Starke Verfärbung leicht zu erkennen	Widerstandsmessung am ruhenden Leiter
Verbinder-schaden	82 %*	Montagefehler Materialermüdung	Unerkennbar	Widerstandsmessung beim manuellen Bewegen der Verbindung

Tab. 1: Schadensbilder an EuK-Vorrichtungen

Mit der Messung des *absoluten* Widerstandes können globale Seilschäden sowie schwerwiegend defekte Pressverbindungen erfasst werden. Es wurde untersucht, ab welchem Widerstand eine EuK-Vorrichtung als defekt anzusehen ist. Mit einer *relativen* Widerstandsänderung beim Bewegen der EuK-Vorrichtung können durchtrennte Adern, schlechte Pressverbindungen und lockere Schraubverbindungen erkannt werden. Es wurde untersucht, ab welcher Widerstandsänderung eine EuK-Vorrichtung als defekt anzusehen ist (s. Abb. 1).

Zur elektrischen Messung wird es notwendig, neben dem Gesamtwiderstand (*absolut*) auch die Widerstandsänderung beim Bewegen der EuK (*relativ*) zu erfassen. Theoretische und experimentelle Untersuchungen werden zeigen, ob die Genauigkeit der Messung ausreichend ist, um EuK-Schäden sicher erkennen zu können.

* An den EuK-Vorrichtungen können mehr als eine Fehlerursache auftreten.

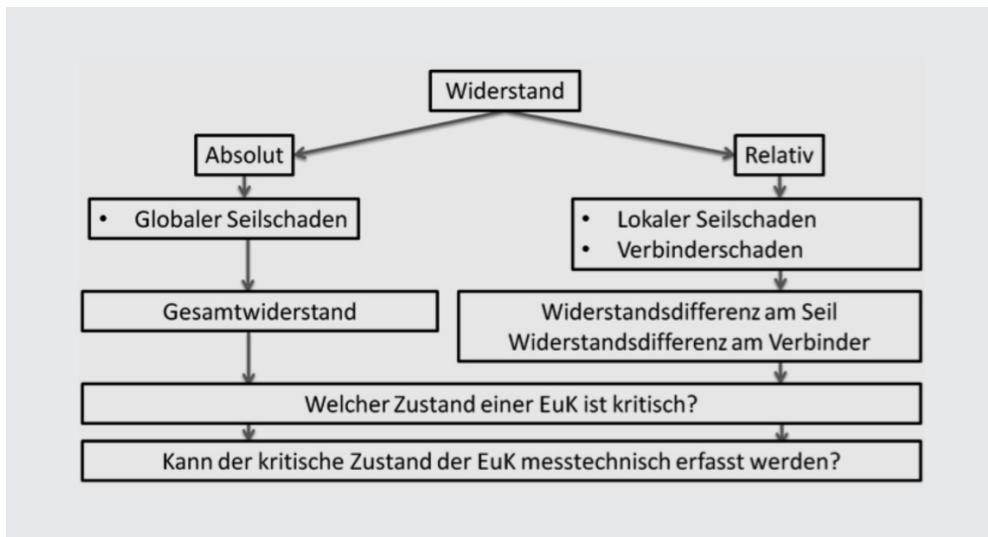


Abb. 1: Beurteilungsschema

Für die Untersuchungen wurden ca. 200 neue und gebrauchte EuK-Vorrichtungen vermessen und davon ca. 50 bis zur Zerstörung geprüft.

Beurteilung von lokalen Seilschäden



Abb. 2: Starker lokaler Seilschaden

Wird ein lokal beschädigtes Leiterseil (s. Abb. 2) an der Fehlstelle bewegt, ändert sich der Widerstand, da sich das Strömungsfeld verändert (s. Abb. 3).

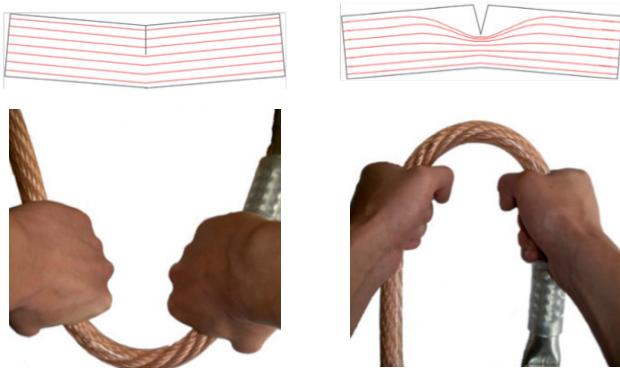


Abb. 3: Einfluss der Leiterbewegung auf das Strömungsfeld bei perforierten EuK-Vorrichtungen

Das Strömungsfeld kehrt in Leiterrichtung exponentiell auf den Gesamtquerschnitt zurück und kann mit der Ortskonstante b beschrieben werden, die quasi unabhängig vom Leiterquerschnitt bei minimal 7 cm liegt (s. Abb. 4). Damit ist vor allem bei der Bewegung nicht die vernachlässigbare Widerstandsänderung durch die Einschnürung selbst, sondern vor allem der Einfluss auf das Strömungsfeld, abweichend wie in /2/ vermutet, erfassbar.

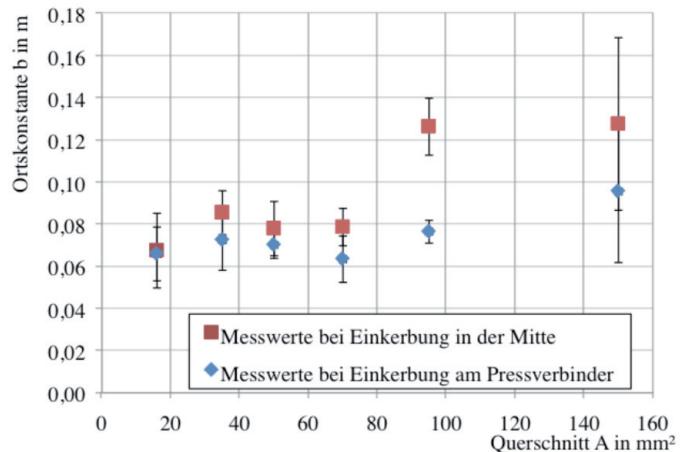


Abb. 4: Ortskonstante b von neuen EuK-Vorrichtungen

Dieser Effekt wird bei alten EuK-Vorrichtungen sogar noch größer sein, da die einzelnen Litzen stärker oxidiert sein werden als im Neuzustand. Zum Erfassen der Widerstandsänderung wird ein spezielles Mikroohmmeter eingesetzt /3/. Mit diesem Messgerät ist es möglich, während einer Messzeit von 30 s den Widerstand in Echtzeit (Abtastfrequenz 10 Hz) zu messen. Am Ende der Messzeit wird auf dem Display der gemessene Minimalwert (R_{\min}), Maximalwert (R_{\max}), sowie die resultierende Widerstandsänderung (R_{Δ}) angezeigt (s. Abb. 5).



Abb. 5: Modifiziertes Mikroohmmeter LoRe

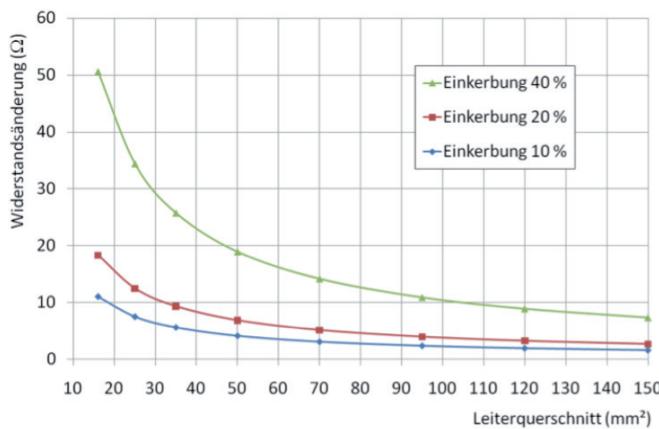


Abb. 6: Zusammenhang Widerstandsänderung R_{delS} und Einkerbung/Perforation v

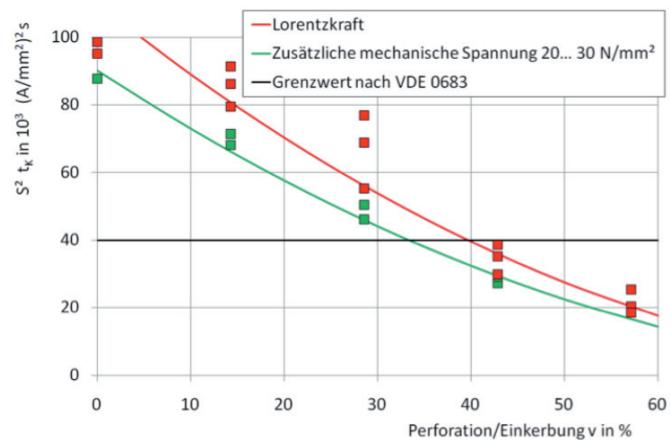


Abb. 8: Stromdichte²-Zeit-Integral $S^2 t_k$ abhängig von der Einkerbung v

Querschnitt des Kupferseiles	Höchstzulässiger Kurzschlussstrom I_k während einer Dauer von				
	10 s	5 s	2 s	1 s	$\leq 0,5$ s
	1 000 A	1 400 A	2 200 A	3 200 A	4 500 A
16 mm ²	1 600 A	2 200 A	3 500 A	4 900 A	7 000 A
25 mm ²	2 200 A	3 100 A	4 900 A	6 900 A	10 000 A
35 mm ²	3 100 A	4 400 A	7 000 A	9 900 A	14 000 A
50 mm ²	4 400 A	6 200 A	9 800 A	13 800 A	19 500 A
70 mm ²	5 900 A	8 400 A	13 200 A	18 700 A	26 500 A
95 mm ²	7 500 A	10 600 A	16 700 A	23 700 A	33 500 A
120 mm ²	9 400 A	13 200 A	20 900 A	29 600 A	42 000 A
150 mm ²					

$$S^2 \cdot t_k = \frac{I_k^2}{A^2} \cdot t_k = \left(\frac{4500 \text{ A}}{16 \text{ mm}^2} \right)^2 \cdot 0,5 \text{ s} = 39,55 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)^2 \cdot \text{s}$$

$$S^2 \cdot t_k = \frac{I_k^2}{A^2} \cdot t_k = \left(\frac{9400 \text{ A}}{150 \text{ mm}^2} \right)^2 \cdot 10 \text{ s} = 39,3 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)^2 \cdot \text{s}$$

Abb. 7: Nennwerte von EuK-Vorrichtungen /4/

Eine systematische Messung an fabrikneuen EuK-Vorrichtungen der Leiterquerschnitte 16... 150 mm² mit derartigen künstlichen Schäden im homogenen Leiterzug und in der Nähe der Pressverbindungen führt zu der Kennlinie der Widerstandsänderung abhängig vom Leiterquerschnitt und der Perforation (s. Abb. 6).

Unterzieht man die Vorrichtungen nun verschiedenen praktischen Kurzzeitbeanspruchungen (Messungen in HTW, IPH und I²PS) und vergleicht die Versagensgrenze mit der Nennbeanspruchung von $S^2 t_k = 40 \cdot 10^3 \text{ (A/mm}^2\text{)}^2 \text{ s}$ (s. Abb. 7), kann eine Grenze von $v = 20\%$ mit $S^2 t_k = 60 \cdot 10^3 \text{ (A/mm}^2\text{)}^2 \text{ s}$ angenommen werden, bei der auf der einen Seite trotz Beschädigung des Seils dessen Funktionalität noch umfänglich zugesichert werden kann, auf der anderen Seite Fehlinterpretationen durch Messungenauigkeiten ausgeschlossen werden können. Diese Bedingung ist auch erfüllt, wenn das Seil exakt am Ende des Kurzschlusses wegen seiner radialen Beschleunigung und der schlagartigen Abbremsung eine zusätzliche axiale Zugbeanspruchung von 20... 30 N/mm² erfährt (s. Abb. 8).

Die zulässigen Grenzwerte für die EuK-Vorrichtungen von 16... 150 mm² beim Bewegen des Leiterseils ergeben sich zu (s. Tab 2):

Querschnitt (mm ²)	16	25	35	50	70	95	120	150
Widerstandsänderung	19	13	9	8	6	5	4	3
R_{delS} ($\mu\Omega$)								

Tabelle 2: Grenzwerte für lokale Seilschäden

Beurteilung von Verbinderschäden



Abb. 9: Verbinderschaden nach Prüfung

Im Gegensatz zum Leiterseilschaden tritt beim Verbinderschaden (s. Abb. 9) zwar ein erhöhter Widerstand auf, die lokale Wärmekapazität ist aber nicht erniedrigt, sondern sogar durch den größeren Querschnitt des Verbinders gegenüber dem Leiter erhöht. Deshalb sind grundsätzlich deutlich höhere Grenzwerte $A \cdot R_{delV}$ zulässig, die querschnittsunabhängig zur Zerstörung führen.

$$\Delta\vartheta \sim S^2 t_k A R_{delV}$$

Der Zusammenhang zwischen dem $S^2 t_k$ - und dem $A R_{\text{delV}}$ -Wert wurde experimentell an insgesamt 15 EuK-Vorrichtungen im IPH und bei I²PS bestimmt. Der Grenzwert mit $A \cdot R_{\text{delV}} = 4250 \text{ mm}^2 \Omega$ ergibt sich analog aus dem Stromdichte²-Zeit-Integral für Seilschäden bei $S^2 t_k = 60 \cdot 10^3 \text{ (A/mm}^2\text{)}^2 \text{ s}$ (s. Abb. 10) und kann auf die typischen Seilquerschnitte umgerechnet werden (s. Tab 3).

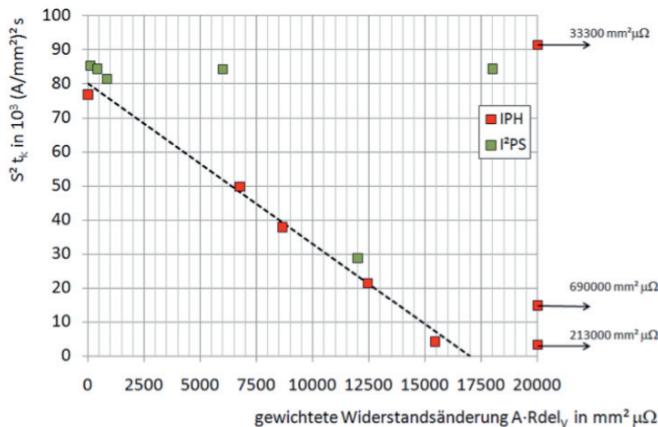


Abb. 10: Stromdichte²-Zeit-Integral $S^2 t_k$ abhängig der gewichteten Widerstandsänderung $A \cdot R_{\text{delV}}$ am Verbinder

Querschnitt (mm ²)	16	25	35	50	70	95	120	150
Widerstandsänderung R_{delV} (μΩ)	267	171	120	86	60	45	36	27

Tabelle 3: Grenzwerte für Verbinderschäden

Der Grenzwert liegt ca. eine Größenordnung größer als der Grenzwert bei Seilschäden. Dieser Zusammenhang kann näherungsweise durch folgende Überschlagsrechnung unter Annahme gleicher Endtemperaturen nach der Beanspruchung hergeleitet werden.

$$\frac{R_{\text{delV}}}{R_{\text{delS}}} = \left(\frac{A_V + A_S}{A_S} \right)^2 \left(\frac{A_S}{A_S(1-v)} \right)^2 \approx \left(\frac{3}{0,8} \right)^2 \approx 10$$

Beurteilung von globalen Seilschäden



Abb. 11: Starker globaler Seilschaden

Unter den Annahmen eines zulässigen Grenzwertes von $S^2 t_k = 60 \cdot 10^3 \text{ (A/mm}^2\text{)}^2 \text{ s}$ kann der globale Einfluss durch Oxidation (s. Abb. 11), also die Gesamtwiderstandserhöhung unter der Annahme gleicher Endtemperaturen abgeleitet werden. Diese tritt auf, wenn ein Leiterseil über weite Abschnitte hinweg massiv oxidiert wurde.

Der Widerstandsbelag r (s. Tab 4) kann aus den experimentellen Versuchen zur Bestimmung des Faktors $k = 1,75$ (s. Abb. 12) für Kupferseile errechnet werden.

$$r = \frac{k \rho}{A} \approx \frac{1,75 \cdot 0,01754 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}}{A}$$

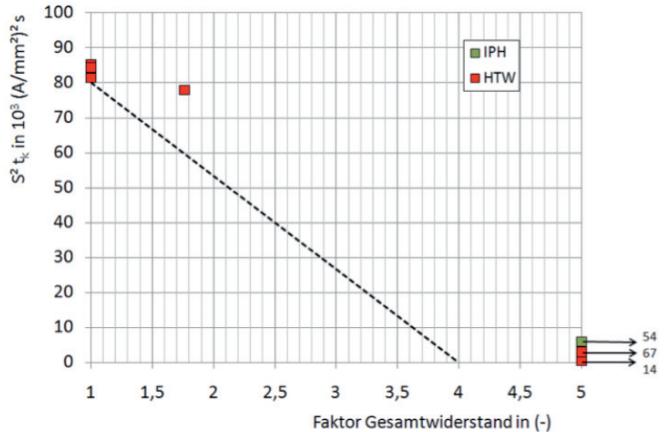


Abb. 12: Stromdichte²-Zeit-Integral $S^2 t_k$ abhängig vom Widerstands-faktor k

Der Faktor k kann näherungsweise durch folgende Überschlagsrechnung unter Annahme gleicher Endtemperaturen nach unten abgeschätzt werden.

$$k > \left(\frac{1}{(1-v)} \right)^2 = \left(\frac{1}{0,8} \right)^2 = 1,56$$

Querschnitt (mm ²)	16	25	35	50	70	95	120	150
Widerstandsbelag r (μΩ/m)	1935	1240	885	620	440	325	255	205

Tabelle 4: Grenzwerte für globale Seilschäden

Gesamtbeurteilung von globalen Seilschäden

Eine EuK-Vorrichtung kann als einsatzbereit gelten, wenn folgende drei Bedingungen erfüllt sind (s. Tab. 2 bis 4):

- Beim Bewegen des Leiterseils treten Widerstandsänderungen auf, die kleiner als R_{delS} sind.
- Beim Bewegen der Verbinder treten Widerstandsänderungen auf, die kleiner als R_{delV} sind.
- Am ruhenden Prüfling werden der Widerstand und die Länge gemessen ($R_{\text{min}} \approx R_{\text{max}}$). Vom gemessenen Gesamtwiderstand werden pauschal 60 μΩ für die Kugelfixpunkte, wenn vorhanden, abgezogen. Der verbleibende Widerstand wird auf die Länge bezogen. Der Widerstandsbelag ist kleiner als r .
- Die Grenzwerte können folgender Tabelle entnommen werden (s. Tab. 5), wobei diese abhängig von der Temperatur der EuK-Vorrichtung korrigiert werden.

Querschnitt (mm ²)	16	25	35	50	70	95	120	150
Widerstandsänderung R_{delS} ($\mu\Omega$)	19	13	9	8	6	5	4	3
Widerstandsänderung R_{delV} ($\mu\Omega$)	267	171	120	86	60	45	36	27
Widerstandsbelag r ($\mu\Omega / m$)	1935	1240	885	620	440	325	255	205
Temperatur (°C)	-20	-10	0	10	20	30	40	
Korrektur	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	

Tabelle 5: Grenzwerte für EuK-Vorrichtungen

Anwendung des Messverfahrens

Das hier vorgestellte Messverfahren wurde auf insgesamt 139 EuK-Vorrichtungen aus der betrieblichen Praxis von 6 Betreibern und Herstellern angewendet, und an 15 Auffälligen wurden Kurzzeitbeanspruchungen bis zum Versagen durchgeführt. Dabei ergibt sich folgendes Bild:

- Fehlerquote bei rein optischer Bewertung: 7 %
 - Fehlerquote lokaler Seilschaden: 2 %
 - Fehlerquote globaler Seilschaden: 6 %
 - Fehlerquote Verbindersehnen: 23 %
-
- Gesamtfehlerquote: 28 %

Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Der Gesamtfehlerschaden ergibt sich nicht aus der Summe der Teilschadenquoten, da mehr als eine Auffälligkeit pro EuK-Vorrichtung auftreten kann.
- Alle rein optisch aussortierten Vorrichtungen werden auch elektrisch aussortiert.
- Die Schadensquote liegt unrealistisch hoch, da zu einem Großteil der Messungen betriebsalte Vorrichtungen verwendet wurden.
- Es wurden viermal mehr Vorrichtungen elektrisch als rein optisch aussortiert. Unter dieser Annahme kann geschlussfolgert werden, dass die Aussonderungsquote in der betrieblichen Praxis bei Verwendung des Verfahrens um Faktor 4 ansteigen wird.
- Es wurden 48 EuK-Vorrichtungen mit Kurzschlussströmen bis zum Versagen geprüft:
- Eine Vorrichtung gilt als kritisch, wenn die Widerstandsmessung einen Messwert ergeben hat, der größer ist als einer der Grenzwerte.
 - Eine Vorrichtung hat versagt, wenn ihr Stromdichte²-Zeit-Integral kleiner als $S^2 \cdot tk = 60 \cdot 10^3$ (A/mm²)² war.
 - Alle kritischen EuK-Vorrichtungen mit lokalen oder globalen Seilschaden haben versagt.
 - 70 % der kritischen EuK-Vorrichtungen mit Verbindersehnen haben versagt. Bei 30 % der Vorrichtungen kam es während des Kurzschlusses zu einem Aufschmelzen und

einer offensichtlichen Verringerung des Widerstandes. Dies führte zu einem zeitlich späteren Versagen als dies aus den Messwerten zu erwarten gewesen wäre.

Es konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz eines elektrischen Messverfahrens eine deutlich genauere Bewertung von EuK-Vorrichtungen als rein optisch erreicht werden konnte. Bei konsequenter Umsetzung in der betrieblichen Praxis nimmt die Personensicherheit in Bezug auf eine um Faktor 4 verringerte Versagenswahrscheinlichkeit von EuK-Vorrichtungen zu.

Es wird Aufgabe weiterer Veröffentlichungen sein, die hier vorgestellte Vorgehensweise im praktischen Einsatz durch die Elektrofachkraft vor Ort vorzustellen.

Quellenverzeichnis

- /1/ Leonhardi, H.:
Wiederholungsprüfungen von EuK-Vorrichtungen
BG Energie Textil Elektro. Brücke. Ausgabe Elektro Feinmechanik. 4/2009
S. 10-12
- /2/ Brocke, R.:
Bewertung von Verfahren zur Wiederholungsprüfung an EuK-Vorrichtungen
Np. 48(2009), Heft 12
S. 20-24
- /3/ www.theta-dresden.de
- /4/ DIN 57683 Teil 1 / VDE 0683 Teil 1