

K. Berger, Zürich und W. Baumann, Däniken

Die Gefährdung von Rohrleitungen im Spannungstrichter von Hochspannungs-Erdungen

Die Gefährdung von Rohrleitungen im Spannungstrichter von Hochspannungs-Erdungen

Von K. Berger, Zürich, und W. Baumann, Däniken

621.316.99:621.643.004.64

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit werden Versuche über das Verhalten blanker und isolierter Rohrleitungen im Spannungstrichter einer Hochspannungserdung beschrieben. Insbesondere werden die Wirkungen des Stromüberganges an defekten Stellen der Rohrisolation untersucht, wobei Rohrisolation, Wandstärke des Rohres, Stromstärke zum Rohr bzw. Bodenwiderstand und Stromdauer variiert wurden.

Im zweiten Teil werden die Ergebnisse theoretisch ausgewertet und Folgerungen gezogen über mögliche Massnahmen zur Verhinderung schwerer Rohrschäden, die an Fehlerstellen der Rohrisolation infolge der Schmelzwirkung konzentrierter Lichtbogen entstehen können.

La première partie de l'exposé décrit les essais effectués au sujet du comportement des conduites tubulaires nues et isolées dans les entonnoirs de tension d'une mise à la terre à haute tension. Les recherches se sont en particulier préoccupées des répercussions du passage du courant aux emplacements défectueux des tubes isolants en variant l'isolement du tube, l'épaisseur des parois du tube, l'intensité du courant par rapport au tube, resp. la résistance du sol et la durée du courant.

La seconde partie présente une évaluation théorique des résultats, ainsi que des conclusions relatives aux mesures destinées à éviter les graves dégâts causés à l'isolement des tubes par suite des fusions provoquées par des arcs concentrés.

1. Einleitung

Tritt an einer Hochspannungsleitung ein Erdschluss auf, sei es durch Überschlag eines Isolators oder infolge Seilbruches, so geraten in der Nähe der Erdschluss-Stelle verlegte Rohrleitungen in den Bereich eines sog. Spannungstrichters. Ist das Rohr nicht isoliert, so fliesst ein Teil des Erdschlussstromes auf die blanke Rohrleitung. Bei isoliertem Rohr tritt an der Isolation eine Spannung auf, die dem Potential des Erdreiches um das Rohr entspricht. Reicht diese Spannung aus, um die Isolation zu durchschlagen, so fliesst in der Folge ebenfalls ein Strom auf die Rohrleitung. Bei genügender Stromstärke wird das Rohr an der Durchschlagsstelle vom Lichtbogen angeschmolzen. Das gleiche wird an einem Rohr mit Fehlerstellen der Isolation geschehen, insbesondere wenn die Stromübergangsstelle klein ist, so dass eine grosse Stromdichte entsteht. Die Erfahrung zeigt, dass dabei die Rohrwand durchlöchert werden kann. Die geschilderten Vorgänge sind infolge der zunehmenden Verbreitung von Öl- und Gasleitungen im Bereich von Hochspannungsanlagen und ganz besonders längs Hochspannungsleitungen von wachsender Bedeutung¹⁾.

Die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) wurde deshalb vom Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) beauftragt, die Beschädigung von Rohrleitungen durch Ströme aus dem Spannungstrichter von Erdungen unter den praktisch auftretenden Bedingungen zu untersuchen.

Im ersten Teil der folgenden Ausführungen werden Versuche beschrieben, die den Stromübergang vom Erdreich auf

isolierte Eisenrohre mit kleiner Defektstelle in der Isolation zum Gegenstand haben. Vergleichsweise kamen auch blanke Rohre zum Versuch. Im besonderen ist dabei die Auswirkung

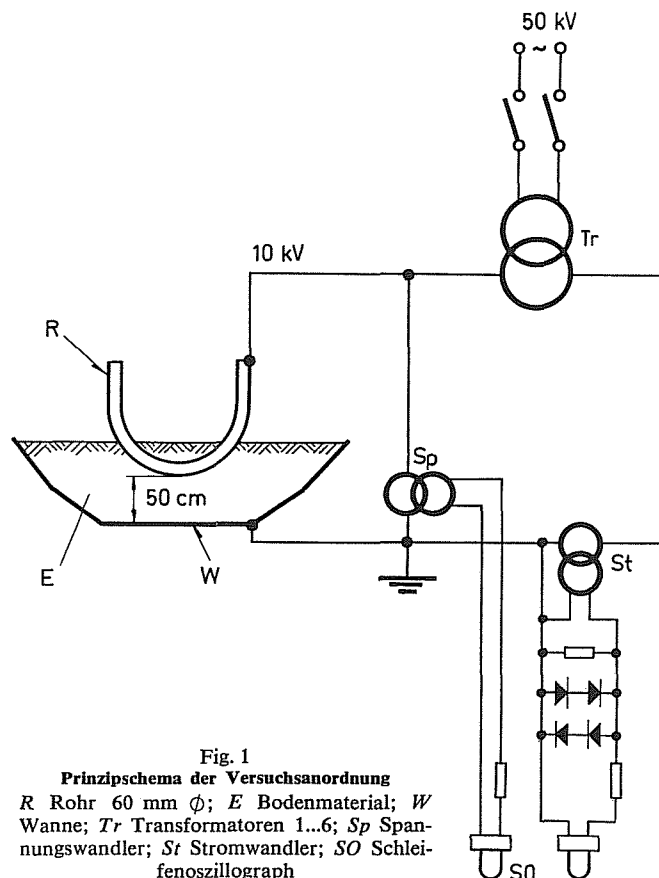
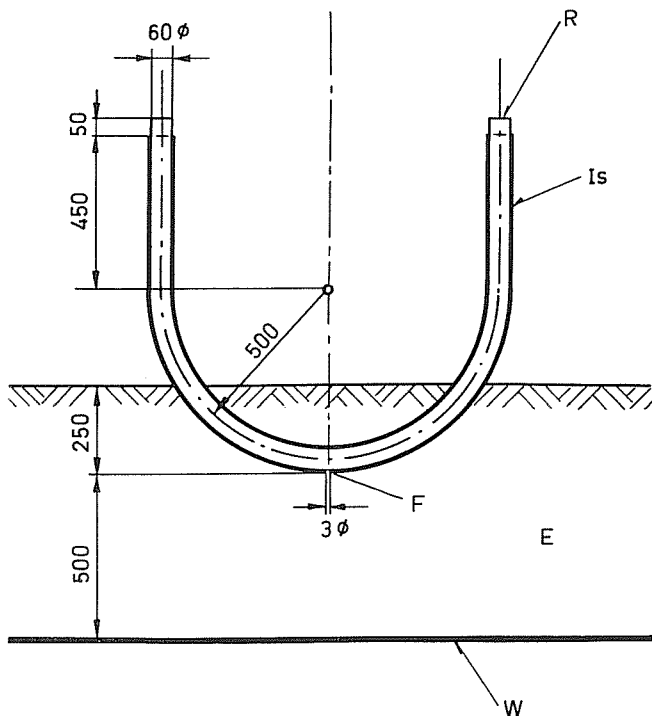


Fig. 1

Principalschema der Versuchsanordnung

R Rohr 60 mm ϕ ; E Bodenmaterial; W Wanne; Tr Transformatoren 1...6; Sp Spannungswandler; St Stromwandler; SO Schleifenzillograph

¹⁾ Grundsätzlich besteht dieselbe Gefahr auch für jede Art isolierter Kabelmäntel und Schutzrohre.



R Rohr; *Is* Isolation; *F* Fehlerstelle der Isolation; *W* Wanne; *E* Bodenmaterial

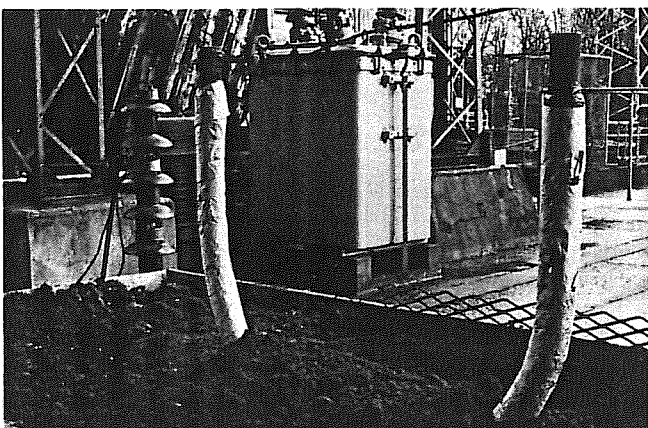
der Rohrisolation, der Rohrwandstärke, der Stromstärke bzw. des spezifischen Bodenwiderstandes und der Stromdauer untersucht worden. Die Resultate dieser Versuche dienen als Grundlage für die Berechnung im zweiten Teil.

2. Versuchsanordnung

Das Prinzipschema der Messungen ist in Fig. 1, die Anordnung der Versuchsrohre in den Fig. 2, 3 und 4 dargestellt.

In einer mit Bodenmaterial gefüllten Eisenwanne ist ein gebogenes Rohrstück teilweise eingegraben. Der kleinste Abstand bis zur ebenen Erdelektrode (Wanne) beträgt bei allen Versuchen 50 cm.

Über die Transformatoren Tr kann zwischen das Rohr und die Erdelektrode eine Wechselspannung von ca. 10 kV angelegt werden. Aus praktischen Gründen wurde der Spannungspol an das Eisenrohr, die Wanne dagegen direkt mit Erde verbunden. Für den Vorgang *am Rohr* ist diese Vertau-

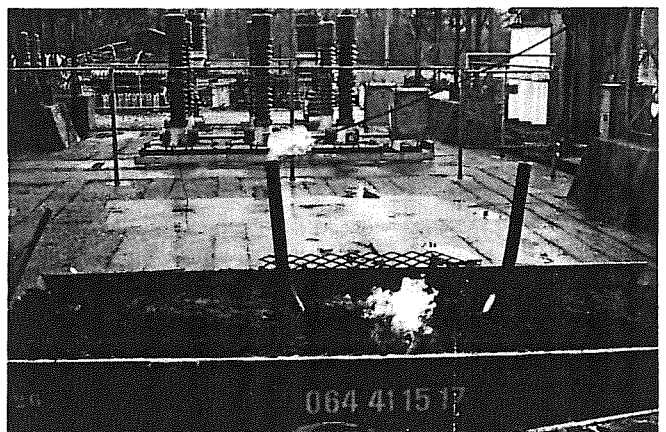


sung gegenüber der Wirklichkeit nicht von Bedeutung. Bei Kurzschluss zwischen dem Rohr und der Erdelektrode (Lichtbogen durch die 50-cm-Erdschicht) wird der Strom durch die Transformatoren-Impedanz auf ca. 2 kA (Effektivwert) begrenzt. Beim grössten Fehlerstrom von ca. 1000 A (Scheitelwert) sank die Spannung auf ca. 8,2 kV, was ca. 16 % Spannungsabfall entspricht.

Die Messung der Spannung und des Stromes erfolgte mit einem Schleifenoszillographen über den Spannungswandler 16 kV/100 V, bzw. den Stromwandler 1200/5 A. Zum Schutze der Stromschleife des Oszillographen bei Kurzschluss waren Si-Dioden als Strombegrenzer parallel zur Schleife eingebaut.

3. Versuchsobjekte

Die Abmessungen der verwendeten Eisenrohre sind aus Fig. 2 ersichtlich. Um das Isolieren der Rohrenden zu vermeiden, wurden die Rohre zu einem Halbkreis gebogen. Es gelangten Rohre von 60 mm Aussendurchmesser und Wandstärken von 3,65 mm, 5 mm, 7,5 mm und 10 mm zur Verwendung. Sie waren entweder mit 5...6 mm Bitumen, 8...10 mm Bitumen-Jute oder mit verschiedenen Kunststoffisolationen versehen oder auch blank. Auf die für Kunststoffisolation vorgesehenen Rohre wurde zuerst ein 1,4 mm dicker PVC-Schrumpfschlauch aufgezogen. Durch Aufwickeln von wärme-



festerem Isoliermaterial, wie Polyesterfolie oder Polyesterharz mit Glasfasern, wurden dann in der Mitte des Rohres Isolationsdicken von 1,6 mm bis 10 mm hergestellt. Als künstliche Fehlerstelle wurde diese Rohrisolation an allen Rohren an geeigneter Stelle durch eine Bohrung von 3 mm Durchmesser beschädigt.

4. Versuchsergebnisse

Die Resultate von 44 Versuchen an den beschriebenen Rohren sind in der Tabelle I zusammengestellt. Die Fig. 5a und b geben Oszillogrammbeispiele des Stromverlaufs mit verschiedenem Bodenwiderstand (Stromgrösse). Die Fig. 6...12 zeigen Beispiele von Anschmelzungen. Dazu sind die folgenden Bemerkungen zu machen:

Der auftretende Strom ist in erster Linie vom Widerstand der Erdschicht bedingt. Durch Ändern der Leitfähigkeit des Bodens mit Salzwasser konnte der Anfangsstrom i_1 von ca. 100 A (Scheitelwert) bis ca. 800 A (Scheitelwert) variiert wer-

Versuchs-Variante Nr.	Prüf-Objekt Nr.	Rohr-Wand mm	Rohr-Inhalt	Rohr-Umgebung	Rohr-Isolation		$\hat{i}_1$ A	$\hat{i}_2$ A	Zeitdauer s	Auswirkung
					Material	mm				
1.1	21	3,65	leer	Humus	blank 30 cm	—	290	375	1,07	Keine Brandspuren Kleine Schmelzperlen Kleine Schmelzperlen Kleine Schmelzperlen
.2	29	3,65					690	830	0,9	
.3	33	3,65					630	860	1,06	
.4	38	3,65					430	650	1,04	
2.1	3	3,65	leer	Humus	Jute u. Teer	9	105	255	1,0	<i>Loch</i> , 8 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 2,5 mm tief; 3,5 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 2,5 mm tief; 2 mm $\varnothing$ kein Loch, mehrere kleine Spuren kein Loch, mehrere kleine Spuren
.2	5	3,65				9	185	340	0,61	
.3	6	3,65				9	140	200	1,0	
.4	8	3,65				9	115	290	1,08	
.5	9	3,65				9	145	290	1,07	
3.1	22	3,65	leer	Humus	Teer	5	130	230	1,05	kein Loch, Spur: 0,5 mm tief; 2,5 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 1 mm tief; 4,5 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 1 mm tief; 8 mm $\varnothing$
.2	23	3,65				5	145	265	1,07	
.3	41	3,65				5	85	345	1,64	
4.1	2	3,65	leer	Humus	PVC	1,4	115	170 2700	0,3 +0,7	kein Loch, 8 cm flache Schmelzspuren
5.1	4	3,65	leer	Humus	PVC u. Poly- ester- folie	6,4	170	510	2,1	<i>Loch</i> , 7 mm $\varnothing$ <i>Loch</i> , 5 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 2 mm tief; 2 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 1,5 mm tief; 7 mm $\varnothing$ <i>Loch</i> , 6 mm $\varnothing$ <i>Loch</i> , 9...14 mm $\varnothing$
.2	10	3,65				1,6	175	345	1,08	
.3	11	3,65				1,9	190	420	0,51	
.4	12	3,65				2,2	175	360	0,84	
.5	13	3,65				1,9	200	290	1,0	
.6	42	3,65				2,7	260	780	2,11	
6.1	24	3,65	leer	Humus	Poly- ester- harz u. Glas	4	150	265	1,07	kein Loch, 2 weitere Isolationsdef. kein Loch, Spur: 0,5 mm tief; 4 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 1,5 mm tief; 4 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 0,5 mm tief; 8 mm $\varnothing$ <i>Loch</i> , 8 mm $\varnothing$ kein Loch, 2 Spuren: 0,2 mm und 2,5 mm tief <i>Loch</i> , 7 mm $\varnothing$
.2	25	3,65				4	115	225	1,07	
.3	26	3,65				10	90	175	1,05	
.4	27	3,65				4	115	300	2,12	
.5	28	3,65				9	115	275	3,05	
.6	34	3,65				7	430	780	1,04	
.7	35	3,65				6	420	1050	1,06	
7.1	17	3,65	Wasser	Humus	PVC u. Poly- ester- folie	1,7	260	430 2700	0,4 +0,7	2 Löcher, 16 mm und 11 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 0,5 mm tief; 2...6 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 1 mm tief; 4 mm $\varnothing$ kein Loch, Spur: 1 mm tief; 3...8 mm $\varnothing$ <i>Loch</i> , 11 mm $\varnothing$ <i>Loch</i> , 4 mm $\varnothing$
.2	18	3,65	Wasser			1,7	130	215	1,07	
.3	19	3,65	Wasser			2,2	130	230	1,07	
.4	20	3,65	Öl			2,6	175	260	1,07	
.5	30	3,65	Wasser			1,9	830	950	1,08	
.6	32	3,65	Wasser			1,5	275	420	1,08	
8.1	7	3,65	leer	Sand	PVC u. Poly- ester- folie	1,9	<1	<1	1,1	nur leicht geschwärzt Dauerversuch: <i>Loch</i> , 7...10 mm $\varnothing$
.2	7	3,65				1,9	<1	<100 2700	5 min +1 s	
9.1	14	9,5	leer	Humus	Epoxy- harz u. Poly- ester- folie	2,2	230	420	2,65	kein Loch, Spur: Tropfen 2 mm lang kein Loch, Spur: Tropfen 5 mm lang kein Loch, Spur: 7 mm tief; 15 mm $\varnothing$
.2	15	10				7	200	490	2,65	
.3	16	10				6,5	?	? 2700	2,6	
10.1	31	7,5	leer	Humus	Teer	6	600	980	1,06	kein Loch, Spur: 11 mm $\varnothing$; 3 mm tief
11.1	36	5	leer	Humus	PVC u. Poly- ester- folie	1,8	660	800	1,05	kein Loch, Spur: 4 mm tief; 10...15 mm $\varnothing$ 2 grosse Löcher 2 grosse Löcher kein Loch, Spur: 3 mm tief; 7 mm $\varnothing$ <i>Loch</i> , 12 mm $\varnothing$
.2	37	5				2,9	345	780 2700	0,32 +1,83	
.3	39	5				3,5	345	810 2700	0,92 +1,22	
.4	43	5				6,4	245	490	1,6	
.5	44	5				3	320	750 2700	0,62 +0,48	
12.1	40	10	leer	Wasser	PVC	4,5	340	680	0,74	kein Loch, Spur: 3,5 mm tief; 9 mm $\varnothing$

den. Bei blankem Rohr ist der Strom praktisch in Phase mit der Spannung und wie diese sinusförmig. Bei isoliertem Rohr mit Defektstelle dagegen ist der Strom nicht sinusförmig, wie aus den Oszillogramm-Beispielen der Fig. 5a und b ersichtlich ist. Daraus geht hervor, dass mit jeder Halbwelle eine Lichtbogenstrecke neu gezündet wird. Der Stromscheitelwert steigt von einem Anfangswert i_1 auf den Endwert i_2 beim Ausschalten der Spannung. Die entsprechenden Spannungswerte sind $\hat{u}_1$ und $\hat{u}_2$. Bei genügender Stromdauer tritt ein plötzlicher Stromanstieg bis zum Kurzschluss-Strom von ca. 2 kA (eff.) auf.

4.1 Blankes Rohr

Bei allen Versuchen mit blanken Rohren (Versuchsvariante 1) konnten selbst bei den relativ grossen Strömen zum Rohr von $i_1 = 690$ A Anfangswert und $i_2 = 830$ A nach

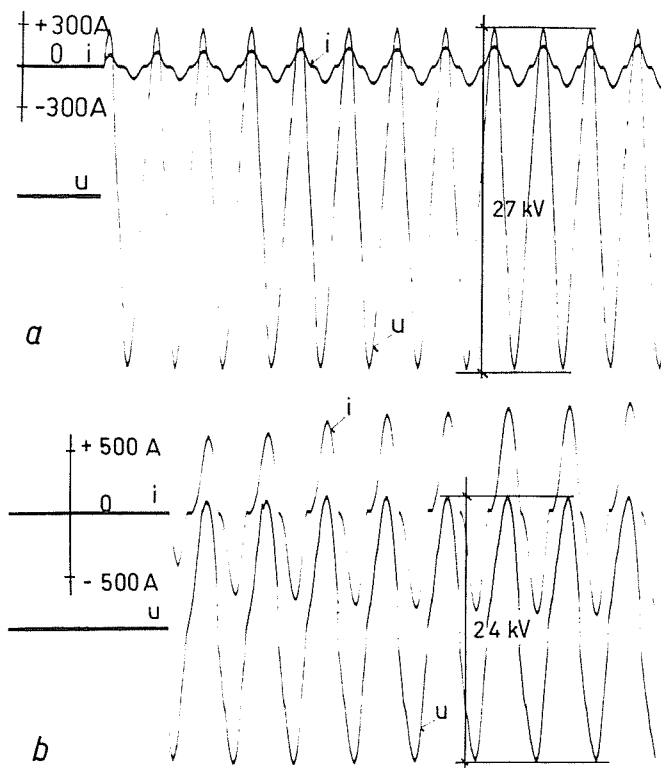


Fig. 5

Oszillogramm-Beispiele (a und b) für den Stromverlauf beim Einschalten
u Spannung; i Strom bei einer Grundfrequenz von 50 Hz

ca. 1 s nur ganz unbedeutende, kleine Schmelzperlen festgestellt werden. Eine Gefährdung der Rohre war in keinem Fall vorhanden.

4.2 Isolierte Rohre mit Fehlerstellen

Schon beim kleinsten Fehlerstrom von $i_1 = 90$ A und $i_2 = 175$ A entstand beim Versuch 6.3 am Versuchsobjekt 26 innert 1,05 s Stromdauer eine Anschmelzung von 1,5 mm Tiefe (Rohrisolation Polyesterharz mit Glasfasern). Beim Versuch 2.1 entstand am Versuchsobjekt 3 mit 3,65 mm Wandstärke mit $i_1 = 105$ A und $i_2 = 255$ A nach 1 s ein Loch von 8 mm Durchmesser; das Rohr war mit Bitumen-Jute isoliert. Im Gegensatz dazu waren beim Versuch 2.5 am Versuchsrohr 9 trotz einem Strom von 145 A (Scheitelwert) am Anfang und 290 A (Scheitelwert) nach 1 s nur viele kleine Anschmelzungen im Umkreis mehrerer cm zu beobachten; das Rohr war

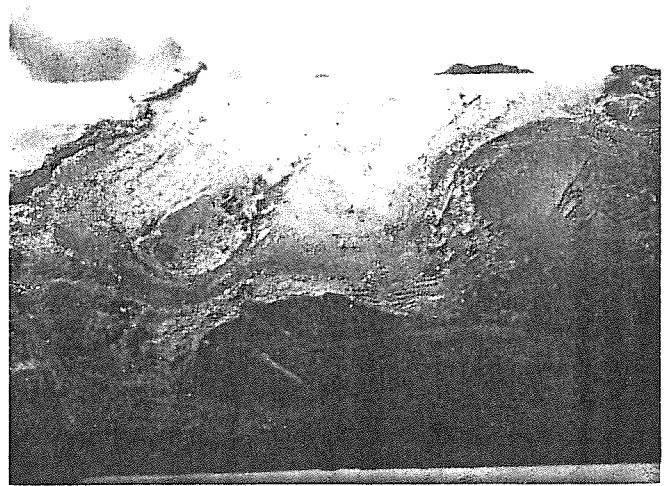


Fig. 6

Prüfobjekt Nr. 2 nach Versuch 4.1

Isolation auf ca. 8 cm verbrannt, kein Loch, nur flache Anschmelzungen in der Rohrwandung
Rohrwandstärke 3,65 mm, Rohr leer, 1,4 mm PVC-Isolation (Schrumpfschlauch)

$$\left. \begin{array}{l} \hat{i}_1 = 115 \text{ A} \\ \hat{i}_2 = 170 \text{ A}, t = 0,3 \text{ s} \\ i_{KS} = \text{ca. } 2 \text{ kA (Effektivwert)}, t = 0,7 \text{ s} \end{array} \right\} t_{\text{tot}} = 1 \text{ s}$$

ebenfalls mit Bitumen-Jute isoliert. Die Streuung ist insbesondere bei Bitumen-Jute-Isolation beträchtlich. Im allgemeinen zeigte sich, dass bei Isolationen mit geringer Durchschlags- oder Wärmefestigkeit (z. B. Bitumen) der Stromübergang an mehreren Stellen oder auf einer grösseren Fläche möglich ist, sei es infolge mehrerer Durchschläge oder durch Wegschmelzen des Isoliermaterials. Ein Beispiel hierfür ist der Versuch 4.1 mit *dünnere* PVC-Schicht (Schrumpfschlauch) mit Rohr Nr. 2, bei dem nach einem Strom von $i_1 = 115$ A und $i_2 = 170$ A bereits nach 0,3 s ein Kurzschluss-Lichtbogen von ca. 2 kA (Effektivwert) während 0,7 s auftrat. Die Isolation wurde dabei auf einer Länge von 8 cm weggeschmolzen. Das Rohr wies grosse, aber nur flache, ungefährliche Anschmelzungen auf, wie aus Fig. 6 ersichtlich ist. Für das Entstehen tiefer Anschmelzungen oder Löcher muss demnach



Fig. 7

Prüfobjekt Nr. 10 nach Versuch 5.2

Loch mit 5 mm ϕ in der Rohrwandung, Rohrwandstärke 3,65 mm, Rohr leer, Isolation 1,4 mm PVC und 0,2 mm Polyesterfolie
 $i_1 = 175$ A; $i_2 = 345$ A; $t = 1,08$ s

der Stromübergang an der gleichen Stelle festgehalten und der Lichtbogen durch die Isolation auf einen kleinen Querschnitt begrenzt bleiben. Fig. 7 und 8 zeigen zwei Beispiele solcher Anschmelzungen.

Bei den Rohren mit 5 mm Wandstärke entstanden bei 3 von 5 Versuchen Löcher im Rohr, wobei es in allen 3 Fällen innert 1 s zu einem Kurzschluss mit 2 kA (eff.) gekommen war (Versuche 11.2, 11.3 und 11.5)²⁾.

Bei den Rohren mit 7,5 bis 10 mm Wandstärke kam es in keinem Fall zu einem Loch. Immerhin wurde bei Versuch 9.3 am Rohr 16 infolge eines Kurzschlusses eine 7 mm tiefe Anschmelzung festgestellt.

Durch Änderung des spezifischen Humus-Widerstandes konnten die Anfangsströme von 85...830 A (Scheitelwert) variiert werden. Das entspricht einem wirksamen Anfangswiderstand von 160...15 Ω ($9600 \sqrt{2}/85$ bzw. $8900 \sqrt{2}/830$). Einen Sonderfall bezüglich Bodenwiderstand stellt Objekt / dar, wo das Rohr in leicht feuchten Sand verlegt war. Es floss ein Anfangsstrom von nur ca. 0,2 A, was einem Widerstand von ca. 70 k Ω entspricht. Die defekte Stelle war nach 1,1 s

²⁾ Aus den Fig. 9...11 sind 3 Beispiele ersichtlich.

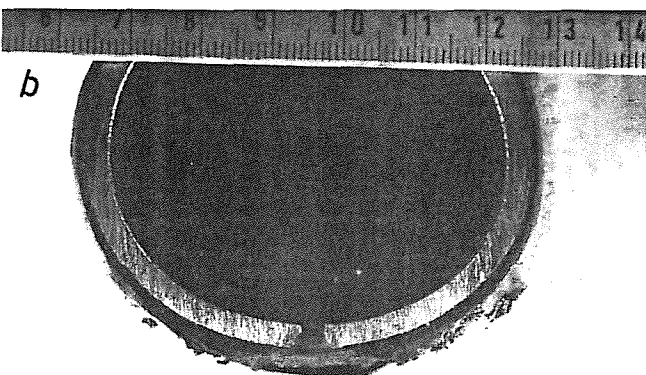
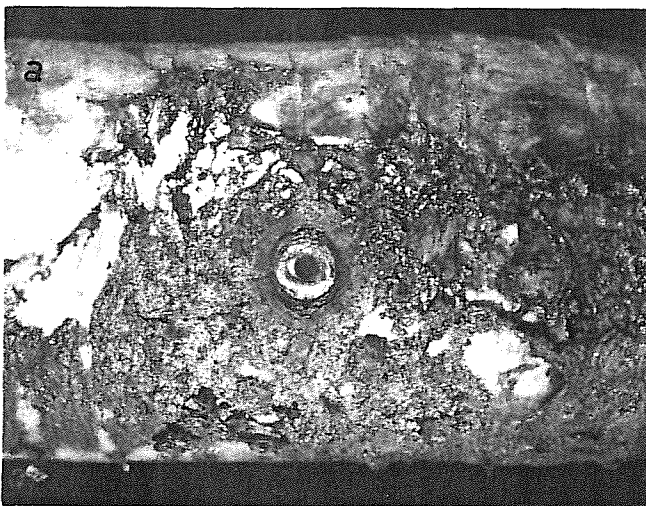


Fig. 8

Prüfobjekt Nr. 32 nach Versuch 7.6

a Ansicht; b Rohrquerschnitt

Loch mit 4 mm ϕ in der Rohrwandung, Rohrwandstärke 3,65 mm, Rohr mit Wasser gefüllt, Isolation ca. 1 mm PVC und 0,5 mm Polyesterfolie

$i_1 = 275$ A; $i_2 = 420$ A; $t = 1,08$ s

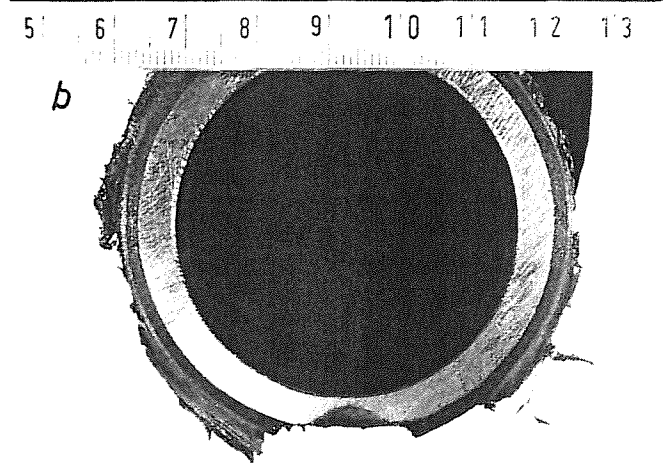
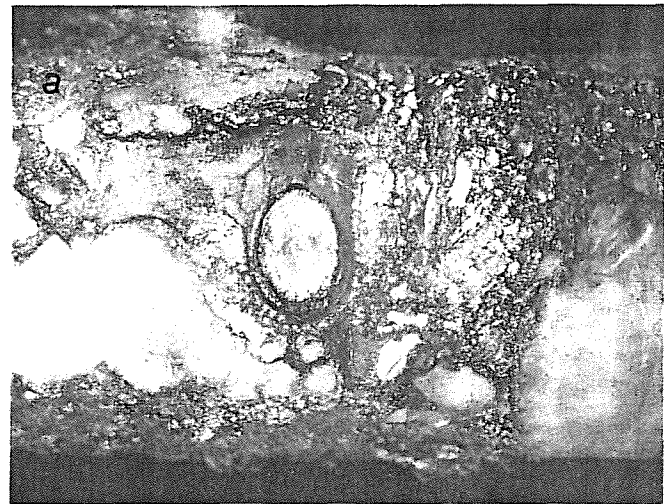


Fig. 9

Prüfobjekt Nr. 36 nach Versuch 11.1

a Ansicht; b Rohrquerschnitt

Anschmelzung, 4 mm tief, 10...15 mm ϕ

Rohrwandstärke 5 mm, Rohr leer, Isolation 0,3 mm PVC und 1,5 mm Polyesterfolie

$i_1 = 660$ A; $i_2 = 800$ A; $t = 1,05$ s

nur leicht geschwärzt. Ein anschliessender Dauerversuch ergab einen langsamen stetigen Stromanstieg, bis nach ca. 5 min ein Strom von 100 A (Scheitelwert) erreicht war. Kurz darauf trat ein Kurzschluss-Strom von 2 kA (eff.) durch den Sand auf, der innert 1 s zu einem Loch von ca. 10 mm Durchmesser im 3,65 mm starken Rohr führte.

Ein Einfluss des Rohrinhaltes (Wasser, Öl usw.) war bei den Versuchen nicht mit Sicherheit festzustellen, vor allem wohl deshalb nicht, weil die Streuung der Resultate infolge der Nicht-Homogenität des Erdreichs an der Fehlerstelle zu gross war. Dies zeigt Tabelle II. Die grössere Wärmekapazität und bessere Kühlung des gefüllten Rohres kann sich bei der kurzen Stromdauer nicht wesentlich auswirken.

Der Einfluss des Druckes in der Rohrleitung konnte nicht untersucht werden, trotzdem die Versuche eine erhöhte Gefährdung durch Anschmelzen bei Hochdruckleitungen vermuten lassen. Bei vielen Prüfobjekten mit Anschmelzungen war nämlich festzustellen, dass geschmolzenes Material der Rohrwandung in der Defektstelle wieder erstarrte. Es ist darum wahrscheinlich, dass mit genügendem Druck im Rohr ein Loch bereits bei kleinerem Strom oder nach kürzerer Zeit als beim Versuch entstehen würde.

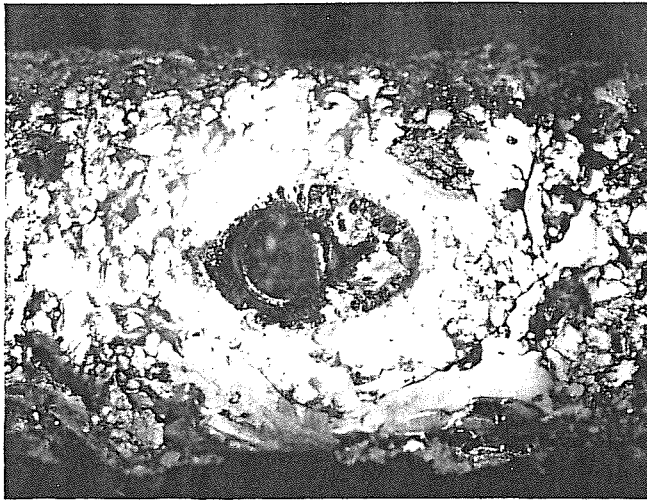


Fig. 10

Prüfobjekt Nr. 44 nach Versuch 11.5

Loch mit 12 mm $\varnothing$ in der Rohrwand
 Rohrwandstärke 5 mm, Isolation 1 mm PVC und 2 mm Polyesterfolie
 $i_1 = 320$ A
 $i_2 = 750$ A, $t = 0,62$ s
 $i_{KS} = \text{ca. } 2$ kA (Effektivwert), $t = 0,48$ s $\left. \vphantom{\begin{matrix} i_1 \\ i_2 \end{matrix}} \right\} t_{\text{tot}} = 1,1$ s

5. Auswertung der Versuchsergebnisse

5.1 Elektrisches Feld am Rohr im Spannungstrichter einer Hochspannungserdung

5.1.1. Kurzes blankes Rohrstück im Spannungstrichter der Erdung. Fig. 12. Das blankes Rohr nimmt das Potential seiner Umgebung V_x an. Unter Voraussetzung eines angenähert homogenen Strömungsfeldes E_0 und j_0 in der Umgebung der Rohrleitung wird die grösste Feldstärke E_{max} am Rohr und die grösste Stromdichte j_{max} :

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{max}} &= 2 E_0 \\ j_{\text{max}} &= 2 j_0 \end{aligned} \right\} \text{ mit } E = \frac{\rho}{\gamma}, \text{ wobei } \rho \text{ den spezifischen} \\ \text{Bodenwiderstand bezeichnet}$$

An der Mantellinie des Rohres, die mit der E_0 -Richtung den Winkel α einschliesst, beträgt die Feldstärke E und die Stromdichte j :

$$E_x = 2 E_0 \cos \alpha$$

$$j_x = 2 j_0 \cos \alpha$$

5.1.2 Blanke Rohrleitung durch den Erdungstrichter hindurch bis in neutrale Erde, Fig. 13. Das Strömungsfeld in der Umgebung der Rohrleitung ergibt sich durch Superposition von zwei Feldern. Zur Bestimmung des ersten Teilfeldes wird die Rohrleitung in kurze Teilstücke zerlegt. Jedes Teilstück nimmt das Potential V_R seiner Umgebung V_x an. Das zweite Teilfeld entsteht dadurch, dass jedem Teilstück der Rohrleitung jetzt die Spannung ($-V_x$) aufgedrückt wird. Damit wird die Totalspannung der Rohrleitung auf Potential Null ge-

bracht. Im ersten Teilfeld fliesst kein Strom zur Rohrleitung. Somit bestimmt sich der Strom zur Rohrleitung aus dem zweiten Teilfeld allein.

Die blanke Rohrleitung hat wegen der Unmöglichkeit, sie kathodisch zu schützen, wenig praktisches Interesse. Andererseits ist sie der Beschädigung durch Lichtbogen viel weniger ausgesetzt, wie dies die Versuche zeigten. Auf eine rechnerische Betrachtung wird daher hier verzichtet.

5.1.3 Vollkommen isolierte Rohrleitung mit Potential Null im homogenen Strömungsfeld, Fig. 14. Die Spannung an der Rohrisolation beträgt:

$$V_x - V_R = U_0$$

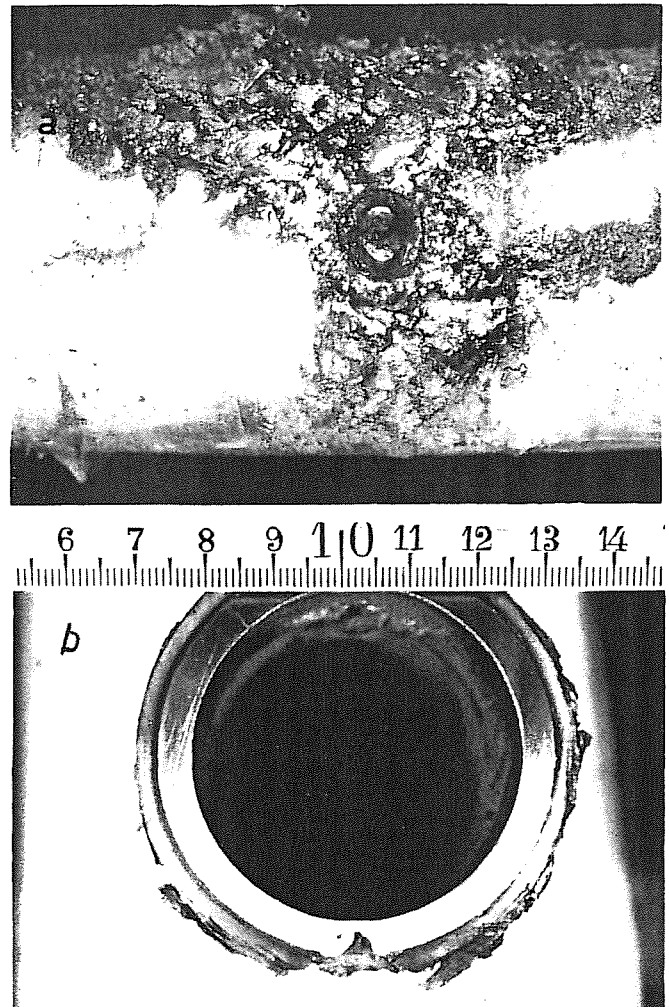


Fig. 11

Prüfobjekt Nr. 43 nach Versuch 11.4

a Ansicht; b Rohrquerschnitt

Kein Loch, Anschmelzung ca. 3 mm tief, ca. 7 mm $\varnothing$
 Rohrwandstärke 5 mm, Isolation 1,4 mm PVC und 5 mm Polyesterfolie
 $i_1 = 245$ A; $i_2 = 490$ A; $t = 1,6$ s

Der Einfluss des Rohrinhaltes

Tabelle II

i_1 A	i_2 A	Versuch	Versuchs- objekt	Rohrinhalt und Ergebnis der Versuche	
275	420	7.6	32	Rohr mit Wasser gefüllt: Loch 4 mm $\varnothing$ (Fig. 8)	nach 1,08 s
200	290	5.5	13	Rohr leer: Loch 6 mm $\varnothing$	nach 1,0 s
175	260	7.4	20	Rohr mit Öl gefüllt: Anschmelzung 1 mm tief	nach 1,07 s
175	345	5.2	10	Rohr leer: Loch 5 mm $\varnothing$ (Fig. 7)	nach 1,08 s
130	215	7.2	18	Rohr mit Wasser gefüllt: Anschmelzung 0,5 mm tief	
130	230	3.1	22	Rohr leer: Anschmelzung 0,5 mm tief	

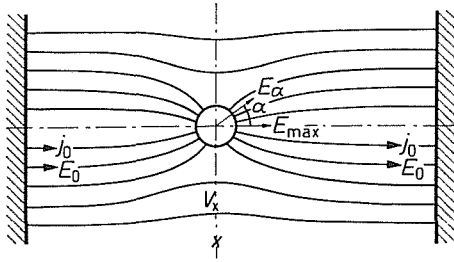


Fig. 12

Strömungsfeld einer blanken Rohrleitung im homogenen Feld E_0
 j_0 Stromdichte im homogenen Feld; E_0 Feldstärke im homogenen Feld,
 $E_{\max} = 2 E_0$; $E_\alpha = 2 E_0 \cos \alpha$; V_x Potential an der Stelle x

darin bedeuten

V_R Potential des Rohres, in der Regel $V_R = 0$

V_x Potential des Bodens an der Stelle x

U_0 Spannung an der Rohrisolation

Die Rohrisolation muss somit die volle Spannung des Erdungstrichters an der Stelle x aushalten.

Die grösste Feldstärke und Stromdichte im Erdboden tritt in der Querebene zum Rohr auf; sie beträgt auch hier $E_{\max} = 2 E_0$. In der Richtung α ist $E_\alpha = 2 E_0 \sin \alpha$.

5.1.4 Isolierte Rohrleitung mit Fehlerstelle F im Strömungsfeld der Erdung, Fig. 15.

Bezeichnungen: Wandstärke des Stahlrohres w_R

Wandstärke der Rohrisolation w_1

Durchmesser der Fehlerstelle $2 r$

Der Erdboden in der Umgebung der Rohrleitung habe den spezifischen Widerstand ϱ_1 . In der Fehlerstelle befinde sich Humus oder Wasser mit dem spezifischen Widerstand ϱ_2 .

Die Berechnung des Stromes in der Fehlerstelle gelingt mit guter Näherung mit Hilfe des Satzes von der Ersatzstromquelle. Zu diesem Zweck wird das gesamte Strömungsfeld der Erdung als lineares Netzwerk betrachtet, wozu auch das mit Schmutz oder Wasser gefüllte Loch in der Isolation mit einem Widerstand R_2 gehört. Es werden nun zwei Fälle untersucht:

Erstens soll der Widerstand R_2 unendlich gross werden («Leerlaufversuch» des Elementes R_2), dadurch ergibt sich an der Fehlerstelle eine Spannung U_0 . Diese Spannung ist

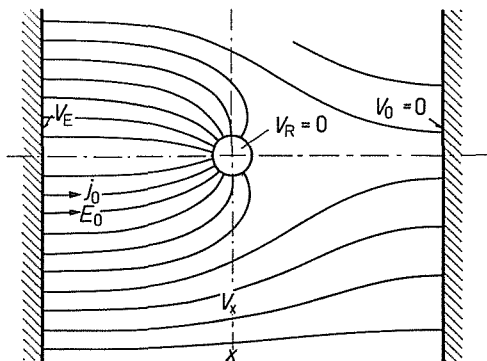


Fig. 13

Strömungsfeld einer blanken Rohrleitung mit Potential $V_R = 0$ zwischen der Erdung V_E und der Bezugserde $V_0 = 0$

(Blanke Rohrleitung mit Spannung $V_R = 0$ im Trichter der Erdung V_E)
 j_0 Stromdichte im homogenen Feld; E_0 Feldstärke im homogenen Feld
 V_E , V_R , V_0 Potentiale der Erdung, des Rohres und der Bezugserde

identisch mit dem Potential V_x an der vollkommenen Rohrisolation.

Zweitens soll der Widerstand $R_2 = 0$ gemacht werden («Kurzschlussversuch» des Elementes R_2). Dadurch fliesst an der Fehlerstelle ein Strom I_K .

Aus diesen beiden Messungen ergibt sich der innere Widerstand der Stromquelle zu $R_q = U_0/I_K$. Gemäss des Satzes von der Ersatzstromquelle ist damit der Strom im Widerstand R_2 :

$$I = \frac{U_0}{R_q + R_2} \quad (1)$$

Die Bestimmung von U_0 ist einfach: es ist dies die Spannung an der vollkommenen Rohrisolation nach 5.1.3, d. h. das Potential V_x der Erdung am Ort der Rohrleitung, wobei diese als nicht vorhanden oder unendlich dünn angenommen werden kann, weil das Erdungsfeld mit und ohne das isolierte Rohr nicht wesentlich verschieden ist (kleiner Rohrdurchmesser im Vergleich zu den Abmessungen des Erdungstrichters). Somit ist $U_0 = V_x - V_R = V_x$.

Die Bestimmung von I_K ist durch Superposition zweier Fälle wie folgt möglich: Zuerst wird angenommen, die Rohr-

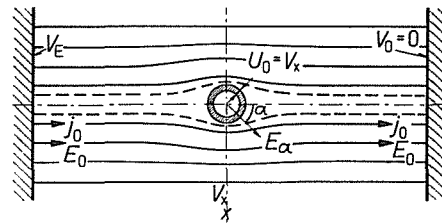


Fig. 14

Strömungsfeld um die isolierte Rohrleitung in einem homogenen Feld E_0

U_0 Spannung an der Rohrisolation

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 12 und 13

leitung besitze keinerlei Erdverbindung; sie kommt dann infolge der Kurzschlussverbindung $R_2 = 0$ auf das Potential $V_R = V_x$ (gemäss Fall 5.1.1). Sodann wird an die Rohrleitung ein Potential $V_R = 0$ statt $V_R = V_x$ angelegt, d. h. eine Quelle ($-V_x$) überlagert. Mit dieser Quelle ergibt sich eine Strömung durch die Fehlerstelle $R_2 = 0$, die dem Fehlerstrom I_K mit $R_2 = 0$ entspricht.

Die Berechnung dieses Fehlerstromes aus $R_2 = 0$ in das umgebende Erdreich ist annäherungsweise möglich, wenn die Form der Stromausbreitung in Betracht gezogen wird. Da der Durchmesser des Loches an der Fehlerstelle sehr klein ist gegenüber dem Rohrdurchmesser D , entsteht ein Strömungsfeld, das in guter Näherung demjenigen eines kreisförmigen Plattenerders mit Radius r an der Rohr- bzw. Erdoberfläche entspricht. Dafür beträgt der Ausbreitungswiderstand $R_1 = \varrho_1/4r$ und $I_K = V_0/R_1$. Mit $R_2 = w_1 \varrho_2/r^2 \pi$ wird nach Gl. (1):

$$I = \frac{U_0}{\frac{\varrho_1}{4r} + \frac{\varrho_2 w_1}{r^2 \pi}} \quad (2)$$

Die Spannung U_2 am Widerstand R_2 der Fehlerstelle ergibt sich aus:

$$\frac{U_2}{U_0} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{\frac{\varrho_2 w_1}{r^2 \pi}}{\frac{\varrho_2 w_1}{r^2 \pi} + \frac{\varrho_1}{4r}} \quad (3)$$

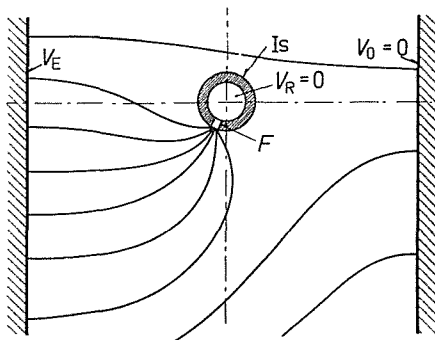


Fig. 15

Strömungsfeld an einer Fehlerstelle der Rohrleitung

(Isolierte Rohrleitung mit Fehlerstelle F, im Spannungstrichter der Erdung V_E)

I_s Isolation der Rohrleitung; F Fehlerstelle (z. B. 3 mm ϕ)

V_E , V_R , V_0 Potentiale der Erdung, der Rohrleitung und der Bezugserde

oder für $\varrho_1 = \varrho_2 = \varrho$:

$$\frac{U_2}{U_0} = \frac{\frac{w_1}{r \pi}}{\left(\frac{w_1}{r \pi} + \frac{1}{4}\right)} = \frac{w_1}{w_1 + \frac{r \pi}{4}} \quad (3a)$$

Beispiel: Fehlerstelle mit Material von $\varrho_2 = 10^4 \Omega \text{ cm}$ gefüllt (z. B. mit Wasser):

Es sei

$$\varrho_1 = \varrho_2 = 10^4 \Omega \text{ cm}, 2r = 0,3 \text{ cm}, w_1 = 0,3 \text{ cm}$$

so wird

$$\frac{U_2}{U_0} = \frac{0,3}{0,3 + 0,15 \cdot 0,78} \approx 72 \%$$

5.2 Erwärmung der Fehlerstelle, Entstehung eines Lichtbogens, Durchschlag

Die Erwärmung wird unter der Voraussetzung berechnet, dass während der kurzen Dauer T des Fehlerstromes (ca. 1 s) keine Wärme aus dem Widerstand R_2 abgeleitet wird. Dann gilt für die erzeugte und gespeicherte Energie W :

$$W = U_2 I_2 T = U_2^2 R_2 T = m_2 c \cdot \Delta \vartheta$$

m_2 Masse im Volumen der Fehlerstelle F in Gramm = $\gamma r^2 \pi w_1$

c spezifische Wärme in $\text{Ws}/^\circ\text{C} \cdot \text{g} = 4,2 \text{ Ws}/^\circ\text{C} \cdot \text{g}$ für Wasser

$\Delta \vartheta$ Erwärmung in $^\circ\text{C}$

γ spezifisches Gewicht g/cm^3

$\varrho_1 \varrho_2 \varrho$ spezifischer Widerstand $\Omega \text{ cm}$

$$\Delta \vartheta = \frac{U_2 I T}{m_2 c} = \frac{U_2^2}{4,2 \varrho_2 w_1^2} \quad (4)$$

oder durch Einsetzen von U_2/U_0 :

$$\Delta \vartheta = \frac{U_0^2 T}{4,2 \varrho_2 \left(w_1 + \frac{r \pi}{4}\right)^2} \quad (4a)$$

Daraus folgt die ohne Lichtbogenbildung höchstzulässige Spannung

$$U_0^2 = \frac{\Delta \vartheta}{T} 4,2 \varrho_2 \left(w_1 + \frac{r \pi}{4}\right)^2$$

oder

$$U_0 = \sqrt{\frac{4,2 \varrho_2 \Delta \vartheta}{T} \left(w_1 + \frac{r \pi}{4}\right)} \quad (4b)$$

Für beginnende Verdampfung des Wassers der Fehlerstelle R_2 sei $\Delta \vartheta = 100^\circ\text{C}$

Mit $\varrho = 10^4 \Omega \text{ cm}$ und $T = 15$ wird z. B.

$$U_0 = \sqrt{420} \cdot 100 \left(0,3 + \frac{0,15 \pi}{4}\right) = 2050 (0,3 + 0,117) \approx 900 \text{ V}$$

Somit ist bei der Fehlerstelle ($r = 1,5 \text{ mm}$) mit ca. $0,9 \text{ kV}$, bei einer Fehlerstelle mit ($r = 3 \text{ mm}$) mit ca. $1,1 \text{ kV}$ nach 1 s mit der beginnenden Verdampfung in der Fehlerstelle und damit mit dem beginnenden Lichtbogen zu rechnen. Bei Schmutz statt Wasser liegt die Spannungsgrenze tiefer, weil die spezifische Wärme des Schmutzes kleiner ist als für Wasser. Grosser spezifischer Widerstand erhöht die Wärmeleistung in R_2 und senkt damit die während 1 s zulässige Gesamtspannung U_0 . Würde die Temperatur des Widerstandes R_2 berücksichtigt, so würde sich die Wärmeleistung bei konstanter Gesamtspannung U_0 erniedrigen oder die während 1 s zulässige Spannung U_0 etwas erhöhen. Es folgt daraus zunächst, dass Erdungstrichter von Niederspannungsanlagen keine Gefährdung bezüglich Anschmelzung von Rohrleitungen darstellen.

Aus den Gl. (4) und (4a) lässt sich für eine gegebene Spannung U_2 oder U_0 die Zeitdauer bis zur beginnenden Dampfbildung, d. h. bis zum Ansatz eines Lichtbogens, bestimmen. Es ist:

$$T = \frac{\Delta \vartheta}{U_2^2} 4,2 \varrho_2 w_1^2 \quad (4c)$$

$$\begin{aligned} \text{Beispiel: } \Delta \vartheta &= 100^\circ\text{C} \\ \varrho_2 &= 10^4 \Omega \text{ cm} \\ w_1 &= 0,3 \text{ cm} \\ U_0 &= 10 \text{ kV (eff.)} \\ \frac{U_2}{U_0} &= \frac{w_1}{w_1 + \frac{r \pi}{4}} \approx 0,72 \end{aligned} \left\{ \begin{aligned} T &= 4,2 \cdot 0,09 \cdot \frac{1}{7,2^2} \\ &= \frac{0,38}{52} = 7,3 \text{ ms} \end{aligned} \right.$$

d. h. der Lichtbogen bildet sich innert der ersten Halbwelle.

Die Oszillogramme zeigen tatsächlich bereits nach der 1. Halbwelle einen Lichtbogen, der sich in kurzen Strompausen beim Nulldurchgang deutlich äussert. Diese Feststellung gilt für Isolationsdicken von 3...10 mm. Die Lichtbogenbildung wird überdies dadurch beschleunigt, dass bei den Versuchen die Fehlerstelle nur teilweise mit Humus gefüllt war, wie das praktisch oft der Fall sein wird. Es kann mit der sofortigen Zündung eines Lichtbogens in der Fehlerstelle gerechnet werden. Der Stromverlauf ist sodann von der Erwärmung des Bodenmaterials vor der Fehlerstelle (Widerstand R_1), von der Nicht-Linearität des Materials bei hohen Feldstärken³⁾ und der Ausdehnung des Lichtbogens bedingt.

Mit dem Lichtbogen ausschliesslich innerhalb der Fehlerstelle müsste der Strom mit dem Wert I_0 beginnen:

$$I_0 \approx \frac{U_0}{R_1} = \frac{U_0}{\frac{\varrho_1}{4r}} = \frac{4r U_0}{\varrho_1}$$

³⁾ siehe K. Berger: Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stossströmen. Bull. SEV 1946, Nr. 8.

Mit $U_0 = 10 \text{ kV}$, $r = 0,15 \text{ cm}$, $\varrho_1 = 10^4 \Omega \text{ cm}$ wird:

$$I_0 = \frac{6000}{10^4} \approx 0,6 \text{ A}$$

Demgegenüber beginnt der Strom bereits in der 1. Halbwelle mit ca. 90...800 A (Scheitelwert) je nach dem Wert von ϱ_1 .

Aus den Versuchen geht somit deutlich hervor, dass der Lichtbogen sich bereits in der 1. Halbwelle nicht auf das Raumgebiet in der Fehlerstelle R_2 beschränkt, sondern sich sofort in den Spannungstrichter vor der Fehlerstelle in den Widerstand R_1 ausbreitet. Mit einem gemessenen Strom von 100 A (eff.) lässt sich ein widerstandsloser halbkugelförmiger Bereich mit dem Radius r_0 ausrechnen:

$$I = U_0 \frac{2 \pi r_0}{\varrho_1}$$

$$r_0 = \frac{10^2 \cdot 10^4}{10^4 \cdot 2 \pi} \approx \frac{100}{6,3} \approx 16 \text{ cm} \quad (\varrho_1 = 10^4)$$

In Wirklichkeit ist dieser Bereich allerdings nicht widerstandslos, so dass r_0 unter diesem Grenzwert bleibt. Die Messung zeigt aber weiter, dass ein wesentlicher Anteil der Schlagweite von 50 cm durch den Lichtbogen bereits innert einer Halbwelle der Frequenz 50 in einen gutleitenden Zustand versetzt wird. Die Erwärmung des Erdreiches lässt dann den Strom auf den 2...3 fachen Anfangswert innert 1...3 s ansteigen.

Die Feldstärke E am Rand dieses als widerstandslos angenommenen Bereiches rechnet sich aus als:

$$E = \frac{U_0}{r_0} \approx \frac{10}{16} \approx 0,65 \text{ kV/cm}$$

Dieser Wert liegt wesentlich tiefer als die für den Humus festgestellte Grenze der Linearität, nämlich 2,5...3 kV/cm³. Daraus muss geschlossen werden, dass die erhöhte Leitfähigkeit durch die heissen Lichtbogengase im porösen Humus bewirkt wird.

Je nach Homogenität und Porosität des Erdreiches bei der Fehlerstelle wird sich der Lichtbogen langsamer oder rascher ausdehnen, bis es infolge zu grosser Feldstärke zum plötzli-

⁹⁾ siehe K. Berger: Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stossströmen. Bull. SEV 1946, Nr. 8.

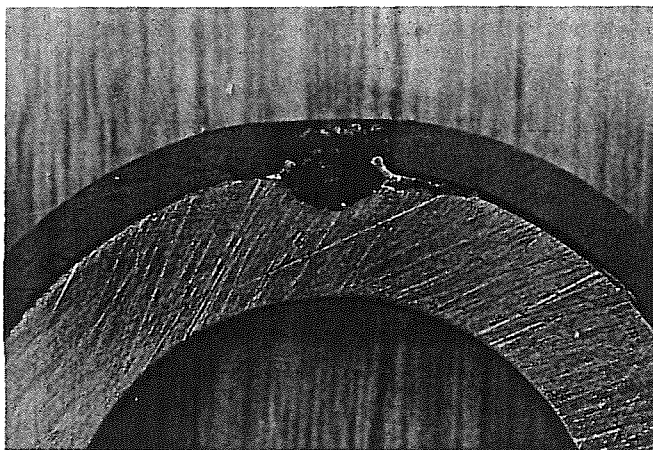


Fig. 16

Querschnitt durch die Anschmelzung eines 10 mm starken Stahlrohres mit 4,5 mm PVC-Isolation

$i_1 = 340 \text{ A}$; $i_2 = 680 \text{ A}$; $t = 0,74 \text{ s}$

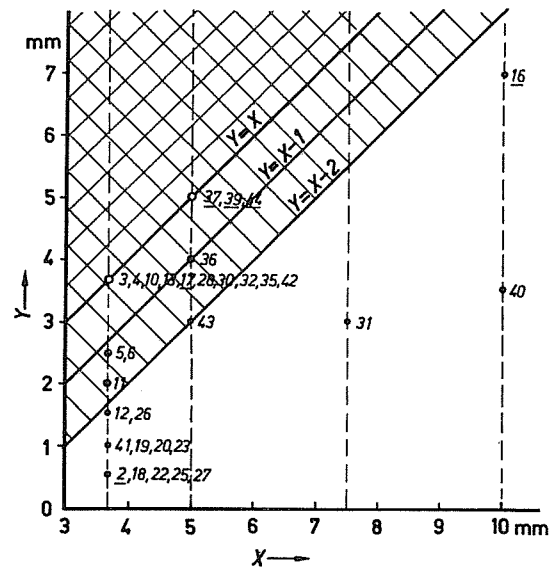


Fig. 17

Tiefe der Anschmelzungen Y nach den Versuchen, für verschiedene Wandstärken X der Rohre

- Loch in der Rohrwand ohne Überdruck im Rohr;
- Vermutlich Loch in der Rohrwand mit Überdruck im Rohr;
- nur Anschmelzungen

Die Zahlen bedeuten die Nummern der Versuchsrohre nach Tabelle I. Dort finden sich alle näheren Angaben für die einzelnen Versuche. Unterstrichene Zahlen bedeuten die Entstehung eines Kurzschluss-Lichtbogens zwischen der Erdung und dem Versuchsrohr (0,5 m Abstand) innert 1 s

chen Durchschlag der Reststrecke kommt. Im 10-kV-Erdungstrichter kann dieser Durchschlag des Erdreiches bei 1,4...1,7 mm starkem Weich-PVC bereits nach 0,3...0,4 s eintreten (Versuche 4 und 7.1), bei sehr gutleitendem Boden und 3 bzw. 3,5 mm starkem PVC mit Polyester nach 0,3...0,6 und 0,9 s (Versuche 11.2, 11.3 und 11.5).

5.3 Folgen des Lichtbogens an der Fehlerstelle

Die Anschmelzwirkungen des Lichtbogens sind bei isolierten Rohrleitungen ungleich schwerer als bei blanken Rohren.

Bei *blanken Rohren* (Versuch 1) entstehen auch bei Strömen von 300...900 A (Scheitelwert) während einer Sekunde nur kleine Schmelzspuren. Die Wandstärke der untersuchten Rohre (3,65 mm) wird dabei kaum geschwächt.

Bei *isolierten Rohren* spielt vor allem der Schmelzpunkt des Isoliermaterials eine Rolle: Weiches PVC von 1,4 mm Dicke wird auf vielen cm² weggeschmolzen, es entstehen nur flache Anschmelzungen. Dagegen geben relativ lichtbogenbeständige Stoffe, wie PVC mit Polyesterfolien oder Harz mit Glasfasern, die schlimmsten Lichtbogenwirkungen, d. h. die am meisten konzentrierten Anschmelzungen, die oft rund sind wie ein gebohrtes Loch mit wenig grösserem Durchmesser als in der Isolation. Hier kommt es z. T. innert 1 s zu Löchern bei einer Wandstärke von 3,65 mm.

Ein Beispiel ist in Fig. 16 gegeben, das den Schnitt durch die Fehlerstelle an einem 10 mm starken Rohr mit 4 mm starker PVC-Isolation zeigt (Versuch 12.1 von Tab. I).

Fig. 17 gibt schliesslich eine Darstellung der Tiefe Y der Anschmelzung an isolierten Rohren in Funktion der Wandstärke $X = W_R$ der Stahlrohre, bei verschiedenen Beanspru-

chungen nach Tabelle I. Die in den Kreisen notierten Nummern sind die Prüfobjektnummern der Tabelle I, aus welchen alle zugehörigen Daten des Versuches zu entnehmen sind. Ebenso sind drei schräge Geraden eingezeichnet worden. Die erste entspricht der Gleichung $Y = X$, d. h. Anschmelztiefe = Wandstärke. Zwei weitere Geraden liegen 1 bzw. 2 mm tiefer: $Y + 1 = X$ bzw. $Y + 2 = X$.

Aus der Darstellung ergibt sich eine interessante Beobachtung: Zwischen den Fällen mit Loch in der Rohrwandung und den andern, wo lediglich eine Anschmelzung erfolgt, liegt ein Ordinatenabstand von 1...2 mm mit nur sehr wenigen Resultaten. Dieser Abstand ist offenbar darin begründet, dass während des Anschmelzens im Lichtbogen mehr Masse flüssig wird als aus der bleibenden Tiefe der Anschmelzung geschlossen werden kann. Offenbar erstarrt ein Teil des flüssigen Materials nach dem Löschen des Lichtbogens wieder. Dieser Vorgang dürfte bei einer Rohrleitung, die unter hohem innerem Überdruck steht, wohl etwas anders verlaufen, indem die flüssige Metallmasse unter Druck ausgestossen würde. Die blosse Füllung des Rohres mit Wasser oder Öl ohne Druck vermag in dieser Hinsicht keine Anhaltspunkte zu geben. Vorsichtigerweise wird man im flüssigen Zustand mit 1...2 mm tieferen Anschmelzungen rechnen als bei der Ausmessung nach dem Erstarren ohne inneren Überdruck.

5.4 Rohrspannung U_0 , Erderspannung U_e und Mindestabstände zwischen Rohrleitung und Erdern

Ein erstes Kriterium betrifft die Anschmelzwirkungen im Erdungstrichter.

Aus Fig. 17 folgt zunächst für die untersuchte Spannung $U_0 = 10$ kV an der isolierten Rohrleitung, dass bei den untersuchten Bodenwiderständen die Rohrwandstärke 3,65 mm dem Lichtbogen nicht standhält, sondern durchbohrt wird. Auch 5 mm Wandstärke ist zu knapp, indem ohne Überdruck im Rohr bei 5 Versuchen dreimal ein Loch im Rohr entstand. Die Rohrwandung 7,5 mm dürfte im 10-kV-Spannungstrichter nicht mehr wesentlich gefährdet sein, noch weniger 10 mm Wandstärke.

Für andere Anordnungen der isolierten Rohrleitung im Spannungstrichter einer Hochspannungserdung ist gemäss der theoretischen Betrachtung in Abschnitt 5 für die Anschmelzgefährdung lediglich die Spannung U_0 von Bedeutung, d. h. die Spannung, die an der fehlerlosen Isolation der Rohrleitung im Erdungstrichter auftreten würde. Daneben ist, wie schon gezeigt wurde, die Art der Rohrisolation von entscheidender Bedeutung für die Anschmelzung.

Der Rohrdurchmesser ist von geringer Bedeutung, weil der sekundäre Spannungstrichter an der Fehlerstelle nicht stark davon abhängt; grundsätzlich wird bei gleich grosser Fehlerstelle der grössere Rohrdurchmesser etwas weniger gefährdet, weil obiger Trichter von einem grossen Rohr mehr behindert wird als von einem dünnen Rohr.

Andere Abstände zwischen Erder und Rohrleitung als bei den Versuchen (50 cm) und andere Erderspannungen (10 kV) wirken sich in dem Sinne aus, als dadurch die Spannung U_0 an der isolierten Rohrleitung geändert wird. Gleiches U_0 gibt bei gleicher Bodenbeschaffenheit und gleicher Fehlerstelle gleiche Gefährdung. Damit ist ein erstes Kriterium für die Bemessung der Abstände bezüglich Stärke der Anschmelzung gegeben.

Für Wandstärken von 10 mm dürfte $U_0 \approx 10$ kV in üblichen Böden zulässig sein, Stromdauer von nicht mehr als 1 s vorausgesetzt.

Welche Spannung U_0 z. B. für 5 mm starke Rohre zugelassen werden kann, kann aus den Versuchen nicht zuverlässig entschieden, sondern höchstens abgeschätzt werden. Dazu wären Versuche mit z. B. $U_0 < 10$ kV erforderlich.

Nach einem Bericht von B. Favez und J.-C. Gougeuil der Electricité de France (CIGRE-Report 336, 1966) sind für Wandstärken von 4...5 mm Spannungen U_0 von höchstens 5 kV zulässig. Diese Forderung passt gut in den Rahmen der vorliegenden Untersuchung.

Ein zweites Kriterium für den minimalen Abstand zwischen Erder und Rohrleitung folgt aus den Versuchen dadurch, dass bei 7 von 44 Versuchen ein Kurzschlusslichtbogen zwischen Rohrleitung und Erder auftrat, bei 10 kV Erderspannung U_e und 50 cm Abstand im Humus. Für eine minimale Sicherheit zur Verhinderung solcher Kurzschlüsse, d. h. Durchschläge des Erdreiches zwischen Rohrleitung und Erder, müssen schätzungsweise mindestens doppelte Abstände vorhanden sein, d. h.:

für 10 kV Erderspannung U_e mindestens 1 m Abstand zwischen Rohr und Erder

für 20 kV Erderspannung U_e mindestens 2 m Abstand zwischen Rohr und Erder

für 30 kV Erderspannung U_e mindestens 3 m Abstand zwischen Rohr und Erder.

Dabei ist eine maximale Dauer der Erderspannung von 1 s vorausgesetzt.

Wenn diese Anforderungen mit jenen des 1. Kriteriums verglichen werden, ist ersichtlich, dass im allgemeinen das erste Kriterium schwieriger zu erfüllen ist als das zweite.

6. Schutzmassnahmen

Aus dem Vorstehenden ergibt sich, dass zum Schutz von Rohrleitungen zwei Bedingungen erfüllt sein müssen:

1. Verhinderung direkter *Kurzschlüsse* zwischen Erdung und Rohrleitung. Dazu sind Minimalwerte des Abstandes zwischen beiden einzuhalten, nämlich ca. 1 m Abstand pro 10 kV Erderspannung.

2. Verhinderung schädlicher *Anschmelzungen* der Rohrleitungen (Löcher im Rohr ohne direkten Kurzschlusslichtbogen). Dazu muss der Abstand der Rohrleitung von der Erdung so gross sein, dass überall längs der Rohrleitung das von der Erdung verursachte Potential kleiner bleibt als ca.

$$U_0 \leq 10 \text{ kV für Rohrwandstärken von 8 mm und mehr}$$

$$U_0 \leq 5 \text{ kV für Rohrwandstärken von 4...6 mm}$$

Wo diese Bedingungen nicht eingehalten sind, kommt in Frage, die Rohrleitung mit einem Isolierschlauch aus PVC, PE oder einem anderen Stoff zu umhüllen, welcher der Spannung U_0 an der Rohrisolation zuverlässig gewachsen ist. Der Raum zwischen Rohrleitung und Isolierschlauch wird mit Vorteil mit Humus oder Wasser gefüllt, um dort Entladungen zu verhindern.

Adressen der Autoren:

Prof. Dr. K. Berger, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich, und W. Baumann, dipl. Elektrotechniker, Versuchsstation der FKH, 4658 Däniken.