

Polyäthylen als Hochspannungsisolierstoff für Energiekabel

Autor(en): **Feichtmayr, F. / Würstlin, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **61 (1970)**

Heft 2

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915899>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Polyäthylen als Hochspannungsisolierstoff für Energiekabel

F. Feichtmayr und F. Würstlin, Ludwigshafen am Rhein

490-496

679.582:621.315.61:621.3.027.3:621.315.2

1. Einleitung

Polyäthylen (PE) hat als unpolarer Stoff ausgezeichnete dielektrische Eigenschaften. Die niederen ε - und $\tan \delta$ -Werte und ihre geringe Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur haben deshalb PE schon seit Jahren zu dem wichtigsten Isolierstoff für Hochfrequenzkabel gemacht. In zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen wurden diese dielektrischen Werkstoffkonstanten nicht nur weitgehend ermittelt, sondern auch ihr Zusammenhang mit der Struktur und dem Aufbau des PE geklärt. Dem Kabelfachmann steht somit alles an Eigenschaftsdaten zur Verfügung, was er zur Konstruktion und zum Betrieb solcher Hochfrequenzkabel benötigt.

Seit einigen Jahren wird nun PE immer mehr auch als Isolierstoff in Energiekabeln verwendet. Die dielektrischen Eigenschaften des Materials spielen hier vorerst noch eine untergeordnete Rolle. Die wichtigste Anforderung an das PE bei dieser Anwendung ist eine hohe Durchschlagfestigkeit, wobei besonderer Wert auf eine hohe elektrische Zeitstandfestigkeit gelegt wird. Hier beginnen nun die Schwierigkeiten, und hier wird sofort einer der Gründe offensichtlich, die für den zögernden Einsatz von PE als Isolierstoff in Energiekabeln verantwortlich sind: Es ist weder eine umfassende Theorie des elektrischen Durchschlags in (organischen) Festkörpern vorhanden, noch liegen genügend experimentelle Ergebnisse über das Durchschlagverhalten von PE vor. Dem Kabelfachmann fehlen somit Hinweise, wie hoch er die Betriebsfeldstärke in PE-isolierten Kabeln ansetzen kann bzw. welches Risiko er im Einzelfall eingeht, wenn z. B. die Betriebsfeldstärken merklich schwanken.

2. Problemstellung

Die zwei so sehr verschiedenen Entwicklungsstadien beim Einsatz von PE in Hochfrequenzkabeln bzw. in Energiekabeln sind durchaus erklärlich. Beim Hochfrequenzkabel sind die dielektrischen Eigenschaften des PE ausschlaggebend für die Anwendung. Sie können als Werkstoffkonstanten sowohl am Prüfkörper als auch am Fertigprodukt «Kabel» durch Einzelmessungen ermittelt werden. Im Gegensatz hierzu ist im Energiekabel die Durchschlagfestigkeit die ausschlaggebende Grösse. Sie ist keine Werkstoffkonstante wie die dielektrischen Werte ε und $\tan \delta$. Die Ermittlung der Durchschlagfestigkeit erfolgt über eine Zerstörungsprüfung mit der bekannten komplexen Abhängigkeit der Messergebnisse von einer Vielzahl von Faktoren. Wie bei allen Zerstörungsprüfungen sind daher nur statistisch ermittelte Werte, d. h. Werte, die aus einer Grosszahl von Einzelversuchen resultieren, als Ergebnis aussagekräftig. Über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bzw. über Vergleichsversuche kann daher nur diskutiert werden, wenn alle variablen Versuchsbedingungen sorgfältig konstantgehalten werden. Dies bedeutet

auch, dass Resultate, die mit einer bestimmten Versuchsanordnung erzielt wurden, im allgemeinen nicht «umrechenbar» auf andere Versuchsbedingungen sind.

Die Durchschlagfestigkeit eines Isolierstoffes, die nach irgendeiner nationalen oder internationalen Norm ermittelt wurde, ist somit nicht vergleichbar mit der Durchschlagfestigkeit eines Kabels, das unter Verwendung dieses Isolierstoffes hergestellt wurde. Die Diskrepanz ist dabei nicht allein auf die unterschiedliche Geometrie der Messanordnung in den beiden Versuchen zurückzuführen, sondern auch auf Faktoren, die auf den Fertigungsprozess bei der Kabelherstellung zurückgehen.

Diese Einflüsse machen es ratsam, dass der Kabelhersteller nicht nur das Fertigprodukt Kabel auf seine elektrische Festigkeit untersucht, sondern auch den Isolierstoff allein etwa in Form einer Eingangskontrolle. Daraus ergibt sich, dass Anwender und Hersteller des Isolierstoffes gleichermaßen interessiert sind an einer problemgerechten Prüfung des Isolierstoffes. Um derartige Prüfungen durchführen zu können, steht man vor der Frage, ob eine der üblichen Prüfmethode zur Bestimmung der Durchschlagfestigkeit den Forderungen gerecht wird, die sich aus dieser Problemstellung zwangsläufig ergeben (s. nächster Abschnitt), oder ob es notwendig ist, eine spezielle Messmethodik zu entwickeln. Generell kann zu dieser Problemstellung gesagt werden, dass das Ziel jeder derartigen Untersuchung an Isolierstoffen für Energiekabel die Charakterisierung des Isolierstoffes durch eine Lebensdauerkurve sein wird, d. h. es muss die Abhängigkeit der Zeitstandfestigkeit von der angelegten Spannung aufgezeigt werden. Die für ein bestimmtes PE ermittelte Lebensdauerkurve wird dann u. a. auch die Grundlagen für die Beantwortung der Frage liefern, ob PE in seiner elektrischen Zeitstandfestigkeit durch den Zusatz von sog. «Spannungsstabilisatoren» verbessert werden kann. Darüberhinaus ist zu erhoffen, dass man über die statistische Auswertung der Grosszahlversuche zu neuen Aussagen bzw. Erkenntnissen über den Durchschlagmechanismus kommt, welche die heute noch sehr mangelhaften Vorstellungen über die Vorgänge beim elektrischen Durchschlag in Isolierstoffen erweitern.

3. Messmethode

Für die anzuwendende Messmethode ist wohl die wichtigste Forderung, dass die Messobjekte leicht und reproduzierbar in grossen Stückzahlen hergestellt werden können. Das einzelne Messobjekt selbst soll dabei so klein sein, dass gleichzeitig 20 bis 30 Prüflinge derselben Spannungsprüfung unterzogen werden können. Die zum Durchschlag führenden Wechselspannungen U_a sollten 30 kV nicht überschreiten, damit der Arbeitsplatz auch bei Parallelschaltung von 20 bis 30 Prüflingen nicht zu gross wird. Schliesslich muss die

Durchschlagfestigkeit an einer Probenform ermittelt werden, die so gewählt ist, dass der Durchschlag des Prüflings an einer definierten Stelle entsteht. Nebendurchschläge dürfen auf keinen Fall auftreten, da sie eine sinnvolle Aussage über die elektrische Festigkeit unmöglich machen [1] ¹⁾. Eine sichere statistische Bewertung sollte in einfachen Fällen schon mit Stichprobenzahlen von 15 bis 30 Prüflingen möglich sein.

Unter den gängigen Prüfmethode n entsprach nun keine den hier aufgestellten Forderungen. Sie werden jedoch von einem Messverfahren erfüllt, das von den beiden Autoren bereits an zwei Stellen ausführlich beschrieben wurde [2; 3]. Einige Einzelheiten dieses neuen Verfahrens seien hier zum Verständnis der weiteren Ausführungen kurz wiederholt. So zeigt Fig. 1 schematisch die Versuchsanordnung für den einzelnen Probekörper. Bei dem im Pressvorgang hergestellten Prüfling handelt es sich um eine 5 mm dicke Rundscheibe mit einem Durchmesser von 70 mm. In der Mitte der Scheibe befindet sich eine kegelförmige Vertiefung von 4 mm Tiefe und einem Kegelwinkel von 50°, die durch eine im Presswerkzeug angebrachte gehärtete Metallspitze eingepresst wird. Die Kegelfläche sowie die gegenüberliegende Planfläche ($\phi = 20$ mm) werden nach dem Pressen mit Leitsilber metallisiert. Die der elektrischen Beanspruchung unterworfenen Prüfstrecke s Kegelspitze–Gegenfläche beträgt 1 mm, der Pressvorgang erlaubt die Einhaltung dieses Masses auf $\pm 0,05$ mm.

Für eine Messanordnung Spitze–Platte ist aus elektrischen Gründen die Forderung zu stellen, dass die Spitze in einer definierten Abrundung endet. Für das hier verwendete Verfahren bedeutet dies, dass sich die kegelförmige Vertiefung im Pressvorgang reproduzierbar herstellen lassen muss. Um dies zu gewährleisten, wird die gehärtete Metallspitze des Presswerkzeuges auf der Drehbank unter dem Mikroskop auf einen Rundungsradius von 0,2 mm abgeschliffen. In Fig. 2 ist eine nach diesem Verfahren hergestellte Spitze des Presswerkzeuges vergrößert abgebildet. Mit der gleichen Spitze wurde anschliessend ein Prüfling aus PE gepresst und ein Abdruck der kegelförmigen Vertiefung gemacht. Wie die Gegenüberstellung in Fig. 2 erkennen lässt, erlaubt es das verwendete Pressverfahren, bei allen Prüflingen

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

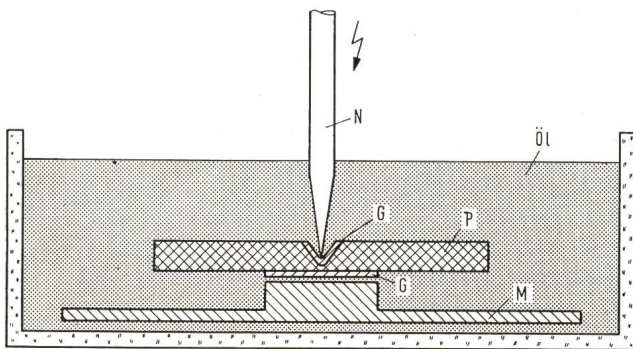


Fig. 1
Form und Anordnung des Prüflings zur Bestimmung der elektrischen Zeitstandfestigkeit

N Metallnadel zur Zuführung der Spannung U_a (Spitzenabrundung $r \geq 0,5$ mm); P Prüfling; G Leitsilberelektroden; M geerdete Metallplatte

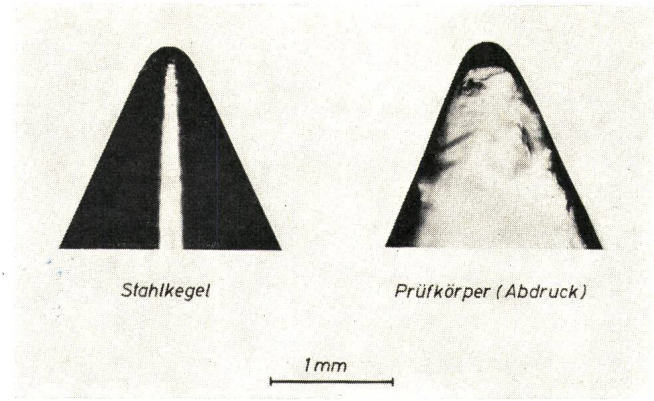


Fig. 2
Elektrische Zeitstandfestigkeit von Polyäthylen

bezüglich der Geometrie der Durchschlagstelle identische Bedingungen zu schaffen ²⁾.

Der schematischen Darstellung der Prüfanordnung (s. Figur 1) ist weiter zu entnehmen, dass die elektrische Beanspruchung der Probekörper unter einem flüssigen Isoliermittel vorgenommen wird, um Nebendurchschläge [1] in dem hier interessierenden Spannungsbereich bis ca. 35 kV zu verhindern. Im Prinzip eignen sich für diesen Zweck alle Isolierflüssigkeiten, wie z. B. Transformatorenöl, Silikonöl, Palatinol AH, die auch dazu verwendet werden, die Durchschlagfestigkeit von festen Isolierstoffen bei kontinuierlich ansteigender Spannung zu bestimmen [4]. Bei der kurzen Versuchszeit (1...2 min), die zur Bestimmung dieser Art von Durchschlagfestigkeit benötigt wird, spielt die Frage einer Einwirkung des flüssigen Isoliermittels auf das PE keine Rolle. Sie ist aber zweifellos zu berücksichtigen bei den hier vorliegenden Versuchen zur Bestimmung der elektrischen Zeitstandfestigkeit von PE. Da hierbei die einzelnen Prüflinge über Wochen und Monate in der Isolierflüssigkeit liegen, kann keine Flüssigkeit verwendet werden, die das PE chemisch beeinflusst oder in das PE eindiffundiert. In jedem derartigen Fall wären zusätzliche, materialfremde Effekte zu befürchten.

Ein Beispiel für diesen Sachverhalt ist in Fig. 3 gegeben. In den angeführten Versuchsreihen wurde ein Hochdruckpolyäthylen der Dichte 0,918 mit einem Schmelzindex MFI 190/2 von 0,2 unter drei verschiedenen Bedingungen jeweils mit $U_a = 22$ kV durchgeschlagen. Die Auswertung der Durchschlagzeiten jeder einzelnen Messreihe wurde dabei analog einem in der Textiltechnik benutzten statistischen Verfahren für kleinen Stichprobenumfang vorgenommen [5]: Ordnung der Durchschlagzeiten t als $\log t$ auf der Abszisse, Auftrag der zugehörigen Summenhäufigkeiten F_j auf der Ordinate; man kann dazu ein Summenhäufigkeitspapier verwenden. Liegt eine log-Normalverteilung vor, so

²⁾ Die verwendete Prüfanordnung Kegelspitze–Platte bedingt ein sehr inhomogenes Feld mit einer hohen Maximalfeldstärke E_{\max} an der Spitze. Sie lässt sich nach A. Schwaiger: «Elektrische Festigkeitslehre», Springer-Verlag, Berlin 1925, durch den Ausnutzungsfaktor η charakterisieren, d. h. durch das Verhältnis von mittlerer zu maximaler Feldstärke:

$$\eta = \frac{E_{\text{mittel}}}{E_{\text{max}}} \quad E_{\text{max}} = \frac{U_a}{s \eta}$$

Die Berechnung ergibt für die in Fig. 1 gezeigte Prüfanordnung (Rundungsradius der Spitze $r = 0,2$ mm, Abstand Spitze–Platte $s = 1,0$ mm) $\eta = 0,282$. Nach dieser Formel sollte $E_{\max} \approx 4 E_{\text{mittel}}$ sein.

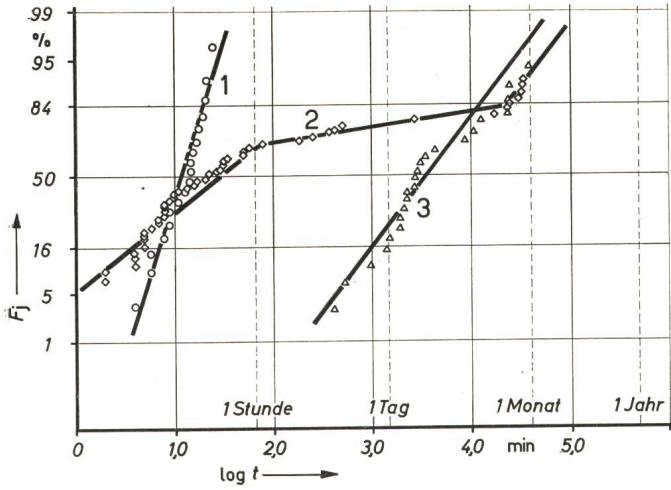


Fig. 3

Elektrische Zeitstandfestigkeit von Polyäthylen

Summenhäufigkeit der Durchschlagzeiten F_j in Funktion der Zeit t ($U_a = 22 \text{ kV}$)

1 Durchschläge unter Silikonöl; 2 Durchschläge unter Transformatoröl; 3 Durchschläge nach Lagerung in Transformatoröl bis zur Gewichtskonstanz

sammeln sich die Messpunkte auf einer Geraden. Dies ist nun z. B. bei der Messreihe 1, dem Ergebnis von Durchschlagversuchen unter Silikonöl, tatsächlich der Fall. Die zusätzliche Beobachtung, dass in dieser Isolierflüssigkeit PE auch bei monatelanger Lagerung weder chemische noch gewichtsmässige Veränderungen zeigt, lässt den Schluss zu, dass die gefundene log-Normalverteilung der Durchschläge eine Eigenschaft des PE ist. Die Messreihe 2 ist das Ergebnis von Durchschlagversuchen unter Transformatoröl. Sie führen, wie die Treppenkurve beweist, zu einem Mischkollektiv, d. h. mehrere Verteilungen sind überlagert. Versuche, welche die Auswirkung des Transformatoröls auf die Durchschlagfestigkeit aufzeigen sollten, ergaben, dass PE bis zu 4,3 Gew.-% Transformatoröl aufnehmen kann; materialfremde Effekte werden damit wahrscheinlich. Diese materialfremden Effekte konnten mit Hilfe der Messreihe 3 tatsächlich nachgewiesen werden. Diese Messreihe ist das Ergebnis einer

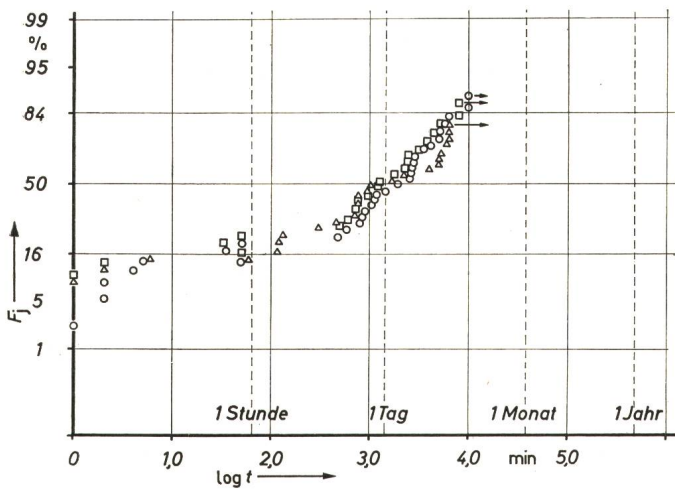


Fig. 4

Elektrische Spannungsfestigkeit von spannungsstabilisiertem Polyäthylen

($U_a = 27 \text{ kV}$)

Getrennte Auswertung der drei Messreihen von Tab. I

○ Durchschläge unter Silikonöl; □ Durchschläge unter Transformatoröl; △ Durchschläge nach Lagerung in Transformatoröle bis zur Gewichtskonstanz

Versuchsserie, der eine Lagerung der PE-Proben unter Transformatoröl bis zur konstanten Gewichtszunahme vorausging. Die Durchschlagzeiten für die gequollenen Proben gehorchen nun wieder einer log-Normalverteilung, die allerdings gegenüber dem nichtgequollenen PE nach längerer Zeit verschoben ist.

Mit Hilfe dieser Daten gelingt nun sehr leicht eine Deutung der Messreihe 2. So kann man sagen, dass der bei kurzen Zeiten liegende Anteil des Mischkollektivs der log-Normalverteilung des unbeeinflussten, d. h. nichtgequollenen PE, zuzuordnen ist. Der bei langen Zeiten liegende Ausläufer des Mischkollektivs entspricht dagegen der log-Normalverteilung des mit Transformatoröl gesättigten PE. Im ersten Drittel der Versuchsreihe schlagen also PE-Proben durch, die wegen der kurzen Verweilzeit noch kein Transformatoröl aufgenommen haben. Die PE-Proben dagegen, welche die erste Zeit ohne Durchschlag überstanden haben, sättigen sich mit der Zeit mit Öl und ergeben den bei langen Zeiten liegenden Ausläufer des Mischkollektivs. Eine entsprechende Übergangsphase zwischen den beiden Grenzzuständen wird ebenfalls beobachtet, wie der flache Kurvenverlauf im mittleren Drittel zeigt. Dieser Befund lässt zu-

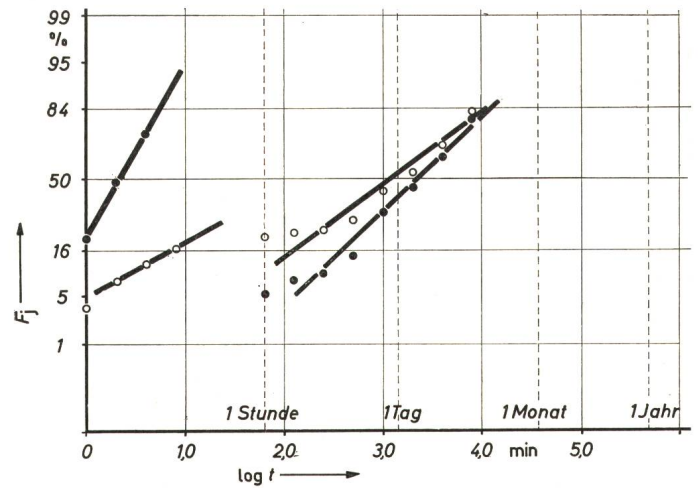


Fig. 5

Elektrische Zeitstandfestigkeit von spannungsstabilisiertem Polyäthylen

($U_a = 27 \text{ kV}$)

○ gemeinsame Auswertung der drei verschiedenen Messreihen von Fig. 3
● Aufteilung in zwei log-Normalverteilungen
Bezeichnungen siehe Fig. 3

nächst der Schluss zu, dass das für die Messung verwendete Transformatoröl ein Spannungsstabilisator für PE ist, der vorwiegend Kurzzeitdurchschläge verhindert. Da durch das eindiffundierte Öl jedoch eine Reihe anderer wichtiger Eigenschaften des Isoliermaterials merklich verschlechtert werden, ist es letzten Endes für diesen Anwendungszweck nicht geeignet.

4. Zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

Nachdem die in Fig. 3 zusammengefassten Ergebnisse über den Einfluss von Isolierölen auf die Durchschlagfestigkeit von PE zeigten, dass Silikonöl eine geeignete Isolierflüssigkeit für das hier verwendete Verfahren ist, kann die Messmethodik als genügend «ausgearbeitet» angesehen werden. Ein weiterer wichtiger, ja entscheidender Punkt, der jetzt noch geklärt werden muss, ist die Frage der Reproduzier-

Zeitstandfestigkeit von spannungsstabilisiertem Polyäthylen
Angelegte Spannung $U_a = 27 \text{ kV}$

Tabelle I

Klassengrenzen für $\log t$	Einzel- auswertung			Gesamtauswertung			Aufteilung in zwei unabhängige Verteilungen	
	Messreihe			Anzahl Σn_i	Häufigkeit %	Summen- häufigkeit %	Häufigkeit %	Summen- häufigkeit %
	1	2	3					
...0,000	1		2	3	3,2	3,2	20,0	20,0
0,001...0,300		3	1	4	4,3	7,5	26,7	46,7
0,301...0,600	2	1	1	4	4,3	11,8	26,7	73,4
0,601...0,900	2	1	1	4	4,3	16,1	26,7	100
0,901...1,200							$\Sigma n = 15$	
1,201...1,500								
1,501...1,800	2		2	4	4,3	20,4	5,1	5,1
1,801...2,100		2		2	2,2	22,6	2,6	7,7
2,101...2,400		2		1	1,1	23,7	1,3	9,0
2,401...2,700	1	2	1	4	4,3	28,0	5,1	14,1
2,701...3,000	4	5	5	14	15,1	43,1	18,0	32,1
3,001...3,300	5	2	3	10	10,8	53,9	12,8	44,9
3,301...3,600	6	2	5	13	14,0	67,9	16,7	61,6
3,601...3,900	5	7	2	14	15,1	83,0	18,0	79,6
3,901...4,200	1		1	2			$\Sigma n = 78$	
	4*	6*	4*	14*				
$\Sigma n =$	33	32	28	93				

* Proben nicht durchgeschlagen
 Σn Anzahl der für die statistische Auswertung eingesetzten Proben
 Σn_i Anzahl der durchgeschlagenen Proben je Klasse

Ein weiterer Nachweis für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit diesem Messverfahren ergibt sich aus drei Messreihen, für die dasselbe Hochdruckpolyäthylen verwendet wurde, das den Messreihen der Tabelle I bzw. Fig. 4 und 5 zugrunde liegt. Allerdings enthält das PE in diesem Fall keinen Spannungsstabilisator. Die Proben der einzelnen Messreihen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten mit einer konstanten Wechselspannung von $U_a = 14 \text{ kV}$ beansprucht. Die Reproduzierbarkeit der mit dem neuen Messverfahren erhaltenen Daten ergibt sich aus Tabelle II, in welcher die bei den einzelnen Messreihen erhaltenen Durchschlagzeiten in der Strichliste getrennt aufgeführt sind. Innerhalb der zu erwartenden Genauigkeit sind diese offensichtlich identisch. In den letzten drei Spalten von Tabelle II wurden alle 81 eingesetzten Proben zusammenfassend ausgewertet. Die dabei erhaltenen Ergebnisse sind in Fig. 6 graphisch dargestellt. Die Figur lässt erkennen, dass bei 14 kV die Durchschlagzeiten des nicht spannungsstabilisierten Hochdruckpolyäthylens einer log-Normalverteilung gehorchen. Als Mittelwert erhält man $\bar{x} = 4,0$; die Standardabweichung beträgt $s = 0,9$. Bemerkenswert ist, dass sich die Punkte des mittleren Bereiches, etwa zwischen $x - s$ und $x + s$, gut auf einer Geraden anordnen. Aber auch der kürzeste Durchschlagwert liegt noch annähernd auf derselben Geraden. Für die Verteilung der Durchschläge bei den 81 Proben lässt sich damit ein experimentell ermittelter Wert für die Lage von $\bar{x} - 2s \approx 2,0$ angeben. Die Tatsache, dass sich dieses interessante Ergebnis auch in jeder der drei Messreihen widerspiegelt, ist ein weiteres Indiz für die gute Reproduzierbarkeit, die mit dem neu entwickelten Messverfahren erreicht wird.

barkeit der Versuchsergebnisse. Zur Klärung der Frage wurden aus dem Granulat eines spannungsstabilisierten Hochdruckpolyäthylens nach dem oben beschriebenen Pressverfahren 93 Prüflinge hergestellt und in drei getrennten Messreihen mit 33, 32 und 28 Proben die Durchschlagszeiten bei $U_a = 27 \text{ kV}$ bestimmt und die in den einzelnen Messreihen beobachteten Durchschlagzeiten nach dem genannten Verfahren [5] statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in den ersten Spalten der Tabelle I angeführt bzw. in Fig. 4 als Summenhäufigkeit über der Zeit aufgetragen. Die graphische Darstellung lässt erkennen, dass die Verteilung der Durchschlagzeiten bei den drei Messreihen praktisch identisch ist. Der Verlauf der Kurven (keine einfache Gerade) weist darauf hin, dass bei diesem Material keine einfache log-Normalverteilung vorliegt.

Eine zusammenfassende Auswertung der drei Versuchsreihen ist ebenfalls der Tabelle I bzw. der Fig. 5 zu entnehmen. Entsprechend dem grossen Probenumfang ($n = 93$) wurde die zusammenfassende Auswertung nach einer Klasseneinteilung vorgenommen, die Klassenbreite für $\log t$ wurde dabei zu $w = 0,30$ gewählt. Die Gesamtauswertung lässt auch hier zunächst wieder ein Mischkollektiv erkennen. Wertet man jedoch die 78 oberhalb $\log t = 1,5$ liegenden Durchschlagzeiten für sich aus, so erhält man die rechte Gerade in Fig. 5 mit einem statistischen Mittelwert $\bar{x} = 3,4$ und einer Standardabweichung $s = 0,8$. 84 % des Gesamtergebnisses werden von dieser log-Normalverteilung erfasst. Die verbleibenden 16 % können offensichtlich einer weiteren log-Normalverteilung mit $x = 0,4$ zugeordnet werden, wie die linke Gerade in Fig. 5 zeigt.

Zeitstandfestigkeit von Hochdruck-Polyäthylen
Angelegte Spannung $U_a = 14 \text{ kV}$

Tabelle II

Klassengrenzen	Einzel- auswertung			Gesamtauswertung		
	Messreihe			Anzahl Σn_i	Häufigkeit %	Summen- häufigkeit %
	1	2	3			
0,000...0,300						
0,301...0,600						
0,601...0,900						
0,901...1,200						
1,201...1,500			1	1	1,2	1,2
1,501...1,800						1,2
1,801...2,100						1,2
2,101...2,400	1	2	1	4	4,9	6,1
2,401...2,700	1		1	2	2,5	8,6
2,701...3,000						8,6
3,001...3,300	1	4		5	6,2	14,8
3,301...3,600	3	3	1	7	8,7	23,5
3,601...3,900	4	10	6	20	24,7	48,2
3,901...4,200	4	5	8	17	21,0	69,2
4,201...4,500	6	1	4	11	13,6	82,8
4,501...4,800	5		3	8	9,9	92,7
	3*		3*			
$\Sigma n =$	28	25	28	81		

* Proben nicht durchgeschlagen
 Σn Anzahl der für die statistische Auswertung eingesetzten Proben
 Σn_i Anzahl der durchgeschlagenen Proben je Klasse

5. Elektrische Zeitstandfestigkeit des Polyäthylens

In der Einleitung wurde als eines der Ziele dieser Untersuchungen die Aufstellung der Lebensdauerkurve des verwendeten Hochdruckpolyäthylens genannt, d. h. es sollte die elektrische Zeitstandfestigkeit des PE in Abhängigkeit von der angelegten Spannung für die hier gewählten Bedingungen (Fig. 1) ermittelt werden. Da die mit verschiedenen Spannungen U_a geprüften Versuchsserien statistisch ausgewertet werden, ist es sinnvoll, den statistischen Mittelwert \bar{x} als charakteristische Grösse für jede Versuchsserie zur Aufstellung der Lebensdauerkurve zu verwenden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass jede Versuchsserie einer log-Normalverteilung gehorcht bzw. im Falle eines binären Mischkollektivs eine einwandfreie Aufteilung in zwei log-Normalverteilungen möglich ist.

Fig. 7 zeigt die Lebensdauerkurve des hier verwendeten Hochdruckpolyäthylens sowie die Lebensdauerkurve desselben PE, das durch Zusatz eines Spannungsstabilisators verbessert wurde. Zur Konstruktion dieser Kurven wurden die aus jeder Messreihe erhaltenen statistischen Mittelwerte \bar{x} in ein Koordinatensystem — angelegte Spannung U_a (kV) gegen $\log t$ der Durchschlagzeit t — eingetragen. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, ergibt sich hierbei für das nicht spannungsstabilisierte PE eine Kurve, die im Bereich hoher Spannungen zunächst merklich abfällt, bei niedrigeren Spannungen jedoch zunehmend flacher verläuft. Wie weit dies Verflachung der Kurve bei weiterer Spannungserniedrigung fortschreitet, kann erst nach Durchführung der entsprechenden Versuche gesagt werden. Aus den bis jetzt ermittelten Langzeitwerten des nicht spannungsstabilisierten PE ergibt sich die für die Praxis interessante Aussage, dass eine Änderung der Spannung um ca. 10 % eine Änderung der Lebensdauer um den Faktor 10 bewirkt.

Für den Konstrukteur von Hochspannungsanlagen ist die Angabe des Mittelwertes \bar{x} noch keine direkt verwendbare Aussage, da der Gebrauchswert der Isolation von den ersten, bei kurzen Zeiten liegenden Durchschlägen einer Messreihe bestimmt wird. Es interessiert daher besonders eine Messgrösse, welche die Frage beantwortet, wann über-

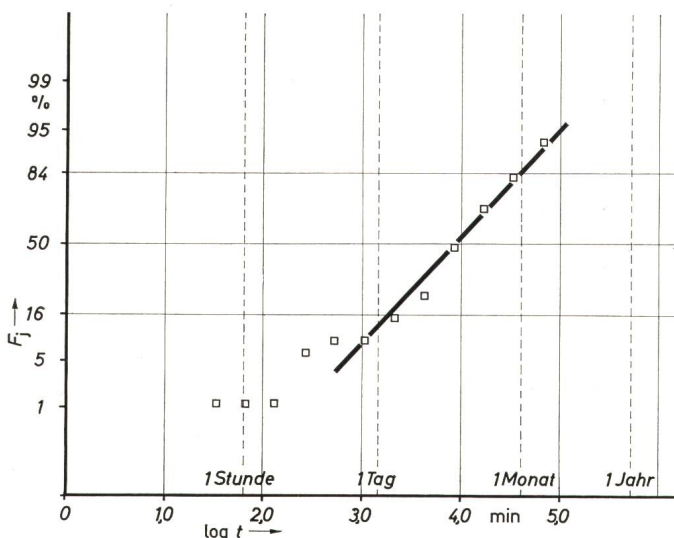


Fig. 6
Elektrische Zeitstandfestigkeit von Hochdruckpolyäthylen
 $U_a = 14$ kV (s. a. Tab. II)
Bezeichnungen siehe Fig. 3

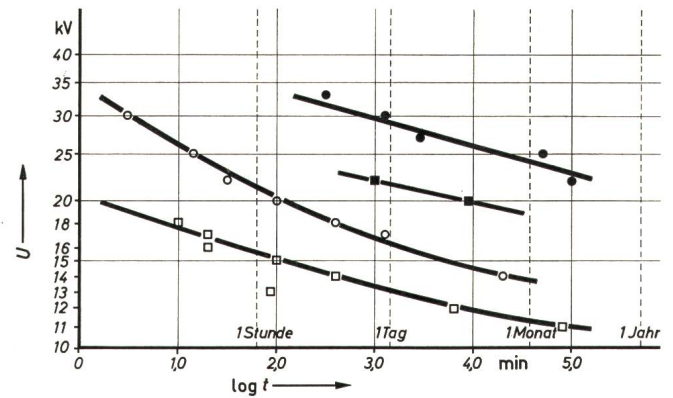


Fig. 7
Abhängigkeit der elektrischen Zeitstandfestigkeit von der angelegten Spannung U_a

○ □ Hochdruckpolyäthylen;
● ■ Spannungsstabilisiertes Polyäthylen;
statistische Kenngrössen: \bar{x} (○ ●); $\bar{x} - 2s$ (□ ■)

haupt die ersten Durchschläge auftreten. Der statistische Mittelwert \bar{x} muss also zumindest ergänzt werden durch die Standardabweichung s , die, zumindest im mittleren Bereich, die Steilheit der Häufigkeitskurve erkennen lässt. Wesentlich aussagekräftiger für die praktische Beurteilung eines Isolierstoffes ist die Angabe des experimentell ermittelten Wertes $\bar{x} - 2s$. So lässt sich z. B. das in diesen Versuchen verwendete Hochdruckpolyäthylen (s. Fig. 6) bei 14 kV durch folgende drei statistische Werte charakterisieren:

statistische Grösse	Zahlenwert ($\log t$)
\bar{x}	4,0
$\bar{x} - s$	3,1
$\bar{x} - 2s$	$\approx 2,0$

In Fig. 7 sind die bisher bei verschiedenen Spannungen U_a bestimmten Werte \bar{x} bzw. $\bar{x} - 2s$ zusammenfassend dargestellt. Es sei hier gleich darauf hingewiesen, dass den experimentell bestimmten Werten von $\bar{x} - 2s$ eine Probenmenge $n > 100$ zugrunde liegt. Im einzelnen ist Fig. 7 folgendes zu entnehmen: Für das nicht spannungsstabilisierte Hochdruckpolyäthylen liegt bei $U_a = 30$ kV der Mittelwert \bar{x} bei ca. 0,5; wird die Spannung erniedrigt, werden die \bar{x} -Werte immer grösser. Werte für $\bar{x} - s$ bzw. $\bar{x} - 2s$ können bei den hohen Spannungen noch nicht angegeben werden, da noch sehr viele Kurzzeitdurchschläge mit Durchschlagzeiten < 1 min auftreten, die nicht mehr differenziert angegeben werden können. Erst ab $U_a \leq 18$ kV lassen sich Zahlen für $\bar{x} - 2s$ angeben. Verbindet man die ($\bar{x} - 2s$)-Werte durch eine Kurve, so verläuft diese mit sinkender Spannung U_a immer flacher.

Wie Fig. 7 weiterhin zeigt, erhält man wesentlich grössere Mittelwerte \bar{x} , wenn spannungsstabilisiertes PE eingesetzt wird. Darüber hinaus ergibt sich, dass beim spannungsstabilisierten PE schon bei $U_a = 22$ kV keine Kurzzeitdurchschläge mehr auftreten, so dass bereits für diese Spannung ein Wert für $\bar{x} - 2s$ angegeben werden kann; er liegt bei $\log t = 3,0$.

6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, den Isolierstoff Polyäthylen als Werkstoff in seiner Eigenschaft «Durch-

schlagfestigkeit» zu charakterisieren und die Möglichkeiten einer Verbesserung seiner Zeitstandfestigkeit durch Zusatz eines Spannungsstabilisators zu prüfen.

Die erhaltenen Ergebnisse ergaben zunächst, dass die hier angewandte neu entwickelte Messmethode geeignet ist, zur Klärung dieser beiden Fragestellungen beizutragen. So ergab sich z. B. eine ausgezeichnete Übereinstimmung der Messdaten, die unter gleichen Bedingungen an verschiedenen, unabhängig voneinander geprüften Versuchsreihen erhalten wurden. Die Messmethode ist somit in der Lage, reproduzierbare Ergebnisse zu liefern. Eine statistische Auswertung der Einzelergebnisse erlaubt es, die Zeitstandfestigkeit des Polyäthylens durch den Mittelwert \bar{x} , durch die Standardabweichung $\bar{x} - s$ und durch die Grösse $\bar{x} - 2s$ zu charakterisieren. Die Durchschlagzeiten selbst gehorchen einer log-Normalverteilung; liegen im Einzelfall Mischkollektive vor, so können diese in zwei (oder mehrere) log-Normalverteilungen aufgeteilt werden. Die Grössen \bar{x} bzw. $\bar{x} - s$ selbst lassen sich an einer kleinen Probenmenge $n \leq 30$ bestimmen. Zur Bestimmung der Grösse $\bar{x} - 2s$ muss zwangsläufig ein grosser Probenumfang ($n > 100$) verwendet werden. Da die Ver-

suchsserie jedoch nach kurzer Zeit abgebrochen werden kann (wenn ca. 5 % der Proben durchgeschlagen sind), ist die Bestimmung dieses Wertes weder zeitlich noch kostenmässig zu aufwendig. Zahlenangaben für $\bar{x} - 2s$ sind deswegen besonders wichtig, da sie dem Praktiker Hinweise geben, wann unter den vorgegebenen Versuchsbedingungen die ersten Durchschläge zu erwarten sind.

Literatur

- [1a] G. Dronsek und D. Kind: Nebendurchschläge in festen Isolierstoffen. ETZ-A 86(1965)19, S. 636...637.
- [1b] G. Dronsek: Durchschlagsvorgänge in festen Isolierstoffen durch Gleit-entladungen. ETZ-A 89(1968)21, S. 586...590.
- [2] F. Feichtmayr und F. Würstlin: Neue Messmethode zum Nachweis der Spannungsstabilisierung von Polyäthylen. Kunststoffe 58(1968)10, S. 713...717.
- [3] F. Feichtmayr und F. Würstlin: Die elektrische Zeitstandfestigkeit von Polyäthylen. ETZ-B 21(1969)6, S. 123...138.
- [4] H. J. Mair und W. Zaengl: Die elektrische Festigkeit von Polyäthylen und Polystyrol. ETZ-A 90(1969)7, S. 147...152.
- [5] H. J. Henning und R. Wartmann: Statistische Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz: Kleiner Stichprobenumfang und Zufallsstreuungsbereich. Zeitschrift für die gesamte Textilindustrie 60(1958)1, S. 19...24.
- [6] Prüfung von Textilien. Auswertung der Messergebnisse. DIN 53804.

Adresse der Autoren:

F. Feichtmayr und F. Würstlin, Badische Anilin- und Sodafabrik AG, D-67 Ludwigshafen am Rhein.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzung des CE 62, Equipement électrique utilisé dans la pratique médicale, vom 13. bis 15. Oktober 1969 in Kyoto

Die Sitzung des CE 62 fand im Anschluss an den 12. Internationalen Radiologenkongress statt. Unter Leitung des neuen Präsidenten, Prof. G. Candardjis (Schweiz), und H. Bertheau (Deutschland) als Sekretär, nahmen 49 Vertreter aus 11 Ländern teil. Ferner waren Beobachter aus Indien sowie von den Organisationen ICRP und ICRU, International Commission on Radiological Protection and Radiological Units, anwesend.

Vorerst wurde über Titel und Arbeitsbereich des CE 62 beraten und folgendes festgelegt:

Titel: «Equipment électrique utilisé dans la pratique médicale.»

Arbeitsbereich:

«To prepare international recommendations concerning the manufacture, installation and application of electrical equipment used in medical practice. This also concerns surgery, dentistry and the other specialities of the healing art.»

Auf Beschluss der Vollversammlung wurde dem Arbeitsbereich noch folgende Ergänzung beigefügt:

«This scope includes systems, equipments and accessories which are within the scope of other Technical Committees; attention will be confined to aspects in which special requirements for medical use arise, particularly as regards safety.»

Mit dieser Ergänzung soll gesichert werden, dass der Arbeitsbereich jederzeit neuen Gebieten der Technik angepasst werden kann.

Die Breite des Arbeitsgebietes des CE 62 liess eine Unterteilung in Sous-Comités als unerlässlich erscheinen. Es wurden folgende Sous-Comités gebildet:

Sous-Comité		Präsidium	Sekretariat
SC 62A	Aspects généraux	Frankreich	Niederlande
SC 62B	Equipement à rayons X jusqu'à 400 kV et accessoires	Japan	Deutschland (Personalunion mit TC 62)
SC 62C	Equipement pour radiation de haute énergie et pour la médecine nucléaire	Italien	England
SC 62D	Equipement d'électricité médicale	Dänemark	USA (Vorschlag)

Jedes Sous-Comité erhält eine Anzahl Arbeitsgruppen, denen die Erstellung von Empfehlungen für die einzelnen Sachgebiete obliegt. Das CES soll primär in den Arbeitsgruppen für Strahlenschutz mitarbeiten, da bereits ein schweizerisches Strahlenschutzgesetz besteht.

Es wurden auch ad-hoc-Arbeitsgruppen gebildet, um Detailfragen der zukünftigen Arbeit zu beraten und um die Gestaltung des Arbeitsablaufes festzulegen. Folgende Sachgebiete wurden behandelt:

Radiation Protection,
Electromedical Equipment,
High Energy Radiotherapy Equipment,
Tubes and Housings,
Image Intensifiers and Television,
Special Requirements Regarding Installation Problems in Hospitals,
Nuclear Medicine and Computers for Medical Application.

Die nächste Sitzung ist für September 1970 vorgesehen.

L. Coradi