

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 65 (1974)

**Heft:** 7

**Artikel:** Zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Polyäthylen (PE) im inhomogenen Feld und unterschiedlicher Spannungsbeanspruchung

**Autor:** Guindehi, S. / Zaengl, W.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915380>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Elektrotechnik – Electrotechnique



### Zur elektrischen Durchschlagfestigkeit von Polyäthylen (PE) im inhomogenen Feld und unterschiedlicher Spannungsbeanspruchung

Von S. Guindehi und W. Zaengl

*Es wird über eine Reihe von Durchschlaguntersuchungen an handelsüblichem Polyäthylen für die Herstellung von Hochspannungskabeln berichtet, wobei insbesondere 50-Hz-Wechselspannungen, aber auch kurzzeitige Stoßspannungen und überlagerte Wechsel-Gleichspannungen verwendet wurden. Die untersuchten Isolierstoffproben wiesen einheitlich eine Isolierwandstärke von 1 mm auf, wobei eine unsymmetrische, inhomogene Elektrodenanordnung die Materialbeanspruchung kennzeichnet. Die Beanspruchungszeit lag im Zeitbereich von Mikrosekunden bis Minuten. Die Versuchsergebnisse lassen erkennen, dass innerhalb dieser Beanspruchungszeit eine stoff-spezifische Durchschlagfeldstärke («intrinsic strength») die Materialfestigkeit kennzeichnet; die Ausbildung von Raumtladungen im Polyäthylen beeinflusst aber die erzielbaren Durchschlagspannungen erheblich, wie auf Grund qualitativer Überlegungen gezeigt wird.*

#### 1. Einleitung

Zwischen der ausserordentlich hohen elektrischen Gleichspannungs-Durchschlagfestigkeit von Polyäthylen bei dünnen Schichten («intrinsic strength») und den Wechselspannungsfestigkeiten desselben Materials im Dauerbetrieb und grösseren Isolierwandstärken bestehen bekanntlich sehr grosse Unterschiede, die sich im PE-Hochspannungskabel am stärksten bemerkbar machen. Diese starke Reduktion der elektrischen Isolierfähigkeit wird von einer sehr grossen Zahl von zumindest qualitativ bekannten Einflussfaktoren verursacht, wie Hohlräumen oder Fremdstoffpartikeln im Isolierstoff, mechanischen Spannungen, lokalen Feldstärkeüberhöhungen durch schlechte Kontaktierung zwischen Isolierstoff und Elektroden-system (Leiterglättung). Auch chemische Alterungsvorgänge, die durch die Einwirkung elektrischer Felder noch verstärkt werden können, belasten die Dauerstandfestigkeit dieser Isolierungen erheblich. Weitaus die grösste Anzahl der Durchschläge im PE-Kabel kann auf die «Bäumchenbildung» (treeing) zurückgeführt werden, die zu lokal hohen Feldstärken an den Spitzen dieser Teilentladungsfiguren führt, die wiederum das Wachstum der Bäumchenbildung fördert. So lässt sich vermuten, dass letztlich jeder Durchschlag durch lokal hohe Feldstärken verursacht wird, was wiederum die Frage nach den

*Un compte rendu est présenté, sur une série d'essais de perforation électrique de polyéthylène industriel pour les câbles haute tension, en appliquant notamment des tensions alternatives à 50 Hz, ainsi que des tensions de choc de courte durée et des tensions alternatives et continues superposées. Toutes les éprouvettes avaient une épaisseur de paroi de 1 mm. La contrainte de l'isolant, dont la durée s'étend d'une fraction de microseconde à quelques minutes, est caractérisée par la disposition asymétrique des électrodes et par le fait que le champ n'est pas homogène. Les résultats des essais montrent que, pendant ces durées de contrainte, la résistance de la matière isolante est caractérisée par une intensité de champ de perforation («intrinsic strength»). La formation de charge d'espace dans le polyéthylène a, toutefois, une grande influence sur les tensions de claquage comme le montrent les considérations qualitatives.*

fundamentalen Durchschlagsprozessen besonders wichtig erscheinen lässt. Es besteht kein Zweifel daran, dass gerade auf diesem Gebiete noch grössere Unsicherheiten herrschen.

Die nachfolgenden Untersuchungen können einen weiteren Beitrag dazu liefern, wie der Durchschlag in einem heute handelsüblichen Polyäthylen, das bei der Fabrikation von Hochspannungskabeln verwendet wird, bei einer kurzzeitigen oder nicht zu langzeitigen Spannungsbeanspruchung, insbesondere bei Wechselspannungen, zustande kommt. Die gewählte Proben- und Elektrodenform schliesst zwar eine Bäumchenbildung vor dem Durchschlag praktisch aus; die untersuchte Isolierstoffdicke von 1 mm und die herrschende Feldinhomogenität im Isoliermaterial stellen jedoch Bedingungen dar, wie sie bei grösseren Isolationssystemen zumindest kurz vor dem eigentlichen Durchschlag vorherrschen dürften. Da an den gleichen Materialien und denselben Probenformen schon anderweitig vielfältige Dauerfestigkeitsversuche durchgeführt wurden, können die hier veröffentlichten Ergebnisse eine wertvolle Ergänzung zu jenen Untersuchungen [1...3]<sup>1)</sup> darstellen.

Ein Hauptziel der Versuche bestand auch darin, die Einflussparameter mit einer sehr grossen statistischen Zuverlässigkeit zu ermitteln, was zu einer sehr guten Reproduzierbarkeit

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



der Messresultate führt. So wurde grundsätzlich jeder Parameter an einer Serie bzw. Stichprobe von Prüflingen durchgeführt, die jeweils aus etwa 30 Probekörpern bestand. Für einen unmittelbaren Vergleich innerhalb grösserer Messreihen wurde darüber hinaus nur einheitliches Material derselben Produktions-Charge verwendet.

## 2. Prüfanordnung und Materialdaten

Wie aus Fig. 1 zu ersehen ist, entsprechen die untersuchten Proben denjenigen, welche von *Feichtmayr* und *Würstlin* [1; 2] verwendet wurden. Es handelt sich um Hochdruck-PE der Dichte 0,918 der Badischen Anilin- und Soda-Fabrik AG (BASF) mit der Bezeichnung 1812-DXSK. Die Proben bestehen aus 5 mm dicken Rundscheiben mit einem Durchmesser von 70 mm. Sie sind im Spritzguss-Verfahren hergestellt. In der Mitte der Scheibe befindet sich eine kegelförmige Vertiefung von 4 mm, einem Kegelswinkel von 50° und einem Rundungsradius von 0,2 mm. Die Kegelfläche wurde mit Leitsilber metallisiert. Die der elektrischen Beanspruchung unterworfenen Prüfstrecke (Kegelspitze-Gegenfläche) beträgt 1 mm ± 0,05 mm. Die gegenüberliegende ebene Elektrodenfläche hat einen Durchmesser von ca. 30 mm.

Diese Prüfanordnung Kegelspitze-Platte bedingt ein inhomogenes Feld im Isolierstoff mit einer Maximalfeldstärke  $E_{\max}$  an der abgerundeten Spitze. Dabei ist:

$$E_{\max} = \frac{E_{\text{mittel}}}{\eta}$$

$\eta$  Ausnutzungsfaktor nach *Schwaiger*

Die Feldberechnung ergibt für diese Prüfanordnung einen  $\eta$ -Wert von 0,24 [5]. Somit ist:

$$E_{\max} \approx 4 \cdot E_{\text{mittel}} = 4 \frac{U}{S}$$

$U$  Spannung am Prüfobjekt

$S$  kürzester Elektrodenabstand (1 mm)

Um eine Vorstellung von der in dieser Anordnung herrschenden Potentialverteilung entlang der Proben-Oberfläche zu

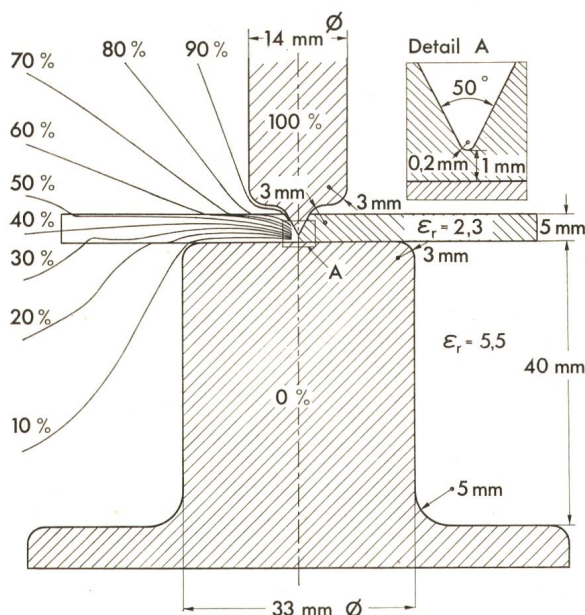


Fig. 1 Messanordnung

bekommen, wurden die zugehörigen elektrostatischen Potentialfelder mit der Widerstandspapiermethode [14] ermittelt.

Die Anwendung dieser Prüfanordnung besitzt mehrere Vorteile:

- Es liegen wertvolle und zahlreiche Ergebnisse über die Zeitstandfestigkeit des Materials aus der Literatur [2] vor, die einen unmittelbaren Vergleich der hier gewonnenen Resultate zulassen;
- Die Feldinhomogenität im Isoliermaterial entspricht eher den praktischen Verhältnissen in Hochspannungskabeln, wobei auch die Dicke der geprüften PE-Schicht in der Grössenordnung von Isolierwandstärken bei Kabeln liegt;
- Das Prüfspannungsniveau ist noch nicht so hoch, dass die Durchschlagspannungen durch unerwünschte Nebeneffekte (Nebendurchschläge, Gleitentladungen an der Grenzschicht Einbettungsmedium-Polyäthylen) wesentlich beeinflusst werden können.

Als *Einbettungsmedium* wurden die Isolieröle nach Tabelle I benutzt:

Einbettungsmedium	$\epsilon_r$	$\text{tg } \delta$	Verwendet bei Versuchen
Palatinöl AH <sup>1)</sup>	5,5	0,065	1 und 2
Silikonöl (SF-96/50) <sup>2)</sup>	2,72	0,0001	3 und 4

<sup>1)</sup> Hersteller: BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen (BRD)

<sup>2)</sup> Hersteller: General Electric Company

## 3. Versuchsergebnisse

Sämtliche Versuche wurden bei Zimmertemperatur durchgeführt.

### 3.1 Einfluss der Anstiegsgeschwindigkeit der Prüfwechselspannung auf die Durchschlagfestigkeit von spannungsstabilisiertem und natürlichem PE

Bekanntlich beeinflusst die Zeitdauer der Spannungsbeanspruchung die Durchschlagfestigkeit fester Isolierstoffe sehr stark. Vor allem im Zeitbereich von Minuten ist ein starker Rückgang der elektrischen Festigkeit feststellbar [4]. Für die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen ist daher die Frage der Schnelligkeit der Spannungssteigerung bis zum Durchschlag sehr wesentlich. Ausserdem sollte abgeklärt werden, wie ein Spannungsstabilisator die Durchschlagfestigkeit im Kurzzeitbereich beeinflusst. Daher wurden bei diesen Versuchen vier verschiedene Geschwindigkeiten für die Spannungssteigerung angewandt, nämlich:

- 0,915 kV/min, also ca. 1 kV/min
- 9,45 kV/min, also ca. 10 kV/min
- 18,85 kV/min, also ca. 20 kV/min
- 30,0 kV/min

Für beide PE-Typen (Fig. 2) zeigte sich die erwartete Tendenz, dass mit zunehmender Spannungsanstiegsgeschwindigkeit auch die Durchschlagfestigkeit zunimmt. Es ist auch deutlich erkennbar, dass bei einer langsamen Spannungssteigerung das stabilisierte PE eine höhere Durchschlagfestigkeit als das natürliche PE aufweist. Diese Differenz wird bei einer raschen Spannungssteigerung von 30 kV/min bedeutungslos. Der Spannungsstabilisator benötigt somit Zeit, um die elektrischen Eigenschaften des Isoliermaterials zu beeinflussen. Diese Anlaufzeit liegt in der Grössenordnung von Minuten, wie kürzlich auch von anderen Autoren [6] festgestellt wurde.

Als Nachweis für die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse sei das folgende Ergebnis angeführt: Es wurde eine zweite Stichprobe, bestehend aus 30 Proben, mit einer Spannungsanstiegsgeschwindigkeit von 9,45 kV/min untersucht. Die Messergebnisse sind in Tabelle II (PE-Natur) zusammengestellt.



Tabelle II

	Proben- zahl $N$	$\bar{U}_d$ kV	$s$ kV	95%-Vertrauens- bereich um $\bar{U}_d$ kV
1. Serie	30	46,95	6,38	$\pm 2,381$
2. Serie	30	46,735	5,77	$\pm 2,153$

Die Differenzen sind sehr gering und zeigen auch bei einem statistischen Vergleich, dass keinerlei Merkmalsunterschiede vorhanden sind.

### 3.2 Einfluss einer Vorbeanspruchung auf die Wechselspannungs-Durchschlagfestigkeit

Um den Einfluss einer zeitlichen Vorbeanspruchung auf die Durchschlagfestigkeit von PE zu untersuchen, wurde zuerst für eine Stichprobe ein Spannungsniveau verwendet, das noch keine Durchschläge verursachen kann. Aufgrund der vorhergehenden Messungen ergab sich, dass mit einer Spannungsanstiegsgeschwindigkeit von 9,45 kV/min bis zu einer Spannung von 30 kV, also einer Feldstärke von ca. 120 kV/mm, kein Durchschlag zu erwarten ist. Deshalb wurde die Spannung von 30 kV als Vorbeanspruchungsniveau festgelegt.

Der Versuch wurde wie folgt durchgeführt: Die Spannung wurde mit einer Geschwindigkeit von 9,45 kV/min bis 30 kV gesteigert und dieses Spannungsniveau für eine Zeitdauer von 10/30/60 min beibehalten, um sofort anschliessend die Spannung weiter bis zum Durchschlag zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in Tabelle III (PE-Natur) zusammengestellt.

Tabelle III

Wartezeit min	$N$	$\bar{U}_d$ kV	$s$ kV	95%-Vertrauens- bereich um $\bar{U}_d$ kV
10	30	52,392	8,65	$\pm 3,227$
30	23	50,137	4,05	$\pm 1,75$
60	30	52,965	6,58	$\pm 2,454$

Die statistische Prüfung dieser Versuchsergebnisse zeigt, dass die Abweichungen zwischen den Varianzen  $s^2$  sowie den Mittelwerten  $\bar{U}_d$  nur zufällig sind. Dies bedeutet, dass die Vorbeanspruchungsdauer bei dem gewählten Spannungsniveau keinen Einfluss auf die Durchschlagfestigkeit von natürlichem PE ausübt.

Das Ergebnis dieser Versuchsreihe besagt nun aber nicht, dass das Material auch noch längere Wartezeiten ertragen

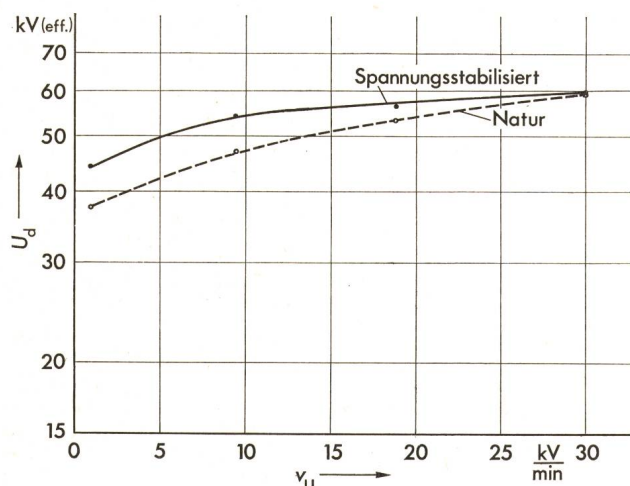


Fig. 2 Einfluss der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit  $v_u$  auf die Durchschlagfestigkeit  $U_d$  von PE

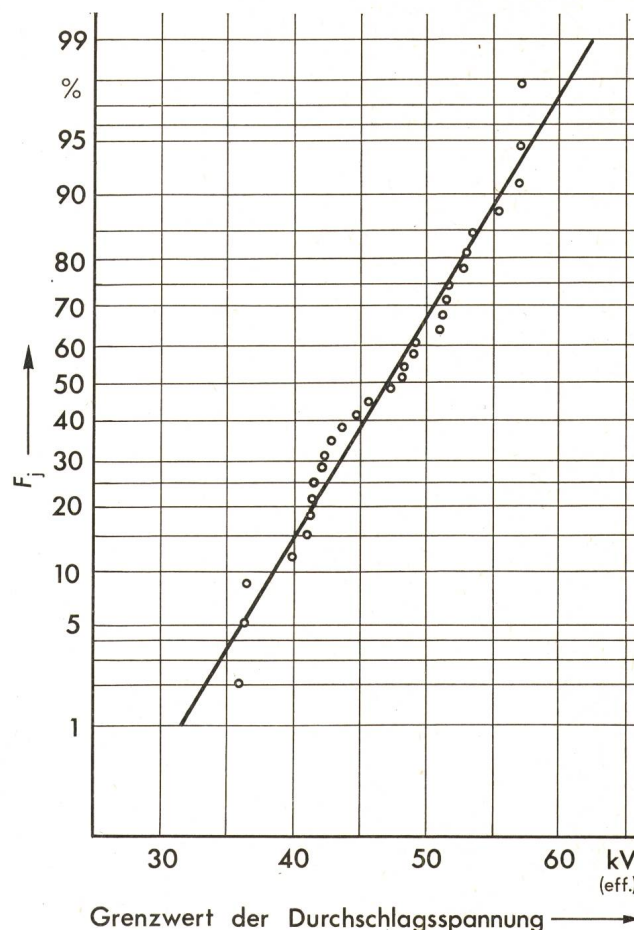


Fig. 3 Durchschlagwahrscheinlichkeit bei Wechselspannungsbeanspruchung  
 $F_j$  Summenhäufigkeit

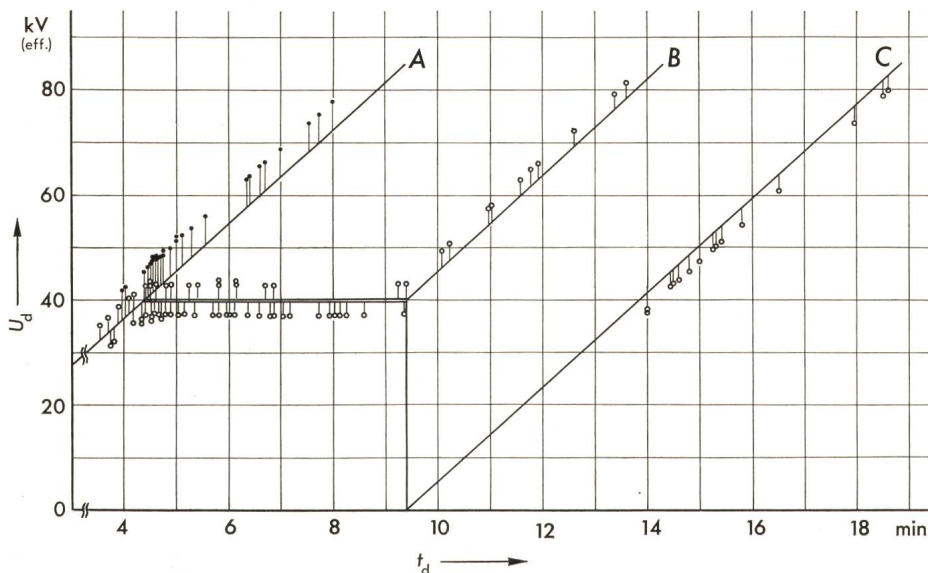
würde; denn zweifellos erfolgen bei Maximalfeldstärken von ca. 120 kV/mm nach einer noch länger dauernden Beanspruchung Langzeitdurchschläge. Eine bessere Aussage über die Bedeutung einer Spannungs-Vorbeanspruchung ist dann zu erwarten, wenn man sicher ist, dass eine Probe bis kurz vor dem Durchschlag vorbeansprucht wird. Daher wurde bei einer weiteren Versuchsreihe ein Spannungsniveau ausgewählt, das eine bestimmte Durchschlagwahrscheinlichkeit im betrachteten Beanspruchungszeitraum mit sich bringt. Diese Wahl fiel auf eine Spannung von 40 kV, was aufgrund der vorhergehenden Versuche eine Durchschlagwahrscheinlichkeit von ca. 15 % bei einer linearen Spannungssteigerung von 9,45 kV/min erwarten liess (Fig. 3).

Schon während der Steigerung bis zur Spannung von 40 kV werden somit einige Proben durchschlagen; eine weitere Probenzahl wird die Dauerbeanspruchung nicht überstehen. Der dann noch verbleibende Probenrest kann daraufhin geprüft werden, ob die Materialfestigkeit unter der Vorbeanspruchung gelitten hat.

Das Ergebnis dieser Versuchsreihen ist in Fig. 4 dargestellt. Die gewählte Abhängigkeit  $U_d = f(t_d)$  gibt die Möglichkeit, den zeitlichen Spannungsverlauf an den Proben (ausgezogene Geraden) einzuzichnen und darauf den Durchschlag sowohl hinsichtlich  $U_d$  als auch  $t_d$  zu markieren. Man erkennt, dass insgesamt drei Messreihen (A bis C) durchgeführt wurden.

**Messreihe A:** Sie stellt eine Referenzmessung bei kontinuierlicher Spannungssteigerung bis zum Durchschlag dar.





**Fig. 4**  
Einfluss der Vorbeanspruchung auf die Wechsellspannungsdurchschlagfestigkeit  
 $U_d$  Durchschlagfestigkeit  
 $t_d$  Durchschlagzeit  
A, B, C Messreihen

**Messreihe B:** Nachdem das Spannungsniveau von 40 kV erreicht war, blieb dieses fünf Minuten lang konstant. Während dieser Zeit wurden 13 von insgesamt 31 Proben durchgeschlagen. Unmittelbar anschliessend wurde die Spannung weiter gesteigert, bis alle Proben zerstört waren.

**Messreihe C:** Wie bei der Messreihe B wurde die Spannung mit 9,45 kV/min gesteigert und das konstante Spannungsniveau von 40 kV fünf Minuten lang beibehalten, wobei 28 von total 49 Proben innert der Konstantspannungsperiode durchschlugen. Bei allen noch intakten 15 Proben wurde dann aber die Spannung innerhalb weniger Sekunden auf Null reduziert und sofort anschliessend wieder mit 9,45 kV/min gesteigert. Bemerkenswerterweise hielten nun alle Proben die Spannung bis zum Wert von 40 kV aus und fielen erst bei höheren Spannungen aus.

Bei der Auswertung der Messergebnisse wurden alle Proben, die innerhalb der Konstantspannungsbeanspruchungszeit von 5 min durchschlugen, *nicht* berücksichtigt, da diese Beanspruchungsart anders ist als diejenige während der Spannungssteigerung. Die Ergebnisse sind in Tabelle IV zusammengestellt:

Versuch	N	$\bar{U}_d$ kV	s kV	95%-Vertrauensbereich um $\bar{U}_d$ kV
A	30	48,195	10,49	3,9
B	17	51,117	14,9	7,7
C	21	52,309	16,55	7,5

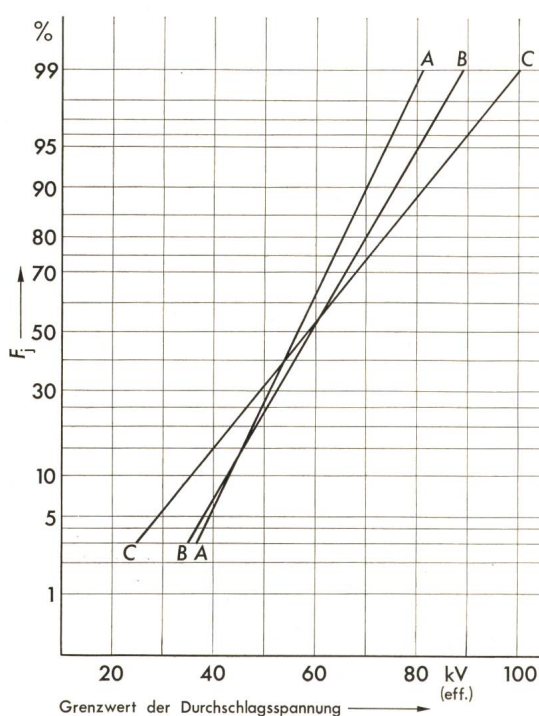
Der statistische Test für die Mittelwerte  $\bar{U}_d$  und die Varianzen  $s^2$  bei einer Sicherheitsschwelle von 0,05 ergab, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen Werten rein zufällig ist.

Wenn man bei der Messreihe A die tieferen Werte unter dem 40-kV-Niveau ausschliesst und beim Versuch B und C nur die Proben, welche die Vorbeanspruchung überstanden haben, berücksichtigt, dann erhält man die drei Durchschlagwahrscheinlichkeiten, die in Fig. 5 dargestellt sind. Beim Vergleich der Regressionskoeffizienten mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 zeigt sich, dass kein gesicherter Unterschied besteht. Daraus kann man schliessen, dass auch die Verteilung der Stichprobe A (ohne Vorbeanspruchung) mit derjenigen der Stichproben B und C identisch ist. Diese Aus-

wertung liefert in Verbindung mit den Ergebnissen von Tabelle IV den Beweis dafür, dass dieses Vorbeanspruchungsniveau unter den vorerwähnten Versuchsbedingungen keine signifikante Vorbeanspruchung oder Alterung des Materials bewirkt.

Über den Einfluss ähnlicher Vorbeanspruchungen auf die Durchschlagfestigkeit von Festisolierstoffen wurde in jüngster Zeit von Artbauer und Griač [7] sowie von Bradwell, Cooper und Varlow [8] berichtet. Da die Ergebnisse dieser Autoren scheinbar im Widerspruch zu den eigenen Messungen stehen, ist eine kurze Diskussion angebracht:

In [7] werden Versuche an PE-Terephthalaten (Foliendicke 65 bis 100  $\mu$ m) beschrieben. Das Vorbeanspruchungs-Spannungsniveau wurde dabei anstelle der Kurzzeit-Durchschlagwahrscheinlichkeit aufgrund der Langzeit-Durchschlagswahrscheinlichkeit (Lebensdauerkurve) bestimmt. Aus der Lebens-



**Fig. 5** Einfluss der Vorbeanspruchung auf die Wechsellspannungsdurchschlagwahrscheinlichkeit  
Bezeichnungen siehe Fig. 3 und im Text



dauerkurve für eine Scheitelwert-Feldstärke von 250 kV/mm bestimmte man eine Vorbeanspruchungsdauer von 100 min, die eine Durchschlagwahrscheinlichkeit von 20 % erwarten liess. Dann wurde bei der genannten Feldstärke und dieser Vorbeanspruchungszeit die Durchschlagfestigkeit für eine grössere Anzahl von Proben gemessen. Die Messergebnisse werden dann mit denjenigen einer nicht vorbeanspruchten Serie verglichen. Dabei ergibt sich eine Abnahme der Durchschlagfestigkeit infolge dieser Vorbeanspruchung, was scheinbar im Widerspruch zu den hier mitgeteilten Ergebnissen steht. Zwei Punkte sind es aber, die diesen Widerspruch entkräften:

a) Während der Vorbeanspruchungsdauer von 100 min schlugen ca. 20 % der untersuchten Proben durch. Diese Proben wurden mit in die Auswertung einbezogen, obwohl sie nicht dieselben Anfangsbedingungen besitzen wie diejenigen, welche dieser Vorbeanspruchung standhielten. Scheidet man diese Probenzahl von 20 % aus, so dürfte der Unterschied zwischen den Verteilungen der zwei Stichproben eventuell vollständig verschwinden.

b) Sofern bei der gemäss a) geänderten Auswertemethode noch ein gesicherter Unterschied der Durchschlagfestigkeitswerte verbleiben sollte, wäre es denkbar, dass das Feldstärkeniveau, bei dem die Vorbeanspruchung durchgeführt wird, noch einen gewissen Einfluss besitzt. Sicherlich lässt sich keines der Ergebnisse verallgemeinern.

Auch die in [8] veröffentlichten Versuchsergebnisse über die Stoßspannungsfestigkeit von PE-Folien mit einer Dicke von ca. 50  $\mu\text{m}$  sind in diesem Zusammenhang bemerkenswert. Die Vorbeanspruchung des Materials erfolgte hier mit Gleichspannung beiderlei Polarität. Das wesentliche Ergebnis dieser Arbeit besteht darin, dass die Gleichspannungs-Vorbeanspruchung, unabhängig von deren Polarität, keinen Einfluss auf die Stoßspannungsfestigkeit ausübt, wenn zwischen beiden Beanspruchungsarten eine spannungslose Pausenzeit von mehr als ca. 10 ms liegt.

### 3.3 Polaritätsabhängigkeit des Durchschlages bei reiner Wechsel- und Mischspannungsbeanspruchung

Bei den Wechsellspannungs-Durchschlagsmessungen wurde mit Hilfe eines Magnetband-Speichergerätes (Typ SSO1 – Grundig) der Momentanwert des Durchschlages registriert. Daraus ergab sich ausnahmslos, dass der Durchschlag immer dann erfolgt, wenn die Spannung etwa beim positiven Scheitelwert liegt; die Abweichungen vom exakten Scheitelwert liegen bei ca.  $\pm 1$  ms. Zwei Oszillogramm-Beispiele sind in Fig. 6 dargestellt. (Die wirkliche Speicherzeit des Gerätes liegt nur bei ca. 17 ms; die während ca. 3 ms andauernden Störungen in den Oszillogrammen wurden durch Umschaltvorgänge im Gerät verursacht.) Auch bei Versuchen an noch inhomogenen Elektrodenanordnungen, über die hier nicht berichtet wird, tritt der Durchschlag jeweils in der positiven Halbperiode auf. Auf diese Erscheinung wurde wohl erstmals von J.H. Mason [9] hingewiesen.

Zur weiteren Klärung dieser Polaritätsabhängigkeit wurde die 50-Hz-Wechselspannung mit einer Gleichspannung überlagert. Die Versuchsanordnung zeigt das Schaltschema in Fig. 7, das keiner näheren Erläuterung bedarf.

Die Welligkeit der Gleichspannungsquelle am Prüfobjekt, die über  $C_m$  gemessen wurde, betrug 0,7 %, während der Wechsellspannungsanteil am Glättungskondensator  $C_g$  bei ausgeschalteter Gleichspannungsquelle 1 % betrug.

Die Versuche wurden folgendermassen durchgeführt: Ein Gleichspannungsniveau von 0, 15, 30 und 45 kV beiderlei

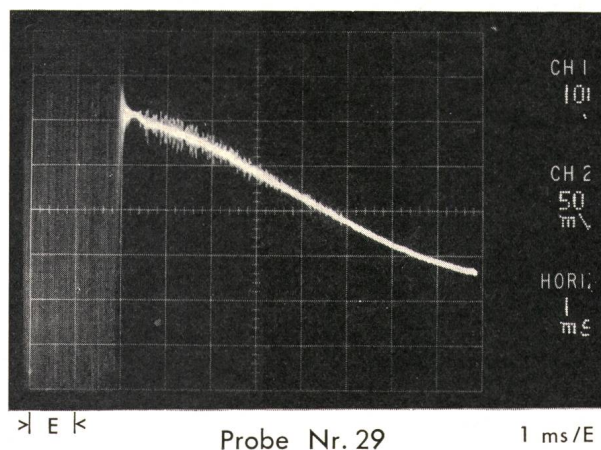
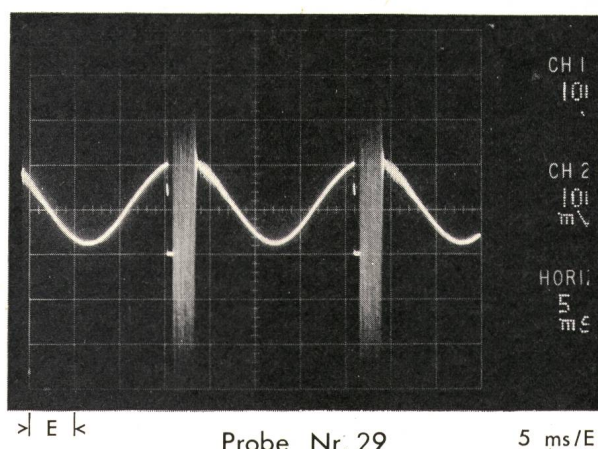
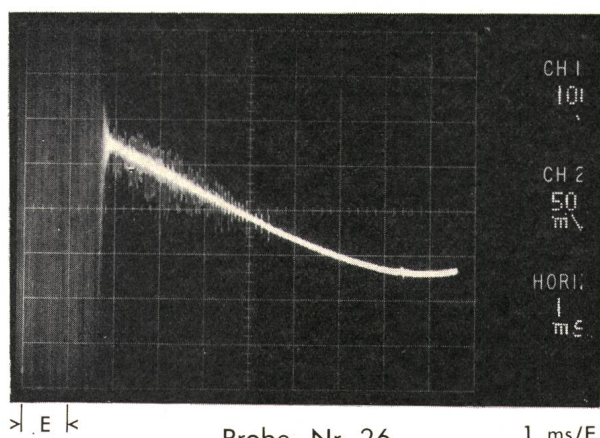
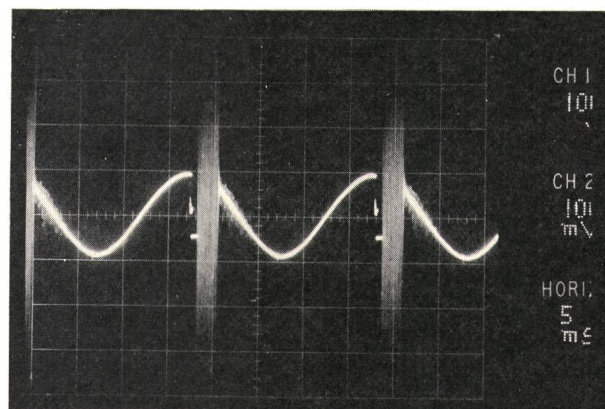


Fig. 6 Durchschlagmoment bei Wechsellspannungsbeanspruchung  
E Zeitbasiseinheit



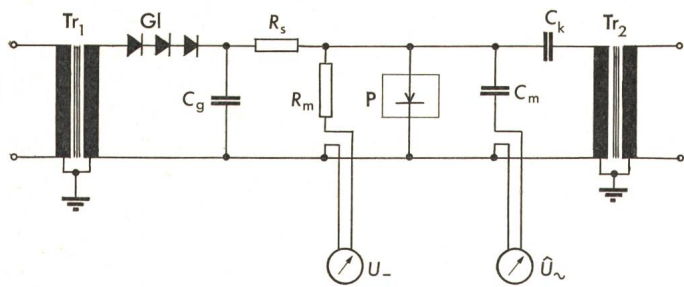


Fig. 7 Versuchsanordnung bei Gleichspannungsüberlagerung

$Tr_1$ und $Tr_2$	Hochspannungstransformatoren
$Gl$	Gleichrichter
$C_g$	Glättungskapazität (6000 pF)
$R_s$	Schutzwiderstand (50 M $\Omega$ )
$R_m$	Messwiderstand (140 M $\Omega$ )
$P$	Prüfobjekt
$C_m$	Messkapazität (100 pF)
$C_k$	Koppelungskapazität (600 pF)
$U_-$	Gleichspannungsmessgerät
$\hat{U}_{\sim}$	Wechselspannung-Scheitelwertmessgerät

Polarität wurde an die inhomogene Hochspannungselektrode der PE-Probe angelegt und anschliessend die Wechselspannung mit einer Geschwindigkeit von 8 kV/min bis zum Durchschlag gesteigert. Dabei ergab sich folgendes:

a) Bei der Überlagerung von positiver Gleichspannung mit der Wechselspannung, was zu einer Reduktion der negativen Halbwellen zugunsten der positiven führt, erfolgt der Durchschlag nach wie vor beim positiven Scheitelwert dieser Mischspannung, was zu erwarten war.

b) Überlagert man der Wechselspannung eine negative Gleichspannung, so tritt erst beim 30-kV-Gleichspannungsniveau ein Wechsel der Durchschläge von den positiven auf den negativen Spannungsscheitel ein. Bei 14 Proben erfolgte dabei der Durchschlag in der positiven, bei 16 in der negativen Polarität. Beim 45-kV-Gleichspannungsniveau erfolgt der Durchschlag ausschliesslich beim negativen Scheitel. Die Messresultate sind in Fig. 8 eingetragen, wobei durch eine Darstellung der Mittelwerte der Durchschlagsspannungen  $\hat{U}_d$  als Funktion des Gleichspannungsniveaus in den vier Quadranten eine aussagefähige Darstellung der Ergebnisse sowohl hinsichtlich der Einzelspannungskomponenten ( $\hat{U}_{\sim}$  = Scheitelwert der Wechselspannungskomponente;  $U_-$  = Gleichspannungsniveau) als auch hinsichtlich des Polaritätswechsels beim Durchschlag (siehe Verlauf von  $\hat{U}_{\sim} + U_-$ ) ermöglicht wird.

Die statistischen Tests mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 über die Messergebnisse führten zu folgenden Ergebnissen:

a) Die Unterschiede zwischen den Varianzen der sieben Messreihen sind rein zufällig; sie besitzen somit dieselbe Streuung, woraus gefolgert werden kann, dass die Gleichspannungsüberlagerung keinen Einfluss auf den fundamentalen Durchschlagmechanismus ausübt.

b) Der Maximalwert der Durchschlagsspannung  $\hat{U}_d = \hat{U}_{\sim} + U_-$  ist stark vom Anteil der überlagerten Gleichspannung abhängig. Hingegen schlägt das Material stets bei etwa derselben Höhe der Wechselspannungskomponenten durch: Überlagert man der Wechselspannung eine negative Gleichspannung, wodurch eine asymmetrische Wechselspannung mit negativem Gleichspannungsanteil entsteht, so besteht *kein* gesicherter Unterschied bezüglich der Wechselspannungsdurchschlagskomponente  $\hat{U}_{\sim}$  (siehe 4. Quadrant von Fig. 8). Wird hingegen eine positive Gleichspannung überlagert, so sinkt mit höher werdendem Gleichspannungsanteil die Durchschlagsspannung  $\hat{U}_{\sim}$  statistisch gesichert ab. Dieser Abfall ist aber sehr gering (siehe 1. Quadrant von Fig. 8).

Das überraschende Ergebnis dieser Versuchsreihe zeigt somit, dass eine zur Wechselspannungsbeanspruchung überlagerte Gleichspannung die Wechselspannungsfestigkeit praktisch nicht beeinflusst; der Durchschlag erfolgt dann, wenn der «peak to peak»-Wert eine bestimmte Höhe erreicht.

### 3.4 Die Durchschlagfestigkeit bei Keilwellenbeanspruchung

Zur weiteren Klärung der Polaritätsabhängigkeit des Durchschlages eignen sich auch kurzzeitige, unipolare Spannungsbeanspruchungen, wie sie durch Stoßspannungen dargestellt werden. Um eine eindeutige Zeitabhängigkeit zu erhalten, wurde eine Keilwellenbeanspruchung gewählt und der möglichst lineare Spannungsanstieg bezüglich der Steilheit stark variiert.

Zur Verfügung stand ein 4stufiger Stossgenerator mit einer Ladespannung von 90 kV/Stufe, was einer Summenladespannung von ca. 350 kV entspricht. Durch eine Variation des Dämpfungswiderstandes  $R_d$  und der Belastungskapazität  $C_b$  (Fig. 9) wurden vier verschiedene Frontsteilheiten erzeugt, nämlich: 600, 200, 9 und 0,65 kV/ $\mu$ s.

Die 50-%-Durchschlagfestigkeit  $U_{d 50\%}$  als Funktion der Durchschlagszeit  $t_d$  ist in Fig. 10 wiedergegeben; die Zahlenwerte der Messresultate sind in der Tabelle V zusammengefasst.

Die statistische Auswertung der Ergebnisse mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 führt zu den folgenden Feststellungen:

a) Die Varianzen der Messreihen bei positiver und negativer Polarität weisen signifikante Unterschiede auf. Die drei Stichproben bei positiver Spannungsbeanspruchung und die vier Messreihen mit negativer Spannungsbeanspruchung zeichnen sich aber dadurch aus, dass die Varianz nicht unterschiedlich ist (kleine Streuung bei negativer, grosse Streuung bei positiver Polarität).

b) Die Mittelwerte der Durchschlagsspannungen für die drei Stichproben mit positiver Spannungsbeanspruchung besitzen keinen signifikanten Unterschied; zwischen den Mittelwerten der vier Stich-

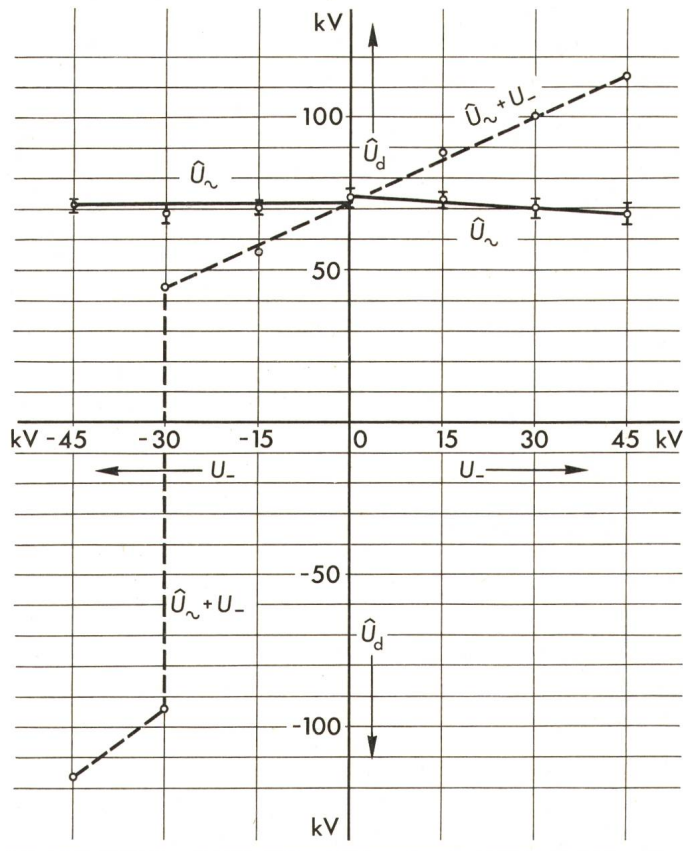


Fig. 8 Einfluss der Gleichspannungsüberlagerung auf die 50-Hz-Durchschlagfestigkeit

□ 95-%-Vertrauensgrenze

Weitere Bezeichnungen siehe im Text



Tabelle V

Polari- rität	Steilheit in kV/ $\mu$ s	600	200	9	0,65
Negativ	$\bar{U}_d$ in kV	251,891	196,863	193,03	185,28
	$N$	22	19	10	18
	$s$ in kV	8,7785	7,0821	9,307	7,9689
	95 %-Vertrauens- bereich um $\bar{U}_d$ in kV	$\pm 3,893$	$\pm 3,414$	$\pm 6,62$	$\pm 3,963$
	$t_d$ in $\mu$ s	0,3598	0,9843	21,45	285,05
Positiv	$\bar{U}_d$ in kV	146,01	155,62	158,71	
	$N$	19	19	13	
	$s$ in kV	19,9694	20,6806	20,38	
	95 %-Vertrauens- bereich um $\bar{U}_d$ in kV	$\pm 9,625$	$\pm 9,968$	$\pm 12,316$	
	$t_d$ in $\mu$ s	0,243	0,778	17,63	

proben mit negativer Spannungsbeanspruchung besteht jedoch ein statistisch gesicherter Unterschied.

Die auf Grund der statistischen Tests hier gemachten Aussagen beruhen auf einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % und können somit als sicher gelten.

Um eine genauere Übersicht für die statistische Verteilung der Messwerte zu erhalten, wurde die Durchschlagwahrscheinlichkeit bei negativer Keilwellenbeanspruchung in Fig. 11 wiedergegeben. Daraus erkennt man, dass die Durchschläge normalverteilt sind.

Die Ergebnisse dieser Messreihen lassen folgende Schlüsse zu:

a) Der Durchschlagvorgang bei einer Keilwellenbeanspruchung folgt bei positiver Polarität einem anderen Mechanismus als derjenige bei negativer Polarität, da die Streuung der Messwerte unterschiedlich ist.

b) Während die Steilheit der Keilwellen im untersuchten Zeitbereich keinen Einfluss auf die Durchschlagfestigkeit bei positiver Beanspruchung besitzt, zeigte sich ein gesicherter Einfluss bei negativer Beanspruchung.

c) Die negative Durchschlagfestigkeit liegt im untersuchten Gebiet höher als diejenige bei positiver Polarität; dieser Unterschied ist grösser (ca. 35 %) bei sehr kleinen Durchschlagzeiten ( $< 0,5 \mu$ s) und wird geringer bei zunehmender Durchschlagzeit (ca. 25 %).

Auch hier sei wiederum vergleichsweise auf einige Ergebnisse anderer Autoren hingewiesen: *Mason* [9] stellt bei Versuchen mit inhomogenen Elektrodenanordnungen an verschiedenartigen Isolierstoffen fest, dass bei einer Stoßspannungsbeanspruchung die negative Durchschlagfestigkeit etwa 25 %

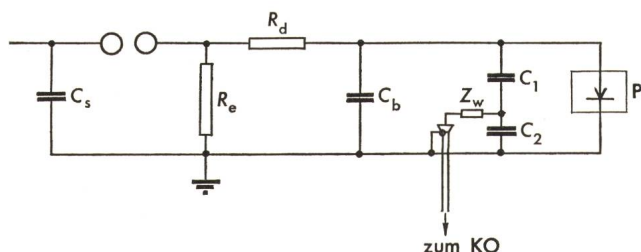


Fig. 9 Versuchsanordnung bei Keilwellenbeanspruchung

- $C_s$  Stosskapazität (750 nF)
- $R_e$  hochohmiger Entladewiderstand (ca. 1 M $\Omega$ )
- $R_d$  Dämpfungswiderstand
- $C_b$  Belastungskapazität
- $Z_w$  Wellenwiderstand
- $C_1$  Hochspannungskapazität des kapazitiven Teilers
- $C_2$  Niederspannungskapazität des kapazitiven Teilers
- $P$  Prüfbjekt

höher liegt als diejenige der positiven. *Pairitsch* [10] machte eine ähnliche Beobachtung an PE-Kabeln und Stoßspannungen der Wellenform 1 | 50  $\mu$ s. Bei negativer Polarität dieser Blitzstoßspannungen lagen die Durchschlagswerte zwischen 10 und 40 % höher als bei positiver Spannung. Auch daran ist ersichtlich, dass die hier durchgeführten Versuche einen quantitativen Vergleich zu den praktisch verwendeten PE-Isoliersystemen bei Kabeln zulassen und die physikalischen Ursachen für diese Erscheinungen offensichtlich fundamentaler Natur sind.

#### 4. Bemerkungen zur statistischen Auswertung der Messreihen

Wie aus den Einzeldaten bestimmter Messreihen ersichtlich ist, basieren alle Versuchsergebnisse auf Grosszahluntersuchungen. Jeder Messpunkt stellt das Ergebnis einer Stichprobe, bestehend aus ca. 30 PE-Proben, dar. Stets wurde die statistische Verteilung der Einzelmesswerte geprüft, wobei sich ausnahmslos eine Normalverteilung dieser Messwerte ergab. Auf dieser Voraussetzung basierten die angewandten, statistischen Tests, von denen die folgenden angewandt wurden [11...13]:

Der Vergleich der Varianzen der verschiedenen Messreihen geschah mit Hilfe des *F*-Tests für zwei Varianzen und des  $\chi^2$ -Tests von *M.S. Barlett* bei mehr als zwei Stichproben.

Die Feststellung, dass die Varianzen signifikant voneinander abweichen, lässt den Schluss zu, dass die Einflussfaktoren, welche zu einer bestimmten Eigenschaft führen, sich voneinander wesentlich unterscheiden.

Weisen Messreihen dieselbe Varianz auf, so lässt sich mittels des *t*-Testes (für zwei Mittelwerte) oder des *F*-Testes (für mehr als zwei Mittelwerte) prüfen, ob der geänderte Parameter einen signifikanten Einfluss auf den Mittelwert der Grundgesamtheit besitzt oder nicht. So erweist sich beispielsweise die leicht ansteigende Tendenz von  $U_{d 50 \%}$  bei positiver Stoßspannung von Fig. 10 als rein zufällig und als nicht signifikant, im Gegensatz zur abfallenden Tendenz bei der negativen Spannungsbeanspruchung.

Auf die Wiedergabe von Einzelergebnissen bei der statistischen Auswertung musste aus Platzgründen verzichtet werden.

#### 5. Qualitative Deutung der Messergebnisse

Die vorliegenden Versuchsergebnisse weisen einige fundamentale Abhängigkeiten und Erscheinungen auf, welche wenigstens qualitativ gedeutet werden sollen. Dabei kann man

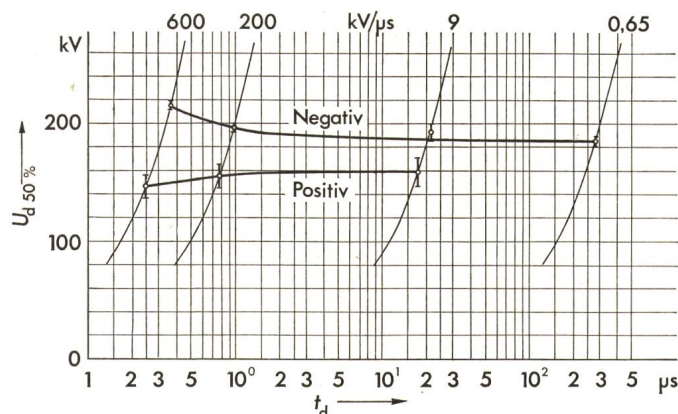


Fig. 10 50 %-Durchschlagfestigkeit  $U_{d 50 \%}$  als Funktion der Durchschlagzeit  $t_d$  bei Keilwellenbeanspruchung



sich auf Durchschlagstheorien stützen, welche von anderen Autoren bereits ausführlich behandelt wurden. Die folgenden Erscheinungen werden dabei näher erläutert:

a) Die Durchschlagfestigkeit des inhomogen beanspruchten Materials ist nicht nur bei Wechselspannungen, sondern auch bei unipolaren kurzzeitigen Spannungsbeanspruchungen polaritätsabhängig.

b) Die Durchschlagfestigkeit bei Wechselspannungsbeanspruchung liegt grundsätzlich wesentlich tiefer als die bei Gleich- oder unipolarer Stossbeanspruchung (vergleiche Fig. 2 mit Fig. 10).

c) Die Durchschlagfestigkeit bei Wechselspannungsbeanspruchung hängt von der Zeitdauer der Beanspruchung ab (siehe Fig. 2 und Fig. 4).

d) Die reine Wechselspannungsfestigkeit des Materials wird entweder nicht oder nur wenig von einer überlagerten Gleichfeldbeanspruchung beeinflusst (siehe Fig. 8).

Bevor auf die einzelnen Phänomene eingegangen wird, soll jene Modellvorstellung über den physikalischen Durchschlagsprozess wenigstens kurz angegeben werden, welche die beobachteten Erscheinungen qualitativ zu deuten gestattet.

Es kann heute als gesichert gelten, dass jedem festen Isolierstoff eine spezifische, elektrische Feldstärke («intrinsic strength») zugeordnet werden kann, bei der zumindest lokal das Material zerstört wird. Dies bedeutet, dass bei einer gegebenen Temperatur und unter der Annahme, dass in einer dünnen Schicht des reinen und nicht durch chemisch oder mechanisch bedingte Schwachstellen veränderten Materials eine lokale Feldstärke existiert, die nicht überschritten werden kann. A. von Hippel [15] sowie H. Fröhlich [16] haben wohl als erste gezeigt, dass diese kritische Feldstärke einen engen Zusammenhang mit dem chemisch-physikalischen Aufbau der Stoffe besitzt, und dass es vor allem bei reinem, kristallinem Aufbau dieser Stoffe möglich ist, quantitative Zusammenhänge zwischen der Durchschlagfestigkeit und den quantenmecha-

nischen Mechanismen im Kristall herzustellen. Derartige Zusammenhänge existieren heute bei den komplex aufgebauten Stoffen wie PE noch nicht; dafür sei lediglich die Existenz einer «intrinsic strength» als fundamentales Phänomen vorausgesetzt, wobei es gleichgültig bleibt, ob der physikalische Effekt, der schliesslich zur lokalen Zerstörung des Materials führt, auf einer durch Lawinenprozesse instabilen Elektronenleitung, auf elektromechanische Feldkräfte [20] oder auf eine thermische Instabilität zurückzuführen ist. Der experimentelle Nachweis, dass diese spezifische elektrische Feldstärke in sehr dünnen Schichten unabhängig von einer Gleich- oder Wechselspannungsbeanspruchung ist, gelang in jüngster Zeit [17].

Weiterhin besteht heute kein Zweifel darüber, dass der Leitungsmechanismus in Isolatoren der betrachteten Art im wesentlichen auf einer Elektronenleitung beruht. Dabei wird in Übereinstimmung mit den Arbeiten von H. Fröhlich [18] davon ausgegangen, dass sowohl durch Störungen (Fremdstoffe, Gitterstörungen etc.) bedingte freie Elektronen bei Raumtemperatur vorhanden sind als auch eine nicht unerhebliche Anzahl von Haftstellen existieren, welche sich bei hohen Feldstärken um so mehr an der Stromleitung beteiligen, je höher die Temperatur ist. Diese Haftstellen sind zweifellos die Ursache dafür, dass sich vor allem im inhomogenen, elektrischen Grundfeld (hervorgerufen durch den Feldstärkeverlauf der Elektroden am Isolierstoff) negative Raumladungen aufbauen können, da ein gehaftetes Elektron einer grösseren Energiezufuhr bedarf, um es aus der Haftstelle befreien zu können.

Schliesslich besitzen praktisch alle Isolierstoffe die Eigenschaft einer sehr stark von der Feldstärke abhängigen, nicht-linearen Leitfähigkeit (Pool-Frenkel-Effekt) [21]. Diese Nichtlinearität setzt bei PE bereits bei Feldstärken von 5...10 kV/mm ein, also weit unterhalb der hier zur Diskussion stehenden Durchschlagfeldstärken. In Verbindung mit den sicherlich nicht homogen im Isolierstoff verteilten Haftstellen resultierten daraus Nachladungserscheinungen, die auch beim PE ausgeprägt in Erscheinung treten.

Mit Hilfe dieser hier angedeuteten Effekte lassen sich die eingangs zusammengestellten Erscheinungen qualitativ erläutern.

Zu a): Der Fig. 10 ist zu entnehmen, dass bereits bei einer sehr kurzzeitigen, unipolaren Spannungsbeanspruchung die negative Durchschlagfestigkeit höher liegt als diejenige mit positiver Polarität. Die von der Beanspruchungszeit unabhängige positive Festigkeit ist aber leicht aus der «intrinsic strength» zu erklären, beträgt doch die mittlere Maximalfeldstärke an der Anode ohne Berücksichtigung von Raumladungen im Isolierstoff bereits 6...6,5 MV/cm, was sich mit aus der Literatur bekannten Werten (z.B. [19], S. 17) völlig deckt.

Da die hohe Feldstärke hier nur an der Anode auftritt und somit eine Ladungsträgerinjektion (Elektronenemission) über die Elektroden in das Material kaum stattfinden kann, kann angenommen werden, dass einzig die im Isolierstoff vorhandenen Elektronen den Durchschlag einleiten. Dabei werden sich zunächst nur die sich in unmittelbarer Nähe der Anode befindlichen Elektronen am Zerstörungsprozess beteiligen, der vermutlich in der Art abläuft, dass sich durch Stossionisationsprozesse aus neutralen Molekül- und Atomverbänden weitere Elektronen abspalten, die von der Anode sehr schnell abgesaugt werden. Die zurückbleibenden positiven Raumladungskanäle erhöhen die Feldstärke zur Kathode hin sehr stark und bringen auch die restliche Isolierstrecke sehr schnell zum Durchschlag.

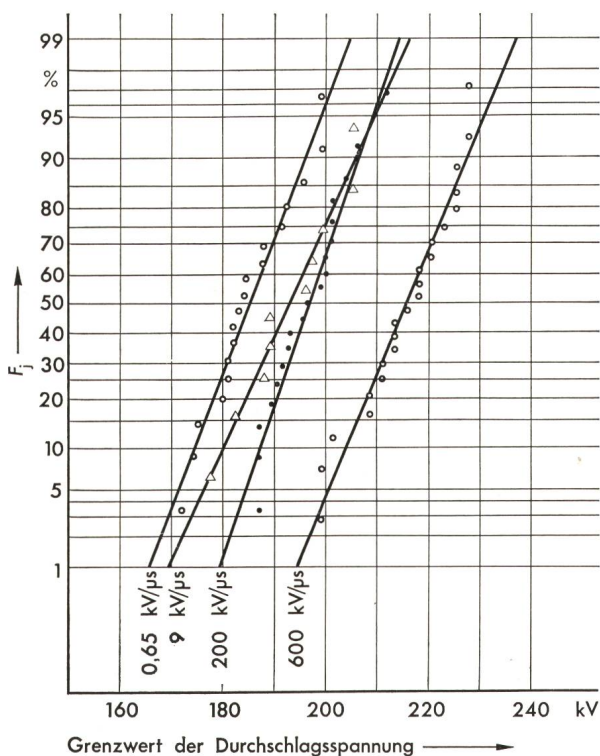


Fig. 11 Durchschlagswahrscheinlichkeit bei negativer Keilwellenbeanspruchung  
 $F_j$  Summenhäufigkeit



Bei negativer Polarität der inhomogenen Elektrode tritt an der Kathode eine hohe Feldstärke auf und man stellt eine höhere Durchschlagspannung fest, welche bei Vernachlässigung der Raumladungen eine mittlere Feldstärke von ca. 7,5 MV/cm an der Kathode (bei ca. 1 kV/μs Spannungssteilheit) erreicht; die Durchschlagfeldstärke wird zudem noch grösser, je kurzzeitiger die Beanspruchung ist (ca. 8,5 MV/cm bei 600 kV/μs Spannungssteilheit). Dieser Polaritätseffekt ist nur verständlich, wenn man Raumladungsbildungen im Isolierstoff annimmt, da die «intrinsic strength» polaritätsunabhängig ist. Zwei Effekte mögen für diese Raumladungsbildung verantwortlich sein: Die Feldemission von Elektronen aus der Kathode und die feldstärkeabhängige, nichtlineare (Elektronen-) Leitfähigkeit im Isolierstoff. Verstärkt durch die Mikrostruktur der Kathode ist mit Sicherheit eine nicht mehr vernachlässigbare Elektronenemission aus den Kontaktflächen an der Kathode wirksam, der Injektions-Elektronenstrom führt zu einer negativen Raumladung vor der Kathode, deren Eindringtiefe zudem zeitabhängig ist. In etwas grösserer Entfernung von der Kathode dürften zudem Elektronen in Haftstellen eingefangen werden und ihre Beweglichkeit weitgehend verlieren. Auch ohne Elektronen-Injektion können sich im feldschwächeren Gebiet vor der Kathode negative Raumladungen aufbauen, da die nichtlineare Leitfähigkeit an den Orten grösster Feldstärke zu einer Ladungsträgerverarmung führt. Da nur freie oder aus Haftstellen befreite Elektronen zur Stromleitung beitragen dürften, wandern die Elektronen aus dem Gebiet höchster Feldstärke in Gebiete schwächerer Feldstärke und schwächen damit das Feld unmittelbar vor der Kathode. Schätzt man die Wege ab, welche die Elektronen in den hier betrachteten Zeitbereichen zurücklegen können, so erhält man bei Elektronenbeweglichkeiten von  $10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , die auch andernorts bei PE bereits gemessen wurden, durchaus zeitliche Abhängigkeiten, die mit den gemessenen übereinstimmen.

Zu b): Ganz offensichtlich liegt die Wechsellspannungsfestigkeit der unter gleichen Bedingungen hergestellten PE-Proben wesentlich tiefer als die bei einer kurzzeitigen, unipolaren Beanspruchung. Auch bei einer sehr schnellen Spannungssteigerung (siehe Fig. 2) liegt der Scheitelwert der mittleren Durchschlagspannung nicht höher als ca. 85 kV, was einer Maximalfeldstärke von ca. 3,4 MV/cm entsprechen würde und damit nur etwa dem halben Wert der Durchschlagfestigkeit bei der oben diskutierten Beanspruchungsart entspricht. Doch auch hier wird sicher der Durchschlag des Materials erst dann eingeleitet, wenn die «intrinsic strength» erreicht wird.

Die Ursache für diese Erscheinung dürfte wiederum im Aufbau einer negativen Raumladung vor der gekrümmten Elektrode zu suchen sein. Jede positive Halbwelle absorbiert aus dem elektrodennahen Bereich des Isolierstoffes Elektronen. Diese Zone der Elektronenverarmung ist mit Sicherheit nicht gross und dürfte sich in einer Schichtdicke von 10...100 μm bewegen. Jede negative Halbwelle aber befördert die im Material befindlichen freien und Haftenektoren noch tiefer in den Isolierstoff; eine schwache Feldemission von der Kathode könnte die entstehende negative Raumladung noch verstärken. Während nun bei der negativen Halbwelle die resultierende Feldstärke an der gekrümmten Elektrode klein bleibt, wird diese bei der positiven Halbwelle stark erhöht, so dass die «intrinsic strength» erreicht werden kann. Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass praktisch jeder Durchschlag dann

entsteht, wenn etwa der Maximalwert der positiven Spannung erreicht wird.

Zu c): Da dieser starke Raumladungsaufbau durch den ständigen Wechsel der Polarität Zeit in Anspruch nimmt, ist es verständlich, dass die Durchschlagfestigkeit um so niedriger wird, je langsamer die Spannungshöhe bis zum Durchschlag hochgeregt wird. Mit Sicherheit wird der Effekt der Erniedrigung der Durchschlagspannung durch Raumladungsbildung bei längerer zeitlicher Beanspruchung durch weitere, vorwiegend chemische Materialveränderungen abgelöst. Inwieweit dieser Übergang zur «Alterung» des Isolierstoffes bei den hier betrachteten Untersuchungen bereits wirksam wurde, kann nicht angegeben werden. Die Ergebnisse von Fig. 4 lassen jedoch den Schluss zu, dass es sich im «Minutenbereich» noch um raumladungsbedingte Durchschläge handelt.

Zu d): Auch die erstaunlichen Ergebnisse von Fig. 8 lassen sich nur durch Raumladungsphänomene erklären. Im wesentlichen ergeben die Versuchsergebnisse, dass die Wechsellspannungskomponente bei dieser Überlagerung mit Gleichspannungen den Durchschlag einleitet.

Bei einer negativen Gleichspannungskomponente tritt der Durchschlag zunächst keineswegs durch die nun wesentlich höheren negativen Spannungsamplituden ein. Offensichtlich wird der Aufbau der negativen Raumladung im Isolierstoff dadurch so verstärkt, dass die Feldstärken vor der Kathode wiederum genügend stark abgesenkt werden. Der Durchschlag tritt bei einem um so niedrigeren positiven Potential an der inhomogenen Elektrode ein. Wechselt der Durchschlagsmoment aber bei sehr hoher Gleichspannungsüberlagerung zur negativen Halbwelle, so könnte bereits die «intrinsic strength» im Gebiet zwischen der negativen Raumladung und der Plattelektrode überschritten worden sein.

Bei der positiven Gleichspannungsüberlagerung ist eine statistisch gesicherte, aber sehr kleine Abnahme der Materialfestigkeit – bezogen auf die Wechsellspannungskomponente – feststellbar. Die ohne Raumladungen betrachteten Maximalfeldstärken beim Durchschlag nehmen aber trotzdem stark zu. Offensichtlich wird die negative Raumladung im PE nun stark abgebaut, da die Elektronen von der inhomogenen Anode aufgenommen werden können. Auch wenn bei den vorliegenden Untersuchungen die Gleichspannungskomponente nicht noch weiter gesteigert werden konnte, da die Proben überschlugen, lässt sich annehmen, dass schliesslich positive  $\bar{U}_d$ -Werte erreicht werden könnten, die der reinen Gleichspannungsfestigkeit bei positiver Polarität entsprächen.

Die Autoren danken der BASF AG, Ludwigshafen (BRD), für die kostenlose Bereitstellung der untersuchten Materialien.

#### Literatur

- [1] F. Feichtmayr und F. Würstlin: Neue Messmethode zum Nachweis der Spannungsstabilisierung von Polyäthylen. *Kunststoffe* 58(1968)10, S. 713...717.
- [2] F.-J. Feichtmayr und F. Würstlin: Die elektrische Zeitstandfestigkeit von Polyäthylen. *ETZ-B* 21(1969)6, S. 128...130.
- [3] H. J. Mair und W. Zaengl: Die elektrische Festigkeit von Polyäthylen und Polystyrol. *ETZ-A* 90(1969)7, S. 147...152.
- [4] F. Feichtmayr und F. Würstlin: Die Spannungsstabilisierung von Hochdruck-Polyäthylen. *Kunststoffe* 60(1970)6, S. 381...385.
- [5] H. Steinbigler: Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren rotations-symmetrischer Elektrodenanordnung in Luft. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1969.
- [6] O. Marček, J. Griač und K. Vida: Untersuchung der Ursachen der bimodalen Verteilung der Logarithmen der Durchschlagzeiten von spannungsstabilisiertem Polyäthylen. *ETZ-A* 94(1973)2, S. 95...96.
- [7] J. Artbauer und J. Griač: Some factors preventing the attainment of intrinsic electric strength in polymeric insulations. *Trans. IEEE EI* 5(1970)4, p. 104...112.



- [8] A. Bradwell, R. Cooper and B. Varlow: Conduction in polythene with strong electric fields and the effect of prestressing on the electric strength. Proc. IEE 118(1971)1, p. 247...254.
- [9] J. H. Mason: Breakdown of solid dielectrics in divergent fields. Proc. IEE Part C Monographs 102(1955), p. 254...263.
- [10] H. Pairitsch: Über die Eignung von Polyäthylen als Isolierung von Hochspannungskabeln. F & G Rdsch. -(1956)41, S. 16...23.
- [11] L. Sachs: Statistische Auswertungsmethoden. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1972.
- [12] A. Linder: Statistische Methoden. 4. Auflage. Basel, Birkhäuser-Verlag, 1964.
- [13] A. Linder: Planen und Auswerten von Versuchen. 2. Auflage. Basel, Birkhäuser-Verlag, 1959.
- [14] H. Krauss: Bestimmung der elektrischen Feldstärke an rotationssymmetrischen Gebilden mittels Widerstandspapiermethode. Bull. SEV 64(1973)11, S. 721...725.
- [15a] A. v. Hippel: Der Mechanismus des «elektrischen» Durchschlages in festen Isolatoren. I. Z. Physik 67(1930)11/12, S. 707...724.
- [15b] A. v. Hippel: Der Mechanismus des «elektrischen» Durchschlages in festen Isolatoren. II. Z. Physik 68(1931)5/6, S. 309...324.
- [15c] A. v. Hippel: Elektrische Festigkeit und Kristallbau. (Der Mechanismus des elektrischen Durchschlages in festen Isolatoren III.) Z. Physik 75(1932)3/4, S. 145...170.
- [16] H. Fröhlich: Dielectric breakdown in solid. Reports on Progress in Physics 6(1939), p. 411...430.
- [17] B. Andress, P. Fischer und P. Röhl: Bestimmung der elektrischen Festigkeit von Kunststoffen. ETZ-A 94(1973)9, S. 553...556.
- [18] H. Fröhlich: On the theory of dielectric breakdown in solids. Proc. Roy. Soc. A 188(1947)1015, p. 521...532.
- [19] J. H. Mason: Dielectric breakdown in solid insulation. Progress in Dielectrics 1(1959), p. 1...58.
- [20] K. H. Stark and C. G. Garton: Electric strength of irradiated polythene. Nature 176(1955)4495, p. 1225...1226.
- [21] G. Stetter: Die elektrische Leitfähigkeit von Hochpolymeren, insbesondere von Polyäthylen, bei hohen Feldstärken. Kolloid Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere 215(1967)2, S. 112...127.

#### Adressen der Autoren:

Dr. S. Guindehi und Prof. Dr. W. Zaengl, Eidg. Technische Hochschule, Laboratorium für Hochspannungstechnik, Physikstrasse 3, 8044 Zürich.

## Heinrich Schuh 1873–1955



Aus Familienbesitz

Jedermann kennt die Sprecher & Schuh AG in Aarau, aber nur wenige werden den Mitbegründer Heinrich Schuh gekannt haben. Sein Vater war aus Süddeutschland zugezogen und hatte nach der Heirat mit einer Oberländerin das Bürgerrecht von Iseltwald erworben. Heinrich Schuh wurde am 18. September 1873 in Interlaken geboren. Nach dem Besuch des Gymnasiums in Burgdorf durchlief er das Technikum Winterthur und arbeitete zunächst in Oerlikon und Basel. Darauf nahm er eine Stelle an bei der Firma Dr. Paul Meyer in Berlin. Mit 23 Jahren heiratete er. Der 58 Jahre währenden Ehe entsprossen 2 Söhne und eine Tochter.

Im Jahre 1900 kehrte Schuh in die Schweiz zurück, um bei der Elektrizitätsgesellschaft Alioth in Basel den Chefposten der Apparateabteilung zu übernehmen. Zwei Jahre später holte ihn Carl Sprecher als Teilhaber in seine Aarauer Firma, die bei diesem Anlass den Namen Sprecher, Fretz & Co. annahm. Schon 1903 trat Fretz aus und seither heisst das Unternehmen Sprecher & Schuh AG bis auf den heutigen Tag.

Schuh hatte bald erkannt, dass das gute Funktionieren von Einrichtungen für elektrische Anlagen nicht nur allein von der Qualität der Maschinen abhing, sondern ebenso sehr von der Güte der Zubehöerteile wie Schalter und dgl. Ihm, dem geborenen Konstrukteur, der dazu einen ausgeprägten Formensinn besass, kommt das Verdienst zu, aus den noch etwas unbeholfenen Geräten funktionstüchtige und zudem gefällige Schaltapparate gemacht zu haben. Dass er stets auch auf die Anregungen und Vorschläge seiner Meister und Arbeiter einging, spricht für ihn.

Die Umsätze stiegen, und Schuh stellte sich ein weiteres Problem: er musste die handwerkliche Einzelanfertigung auf Serienfabrikation umstellen.

Neben der anspruchsvollen geschäftlichen Tätigkeit fand Heinrich Schuh Entspannung beim Reiten, auf Bergwanderungen und beim Basteln. Er fertigte nicht nur Spielsachen für seine Kinder an, sondern baute selbst ein Gärtnerhaus mit einem Stall für 2 Pferde.

1914 zog sich Sprecher von der Geschäftsleitung zurück, diese ganz Heinrich Schuh überlassend. Er hatte den Betrieb während des ganzen ersten Weltkrieges durchzuhalten.

Diese übergrosse Anspannung bewog ihn, sich zum Leidwesen der übrigen Firmainhaber im Jahre 1919 aus dem Geschäft, zu dessen Aufbau zur Grossfirma er massgeblich beigetragen hatte, zurückzuziehen. Er beabsichtigte, sich eine längere Ruhepause zu gönnen und zog mit seiner Familie wieder nach Interlaken ins väterliche Haus. Nun fand er Zeit für die Berge, den Garten und gute Literatur. Aus Interesse an Optik und Photographie arbeitete er eine Zeitlang in dieser Branche. Später beteiligte er sich an einer kleinern Maschinenfabrik, musste aber Enttäuschungen erleben.

Anfangs der vierziger Jahre, als das Haus in Interlaken zu gross geworden war, siedelte er mit seiner Frau zu einem der Söhne – denen beiden er ermöglicht hatte, künstlerisch tätig zu sein, was ihm selber trotz Neigung nicht vergönnt gewesen war – nach Küsnacht (ZH). Dort lebte er in grosser Zurückgezogenheit bis zu seinem Tode am 5. Mai 1955.

H. Wüger