

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Durchbruchspannung in Luft bei verschiedenen Spannungsarten und Elektrodenformen

Von S. Guindehi, Zürich

621.3.015.5:537.523:621.319.51

An verschiedenen Funkenstrecken wird der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Durchbruchspannung in Luft bei 50-Hz-Wechselspannung, sowie beim positiven und negativen $1,2|55$ - μ s-Stoss untersucht. Die grösste untersuchte Schlagweite beträgt 600 mm. Um den Einfluss von Vorentladungen sowie jenen der Zeitspanne zwischen Anfangs- und Durchbruchspannung bei verschiedenen Feuchtigkeiten festzustellen, wurden weitere Versuche in einer zylindrischen Reuse durchgeführt. Dabei wurden an zwei Elektroden, nämlich einem Leiter von 1 mm und einem Rohr von 20 mm Durchmesser, Keilwellenspannungen verschiedener Steilheit angelegt. Der 1-mm-Leiter wies eine Glimmeinsatzspannung von 14,6 kV auf und das 20-mm-Rohr eine solche von 128 kV (Scheitelwert). Aus den Versuchsergebnissen wurde für die verschiedenen Fälle der Korrekturfaktor k_0 nach der Definition der CEI berechnet und mit den k -Werten der CEI-Publikation 60(1962) verglichen.

L'influence de l'humidité de l'air sur la tension d'amorçage de diverses éclateurs dans l'atmosphère est recherchée pour des tensions alternatives de 50 Hz, de même que pour des tensions de choc positives et négatives de $1,2|55$ μ s. La distance maximale d'éclatement recherchée est de 600 mm. Pour constater l'influence des décharges préliminaires et de l'intervalle de temps entre la tension initiale d'effluves et l'amorçage propre, en vue de l'influence de l'humidité sur la tension d'amorçage, il a été procédé à des essais au moyen d'un éclateur cylindrique. Un fil de 1 mm, et un tube de 20 mm de diamètre ont été comparés sous des tensions à front linéaire. Pour le fil au diamètre de 1 mm la tension initiale d'effluves se situe à 14,6 kV, pour le tube de 20 mm de diamètre à 128 kV (valeur de crête). D'après les résultats obtenus lors des essais, on a calculé pour des divers cas les facteurs de correction k_0 selon la définition de la CEI; ces valeurs sont comparées avec ce que la CEI a donné dans sa Publication 60(1962).

1. Einleitung und bisherige Messungen

Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit ist ein wichtiger Faktor in der Koordination der Isolation. Trotz der grossen Zahl von Publikationen älteren und neueren Datums herrscht hier noch nicht die gewünschte Klarheit.

Die verschiedenen Autoren, mit Ausnahme des Japaners Y. Ishiguro und des Deutschen E. Peschke, kommen zum Schluss, dass sich bei negativem Stoss kein wesentlicher Einfluss der Feuchtigkeit bemerkbar macht.

Ishiguro zeigte, dass die 50-%-Stoss-Durchbruchspannung für negative Spitze gegen Platte bei Schlagweiten von 5...30 cm mit zunehmender Feuchtigkeit abnimmt, während sie bei Stab—Stab-Anordnung für Schlagweiten zwischen 16,5 und 43 cm eine leichte Zunahme aufweist.

E. Peschke hatte in seinen Versuchen mit Gleichspannung festgestellt, dass für Stab—Platten-Funkenstrecken mit negativer Spitze und Schlagweiten von 10...40 cm kein Einfluss der Feuchtigkeit auf die Durchbruchspannung festzustellen war, während bei Stab—Stab-Funkenstrecken mit Schlagweiten von 20...80 cm eine Zunahme der Durchbruchspannung mit steigender Feuchtigkeit erfolgt.

Alle Arbeiten, die sich mit dem Feuchtigkeitseinfluss auf die Durchbruchspannung befassen, mit Ausnahme derjenigen von Peschke, gelten für Schlagweiten bis 430 mm. E. Peschke untersuchte Schlagweiten bis 800 mm.

In allen diesen Arbeiten wurde festgestellt, dass der Feuchtigkeitseinfluss auf die Durchbruchspannung mit grösser wer-

den Schlagweiten (Schlagweite \leq 800 mm) zunimmt,

Anfangs 1969 veröffentlichten J. Kučera und V. Fiklik eine Arbeit, in welcher grössere Schlagweiten untersucht wurden. Es handelte sich dabei um Versuche mit Schaltspannungen an Stab—Stab- und Stab—Platte-Funkenstrecken von je 1,5 bzw. 3,0 m Schlagweite. Zwei Schaltspannungsformen, nämlich $200|3200$ μ s und $450|4300$ μ s, wurden angewendet. Die Autoren stellten folgendes fest:

- Die Korrektur für 3,0 m Schlagweite ist kleiner als diejenige bei 1,5 m, d. h. die Korrektur nimmt mit zunehmender Schlagweite ab (Schlagweite $>$ 1,5 m).
- Die Stab—Platte-Funkenstrecke mit negativem Stab zeigt keine wesentliche Beeinflussung durch die Feuchtigkeit. Für

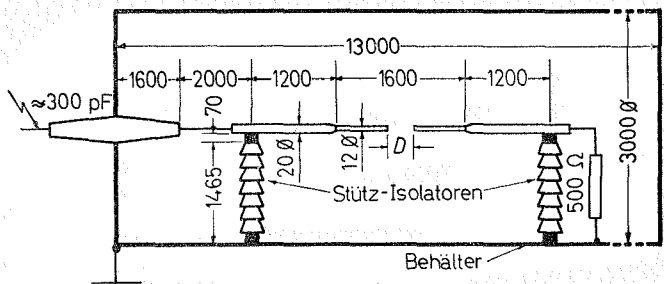


Fig. 1
Prüfanordnung für die 50-Hz- und für die Stoss-Versuche von $1,2|55,5$ μ s
D Schlagweite
Masse in mm

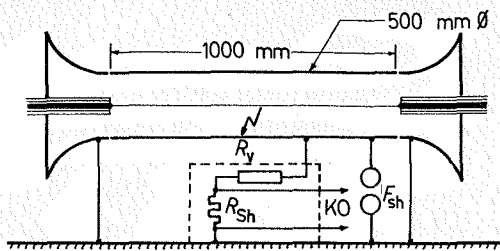


Fig. 2
Prüfanordnung für die Keilwellen-Versuche (R_v und R_{Sh} dienen der Messung des Vorentladungsstromes)
 R_v induktionsarmer Vorwiderstand; R_{Sh} Cumal-Röhrenshunt;
 F_{Sh} Sicherheitsfunkenstrecke von 62,5 mm Durchmesser

Stab—Stab war die Beeinflussung bei negativem Stoss an der Spannungselektrode geringer als diejenige bei positivem.

Diese einleitenden Betrachtungen lassen weitere Untersuchungen über den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Durchbruchspannung in Luft, unter Berücksichtigung der Spannungsform als Parameter, als wünschenswert erscheinen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin:

- Abzuklären, wo und in welchem Masse sich eine Korrektur als notwendig erweist;
- Die Korrekturkurve, die im Jahre 1962 von der CEI (Commission Electrotechnique Internationale) veröffentlicht wurde, zu verifizieren und ihre Gültigkeit zu belegen.

Zu diesem Zweck sind drei Spannungsarten verwendet worden:

- 50-Hz-Wechselspannung;
- Positiver und negativer Stoss 1,2|55 μ s;
- Positive Keilwellenspannung mit Steilheiten von 15, 28, 40 und 80 kV/ μ s.

2. Versuchseinrichtung

Für die 50-Hz-Wechselspannungs- und die Stoßspannungs-Versuche von 1,2|55 μ s stand der Korona-Behälter der FKH-Versuchsstation in Däniken zur Verfügung¹⁾. Dieser Behälter hat einen Durchmesser von 3 m und eine Länge von ca. 13 m. Er besitzt auch eine Klima-Anlage. Diese erlaubt sowohl die Raumtemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit zu regulieren. Die Versuchsserien begannen in der Regel bei völlig trockener Luft, worauf dann die Feuchtigkeit schrittweise erhöht wurde. Zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit diente ein Wasserzerstäuber. Zwei Stäbe mit den Ver-

¹⁾ FKH = Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen.

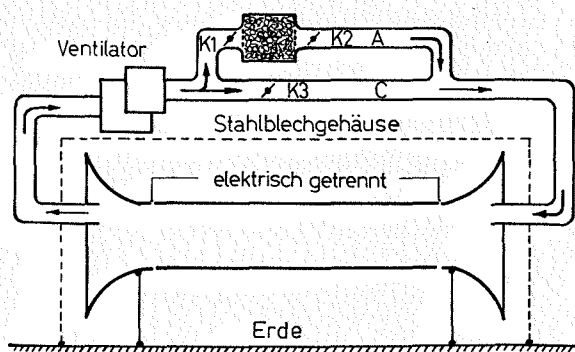


Fig. 3
Schematische Darstellung des Befeuchtungsprinzips bei den Keilwellen-Versuchen

suchselektroden wurden im Behälter gemäss Fig. 1 montiert. Für die Keilwellen-Versuche wurde eine zylindrische Reuse aus bromatisiertem Stahl von 1 m Länge und 500 mm Innendurchmesser, die das Prüfobjekt koaxial umgibt, benutzt (Fig. 2). Diese Keilwellen-Versuche wurden im Hochspannungslaboratorium der ETH durchgeführt.

Die Befeuchtung und Trocknung der Luft innerhalb der Reuse ist in Fig. 3 schematisch dargestellt. Im Behälter B befindet sich entweder $(SiO_2)_m$ — kommerziell unter dem Namen «Silica-Gel-Blau» bekannt — oder aber ein feuchter Schwamm, um die Luft zu trocknen bzw. zu befeuchten, je nachdem, wie es die Versuchsbedingungen verlangen. Alle Messungen wurden bei einer Temperatur von 19...21,3 °C durchgeführt. Der Druck schwankte zwischen 710 und 744 mm Hg. Die Messresultate wurden nachträglich auf die Normalbedingungen, 760 mm Hg und 20 °C, reduziert.

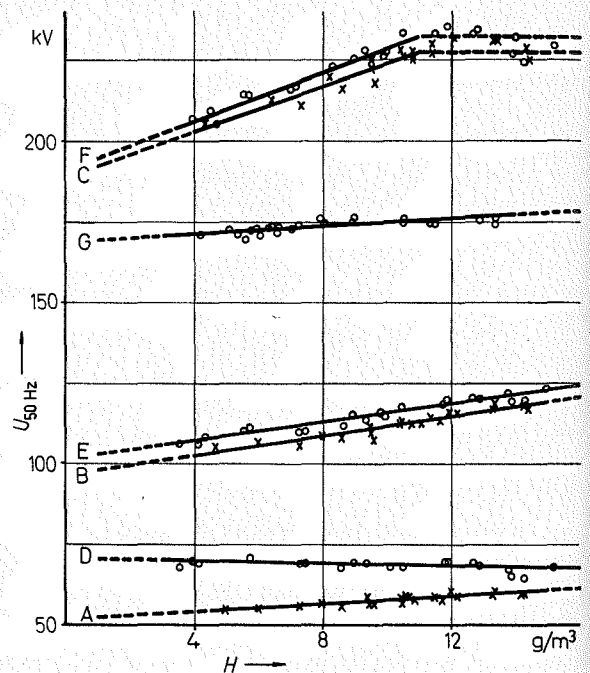


Fig. 4
Abhängigkeit der 50-Hz-Durchbruchspannung $U_{50 \text{ Hz}}$ von der Feuchtigkeit H

- A Spitze—Spitze, Schlagweite 150 mm
- B Spitze—Spitze, Schlagweite 300 mm
- C Spitze—Spitze, Schlagweite 600 mm
- D Stab—Stab, Schlagweite 150 mm
- E Stab—Stab, Schlagweite 300 mm
- F Stab—Stab, Schlagweite 600 mm
- G Kugel, 250 mm ϕ , Schlagweite 100 mm
- o x Messpunkte

3. Prüfobjekte

- Für 50-Hz-Wechselspannung
 - 12-mm-Stab—Stab-Funkenstrecke mit je einer Halbkugelelektrode von 12 mm Durchmesser (Stab—Stab genannt) mit Schlagweiten von 150, 300 und 600 mm.
 - 12-mm-Stab—Stab-Funkenstrecke mit kegelförmigen Elektroden, 30° Öffnungswinkel und einer Abrundung von 1 mm Durchmesser (Spitze—Spitze genannt) mit Schlagweiten von 150, 300 und 600 mm.
 - Kugelfunkenstrecke mit Kugeln von 250 mm Durchmesser und einer Schlagweite von 100 mm.

Anordnung	Schlagweite <i>D</i> mm	Anzahl Messungen	Bestimmtheits- mass <i>B</i>	Korrelations- Koeffizient <i>r</i>	Standart- Abweichung <i>s</i> kV	Korrektur <i>K</i> kV/g/m ³	50-Hz-Durchbruchspannung	
							<i>U</i> bei <i>H</i> = 0 g/m ³ kV	<i>U</i> bei <i>H</i> = 11 g/m ³ kV
Stab—Stab	150	420	0,287	-0,536	1,25	-0,216	71,0	68,7
	300	420	0,945	0,972	1,279	1,457	101,3	117,3
	600	420	0,969	0,985	1,788	3,712	190,8	232,0
Spitze—Spitze	150	420	0,799	0,894	0,8	0,622	51,5	58,34
	300	420	0,891	0,944	1,401	1,528	96,2	113,0
	600	420	0,919	0,959	2,238	3,499	188,5	226,99
Kugel von 250 mm ϕ	100	500	0,58	0,759	1,295	0,576	168,4	175,0

- b) Für positiven und negativen Stoss 1,2|55 μ s
- ba) 12-mm-Stab—Stab-Funkenstrecke mit je einer 12 mm Halbkugelelektrodenform und Schlagweiten von 150, 300 und 600 mm.
- bb) Kugelfunkenstrecke mit Kugeln von 250 mm Durchmesser und einer Schlagweite von 100 mm.
- c) Für positive Keilwellenspannung (15, 28, 40 und 80 kV/ μ s)
- ca) Koaxialanordnung, bestehend aus einem äusseren Zylinder von 500 mm Innendurchmesser und einem zentralen Zylinder von 1 mm Durchmesser.
- cb) Koaxialanordnung, bestehend aus einem äusseren Zylinder von 500 mm Innendurchmesser und einem zentralen Zylinder von 20 mm Durchmesser (Rohr).

(20...25 Feuchtigkeitsstufen) gemessen. Bei einem konstanten Feuchtigkeitsgrad und einer konstanten Temperatur von 20 °C erfolgten bei jeder Anordnung 20 Messungen. Die Auswertungsergebnisse, auf Grund der mathematischen Statistik für die verschiedenen Grössen berechnet, sind in Tabelle I aufgeführt. Fig. 4 zeigt die Regressionsgeraden der sieben verschiedenen Anordnungen.

b) Positiver und negativer Stoss 1,2|55 μ s

Bei diesen Versuchen wurde die 50-%-Stossdurchbruchspannung $u_{i,50\%}$ in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit h_i wie folgt gemessen:

Für jedes Prüfobjekt und bei jedem Feuchtigkeitsgrad h_i wurden ca. 8...10 Spannungsstufen angewendet. Bei jeder Spannungsstufe erfolgten 50 Stösse, daraus wurde die Durchbruchhäufigkeit auf streng statistischer Grundlage berechnet. Eine Zusammenstellung der Auswertungsergebnisse für die verschiedenen Grössen ist in Tabelle II gegeben. Fig. 5 zeigt die Regressionsgeraden der vier verschiedenen Anordnungen für beide Stoss-Polaritäten.

4. Messungen und Auswertung

a) 50-Hz-Wechselspannung

Für jedes Prüfobjekt und bei jeder Schlagweite wurde die Durchbruchspannung bei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden

Feuchtigkeits-Einfluss beim 1,2|55- μ s-Stoss auf die 50-%-Durchbruchspannung

Tabelle II

Polarität	Anordnung	Schlagweite <i>D</i> mm	Anzahl Stösse	Bestimm- theitsmass <i>B</i>	Korre- lations- Koeffizient <i>r</i>	Standart- Abweichung <i>s</i> kV	Korrektur <i>K</i> kV/g/m ³	50-%-Durchbruch- spannung		$\varepsilon_{11\%} =$ $= \frac{K}{U_{11}} 100$
								<i>U</i> _{50%} bei <i>H</i> = 0 g/m ³ kV	<i>U</i> _{50%} bei <i>H</i> = 11 g/m ³ kV	
Positiv	Stab—Stab	150	8 700	0,72	0,85	1,739	0,737	123,1	131,2	0,56
		300	10 600	0,93	0,96	2,432	2,032	214,5	236,9	0,857
		600	11 650	0,93	0,96	3,047	3,267	326,0	361,9	0,902
	Kugel von 250 mm ϕ	100	13 550	0,54	0,74	1,329	0,532	234,4	240,2	0,222
Negativ	Stab—Stab	150	7 150	0,54	0,74	0,649	0,157	143,4	145,1	0,108
		300	11 250	0,03	0,17	2,641	0,119	257,9	259,3	0,046
		600	11 200	0,71	0,84	3,321	1,266	474,7	488,6	0,259
	Kugel von 250 mm ϕ	100	12 500	0,79	0,89	0,761	0,442	241,3	246,1	0,179

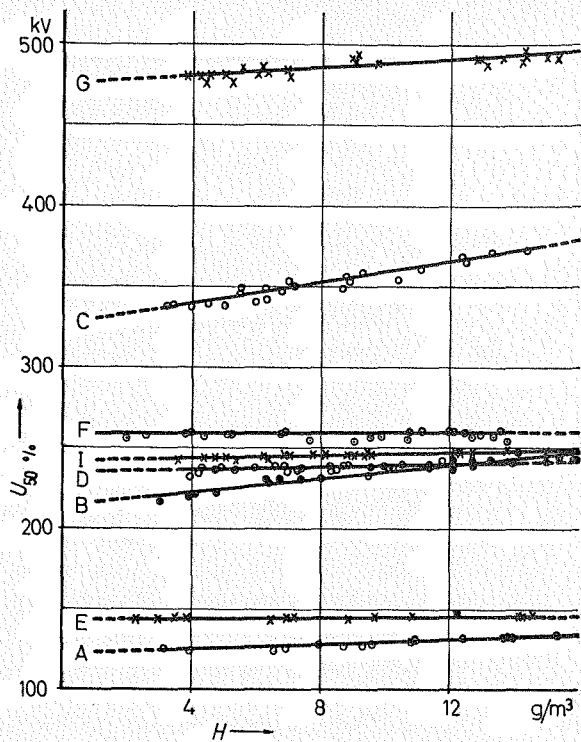


Fig. 5

Abhängigkeit der 50%-Stoss-Durchbruchspannung von der Feuchtigkeit H

Positiver Stoss

- A Stab-Stab, Schlagweite 150 mm
- B Stab-Stab, Schlagweite 300 mm
- C Stab-Stab, Schlagweite 600 mm
- D Kugel, 250 mm ϕ , Schlagweite 100 mm

Negativer Stoss

- E Stab-Stab, Schlagweite 150 mm
- F Stab-Stab, Schlagweite 300 mm
- G Stab-Stab, Schlagweite 600 mm
- I Kugel, 250 mm ϕ , Schlagweite 100 mm

• • x Messpunkte

c) Positive Keilwellenspannung (15, 28, 40 und 80 kV/ μ s)

In diesem Versuch wurde bei jeder Anordnung mit jedem Feuchtigkeitsgrad und mit jeder Steilheit je eine Serie von 42...56 Messungen durchgeführt und davon der Durchschnitt ermittelt.

Die Regressionsgeraden der Beziehung zwischen Durchbruchspannung und Feuchtigkeit, mit der Steilheit als Parameter Vorgehen bei den 50-Hz-Versuchen berechnen. Die meter, sowie die übrigen Größen liessen sich entsprechend Auswertungsergebnisse für die verschiedenen Größen enthält Tabelle III. Die Fig. 6 und 7 zeigen die Regressionsgeraden der zwei verschiedenen Anordnungen für die vier angewendeten Stoßspannungssteilheiten.

5. Versuchsergebnisse

a) 50-Hz-Wechselspannung

Aus Fig. 4 ist ersichtlich, dass die Neigung der Regressionsgeraden (mit Ausnahme derjenigen von 150 mm Schlagweite) für Spitze-Spitze und Stab-Stab praktisch dieselbe ist, wobei die Parallel-Verschiebung weniger als 5 % beträgt. Das bedeutet, dass die Korrektur K (kV/g/m³) dieselbe ist

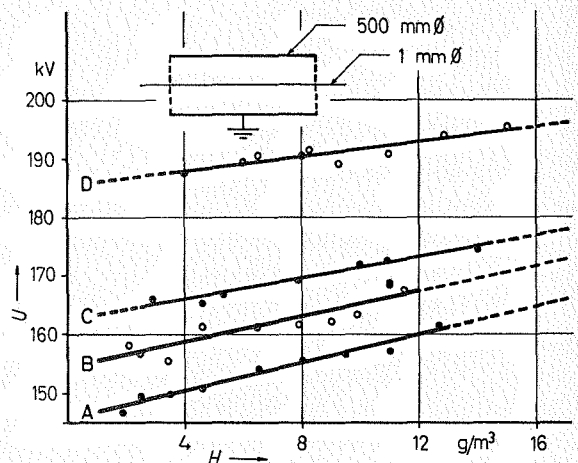


Fig. 6

Durchbruchspannung U für die Anordnung mit einem 1-mm-Leiter in Funktion der Feuchtigkeit H , mit der Steilheit du/dt als Parameter

- A $du/dt = 15$ kV/ μ s
- B $du/dt = 28$ kV/ μ s
- C $du/dt = 40$ kV/ μ s
- D $du/dt = 80$ kV/ μ s

Bezeichnungen siehe Fig. 5

Feuchtigkeits-Einfluss auf die Durchbruchspannung bei Keilwellen verschiedener Steilheiten

Tabelle III

Anordnung	Steilheit kV/ μ s	Anzahl Messungen	Bestimmtheits- mass B	Korrelations- Koeffizient r	Standard- Abweichung s kV	Korrektur K kV/g/m ³	Durchbruchspannung	
							U bei 0 g/m ³ kV	U bei 11 g/m ³ kV
Leiter (1 mm Durchmesser)	15	378	0,9623	0,981	0,971	1,191	145,6	158,7
	28	420	0,7934	0,8907	2,059	1,076	154,4	166,3
	40	294	0,9596	0,9795	0,7956	0,8995	162,4	172,3
	80	378	0,7986	0,8936	1,167	0,624	185,5	192,3
Rohr (20 mm Durchmesser)	15	1120	0,762	0,873	1,669	0,991	150,0	160,9
	28	1120	0,555	0,745	2,514	0,931	156,6	166,9
	40	1232	0,788	0,8878	1,64	0,881	166,0	175,7
	80	1232	0,6895	0,8304	1,649	0,726	178,4	186,35

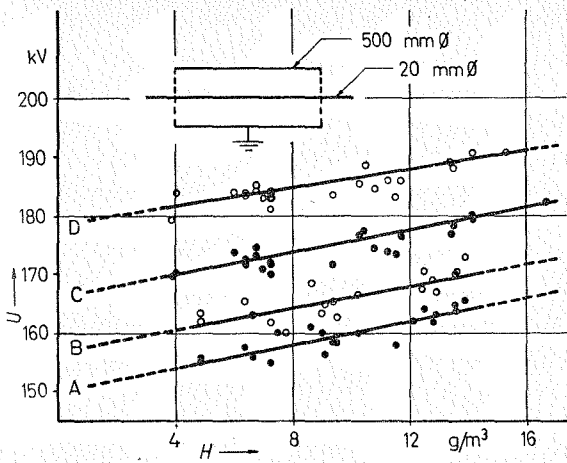


Fig. 7

Durchbruchspannung U für die Anordnung mit einem Rohr von 20 mm \varnothing in Funktion der Feuchtigkeit H , mit der Steilheit du/dr als Parameter
Angaben siehe Fig. 6, Bezeichnungen Fig. 5

für Stab—Stab- wie für Spitze—Spitze-Anordnung und dass die Durchbruchspannung von Stab—Stab, je nach Schlagweite, um höchstens 5 kV (Effektivwert) höher liegt als diejenige von Spitze—Spitze-Funkenstrecken. Daraus kann man schliessen, dass die Halbkugel-Elektrodenform gleichermaßen einen inhomogenen Feldverlauf verursacht wie diejenige mit Spitzen als Elektrodenform.

Andererseits ist zu bemerken (Tabelle I), dass die Standardabweichung s im Falle der Spitze—Spitze-Funkenstrecken

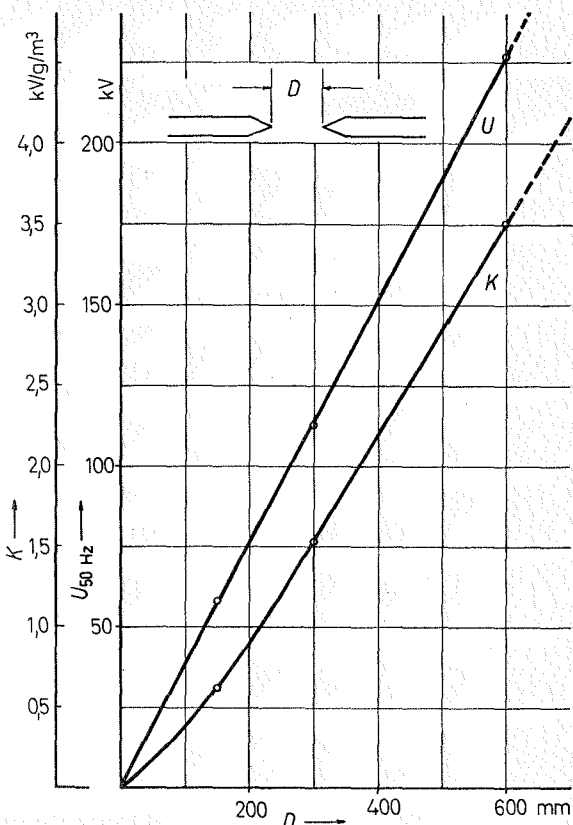


Fig. 8

Die Durchbruchspannung U bei 11 g/m^3 (kV) und K (kV/g/m^3) in Funktion der Schlagweite D (mm) für 50-Hz-Versuche
Raumtemperatur 20°C
o Messpunkt

im allgemeinen kleiner ist als diejenige im Falle der Stab—Stab-Funkenstrecken; das lässt sich folgendermassen erklären: Bei der Spitze—Spitze-Funkenstrecke fängt die Vorentladung, die zum Durchbruch führt, an der Spitze, d. h. an der Stelle der höchsten Feldstärke, an, während bei der Halbkugel die Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Vorentladung irgendwo auf der Kugeloberfläche beginnt, da hier die Feldstärke auf einer grösseren Fläche ungefähr denselben Wert beibehält; wichtig ist aber, dass die Vorentladung, sicherlich infolge des weniger inhomogenen Feldes, bei einer höheren Spannung einsetzt als bei der Spitze.

Es ist noch zu bemerken, dass die Neigung der Geraden mit zunehmender Schlagweite steiler wird, d. h. K (kV/g/m^3)

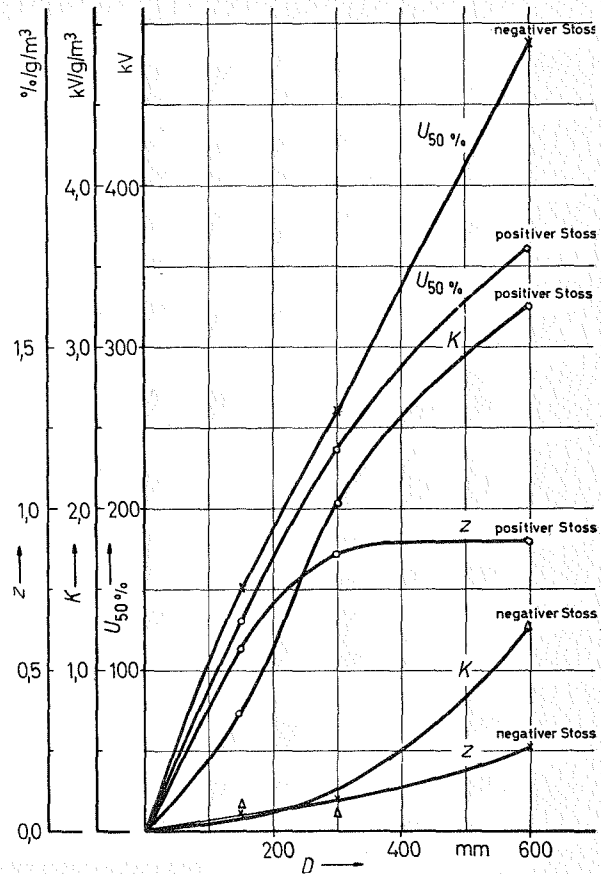


Fig. 9

Die 50%-Stoss-Durchbruchspannung bei 11 g/m^3 (kV), K (kV/g/m^3) sowie z (\%/g/m^3) für die Stab—Stab-Funkenstrecke in Funktion der Schlagweite D
o Δ x Messpunkte

nimmt mit zunehmender Schlagweite zu. Der Zusammenhang zwischen K (kV/g/m^3), der Durchbruchspannung bei 11 g/m^3 in kV und der Schlagweite D in mm für die Spitze—Spitze-Funkenstrecke ist in Fig. 8 dargestellt.

b) Positiver und negativer Stoss $1,2|55 \mu\text{s}$ (Fig. 5)

Beim positiven Stoss nimmt die Neigung der Regressionsgeraden, d. h. der Korrektur K (kV/g/m^3) mit steigender Schlagweite zu. Beim negativen Stoss zeigen die zwei Schlagweiten 150 und 300 mm eine sehr kleine Neigung der Regressionsgeraden ($K \approx 0$); dies bedeutet, dass die Feuchtigkeit praktisch keinen Einfluss auf die 50%-Stoss-Durchbruch-

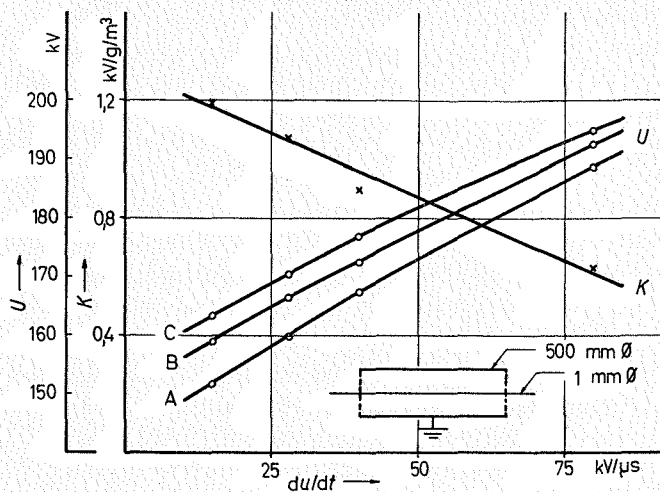


Fig. 10

Durchbruchspannung U und Korrektur K ($\text{kV}/\text{g}/\text{m}^3$) für die Anordnung mit einem 1-mm-Leiter in Funktion der Steilheit du/dt

- A Feuchtigkeit = $5 \text{ g}/\text{m}^3$
- B Feuchtigkeit = $11 \text{ g}/\text{m}^3$
- C Feuchtigkeit = $15 \text{ g}/\text{m}^3$

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 9

spannung hat; erst bei 600 mm Schlagweite zeigt sich ein geringer Einfluss der Feuchtigkeit auf die 50%-Stoss-Durchbruchspannung; die Zunahme erreicht etwa 0,26 % pro g/m^3 . Die Regressionsgerade der Kugelfunkenstrecke bei 100 mm Schlagweite zeigt unabhängig von der Polarität praktisch denselben Verlauf in bezug auf den Neigungswinkel; die beiden Geraden verlaufen fast parallel mit einer Verschiebung von ca. 6 kV.

Die Beziehungen zwischen der Korrektur K ($\text{kV}/\text{g}/\text{m}^3$), der 50%-Stoss-Durchbruchspannung $U_{50\%}$ bei $11 \text{ g}/\text{m}^3$ und der %-Korrektur z ($\%/ \text{g}/\text{m}^3$) für die Stab-Stab-Funkenstrecke (für beide Polaritäten) als Funktion der Schlagweite D in mm sind in Fig. 9 graphisch dargestellt.

$$z = \frac{K (\text{kV}/\text{g}/\text{m}^3)}{U_{50\%} (\text{bei } 11 \text{ g}/\text{m}^3)} 100 \quad \%$$

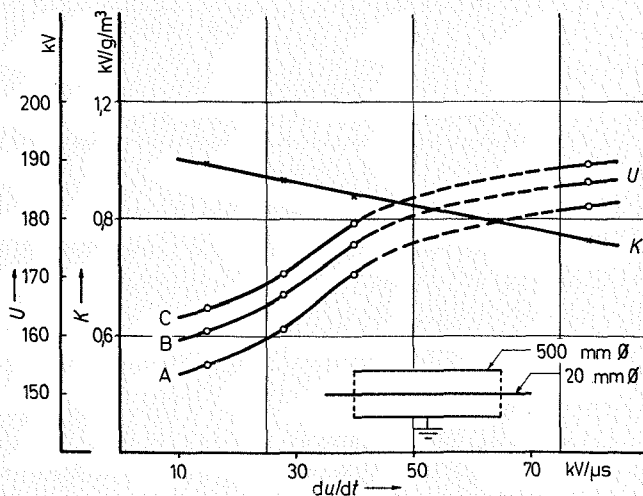


Fig. 11

Durchbruchspannung U und Korrektur K ($\text{kV}/\text{g}/\text{m}^3$) für die 20-mm-Rohr-Anordnung in Funktion der Steilheit du/dt

Angaben siehe Fig. 10, Bezeichnungen Fig. 9

c) Positive Keilwellenspannung (15, 28, 40 und 80 $\text{kV}/\mu\text{s}$) (Fig. 6 und 7)

Es zeigte sich, dass im Falle des Leiters von 1 mm Durchmesser die Korrektur im allgemeinen grösser ist als diejenige beim Rohr von 20 mm Durchmesser und dass der Unterschied zwischen den K -Werten für die verschiedenen Steilheiten beim 20-mm-Rohr kleiner ist als derjenige beim Leiter von 1 mm.

Die Abhängigkeit der Durchbruchspannung U und der Korrektur K ($\text{kV}/\text{g}/\text{m}^3$) von der Steilheit für die zwei Anordnungen ist in Fig. 10 und 11 graphisch dargestellt. Die Korrektur K ($\text{kV}/\text{g}/\text{m}^3$) nimmt mit zunehmender Steilheit des Stosses ab. Weiter ergibt sich für jede Anordnung eine Kurve, die mit zunehmender Stoss-Steilheit, besonders bei der 1-mm-Leiter-Anordnung, eine Abnahme des Feuchtigkeitseinflusses auf die Durchbruchspannung zeigt.

6. Berechnung des Korrekturfaktors k_e nach Definition der CEI

Die CEI-Definition für den Korrekturfaktor k_e in der Publikation 60 vom Jahre 1962 ergibt:

$$k_e (\text{bei Feuchtigkeit } h) = \frac{U (\text{bei } 11 \text{ g}/\text{m}^3)}{U (\text{bei } h \text{ g}/\text{m}^3)}$$

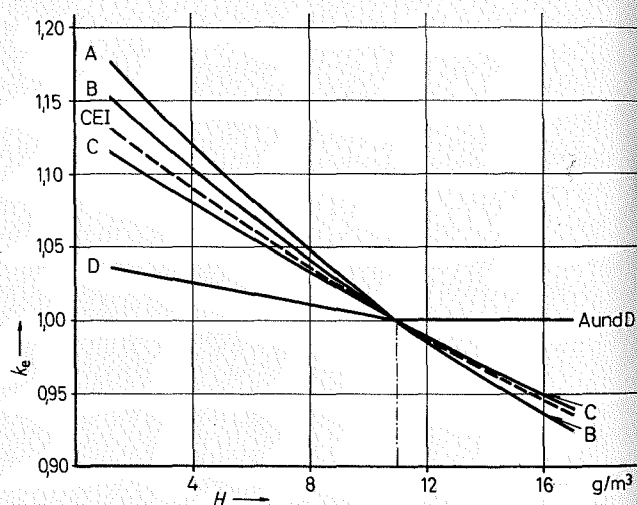


Fig. 12

Berechneter Korrekturfaktor k_e für die 50-Hz-Versuche in Funktion der Feuchtigkeit H

- A Spitze-Spitze, Schlagweite = 600 mm
- B Spitze-Spitze, Schlagweite = 300 mm
- C Spitze-Spitze, Schlagweite = 150 mm
- D Kugel, 250 mm ϕ , Schlagweite = 100 mm

In den Fig. 12, 13, 14 und 15 sind die nach obiger CEI-Formel berechneten Korrekturfaktoren k_e für die verschiedenen Fälle sowie die von der CEI angegebene Korrekturkurve eingetragen.

7. Zusammenfassung der Resultate

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche ergaben folgende Resultate:

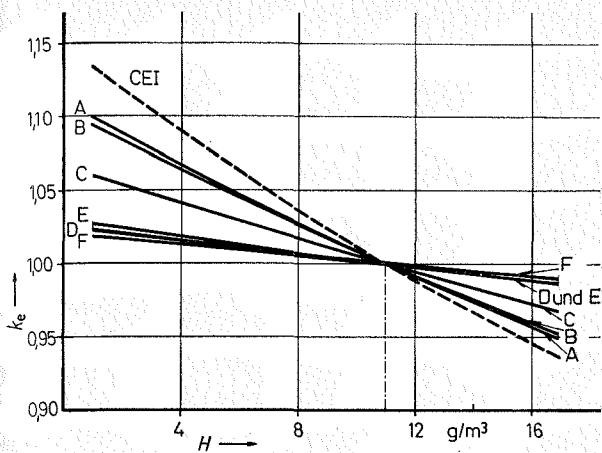


Fig. 13

Berechneter Korrekturfaktor k_e für die 1,2|55,5- μ s-Stossversuche in Funktion der Feuchtigkeit H

- A Stab—Stab, Schlagweite = 600 mm (positiver Stoss)
- B Stab—Stab, Schlagweite = 300 mm (positiver Stoss)
- C Stab—Stab, Schlagweite = 150 mm (positiver Stoss)
- D Kugel, 250 mm ϕ , Schlagweite = 100 mm (positiver Stoss)
- E Stab—Stab, Schlagweite = 600 mm (negativer Stoss)
- F Kugel, 250 mm ϕ , Schlagweite = 100 mm (negativer Stoss)

a) 50-Hz-Wechselspannung

a) Stab—Stab- und Spitze—Spitze-Funkenstrecken verhalten sich praktisch gleich.

Die Korrektur K ($kV/g/m^3$) sowie der aus den Messungen berechnete Wert des Korrekturfaktors k_e nehmen im untersuchten Bereich (Schlagweite ≤ 600 mm) mit steigender Schlagweite zu. Dies gilt jedoch für die 600-mm-Schlagweite nur bis zu einer Feuchtigkeit von 11 g/m^3 .

Der Korrekturfaktor k_e (für die 300- und 600-mm-Schlagweiten) ist bei Feuchtigkeiten $< 11 g/m^3$ grösser bzw. bei Feuchtigkeiten $> 11 g/m^3$ (nur für die 300-mm-Schlagweite) kleiner als der von der CEI angegebene Wert.

b) Bei der Kugelfunkenstrecke von 250 mm Durchmesser mit 100 mm Schlagweite ist der Feuchtigkeitseinfluss so klein, dass man auf eine Korrektur verzichten kann.

b) Stoßspannung 1,2|55 μ s

a) Bei der Kugelfunkenstrecke von 250 mm Durchmesser mit 100 mm Schlagweite ist der Feuchtigkeitseinfluss beim positiven Stoss ungefähr gleich wie beim negativen.

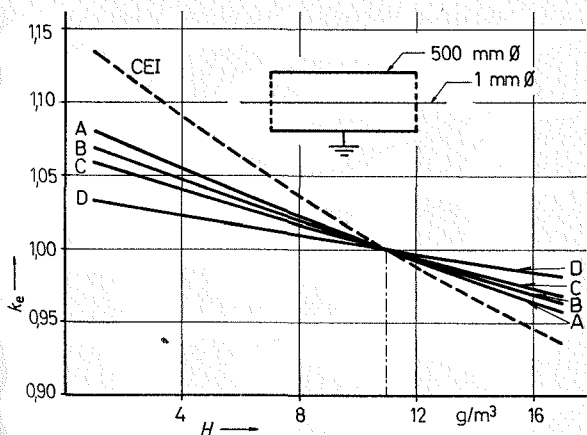


Fig. 14

Berechneter Korrekturfaktor k_e für die Keilwellenspannungs-Versuche mit 1-mm-Leiter-Anordnung in Funktion der Feuchtigkeit H

Angaben siehe Fig. 6

Beide sind klein, und man kann auf eine Korrektur verzichten.

bb) Bei Stab—Stab-Funkenstrecken mit negativem Stoss beginnt der Einfluss der Feuchtigkeit erst bei einer Schlagweite von 600 mm, bleibt aber so klein, dass man auf eine Korrektur verzichten kann.

bc) Bei Stab—Stab-Funkenstrecken mit positivem Stoss nimmt die Korrektur K ($kV/g/m^3$) im untersuchten Bereich (Schlagweite ≤ 600 mm) mit steigender Schlagweite zu.

bd) Bei einer Stab—Stab-Funkenstrecke mit positivem Stoss nimmt der Korrekturfaktor k_e im untersuchten Bereich (Schlagweite ≤ 600 mm) mit steigender Schlagweite bei Feuchtigkeiten von $< 11 g/m^3$ zu, bzw. bei Feuchtigkeiten von $> 11 g/m^3$ ab.

be) Der Korrekturfaktor k_e ist bei Feuchtigkeiten $< 11 g/m^3$ kleiner, bzw. bei Feuchtigkeiten $> 11 g/m^3$ grösser als der von der CEI angegebene Wert.

c) Keilwellenspannung und Zylinderanordnung

ca) Die Korrektur K ($kV/g/m^3$) nimmt mit zunehmendem Durchmesser des Innenzylinders ab.

cb) Die Korrektur K ($kV/g/m^3$) jeder Anordnung nimmt mit zunehmender Spannungssteilheit ab.

cc) Der Korrekturfaktor k_e nimmt mit zunehmendem Durchmesser des Innenzylinders bei Feuchtigkeiten $< 11 g/m^3$ ab, bzw. bei Feuchtigkeiten $> 11 g/m^3$ zu.

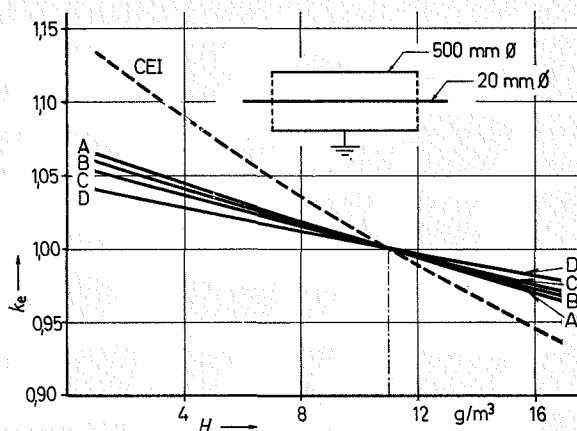


Fig. 15

Berechneter Korrekturfaktor k_e für die Keilwellenspannungs-Versuche mit 20-mm-Rohr-Anordnung in Funktion der Feuchtigkeit H

Angaben siehe Fig. 6

cd) Der Korrekturfaktor k_e jeder Anordnung nimmt mit zunehmender Spannungssteilheit bei Feuchtigkeiten $< 11 g/m^3$ ab, bzw. bei Feuchtigkeiten $> 11 g/m^3$ zu.

ce) Der Korrekturfaktor k_e für beide Anordnungen (Leiter von 1 mm Durchmesser und Rohr von 20 mm Durchmesser) ist bei Feuchtigkeiten $< 11 g/m^3$ kleiner, bzw. bei Feuchtigkeiten $> 11 g/m^3$ grösser als derjenige für den positiven 1,2|55- μ s-Stoss und folglich auch entsprechend kleiner, bzw. grösser als der von der CEI angegebene Wert.

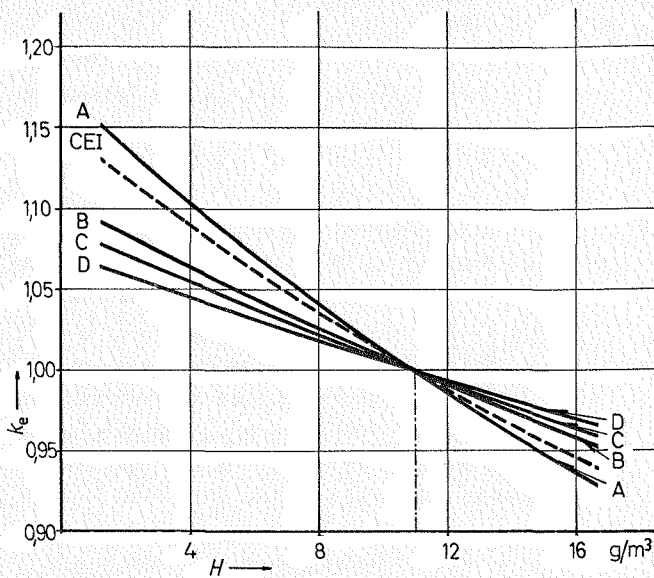


Fig. 16

Abhängigkeit des Korrekturfaktors k_e von den verschiedenen Spannungsarten

- A 50-Hz-Wechselspannung an der Spitze-Spitze-Funkenstrecke mit 300 mm Schlagweite
- B Positive 1,2|55,5- μ s-Stoßspannung an der Stab-Stab-Funkenstrecke mit 300 mm Schlagweite
- C Positive Keilwellen mit 15-kV/ μ s-Steilheit, am Innenzylinder von 1 mm Durchmesser
- D Positive Keilwellen mit 15-kV/ μ s-Steilheit, am Innenzylinder mit 20 mm Durchmesser

Um die Abhängigkeit des Korrekturfaktors k_e von den verschiedenen Spannungsarten zu veranschaulichen, wurde in Fig. 16 die CEI-Korrekturkurve und die berechneten Korrekturfaktoren k_e für vier verschiedene Fälle graphisch dargestellt.

8. Physikalische Betrachtung

Die Erhöhung der Durchbruchspannung bei zunehmender Feuchtigkeit erfolgt hauptsächlich aus nachstehenden Gründen:

a) Die Anlagerung freier Elektronen an die Wassermoleküle hat eine Verminderung der Anzahl freier Elektronen zur Folge. Um den Elektronenverlust zu kompensieren, müssen neue Elektronen erzeugt werden, was eine höhere Feldstärke bei erhöhter Feuchtigkeit verlangt.

b) Die positive Raumladung, die sich im Falle eines inhomogenen Feldes vor der positiven Elektrode bildet und die Durchbruchspannung bestimmt, wird von der Feuchtigkeit beeinflusst. Durch die Anlagerung freier Elektronen auf den Wassermolekülen bei zunehmender Feuchtigkeit bildet sich am Rand der positiven Raumladung eine negative Ionen-

Raumladung. Diese negative Raumladung schwächt das Feld in Richtung zur Kathode. Als Folge davon nimmt die elektrische Festigkeit der Luft zu, was eine höhere Spannung zum Durchbruch benötigt. Sie stärkt andererseits das Feld am Rand der positiven Raumladung, was die Durchbruchspannung herabsetzt. Ob der eine oder der andere Faktor (a oder b) überwiegt, hängt von der Schlagweite und vom Mechanismus ab, der zum Durchbruch führt und der seinerseits abhängig ist von der Form der angelegten Spannung.

Ein deutlicher Einfluss der Luftfeuchtigkeit ist dann vorhanden, wenn ein Vorentladungsprozess dem Durchbruch vorausgeht, d. h. Anfangs- und Durchbruchspannung nicht zusammenfallen. Dieser Einfluss ist um so stärker, je grösser die Zeitspanne vom Erreichen der Anfangs- bis zur Durchbruchspannung ist.

Letztere Bedingung hängt insbesondere mit der Anstiegsgeschwindigkeit der beim Versuch angewendeten Spannung zusammen. Deshalb hat die Feuchtigkeit den grössten Einfluss auf die Durchbruchspannung bei Gleichspannung und den kleinsten bei sehr steiler Keilwellenspannung; dazwischen liegen die 50-Hz-Wechselspannung und die 1,2|55- μ s-Stoßspannung.

9. Schlussbemerkung

Der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) und dem Hochspannungslaboratorium der ETH gebührt der Dank des Autors, da sie das Zustandekommen dieser Arbeit ermöglicht haben. Zugleich sei Prof. Dr. K. Berger für die Förderung der Arbeit durch sein grosses Interesse und die wertvollen Anregungen herzlich gedankt.

Literatur

- [1] D. J. Finney: Probit analysis. A statistical treatment of the sigmoid response curve. Cambridge, University Press, 1947.
- [2] S. Guindehi: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Durchbruchspannung verschiedener Funkenstrecken bei verschiedenen Spannungsformen. Dissertation Nr. 4347 ETH, Zürich 1969.
- [3] Essais à haute tension. Publication No 60 de la CEI. Deuxième édition. Genève, Bureau Centrale de la Commission Electrotechnique Internationale, 1962.
- [4] Y. Ishiguro: Effect of humidity on impulse flashover voltages of rod gaps and isolators. Electrotechn. J. Japan 3(1939)7, p. 147...152.
- [5] A. Linder: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. 4. Auflage. Basel und Stuttgart, Birkhäuser-Verlag, 1964.
- [6] E. Peschke: Über das Durchschlagsverhalten der Luft bei Beanspruchung mit hoher Gleichspannung. Bull. SEV 59(1968)26, S. 1183...1195.
- [7] E. Peschke: Einfluss der Feuchtigkeit auf das Durchschlag- und Überschlagverhalten bei hoher Gleichspannung in Luft. ETZ-A 90(1969)1, S. 7...13.
- [8] G. W. Snedecor: Statistical methods applied to experiments in agriculture and biology. Fifth edition. Ames/Yowa, Yowa State University Press, 1962.

Adresse des Autors:

Dr. S. Guindehi, Hochspannungslaboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, 8006 Zürich.