

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 57 (1966)
Heft: 12

Artikel: Messanordnungen zur Erfassung innerer Ionisation : Rundversuch mit Ionisations-Normal
Autor: Buchmann, E. / Gänger, B. / Goldstein, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916606>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 31.03.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

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

Messanordnungen zur Erfassung innerer Ionisation¹⁾

Rundversuch mit Ionisations-Normal

Von E. Buchmann, Brugg, B. Gänger und A. Goldstein, Baden

537.241 : 621.314.22.08

Unter Teilnahme einer grösseren Anzahl schweizerischer Laboratorien wurde zur Gewinnung eines Überblicks über den heutigen Stand der Messtechnik ein Rundversuch zur Feststellung und Ausmessung innerer Ionisation in Hochspannungsapparaten durchgeführt. Hiezu wurde von jedem Teilnehmer die Störcharakteristik eines Stör-Normals ausgemessen. Die Resultate erweisen die hohe Empfindlichkeit der heute in Verwendung befindlichen Messgeräte sowie die Eignung der üblichen Messschaltungen. Damit ist eine gute Grundlage für die weitere Arbeit des eingesetzten Arbeitsausschusses geschaffen.

Afin d'obtenir une vue d'ensemble sur l'état actuel de la technique des mesures, un essai étendu a été exécuté avec la participation d'un grand nombre de laboratoires suisses afin de déterminer et de mesurer la ionisation intérieure des appareils à haute tension. A cet effet chaque participant mesura la caractéristique perturbatrice d'un étalon de perturbation. Les résultats prouvent la haute sensibilité des instruments de mesure actuellement appliqués, ainsi que l'aptitude des circuits de mesure usuels. Ces données fournissent une base excellente pour les travaux futurs du groupe de travail constitué à cet effet.

1. Aufgabenstellung

In den Regeln für Messwandler des SEV²⁾ findet sich der Hinweis, dass zur Beurteilung ihres dielektrischen Verhaltens die Messung der Glimmeinsatzspannung³⁾ beigezogen werden kann und entsprechende Messverfahren und Methoden in Bearbeitung sind (Ziffer 6.1.4). Auch bei den Leistungstransformatoren stösst die Ionisationsmessung auf erhebliches Interesse. Es wurde daher ein Arbeitsausschuss für Ionisationsfragen gebildet, mit der Aufgabe, die mit Ionisationsvorgängen in Transformatoren und Messwandlern zusammenhängenden Fragen abzuklären.

Im Rahmen des Ausschusses wurde beschlossen, durch einen Rundversuch mit einem Ionisationsnormal in verschiedenen Hochspannungslaboratorien festzustellen, welche Messverfahren im einzelnen zur Anwendung gelangen und mit welchem Grad der Übereinstimmung bei solchen Messungen gerechnet werden kann. Der dabei zu gewinnende Überblick über Meßschaltungen, Messgeräte und Messgrössen sollte für die spätere Ausarbeitung von Messanleitungen nützliche Hinweise liefern.

¹⁾ Ausgearbeitet im Auftrag des Arbeitsausschusses für Ionisationsfragen des Fachkollegiums FK 14 (Transformatoren), FK 38 (Messwandler) und FK 42 (Hochspannungsprüftechnik) des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees.

²⁾ Publ. 3008/1964 des SEV.

³⁾ Im heutigen Sprachgebrauch finden sich nebeneinander die Begriffe Korona, Koronaentladung, Vorentladung, Dunkelentladung, Glimmen, Glimmentladung, Teilentladung etc., um elektrische Entladungen schwacher Energie im Innern oder an der Oberfläche einer Isolieranordnung zu bezeichnen. Daneben werden auch, wenn die Art des Entladungsvorganges näher charakterisiert werden soll, die Begriffe Hohlraumentladung oder Wand-, Grenz- oder Oberflächenentladung verwendet, wobei letztere z. B. eine Gleitentladung sein kann. In der CEI hat man sich darauf geeinigt, die hier interessierenden Entladungen als «partial discharges» bzw. «décharges partielles» zu bezeichnen. Da aber im Deutschen das Wort «Teilentladung» zu farblos erscheint und wenig charakteristisch für die im weiteren betrachteten Vorgänge ist, wird im Text vorzugsweise der Ausdruck «innere Ionisation» oder auch einfach «Ionisation» verwendet.

2. Physikalische Natur der Ionisation

Die energieschwachen Entladungen bei Spannungen oberhalb eines gewissen Schwellen- (Einsatz-) Wertes z. B. um eine Spitze oder in einem Hohlraum, der in ein flüssiges oder festes Dielektrikum höherer elektrischer Festigkeit eingebettet ist, sind nicht von stetigem Verlauf, sondern setzen sich aus einer Vielzahl kurzdauernder Impulse zusammen. Der einzelne Impuls steigt sehr rasch an und klingt langsamer ab. Seine Dauer bewegt sich in der Grössenordnung von 10^{-8} bis 10^{-6} s. Im Falle einer in Luft glimmenden Spitze sind es bei Spannungen wenig oberhalb des Einsatzes gesetzmässig ablaufende Raumladungsumbildungen in der negativen Halbwelle der angelegten Wechselfspannung, die ein nahezu periodisches Erlöschen und Neuentstehen der (Trichel-) Impulse im Bereich des Spannungsmaximums bewirken. In einem Hohlraum, Gasblase o. dgl. wird das darin herrschende elektrische Feld von der gerade aufgebauten Entladung weitgehend ausgelöscht, und zwar bei jeder Polarität. Die kleine Kapazität der Fehlerstelle muss erst durch eine entsprechende Änderung, z. B. einen weiteren Anstieg, der an den fehlerbehafteten Apparat aussen angelegten Spannung erneut bis zum kritischen Wert aufgeladen werden, bevor ein weiterer «Durchschlag» erfolgen kann, usw. Zu jedem Zusammenbruch der an der Fehlerstelle mit der kleinen Kapazität c liegenden Teilspannung u gehört eine stossweise Ladungsverschiebung $q = uc$. Zwischen der Störstelle und den Klemmen des Apparates sind immer weitere Teilkapazitäten und auch Induktivitäten anzunehmen. Der an der resultierenden Eingangskapazität c_1 des Apparates messbare Spannungssprung Δu_1 und die zugehörige Ladungsverschiebung $\Delta q_1 = \Delta u_1 \cdot c_1$ sind deshalb von q und u verschieden.

Vom Netz wird über die Induktivitäten der Zuleitung jedesmal die umgesetzte Ladung verzögert nachgeliefert und damit der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt. Je höher die Spannung über der Einsatzspannung liegt, desto rascher pflegen

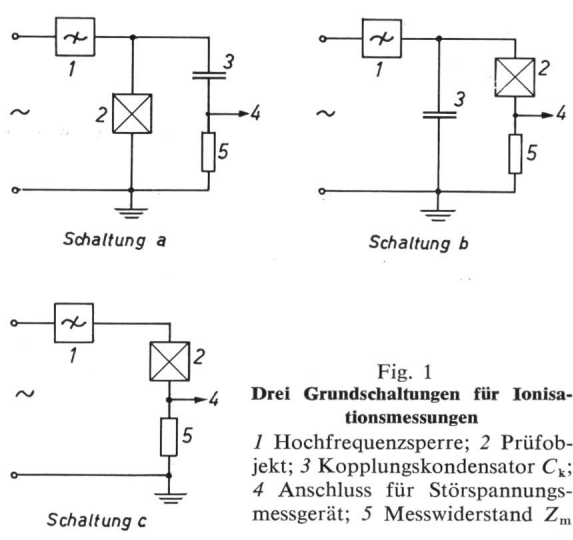


Fig. 1
Drei Grundsaltungen für Ionisationsmessungen
 1 Hochfrequenzsperre; 2 Prüfobjekt; 3 Kopplungskondensator C_k ; 4 Anschluss für Störspannungsmessgerät; 5 Messwiderstand Z_m

die Impulse einander zu folgen; beim Vorkommen mehrerer Störstellen mögen sie einander auch zeitlich überdecken. Wegen der sehr kurzen Dauer eines Impulses liefert seine harmonische Zerlegung ein bis über 10 MHz reichendes Spektrum von nur wenig abnehmender Amplitudenhöhe im unteren Bereich. Die Hochfrequenzenergie wird abgestrahlt (der Hauptteil der an der Entladungsstelle umgesetzten Energie wird dort zum Aufbau der Entladung und damit in Form von Anregungs- und Ionisierungsenergie verausgabt worden sein) oder pflanzt sich längs der Elemente des elektrischen Kreises weiter. Neben einer Erfassung der Störung durch akustische oder visuelle Beobachtungen oder durch Anzeige des Energie-Mehrverbrauches beim Einsetzen der Entladung etwa mit der bekannten Scheringbrücke (Ionisationsknick im $\text{tg } \delta$ -Verlauf) zieht man wegen der weit grösseren Messempfindlichkeit in erster Linie die von einer nahen Antenne aufgefangene oder die an einer Messimpedanz im Kreis der Störquelle abgegriffene hochfrequente Störspannung zur Ausmessung heran.

3. Meßschaltungen

Für Ionisationsmessungen an Hochspannungsmaterial durch Messung der hochfrequenten Störspannungen sind drei Grundsaltungen bekannt (Fig. 1). Ohne weiteres lassen diese sich auch auf dreiphasig geschaltete Anordnungen übertragen. Schaltung a dürfte die meistbenutzte sein (sog. NEMA-Kreis, da in NEMA-Publ. No. 107, 1964, Methods of measuring radio noise, empfohlen). Die Prüfspannung wird über eine Drosselspule oder einen Parallelschwingkreis als Hochfrequenzsperre dem Prüfobjekt (2) zugeführt. Parallel zu diesem liegt ein Kopplungskondensator (3) mit erdseitigem Messwiderstand (5). Dem Störspannungsmessgerät wird entweder die volle am Messwiderstand auftretende Störspannung zugeführt (4) oder auch nur eine Teilspannung, wozu dann der Messwiderstand anzuzapfen ist. Schaltung b unterscheidet sich von der Schaltung a nur dadurch, dass der Messwiderstand in die Erdung des Prüfobjektes statt in die des Kopplungskondensators eingeschleift wird. In Schaltung c wird auf den Kopplungskondensator überhaupt verzichtet. Die hochfrequenten Ströme müssen sich dann über die Streukapazitäten schliessen und werden vielleicht merklich beeinträchtigt.

4. Teilnehmerkreis

Am Rundversuch beteiligte sich eine grössere Anzahl von Laboratorien. Von den folgenden 9 Firmen bzw. Institutionen wurden Resultate eingereicht:

- AG Brown, Boveri & Cie., weiterhin als Teilnehmer
 «A» bezeichnet
 Condensateurs Fribourg SA B
 Forschungskommission des SEV und VSE
 für Hochspannungsfragen (FKH) C
 Maschinenfabrik Oerlikon D
 Micafil AG E
 Moser, Glaser & Co. AG F
 SA des Ateliers de Sécheron G
 Schweiz. Elektrotechnischer Verein H
 Sprecher & Schuh AG I

Alle drei unter Ziff. 3 gekennzeichneten Grundsaltungen kamen beim Rundversuch vor, wobei nicht in allen Fällen mit der Hochfrequenzsperre gearbeitet wurde. Mehr oder weniger vollkommen geschirmt waren nur die Messräume der Teilnehmer A, E, F und H. Eine Übersicht über die verwendeten Schaltungen gibt Tab. I. Schaltung a wurde demnach ausnahmslos verwendet.

Prüfschaltungen beim Rundversuch

Tabelle I

Laboratorium	Schaltung gemäss Fig.	Bemerkungen
A	a	—
B	a	ohne HF-Sperre
C	a, c	—
D	a	ohne HF-Sperre
E	a, b	ohne HF-Sperre
F	a	ohne HF-Sperre
G	a	ohne HF-Sperre
H	a, b, c	—
I	a, c	ohne HF-Sperre

5. Messgeräte

Zur messenden Anzeige von Ionisationsvorgängen in Hochspannungsisolierungen steht eine Vielzahl von speziellen Geräten zur Verfügung. Teils sind diese vorwiegend zum Messen bei ganz bestimmten Apparaten oder Isolieranordnungen bestimmt und eignen sich dann weniger gut für andere Zwecke.

Für Brückenschaltungen kommen vor allem Nullindikatoren, Elektronenstrahlröhren sowie speziell entwickelte Anzeigergeräte in Frage. Für Ionisationsmessungen reicht die Empfindlichkeit dieser Einrichtungen überall dort aus, wo der Anteil der Entladungsstellen in der Isolation gross ist wie z. B. bei Maschinenisolationen. Im weiteren seien jedoch nur noch die weitaus empfindlicheren Messgeräte, die entweder nur in einem schmalen Frequenzband oder auch breitbandig arbeiten, betrachtet. Sie greifen aus dem gesamten Frequenzspektrum der Ionisationsstörung ein mehr oder weniger breites Band heraus und machen den verstärkten Messwert auf dem Schirm einer Röhre sichtbar oder führen ihn einem anzeigenden Instrument zu.

Bei den *selektiven* Messgeräten, bei denen es sich in der Regel um die eigentlichen Funkstörspannungsmessgeräte handelt, beträgt die zur Messung ausgenützte Bandbreite meist 9 kHz. Die verstärkte und gleichgerichtete Störspannung wird einem Bewertungskreis zugeführt, der dem Störempfinden des menschlichen Ohres angepasst ist. Nach den internationalen CISPR-Empfehlungen sind dazu dessen Ladezeitkonstante auf 1 ms und die Entladezeitkonstante auf 160 ms einzustellen.

Hersteller	Typ	Eingangswiderstand Ω	Messfrequenz MHz	Bandbreite kHz	Bewertung Messgrösse	Verwendet von den Teilnehmern am Rundversuch
Hivolt, London	AC 2	—	0,5	± 10	mV pC	A, E
Messwandler-Bau GmbH, Bamberg	HFM	150	1,9	9	1/160 ms dB, μV ($0 \text{ dB} \triangleq 1 \mu\text{V}$)	A, C, E, F, H, I
RCT, Paris ¹⁾	—	75	0,13	1,3	Effektivwert μV	G
Schwarzbeck	FSTME 6112	150	0,492	9	dB ($60 \text{ dB} \triangleq 1 \text{ mV}$)	B
Siemens	STTM 3840	60	0,15—3	9	1/160 ms dB ($0 \text{ dB} \triangleq 0,4 \mu\text{V}$)	A, D, E G, H
Sté Belge Radio-Electr., Bruxelles	CISPR	—	1	9	1/160 ms dB ($0 \text{ dB} \triangleq 1 \mu\text{V}$)	H

¹⁾ Das Gerät wurde speziell für Ionisationsmessungen an Maschinenwicklungen entwickelt.

Die bewertete Störgrösse wird schliesslich einem in dB gezeichneten Anzeigeinstrument zugeführt, oftmals auch zur besseren Kenntlichmachung von schwachen Änderungen noch auf einem Oszillographenschirm sichtbar oder etwa mittels Lautsprecher hörbar gemacht. Aus der Zuordnung Dezibel/Mikrovolt folgt die Höhe der Störspannung selbst. Andere, vor allem von der ERA⁴⁾ in England entwickelte Geräte mit Mess-Bandbreiten von wenigen kHz bis zu 150 kHz machen die Einzelentladungen direkt auf dem Schirm einer Oszillographenröhre sichtbar und erlauben auch nach einfacher Umrechnung direkt die Angabe der scheinbaren Impulsladung (in pC).

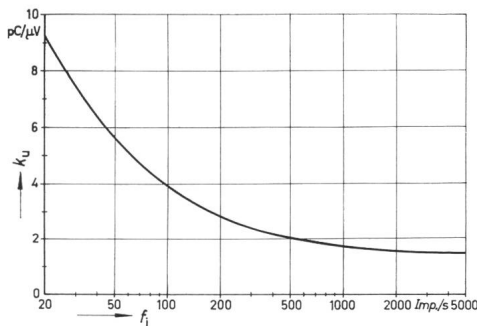


Fig. 2

Zusammenhang zwischen Störspannung und Impulsladung beim Störmessgerät Siemens STTM 3840

Nach Messungen bei $Z_m = 47 \Omega$ im Hochspannungslaboratorium der AG Brown Boveri

k_u Umrechnungsfaktor; f_i Impulsfrequenz

Bei den *Breitband*-Messgeräten wird ein Frequenzband ab meist 10...20 kHz bis hinauf zu vielleicht einigen MHz erfasst. Die verstärkte Störgrösse wird auf einem Oszillographenschirm sichtbar gemacht, oder es wird auch der arithmetische Mittelwert oder der Scheitelwert gemessen. Schliesslich ist noch auf die elektronischen Zählgeräte hinzuweisen, mit denen die Zahl der Entladungsimpulse pro Zeiteinheit oberhalb einer gewissen, einstellbaren Schwelle bestimmt wird. Solche Geräte sind meist zur Zählung bis zu einigen hunderttausend Impulsen pro Sekunde eingerichtet, können aber unter Mehraufwand auch noch mehr leisten. Tabelle II gibt eine Übersicht über die beim Rundversuch benutzten Messgeräte. Soweit bekannt, sind deren wichtigste Daten angeführt. Demnach kamen ausschliesslich

schmalbandige Geräte zur Verwendung, vorzugsweise vom Typ des CISPR-Bewertungskreises. Die von einem Störmessgerät angezeigte Ausgangsspannung hängt in nicht leicht zu übersehender Art von Dauer und Zahl pro Zeiteinheit der originalen Impulse, ferner von Impulsbewertung und Durchlassbreite sowie selbstverständlich vom Verstärkungsgrad ab. Es ist wohl zu unterscheiden zwischen der Höhe des jeweiligen am Messwiderstand abgegriffenen Impulses und der vielfach in μV angegebenen Höhe der ausgemessenen Störspannung. Fig. 2 zeigt für eines der auch im Rundversuch benutzten Geräte den experimentell ermittelten Zusammenhang zwischen Repetitionsfrequenz der Impulse und dem Faktor für die Umrechnung von der Geräteanzeige auf die Ladung eines Impulses. Im gegebenen Fall erreicht demnach bei z. B. 100 Impulsen/s (d. h. 1 Impuls in jeder Halbwelle einer 50-Hz-Wechselspannung) der Umrechnungsfaktor $4 \text{ pC}/\mu\text{V}$. Da die Impulsdauer wohl immer weit kürzer als der Reziprokwert der erfassten Bandbreite ist, gilt der ermittelte Umrechnungsfaktor für jede beliebige Form des Impulses.

6. Ionisations-Normal

Unerlässliche Voraussetzung für Vergleichsmessungen ist das Vorhandensein einer Quelle mit jederzeit leicht und mit guter Genauigkeit reproduzierbarer Ionisation. Zunächst war daran gedacht, als Prüfling einen störenden Giessharzwandler zu verwenden, doch wurde im weiteren davon abgesehen, weil ein solcher in seinem Störverhalten vielleicht nicht hinreichend konstant gewesen wäre und überdies plötzliche Veränderungen des Störcharakters nicht ausgeschlossen werden könnten. Eine andere Möglichkeit, Ionisations-Meßschaltungen durchzumessen und zu vergleichen, bestünde darin, in den Messkreis Ladungsimpulse der gewünschten Form aus speziellen Impuls-generatoren zu injizieren und die Empfindlichkeit der Anzeige für diese zu bestimmen. Auch davon wurde abgesehen, da ein

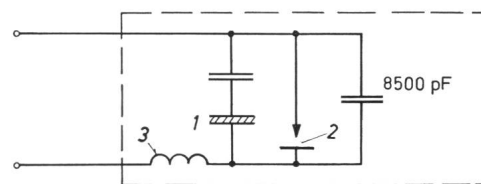


Fig. 3

Grundschaltbild des Ionisations-Normals

1 Hohlraumstörstelle; 2 Spitzenstörstelle; 3 Drosselspule, 0,5 mH

⁴⁾ Electrical Research Association, Leatherhead (England).

solches Vorgehen von dem praktischen Fall des im Messkreis unter Hochspannung stehenden glimmenden Prüfobjektes zu sehr abweichen würde.

In Anlehnung an das bekannte Ersatzschaltbild einer im Dielektrikum eingebetteten Glimmstelle wurde daher vom Hochspannungs-Versuchslokal der AG Brown, Boveri, Baden, ein Ionisationsnormal gemäss Fig. 3 entwickelt. Das Schalt-schema entspricht in erster Näherung einer in der Nähe ihrer Hochspannungsklemme glimmenden Wicklung. Wichtigster Bestandteil ist die künstliche Hohlraum-Störstelle (Fig. 4). Innerhalb eines Kunststoffkörpers stellen drei Rundmessing-scheiben das Elektrodensystem dar. Die hochspannungsseitige Elektrode ist von der mittleren durch eine 4 mm dicke Isolier-scheibe aus Kunststoff getrennt, um die im 3 mm starken Luft-spalt zwischen Mittelscheibe und erdseitiger Scheibe sich aus-bildende Glimmentladung zu stabilisieren und einen Durch-schlag der vollen Elektrodendistanz mit Kurzschluss des Hoch-spannungskreises zu verhüten. Der so gegebenen Charakteristik einer Hohlraum-entladung wird noch eine weitere überlagert. Dazu steht eine auf Hochspannungspotential befindliche Draht-spitze in grösserem freien Abstand einer geerdeten Platte gegen-über. Oberhalb einer bestimmten Spannung glimmt die Spitze ebenfalls. Eine noch im Normal vorhandene Drossel-spule bewirkt ausserdem eine gewisse Anpassung des Frequenz-ganges der Störspannung an das Erscheinungsbild einer Störung nach Durchlaufen einer Hochspannungswicklung. Parallel zu den künstlichen Störstellen liegt ein glimmfreier Kondensator grosser Kapazität (8500 pF). Die ganze Anordnung ist in einen Kasten mit den Abmessungen $450 \times 550 \times 715$ mm eingebaut (Fig. 5) und lässt sich mühelos transportieren (Gewicht 60 kg).

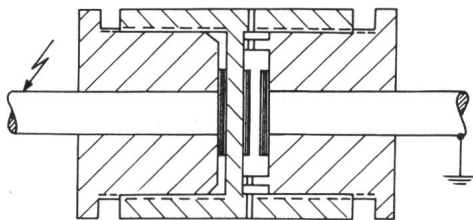


Fig. 4
Hohlraumstörstelle

Der Hochspannungsanschluss in Form einer Kugel ist nach Abnehmen des Deckels direkt zugänglich. Die höchstzulässige Versuchsspannung ist auf 20 kV (eff.) begrenzt.

Versuche hatten die sehr befriedigende Konstanz der Eigen-schaften des Normal erwiesen. Während des sich über Monate hinziehenden Rundversuchs immer wieder in stets gleicher Weise ausgeübte Kontrollmessungen im NEMA-Kreis bei 1 MHz (Kopplungskondensator 1000 pF, resultierender Mess-widerstand 520Ω) führten auf die in Tab. III enthaltenen Werte. Die Drahtspitze beginnt sehr schwach zwischen 4,3 und 5 kV zu glimmen; die Hohlraum-Störstelle setzt zwischen 9 und

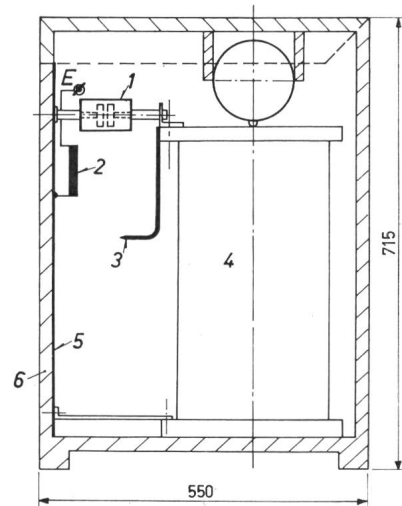


Fig. 5
Aufbau des Normal

1 Störstelle; 2 Drosselspule; 3 Drahtspitze; 4 Kondensator, 8500 pF
5 Blech; 6 Holz, E Erdung

11 kV, dann aber sehr kräftig ein. Bis zur höchsten Spannung steigen die Störwerte nur noch wenig an.

Wie die Übersicht von Tab. III zeigt, waren die bei den Kontrollen festgestellten relativen Differenzen in den Mess-werten durchwegs klein, nur im Bereich der Entladungs-einsätze waren die Streuungen grösser; doch hielten sie sich im Rahmen der bei solchen Messungen zu erwartenden Un-sicherheit.

7. Messresultate

Die in Tabellenform oder in graphischer Darstellung ange-führten Werte geben bis auf weniger belangreiche Einzelheiten einen ziemlich vollständigen Überblick über die von den ein-zelnen Teilnehmern mitgeteilten Resultate. Um die Übersicht und Auswertung zu erleichtern, sind im weiteren die Mess-resultate nach Art der verwendeten Messgeräte aufgegliedert sowie im Einzelfall in Abhängigkeit von der Messfrequenz f , dem resultierenden Messwiderstand Z_m und der Grösse des Kopplungskondensators C_k .

Die Werte (Messreihen) sind dabei jeweils nur einmal auf-geführt; untereinander mögen Messwerte aus verschiedenen Versuchsreihen selbst des gleichen Teilnehmers voneinander abweichen, weil dann die Messfehler und Nebeneinflüsse zu gewissen Abweichungen führten.

Vielfach wurde sowohl bei steigender als auch bei fallender Spannung gemessen. Im vorliegenden Fall waren durchwegs die Unterschiede sehr gering, so dass im nachfolgenden nur die bei steigender Spannung gewonnenen (leicht tieferen) Kurven bzw. Messwerte wiedergegeben sind.

Die von 5 Teilnehmern mit dem Messgerät «Bamberg» ($f = 1,9$ MHz, $Z_m = 60 \Omega$) ermittelten Störspannungswerte sind in Fig. 6 graphisch dargestellt. Der kräftige Störeinsatz des Hohlraumes und das grundsätzliche Verhalten des Normal

Störcharakteristik des Normal bei vielfach wiederholten Messungen

Tabelle III

Spannung (kV)	0...4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20
Mittelwerte aus je 12 Einzelmessungen (μV)	1	6,5	9	12	14,5	19	145	148	175	200	260	320	360
Quadratischer Mittelwert der Streuung (Standardabweichung) (dB)	—	1,6	2,0	1,6	2,3	2,2	2,9	2,7	2,6	2,2	1,2	1,0	0,9

Spannung (50 Hz) kV	Teilnehmer Mess-Schal- tung	A				D			E		G	H									
		a				a			b		a	b									
		Sperrkreis				nein (20 k Ω)			nein		nein (125 k Ω)	nein ¹⁾				nein ¹⁾					
		C _k (pF)				100			100		240	2000				2000					
		Z _m (Ω)				60			60		60	60				60					
f (MHz)				0,15	0,5	1,0	2,0	0,48	0,95	1,9	1,0	1,9	0,15	0,2	0,5	1,0	1,9	0,2	0,5	1,0	1,9
4		4	4	4	4	0,3	0,3	0,3	1		10	2	1	1	1	2	1	1	1	1	
5		10	4,5	8	8	0,5	0,3	0,3	1												
6			8	10		1,2	0,5	0,4	1	1	10	3	2	2	2	3	1	1	1	1	
7		22		13	15	1,6	0,7	0,5													
8						2,2	0,9	0,7	1,5	2,5	80										
9		32	13	25	20	2,6	1,0	0,8				4	3	3	4	7	2	2	2	2	
10		50	13		23	4,5	1,2	0,9	2	3	170										
11		6200	650		180							2000	90	40	40	2200	180	40	15	15	
12				260		100	9	7	200	40	180	2100	100	40	60	2400	180	40	18	18	
13				250		180	14	12													
14		9000	800		250	200	16	14	200	55	200										
15				310								2500	120	40	80	2900	250	50	18	18	
16						270	20	15	280	65	240										
18				440		400	90	260	400	90	260	3000	150	50	90	3200	280	60	20	20	
20		13000	1000	480	440	400	40	19	450	115	330	3500	200	70	110	4000	280	70	22	22	

¹⁾ Ein auf 1 MHz abgestimmter Sperrkreis war in die Hochspannungszuleitung eingebaut.

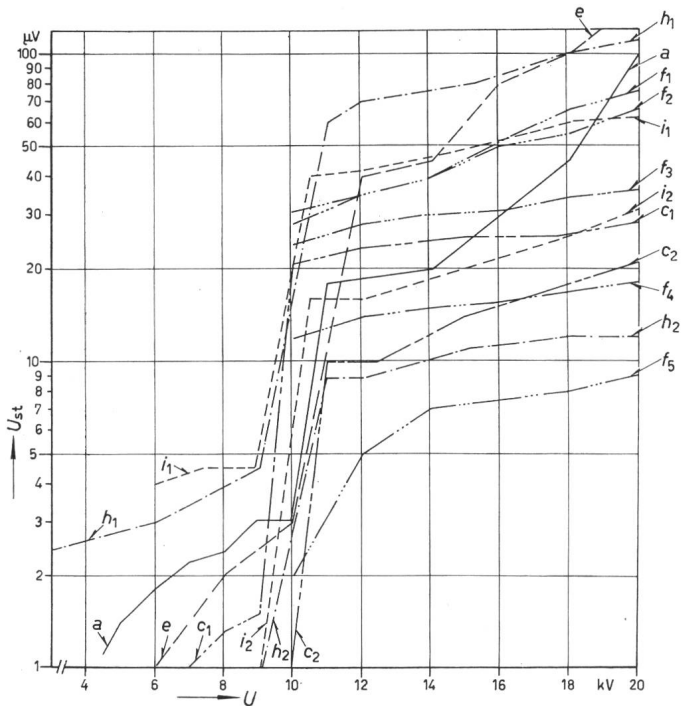


Fig. 6

Mit dem Störspannungs-Messgerät «Bamberg», Typ HFM, aufgenommene Messwerte
 $f = 1,9$ MHz; U_{st} Störspannung; U an Normal angelegte Wechselspannung

Kurve	Mess-laboratorium	Schal-tung	Kopplungs-kondensator C _k	Mess-wider-stand Z _m	Sperrkreis für 1,9 MHz in Hochspannungs-zuleitung
a	A	1	1000 pF		nein
c ₁	C	1	800 pF		ja
c ₂	C	3	—		ja
e	E	2	100 pF		nein
f ₁	F	1	2490 pF		nein
f ₂	F	1	1675 pF		nein
f ₃	F	1	850 pF	60 Ω	nein
f ₄	F	1	150 pF		nein
f ₅	F	1	50 pF		nein
h ₁	H	1	2000 pF		nein (1 MHz)
h ₂	H	2	2000 pF		nein (1 MHz)
i ₁	I	1	—		nein
i ₂	I	3	500 pF		nein

wird in allen Fällen richtig angegeben (wenn vielleicht Kurve f_5 ausser Betracht bleibt, bei deren Aufnahme die Kapazität des Kopplungskondensators sehr klein gewählt war). Dagegen bleibt der feine Einsatz der Spitzenentladung teils unerkannt, was an einem zufallsweise oder wegen ungenügender Raumschirmung erhöhten Fremdstörniveau oder am Fehlen eines Oszillographen am Geräteausgang liegen mag.

In Anbetracht des grossen Umfanges der mit dem «Siemens»-Messgerät, Typ STTM 3840, ausgeführten Messungen ist ein grösserer Teil der Resultate unter Kennzeichnung der jeweiligen Parameter in tabellarischer Übersicht wiedergegeben (Tab. IV). Vergleiche untereinander sind wegen der unterschiedlichen Versuchsbedingungen nur mit grosser Zurückhaltung möglich. Den Einfluss der Grösse des effektiven Messwiderstandes auf die gemessenen Störspannungswerte lassen die Messungen der Teilnehmer G und H erkennen (Tab. V). Mit der Messreihe für $Z_m = 600 \Omega$ von Teilnehmer H ist recht gut die von Teilnehmer A gemäss Tab. IV für einen nur wenig kleineren Messwiderstand ($Z_m = 520 \Omega$) vergleichbar. Die Unterschiede in den Messwerten sind unbedeutend.

Die in Meßschaltung a von zwei Teilnehmern mit dem Messgerät der Fa. Hivolt, Typ AC 2 ($f = 500$ kHz, $C_k = 1000$ pF),

Störspannungswerte, ermittelt mit einem Messgerät «Siemens», Typ STTM 3840

Tabelle V

Spannung (50 Hz) kV	Störspannung (μV)							
	Teilnehmer G (Schaltung a, $f = 150$ kHz, $C_k = 240$ pF)			Teilnehmer H (Schaltung a, $f = 1$ MHz, $C_k = 2000$ pF)				
	$Z_m = 2340 \Omega$	$Z_m = 600 \Omega$	$Z_m = 60 \Omega$	$Z_m = 600 \Omega$	$Z_m = 300 \Omega$	$Z_m = 150 \Omega$	$Z_m = 60 \Omega$	
5	7	1,5	1					
6	10	2,8	1	17	9	3	2	
8	2400	1000	50					
9				25	14	8	3	
10	3800	1100	170					
11				200	180	65	35	
12	4700	1250	180	220	180	80	35	
15	6500	1500	220	300	200	100	40	
18				400	230	140	45	
20	9500	2600	300	420	300	150	60	

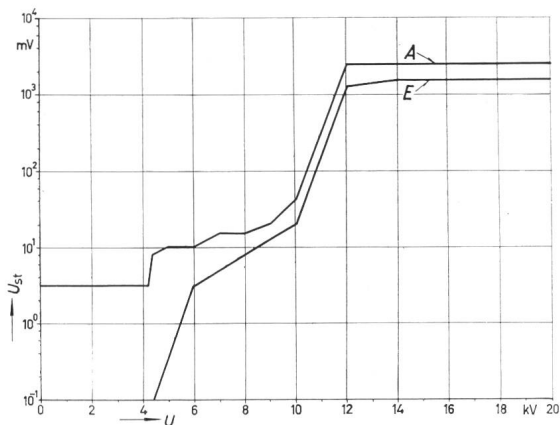


Fig. 7

Mit dem Hivolt-Gerät, Typ AC 2, erhaltene Störspannungswerte
Schaltung a, $f = 500 \text{ kHz}$, $C_k = 1000 \text{ pF}$

A Kurve der Messwerte von Teilnehmer A; E Kurve der Messwerte von Teilnehmer B; U_{st} Störspannung; U an Normal angelegte Wechselspannung

ermittelten Scheitelwerte der Ionisationsimpulse (in mV) sind in Fig. 7 angegeben. Eine weitgehende Übereinstimmung der beiderseitigen Messwerte darf konstatiert werden. Das Gerät gibt auch die Vorgänge im Bereich des feinen Einsatzes korrekt an. Ein direkter Vergleich der «Hivolt»-Messwerte etwa mit denen, die mit den Geräten «Siemens» oder «Bamberg» erhalten wurden, ist wegen der andersartigen Meßschaltung und Geräteeichung nicht möglich. Als ungefährer Anhalt mag dienen, dass die in Millivolt angegebenen «Hivolt»-Werte den μV -Werten der «Siemens»- oder «Bamberg»-Geräte gleichwertig sind.

Die von Teilnehmer H zusätzlich mit dem Messgerät der Sté Belge Radio-Elect. in Meßschaltung a bei $f = 1 \text{ MHz}$, $Z_m = 300 \Omega$, $C_k = 2000 \text{ pF}$, Sperrkreis in Hochspannungszuleitung, erhaltenen Messwerte sind in Tab. VI zusammengestellt.

Störspannungswerte, ermittelt mit einem Messgerät der Sté Belge Radio-Electr.

Tabelle VI

Spannung (50 Hz) kV	6	9	11	12	15	18	20
Störspannung μV	5	10	250	250	250	280	300

Nur die stärkere Störung wurde erfasst, diese aber mit einer den zuvor angeführten Messungen vergleichbaren Empfindlichkeit.

Die von Teilnehmer B mit dem Messgerät der Fa. Schwarzbeck, Typ FSTME 6112, in Meßschaltung a bei $f = 490 \text{ kHz}$, $Z_m = 150 \Omega$, $C_k = 1000 \text{ pF}$, angegebenen Messwerte sind in Tab. VII angeführt.

Störspannungswerte, ermittelt mit einem Messgerät der Fa. Schwarzbeck

Tabelle VII

Spannung (50 Hz) kV	4,4	5,0	6,2	7,2	9,0
Störspannung μV	2,1	2,0	2,5	2,7	2,7

Da keine höhere Spannung angelegt wurde, lässt sich aus diesen Unterlagen die Eignung des verwendeten Messgerätes kaum beurteilen.

Die von Teilnehmer G mit dem Gerät R.C.T. in Messschaltung a bei $f = 130 \text{ kHz}$, $Z_m = 2800 \Omega$, $C_k = 240 \text{ pF}$, erhaltenen Messwerte zeigt Tabelle VIII.

Störspannungswerte, ermittelt mit einem Messgerät der R.C.T.

Tabelle VIII

Spannung (50 Hz) kV	8,5	9	10	12	15	20
Störspannung μV	200	350	400	440	650	1050

Das speziell für Ionisationsmessungen an Maschinenwicklungen entwickelte Gerät lieferte somit Werte, die mit der Masse der übrigen durchaus vergleichbar sind. Die feine Störung bei rd. 5 kV wurde mit ihm nicht erkannt.

8. Vergleichende Betrachtung der Messresultate

Aus der im vorstehenden nach Messgeräten gegliederten Wiedergabe der beim Rundversuch erhaltenen Messresultate lassen sich noch folgende Aussagen über gewisse spezielle Abhängigkeiten von der Grösse des Messwiderstandes, des Kopplungskondensators und der Messfrequenz machen:

Wie beispielsweise die nähere Betrachtung der in Tab. V der von Teilnehmer G für drei Messwiderstände, die im Verhältnis 39 : 10 : 1 stehen, ermittelten Störspannungswerte, oder die des Teilnehmers H für ein Verhältnis der Messwiderstände von 10 : 5 : 2,5 : 1, ergibt, sind die gemessenen Störspannungen in beiden Fällen ziemlich genau proportional dem Ohmwert des Messwiderstandes. Die Abweichungen liegen innerhalb der anzunehmenden Messgenauigkeiten.

Ein deutlicher Einfluss des Kopplungskondensators zeigte sich bei den Messungen in Schaltung a von Teilnehmer F (Fig. 6, Kurven $f_1 \dots f_5$). Sinkt die Kapazität auf wenige hundert Picofarad ab, so muss mit einer merklichen Verkleinerung des gemessenen Störspannungswertes gerechnet werden; Werte um ca. 100 pF müssen als unbefriedigend klein taxiert werden.

Die ja nur mit dem «Siemens»-Gerät mögliche Erfassung der Frequenzabhängigkeit wurde von mehreren Teilnehmern unternommen. Die vergleichende Betrachtung der in Tab. IV angeführten Zahlenwerte lässt erkennen, dass in den untersuchten Schaltungen die Störspannungen bei einer Vergrößerung der Messfrequenz kleiner werden. Im untersuchten Bereich von 0,15 bzw. 0,2 MHz bis zu 2 MHz mag in grober Näherung gelten, dass die Störspannungen umgekehrt proportional dem Quadrat der Messfrequenz sind⁵⁾. Doch ist daran zu erinnern, dass bei solch hohen Frequenzen bereits kleine Änderungen im Schaltungsaufbau und damit natürlich auch die Art der Meßschaltung eine grosse Rolle spielen, so dass die hier gegebene Regel nur die generelle Abhängigkeit anzugeben vermag. Auch die Eigenheiten des Normals — Einfluss seiner Induktivitäten — spielen eine erhebliche Rolle. Aber auch ohne die speziell eingefügte Drosselspule wäre die Störspannung im untersuchten Frequenzbereich wohl kaum konstant.

Die Angaben in Tab. IV, Teilnehmer H, sind wahrscheinlich wie folgt zu erklären: Der verwendete Sperrkreis ist auf 1 MHz abgestimmt. Der Frequenzgang des Sperrkreises ist zwar nicht bekannt, doch ist sicherlich die Impedanz der Sperre ober- und unterhalb von 1 MHz erheblich kleiner als bei diesem Wert. Bei einer anderen Frequenz als 1 MHz fliesst daher ein merklicher Anteil des Störstromes über den Prüftransformator unter

⁵⁾ Auf eine Abhängigkeit dieser Form hatte auch schon J. Meyer de Stadelhofen, PTT, aufmerksam gemacht.

entsprechender Reduzierung des Stromes über den Kopplungskondensator. Schaltung b (Fig. 1) ist empfindlicher. Bei höheren Frequenzen macht sich die Streukapazität zum Messwiderstand stärker bemerkbar, welche bei Ankopplung am Ionisationsnormal grösser sein dürfte (ausgedehnte Erdungsplatte), deshalb kann dann unter Umständen die Schaltung a empfindlicher sein.

Bei 1,9 MHz sind die Messwerte in Schaltung a, gemessen mit dem «Siemens»-Gerät, rund viermal grösser als in Schaltung b. Die Messungen mit dem «Bamberg»-Gerät ergeben vergleichsweise ungefähr den Faktor 5, was als gute Übereinstimmung anzusehen ist.

Der Vergleich der Messungen von Teilnehmer D und E in Tab. IV zeigt, dass die Schaltung a mit einem Kopplungskondensator von 100 pF bereits recht unempfindlich misst, da dann die parasitären Kapazitäten von annähernd gleicher Grösse einen beträchtlichen Teil des Störstromes übernehmen. In der Erdleitung des Prüfobjekts (Schaltung c in Fig. 1) misst man unter diesen Umständen natürlich mehr.

9. Betrachtung des Einflusses der Schaltungsgrössen

Zum besseren Verständnis der bei den verschiedenen Messungen festgestellten Abhängigkeiten sei im folgenden der Messkreis etwas eingehender betrachtet (Fig. 8).

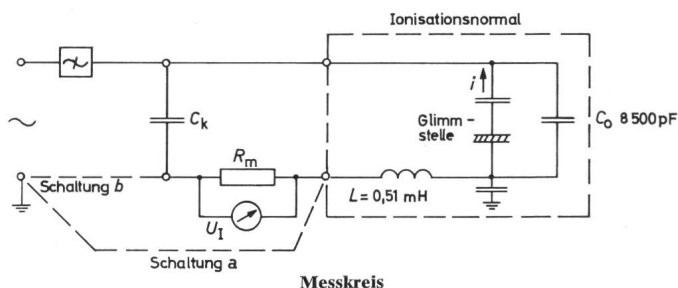
Wie in Abschnitt 2 erläutert, sind die aus der Glimmstelle austretenden Stromimpulse von sehr kurzer Dauer in der Grössenordnung von 10^{-8} s und angenähert darf ihnen ein Spektrum konstanter Amplitude bis zu Frequenzen von einigen MHz zugeordnet werden. Für den Bereich der hier betrachteten Messfrequenzen darf deshalb mit dem gleichen Strom i aus der Glimmstelle bei konstanter angelegter Hochspannung am Normal gerechnet werden. Der Strom i teilt sich auf die beiden Zweige C_0 mit der Impedanz Z_0 und $L - R_m - C_k$ mit der Impedanz Z auf. Dies gilt sowohl für Schaltung a als auch Schaltung b nach Fig. 1, wobei für die Messimpedanz der Wert R_m einzusetzen ist. Für Schaltung c ohne Sperre ist C_k die Eingangskapazität des Speisetransformators. Für den Strom i_z durch Z gilt:

$$i_z = \frac{i}{1 + Z/Z_0} \quad (1)$$

Daraus folgt für die am Messwiderstand abgegriffene Spannung U_I :

$$U_I = i_z R_m = i \frac{R}{1 + j\omega C_0 (j\omega L + R_m + \frac{1}{j\omega C_k})} \quad (2)$$

Bei einer Messfrequenz von $f = 1$ MHz, einem Koppelkondensator von $C_k = 1000$ pF und einem Messwiderstand $R_m = 500 \Omega$ ergibt sich z. B.:



Messkreis
Fig. 8

C_0 Kondensator im Ionisationsnormal; L Drosselspule im Ionisationsnormal; R_m Widerstand parallel zum Ionisationsmessgerät U_I
 C_k Kopplungskondensator; i Glimmstrom

$$\begin{aligned} C_0 &= 8500 \text{ pF} & Z_0 &= -j 19 \Omega \\ L &= 0,51 \text{ mH} & Z_L &= j 3200 \Omega \\ R_m &= 500 \Omega & R_m &= 500 \Omega \\ C_k &= 1000 \text{ pF} & Z_{C_k} &= -j 160 \Omega \end{aligned}$$

In diesem Bereich gilt, da $|Z_L| > |R - jZ_{C_k}|$ und $|Z/Z_0| > 1$ ist, angenähert:

$$|U_I| \approx \frac{R}{\omega^2 C_0 L} \quad (3)$$

Die Formel bestätigt die Proportionalität der gemessenen Störspannung zum Messwiderstand und zum Reziprokwert des Quadrates der Frequenz. Die erste Abhängigkeit gilt allgemein, die zweite jedoch nur für Kreise von ähnlichem Aufbau wie das vorliegende Ionisationsnormal.

Der in der Messung F in Schaltung a ohne Sperre festgestellte Einfluss des Koppelkondensators C_k ist aus der Grundsichtung heraus zunächst nur für sehr kleine Werte von C_k zu verstehen. Die fehlende Sperre und der Einfluss der Streukapazität von der Plattenelektrode der Glimmstelle gegen Erde ergeben jedoch zwei Nebenwege für den Glimmstrom i am Koppelkondensator C_k und dem Messgerät vorbei, die sich bei Werten von $C_k < 1000$ pF im Absinken der gemessenen Störspannung U_I bemerkbar machen.

10. Schlussfolgerungen

Aus den mitgeteilten Messergebnissen des Ionisations-Rundversuchs ergeben sich die folgenden Feststellungen:

10.1 Zur Feststellung und Ausmessung der inneren Ionisation werden in der Schweiz Schmalband-Messgeräte verwendet. Sie haben sich in der Praxis insbesondere wegen ihrer relativen Unempfindlichkeit gegen Störeinflüsse gut bewährt und ermöglichen zuverlässige Messungen.

10.2 Mit den meisten handelsüblichen Geräten lassen sich vor allem wenn am Ausgang des Anzeigeinstrumentes noch ein Lautsprecher oder ein Oszillograph angeschaltet wird, recht empfindliche und vielfach auch gut reproduzierbare Messungen durchführen, mit denen selbst schwache Ionisation noch in Objekten mit Kapazitäten der Grössenordnung 10^4 pF festgestellt werden kann. So gestattet die empfindlicheren Messeinrichtungen eine zuverlässige Festlegung des nur leichten Ionisationseinsatzes beim vorliegenden Normal.

In nichtgeschirmten Messräumen mag es dazu notwendig sein, auf günstige Messzeiten auszuweichen. Die Störgrösse darf allerdings auf ihrem Weg, vom Ursprung bis zu den Messanschlüssen, nicht zu stark gedämpft oder abgeleitet werden.

10.3 Die häufigste in den schweizerischen Laboratorien verwendete Schaltung ist der NEMA-Kreis mit einem Kopplungskondensator von 1000 oder mehr pF parallel zum Objekt und mit einem Messwiderstand in dessen Erdleitung. Die Zuleitung von der Hochspannungsquelle ist dabei meistens für das betrachtete Hochfrequenzband durch eine Sperre abgeriegelt.

10.4 Die gemessenen Störspannungen sind dem Ohmwert des Messwiderstandes direkt proportional. Beim verwendeten Ionisationsnormal sind sie bis zu Frequenzen von ca. 2 MHz angenähert umgekehrt proportional zum Quadrat der Messfrequenz.

Über die messtechnische Seite der Ionisation dürfte damit ein erster Überblick gewonnen sein, der wertvolle Anregungen bietet. International wird bereits im Rahmen des Comité d'Etudes 42 der CEI⁶⁾, Hochspannungsprüftechnik, an Empfehlungen für Ionisationsmessungen gearbeitet.

Allen beteiligten Laboratorien und ihren Mitarbeitern dankt der Arbeitsausschuss an dieser Stelle herzlich für die Durchführung der Versuche. Besonderer Dank gebührt Dipl.-Ing. H.-J. Vorwerk vom Hochspannungs-Versuchslokal der AG Brown, Boveri & Cie. für die Mitarbeit bei der Durchführung des Rundversuches und seine Hilfe bei der Sichtung und Auswertung der Messresultate.

⁶⁾ CEI = Commission Electrotechnique Internationale.

Adressen der Autoren:

E. Buchmann, dipl. Elektrotechniker, Kabelwerke Brugg AG, Klosterzelgstrasse 1058, 5200 Brugg; Dr. B. Gänger, Abteilungsvorstand des Hochspannungsversuchslokals, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden; Dr. sc. techn. A. Goldstein, Assistent der Technischen Direktion A, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.