

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 63 (1972)  
**Heft:** 11

**Artikel:** Internationales Symposium Hochspannungstechnik :  
Zusammenfassung  
**Autor:** Zaengl, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915696>

### **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:** 02.02.2025

**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)

## Internationales Symposium Hochspannungstechnik

vom 9. bis 14. März 1972 in München

### Zusammenfassung

Von *W. Zaengl*, Zürich

621.3.027.3:061.3

#### 1. Allgemeines

Der wissenschaftliche Ausschuss des Vereins Deutscher Elektrotechniker (VDE) veranstaltete in Zusammenarbeit mit der IEEE Power Engineering Society an der Technischen Universität in München erstmalig ein «Internationales Symposium Hochspannungstechnik». Mit dieser Tagung wurde das Ziel verfolgt, die derzeit aktuellen Themen dieses Fachgebietes vornehmlich aus der Sicht theoretischer und experimenteller Erkenntnisse zu behandeln, ohne dabei aber die anwendungstechnischen Probleme völlig zu vernachlässigen. Zweifellos hatten die Veranstalter auch die Absicht, den industriell unabhängigen Forschungsstätten auf dem Gebiete der Hochspannungstechnik, also in erster Linie den Technischen Hochschulen und Universitäten, in einem grösseren Masse als dies bei den regelmässig stattfindenden CIGRE-Tagungen möglich ist, die Gelegenheit zu geben, ihre Forschungs- und Entwicklungsergebnisse zur Diskussion zu stellen.

Zu diesem Symposium wurden insgesamt 93 Arbeiten aus 18 Ländern eingereicht, die in einem Band, der allen Teilnehmern rechtzeitig vor der Tagung zur Verfügung stand, zusammengefasst sind. Auf der Tagung wurde ausschliesslich über diese Beiträge diskutiert. Da sämtliche Diskussionen von der Mehrheit der Tagungsteilnehmer mit Aufmerksamkeit und reger Anteilnahme mitverfolgt wurden, kann der Erfolg dieses Symposiums nicht in Frage gestellt werden.

Mit Sicherheit wird ein grosser Teil der eingereichten Beiträge in den verschiedensten Fachzeitschriften veröffentlicht werden. Um jedoch einige wesentliche Ergebnisse auch einem erweiterten Interessentenkreis schnell zugänglich zu machen, wird nachfolgend eine kurze Zusammenfassung gegeben, ohne dabei auf die speziellen Beiträge oder deren Verfasser selbst einzugehen. Nicht behandelt werden dabei die vorgetragenen Übersichtsvorträge.

#### 2. Berechnung und Messung elektrischer Felder und Feldstärken

Wenn auch heute noch die allgemein bekannten analogen Feldmessmethoden zur Ermittlung der Felder von komplizierten Feldanordnungen verwendet werden, so liegt dies

ausschliesslich daran, dass noch nicht überall Digitalrechner hoher Leistungsfähigkeit oder hochwertige Rechenprogramme für Feldberechnungen zur Verfügung stehen. Die Zukunft der Feldberechnung liegt wohl ausschliesslich bei der digitalen Rechentechnik. Drei prinzipielle Rechenverfahren werden heute angewandt: Das Verfahren der «finiten Elemente», die Methode der «finiten Differenzen» (üblicherweise kurz «Differenzen-Verfahren» genannt) und das «Ladungsverfahren». Jedem Prinzip haften Mängel an, die stets mit der Grösse beziehungsweise der Divergenz des zu berechnenden Feldraumes einerseits und der Schnelligkeit sowie der Speichergrösse des verwendeten Digitalrechners andererseits zusammenhängen. Universelle Rechenprogramme müssen sorgfältigst programmiert sein, und deshalb besitzen spezifische, auf die zu bearbeitenden Probleme zugeschnittene Programme noch manche Vorteile. Am universellsten dürfte das Verfahren der «finiten Elemente» anwendbar sein, da die Dichte der Gitterpunkte relativ einfach den Randbedingungen angepasst werden kann. Ein Ziel der Entwicklungen besteht auch darin, die Randbedingungen (Elektrodenformen) nach vorgegebenen Kriterien (Feldstärken) automatisch abzuwandeln.

Die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Isolierstofftechnik können trotz dieser grossen Möglichkeiten zur digitalen Feldberechnung nicht auf Feldstärkemessungen an der untersuchten Isolieranordnung selbst verzichten, da die letzte Phase des Durchschlagvorganges fast ausnahmslos von Raumladungs- oder instabilen Leitfähigkeitsprozessen begleitet wird. Man muss daher Feldstärkemessungen an Teilausschnitten der Elektrodenanordnungen oder in den Isoliermedien selbst vornehmen. Die erste Aufgabe wird heute mit Hilfe der «Proben-Technik» bei transienten Spannungen oder mit extrem klein gebauten Feldmühen bei Gleich- und Wechselspannungen, also ruhenden oder bewegten Elektrodenausschnitten, gelöst, da mit der modernen Halbleiter-Verstärkertechnik die oftmals sehr kleinen Ströme oder Ladungen erfasst werden können. Die schon recht alte Fragestellung, wie gross die Feldstärke auf glimmenden Leiterseilen ist, konnte beispielsweise mit einer abgewandelten Feldmühlentechnik gelöst werden. Für die Feldstärkemessungen im Isoliermedium selbst wurden hingegen Kugelsonden von



4 bis 5 cm Durchmesser entwickelt, in welche die Messverstärker und -sender unmittelbar eingebaut sind; die Messwerte werden entweder elektromagnetisch oder optisch auf Erdpotential übertragen.

### 3. Erzeugung und Messung hoher Spannungen in Laboratorien

Bekanntlich stehen für die Erzeugung extrem hoher Spannungen aller Arten (Gleich-, Wechsel- und Stoßspannungen) bewährte Prinzipien zur Verfügung.

Die bei der Wechselspannungserzeugung angewandte Technik der Kaskadenschaltung von Einzeltransformatoren stösst jedoch bei Spannungen im Bereich von beispielsweise 2 MV auf nicht unerhebliche Schwierigkeiten. Diese werden einerseits durch die für die Prüftransformatoren dann notwendigen hohen Leistungen und andererseits durch die ungünstige Spannungsaufteilung und die damit verbundenen Überspannungen an den Einzelstufen verursacht. Für Prüfkaskaden wird daher ein mehr als 3stufiger Aufbau fast immer mit nicht unerheblichen Nachteilen verbunden sein, so dass für die zukünftigen Höchstspannungslaboratorien bei Spannungen mit 2 bis 2,4 MV vorzugsweise leistungsstarke Einzeltransformatoren für 700 bis 800 kV zum Einsatz kommen dürften.

Auf dem Gebiete der Stoss-Spannungserzeugung wurde über einen bemerkenswerten Generator nach dem Marx-Prinzip berichtet, der in einer sehr gedrängten Modul-Bauweise aufgebaut ist. Sein Einsatzgebiet beschränkt sich auf Spezialanwendungen, wo sehr kurze Stirnzeiten und ein extrem kleiner Jitter notwendig sind.

Von grossem Interesse für alle Prüffelder und auch Forschungslaboratorien wird eine neuartige triggerbare Mehrfachfunkenstrecke sein, die auch bei sehr hohen Blitz- oder Schaltstoßspannungen eine Abschneidung der Stosswellen mit sehr kleiner Streuung ermöglicht. Da diese Baueinheit gleichzeitig als Belastungskapazität und auch als einfacher Spannungsteiler verwendet werden kann, wird sie sicherlich ein integrierter Bestandteil vieler Stossanlagen werden.

Von den auf dem messtechnischen Gebiet diskutierten neuen Entwicklungen sei ein Pressgaskondensator für 1,2 MV und SF<sub>6</sub>-Isolation erwähnt, der von einer vereinfachten und daher nur mehr beschränkt abgeschirmten Elektrodenanordnung Gebrauch macht. Die Messunsicherheit bezüglich der Kapazität wird mit  $\pm 0,3\%$  angegeben, und der Verlustfaktor kann in ungünstigen Fällen bis auf  $10^{-4}$  ansteigen. Trotzdem dürfte diese vereinfachte und daher auch wirtschaftliche Konstruktion eine Lücke zwischen den üblichen Pressgaskondensatoren und ölisolierten Hochspannungskondensatoren schliessen.

### 4. Durchschlagsvorgänge in Luft und anderen Gasen

Naturgemäss lag auf dem Gebiet des Gasdurchschlages eine Fülle von Arbeiten vor. Behandelt wurden insbesondere die Phänomene des Luftdurchschlages bei Schaltstoss- und Mischspannungen und grossen Schlagweiten sowie Durchschlagsvorgänge in Schwefelhexafluorid. Hier seien wiederum nur wenige, bemerkenswerte Beiträge erwähnt:

Das aus der Anwendung von Kugelfunkenstrecken als Messfunkenstrecken her bekannte definierte und nur mit geringen Streuungen behaftete Ansprechverhalten wird durch

Messungen der Durchschlagsspannungen an einer 25-cm-Kugelfunkenstrecke bei 6 cm Schlagweite in Abhängigkeit der Steilheit der angelegten Stoßspannung stark in Frage gestellt. Im Gegensatz zu den bekannten, mit kleinen Streuungen behafteten Durchschlagswerten, die man erzielt, wenn ausschliesslich mit Zündfunkenstrecken arbeitende Stossgeneratoren zur Spannungserzeugung verwendet werden, wurde hier die Stoßspannung mit impulserregten Transformatoren erzeugt und keinerlei zusätzliche Bestrahlung der Funkenstrecke mit UV-Licht angewandt. Die Durchschlagsspannung dieser Kugelfunkenstrecke kann dann bis zum Doppelten der bekannten statischen Ansprechspannung (von ca. 160 kV), also einem unvorstellbar hohen Wert, ansteigen. Diese starken Streuungen treten vor allem bei Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten von  $< 1,5 \text{ kV}/\mu\text{s}$  auf. Die Ursache liegt eindeutig am Anfangsladungsträgermangel zum Zeitpunkt der hohen Feldbeanspruchung, der im Falle der üblichen Stossgeneratoren mit Zündfunkenstrecken und der damit verbundenen Ionisierungsstrahlung nicht auftritt.

In einer sehr umfangreichen Untersuchung wurden die Paschen-Kurven und die Gültigkeitsgrenzen der bekannten Paschen-Abhängigkeit in reinem SF<sub>6</sub> bei Gleich- und Wechselspannungen im Bereich bis 750 kV bekanntgemacht. Die Grenzen der einheitlichen ( $p \cdot d$ )-Abhängigkeit werden durch die Gasdichte  $p$ , die Schlagweite  $d$ , das verwendete Elektrodenmaterial und die Spannungsart beeinflusst. Die Minimumspannung von 507 V liegt bei einem ( $p \cdot d$ )-Wert von  $0,35 \text{ mbar} \cdot \text{cm}$ . Vergleichende optische Untersuchungen über die Durchschlagskanalentwicklung in SF<sub>6</sub> und Luft zeigen die starken Unterschiede dieser beiden Gasarten. Die zeitliche Entwicklung der Durchschlagskanäle in SF<sub>6</sub> besitzt eine starke Ähnlichkeit mit der Blitzkanalentwicklung, wenn man sich die geometrischen Abmessungen des Feldraumes gewaltig verkleinert vorstellt.

### 5. Durchschlagsvorgänge in festen, flüssigen und gemischten Isolierstoffen

Während die Durchschlagsvorgänge bei den Isoliervgasen doch wenigstens schon teilweise rechnerisch im Zusammenhang mit den bekannten physikalischen Parametern erfasst werden können, so zeigen die Untersuchungen bei den nicht gasförmigen Isolierstoffen einmal mehr die Komplexität der Vorgänge und den noch bestehenden grossen Mangel an Kenntnissen über die physikalischen Einzelheiten, welche die Durchschlagsvorgänge exakt bestimmen. Als wesentlich neue Grösse bei den festen oder gemischten Isolierstoffen tritt der Alterungsprozess hinzu, der wohl weitgehend durch chemische Veränderungen verursacht wird und mit Sicherheit nur an sehr inhomogen verteilten Stellen des Isolierstoffes wirksam auftritt. Die Parameter, die den Durchschlagprozess bestimmen, werden daher extrem gross.

Die vorgelegten Arbeiten bei den Feststoffisolierungen befassten sich mit dem ungünstigen Einfluss mechanischer Spannungen auf die Isolierfestigkeit mit Abhängigkeiten der Kanaleinsatz- und Durchschlagzeiten bei inhomogenen Elektrodenanordnungen (Nadel-Test) und verschiedenen Isolierstoffen mit ergänzenden Untersuchungen zur Theorie der Raumladungs- und der Nebendurchschläge. Polyäthylen- und Öl-Papier-Dielektrika wurden bei tiefen Temperaturen, vorwiegend bei hohen Gleichspannungen untersucht, um



Kennwerte für die viel diskutierte Energieübertragung auf Kabelstrecken bei tiefen Temperaturen zu erhalten.

Bei Isolierölen konnte ein recht eindeutiger Nachweis dafür erbracht werden, dass die Vorgänge in der Gasphase bei dem stets gegebenen Gasgehalt im Öl die elektrische Festigkeit sehr entscheidend beeinflussen. Besonders deutlich ist dieser Einfluss bei inhomogenen Feldanordnungen sichtbar, da vor allem das Teilentladungsverhalten stark von der Gasart abhängig ist.

Weitere Beiträge betrafen das Verhalten von Grenzschichten, insbesondere das Fremdschicht- oder Verschmutzungsproblem. In einer stark diskutierten Arbeit wird gezeigt, dass offenbar die elektrische Festigkeit verschmutzter Oberflächen durch potentialsteuernde Metallringe wesentlich verbessert werden kann. Diese vor allem bei Gleichspannungen vorgenommenen Untersuchungen lassen auch bei Wechselspannungsbeanspruchungen ein verbessertes Verhalten erkennen. Sollten die weiteren Versuche an Freileitungs-Isolatoren diese Ergebnisse in der Praxis bestätigen, so wäre damit ein sehr wünschenswerter Beitrag zur Verbesserung des Fremdschichtverhaltens geleistet.

### 6. Unterirdische Hochleistungsübertragung

Zu diesem hochaktuellen Problem lagen mehrere Untersuchungen vor, die zum Ergebnis kamen, dass das SF<sub>6</sub>-isolierte Rohrgaskabel auf jeden Fall bei Übertragungsleistungen ab ca. 2000 MVA notwendig wird, aber auch schon bei wesentlich kleineren Leistungen und Übertragungsspannungen ab ca. 132 kV wirtschaftlich eingesetzt werden kann. In diesem Zwischengebiet hängt die Entscheidung davon ab, inwieweit konkurrenzfähige Lösungen für künstlich gekühlte konventionelle Kabelstrecken erstellt werden. Besprochen wurden in erster Linie die Schwierigkeiten bei den SF<sub>6</sub>-Rohrgaskabeln im Zusammenhang mit deren Montage bei ungünstigen Witterungsbedingungen und die Einflüsse der Fremdstoffpartikel in den Rohrleitern.

### 7. Anwendung hoher Spannungen in der physikalischen Forschung

Wegen der teilweise engen Zusammenarbeit von Hochspannungsinstituten mit physikalischen Forschungsstätten wurde dieses Thema abschliessend in das Programm des Symposiums aufgenommen. Der Physiker stellt häufig extreme Anforderungen an die technischen Apparaturen unter Verzicht auf die Lebensdauer der Einrichtungen. Die dabei erzielten Resultate sind aber dennoch von allgemeinem Interesse, und es seien daher auch kurz hier einige Ergebnisse angegeben:

Schaltstrecken mit Feststoffisolierungen besitzen wegen des möglichen gedrängten Aufbaues extrem niedrige Induktivitäten und sind auch bezüglich der Schaltzeiten den gas- oder flüssigkeitsisolierten Schaltgeräten überlegen. So kann ein Feststoffschalter bei 500 kV Ströme von 300 kA in einer Zeit von 3 ns schalten.

Wasser kann bekanntlich bei kurzzeitigen Spannungsbeanspruchungen sehr hohe Feldstärken ertragen und daher als Isoliermedium verwendet werden. Dünne Wasserschichten von 50 µm ergeben bei 1 µs Beanspruchungszeit Durchbruchfeldstärken von ca. 100 kV/mm, aber auch bei Schlagweiten von 1 bis 5 mm liegt die Durchschlagfestigkeit noch bei mehr als 20 kV/mm. So wurde über mehrere Anwendungsbeispiele für Isolierungen bis 1 MV berichtet.

Für das Studium von Gasentladungen dürfte jene Arbeit von Interesse sein, welche den Nachweis erbringt, dass man räumlich sehr definierte und reproduzierbare Durchschlagkanäle in Gasen erhalten kann, wenn man in den Elektrodenraum einen Gasstrahl mit kleinerer Durchschlagfestigkeit injiziert. Diese ausgezeichnete Reproduzierbarkeit wurde dazu benützt, die Temperaturverteilung in einem Argon-Plasma kanal durch die bekannten Methoden der Plasma-Diagnostik zu bestimmen.

#### Adresse des Autors:

Prof. Dr. *Walter Zaengl*, Laboratorium für Hochspannungstechnik der ETHZ, Gloriastrasse 35, 8006 Zürich.