

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: 66 (1975)

Heft: 22

Rubrik: Zusammenfassung der Themen und Diskussionsbeiträge

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: 16.03.2025

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

able within the immediate future, which will make a large multiterminal system more attractive.

It is also possible that the energy crises has influenced the realization of long bulk power transmissions. Due to the crisis, it has been decided to develop remote located hydro-power resources or coal fields and to transport the electric power to the load centres by means of HVDC (Canada and USA). Other schemes are considered, too, e.g. to exploit fully the few narrow corridors available for transmission lines.

Realizing the possibilities of further development work within the HVDC field resulting in still better technique and economy, there are good reasons for expecting a lot of new schemes based on HVDC all over the world in the future.

Author's Address:

S. Smedsfelt, Swedish State Power Board, S-16287 Vällingby

Zusammenfassung der Themen und Diskussionsbeiträge

Verzeichnis der wissenschaftlichen Beiträge

Themengruppe 1: Berechnung elektrischer Felder

Diskussionsleiter: *H. Prinz*, München

Berichter: *H. Singer*, Hamburg

-
- 1.1 Rechenverfahren*
-
- 1.1-01 *B. Bachmann*, München: Numerische Berechnung von Mischfeldern
- 1.1-02 *G. B. Denegri, G. Molinari, A. Viviani*, Genova: A program for electric field computation using a finite difference method with curvilinear grid
- 1.1-03 *J. Deuse, P. Pirotte*, Liège: Three-dimensional electric field distribution near high-voltage lines
- 1.1-04 *F. Donazzi, G. Luoni, E. Occhini*, Milano: Automatic field calculation
- 1.1-05 *H. Froidevaux*, Lausanne: Une méthode par éléments finis pour le calcul de la distribution du potentiel électrostatique dans certains cas non-linéaires
- 1.1-06 *V. Hoppe*, Kopenhagen: A versatile field program based on the finite element method
- 1.1-07 *M. Khalifa Riyad, M. Abdel-Salam*, Assiut, Ägypten: Calculation of space charge effect on monopolar corona in air
- 1.1-08 *E. U. Landers*, München: Das koaxiale Zylinderfeld bei hoher Raumladungsdichte
- 1.1-09 *R. Leyvraz*, Zürich: Field calculation by an automatic and iterative grid generation with minimum discretisation error
- 1.1-10 *J. Planchard, M. Morin, G. Gallet*, Electricité de France: Améliorations mathématiques et informatiques de la méthode des charges équivalentes pour la résolution de l'équation de Laplace
- 1.1-11 *G. Praxl*, Graz: Freie Potentiale bei der Methode der finiten Elemente
- 1.1-12 *H. Singer*, Hamburg: Ein Rechenverfahren zur Auslegung von Steuerbelägen in Durchführungen und Kabelendverschlüssen
- 1.1-13 *P. Weiss*, Mannheim: Das Hochspannungsfeld von Trichter-electroden

1.2 Anwendung

- 1.2-01 *V. Andriamiharisca*, Lausanne, *E. Contalbrigo*, Cossonay: Analysis of the electrostatic field by the finite element method for a high voltage cable termination
- 1.2-02 *M. Khalifa, Riyad, M. Abdel-Salam, Assiut, F. Aly*, Cairo, *M. Abu-Seada*, Cairo: Electric fields at bundled conductors of high voltage transmission lines
- 1.2-03 *T. Misaki* und *H. Yamanoto*, Okayama, und *K. Itaka* und *T. Hara*, Osaka: Techniques for finite element analysis of 3-dimensional asymmetrical field distribution in SF₆ gas insulated cables
- 1.2-04 *E. Nasser, M. H. Ibrahim*, Cairo: Gradient computation by charge simulation
- 1.2-05 *P. Sarma Maruvada, N. Hyltén-Cavallius*, Québec: Capacitance and induced voltage calculations for some basic electrode configurations

- 1.2-06 *D. Utmischi*, München: Objekte unter UHV-Freileitungen
- 1.2-07 *P. Weiss*, Mannheim: Das elektrostatische Feld bei Reihen-anordnungen zweier Dielektrika

1.3 Optimierung

- 1.3-01 *B. Bachmann*, München: Optimierung von Isolieranordnungen durch Multitoroidsysteme
- 1.3-02 *W. Breilmann* und *T. Härder*, Darmstadt, und *D. König*, Ratingen: Anwendung des Differenzenverfahrens zur rechnergestützten Optimierung von koaxialen Isolatoren in metallgekapselten Hochspannungstrennschaltern mit SF₆-Gasisolierung
- 1.3-03 *H. Singer*, Hamburg, und *P. Grafoner*, Dortmund: Optimization of electrode and insulator contours

Themengruppe 2: Hochspannungsprüfanlagen

Diskussionsleiter: *J. J. Morf*, Lausanne

Berichter: *B. Staub*, Langenthal (2.1)

M. Aguet, Lausanne (2.2)

2.1 Hochspannungsgeneratoren

- 2.1-01 *H. Anis*, Cairo, und *N. Giau Trinh*, Québec: Effective performance of cascaded transformers in the generation of switching impulses
- 2.1-02 *F. Brändlin, K. Feser, H. Sutter*, Basel: An outdoor-impulse-generator for 5,6 MV
- 2.1-03 *J. M. Christensen, G. C. Crichton, I. W. McAllister, A. Pedersen, S. Vibholm*, Lyngby: A versatile automatic 1.2 MV impulse generator
- 2.1-04 *K. Feser*, Basel: A critical comparison of the characteristics of chopping gaps in the mega-volt-range
- 2.1-05 *P. Glaninger*, Wien: Stoßspannungsprüfung an elektrischen Betriebsmitteln kleiner Induktivität
- 2.1-06 *T. Harada, Y. Acshima, Y. Aihara*, Tokyo, und *T. Okamura* und *M. Hakoda*, Kyoto: A new voltage chopping system
- 2.1-07 *A. Lietti*, Lausanne: Radio frequency high voltage test equipment with very large power supply
- 2.1-08 *M. Modrusan*, Basel: Realisation of the prescribed exponential impuls currents for different kinds of test samples
- 2.1-09 *J. Moeller*, Bamberg: Metal-clad test transformer for SF₆-insulated switchgear
- 2.1-10 *A. Ramrus*, San Diego: High voltage triggered water switch

2.2 Hochspannungsprüfungen

- 2.2-01 *H. Bommer*, Bamberg: Suppression of partial discharges in a high-voltage test circuit by means of a tunable partial discharge rejection filter
- 2.2-02 *U. Brand, M. Marckmann*, Bamberg: Outdoor high-voltage compressed-gas capacitors using SF₆-insulated bushings with potential control
- 2.2-03 *I. Kuzhikin, W. Budowitsch*, Moskau: Untersuchung von Spannungsimpulsen bei Drahtexplosionen

- 2.2-04 *H. Schneider*, Wien: Ein neuer teilentladungsfreier Kabelendverschluss für Prüfzwecke
 2.2-05 *A. Veverka* und *B. Heller*, Prag: Conventional and cumulative function of the distribution of flash-overs

Themengruppe 3: Hochspannungsmesstechnik

Diskussionsleiter: *W. Zaengl*, Zürich
 Berichter: *Aa. Pedersen*, Lyngby DK

3.1 Spannungs- und Strommessmethoden

- 3.1-01 *A. Bertschinger*, *M. Brandestini*, Zürich: Impulse peak-voltmeter with a novel memory-circuitry
 3.1-02 *S. Crepaz*, *R. Manigrasso*, Milano: High-voltage measurements with pockels cells
 3.1-03 *G. A. Gertsch*, *D. Schlicht*, Zürich: Zur Genauigkeit der Messung von Höchstspannungen
 3.1-04 *T. Harada*, *Y. Aoshima*, Tokyo, und *T. Okamura* und *K. Hiwa*, Kyoto: 1 MV Universal voltage divider
 3.1-05 *Adolf J. Kachler*, Nürnberg: Contribution to the problem of impulse voltage measurement by means of sphere gaps
 3.1-06 *T. Kuono*, *S. Kato*, *K. Kikuchi* und *Y. Maruyama*, Tokyo: A new voltage divider covered with metal sheath and improved by frequency division method
 3.1-07 *R. Krawczynski*, Warsaw: Correction of the high voltage measuring system by means of LV transmission line
 3.1-08 *R. Malewski*, Quebec: An improvement of the tubular shunt

3.2 Teilentladungsmessung

- 3.2-01 *J. C. Bapt*, *C. Mayoux*, Toulouse: The insulation ageing by partial discharges, studied by means of a corona frequency analysis
 3.2-02 *I. A. Black*, Brighton: A pulse discrimination system for discharge detection in electrically noisy environments
 3.2-03 *S. Kärkäinen*, Helsinki: Multi-channel pulse analyser in partial discharge studies. Measuring methods and results of studies
 3.2-04 *Bohdan Luczynski*, Copenhagen: The measurements of the temporal development of fast discharge currents
 3.2-05 *D. Mayer*, Graz: Automatische Teilentladungsmessung und -registrierung für Langzeituntersuchungen an Isoliersystemen
 3.2-06 *H. Nieschwietz*, Nürnberg: Teilentladungs-Messungen bei Prüfungen mit hoher Gleichspannung an Stromrichtertransformatoren und HGÜ-Glättungsrosselspulen
 3.2-07 *Th. Praehauser*, Basel: The calibration of partial discharge (PD) measuring circuits accuracy and estimation of errors
 3.2-08 *P. H. Reynolds*, Plymouth: Partial discharge measuring techniques

3.3 Automatisierung: Potentialfreie Messmethoden; Unterdrückung von Störsignalen

- 3.3-01 *Elsayed A. H. Aly*, Cairo: New trends for current measurement in high voltage systems using lightguides
 3.3-02 *B. Beaumont*, *R. Baixas*, *G. Langibout*, Clamart-Renardières: Les mesures en potentiel flottant dans les laboratoires à haute tension
 3.3-03 *A. Bogucki*, *Z. Pilch*, *W. Winkler*, Gliwice, Polen: Übertragung und Unterdrückung von Störsignalen in Höchstspannungswandlern
 3.3-04 *P. Dubois*, *D. Girard*, *G. Langibout*, *J. H. Leroy*, Clamart-Renardières: Acquisition des données et conduite automatique d'essais en haute tension
 3.3-05 *K. Feser*, *R. Niederhauser*, Basel: Trend towards the automation of impulse voltage tests
 3.3-06 *V. Fister*, *A. Fischer*, Stuttgart: Selbsttätige Messwerterfassung und -verarbeitung bei Stoßspannungsversuchen
 3.3-07 *W. Hangauer*, *A. Johannsen*, *H. Lennartz* und *H. G. Kranz*, Aachen: Erfahrungen bei der Automatisierung des Betriebes und der Datenerfassung von Hochspannungs-Versuchsanlagen
 3.3-08 *Aa. Pedersen*, *P. B. Jorgensen*, *O. K. Knudsen* und *P. Moller*, Lyngby: A new device for automatized high voltage impulse testing – including registration and handling of test data
 3.3-09 *P. Wiesendanger*, Zürich: On-line-Erfassung und -Auswertung von Stoßspannungen mittels schnellem Analog-Digital-Converter und Minicomputer

Themengruppe 4: Durchschlag von Isoliergasen

Diskussionsleiter: *D. Kind*, Braunschweig
 Berichter: *W. Boeck*, Darmstadt (4.1 4.2)
G. Carrara, Mailand (4.3 4.4 4.5)

SF₆-Gasisolation

4.1 Gasentladungsphysik, Funkenaufbau und Durchschlagsverhalten von Rein- und Mischgasen

- 4.1-01 *R. G. Baumgartner*, Zürich: Breakdown characteristics of SF₆ and mixtures of SF₆ and N₂ in a coaxial cylinder system
 4.1-02 *W. Boeck*, Darmstadt: Die statistische Streuzeit bei Stoßspannungsbeanspruchung von SF₆-isolierten Gasstrecken
 4.1-03 *I. M. Bortnik*, *V. P. Vertikov*, Moscow: To the calculation of gaseous – SF₆-insulation
 4.1-04 *M. Khalifa*, Riyadh, *S. El-Oeibeiky*, Cairo, *M. Abdel-Salem*, Assiut: Calculating the positive spark-breakdown and pre-breakdown threshold voltages in compressed SF₆
 4.1-05 *A. Kurimoto*, *S. J. Dale*, *A. Aked* und *D. J. Tedford*, Strathclyde, Schottland: Impulse discharge characteristics in long non-uniform field gaps in low pressure SF₆
 4.1-06 *W. Mosch*, *W. Hauschild*, Dresden: Die elektrische Festigkeit als Grundlage für die Berechnung von Durchschlagvorgängen im SF₆
 4.1-07 *J. C. Paul*, Tripura, Indien: Effective field calculation of dielectric under the influence of electric and magnetic field and its influence on breakdown
 4.1-08 *W. Pfeiffer*, Darmstadt: Fortschritte bei der Untersuchung von Funkenentladungen in komprimiertem Schwefelhexafluorid
 4.1-09 *A. Rehn*, *A. Arnesen* und *Th. Ulriksen*, Trondheim: Breakdown in SF₆ with different voltage waveforms
 4.1-10 *I. Sander*, *P. Stritzke* und *H. Raether*, Hamburg: Spectroscopy of sparks. Measurements of electron densities and electron temperatures
 4.1-11 *S. Sangkasaad*, Zürich: Corona inception and breakdown voltage in nonuniform fields in SF₆
 4.1-12 *W. Schmidt*, *D. Nguyen*, Baden: Elektrische Festigkeit von SF₆-Druckgasmischungen
 4.1-13 *T. H. Teich*, *M. A. A. Jarbar* und *D. W. Branston*, Manchester: Observation and simulation of discharge development in electronegative gases

4.2 Beeinflussung des Durchschlagsverhaltens durch Isolierstoffe und Metallgrenzschichten, Oberflächenrauigkeit und Fremdpartikel

- 4.2-01 *V. G. Agapov*, *M. V. Sokolava*, Moscow: The influence of electrode surface microwhiskers on a breakdown voltage of a pressurized gas
 4.2-02 *S. Berger*, Zürich: Einfluss von definierten Elektrodenoberflächenrauigkeiten auf die Einsatzspannung in Luft und SF₆
 4.2-03 *M. Chiba*, *T. Kuono* und *S. Hohn*, Tokyo: Surface discharges in insulating gases and liquid nitrogen
 4.2-04 *A. Colombo*, *W. Mosca*, *M. Tellarini*, *L. Thione*, Milano: High voltage tests of large SF₆ insulation: laboratory problems
 4.2-05 *A. H. Cookson*, *R. E. Wootton*, Pittsburgh: Movement of filamentary conducting particles under AC voltages in high pressure gases
 4.2-06 *B. Gaenger*, Baden: Der Einfluss von Fremdteilchen auf die elektrische Festigkeit in SF₆-Anlagen
 4.2-07 *L. M. L. F. Hosselet*, Eindhoven: Das Verhalten von Restladungen an Araldit-Oberflächen in Luft bei verschiedenen relativen Feuchtigkeiten
 4.2-08 *A. Pedersen* und *E. Bregnsbo*, Lyngby: Estimation of breakdown voltages in compressed SF₆
 4.2-09 *H. Specht*, Braunschweig: Die räumliche und zeitliche Entwicklung von Überschlügen an Isolierstoffoberflächen in SF₆
 4.2-10 *T. Takuma*, *T. Watanaba*, *T. Kuono*, Tokyo: Effect of a narrow gas gap on the surface flashover voltage of spacers in SF₆

Luft-Isolation

4.3 Isolierfestigkeit; Grenzschichten

- 4.3-01 *J. Giesenbauer*, Hannover: Über den Einfluss von Oberflächenladungen auf das Grenzschichtverhalten von Giessharzisolatoren in trockenem und feuchtem Stickstoff bei Wechselspannung

- 4.3-02 *G. Gruber*, Clamart-Renardières, und *R. Kosztaluk*, Varsovie: Contribution à l'essai sous pollution artificielle de longues chaînes d'isolateurs
- 4.3-03 *G. Hahn*, *A. Fischer* und *H. Boecker*, Stuttgart: Einfluss der Luftfeuchte auf die Überschlagentwicklung bei Stoßspannung längs einer Grenzschicht Isolierstoff-Luft
- 4.3-04 *A. Kawashima* und *S. Hoh*, Tokyo: Observation of surface discharges using image-converter camera
- 4.3-05 *K. Nowacki*, Aachen: Der Einfluss ebener Isolierstoffschirme parallel zur Achse auf die Spannungsfestigkeit einer Stab-Stab-Funkenstrecke
- 4.3-06 *A. Tslaf*, Beer-Sheva, Israel: The surface strength regeneration of the insulation after the arc discharge action (heat physics basis)
- 4.3-07 *O. V. Volkova*, *B. P. Kokurkin* und *L. S. Slutskin*, Moskow: Discharge characteristics of EHV post insulation structures

4.4 Untersuchungen mit Schaltstoßspannungen (lange Funkenstrecken)

- 4.4-01 *A. Böhm*, München: Funkenstrecken-Vorwiderstände bei positiver Schaltstoßspannung
- 4.4-02 *P. Callegaro* und *G. Pesavento*, Padua: Leader to arc transition in long sparks
- 4.4-03 *P. Callegaro* und *G. Pesavento*, Padua: A study of corona to leader transition with different electrode arrangements
- 4.4-04 *M. Crucius*, *H. Winkelkemper*, Berlin: Gleitfunken als Analogiemodell langer Funken in Luft
- 4.4-05 *S. J. Dale*, Glasgow: The role of the return ionizing wave of potential gradient in the breakdown of long positive point/plane gaps
- 4.4-06 *A. Fischer*, *H. Boecker*, Stuttgart: Vergleich der Durchschlagmodelle nach Jones und Lemke
- 4.4-07 *H. N. Garcia*, Lisboa: The gap factor concept in the light of breakdown mechanism
- 4.4-08 *G. Gruber*, *B. Hutzler*, *J. Jouaire*, *J. P. Riu*, Electricité de France: Contribution à l'étude des grandes étincelles en polarité négative
- 4.4-09 *B. Hutzler*, *D. Hutzler-Barre*, Electricité de France: Grandes étincelles en polarité positive - caractéristiques de dispersion du leader
- 4.4-10 *H. Ryzko* und *S. Rusck*, Stockholm: The possibility of the leader process in a long spark in air without thermal ionization action

4.5 Gasentladungsphysik in Luft; Berechnungen

- 4.5-01 *V. A. Avrutsky*, *G. M. Gontcharenko*, Moskow: Breakdown time lag of non irradiated gaps at considerable overvoltages
- 4.5-02 *E. M. Bazelian*, *V. A. Brandenburgsky*, *V. I. Levitov*, *A. Z. Ponizovsky*, Moskow: Measurements of electric field strength in the air gap on developing the positive spark
- 4.5-03 *M. Khaled*, Zürich: Breakdown simulation in atmospheric air
- 4.5-04 *M. Khalifa*, Riyad, *M. Abdel Salam*, Assiut, und *S. El-Oebeiky*, Cairo: Calculating the spatial development of streamers in nonuniform field gaps
- 4.5-05 *V. N. Maller*, *M. S. Naidu*, Bangalore: Measurement of the ratio of diffusion coefficient to mobility for electrons in nitrogen and air at high values of E/p
- 4.5-06 *W. Mosch*, *E. Lemke*, *W. Bürger*, Dresden: Zur Dimensionierung von Abschirmelektroden für Prüfanlagen sehr hoher Spannung
- 4.5-07 *W. Peschke* und *A. J. Kachler*, Nürnberg: Einsatzfeldstärke und Einsatzspannungen von Doppeltoroidabschirmkörpern in Luft bei hoher Wechselspannung

Themengruppe 5: Durchschlag von festen, flüssigen und gemischten Isolierstoffen

- Diskussionsleiter: *R. Lacoste*, Toulouse (5.1, 5.4)
A. Leschanz, Graz (5.2, 5.3)
- Berichter: *Z. Croitoru*, Clamart (5.4)
R. Goffaux, Charleroi B (5.1)
E. Woschnagg, Weiz A (5.2, 5.3)

5.1 Neue physikalische Erkenntnisse bei den Durchschlagsprozessen

- 5.1-01 *G. Degli Esposti*, *A. Salvini*, Pavia: A computer analysis of the breakdown inception by treeing under impulse conditions in solid dielectrics
- 5.1-02 *J. Griač*, Bratislava: The effect of additives on extinction of discharges in voids in polyethylene insulation
- 5.1-03 *K. Herstad*, *B. R. Nyberg*, Trondheim, *K. Biorlow-Larsen*, Oslo: Transient conditions in oil-impregnated paper insulation for HVDC cables
- 5.1-04 *M. Ieda*, *G. Sawa*, *M. Nagao*, Nagoya, Japan: On the temperature dependence of electric strength of polyethylene
- 5.0-05 *W. Kalkner* und *H. Winkelkemper*, Berlin: Untersuchungen über den Stromverlauf und den Temperaturanstieg vor dem Durchschlag in festen polymeren Isolierstoffen bei Wechselspannung
- 5.1-06 *M. Nawata* und *H. Kawamura*, Meijyo University, *M. Ieda*, Nagoya, Japan: Treeing breakdown in polyethylene (PE) produced by DC Voltage
- 5.1-07 *R. Patsch*, Frankfurt am Main: Experimentelle Erfassung der materialeigenen elektrischen Festigkeit von Hochpolymeren
- 5.1-08 *J. C. Paul*, Tripura, India: Conduction in liquid dielectric in presence of electric and magnetic field
- 5.1-09 *Y. Shibuya*, *G. Coletti*, *S. Zoledowski*, *J. H. Calderwood*, Salford, UK: Prebreakdown light emission in epoxy resin

5.2 Wirkung von Teilentladungen

- 5.2-01 *M. Aguet*, Lausanne, *B. Staub*, Langenthal: Etude des phénomènes précédant l'apparition de la décharge disruptive à l'intérieur de la porcelaine électrotechnique à fréquence de 50 Hz
- 5.2-02 *F. Bachofen*, Aarau, *M. Beyer* und *H.-J. Jähne*, Hannover: Einfluss mechanischer Spannungen und elektrischer Beanspruchung auf das Teilentladungsverhalten von Epoxidharz
- 5.2-03 *H. Bessei*, Darmstadt: Der Einfluss von Gleichspannungskorona auf den Isolationswiderstand und die Durchschlagfestigkeit getränkter Papierisolation
- 5.2-04 *M. Beyer*, *G. Löffelmacher*, Hannover: Untersuchung der chemisch-physikalischen Vorgänge bei der Ausbildung von Teilentladungskanälen in Polyäthylen
- 5.2-05 *N. Fujioka*, *Y. Tsunoda*, Kobe: Effect of humidity on the degradation of insulating materials
- 5.2-06 *J. Golinski*, *K. Labus-Nawrat*, Varsovie: Etude de la rigidité diélectrique de l'isolement feuille-gaz
- 5.2-07 *V. Karius*, Hannover: Einfluss von Teilentladungen auf die Gasabsorption und Gasabsorption von Isolierölen unter verschiedenen Gasatmosphären
- 5.2-08 *H.-G. Kranz*, Aachen: Existenzbedingungen und Auswirkungen von instabilen und stabilisierten Teilentladungsformen bei Wechselspannung
- 5.2-09 *D. M. Ryder*, *J. W. Wood*, Newcastle Upon Tyne, *W. K. Hogg*, Strathclyde: A comparison of the discharge resistance of natural and synthetic resin bonded mica insulation
- 5.2-10 *B. Salvage*, *J. Hiley*, *O. A. El-Gendy*, *I. R. Sturrock* und *A. M. McGuinness*, Edinburgh: A study of the effects of internal discharges on an epoxy resin using a scanning electron microscope
- 5.2-11 *S. M. Shahguedanova*, Moskow: Some peculiarities of partial discharges in oil-impregnated insulation

5.3 Zulässige Durchschlagfeldstärken bei allen Spannungsarten, Alterung und Lebensdauer

- 5.3-01 *M. Cavalli*, *W. Mosca*, Milano: A new plant for life-tests on UHV power cables
- 5.3-02 *K. Dahinden*, Altdorf: Durchschlagshäufigkeit bei der Prüfung von PE-Mittelspannungskabeln

- 5.3-03 *P. Fischer, A. Lukaschewitsch, E. Peschke* und *K. Nissen*, Berlin und Erlangen: Elektrische Kurz- und Langzeitfestigkeit von Polyäthylen niedriger Dichte
- 5.3-04 *S. Guindehi*, Zürich: On the influence of DC prestressing on the surge electric strength of polythene (PE)
- 5.3-05 *J. Juchniewicz, A. Tyman*, Wrocaw, Polen: Voltage aging tests of Vacuum insulation for cryocables
- 5.3-06 *W. Kodoll*, Braunschweig: Lebensdauer von Feststoffisolationen bei Teilentladungen in künstlichen Fehlstellen
- 5.3-07 *G. Lipták, R. Schuler*, Birr, Schweiz: Ermittlung des Langzeitverhaltens von glimmerhaltigen Isolationen
- 5.3-08 *G. Menges, H. Berg*, Aachen: Das Verhalten von Kunststoffisolationen unter mechanischer Beanspruchung
- 5.3-09 *W. Mosch, H. Böhme, J. Pilling*, Dresden: Zur Interpretation der Lebensdauer kennlinien von Feststoffisolationen
- 5.3-10 *B. Salvage, S. Tubbs, J. Hiley, D. W. Heron, W. A. Sharpley*, Edinburgh: The electric strength of oil-impregnated, paper-lapped conductors for transformer windings
- 5.3-11 *W.-D. Schuppe*, Mönchengladbach: Zur Beurteilung von Step-Tests für das Langzeitverhalten von Kunststoffisolierten Hochspannungskabeln
- 5.3-12 *L. Simoni, G. Pattini, A. Lillini*, Bologna: Relationship between electric strength and voltage life of electrical insulation
- 5.3-13 *A. E. Vlastós, S. Rusck*, Stockholm: Influence of electrode coating on the AC breakdown of a liquid dielectric

5.4 Verhalten bei Kryotemperaturen

- 5.4-01 *L. Centurioni, B. Delfino, G. Molinari, A. Viviani*, Genova: A statistical analysis of dielectric strength on liquid nitrogen-impregnated synthetic paper under controlled conditions
- 5.4-02 *Z. Iwata, K. Kikuchi, E. Kawai*, Yokohama: Low temperature properties of oil impregnated paper insulation
- 5.4-03 *J. C. Paul, Tripura*, Indien: Behaviour of solid insulating materials at cryogenic temperature
- 5.4-04 *D. Peier, B. D. Schmidt*, Braunschweig: Durchschlag von LN₂ bei hohen Wechselspannungen
- 5.4-05 *D. V. Rasevig, M. V. Sokolova*, Moscow: Electrical strength of helium at very low temperatures
- 5.4-06 *P. Thoma*, Braunschweig: Current density instabilities and pre-breakdown processes in insulators
- 5.4-07 *J. Thoris, Marcoussis, J. C. Bobo* und *B. Fallou*, Fontenay-aux-Roses: Caractéristiques diélectriques des isolations de câbles cryogéniques
- 5.4-08 *Y. V. Torshin*, Moscow: Electrical strength of liquid sulphurhexafluoride in the presence of solid conductive contaminants
- 5.4-09 *R. Wimmershoff*, Mülheim/Ruhr: Untersuchungen zum Durchschlag in flüssigen Gasen und an Folienisolationen bei tiefen Temperaturen

Nachträge

Zu Themagruppe 1:

R. Brambilla, A. Pigini, Milano: Electric field strength in typical high voltage insulation

Zu Themagruppe 2:

G. Ceron, A. Spinelli, A. Marconcini, G. Picci und *G. Villa*, Milano: A 6 MV, 500 kJ outdoor impulse generator

Zu Themagruppe 4

H. M. Ryan, W. L. Watson, Hebburn, Tyne and Wear GB: Electrical breakdown and voltage-time characteristics in SF₆ at high pressures

H. M. Ryan, G. Spence, Hebburn, Tyne and Wear GB: Breakdown voltage characteristics in high pressure air for uniform and non-uniform fields

1. Berechnung elektrischer Felder

An den Anfang des Symposiums wurde die Berechnung elektrischer Felder gestellt, die mehr denn je die Grundlage allen hochspannungstechnischen Denkens bildet. Hierfür scheinen, wie der Diskussionsleiter einleitend ausführte, die folgenden vier Gründe verantwortlich zu sein:

1. der Übergang zu immer höheren Betriebsspannungen in fast allen Anwendungsbereichen hoher und höchster Spannungen;
2. der daraus resultierende Wunsch, zu Gerätekonstruktionen zu gelangen, die sich besser dem elektrischen Feld anzupassen vermögen;
3. das Experiment noch weit mehr als bisher durch das Rechenergebnis zu ergänzen und
4. der Umstand, dass mit den heute zur Verfügung stehenden EDV-Anlagen selbst schwierigste feldtheoretische Probleme in kürzester Zeit und mit fast beliebigem Genauigkeitsgrad gelöst werden können.

Mit den vorgelegten 24 Berichten ist seit dem 1. Symposium in München ein erfreulicher Fortschritt zu verzeichnen. Sie wurden zum Zwecke einer konzentrierten Diskussion in drei Untergruppen eingeteilt.

1.1 Rechenverfahren

In der ersten Untergruppe standen 13 Beiträge zur Diskussion; dabei handelt es sich fast ausschliesslich um Beiträge, die auf numerischen Methoden basieren, und zwar das Finite-Element-Differenzen-Verfahren und das Ladungsverfahren.

Der Beitrag von *Hoppe* (1.1-06) beschreibt ein Programmsystem, das mit der Methode der finiten Elemente arbeitet und elektrische, mechanische, thermische und magnetische Felder berechnen kann. Hier wird ausserdem eine Methode vorgeführt, bei der Potential- und Stromfunktion einerseits und Feldstärkekomponenten andererseits unabhängig voneinander beschrieben werden. Ferner wird ein Verfahren angegeben, das gestattet, mit dem Verfahren der finiten Elemente auch räumlich unbegrenzte Felder zu berechnen. Der Autor wies ergänzend darauf hin, dass mit demselben Programmsystem auch Nichtlinearitäten und dreidimensionale Felder berechnet werden können, und zeigte einige Beispiele anhand von Feldbildern.

Der Aufsatz von *Donazzi, Luoni* und *Occhini* (1.1-04) schildert ebenfalls die Berechnung sowohl der elektrischen als auch der mechanischen Beanspruchung von Hochspannungsbau teilen. Die Geometrie der Konturen wird dabei durch logische Operationen weitgehend automatisch eingeführt. Es wird ausserdem gezeigt, wie die Gitter sukzessive verfeinert werden. Im Beitrag von *Leyvraz* (1.1-09) wird eine automatische Gittergenerierung für das Verfahren der finiten Elemente beschrieben. Das Ziel ist eine möglichst kleine Abweichung der Energie des Feldes vom wirklichen Wert; mit diesem Ziel werden selektive Netzverfeinerungen durchgeführt und ein praktisches Beispiel, das Feld an einem Transformator, vorgestellt. Ergänzend wies der Autor darauf hin, dass sich der Anwendungsbereich des Verfahrens auch auf andere Felder, z. B. elektrische Strömungsfelder und Wirbelstromprobleme, erstreckt. *Praxl* (1.1-11) berechnet Elektroden mit freiem Potential mit Hilfe des Verfahrens der finiten Elemente. Diese Elektroden lassen sich als Dielektrika mit hohen Dielektrizitätszahlen darstellen. Der Autor gab ergänzend den Rechenzeitbedarf an und führte Plotterzeichnungen vor. *Froidevaux* (1.1-05) schildert die Behandlung von Nichtlinearitäten, einen Fall, in dem das Verfahren der finiten Elemente vorteilhaft anzuwenden ist. *Denegri, Molinari* und *Viviani* (1.1-02) schildern eine Variante des Differenzenverfahrens, die mit einem krummlinigen Gitter arbeitet, das aus krummlinigen orthogonalen Koordinaten abgeleitet wird. Dieser Beitrag ist ausserdem interessant wegen des aktuellen Problems der Überlagerung von elektrostatischem Feld und Strömungsfeld. In der Diskussion wies *A. Viviani* darauf hin, dass trotz des grossen Fortschritts der letzten Jahre noch ungelöste Probleme in Fällen mit komplizierter Elektrodengeometrie bestünden. Die Frage eines Tagungsteilnehmers nach der Anpassung des Gitters an die Elektrodengeometrie beantwortete er mit dem Hinweis, dass auch bei nicht vollständiger Anpassung an die Konturen deutliche Vorteile gegenüber einem Rechteckgitter auftreten. In Ergänzung zum Beitrag von *Leyvraz* schilderte *P. Bille* ein Rechenverfahren zur Berechnung von axialsymmetrischen Feldern auf Rechnern mit kleinem Kernspeicher.

Der zweite Teil der Untergruppe 1.1 beschäftigte sich mit dem Ladungsverfahren. Im Beitrag von *Bachmann* (1.1–01) wird ein ähnliches Problem wie bei *Denegri* (1.1–02) angesprochen, nämlich die Überlagerung von elektrostatischem Feld und Strömungsfeld. Auf der Grundlage des Ladungsverfahrens wird ein Netzwerk aufgestellt, das mit Ersatz-Kapazitäten und -Widerständen arbeitet. *H. Steinbigler* stellte in Vertretung des Autors als Ergänzung zum Aufsatz Rechenergebnisse vor. *A. Viviani* machte den Vorschlag, in das Verfahren eine komplexe Dielektrizitätskonstante einzuführen. Die Frage von *T. Takuma*, inwieweit Kapazitäten für dielektrische Körper sinnvoll definiert werden können, beantwortete *H. Steinbigler* mit dem Hinweis, dass sich durch die Aufteilung der dielektrischen Konturen Teilkapazitäten bestimmen lassen. Der Beitrag von *Deuse* und *Pirotte* (1.1–03) bringt eine theoretisch gehaltene Übersicht über einige Varianten des Ladungsverfahrens und schildert in einigen Stichworten eigene Berechnungen über den Einfluss eines Mastes auf das Feld eines Bündelleiters. *Planchard, Morin* und *Gallet* (1.1–10) beschreiben einige Varianten und Verbesserungen zum Verfahren der diskreten Ladungen, nämlich Speicherung der Matrix bei extrem grossen Konturpunktzahlen in einem externen Speicher, Rechnung in mehreren Stufen, Gleichungsauflösung nach Gauss-Seidel. Im Beitrag von *Weiss* (1.1–13) wird das Ladungsverfahren mit diskreten Ladungen auf offene Elektroden und Scheibenelektroden erweitert, und zwar durch Einführung einer fiktiven dielektrischen Grenzschicht. Das Verfahren wird angewandt auf trichterförmige Elektroden an Stützern und Seilaufhängungen. Der Autor ergänzte den Aufsatz durch Angaben über die Entladungen und die Entladungsstelle; ausserdem wies er auf die feldentlastende Wirkung von Trichterelektroden hin. *Singer* (1.1–12) behandelt ein Rechenverfahren, das mit Flächenladungen auf der Oberfläche von Elektroden und Dielektrika arbeitet. Als berechnete Beispiele behandelt er einen gesteuerten Kabelendverschluss und eine Kondensatordurchführung.

Der dritte Teil der Untergruppe 1.1 ging auf die Physik des Raumladungsfeldes ein. Im Beitrag von *Khalifa* und *Abdel Salam* (1.1–07) wird die monopolare Gleichspannungskorona zwischen zylindrischem Leiter und Ebene berechnet; dabei wird betont, dass die Raumladungen eine Feldverzerrung bewirken. Die Berechnungen dieses Beitrages werden unter Zuhilfenahme von Näherungsansätzen mit analytischen Methoden durchgeführt. *Landers* (1.1–08) berechnet die stationäre Gleichspannungskorona im koaxialen Zylinderfeld. Zunächst wurde eine unipolare Ionenströmung untersucht. Bei hohen Koronaströmen erweist es sich als vorteilhaft, Koronazone und Aussenbereich mit Hilfe eines Iterationsverfahrens getrennt zu behandeln. Der Autor ergänzte seinen Beitrag durch einen Hinweis auf neuere Rechnungen, bei denen er die scharf begrenzte Koronazone durch einen Existenzbereich der Elektronen ersetzt, so dass sich ein stetiger Verlauf der Strom- und Spannungsverteilung ergibt. Der Diskussionsleiter betonte abschliessend die Wichtigkeit der Berechnung raumladungsbehafteter Felder für die Vorausberechnung des Durchschlages.

1.2 Anwendung

In die zweite Untergruppe wurden 7 Beiträge eingereicht, die sich vor allem mit konkreten Anwendungsbeispielen beschäftigen.

Der Aufsatz von *Utmischi* (1.2–06) schildert die Beeinflussung von Objekten wie Autos oder Weidezäunen unter Freileitungen. Der Autor berichtete ergänzend von experimentellen Untersuchungen der kapazitiven Ströme an Fahrzeugen und isolierten Leitern und gab eine gute Übereinstimmung mit der Rechnung an. *Nasser* und *Ibrahim* (1.2–04) schildern die Berechnung des Feldes einer konkreten Hochspannungs-Gleichstromleitung mit Bündelleitern. *Khalifa, Abdel-Salam, Aly* und *Abu-Seada* (1.2–02) behandeln das Feld in der Nähe von verseilten Bündelleitern. Die Potentialfehler werden dabei nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate minimalisiert. Ergänzend wurde über Messungen von Koronaentladungen an Bündelleitern berichtet. In der Diskussion antwortete *M. Khalifa* auf die Frage, wo und wann die grössten Feldstärken an Bündeln auftreten, dass der Ort der maximalen Feldstärke durch Berech-

nung der Feldstärke in Punkten rund um den Teilleiterumfang gesucht und der Zeitpunkt durch die komplexe Rechnung bestimmt wurde. Im ersten Aufsatz im Anhang der Konferenzbände (*Brambilla, Pigini*) werden Methoden beschrieben, maximale elektrische Feldstärken an der Elektrodenoberfläche möglichst schnell abzuschätzen. Für einige grundlegende Elektrodenanordnungen werden Formeln und Ergebnisse in Diagrammen angegeben. Im Beitrag von *Sarma Maruvada* und *Hyltén-Cavallius* (1.2–05) werden Rechenwege gezeigt, mit genauen Formeln über analytische Methoden und über das Ladungsverfahren Kapazitäten und beeinflusste Spannungen zu berechnen. Ausserdem werden einige verhältnismässig einfache Formeln zur Abschätzung von Kapazitäten angegeben. In Ergänzung zum Aufsatz wurde von einem der Autoren über Messungen der Feldstärkeverteilung in Stationen und unter Freileitungen berichtet.

Im Beitrag von *Weiss* (1.2–07) werden mit Hilfe des Ladungsverfahrens systematische Untersuchungen an Reihenschaltungen zweier Dielektrika durchgeführt. Dabei zeigte sich beispielsweise, dass die Feldstärke-Erhöhung in einem Luftspalt zwischen einer kugelförmigen Elektrode und einem Feststoff-Dielektrikum stärker ist, als auf Grund des Verhältnisses der Dielektrizitätszahlen zu erwarten wäre. Die Frage eines Tagungsteilnehmers nach dem physikalischen Grund für diese Erscheinung beantwortete der Autor mit dem Hinweis auf die Aufweitung des Luftspalts nach beiden Seiten. *G. Praxl* bestätigte den Einbettungseffekt durch Angaben über eigene experimentelle Untersuchungen. Der Diskussionsleiter betonte die Tragweite des Effekts für Anordnungen aus der industriellen Praxis. Im Beitrag von *Andriamiharisca* und *Contalbrigo* (1.2–01) wird ein Rechenprogramm geschildert, das nach dem Verfahren der finiten Elemente arbeitet, sowie dessen Anwendung auf die Berechnung eines Kabelendverschlusses. Die Autoren zeigten in Ergänzung zum Aufsatz einige berechnete Felddiagramme und erklärten, dass die Potentialverteilung auch gemessen wurde. Der Beitrag von *Misaki, Yamanoto, Itaka* und *Hara* (1.2–03) untersucht mit dem Verfahren der finiten Elemente das dreidimensionale Feld eines Rohrgaskabels mit Epoxidharzstützern. Das Feldgebiet wird dabei unter Beachtung der Symmetrien in Polygone und Tetraeder zerlegt. *G. Luoni* und *V. Hoppe* betonten in der Diskussion die Wichtigkeit der automatischen Dateneingabe vor allem bei dreidimensionalen Feldern.

1.3 Optimierung

Da mit den heute bekannten Verfahren der Feldberechnung bereits leistungsfähige Methoden zur Verfügung stehen, kann man einen Schritt weitergehen und nicht nur das Feld vorgegebener Anordnungen berechnen, sondern der EDV-Anlage auch die Aufgabe stellen, Elektroden- und Isolatorgeometrien so zu entwerfen, dass der zur Verfügung stehende Feldraum möglichst gut ausgenutzt wird. Auf diese Weise kann die Feldberechnung in einen rechnergestützten Entwurfs- und Konstruktionsprozess eingegliedert werden.

Breilmann, Härder und *König* (1.3–02) beschreiben die Anwendung des Differenzenverfahrens zur Berechnung der rotationssymmetrischen Felder an einem Trennschalter mit Scheibenisolator in metallgekapselten SF₆-Anlagen. Das Gleichungssystem wird unter Ausnutzung der Eigenschaften der Bandmatrix mit Hilfe der Gauss-Elimination direkt gelöst. In der Diskussion wies *W. Breilmann* auf die Schwierigkeiten hin, die sich bei der praktischen Optimierung von Trennschaltern ergeben; dafür seien zusätzliche Bewertungsmaßstäbe hinsichtlich Beanspruchung und Festigkeit notwendig. Der Beitrag von *Bachmann* (1.3–01) geht noch stärker auf die Optimierung ein und schildert die Auslegung von Toroidsystemen mit Hilfe des Ladungsverfahrens. Es wird gezeigt, dass zu einer ausreichenden Potentialsteuerung ein System von 2 bis 3 Toroiden ausreicht. Die Ergebnisse zur optimalen Auslegung von Toroidsystemen sind in einem Katalog zusammengestellt. Der Autor ergänzte seinen Beitrag, indem er den Unterschied zwischen aktiven und passiven Toroidsystemen weiter ausführte. Im Beitrag von *Singer* (1.3–03) wird ein numerisches Verfahren geschildert, das die automatische Berechnung von optimalen Elektroden- und Isolatorkonturen durch die EDV-Anlage zum Inhalt hat. Die Isolator-

konturen werden dabei so errechnet, dass die Tangentialfeldstärke entlang der Kontur konstant ist; Elektrodenkonturen werden nach Massgabe der Normalfeldstärke ermittelt. In der Diskussion gab *D. Metz* zur Optimierung eine bemerkenswerte Variante an, die ebenfalls auf dem Ladungsverfahren basiert.

1.4 Ausblick

Zum Ende der Diskussion regte der Diskussionsleiter eine Aussprache über die Aufgaben der Feldberechnung an, die in der Zukunft anstehen. Die Vertreter der Industrie nannten eine Reihe von Problemen, die für die Industrie von Bedeutung sind. So deutete *R. Wimmershoff* an, dass es für Probleme bei der Entwicklung von Kabeln und Kabelendverschlüssen wünschenswert sei, Programme verfügbar zu haben, die auf verhältnismässig kleinen Rechenanlagen zu benutzen seien. *R. Leyvraz* entgegnete, dass heute bereits leistungsfähige Programme bestehen, die mit 50 bis 100 k-Worten auskommen, und dass darüber hinaus die Methode der kleinen Ausschnitte verwendet werden könne. Im übrigen würden die Rechner und ihre Speicher laufend vergrössert. *G. Praxl* und *B. Bachmann* deuteten an, das Problem liege nicht in der Grösse des eigentlichen Programms zur Feldberechnung, sondern der Ein- und Ausgabekomfort lasse die Programme stark anwachsen. Es sei ein Kompromiss erforderlich zwischen Benutzerkomfort und Rechnergrösse. *H. V. Stephanides* wies darauf hin, dass der jeweilige Sachbearbeiter mit dem Rechnerprogramm arbeiten müsse; deshalb wünsche die Industrie eine einfache Eingabe und eine detaillierte Programmbeschreibung.

L. Erhart hob hervor, dass die Hochschulen in den letzten Jahren grosse Arbeit in der Feldberechnung geleistet hätten. Er wies für die Zukunft auf Probleme unter dem Aspekt Feuchtigkeit und Verschmutzung hin.

H. Christl regte eine Koordinierung der vorhandenen und zu erstellenden Rechenprogramme an. Dazu wurde darauf hingewiesen, dass ein Universalprogramm wegen der Vielzahl der EDV-Systeme kaum erstellbar sei. Es bestehe aber schon seit einiger Zeit eine Kooperation der deutschen Hochschulen im Rahmen der Feldgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft, wodurch eine sinnvolle Abstimmung der Aufgaben und eine wirkungsvolle gegenseitige Hilfe gewährleistet sei. In einem Schlusswort fasste der Diskussionsleiter die zukünftigen Aufgaben zusammen und nannte als wichtigste Punkte: Optimierungsaufgaben, Raumladungsfeld, Mischfelder, transiente Vorgänge, Kombination von Ladungsverfahren und Finite-Element-Differenzen-Verfahren sowie die Erstellung benutzerfreundlicher Programme. An dieser Vielfalt von Problemen sollte sich auch der Nachwuchs beteiligen, um eine Zeit besser vorzubereiten, die mehr und mehr von feldtheoretischen Betrachtungen getragen sein wird.

2. Installations d'essais en haute tension

2.1 Générateurs de haute tension

Ce sous-groupe peut être divisé en cinq sections selon le domaine d'intérêt. La majorité des contributions figurant dans le sous-groupe 2.1 donne un panorama de l'orientation actuelle des recherches et des développements concernant l'amélioration des générateurs adaptés aux essais à haute tension, particulièrement en fonction des perspectives d'avenir d'utilisation du matériel électrique à ultra-haute tension UHT et d'extension des installations blindées à l'hexafluorure de soufre SF₆. Quelques contributions traitent de l'aspect spécifique de la recherche en physique des plasmas.

2.1.1 Générateurs de haute tension à fréquence industrielle

La limitation de la place disponible et le prix élevé des terrains aptes à accueillir des postes de couplage dans les centres urbains, ainsi que des considérations d'environnement et de stratégie, militent en faveur des installations blindées sous SF₆. La contribution de *Moeller* (2.1-09) traite des essais de réception à fréquence industrielle de disjoncteur sous SF₆ et présente un transformateur isolé au SF₆ adapté aux essais de réception sur place après montage. Cette conception permet de limiter la

capacité de charge importante introduite par les traversées capacitatives utilisées dans les solutions classiques, ainsi que le poids du transformateur d'essai. L'auteur précise que le transformateur présenté permet également de réaliser des essais en tension de manœuvre. Il estime, d'autre part, que de tels transformateurs à isolation film plastique-SF₆ sont réalisables jusqu'à 500 kV.

L. Schiweck fait part de l'existence, en Allemagne, d'un groupement de fabricants, laboratoires d'essais neutres et clients dont le but est de normaliser les essais de réception du matériel blindé isolé au SF₆.

2.1.2 Générateurs de tensions de choc

Quatre contributions présentent

- des modifications de générateurs de choc classiques dans le but d'effectuer des essais sur des transformateurs et des bobines à faible inductance,
- une version automatisée de générateur de choc adapté à l'étude statistique des tensions,
- des améliorations technologiques de générateurs de choc classiques adaptés à des essais UHT.

Selon la contribution de *Glaninger* (2.1-05), la présence d'une inductance en parallèle sur la résistance série afin de permettre des essais sur charge à faible inductance n'introduit aucune oscillation supplémentaire sur l'onde de tension de choc. A ce sujet, l'auteur rappelle l'existence de deux articles de *N. Rao* et *S. R. Kannan*, Proc. IEE 120(1973) et 122(1975).

La contribution de *Christensen, Crichton, McAllister, Pederesen* et *Vibholm* (2.1-03) présente un système de charge du générateur de choc dédoublé améliorant la qualité d'amorçage et réduisant le décalage dans le temps des amorçages des étages supérieurs à partir du premier étage déclenché.

La contribution de *Brändlin, Feser* et *Sutter* (2.1-02), ainsi que celle de *Ceron, Spinelli, Marconcini, Picci* et *Villa* (supplément) démontrent l'intérêt à utiliser du matériel destiné aux installations intérieures en montage blindé à l'extérieur et conçues pour des modifications de couplages automatisées. *K. Feser* précise pour la première contribution que les générateurs de choc en question sont basés sur un principe d'amorçage uniquement sur le premier étage. *G. Villa* précise de son côté que la méthode de calcul des champs électriques utilisant les charges fictives, néglige la présence de diélectriques constitués par la paroi de la cuve en fibre de verre, ce qui est justifié étant donné la faible épaisseur de la cuve par rapport aux dimensions du générateur. D'autre part, le réglage de la tension d'amorçage par la pression au lieu de la distance entre sphères est justifié par l'alignement imparfait d'éclateurs mobiles dû à la flexibilité des matériaux, ainsi que par la suppression d'oxydation des électrodes introduites par l'élimination de l'oxygène.

M. Leroy rapporte qu'il est parfaitement possible d'introduire des microprocesseurs couplés à des générateurs de choc à condition de prendre les précautions nécessaires et de bénéficier d'une certaine expérience (exemples de Clamart et des Renardières, France).

2.1.3 Générateurs de tensions de manœuvre

La contribution de *Anis* et *Giao Trinh* (2.1-01) est consacrée exclusivement à la génération de tensions de manœuvre. La tenue aux surtensions de manœuvre devient, en effet, prépondérante dans le cas des lignes à THT et surtout à UHT par rapport à la tenue aux surtensions de foudre.

La contribution présente deux méthodes de générateur utilisant des transformateurs haute tension en cascade. L'une de ces méthodes emploie comme source une batterie de condensateurs, l'autre directement le réseau. A ce sujet, *W. Mosch* indique que la méthode utilisant le réseau présente un inconvénient puisque les formes d'ondes de manœuvre obtenues dépendent de l'instant d'enclenchement. *L. Thione* précise que n'importe quel transformateur peut être utilisé pour la génération de tension de manœuvre à condition que les critères d'isolation soient en rapport avec le niveau des tensions de manœuvre utilisées.

D. Kind présente la caractéristique non-linéaire de la répartition des tensions de manœuvre lors de l'utilisation de cascades de transformateurs.

H. Anis expose que seules la forme et la pente du front d'ondes de manœuvre sont responsables de la rupture d'isolation dans l'air et qu'elles doivent, en conséquence, être simulées exactement en laboratoire haute tension.

2.1.4 Autres types de générateurs

La contribution de *Modrusan* (2.1-08) traite des méthodes de production du courant de choc appliquées à des essais de matériels (inductances, parafoudres, etc.) en laboratoire haute tension. L'un des générateurs de courant de choc présenté est basé sur l'utilisation d'une branche de court-circuit inductive-résistive. L'auteur ajoute que l'installation de courant de choc permet en outre de tester le comportement des avions aux courants de foudre.

Lietti (2.1-07) présente des systèmes de génération d'impulsion de tension du type radiophonique à haute énergie, pour l'étude de l'isolation des équipements nécessaires à la recherche en physique des plasmas. L'installation comporte un oscillateur haute tension multi-tubes, puis un générateur haute tension à ligne. Les éclateurs utilisés dans l'oscillateur multi-tubes travaillent sous hydrogène-azote pressurisé et présentent une basse inductance. L'auteur constate qu'en technologie de physique des plasmas, les fabricants ne donnent, en général, que les caractéristiques de leurs matériaux aux fréquences industrielles. Or, ces valeurs ne peuvent pas être extrapolées aux fréquences élevées utilisées en physique des plasmas.

2.1.5 Auxiliaires de générateurs de choc

Trois contributions traitent de l'état actuel du développement technologique des éclateurs, aussi bien dans le domaine des laboratoires haute tension que dans celui de la recherche en physique des plasmas.

La contribution de *Harada, Acshima, Aihara, Okamura et Hakoda* (2.1-06) présente un éclateur de coupure d'ondes de choc utilisant une source auxiliaire basée sur une cascade de Greinacher. *T. Takuma* précise que l'homogénéisation de la répartition de tension sur les étages de la cascade est réalisée par équilibrage résistif.

La contribution de *Feser* (2.1-04) compare les types d'éclateurs pointe-pointe, sphère-sphère et multiples. L'auteur rapporte qu'une caméra à haute vitesse a été utilisée pour étudier l'amorçage et le développement des arcs de chaque étage des éclateurs en fonction du temps. L'amorçage des éclateurs par rayon laser est possible mais son coût est actuellement prohibitif par rapport aux solutions classiques par trigatrons.

La contribution de *Ramrus* (2.1-10) est consacrée aux éclateurs à eau pour le couplage à un transformateur d'une ligne chargée par un générateur de Marx. *W. Olsen* précise que le temps de commutation d'un tel éclateur est de l'ordre de 50 ns. L'eau utilisée pour l'éclateur a une résistivité de l'ordre de 5 M Ω cm.

2.2 Essais à haute tension

Les cinq contributions consacrées aux essais en haute tension traitent chacune des aspects différents et montrent par là la diversité des problèmes liés à la technique de la haute tension.

2.2.1 Techniques de mesures

Deux contributions traitent du problème des décharges partielles. *Bommer* (2.2-01) aborde un problème de filtre pour décharges partielles, *Schneider* (2.2-04) traite d'une borne d'extrémité pour câbles, dépourvue de décharges partielles, et permettant d'atteindre des tensions jusqu'à 150 kV. Au sujet de cette borne, *H. Schneider* précise que la tension auxiliaire appliquée à l'écran, doit être en opposition de phase à la tension principale. Cette solution a obtenu un vaste écho auprès des participants du symposium.

Brand et Marckmann (2.2-02) décrivent un nouveau condensateur sous pression pour THT. Il s'agit d'un condensateur blindé à cuve en acier pourvue d'une borne de traversée sous SF₆. On remarquera l'isolateur-support conique séparant la cuve du condensateur de la borne de traversée, ainsi que le mode de fixation de l'électrode haute tension. Quant au comportement de la porcelaine sous forte pression, l'auteur précise que dans une

prochaine exécution l'utilisation d'isolations synthétiques pourrait être envisagée.

2.2.2 Interprétation des mesures

Veverka et Heller (2.2-05) présentent une méthode d'analyse et de synthèse des valeurs de tensions disruptives ne recourant pas à la courbe des fonctions de répartition. Les décharges disruptives sous tension de manœuvre dans l'huile et dans le SF₆ semblent satisfaire à la nouvelle fonction décrite. Malheureusement, les auteurs de cette contribution, de Prague, n'ont pu être présents pour discuter leur thèse.

2.2.3 Aspect particulier

La contribution de *Kuzhekin et Budowitsch* (2.2-03) est consacrée au comportement de fils conducteurs minces au choc. Il est évident que des sécurités basées sur des fils fusibles sont exploitées depuis de nombreuses décennies, mais il n'y a que quelques années que des publications traitent en détail ce problème, particulièrement en rapport avec la recherche en physique des plasmas. *J. Salge* précise que le travail sur la fusion de fils est en rapport avec l'étude de disjoncteurs à courant continu.

Pour conclure et selon les termes du président de la séance, l'utilisation de tensions de l'ordre du million de volts pour le transport de l'énergie électrique a révélé que les surtensions de manœuvre, d'origine interne, prennent une importance plus grande que les surtensions d'origine externe dues à la foudre. L'observation des phénomènes qui se présentent dans la réalité a révélé des surtensions transitoires dont la forme diffère des essais de tensions à fréquence de service et aussi de la forme des tensions de choc classiques. La pratique a montré qu'on pouvait imiter la forme de ces surtensions internes plus ou moins bien en adaptant les générateurs de choc, initialement conçus pour reproduire des surtensions de foudre. Toutefois, cette adaptation n'est pas parfaite et pose certains problèmes technologiques, p. ex. l'extinction prématurée d'un ou plusieurs éclateurs.

En ce qui concerne la normalisation des tensions d'essais, le dilemme fondamental subsiste. Faut-il normaliser la forme d'onde de la tension d'essai en se rapprochant le plus possible de ce que l'on observe dans la réalité ou, au contraire, la forme d'onde en fonction des possibilités techniques actuelles des laboratoires d'essais? Dans le premier cas on obtient un test théorique se rapprochant le plus possible de la réalité pratique, au risque de ne pas pouvoir le réaliser dans les laboratoires, faute d'une technique adéquate. Dans le second cas on peut assurer une meilleure reproductibilité dans les laboratoires des divers pays en s'écartant de la sollicitation réelle qui se présentera in situ lorsque les appareils auront été incorporés au réseau; de plus, on risque de devoir normaliser des formes d'ondes qui évoluent au fur et à mesure que les technologies d'essais se perfectionnent. Même si les auteurs n'ont pas tous mentionné expressément ce dilemme dans leur contribution, il reste toujours sous-jacent.

3. High-voltage Measurement Techniques

For the benefit of the discussion, the 25 papers of this section were divided into three main sub-groups. Before the discussion, the papers relating to the same subject were briefly introduced by the special reporter. In spite of the limited time, 65 contributions were given to the discussion, including additional information from the authors of the papers. The intensive discussion thus gives an indication of the great interest in the covered subjects.

Opening the session, the chairman referred to the subjects listed in the call for papers, and stated that all the subjects – except field strength measurements in insulating systems – had been covered by papers submitted to the symposium.

3.1 Methods of measuring voltages and currents

This sub-group dealt with 8 papers (including paper 3.3-03) covering a great variety of subjects: sphere gaps, potential transformers, Pockel cells for voltage measurements, voltage dividers, shunts and crest voltmeters.

Sphere gaps: When irradiation of the sphere gap is missing or reduced, great measuring errors are encountered, giving higher sparkover values and greater standard deviations (Paper 3.1-05 by *Kachler*). The investigation shows that the irradiation from the spark gaps in the impulse generator plays a decisive role for the accuracy of the sphere gap measurements of impulse voltages. In modern impulse generators, however, the irradiation is strongly reduced due to the incapsulation. The results of the investigation show that an additional source of irradiation in most cases will reduce the discrepancies between the IEC values and the values obtained in the laboratory. Several speakers reported similar findings. The increasing use of incapsulation of the spark gaps in modern impulse generators makes it necessary in one way or another to reconsider the IEC Publication 52.

Potential transformers: Paper 3.1-03 by *Gertsch* and *Schlicht* gives the results of an investigation of capacitive potential transformers for the highest system voltages. The effect of leakage currents over the surface of the capacitor stack is investigated together with the thermal effect on the accuracy of the voltage measurement. Without giving constructive details, the paper reports that new methods for obtaining high temperature stability have been developed, resulting in class 0.2 potential transformers for system voltages of at least up to 765 kV. During the discussion, doubts were raised concerning the claimed high thermal stability. Further, the effect of unbalanced currents caused by stray capacitances and corona was discussed. Results were reported from subdivided capacitor dividers. In order to limit the errors caused by the height of the divider, the total voltage is measured as the sum of the voltages over the individual elements. The transmission of the voltage components takes place by means of electro-optic systems.

Paper 3.3-03 by *Bogucki*, *Pilch* and *Winkler* presents the results of a theoretical study of the transfer characteristics of inductive and capacitive potential transformers. In order to prevent relays etc. from being activated by transients, it is desirable that the transient oscillation is not amplified in relation to the power frequency. It is demonstrated, that in this respect the capacitive potential divider in many cases is more advantageous than the inductive potential divider.

Pockel cells for voltage measurements: Paper 3.1-02 by *Cre-paz* and *Manigrasso* describes a voltage measuring system utilizing the Pockel effect. Some unidirectional crystals exhibit electro-optical effects. Their refraction index n as a function of E can be written as:

$$n = n^0 + aE + bE^2 \dots$$

(the higher terms in E may usually be neglected)

When the coefficient a is zero, the crystals show the Kerr effect whereas the Pockel effect is obtained when b is zero. The crystals with Pockel effect, however, are in addition piezo-electric, for which reason electromechanical changes in the refraction index are superimposed on the electro-optic effect. Hence the Pockel cells cannot always be used due to mechanical oscillation. During the discussion, results were given from investigations of ADP crystals used for measuring the voltage distribution on insulators. Information was given concerning the use of Kerr cells for which the nonlinearity of the system is taken into consideration. Another speaker reported on a measuring system in USA based on Kerr cells for 16 MV with a rise time of about 100 ns, and on another measuring system in Europe for a 1 MV system with a rise time of 3 ns. It was agreed, that these electro-optical systems are of great interest; but there seems to be a lot more to be done before such systems will be of general use.

Voltage dividers: Paper 3.1-04 by *Harada*, *Aoshima*, *Oka-mura* and *Hiwa* describes the design of a universal voltage divider with the following ratings: 1 MV lightning impulses, 700 kV switching impulses, 350 kV AC, and 500 kV DC. The response time is about 10 ns measured with a damping resistor of 540 Ω at the input end of the high voltage lead, which is indeed an accomplishment. During the discussion, the development of another similar system was reported. In another contribution, the relation between the ratio in the frequency and time domains was given for not fully compensated dividers.

Paper 3.1-06 by *Kuono*, *Kato*, *Kikuchi* and *Maruyama* describes a completely screened, compensated resistor divider housed in a SF₆ pressurized tank. The compensation due to the slow response caused by the important stray capacitances to the tank is in this case obtained by the response from a parallel connected capacitor divider, which at the correct instant is added to the response of the resistor divider. The response time of the divider, rated 1 MV full lightning impulses, is about 10 ns when measured with a damping resistor in the input end of the high voltage lead and matching the impedance of this lead. During the discussion, the authors reported that the same principle can be applied for compensation when using generating voltmeters for field measurements.

Paper 3.1-07 by *Krawczyński* describes a new form of compensation of the voltage divider. The voltage over the test object and the voltage of the divider are different due to the reflection at the divider end of the high voltage lead. Therefore, the output from an idealized divider will be different from the test voltage. When a reflection similar to the reflection from the top of the divider is generated in the low voltage system and added to the output from the divider at the right instant, the output voltage will give a faithful reproduction of the test voltage.

Crest voltmeters and shunts: Paper 3.1-01 by *Bertschinger* and *Brandestini* describes an impulse crest voltmeter, the conventional circuit containing a simple current amplifier at the input which charges a capacitor through a rectifier being blocked when the capacitor is charged to the maximum of the input voltage. This simple circuit has the disadvantage that the voltage drop of the diode is included in the measurement. Further, the system may cause overshoot. For the circuit described, however, a comparator has been added sensing the voltage over the capacitor. This comparator will switch off the connection to the current amplifier at the right instant by means of a field effect transistor. Using batteries, the polarity change can be made very simple. In addition to the paper, the authors reported on improvements with a faster current amplifier giving as small errors as about $\pm 0.2\%$ for lightning and switching impulses.

Paper 3.1-08 by *Malewski* describes a new type of shunt which seems to offer great advantages as compared to the classical tubular shunt. The shunt is composed of an outer tube around a tight-fitting inner tube connected to a current terminal at each end. The inner tube is equipped with a groove in which is placed a measuring lead connected at one end to the current terminal, and at the other end to the centre of a coaxial connector mounted on the other current terminal. In this manner, the slow response from the resistive voltage drop on the inside of the tube is compensated by an induced voltage. By proper choice of the thickness of the two tubes the response time can be reduced seven to ten times compared to a conventional tubular shunt.

3.2 Measurement of partial discharges

This sub-group dealt with 8 papers which can be divided into two categories.

Measuring technique for the detection of partial discharges PD: Paper 3.2-02 by *Black* gives the result of a new detection technique especially suited for PD measurements in noisy environments. Instead of the simple noise rejection achieved by means of the conventional balanced method involving two test objects, the described method is based on the extensive use of logic in order to discriminate between impulses from the two test objects or from some external source. According to the authors, the noise immunity is extremely good. Additional information was given during the discussion: When the signals from the two measuring impedances are gated with dU/dt , it is possible to differentiate between partial discharges in the two test objects so that the reference object does not need to be discharge-free. One speaker drew attention to the fact that for open tests discharges in one object might be capacitively coupled to the other object and thus give rise to a wrong interpretation of the measurements. This could be cured, however, by the use of a screen between the two test objects.

In order to select acceptable levels for constructions it is important to be able to compare the PD values from older RIV measurements in μV with the PD values in μV and pC meas-

ured with the present techniques. In paper 3.2-07 by *Praehauser*, the accuracy of older and newer results of PD measurements in μV and pC are investigated with the following main results: Wide band measurements of apparent charge in pC can be done more accurately than the narrow band measurements of RIV in μV ; in both cases it is claimed that the error can be kept below ± 3 dB, whereas the older measurements may deviate up to 10 dB. During the discussion, several speakers were of the opinion that, for potential transformers, the difference between the measurements in μV and in pC is small contrary whereas great deviations may be found with power transformers, depending on the location of the PD source in the transformer.

In paper 3.2-08 by *Reynolds*, the author gives a survey of the practice for the PD measurements in the USA. Interesting is the development of logic circuits to be used in connection with the equipment. Further, the paper describes the principle of a bridge for PD measurements which may be connected to points at high potential by means of coupling capacitors. Finally, the use of very low frequency for PD tests is dealt with and the advantages are outlined: small size equipment and good noise discriminating features. During the discussion it was stressed that in order to utilize the very low frequency PD test, a thorough investigation of the insulation type in question must be carried out over the frequency range from power frequency down to the test frequency.

Paper 3.2-06 by *Nieschwietz* describes an investigation of PD measurements of rectifier transformers and reactors at DC. A narrow band system measuring the μV and a wide band system measuring the apparent charge in pC was connected in parallel. The conclusion of the investigation is that inception and extinction voltages cannot be determined at DC due to the very low repetition frequency involved and the associated long testing time necessary to establish these quantities with confidence. Besides, the results from the two measuring systems in the investigated cases seem to coincide relatively well when the μV reading is corrected for the sensitivity dependence of the repetition rate. Due to the low repetition rate as compared to the AC case, much higher PD values may be tolerated at DC.

Measuring techniques for the investigation of the effect of partial discharges: In paper 3.2-01 by *Bapt* and *Mayoux*, the results of an investigation of PD in artificial voids in epoxy are given. The values of the apparent charge were fed to a multi-channel analyser capable of discriminating the pulses in amplitudes as well as in the time intervals between consecutive pulses. The time interval distribution shows a remarkable change with the time of testing, especially in the time region shortly before breakdown. The authors suggest a model for the calculation of the distribution in the time range of Δt up to 200 μs .

Paper 3.2-03 by *Kärkäinen* describes an investigation of PD quantities utilizing a multi-channel analyser providing for the determination of nearly any form of pulse frequency distribution, amplitude, pulse interval, phase angle, etc. Some of the results show a pronounced similarity with the results in paper 3.2-01. The discharges take place as primary discharges across the cavity, followed by secondary surface discharges. The degradation in wide cavities is found to be a function of the number and magnitude of the primary discharges.

Paper 3.2-04 by *Luczyński* describes an investigation of partial discharges in artificial voids in polyethylene. A specific type of discharge, the quenched discharge, is closely examined. The results seem to indicate that this type of discharge may be explained by a Townsend generation process with photo emission feed-back. The results obtained when the test conditions are changed within a major range can be explained by the same model. A program for the calculation of the discharge currents has been developed. It takes into account the α and γ_{ph} processes and the effect of the field changes caused by space and surface charges. The author gave additional results concerning an investigation of other types of discharges and their temporal and spatial distribution.

In paper 3.2-05 by *Mayer*, a test set-up capable of handling up to 20 test objects for long term tests is described. At pre-selected intervals, the test objects are disconnected from the supply, and the apparent charge is measured for each test object,

one by one, by means of a 16 channel analyser. After the PD measurements, all the samples are again switched on to the supply. During the measurement, the power frequency cycle is subdivided into 16 time intervals. For each interval the spectrum of the amplitudes of the discharges is counted on 16 channels, which means 256 measurements at each cycle. The results are recorded on a tape recorder and, later, data processed off line.

During the discussion of the four papers, several speakers gave information on similar investigations. In one contribution, the limitation in the measurement of the total apparent charge by means of the individual pulses was discussed, because this value may be much smaller than the integrated charge. Concerning the deterioration caused by the partial discharges, warnings were given not to relate uncritically the discharge quantities and the expected lifetime. In one contribution it was stated that the energy at the front of a streamer was higher than 15 eV, and thus high enough to cause degradation of the surface. Results were given from an investigation of the energy range for the photons; it was stated that the energy involved was too low to ionize free molecules near to or at the surface, however sufficient to release trapped charges at the surface which could produce new avalanches.

3.3 Potential-free measurements, automatization, and suppression of interfering signals

In this sub-group 2 papers concern potential-free measurements and 6 papers automatization and suppression of interfering signals.

Potential-free measurements: Paper 3.3-01 by *Aly* gives results from an investigation of an opto-electric system for current measurements at high potential. Light guides in the form of rods are used and investigated for different influences, e.g. absorption of clean and salt water. Suggestions are given for such a system used as current transformer.

In paper 3.3-02 by *Beaumont*, *Baixas*, *Langibout*, a more general analysis of the possibilities and limitations of measurements at floating potential is given together with examples of different solutions of the problems involved, e.g. the power supply for the measuring devices at high potential, methods for the conduction of the measurement, and questions about stability. Of special interest is the description of actual opto-electric systems based on light guide transmission in analogue as well as in digital form. Additional information was given concerning the electro-optic system EVARIST, utilizing transient recorder and data compression systems and storing facilities, to be used e.g. for the recording of surges in the network. In another contribution, results from the use of an opto-electric current transformer were reported. The error is nearly independent of the applied voltage and well within the class 02 even for very small currents. During the discussion it was agreed that opto-electric systems will be of great importance in the future. Problems of reliability and the long term stability of the components, especially the power supply at high potential, remain to be investigated more closely.

Automatization and suppression of interfering signals: The increasing trend towards automatization is related to the increasing use of electronic components at a reduced price which now makes such a task possible and attractive from the economical point of view. At the same time, a great amount of tedious work can be avoided, and a number of human errors can be eliminated. There seem to be two main trends in the automatization:

1. The use of an on-line type of automatization, often in connection with a minicomputer and a keyboard providing for the possibility of a dialogue between the operator and the impulse generator.

2. The use of a logic controller capable of supervising a number of standardized test programs which can be preselected from the control panel. The controller will then take over the execution of the test in a pre-described way. The logic system may be constituted by a prewired logic system like the one described in paper 3.3-05, or by a microcomputer like the one described in paper 3.3-08. The test data can either be processed on-line in connection with the logic system, or collected on an external source, e.g. a tape recorder, for later off-line processing.

Paper 3.3-04 by *Dubois, Girard, Langibout* and *Leroy* describes a fully automatized impulse generator comprising a mini-computer, keyboard, transient analyzer, data screen, and external storage facilities as discs, magnetic and punch tape. The system gives the possibility of a dialogue, by means of a specially developed macro-program between the operator and the impulse generator. This system is the most elaborate seen so far. Examples of its use were given during the discussion.

Paper 3.3-06 by *Fister* and *Fischer* describes a system for the handling of data on digital form from instruments and transient recorders. The paper emphasizes the problem of the compatibility of the different codes, parallel or series transmission, etc., and an actual solution of these problems.

Paper 3.3-07 by *Hangauer, Johannsen* and *Lennartz* describes different applications of automatization for long time tests at AC and DC, tests for statistical evaluation of breakdown probabilities of impulse voltages, and partial discharge tests. The noise problems have been investigated, and examples of the noise protection used in the different systems are given.

In paper 3.3-09 by *Wiesendanger*, a full data acquisition and data handling system for an impulse generator is described. The system comprises a transient recorder, a minicomputer, keyboard, and storage facilities. The characteristics of the measured impulse voltages are computed on-line, and the values recorded for later processing.

In paper 3.3-05 by *Feser* and *Niederhauser*, the possibilities of automatization are discussed, and a fully automatic impulse generator with a number of standard test programs is described as an example. Further information is given about a measuring system comprising a transient recorder.

Paper 3.3-08 by *Pedersen, Jørgensen, Knudsen* and *Møller* describes an automatic impulse generator comprising an analogue regulator for the charging system and a supervisor for the conduction of tests. The logic system is based on a programmable microcomputer. The standardized test is selected and the parameters are set from the control panel. The data are recorded on a tape recorder for later data processing. Means are provided for an analogue record of the charging and crest voltages in order to make it possible for the operator to detect any possible trends during the test.

Very few contributions were given in the discussion due to the limited time. Most of the time was devoted to a discussion on noise and means of noise protection. This problem may be very difficult to handle, but as shown in the contributions, can be solved.

Final remarks: Many new results and improvements have been presented in group 3, in the reports as well as during the discussions. The main features may be summarised as follows:

– The continuous improvements within the measuring techniques for voltages and currents will provide possibilities of better insulation dimensioning in the future. The development of opto-electric measuring systems is still in progress; at present such systems are widely in use and seem to have a great future in our laboratories.

– The measuring technique for partial discharges is still improving. There seems to be a trend towards the use of multichannel systems. The main question, however, is the determination of the influence of the partial discharges on the material. In this field, too, improvements have been reported, even though much more has to be done before sufficient knowledge is available.

– Automatization of our tests and measurements, and the associated data acquisition and data handling have come to stay in the high voltage laboratories, and so has the extensive use of electronic components, e.g. integrated circuits. This will have a pronounced effect on the testing and measuring technique and therefore on the high voltage research of tomorrow.

4. Durchschlag von Isoliergasen

4.1, 4.2 SF₆ und andere Isoliergase

Schwefelhexafluorid SF₆ hat in der Schaltanlagentechnik und der Technik gasisolierter Rohrleiter eine breite Anwendung gefunden. Besondere Problemerkweise der SF₆-Isolation sind in dem Übersichtsvortrag herausgearbeitet worden. Hieran orientiert sind die Fachbeiträge in acht Untergruppen diskutiert worden.

Lawinen-, Streamer- und Funkenaufbau

Der Streamermechanismus nach *Pedersen* und *Raether* hat sich bei der Berechnung der Durchschlagspannung in SF₆ als anwendbar erwiesen. Dabei kann der Lawinenaufbau bis zur kritischen Elektronenzahl in seiner räumlichen Entwicklung relativ einfach theoretisch ermittelt und eine Durchschlagbedingung angegeben werden. Für die Isolationskoordination ist jedoch die Zündverzugszeit entscheidend. Diese unterliegt einer statistischen Streuung, die aus der Zeit bis zum Auftreten eines ersten wirksamen Anfangselektrons resultiert. Für den Anfangselektronenhaushalt sind die unkritischen Lawinenprozesse vor Erreichen der kritischen Feldstärke massgebend. Von *Bortnik* und *Vertikov* ist ein Rechenprogramm (4.1-03) erarbeitet worden, das es erlaubt, die räumlich-zeitliche Lawinenentwicklung in elektronegativem Gas zu berechnen, wobei im Falle von SF₆ neben der Ionisation und Anlagerung auch die Lebensdauer der instabilen negativen Ionen und die Erzeugung stabiler negativer Ionen in die Berechnung einbezogen werden muss. Die räumliche Lawinenausbildung wird auch durch die Diffusion bestimmt. Der auf die Beweglichkeit bezogene radiale Diffusionskoeffizient ist von *Maller* und *Naidu* zunächst für Luft bestimmt worden (4.5-05). Die 0%-Stehstoßspannung wird vor allem im Kurzzeitbereich durch die Streamer- und Funkenaufbauzeit bestimmt. Für Stickstoff N₂ wird von *Sander, Stritzke* und *Raether* der räumlich-zeitliche Streameraufbau mit Hilfe einer Bildwandlerkamera und die Elementarprozesse sowie das Temperaturprofil mit Hilfe eines Photomultipliers mit nachgeschaltetem Spektrographen untersucht (4.1-10). Nach *Pfeiffer* erfordern die äusserst schnellen Vorgänge des Funkenaufbaus in SF₆ eine koaxiale Prüf- und Messeinrichtung (4.1-08). Dabei gelingt es, durch eine Bildspeicherung im engen Lichtstrahl den Beginn des Funkenaufbaus im Bild festzuhalten und die Aufnahme dem zeitlichen Stromverlauf zuzurechnen.

Einfluss von Elektrodenrauigkeiten – Probleme bei hohen Gasdrücken

Bei hohen Gasdrücken liegen die experimentell ermittelten Durchschlagspannungen teilweise erheblich unter den theoretischen Werten entsprechend dem Streamerdurchschlag nach *Pedersen* (4.2-08). Nahezu in allen Beiträgen sowie in einem Diskussionsbeitrag von *R. G. Baumgartner* wird dieser Effekt auf die Elektrodenrauigkeiten und die dadurch bedingte Feldstärkenerhöhung zurückgeführt, die nur bei hohen Gasdrücken zur Bildung kritischer Lawinen im Elektrodenbereich führt. Zieht man dieses «Mikrofeld» in die Berechnungen ein, so ergibt sich eine Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Nur von *Khalifa, El Oeiby* und *Abdel Salam* (4.1-04) wird der Raumladungseinfluss auf die Lawinenbildung als entscheidend angesehen. Derartige Oberflächenrauigkeiten können durch Durchschlagvorgänge abgebaut werden (4.1-01, 4.1-03, Nachträge S. 17). Dabei wird festgestellt, dass eine Konditionierung vor allem bei relativ glatten Oberflächen möglich ist. Die relativ wenigen Schwachstellen werden durch wenige Konditionierungsdurchschläge verbessert. Allerdings kann bei grossen Entladungskapazitäten auch eine so starke Kraterbildung auftreten, dass die Spannungsfestigkeit abgesenkt wird, wie neueste Untersuchungen von *Baumgartner* zeigen (4.1-01).

Statistische Streuung

In SF₆ ist die statistische Streuung der Zündverzugszeit besonders gross. Eine neue Theorie von *Boeck* (4.1-02) erlaubt, die Verteilung der Durchschlagwerte theoretisch zu berechnen. Dabei ist die Wartezeit bis zum Auftreten der ersten wirksamen Elektronen massgebend. Von *Rein* und *Arnesen* wird eine Streuung der Ionisations- und Anlagerungskoeffizienten angenommen (4.1-09). Von *Ryan* und *Watson* (Nachträge S. 12) werden ähnliche Verteilungen festgestellt und Stosskennlinien für Blitz- und Schaltstoßspannung angegeben. Für eine einfache Anwendung in der Praxis wird von *Mosch* und *Hauschild* bei Annahme einer Doppel exponentialverteilung (4.1-06) und Berücksichtigung des Einflusses der Elektrodenfläche aus Grosszahlversuchen ein Rechenweg zur Ermittlung sicherer Stehspannungen bei Wechselspannungsbeanspruchung angegeben.

Vorentladung bei inhomogenen Anordnungen

Bei stark inhomogenen Anordnungen und niedrigen Gasdrücken werden auch in SF₆ Vorentladungen beobachtet, wobei die Spannungsfestigkeit durch Raumladungsbildung erhöht wird. Nach Kurimoto, Dale, Aked und Tedford treten derartige Vorentladungen auch bei Stoßspannungsbeanspruchung auf (4.1–05), wobei die Zeitspanne zwischen dem ersten Vorentladungsimpuls und dem Durchschlag mit wachsendem Druck abnimmt. Aufnahmen von Durchschlagkanälen von Sangkasaad (4.1–11) zeigen, dass im Bereich der intensivsten Raumladungsbildung der Funkenkanal die Raumladungszone umgeht.

SF₆-Gasgemische

Isoliergasgemische gewinnen in der Isolationstechnik wachsende Bedeutung. Insbesondere kann dadurch der Siedepunkt und die zulässige Betriebstemperatur stark gesenkt werden. Schmidt und Nguyen (4.1–12) stellen fest, dass bei einer Stickstoffbeimengung von bis zu 40 % mit keiner nennenswerten Festigkeitsminderung zu rechnen ist. In gewissen Mischungsbereichen wird sogar eine leichte Festigkeitserhöhung im Vergleich mit reinem SF₆ festgestellt, allerdings bei erhöhter Streuung. Baumgartner (4.1–01) vermutet, dass dieser Effekt auf den geringeren Einfluss von Oberflächenrauigkeiten zurückzuführen ist. Von Cookson (4.2–05) wird in der Diskussion auf Besonderheiten im Durchschlagverhalten von Gasgemischen bei beweglichen, leitfähigen Teilchen hingewiesen.

Teilchenbewegung

Durch lose, elektrisch leitende Partikel kann sich in SF₆-Anlagen eine besondere Festigkeitsminderung ergeben. Gaenger (4.2–06) hat diese Partikelbewegung durch einen Film veranschaulicht und weist in seinem Beitrag insbesondere auf die dadurch resultierenden hohen Streuwerte der Durchschlagspannung hin und gibt Messverfahren zum Nachweis derartiger Fremdpartikel wieder. Von Cookson und Wootton (4.2–05) wurde ein Rechenprogramm erarbeitet, das es erlaubt, den Bewegungsablauf derartiger Teilchen zu berechnen. In der Diskussion wird von A. H. Cookson darauf hingewiesen, dass auf Grund dieser Ergebnisse eine Stoßspannungsprüfung nicht eine Wechselspannungsprüfung ersetzen sollte. D. Kind weist darauf hin, dass wiederholte Schaltspannungsprüfungen, evtl. durch eine vorausgehende Prüfung mit niedriger Wechselspannung ergänzt, durchaus konditionierende Wirkung bei losen Partikeln zeigen.

Einfluss von Isolierstoffoberflächen

Den Isolierstoffoberflächen in SF₆-Anlagen muss besondere Beachtung geschenkt werden. Durch geeignete Stützerformung kann zwar die maximale Feldstärke im Stützbereich herabgesetzt werden, es gibt jedoch hier z. B. durch Fremdpartikel, Rauigkeiten besondere festigkeitsmindernde Einflüsse. Specht weist in seinem Beitrag (4.2–09) und einem ergänzenden Diskussionsbeitrag nach, dass die Feststoffoberfläche starke Einwirkung auf die Funkenkanalentwicklung hat. Ein Vorentladungskanal weitet sich beim Erreichen der Isolierstoffoberfläche stark aus und erreicht eine höhere Vorwachsengeschwindigkeit; offenbar findet er dort bessere Bedingungen für den Kanalaufbau vor. Nach Takuma und Watanaba setzen enge Spalten in Stützeranordnungen insbesondere bei hohen Gasdrücken (4.2–10) die Spannungsfestigkeit herab. Bei niedrigen Gasdrücken werden feine Spalten offenbar aus ähnlichen Gründen wie Oberflächenrauigkeiten weniger wirksam. Festigkeitsmindernde Einflüsse ergeben sich nach Giesenbauer bei feuchten Oberflächen (4.3–01), wobei dieser Effekt durch Oberflächenladungen noch verstärkt wird. Derartige Oberflächenladungen können sich allerdings insbesondere bei Giessharzen mit hoher Feuchte (Hosselet, 4.2–07) auch besonders schnell abbauen. Die Überschlagfestigkeit von Gleitanordnungen (Chiba, Kuono, Hohn, 4.2–03) weist bei SF₆, N₂ und Gasgemischen geringere Unterschiede auf als die Durchschlagfestigkeit. Der Aufbau der Gleitentladung wird durch umfangreiche Aufnahmen der Gleitfiguren eingehend untersucht.

Höchstspannungsprobleme und Prüftechnik

Ein Prüfkessel mit 18 m³ Inhalt für Prüfspannungen bis zu 2 MV mit einer Durchführung von nur 6 m Länge wird von

Colombo, Mosca, Tellarini und Thione vorgestellt (4.2–04). Die geringe Bauhöhe der Durchführung resultiert aus einer achsialen ohmschen Steuerung mit Wasser. Die umfangreichen Gasversorgungs-einrichtungen werden beschrieben. Die Diskussion ergab, dass ein vergleichbares Höchstspannungsprüfgefäß mit einer Ölpapier-Durchführung an der TH Darmstadt im Einsatz ist. Für geringere Spannungen wird an der TU Braunschweig eine besonders schlanke folienisolierte Durchführung mit SF₆-Imprägnierung eingesetzt, an der TU Berlin ein Prüfgefäß mit Isolierstoffmantel ohne separate Durchführung.

4.3...4.5 Air insulation

Twenty-two reports assigned to these groups dealt with problems of air insulation at atmospheric pressure, related to the electrical discharge in air and on insulating surfaces.

A group of four papers was related to first corona in air, and to the formation of streamers in the space surrounding the energized electrode. Avrutsky and Gontcharenko (4.5–01) presented the good results obtained with a theoretical analysis of the pre-breakdown processes in a sphere gap, which cause the appearance of initial electrons in non irradiated gaps at field strengths around 100 kV/cm. Khaled (4.5–03) and Khalifa, Abdel Salam and El-Oebeiky (4.5–04) presented models for the calculation of streamer development. During the discussion other contributions were presented, and a suggestion was made, that all the scientists dealing with the subject exchange ideas, and examine the possibility to unify their findings into a complete model. Peschke and Kachler (4.5–07) presented very interesting experimental and theoretical results on corona inception and breakdown voltages of double toroid electrodes, with gap spacings up to 5 m, and voltages up to 1500 kV. With reference to these results, it was shown during the discussion how a good design of the electrodes can substantially reduce the clearances necessary in a high voltage laboratory.

Another group of four papers dealt with the phenomenon of the transition from streamer to leader in large air gaps. This transition is of primary importance in the evaluation of the switching surge sparkover voltage of the external insulation for extra-high and ultra-high voltage. Callegaro and Pesavento (4.4–03) investigated the effect of field configuration and of the steepness of the applied voltage rise on the characteristics of first corona, dark period, and leader formation, proposing a physical interpretation of the existence and duration of the dark period. Ryzko and Rusck (4.4–10) examined the leader formation in a 1.75 m rod-plane gap subjected to switching impulses of positive polarity with very long times to crest (3000 μs), formulating the hypothesis that the leader stem can be formed also without the action of thermal ionization. This hypothesis was supported by a discussor, who presented a possible physical explanation, showing that the transformation can occur even at temperatures between 1000 and 1500 °K. Mosch, Lemke and Bürger (4.5–06) reported on corona measurements on very large smooth electrodes, where the possible presence of a rugosity was represented by a very short rod stemming out from the surface. It was shown that the formation of the leader, and therefore, with such large electrodes, the breakdown of the gap, will occur when the charge injected into the gap by the corona burst is of about 20 μC. This sets a limit to the possibility of using electrodes above a certain size. During the discussion it resulted that the value of 20 μC is affected by great dispersion. Volkova, Kokurkin, Slutskin (4.3–07) finally reported test results on insulator stacks with huge grading rings. Depending on their dimensions and position, the rings lead to an increase of the 50 % breakdown voltage, if they prevent the leader formation at the top of the insulator stack. The shape of the sparkover probability function is affected by the presence of the rings: on probability paper the shape becomes an 'inverted S', with important consequences for the application of the statistical dimensioning of the insulation. This matter also should be thoroughly investigated having the practical applications in mind.

A subsequent group of four papers was related to the phenomenon of propagation of the leader into the gap. Fischer and

Boecker (4.4-06) compared two of the most recent mathematical models of leader propagation, evidencing their similarities and their discrepancies, and showed possible way to improve their effectiveness, while *B. Hutzler* and *D. Hutzler-Barre* (4.4-09) gave an explanation of the dispersion of times to sparkover, with the assumptions that, according to experimental observations, the leader velocity is constant and that its direction varies with the time according to an assumed distribution of the probabilities of occurrence of each angle. *García* (4.4-07) examined the leader progression in a rod-rod gap, showing the presence of a negative leader which starts from the grounded rod. The ratio of the lengths of positive and negative leaders determines the gap factor of the configuration, i.e. the ratio of its sparkover voltage to that of a rod-plane gap having the same spacing. The last paper of the group, *Bazelian, Brandenburgsky, Levitov, Ponizovsky* (4.5-02), described tests to measure the field strength in the space of the gap, and showed some interesting results obtained in a rod-plane gap. For instance the field strength inside the region of space charge may change sign with respect to that in absence of space charge. The possibility of such measurements is very important for the improvement of the knowledge of leader development.

The next group included three papers and dealt with the formation of the breakdown channel after the streamers have reached the terminating electrode. This transition is related both to the final stage of the discharge under switching impulses, and to the discharge phenomenon for lightning impulses. *Callegaro* and *Pesavento* (4.4-02) examined the conditions of the 'final jump' of the switching impulse discharge, i.e. the phenomenon occurring between the reaching of the streamers and the reaching of the leader to the terminating electrode. *Böhm* (4.4-01), too, examined the effect of circuit parameters on discharge characteristics, introducing a resistance in series with the energized rod: the effect of the resistance was noticeable as well on the sparkover voltage, as on the various characteristics of the phenomenon during the final jump. The resistance values at which this effect on the sparkover voltage was noticed, however, are rather high (100...400 kOhm), and do not represent a problem for the normal laboratory tests. The last paper of the group, *Dale* (4.4-05), dealt with the phenomena occurring after the leader has reached the plane, and analysed the characteristics of the return ionizing wave, which complete the collapse of the dielectric strength of the gap.

In the discussion of the whole phenomenon of discharge in large air gaps, an important investigation to come from the 'Les Renardières Group' was outlined.

The development of the discharge in large air gaps presents many analogies with the natural lightning, the phenomenon being the same, but in different dimensions. A comparison between the observations may give very interesting results for the understanding of the lightning process. Prof. *Baatz* drew the attention to the possibility of comparing the final part of the lightning discharge with the laboratory discharges, the main problem being to represent correctly the charge in the lightning leader channel: the concept of 'striking distance' will have a more physical basis. The starting of the upward leaders from grounded structures may be treated in analogy with the leader formation in laboratory gaps. Moreover, he reported on results of tests with lightning rods equipped with radioactive materials, showing that the presence of such materials has the only effect to reduce the dispersion of the sparkover voltages. The radioactive material affects the values of the currents emitted by the rod tips only in case of gradients below the corona onset. Prof. *Berger* showed streak photographs of various types of lightning development: negative and positive leaders both downwards and upwards, the meeting point of the two leaders of opposite polarity being well visible, too. Although the velocities of the lightning leaders are about 20 times greater than the laboratory leaders, and their currents even 100 times higher, the phenomena are much the same. This shows that the negative discharge in laboratory gaps should be studied thoroughly, in order to be able to use laboratory findings to explain the lightning phenomenon.

With reference to lightning, an interesting film was projected which showed the 'capture' of two lightnings at the research station of Saint Privat d'Allier in France. These strokes are used

to study the effect of high impulse currents on earthed structures, such as electric transmission towers.

The phenomena occurring at the negatively charged electrodes, and the development of the discharge starting from them, were presented by *Gruber, Hutzler, Jouaire, Riu* (4.4-08), who dealt with the subject more qualitatively than quantitatively, representing a good starting point for future studies, which should, hopefully, bring the knowledge of the negative discharge up to the level of the positive one.

Finally, the possibility to generate lightnings using impulse generators of a conventional type was reported. The required generator, of 25 MV charging voltage, presents very great mechanical problems, so that its project was abandoned.

A group of three papers was then discussed, which dealt with miscellaneous problems. *Gruber* (4.3-02) reported the results of extensive tests on contaminated insulator strings, with lengths up to 13 m, and voltages up to 1000 kV rms. The tests showed linearity of the electric strength of the string with its length. Practical rules for the choice of string length for various voltages and contaminations were given. During the discussion the importance of the impedance of the voltage source was emphasized, as well as that of the duplication of the real service conditions in the laboratory. *Nowacki* (4.3-05) reported on lightning impulse tests on short rod gaps, from 30 to 150 mm spacing, inserted between two insulating plates, showing the effect of the distance between the two plates on the sparkover voltage. During the discussion the possible effect of trapped charges on the sparkover voltage was raised: to avoid it, during the tests, suitable means to discharge the insulating plates between successive impulses were adopted. *Tslaf* (4.3-06) dealt with the extinguishing properties of various insulating materials, on an electric arc burning in a narrow slit between two plates of insulating material. In the discussion the possible influence of the dissociation energy and of the decomposition products was mentioned.

The last group included three papers dealing with surface discharge. *Hahn, Fischer* and *Boecker* (4.3-03) reported sparkover tests on insulators and on plates with various absolute and relative humidities, showing that the effect of the humidity is different for the two insulating paths in parallel: the strength of the path in air increases with increasing absolute humidity, while the strength of the surface decreases with increasing relative humidity. This leads to a combination of the two types of discharge, evidenced by two distributions in the time to breakdown. *Kawashima* and *Hoh* (4.3-04) showed that the Lichtenberger figures are due to the effect of the light, and that their development in space and time is well visualized using the image converter camera in streak operation.

Crucius and *Winkelkemper* (4.4-04) reported the results of the study of surface discharges on a plate, starting from a point located at the center of the plate. The characteristics of the development of the discharge (leader, streamers, etc.) have similarity with the phenomena occurring in large gaps. From this observation a geometric model is proposed to determine, from measurements of discharge voltages on the plate, the discharge voltage of a large air gap, and the influence of humidity on it. Tests performed in 1 : 50 scale showed a surprisingly good agreement with rod-plane sparkover voltages with positive and negative polarity. The correction factors for humidity, too, agree with the proposed curves in the IEC standards. In the discussion it was pointed out that pattern of the leader development on the plate is somewhat different from that in large gaps, and that, as seen in a previous paper, the effect of humidity in air is different from that on a surface. The model is very interesting, and deserves further study.

5. Perforation des isolants solides, liquides et mixtes

5.1 Nouvelles connaissances en physique lors de processus de perforation

Les mémoires présentés dans ce groupe peuvent être classés en 3 catégories:

- Propriétés de conduction des matériaux isolants;
- Mécanismes physiques responsables du claquage des matériaux isolants;
- Mécanismes physiques responsables du treeing.

5.1.1 Propriétés de conduction des matériaux isolants

Herstad et *Nyberg* (5.1-03) ont étudié, sur ordinateur, l'évolution dans le temps, de la répartition du potentiel électrique dans un câble HVDC isolé au papier imprégné à l'huile en tenant compte d'un courant transitoire d'absorption du type: $I(t) = At^{-n}$ (loi de *Curie-Von Schweidler*) et de la variation locale de la conductibilité électrique avec la température. Les résultats obtenus mettent en évidence notamment un changement très appréciable de la répartition de potentiel dans le câble au cours de l'installation du régime thermique: le champ maximal est situé au niveau de l'âme du câble à $t = 0$ et de l'armature $t \rightarrow \infty$. Pour leurs calculs, les auteurs font appel à des observations du courant transitoire de résorption. Lors de la discussion les auteurs ont tenté de montrer le bien-fondé de leurs hypothèses de calcul à l'aide de mesures électriques supplémentaires.

Thoma (5.4-06) s'est proposé d'établir une relation entre la nature des instabilités du courant de conduction, enregistrées sur des matériaux isolants et la densité moyenne de puissance dissipée P . Pour $P < 10 \text{ W/m}^3$, les instabilités de courant sont rares et du type «impulsion». Pour $10^4 > P > 10 \text{ W/m}^3$, on assisterait à des sauts de courant du type «rectangulaire». Pour $P > 10^4 \text{ W/m}^3$ les instabilités seraient du type «impulsion» et seraient produites à une fréquence nettement plus élevée que dans le premier cas; en même temps, on peut assister à une augmentation continue du courant de conduction. L'auteur admet que ces instabilités de courant peuvent être associées à des transitions localisées de phase, du type *Ovshinski* par exemple. Certaines instabilités pourraient être comparées aux oscillations de relaxation du courant, observées par *Shtatzkes* [1]¹⁾ sur des films de SiO_2 et par *Tourelle* [2] sur des feuilles de polyéthylène; dans ce matériau, les oscillations de relaxation précèderaient directement sa perforation. Ces instabilités de courant ont été interprétées en termes de relaxation de charges d'espace ioniques, disposées au voisinage des électrodes ou à la séparation des phases amorphes et cristallines du polymère [3]. En complément, l'auteur, après avoir rappelé l'importance de la notion de densité de puissance dissipée sur la nature des instabilités de courant observées, a fourni quelques informations complémentaires (mécanisme de percolation par exemple) sur l'origine des instabilités.

5.1.2 Mécanismes physiques responsables du claquage des matériaux isolants

Une analyse numérique du champ de perforation de diélectriques solides par impulsions (perforation intrinsèque) a été entreprise par *Esposti* et *Salvini* (5.1-01) en se fondant sur le modèle «ballistique» de production d'une avalanche, proposé, il y a quelques années déjà, par *Seitz*, et valable dans l'approximation de l'électron libre ($\mu > 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Vs}$). Bien que la variation du champ de perforation avec l'épaisseur des échantillons paraisse être vérifiée correctement par les résultats numériques des auteurs, il semble que cet accord soit obtenu en tenant compte de valeur discutable de certains paramètres ajustables du modèle (libre parcours moyen L en particulier). Les auteurs ont choisi $L \rightarrow 10^{-8} \text{ m}$, valeur comparable à celle couramment adoptée pour le silicium dont la mobilité électronique est sensiblement supérieure ($10^{-1} \text{ m}^2/\text{Vs}$) à celle du polyéthylène ($< 10^{-10} \text{ m}^2/\text{Vs}$) [4; 5]. Les auteurs admettent avoir fait un choix approprié des paramètres ajustables (L et H) de manière à rendre compte correctement de la variation du champ de perforation intrinsèque avec l'épaisseur des échantillons de polyéthylène et de résine époxy.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

La variation du champ de perforation du polyéthylène sous impulsion et sous tension continue, avec la température ($75 < T < 400 \text{ }^\circ\text{K}$) a été étudiée par *Ieda*, *Sawa* et *Nagao* (5.1-04). Les auteurs ont distingué 3 causes possibles de perforation; chacune opérant dans une gamme de températures bien déterminée. L'avalanche électronique est retenue comme cause aux très basses températures. Aux températures intermédiaires, les auteurs proposent une instabilité électronique dans les phases amorphes (modèle collectif approprié de *Frohlich*, aménagé en tenant compte d'un mécanisme de transfert de charges influencé par des mouvements moléculaires des polymères et de l'influence de la cristallinité et de la forme de l'échantillon, en particulier). Aux températures plus élevées, le mécanisme de déformation mécanique est retenu. Dans la discussion, *Ieda* a clairement mis en évidence l'influence de quelques paramètres importants sur la mobilité électronique des hauts polymères (structure du matériau et température en particulier).

Kalkner et *Winkelkemper* (5.1-05) ont étudié la variation du courant de conduction et de la température locale de divers échantillons (PVC, PETP et POM) avant le claquage, en vue de dégager les mécanismes responsables de leur perforation sous une tension périodique en utilisant des techniques avancées (détecteur IR avec enregistrement). Les auteurs signalent qu'un échauffement local et important est observé sur les matériaux présentant des pertes relativement élevées, pouvant entraîner une instabilité thermique sur certains matériaux (PVC p. ex.). Sur des matériaux à très faibles pertes, l'échauffement est pratiquement indécélable. Les auteurs ont développé un modèle théorique de claquage thermique de type filamentaire, dans l'approximation stationnaire et ont obtenu notamment un accord satisfaisant avec les observations expérimentales (PVC). En complément, *Kalkner* a signalé que sa technique permettait d'enregistrer 16 images/seconde, dont la résolution était de $100 \mu\text{m}$. Il envisage d'augmenter la fréquence d'enregistrement, en vue d'observer éventuellement le switching.

5.1.3 Mécanismes physiques responsables du treeing

Nawata, *Kawamura* et *Ieda* (5.1-06) ont étudié la variation de la tension de déclenchement du treeing et de la longueur du treeing dans des échantillons de polyéthylène pourvus d'une pointe en fonction de la polarité de la tension appliquée, de son taux d'accroissement et de sa durée d'application et en fonction de la température et ce, pendant le court-circuit de l'échantillon, après élimination de la sollicitation extérieure. Selon ces auteurs, le treeing est dû à une concentration de champ importante, au niveau de la pointe, provoquée par une homocharge injectée. Leurs travaux suggèrent une constante de temps d'installation de l'homocharge de l'ordre de quelques minutes. L'influence de la température sur la longueur du treeing est discutée à partir de l'accroissement de la mobilité électronique avec la température, lorsque T varie entre 0 et $40 \text{ }^\circ\text{C}$ et à partir de la dispersion, par diffusion, de l'homocharge injectée, lorsque T est comprise entre 40 et $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Patsch (5.1-07) s'est proposé d'investiguer expérimentalement l'origine de la perforation intrinsèque du polyéthylène, en particulier sous un champ électrique inhomogène en termes de déclenchement du treeing. Des mesures d'intensité de décharge et du spectre de phase des décharges sont envisagées à cet effet. L'auteur signale que le champ initiateur du treeing correspond au champ maximal de perforation sous champ homogène et que le champ d'initiation du treeing est indépendant de la température entre 20 et $80 \text{ }^\circ\text{C}$, mais que le taux de développement du treeing augmente avec la température. D'après l'auteur, ses résultats expérimentaux plaideraient pour une perforation par un mécanisme essentiellement électronique et écartent une destruction du matériau d'origine mécanique. Des travaux seraient en cours pour obtenir une meilleure connaissance des mécanismes de perforation intrinsèque des hauts polymères.

Shibuya, *Coletti*, *Zoledziowski* et *Calderwood* (5.1-09) ont envisagé l'étude des mécanismes initiateurs du courant filamentaire en analysant, d'une manière détaillée, l'évolution de l'émission lumineuse, produite au niveau d'une pointe insérée dans une résine époxyde, soumise à des impulsions ou à des

sollicitations périodiques. Les observations ont mis en évidence la présence d'émission lumineuse au cours du passage de la queue de l'impulsion électrique, une tension d'initiation du treeing supérieure en polarité négative et une indépendance de cette tension vis-à-vis du rayon de la pointe, lorsque celui-ci est inférieur à 4 µm. Sous une tension périodique, des processus de faible dégradation ont été détectés, qui précèdent la formation soudaine du treeing. Les auteurs admettent que sous impulsion de tension, l'émission lumineuse est due à la neutralisation de la charge d'espace dont la formation est rapide. Sous une tension périodique, on assisterait à la production d'une vacuole de très faible taille sur une période d'une dizaine de minutes et le treeing apparaît brusquement lorsque la vacuole atteint une taille critique. Les travaux sont poursuivis actuellement pour analyser d'une manière très détaillée les mécanismes initiateurs du courant filamentaire dans des hauts polymères.

Paul (5.1-08), absent, a demandé par écrit à être informé des commentaires sur sa communication.

Il convient de mentionner également le mémoire de Paul (5.1-08) qui n'appartient pas au groupe de travaux rappelés plus haut. L'auteur a étudié l'influence du champ magnétique sur les propriétés de conduction de diélectriques liquides en faisant intervenir la réduction correspondante des barrières de potentiel associée au transport de charges. La réduction du courant de conduction avec le champ magnétique appliqué permettrait d'évaluer notamment la mobilité des porteurs de charge sous un champ électrique important. Il faut noter que Saveanu et Mondescu [6] notamment, ont déjà étudié l'influence du champ magnétique sur la conductibilité électrique des diélectriques liquides. Ces auteurs ont introduit une équation de transport des charges plus complète et ont aussi montré une réduction de la conductibilité électrique des diélectriques liquides dans une plage donnée de variation du champ magnétique.

5.2 Wirkung von Teilentladungen

Die Existenzformen von Teilentladungen TE wurden mit einer modifizierten Phasenbildmethode untersucht (5.2-08, Kranz). Durch digitale Verarbeitung der Messwerte wurden die Impulsfolgen auch zeitlich aufgelöst und vier Grundformen von TE gefunden. Instabile oder periodisch instabile TE stabilisieren sich, wenn die Anfangsbedingungen für positive und negative Polarität symmetriert werden. Besonders gefährlich erscheinen metastabile TE. Diese setzen die bekannten Selbstlöschmechanismen ausser Kraft und brennen somit auch dann weiter, wenn die anliegende Wechselspannung die Zündspannung unterschreitet.

In der Diskussion wurde als weiterer Selbstlöschereffekt bei periodisch instabilen TE der Raumladungsaufbau in der TE-Strecke genannt und auf die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung hingewiesen. Weiters wurde auf die Problematik der Messung von Einsetz- und Aussetzwechselspannung aufmerksam gemacht. Die lineare Spannungssteigerung liefert grössere Streuung, da die Einsetzzeit von der Höhe der Prüfspannung abhängt. Dies wurde nur bei natürlichen Fehlstellen in Modellen aus Epoxydharz festgestellt.

Das TE-Verhalten von Polyäthylen wurde in drei Beiträgen untersucht. Die Entwicklung des Durchschlages geht dreistufig vor sich. Die TE lokalisieren sich auf Fehlstellen, brechen durch konzentrierte Einwirkung den Isolierstoff auf und führen damit zum Treeing. Das Wachstum der Kanälchen hängt von Art und Druck der gebildeten Zersetzungsgase, vor allem des Wasserstoffes H₂, ab, welche die Zündbedingungen beeinflussen (5.2-04, Beyer, Löffelmacher).

Insbesondere bei Folien ist auf grösstmögliche Homogenität zu achten. Die TE-Intensität nimmt durch Schwachstellen wie gas- und staubförmige Fremdeinschlüsse oder auch durch Voralterung stark zu und führt mit der Zeit zu lokalen Schäden und letztlich zum Durchschlag (5.2-06, Golinski, Labus-Nawrat). Die Lebensdauer hängt von der relativen Feuchte ab. In die durch Erosion gebildeten Grübchen dringt kondensierendes leitfähiges Wasser ein (5.2-05, Fujioka, Tsunoda). In der Diskussion brachten die Autoren Ergänzungen, insbesondere über zwischenzeitliche neuere Messergebnisse. Zur Erklärung des Durchschlagmechanismus in hydrophilen Kunststoffen, wie PET, wurde auf

eine frühere Arbeit von Böck-Rao an PE Bezug genommen. Durch die Feuchte, d. h. die Anwesenheit von Wasser, kommt es zur Bildung von salpetriger Säure, die ins Material hineindiffundiert. Hier wandert eine steile Ionenraumladungsfrent. Bei ihrem Eintreffen an der Gegenelektrode tritt ein Leitfähigkeitssprung auf, und der Durchschlag ist erreicht. In einer weiteren Wortmeldung wurde auf Fragen der praktischen Anwendung der Folien-SF₆-Isolation anhand des Dimensionierungsgesetzes für einen Spannungswandler eingegangen.

Das TE-Verhalten von Epoxydharz war Gegenstand zweier Berichte. Beim Einsatz unter hohen Betriebsfeldstärken kommt es ganz besonders auf Reinheit und Homogenität des Isolierstoffes an. Zugspannungen führen zu Fliesszonen und schliesslich zur Bildung von Haarrissen, die ein starkes Ansteigen der TE-Werte zur Folge haben (5.2-02, Bachofen, Beyer, Jähne). Es wurde ein kritischer TE-Pegel festgestellt, unter welchem die TE erlöschen (Selbstheilung). Mit dem Raster-Elektronenmikroskop wurde an den glatten Wandungen künstlicher Hohlräume die Ausbildung kristallartiger Ablagerungen beobachtet, von denen dann das Treeing seinen Ausgang nimmt (5.2-10, Salvage, Hiley, El-Gendy, Sturrock, McGuinness).

Im Diskussionsbeitrag wurde insbesondere versucht, den Beginn der Zerstörungsphase zu definieren. Es wurde eine kritische Belastungsrate von 7 pC.min angegeben. Die mikroskopischen Zerstörungen erreichen dann 1% der Schlagweite. Es folgte ein Hinweis auf das Temperaturverhalten. Weitere elektronenmikroskopische Aufnahmen mit anderem Bildwinkel wurden zum zweiten Beitrag präsentiert.

Über das TE-Verhalten sonstiger Feststoffisolierungen lagen zwei Arbeiten vor. Auch bei elektrotechnischem Porzellan kommt es, bedingt durch die feinkristalline, inhomogene Struktur, ausgehend von den Hohlräumen zu Kanalbildung ähnlich dem Treeing (5.2-01, Aguet, Staub). Verbesserungen wurden mit halbleitenden Zusatzstoffen erzielt. Epoxydharzgebundene Mica-Systeme zeigen besseres Langzeitverhalten als Naturharz/Mica. Die Zerstörung der Isolation setzt im Bereich der Überlappungen und Stösse, vorzugsweise bei schmalen Bändern, an (5.2-09, Ryder, Wood, Hogg). Neuere Aufnahmen mit dem Raster-Elektronenmikroskop zeigten, dass bei einer Anordnung Spitze gegen Mica-Folie die Beschädigungen nicht direkt unter den kristallartigen Ablagerungen (wie in 5.2-10), sondern als tiefe Erosionen um die Wurzeln der dendritischen Formationen auftreten.

Das TE-Verhalten von ölprägnierten Isolierungen wurde in drei Berichten diskutiert. Für die Alterung eines Gleichspannungs-Masse-Papierkabels ist die Elektrophorese verantwortlich, die im Entladungsgebiet zu einer Austrocknung der Poren über die gesamte Papierdicke führt und dadurch Widerstand und Durchschlagsfestigkeit der Anordnung reduziert (5.2-03, Bessei). An der Grenzschicht zwischen Gas und Isolieröl kommt es je nach Gasatmosphäre und Ölzusammensetzung zu Absorption oder Desorption des Gases durch das Öl, wodurch das TE-Verhalten beeinflusst wird (5.2-07, Karius). Unter einer bestimmten Gasatmosphäre lässt sich das Gasverhalten verschiedener Öle aus dem Verlauf der scheinbaren Impulsleistungen beurteilen. Das TE-Verhalten des Öles hängt ferner vom Gehalt an aromatischen Kohlenwasserstoffen ab und liegt bei etwa 20% am ungünstigsten (5.2-11, Shahguedanova).

In der Diskussion über das Gleichspannungskabel wurde betont, dass die Zähigkeit der Tränkmasse, vor allem jene des Grundöles, in die Lebensdauer eingeht. Quantitative Aussagen über Kapillar- und elektrophoretische Kräfte liegen nicht vor. Chemische und elektrische Untersuchungen nach 10jährigem Betrieb des 250-kV-Kontiskan-HGÜ-Kabels haben jedoch keine Alterungserscheinungen aufgezeigt. Zum Gasverhalten von Isolierölen wurden weitere Messergebnisse mitgeteilt. Dieses hängt im wesentlichen von den Entladungen mit grösserem Ladungsinhalt ab.

5.3 Zulässige Durchschlagsfeldstärken bei allen Spannungsarten, Alterung und Lebensdauer

Dieser Themenkreis umfasste 14 Berichte, die in folgenden 5 Untergruppen diskutiert wurden:

Die Bestimmung und Deutung von Lebensdauergeraden geht von der Annahme einer Schadensakkumulation aus. Dann kennzeichnet die relative Länge der TE-Kanälchen den erreichten Grad der Schädigung bzw. die bereits verbrauchte relative Lebensdauer (5.3-09, Mosch, Böhme, Pilling). Letztere ist unabhängig von der Höhe der Beanspruchung, wenn sich dabei nicht die Art, sondern nur die Intensität des Zerstörungsmechanismus ändert. In doppelt-logarithmischer Darstellung bedeutet dies einen konstanten Anstiegsparameter n der Lebensdauergeraden. Dieser kann aus der Messung der elektrischen Kurzzeitfestigkeit im Anschluss an eine konstante Vorbeanspruchung definierter Dauer exakter bestimmt werden, als direkt aus Langzeitversuchen (5.3-12, Simoni, Pattini, Lillini). In den mathematischen Zusammenhang der mit der Zeit linear ansteigend vorausgesetzten Alterungsgrösse kann ein beliebiges Lebensdauergesetz eingebracht werden.

Am Symposium wurden von den Autoren nochmals die wesentlichen Punkte ihrer Arbeiten herausgestellt. Eine Stückprüfung soll möglichst kurz, d. h. billig sein. Fehlerhafte Stücke müssen dabei sicher ausfallen, die fehlerfreien sollen möglichst wenig geschädigt werden. Ein weiterer Diskussionsbeitrag nahm auf hochfrequente Phänomene beim Erwärmungs- und Alterungsmechanismus Bezug.

Die Lebensdauer von Kunststoffen unter verschiedenen Einflüssen wurde in 5 Arbeiten untersucht. Die Kurzzeitfestigkeit folgt einer multiplikativen Weibull-Mischverteilung, deren steiler Ast durch die Materialwerte (intrinsic) bestimmt wird und nur mit Proben bis zu einigen mm³ messbar ist (5.3-03, Fischer, Lukaschewitsch, Peschke, Nissen). Für die Praxis massgebend ist jedoch die fehlerstellenbedingte Verteilung. Die Gültigkeit der Volumstransformation wurde nachgewiesen. Langzeitversuche erbrachten eine Frühausfallverteilung ($a < 1$) bei Dauerfestigkeiten von 300...375 kV/mm, welche bei noch kleineren Feldstärken in eine Verteilungskurve $a > 1$ überging. In einem Diskussionsbeitrag wurde betont, dass Kurzzeit-Durchschlagsversuche an Feststoffen wie PE, CH- und EP-Harzen in jedem Fall eine Weibull-(Misch-)Verteilung ergeben, was durch Messungen an bis zu je 2000 unter Sauberraumbedingungen vorbehandelten Proben statistisch gesichert erscheint.

Spannungsstabilisierende Additive erhöhen die Leitfähigkeit der Hohlraumwände und erhöhen dadurch die Standzeit (5.1-02, Griač). Von einem Diskussionsredner wurde der Auslöschmechanismus durch ein organo-metallisches Additiv beschrieben.

Hohlräume können auch durch mechanische Beanspruchung entstehen, wobei sich Risse quer zur Richtung der grössten Dehnung ausbilden (5.3-08, Menges, Berg). Das Zünden der TE führte bei Polypropylenfolien schon bei Dehnungen ab 1% zu starkem Ansteigen des Verlustfaktors. Ähnliche Ergebnisse wurden inzwischen auch an HDPE gefunden und 16...18% Absenkung der Durchschlagsfeldstärke bei Dehnungen bis 12% genannt. Vergleichende Standzeitversuche mit 0 bzw. 5% Dehnung ergaben stark divergierende Kennlinien, d. h. eine beträchtliche Reduktion der Lebensdauer.

Es wurde versucht, das starke Ansteigen der TE-Kenngrössen unmittelbar vor dem Durchschlag als Kriterium für dessen Vorhersage zu benützen (5.3-06, Kodoll). Eine rechtzeitige, positive Prognose war bei nicht zu hoher oder zu tiefer Beanspruchung möglich. In der Diskussion wurde auf ähnliche Versuchsergebnisse über die Festigkeit von Kunstharzen gegen innere Teilentladungen verwiesen. 420- und 60-Hz-Messdaten zeigten dabei gute Übereinstimmung. Bei Entwicklung eines Tree-Kanals steigt die TE-Grösse und signalisiert den Beginn der Zerstörungsphase.

Nach Vorbeanspruchung mit Gleichspannung wurde eine von der Kombination der Polaritäten abhängige Verschiebung der Stossdurchschlagsspannung beobachtet (5.3-04, Guindehi). Sie ist auf die Bildung von Raumladungen zurückzuführen, wobei die positive erst nach Erholungszeiten von mindestens einer Minute verschwindet.

Die Kurz- und Langzeitfestigkeit von Maschinen- und Transformatorisierungen hatten drei Arbeiten zum Thema. Es wurden wichtige Hinweise zur korrekten Durchführung und Auswertung von Lebensdaueruntersuchungen an Generatorstäben

gegeben (5.3-07, Lipták, Schuler). Insbesondere sollen Prüfling und reale Maschinenisolation sich technologisch und physikalisch entsprechen. In einem Diskussionsbeitrag wurde ergänzend ausgeführt, dass bei den Versuchen mit praxisnahen Modellen aus kombinierter Isolation von mindestens drei verschiedenen Dielektrika unter 5...25 kV/mm von Beginn an starke TE gemessen wurden. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Lebensdauer und TE-Intensität liess sich nicht angeben.

Ölgetränkte Papierisolationen wurden systematischen Kurzzeitfestigkeitsprüfungen unterzogen (5.3-10, Salvage, Tubbs, Hiley, Heron, Sharpley). Das Verhältnis von Schalt-/Stoßspannungsfestigkeit wurde mit 0,77...0,95, jenes von Stoss-/Wechselspannungsfestigkeit mit 1,18...1,74 angegeben. Die Durchschlagsfeldstärke von Transformatorenöl kann im quasihomogenen Feld bei Wechselspannung durch Beschichtung einer oder beider Elektroden mit Sprühfarbe oder Epoxydharz um 50...80% verbessert werden (5.3-13, Vlastós, Rusek).

Über die Lebensdauer von Kunststoffkabeln wurden zwei Berichte vorgelegt. Einerseits wurde die Aussagekraft des Step-Tests an 110-kV-VPE-Kabelprüflingen überprüft (5.3-11, Schuppe). Die Durchschlagsfeldstärken waren nach Weibull mit Exponent $n \times a$ verteilt. In doppelt-logarithmischer Darstellung wurde eine Lebensdauergerade der Steigung $n \geq 20$ gefunden. Auch nach Umrechnung vom Modell auf 10 km Kabellänge lagen noch alle Durchschlagswerte über der Lebensdauer-Sollgeraden, die vom 2,5fachen Wert der Nennspannung nach 30 Jahren ausgeht. Andererseits wurden die Weibull-Koeffizienten aus den Messergebnissen der Routineprüfungen während der Fertigung an über 3000 km PE-Kabel der 20- und 30-kV-Reihen bestimmt (5.3-02, Dahinden). Hier ergab die Durchschlagshäufigkeit pro Längeneinheit über der Prüfzeit eine Gerade mit $a = 0,5$. Bei Langzeitversuchen ergibt sich ein Knick der Lebensdauergeraden auf $a > 1$. Hier sind dann TE massgebend, die auch bei nur geringer Intensität die Lebensdauer verkürzen.

Die Diskussionsredner unterstrichen die Problematik der Extrapolation über lange Zeiträume. Die von verschiedenen Autoren angegebenen Streukoeffizienten stimmten gut überein. Sorgfältige TE-Messung und praxisnahe Langzeitversuche werden als absolut notwendig erachtet. Beanspruchung und Temperatur sind so zu wählen, dass die gleichen Mechanismen wie im Betrieb auftreten.

Zwei Berichte befassten sich mit der Entwicklung und Prüfung von kommenden Hochleistungskabeln. Beim CESI befinden sich Niederdruck-Ölkabel-Prototypen mit reinem Zellosepapier für 765 bzw. 1100 kV im Dauerversuch (5.3-01, Cavalli, Mosca). In der Diskussion wurde als Alternativlösung ein Hochspannungs-Hochleistungskabel aus Tripellaminat (Zellulose-Polypropylen-Zellulose) vorgestellt, mit dem die gestellten Anforderungen auch ohne forcierte Kühlung und ohne erhöhten Öldruck erfüllt werden. Dauerversuche wurden z. T. bereits erfolgreich bestanden.

Für die Hochspannungsisolation in Kryokabeln ist auch Vakuum geeignet (5.3-05, Juchniewicz, Tyman). Die Überschlagsfestigkeit hängt von der durch die erforderlichen Distanzierungen gebildeten Tripelstelle Metall-Dielektrikum-Vakuum ab. Die Kurzzeitfestigkeit gehorcht auch hier einer statistisch gesicherten Weibullverteilung.

5.4 Comportement des isolants aux basses températures

L'intérêt de l'étude des isolants à basse température est à la fois scientifique et technique. L'intérêt scientifique est évident. L'intérêt technique est lié au développement de la cryoélectrotechnique, basée sur les propriétés remarquables des conducteurs électriques à basse température, et en particulier sur la supraconductivité. Parmi les applications réalisées ou envisagées figurent notamment les électro-aimants, les inducteurs des alternateurs et les câbles de transport d'énergie. Toutes ces applications requièrent des isolants électriques, mais seuls les câbles mettent en œuvre de hautes tensions.

On a envisagé, pour l'isolation du matériel cryoélectrique, divers matériaux, à l'état gazeux, liquide ou solide. Des communications concernant chacun des trois états de la matière ont été présentées au Symposium.

En ce qui concerne les fluides, les réfrigérants cryogéniques, hélium et azote, ont fait déjà l'objet de travaux nombreux et les connaissances pratiques commencent à atteindre un niveau suffisant. Leurs tensions de rupture peuvent généralement s'exprimer par des formules de la forme Kd^n , où d est la distance entre électrodes (*Thoris, Bobo et Fallou*, 5.4-07). D'autres résultats intéressants ont été présentés concernant le comportement diélectrique à basse température de l'huile minérale, du dodécylbenzène (*Iwara, Kikuchi, Kawai*, 5.4-02) et de l'hexafluorure de soufre liquide (*Torshin* 5.4-08). Les résultats indiquent généralement de forts accroissements des tensions disruptives, lorsque la température s'abaisse.

Mais le plus fort accent a été mis, en ce qui concerne les fluides, sur l'étude des mécanismes de rupture diélectrique. C'est ainsi que, dans leur communication *Rasevig et Sokolova* (5.4-05) tentent d'expliquer des anomalies par rapport à la loi de Paschen de la tension de rupture de l'hélium gazeux, près de la température de liquéfaction, par la présence de gouttes de liquide en suspension. Deux autres communications étudient le mécanisme de rupture diélectrique dans l'azote liquide (*Wimmershoff*, 5.4-09) et dans l'hexafluorure de soufre (*Torshin*), par le mouvement d'impuretés solides, respectivement isolantes ou conductrices, conduisant à la formation de bulles gazeuses, par échauffement dû à ces mouvements, qui sont siège de l'initiation de la rupture. Enfin, une communication (*Peier, Schmidt*, 5.4-04) étudie la rupture diélectrique de l'azote liquide en champ divergent (entre pointe et plan) et présente des considérations statistiques intéressantes relatives aux deux polarités de la tension et mettant en cette évidence un mécanisme d'initiation par émission secondaire.

L'utilisation d'une isolation fluide exige la séparation des pièces sous tension par des entretoises solides qui risqueraient de devenir des points faibles. On peut cependant (*Torshin*), par une étude soignée de ces pièces, obtenir une tenue diélectrique proche de celle du fluide seul.

Mais les spécialistes s'intéressent de plus en plus à l'isolation solide, dans le but d'accroître la compacité du matériel. L'utilisation d'une isolation isotrope semble improbable, du fait des problèmes mécaniques soulevés par la forte contraction et la perte d'élasticité (*Torshin*) des matériaux plastiques à basse température. On se dirige donc vers l'utilisation d'isolations laminées perpendiculairement à la direction du champ électrique. Celles-ci doivent être imprégnées d'un fluide pour remplir les dé joints et imperfections diverses, et l'imprégnation se fait mieux si l'on utilise, au moins partiellement, des feuilles poreuses. On retrouve donc, à basse température, les mêmes considérations que celles qui ont conduit, au-dessus de la température ambiante, au choix du papier imprégné.

Le papier imprégné à basse température a fait l'objet de trois communications. Les imprégnants étaient l'huile minérale, le dodécylbenzène et l'azote liquide (*Iwata*, 5.4-02), l'air gazeux ou liquide (*Paul*, 5.4-03) et l'hélium liquide (*Wimmershoff*, 5.4-09). De façon générale, les tenues diélectriques de ces isolations sont excellentes à basse température, parfois plusieurs fois supérieures à celles obtenues à la température ambiante, surtout sous tension impulsionnelle ou continue. Comme par ailleurs, à très basse température, les pertes diélectriques en alternatif seraient prohibitives, en raison du coût élevé de la frigorification, c'est surtout sous tension continue que cette isolation présente de l'intérêt.

Sous tension alternative, on doit donc faire appel à des matériaux synthétiques non polaires, donnant des pertes très

basses. Parmi les matériaux étudiés, figurent le polyéthylène en film (*Paul et Thoris*) ou feutre (*Centurioni et Thoris*), le feutre de polyamide (*Centurioni, Delfino, Molinari et Viviani*, 5.4-01), le polypropylène et le fluoroéthylène propylène (*Thoris*) imprégnés d'azote liquide (*Centurioni et Thoris*), d'air gazeux ou liquide (*Paul*) ou d'hélium liquide (*Thoris*). L'étude de ces matériaux montre que, de façon générale, le mécanisme de rupture diélectrique est celui décrit par *H. Bertein* [7], selon lequel l'initiation du phénomène a lieu dans le milieu d'imprégnation. Il conduit à des tensions disruptives pouvant descendre, en alternatif, jusqu'à 50 % des valeurs mesurées en continu ou en impulsion et à des lois de variation avec l'épaisseur d de la forme Kd^n , n'étant compris entre 0,5 (fortes épaisseurs) et 1 (faibles épaisseurs).

L'étude de maquettes plus élaborées (5.4-07) constituées de films rubanés et imprégnés d'azote ou d'hélium liquides a mis en évidence le fait que les pertes diélectriques en alternatif 50 Hz s'accroissent fortement avec le champ électrique appliqué, au-dessus d'un seuil de ce dernier et atteignant des niveaux prohibitifs à des champs inférieurs à ceux que l'on souhaiterait appliquer en service. Ces pertes semblent résulter de la formation de bulles gazeuses et des décharges partielles qui s'y produisent, mais le phénomène peut être fortement atténué par l'utilisation de «sandwiches» de film et de feutre ou par l'accroissement de la pression.

Enfin, un projet de câble cryorésistif isolé au papier imprégné, pour courant continu, a été présenté (*Iwata, Kikuchi, Kawai*, 5.4-02), analogue à celui conçu en Grande-Bretagne par *B. Salvage*, mais à refroidissement interne, ce qui conduit à des pertes moindres par effet Joule. Toutefois, comme l'a remarqué *B. Salvage*, le refroidissement externe présente certains avantages, comme la réduction de pertes de charge permettant de plus grandes distances entre stations de réfrigération pour des liaisons de grande longueur.

En conclusion, on peut dire que tous les thèmes essentiels ont été traités au Symposium. La tenue diélectrique des fluides, à présent très bien connue, a fait l'objet de publication de résultats concordants. Toutefois, l'intérêt des spécialistes semble se diriger vers des solides, laminés et imprégnés, où les substances poreuses, papier ou feutre, seuls ou combinés à des films homogènes, semblent devoir jouer un rôle semblable à celui joué par ces isolations à la température ambiante. De même, la nature des mécanismes semble être la même qu'à la température ambiante.

Littérature

- [1] *M. Shatzkes, M. Av-Ron and M. R. Anderson*: On the nature of conduction switching in SiO₂. *Journal of Applied Physics* 45(1974)5, p. 2065...2077.
- [2] *A. Tourelle*: Sur les phénomènes de conduction à champ électrique élevé dans les hauts polymères. Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 1974.
- [3] *M. Ieda, G. Sawa and R. Takeuchi*: Decay processes of different kinds of surface electric charges across polyethylene film. *Japanese Journal of Applied Physics* 8(1969)6, p. 809.
- [4] *D. K. Davies*: Carrier transport in polythene. *Journal of Physics* 5(1972)1, p. 162...168.
- [5] *L. Saveanu et D. Mondescu*: Aspects de l'influence des champs magnétiques sur la conductibilité électrique des diélectriques liquides. Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique No. 179: Phénomènes de conduction dans les liquides isolants, Grenoble, 17...19 septembre 1968. Paris, Edition du CNRS, 1970; p. 385...397.
- [6] *H. Bertein*: Etude du mécanisme de la perforation des isolants solides sous l'action des décharges partielles. Identification d'un critère intrinsèque de tenue des isolants à la tension. *Rev. Gén. Electr.* 79(1970)6, p. 497...505.

Internationales Symposium Hochspannungstechnik 1975

Wir weisen darauf hin, dass eine beschränkte Anzahl Konferenzbände, die sämtliche Symposiumsbeiträge enthalten, zum Preise von Fr. 120.— bezogen werden können.

Bezugsquelle:
Administratives Sekretariat des SEV
Postfach, 8034 Zürich