

| | |
|---------------------|---|
| 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: | 83 (1992) |
| Heft: | 15 |
| Artikel: | Messung von Raumladungen in Kunststoffisolierungen |
| Autor: | Rengel, Urs |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-902851 |

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 26.01.2026

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

Messung von Raumladungen in Kunststoffisolierungen

Urs Rengel

Mit Hilfe der «pressure wave propagation method» (PWP-Methode) ist es möglich, Raumladungen im Innern von Festkörpern zu messen. Im vorliegenden Beitrag wird das Messprinzip kurz dargestellt und der Aufbau für Messungen an Kunststoffplatten und an ganzen Kabeln beschrieben. Für die beiden Kabelisoliermaterialien Polyäthylen (PE) und Äthylen-Propylen-Copolymerisat (EPR) werden einige Messungen über die Raumladungsausbildung bei Feldstärken bis 30 kV/mm vorgestellt.

La «pressure wave propagation method» (méthode PWP) permet de mesurer les charges spatiales à l'intérieur de corps solides. L'article présente brièvement le principe de mesure et le montage utilisé pour les mesures sur plaques plastiques et sur des câbles complets. Pour les deux matériaux utilisés pour l'isolation de câbles, le polyéthylène (PE) et le copolymérisat éthylène-propylène (EPR), on présente quelques mesures sur la formation des charges spatiales soumises à des intensités du champ allant jusqu'à 30 kV/mm.

Adresse des Autors

Urs Rengel, Dipl. El.-Ing. ETHZ, Brugg Kabel AG, 5200 Brugg.

Um Lebensdauer und Qualität von Hoch- und Höchstspannungskabeln verbessern zu können, müssen die physikalischen Vorgänge im Isoliermedium und an den Übergangsstellen noch besser verstanden werden. Einen wichtigen Platz dabei nehmen Raumladungen ein, die sich an gewissen Stellen und unter bestimmten Umständen ansammeln und so den Verlauf des inneren elektrischen Feldes stark beeinflussen können. Als Raumladungen bezeichnet man gebundene, überschüssige Elektronen sowie fehlende Elektronen, die als sogenannte Löcher positive Raumladungen darstellen. Sie sind bei der Klärung verschiedener Durchschlagsmechanismen zu berücksichtigen. Nicht nur im Hinblick auf Gleichspannungskabel ist es interessant, Injektions-, Extraktions- und Bewegungsmechanismen von Ladungsträgern im Innern von Isolierstoffen genauer zu untersuchen. So können zum Beispiel Feldüberhöhungen, die durch mikroskopische, spitze Unebenheiten an Kontaktierungsgrenzschichten auftreten, durch Raumladungen homogenisiert werden, was die Gefahr eines Initialauffruchs wesentlich reduzieren kann.

Mit Hilfe der sog. «pressure wave propagation method» (PWP-Methode) ist es möglich, Raumladungen im Innern von Festkörpern zu messen. In diesem Beitrag wird das Messprinzip kurz dargestellt und der Aufbau für Messungen an Kunststoffplatten und an ganzen Kabeln beschrieben. Für die beiden Kabelisoliermaterialien Polyäthylen (PE) und Äthylen-Propylen-Copolymerisat (EPR) werden einige Messungen über die Raumladungsausbildung bei Feldstärken bis 30 kV/mm vorgestellt. PE und EPR zeigen dabei ein unterschiedliches Verhalten. Weiter kann festgestellt werden, dass raumladungsbedingt die

Feldstärke lokal bis zu dreimal höher werden kann als im vergleichbaren homogenen Fall. Insbesondere lässt es sich zeigen, dass die Gleichspannungsprüfung von Hochspannungskabeln wenig Aussagekraft hat und sogar schädlich sein kann, was von anderen Autoren bereits früher angeführt worden ist. Die PWP-Methode scheint ein taugliches Mittel zu sein, um das Verständnis von Durchschlagsmechanismen und Vorgängen an den Kontaktierungsstellen zu verbessern, und könnte eine vielversprechende Methode im Hinblick auf die Optimierung von Isolierstoffen und Füllstoffen darstellen.

Das Messprinzip

Die zerstörungsfreie Messung von Raumladungen im Innern von Isolierstoffen kann mit einer den Probekörper durchlaufenden, akustischen Druckwelle geschehen. Das Messprinzip soll nur kurz erläutert werden; eingehendere Betrachtungen findet man in [1–3]. Durchläuft eine Druckwelle einen Isolierstoff, der Ladungen enthält, so wird durch die mechanische Bewegung ein Verschiebungsstrom erzeugt, der in einem äusseren Stromkreis ebenfalls gemessen werden kann. Bei Verwendung einer genügend starken Druckwelle, deren Anstiegszeit und Dauer kurz gegenüber den Durchlaufzeiten von einigen hundert Nanosekunden ist, lässt sich nach [3] aus dem gemessenen Stromsignal direkt auf die Ladungsverteilung schliessen. Die Erzeugung eines solchen Druckimpulses ist auf verschiedene Arten möglich. Die geeignetste Möglichkeit ist nach [3] die Verwendung eines Laserpulses. Im vorliegenden Fall findet ein Nd-YAG-Laser der Wellenlänge 1064 nm und einer Ener-

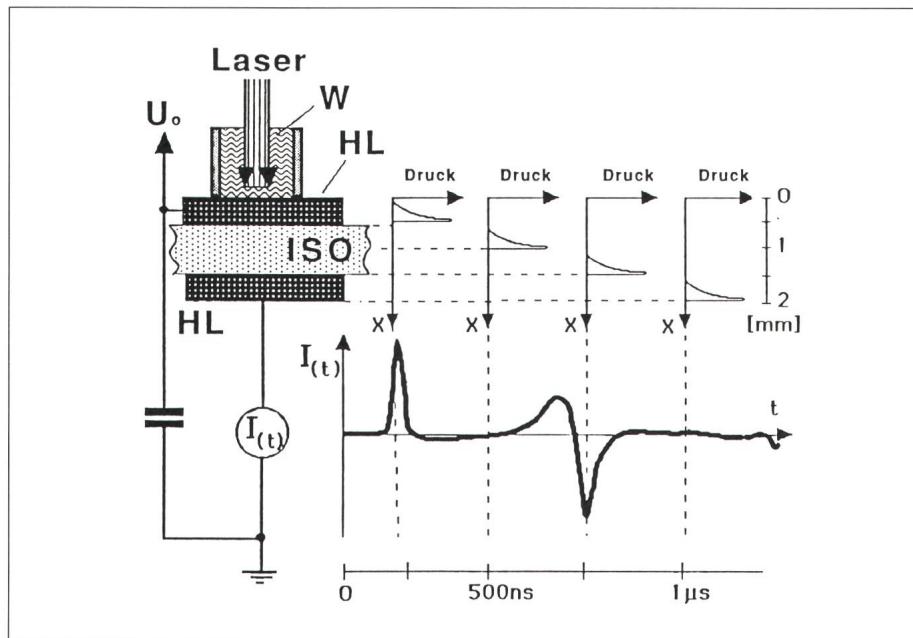


Bild 1 Schematische Darstellung des Messprinzips

U_o Spannung: $U_o = +30 \text{ kV}$

W Wasser

HL Halbleiter

ISO Isoliermedium

Der Stromverlauf $I(t)$ ist ein Abbild der Ladungsverteilung im Prüfling

gie von ungefähr 150 mJ Verwendung. Der Lichtimpuls besitzt eine Anstiegszeit von 3 ns und eine Halbwertsbreite von 4 ns. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf einem schwarzen Halbleiterkunststoff wird ein Teil desselben explosionsartig verdampft und löst dadurch eine Druckwelle aus. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Ablauf.

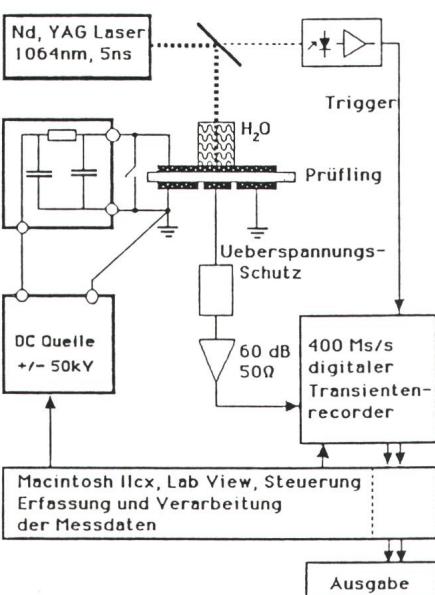


Bild 2 Schematischer Messaufbau bei Prüflingen in Plattenform

sigt werden. In Bild 1 ist der Durchlauf einer Druckwelle schematisch dargestellt. Das Stromsignal in Bild 1 entspricht dem Fall einer (im Zeitpunkt der Messung) seit 30 Minuten angelegten positiven Spannung von 30 kV, welche zu einer positiven Raumladungszone vor der Kathode führte (in Bild 1 ist der Stromverlauf der Messung nachgezeichnet).

Messanordnungen

Nachfolgend sind zwei verschiedene Messanordnungen kurz beschrieben. Die erste ist für Prüflinge in Plattenform ausgelegt, die zweite zur Messung an einem Kabelstück. Bei den verwendeten Platten handelt es sich um 1 mm dicke Polyäthylen(Neste NCPE4201)- oder EPR(Brugg BCR-30)-Platten, die mit einer 0,5 mm dicken Halbleiterschicht (BP HFDM0595) unter Stickstoff bei 8 bar vernetzt wurden. Die Halbleiterschicht dient bei der Messung als Elektrode und als Absorber für das IR-Laserlicht. Die Platten sind in einer kreisförmigen Schutzringanordnung ausgeführt. Die Signalauskopplung ist im 50-Ω-System ausgelegt, so dass am Ausgang eine stromproportionale Spannung anfällt. Ein Breitbandverstärker (0,01–500 MHz) mit

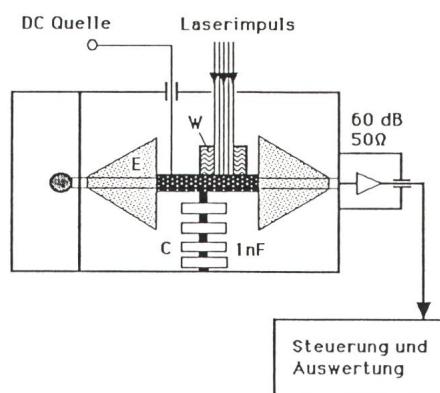


Bild 3 Schematische Darstellung des Messaufbaus für 50 cm lange Kabelprüflinge

E Endverschluss

W Wasser

C Koppelkondensator

einer niedrigen Rauschzahl ($f = 1,4$) verstärkt das Signal um 60 dB, um es einem digitalen Speicheroszilloskop zuzuführen. Für die nachträgliche Datenverarbeitung dient ein PC. Der schematische Aufbau ist in Bild 2 dargestellt.

Für die Messungen am ganzen Kabel wurde eine Anordnung gemäss Bild 3 aufgebaut. Der äussere Halbleiterbelag des Kabels liegt jeweils auf Potential, während der Innenleiter über den Messverstärker auf Erde liegt. Über einen Koppelkondensator C wird der Signalkreis geschlossen. Das Signal wird dann ebenfalls der Auswertungselektronik zugeführt. Das zur Verfügung stehende Signal ist in dieser Anordnung jedoch wegen der verbleibenden Kabelkapazität um etwa 15 dB geringer als bei der Anordnung mit plattenförmigen Prüflingen. Als Versuchskabel diente ein Polyäthylen-Kabel (Brugg 10 kV-95 mm²-XKT) mit einer Isolationsdicke von 2,8 mm sowie ein EPR-Kabel (Brugg 10 kV-95 mm²-GKT) mit den gleichen geometrischen Abmessungen.

Messungen

Empfindlichkeit

Mit der druckverstärkenden Wassersäule ist die Anordnung mit den Plattenproben empfindlich genug, um bei einer Plattendicke von 1 mm und einer angelegten äusseren Spannung von 250 V noch ein brauchbares Signal/Rauschverhältnis zu erhalten. Bild 4 zeigt einen Ausschnitt des Signals, das allein durch die Oberflächenladung auf der positiven Elektrode erzeugt wird (Messaufbau nach Bild 2). Die Eichmessung muss im möglichst raumladungsfreien Zustand erfolgen. Die Flächenladungsdichte beträgt im vorliegenden Fall, bei 250 V angelegter Spannung, 0,4 nC/cm². Der daraus resultierende Verschiebungsstrom als interessierende Messgröße beträgt 0,5 μ A.

Sind erst einmal Raumladungen im Material vorhanden, so sind diese kurzfristig, je nach «Einprägtiefe», nur durch Kurzschließen bei Temperaturen um 200 °C wieder zu eliminieren.

Messungen an plattenförmigen Prüflingen

In Bild 5.a ist das Signal eines Polyäthylen-Prüflings, unmittelbar nach Anlegen einer Spannung von -25 kV, dargestellt. Es sind noch keine Raumladungen zu sehen; lediglich die Signalspitzen, hervorgerufen durch die Oberflächenladungen an den Kontaktierungen, sind deutlich zu erkennen.

Die durch die äussere Spannung aufgezwungenen Ladungen ergeben Stromimpulse von bis zu 40 μ A.

Unter dem Einfluss des E-Feldes beginnen die Ladungsträger sich langsam zu verschieben, was durch Elektronen-Hopping sowie durch Ionenmigration oder weitere eventuell chemische Prozesse ermöglicht werden dürfte. Nach einigen Stunden stabilisiert sich die Raumladungsverteilung. Wird nun die äussere Spannung entfernt und der Prüfling über einen Widerstand von einigen k Ω für zwei Stunden entladen, so bleiben dennoch die Raumladungen im Innern des Isolierstoffes erhalten. Während des Entladevorgangs, würde man ihn über Stunden beobachten, verändert sich die Raumladungssituation natürlich erneut, bis sie wahrscheinlich nach Wochen gänzlich neutral wird. Wie die Verteilung nach 24 Stunden Spannungsbelastung und nach zwei Stunden Entladung an einem EPR-Prüfling aussieht, zeigt Bild 5.b. Vorhandene Elektronen scheinen hier von der Kathodenseite her beginnend zur Anode gewandert zu sein, was eine positive Raumladungszone in der Nähe der (ehemaligen) Kathode und eine negative Raumladungszone in der Nähe der (ehemaligen) Anode bewirkt. Es scheint, als ob im vorliegenden Fall kein Elektronen-Nachschub aus der Kathode stattgefunden hat, was auf gewisse Energiebarrieren oder weitere noch abzuklärende Vorgänge an der Kontaktierungsstelle zwischen Halbleiter und Isolator zurückzuführen sein dürfte. Weitere

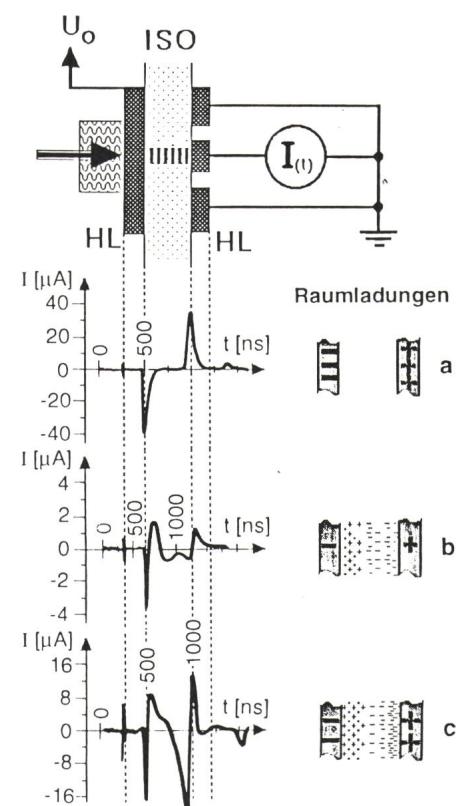


Bild 5 Raumladungsmessungen an Platten-Prüflingen aus PE und EPR

- a PE-Prüfling, gemessen unmittelbar nach Anlegen einer Spannung von -25 kV (Messung bei angelegter Spannung)
- b EPR-Prüfling, gemessen nach einer Belastung mit -25 kV während 24 Stunden und anschliessendem Kurzschließen während 2 Stunden (Messung ohne angelegte Spannung)
- c PE-Prüfling, sonst wie b

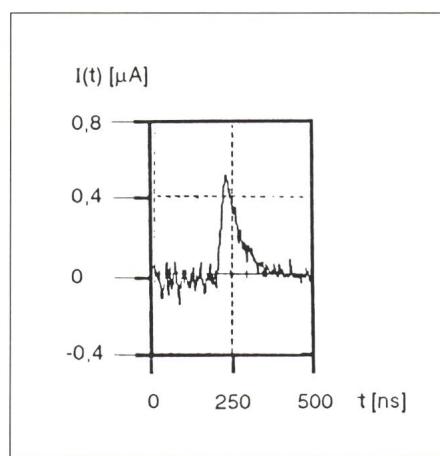


Bild 4 Ausschnitt des Messsignals

Der Ausschnitt des Messsignals $I(t)$ entspricht der Oberflächenladung auf der positiven Elektrode bei einer angelegten Spannung von 250 V an einer 1 mm dicken EPR-Platte

Versuche werden hier vielleicht Aufschluss geben können. Immer wenn Raumladungen im Innern vorhanden sind, induzieren sie natürlich auf den Elektroden die zugehörigen Spiegelladungen, die dann ebenfalls als Signalspitzen zu erkennen sind.

Im Gegensatz zu EPR weist PE bei der gleichen Belastung eine grössere Konzentration von Raumladungen auf. Vor allem die negative Zone weist eine hohe Dichte unmittelbar vor der ehemaligen Anode auf, was dem Bild 5.c zu entnehmen ist. Würde man einen so vorbelasteten Prüfling mit einer umgekehrt gepolten Gleichspannung erneut beladen, entstünden lokal bis zu dreimal höhere Feldstärken. Daraus kann auch abgeleitet werden, dass ein mit $3U_0$ gleichspannungsvorgeprüftes Kabel nicht sofort und abrupt ans Netz geschaltet werden sollte.

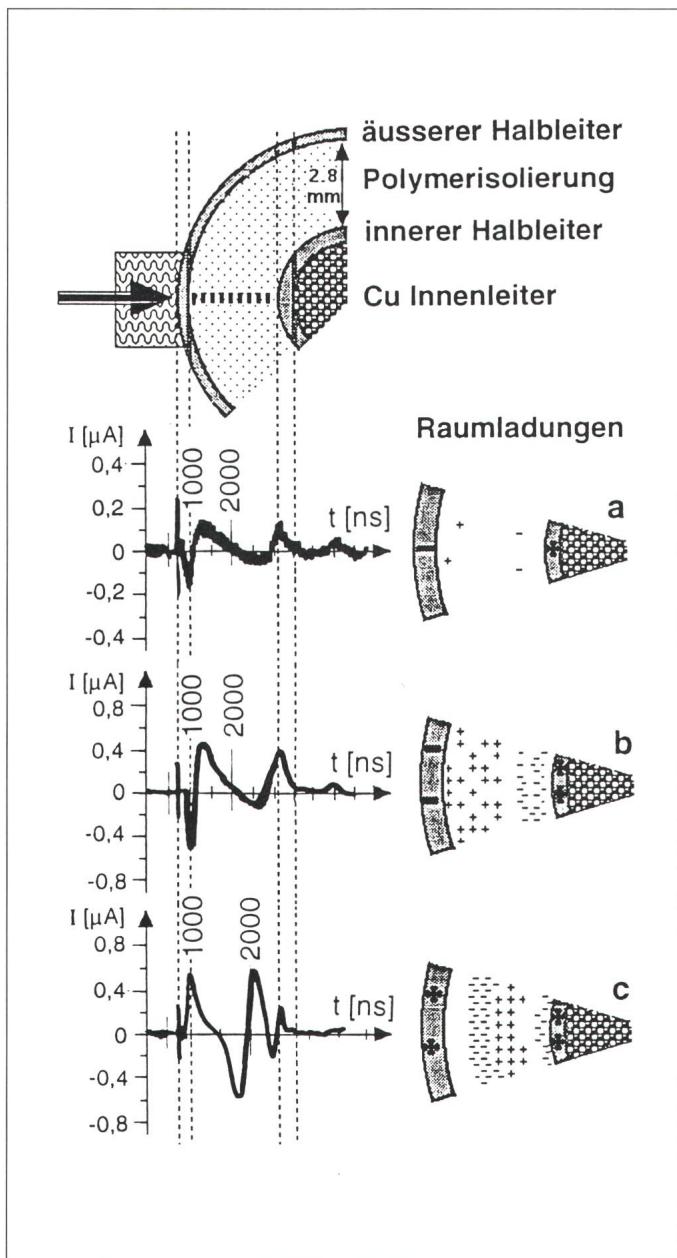


Bild 6
Raumladungsmessungen an Kabelstücken mit PE und EPR als Isolierstoff

- a EPR-isoliertes Kabel mit Isolationsdicke von 2.8 mm. gemessen nach einer Belastung mit 17 kV/mm während 30 Minuten (Messung ohne angelegte Spannung)
- b wie a, aber nach einer Belastung während 4 Stunden
- c PE-isoliertes Kabel, sonst wie b

äthylenkabel in der Isolatormitte zwei Raumladungszonen gegensätzlicher Polarität zu beobachten, dies in beiden Feldrichtungen (Bild 6,c). Eine Interpretation ist nur mit grösster Vorsicht zu wagen, könnten doch Rückstände eines polaren Vernetzungsmittels mit im Spiel sein.

Aussichten

Die laserinduzierte PWP-Methode scheint ein taugliches Mittel zu sein, um verschiedene, noch unbekannte Zusammenhänge im Verhalten von polymeren Isolierstoffen unter elektrischer Beanspruchung etwas aufzuhellen. Insbesondere im Bereich der Grenzschicht Halbleiter-Kunststoff sind einige Phänomene noch weitgehend ungeklärt. Untersuchenswert ist auch die Raumladungsausbildung unter verschiedenen Spannungsbeanspruchungen, das Raumladungsverhalten von gealterten Kabeln sowie der Einfluss der verschiedenen Wasserbäumchen auf die Raumladungsverteilung. Es bleibt somit noch ein grosses Feld von möglichen Untersuchungen offen.

Messungen an ganzen Kabeln

Die Messungen an Kabelstücken (siehe Bild 6) mit einer Isolierdicke von 2,8 mm gestalten sich infolge der kleineren Signale als etwas schwieriger, dennoch sind auch hier nach einer Zeit von 4 Stunden im Isolator bereits Raumladungen sichtbar. Die Dämpfung der Druckwelle ist bei den Messungen am Kabel offenbar in der gleichen Grössenordnung wie die Zunahme der Flächenladungsdichte an der Innenelektrode infolge der Feldgeometrie. Ersichtlich wird dies daraus, dass die Amplituden der Signale des Ladungsbetriebs an der äusseren und der inneren Elektrode gleich sind. Die geringere Anstiegssteilheit des Signals der Innenelektrode weist auf die

vorhandene Dämpfung der Schallwelle hin. Aus verschiedensten Messungen mit positivem und negativem Innenleiter haben sich die nachfolgenden Raumladungsverteilungen feststellen lassen: Bei einem EPR-isolierten Kabel sind nach 30 min Spannungsbelastung mit 17 kV/mm bereits deutlich Raumladungen sichtbar (Bild 6.a). Nach 4 Std. sind die Raumladungen noch deutlicher zu erkennen und lassen, im Gegensatz zu den Plattenprüflingen, auf eine Ladungsträgerinjektion schliessen, was vermutlich auf unterschiedliche Vorgänge an den Kontaktierungsflächen (Grenzschicht zwischen Halbleiter und Isolator) zurückzuführen sein dürfte (Bild 6,b). Interessanterweise sind beim Poly-

Literaturverzeichnis

- [1] P. Laurenceau, G. Dreyfus and J. Lewiner: New Principle for the Determination of Potential Distributions in Dielectrics. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 38, pp. 46–49, 1977.
- [2] J. Lewiner: Evolution of experimental techniques for the study of the properties of insulating materials. *IEEE Transactions in Electrical Insulation*, Vol. E I-21, pp. 351–360, June 1986.
- [3] C. Alquié, T. Ditchi and J. Lewiner: Measurement of charge distributions in insulating materials for high voltage cables. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol E I, pp. 434–437, 1988.
- [4] T. Ditchi, C. Alquié, J. Lewiner: La méthode de l'onde de pression: perfectionnement et application à des matériaux pour câbles à courant continu. *SEE*, vol. E4, pp. 257–262, 1989.
- [5] S. Mahdavi, Y. Zhang, C. Alquié, J. Lewiner: Determination of space charge distributions in polyethylene samples submitted to 120 kV DC Voltage. *CEIDP*, pp. 520–526, 1990.

Dank: Einen speziellen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr. Zaengl und der Fachgruppe für Hochspannungstechnik der ETH-Zürich aussprechen, die mir immer mit Gastrecht und Ratschlag zur Seite standen.

Anmerkung: Dieser Aufsatz stellt eine leicht redigierte Fassung des anlässlich des ETG-Kabelseminars vom 10./11. März 1992 an der ETH gehaltenen Vortrages dar.