

# **Einfluss der mechanischen Belastung auf das TE-Verhalten von faserverstärkten Isolierstoffen**

H.-P. Burgener, K. Fröhlich

## **Kurzfassung**

Diese Arbeit wurde durchgeführt, um einen besseren Einblick in das dielektrische Verhalten von mechanisch stark vorgestressten faserverstärkten Isoliermaterialien zu erhalten. Sowohl fabrikneue als auch mechanisch vorbelastete Faserverbundrohre wurden untersucht. Optische Untersuchungen zeigen Mikrorisse in der Grössenordnung von einigen zehn Mikrometern, nachdem die Rohre einem Zugversuch unterzogen wurden. In der Folge konnten mit einem phasenauflösenden Messsystem Teilentladungen (TE) nachgewiesen werden, deren Amplituden z.T. deutlich kleiner als 1 pC waren, bevor ein elektrischer Durchschlag eintrat. Theoretische Abschätzungen korrelieren mit den gemessenen TE-Einsatzfeldstärken und den geometrischen Abmessungen der Risse. Die untersuchten Effekte traten bei elektrischer und/oder mechanischer Belastung weit über den heute üblichen Betriebsbedingungen auf. Deshalb ist zu erwägen, ob qualitativ hochwertige faserverstärkte Isoliermaterialien in Zukunft nicht für höhere Betriebsbelastungen geeignet sind.

## **Einleitung**

Faserverstärkte Isoliermaterialien sind heute wichtige Komponenten bei der Entwicklung und Herstellung von elektrischen Betriebsmitteln, besonders bei Luft isolierten und SF<sub>6</sub> isolierten Schaltanlagen. Die herrschenden Belastungen sind nicht nur dielektrischer sondern auch thermischer und mechanischer Art.

Erste Erfahrungen über das Verhalten von Faserverbundstoffen bei dielektrischer und mechanischer Belastung wurden schon in vorangehenden Arbeiten [1,2,3] gewonnen. Es konnte festgestellt werden, dass Teilentladungen durch Biegen von Rohrstangen getriggert werden. Der physikalische Mechanismus, welcher für die auftretenden Phänomene verantwortlich ist, ist noch nicht vollständig verstanden. Deshalb sollen weitere Forschungsarbeiten im Bereich der qualitativ hochstehenden faserverstärkten Isoliermaterialien ein besseres Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen mechanischen und dielektrischen Belastungen erreichen. Das Ziel der laufenden Arbeit besteht auch in der Beantwortung der Frage, inwiefern diese Materialien für die heutigen Betriebsbedingungen richtig dimensioniert wurden. Eine empfindlich phasenauflösende TE-Messung kombiniert mit mikroskopischen Untersuchungen bilden den Kern der Untersuchungen.

## **Experimente**

### **Prüfaufbau**

Für die dielektrischen Untersuchungen des Faserverbundstoffs wurde eine phasenauflösende TE-Messung herangezogen. Dazu wurde ein konventioneller TE-Kreis mit GIS-Komponenten bestehend aus Hochspannungstransformator, Netzfilter, Koppelkondensator, Testobjekt und Ankoppelvierpol aufgebaut. Ein Spektrumanalysator dient zur Abstimmung eines optimalen Signal-Rausch-Verhältnisses. Die Prüflinge bestehen aus polyesterfaser-verstärkten vakuumimprägnierten Epoxidharz-Rohren mit einer Länge von 450 mm, einem äusseren Durchmesser von 34 mm und einer Wandstärke von 3 mm. Um Oberflächeneffekte zu vermeiden, fanden alle dielektrischen Prüfungen in einem SF<sub>6</sub>-Gefäss (6 bar absolut) statt. Die Geometrie der Elektroden wurde mittels Computersimulation so berechnet, dass möglichst homogene Feldverhältnisse am Prüfling herrschen. Detailliertere Angaben zum Prüfaufbau finden sich in [1 & 2].

## Prüfprozeduren

Die Prüfprozedur beschränkt sich auf folgende drei Untersuchungsarten:

- mechanische Prüfung
- dielektrische Prüfung
- optische Prüfung

Sämtliche Proben wurden einer dielektrischen und optischen Beanspruchung unterzogen, während die mechanische Prüfung nur auf die Hälfte der Proben angewandt wurde.

Die mechanische Prüfung bestand aus einem Zugversuch in dem die Proben auf  $\varepsilon = 8\%$  verlängert wurden. Das entsprechende Spannungs-Dehnungsdiagramm ist in Fig. 1 dargestellt. Die Berstgrenze war bei einer relativen Längenänderung von ca. 10%.

Die mechanisch gestressten wie nicht gestressten Rohre wurden dann nach einer Wartezeit von einigen Wochen im  $\text{SF}_6$ -Prüfgefäß dem elektrischen Feld ausgesetzt. In der Regel wurde die Feldstärke zu Beginn ca. eine halbe Stunde auf rund 70 kV/cm eingestellt (vgl. Fig. 2) und in der Folge stufenweise etwa im 2 Minutentakt erhöht. Während dieser Zeit konnten TE-Muster aufgenommen werden. Kurz vor dem Überschlag bzw. Durchschlag der Probe musste die Feldstärke aufgrund der thermischen Auslastung der Anlage jedoch rascher erhöht werden.

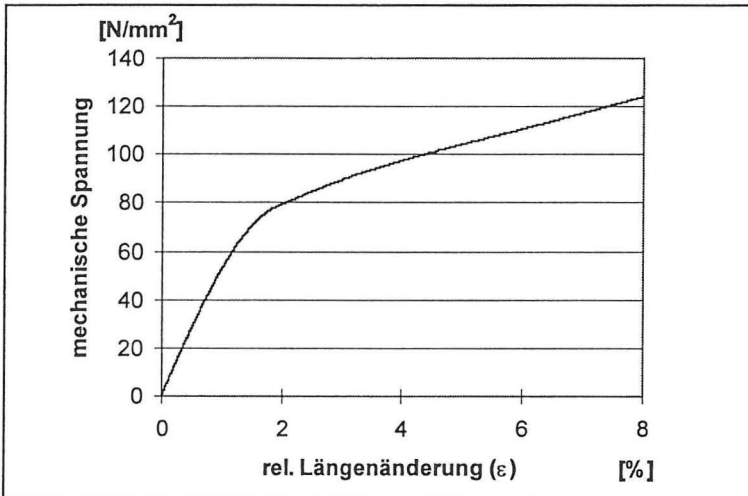


Fig. 1  
Typisches Spannungs-  
Dehnungsdiagramm

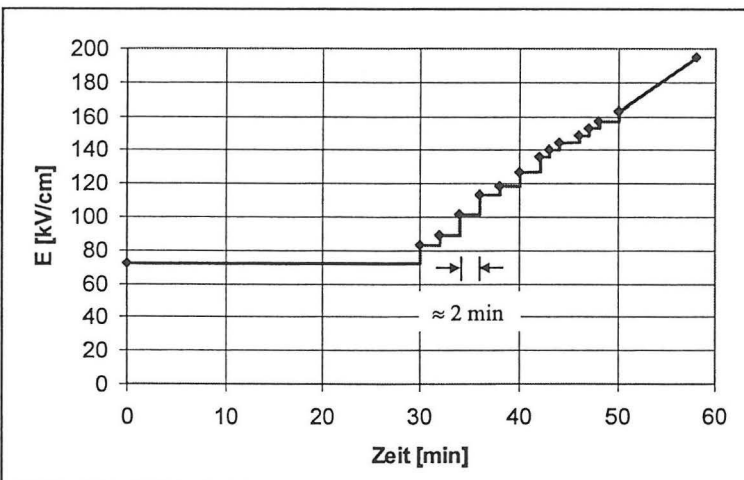


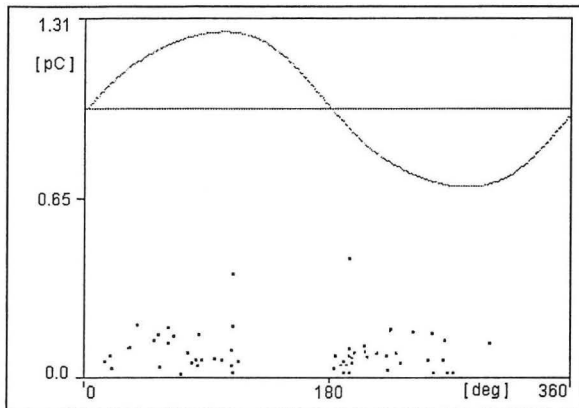
Fig. 2  
Zeitlicher Verlauf der  
Hintergrundfeldstärke

Nach der dielektrischen Prüfung wurde jener Teil des Rohres, welcher im elektrischen Feld lag, aber durch den Durch- bzw. Überschlag nicht beschädigt wurde, optisch untersucht. Entsprechende Stücke wurden herausgetrennt, geschliffen und poliert und mit einem Lichtmikroskop mit einer maximalen Vergrößerung von 1000 untersucht.

## Resultate

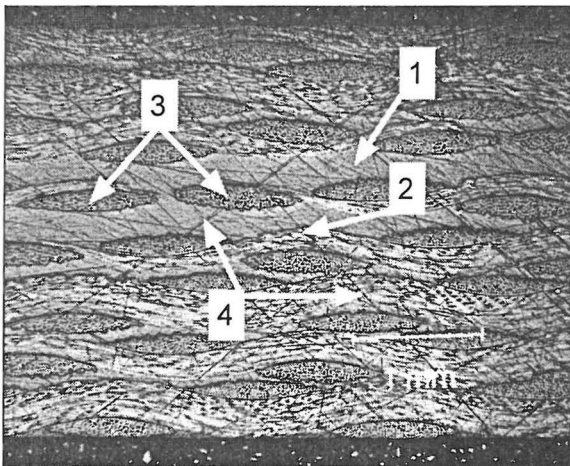
Jene Proben (Anzahl 2), welche keinem mechanischen Stress ausgesetzt wurden, zeigten keine messbare TE, d.h. messbare TE traten praktisch nur unmittelbar vor dem Überschlag auf. Die gemessenen Überschlagsfeldstärken waren 180 kV/cm und 178 kV/cm.

Bei den durch den Zugversuch gestressten Proben (Anzahl 3) konnten bereits vor der Durchschlagsfeldstärke TE gemessen werden. Fig. 3 zeigt ein typisches TE-Muster. Die *TE-Einsatzfeldstärke* belief sich im Mittel auf 152 kV/cm und lag innerhalb einer gesamten Streubreite von 20 kV/cm. Der entsprechende Mittelwert der *Durchschlagsfeldstärke* war 182 kV/cm und streute innerhalb einem Bereich von 50 kV/cm.



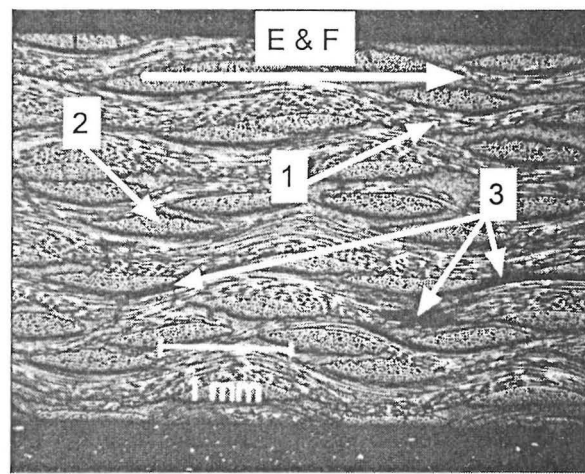
**Fig. 3**  
Typisches TE-Muster  
gemessen bei 160 kV/cm  
nach dem Zugversuch  
mit  $\epsilon_{\max} = 8\%$

Für die Untersuchungen mit dem Lichtmikroskop wurde von jeder Probe ein Längs- und ein Querschliff angefertigt. Die nicht zugbelasteten Proben zeigten in beiden Betrachtungsebenen keine wesentlichen Fehler (Hohlräume). Fig. 4 bildet einen Teil eines Längsschliffs ab.



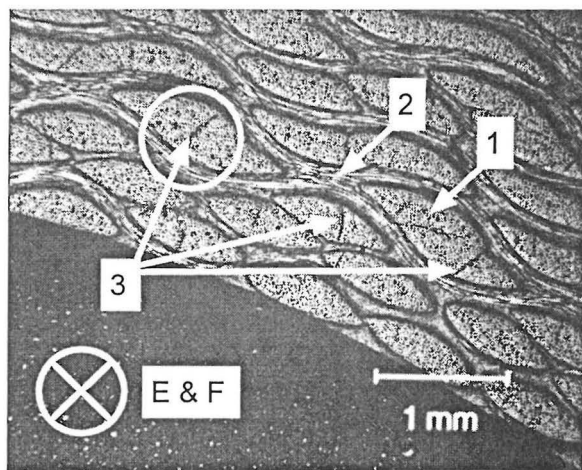
**Fig. 4**  
Längsschliff durch eine  
mechanisch nicht  
belastet gewesene  
Rohrwand  
1) Matrix (Epoxidharz)  
2) Längsfaserbündel  
3) Querfaserbündel  
4) Schleifspuren  
Vergrößerung:  $\approx \times 20$

Fig. 5 stellt den Längsschliff einer mechanisch gestressten Probe dar. Der Pfeil gibt die Belastungsrichtung von Feldstärke (E) und Zugkraft (F) an. Im Gegensatz zu Fig. 4 sind hier dunkle Schatten sichtbar. Die Entstehung dieser Schatten lässt sich wie folgt erklären: Durch die grosse Belastung im Zugversuch werden die Fasern teilweise von der Matrix gelöst, und es entstehen sogenannte Mikrorisse in der Zwischenschicht. Beim Schleifprozess können nun Matrix- bzw. Faserbruchstücke, welche nicht mehr genügend hohe Haftung haben, an diesen Mikrorissstellen herausbröckeln. Aus diesem Grund dürften diese dunklen Flecken in der Mikroskopaufnahme ein Indiz für die Anzahl und Geometrie der Risse in Längsrichtung sein.

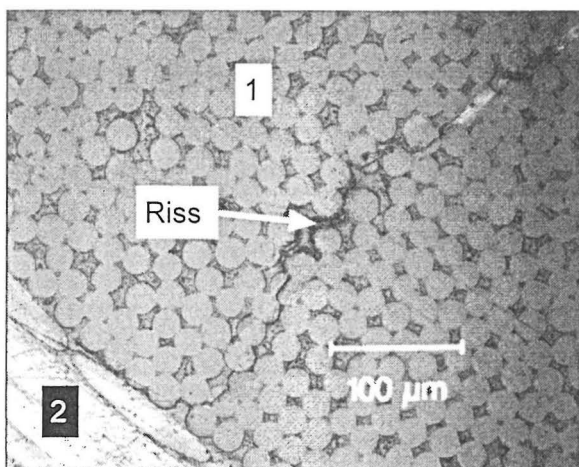


**Fig. 5**  
 Längsschliff durch die  
 Rohrwand eines  
 mechanisch gestresst  
 gewesenen Rohrs  
 1) Längsfaserbündel  
 2) Querfaserbündel  
 3) Ausrisse  
 Vergrößerung:  $\approx \times 20$

Ein Querschliff desselben Rohres zeigt Fig. 6a (E und F zeigen in mechanischer Belastungsrichtung). Hier sind die Risse, welche in Richtung der Belastung verlaufen, als dünne Linien, die oft das Längsfaserbündel spalten, erkennbar. Eine Vergrößerung (vgl. Fig. 6b) des durch einen Kreis gekennzeichneten Risses verdeutlicht die effektiven Querabmessungen eines solchen Längsrisses. Es ist gut ersichtlich, dass letztere nur etwa  $10\ \mu\text{m}$  betragen. Über weite Bereiche ist der Riss nur einige Mikrometer breit. Wenn die Anbindung zwischen Faser und Matrix sehr gut ist, können auch einzelne Fasern gespalten werden. Häufig endet der Riss auf einem Faserbündel, welches transversal zur Rissausbreitungsrichtung verläuft.



**Fig. 6a**  
 Querschliff durch die  
 Rohrwand einer  
 mechanisch gestresst  
 gewesenen Probe  
 1) Längsfaserbündel  
 2) Querfaserbündel  
 3) Mikrorisse  
 Vergrößerung:  $\approx \times 20$



**Fig. 6b**  
 Vergrößerung des  
 eingekreisten Bereichs  
 Vergrößerung:  $\approx \times 200$

## Interpretation

Die folgende Interpretation beinhaltet eine einfache Abschätzung über die nötigen geometrischen Abmessungen in Abhängigkeit der herrschenden Feldverhältnisse, damit ein Auftreten von Teilentladungen wahrscheinlich ist.

Eine notwendige Bedingung für den Start einer Elektronenlawine und damit messbaren Teilentladung ist das Vorhandensein eines Primärelektrons. Dieses kann durch kosmische Strahlung oder natürliche Radioaktivität hervorgerufen werden. Die folgende Formel beschreibt die mittlere Zündverzugszeit für einen sphärischen Hohlraum in einem festen Dielektrikum [4]:

$$\Delta t_{eins} \approx \left[ \left( \pi/6 \right) C_{strahl} \Phi_{strahl} (\rho/p)_0 p \ell^3 \left( 1 - \left( \frac{U_0}{U_{eins}} \right)^{-\beta} \right) \right]^{-1}$$

Angenommen der sphärische Hohlraum ( $\ell = 1 \text{ mm}$ ) sei mit  $10^5 \text{ Pa}$  Luft gefüllt ( $(\rho/p)_0 \approx 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ,  $\beta = 1/2$ ). Dann ergibt sich bei einer natürlichen Strahlung ( $C_{strahl} \cdot \Phi_{strahl} \approx 2 \cdot 10^6 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), wenn die angelegte Spannung viel grösser als die Einsatzspannung ( $U_0/U_{eins} \gg 1$ ) ist, eine mittlere Zündverzugszeit von ca. 16 Minuten. Aus den Figuren 5 und 6b ist ersichtlich, dass die Hohlräume in den gezogenen Stäben eine Länge von ca.  $500 \mu\text{m}$  und eine Breite von ca.  $10 \mu\text{m}$  aufweisen können. Falls nur *ein* solcher Riss im elektrischen Feld läge, könnte eine entsprechend lange Zeit verstreichen, bis ein Primärelektron eine Ladungsträgerlawine auslösen würde. Um diese Zündverzugszeit niedrig zu halten, wurden die Stäbe wie erwähnt auf  $\varepsilon = 8\%$  gezogen, damit eine möglichst homogene Verteilung der Fehlstellen (Hohlräume) erreicht wird.

Wie Fig. 2 zeigt, wurde die elektrische Feldstärke zu Beginn während ca. 30 Minuten auf etwa  $70 \text{ kV/cm}$  gehalten. Mit einer relativen Permittivität des untersuchten Materials von  $\varepsilon_r = 3.6$  könnten um den Faktor 3.6 höhere Feldstärken im Gasraum auftreten. Würde die sphärische Geometrie des Hohlraums mit berücksichtigt (Fehlstellen sind eigentlich eher länglicher Natur), könnte die Feldstärke nur um den Faktor 1.9 ( $\varepsilon_{sph} \approx (\varepsilon_r + 2)/3$ ) im Vergleich zur Hintergrundfeldstärke angehoben werden. Mit der Annahme, dass der Gasraum mit Luft ( $E_{krit} \approx 24.4 \text{ kV/cm}$ ,  $p = 10^5 \text{ Pa}$ ) gefüllt und die Gasraumdicke genügend hoch ist, sollten dennoch Teilentladungen innerhalb eines Zeitfensters von 30 Minuten gemessen werden können - was aber nicht der Fall war. Die mittlere TE-Einsatzfeldstärke lag bei  $152 \text{ kV/cm}$  (s.o.) mit wenig Streuung. Die Abwesenheit der messbaren Teilentladung bei  $70 \text{ kV/cm}$  scheint daher nicht auf ein zu klein gewähltes Zeitfenster zurückführbar. Aus den genannten Überlegungen geht hervor, dass die oben gemachten Annahmen über die wirksamen Abmessungen der Fehlstellen nicht bestätigt werden.

Das Heranziehen des Townsend Kriteriums ermöglicht eine etwas verfeinerte Abschätzung der wirksamen Abmessungen des Gasraums:

$$E_{eins} = p \left( \left( \frac{\ln(1/\gamma)}{k \cdot p \cdot d} \right)^{1/2} + E_{krit} \right), \quad k \approx 0.22 \frac{\text{cm} \cdot \text{bar}}{(\text{kV})^2}$$

wobei hier der Schumann Ansatz für den effektiven Ionisationskoeffizienten bereits implizit enthalten ist. Übrigens stehen  $\gamma$  für den Rückwirkungskoeffizienten,  $p$  für den Druck im Hohlraum und  $d$  für den Weg, welcher der Lawine zur Verfügung steht. Für den Rückwirkungskoeffizienten beim hier betrachteten polyesterfaserverstärkten Epoxidharz wird in erster Näherung der aus der Literatur bekannte Wert für Epoxidharz von ca.  $10^{-4}$  [5] herangezogen. Fig. 7 zeigt die Townsend Einsatzfeldstärke bezogen auf die für eine Lawine



zur Verfügung stehende Weglänge mit  $\gamma$  als Parameter. Der Druck soll entsprechend der Annahme auf  $10^5$  Pa gehalten werden. Die horizontale Linie stellt die gemessene mittlere Hintergrundfeldstärke für den TE-Einsatz dar. Wird die Feldüberhöhung vernachlässigt, müsste die Gasstrecke, unter der Annahme, dass die Feldstärke sich über den gesamten Hohlraum nicht signifikant ändert (Was bei homogenem Hintergrundfeld und kleinen Hohlräumen angenommen werden kann.), für eine Lawine etwa  $30\text{ }\mu\text{m}$  betragen. Unter Berücksichtigung der Feldüberhöhung würden sogar noch kleinere Gasstrecken genügen, um eine Lawinenbildung zu begünstigen. Deshalb dürften einerseits die Längsabmessungen der Fehlstelle nur einige bis einige  $10\text{ }\mu\text{m}$  lang sein oder die Querabmessungen sind so klein, dass sie die Entwicklung einer Lawine stoppen können. Dabei ist der zweite Fall wahrscheinlicher, auch wenn die Risslänge einige  $100\text{ }\mu\text{m}$  beträgt, muss dessen Breite nicht über die ganze Länge gross genug sein, um ein Lawinenwachstum zu begünstigen.

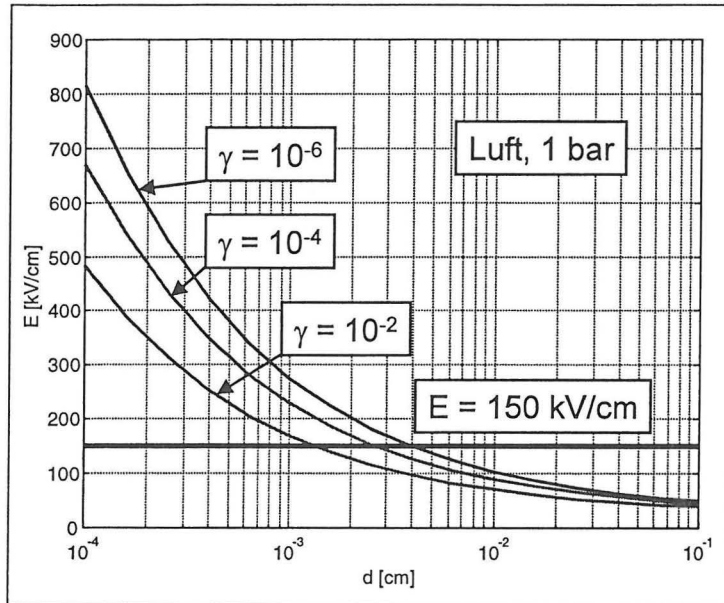
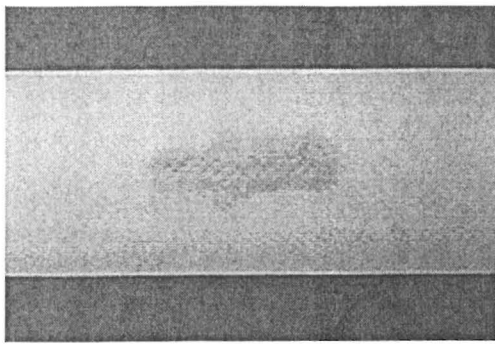


Fig. 7  
Einsatzfeldstärke  
bezogen auf die  
Weglänge im Gasraum

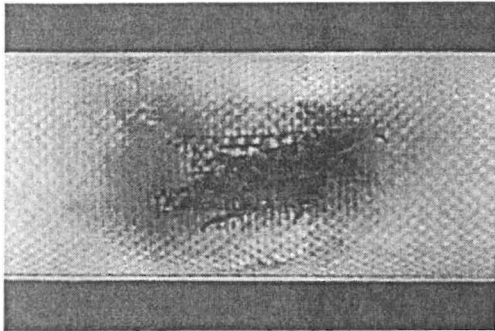
Dieser Abschnitt dient zur Begründung der still getroffenen Annahme, dass die Teilentladung im Innern des Isoliermaterials und nicht an dessen Oberfläche auftritt. Folgende Gründe erhärten das Auftreten der Teilentladung im Innern:

- Das anliegende Feld ist sehr homogen. Oberflächen-TE dürften deshalb zu einem direkten Überschlag führen.
- Bei den mechanisch nicht gestressten Proben konnten bis zum Überschlag keine Teilentladungen gemessen werden. Die mechanisch gestressten Stäbe wiesen schon vor dem Durchschlag Teilentladungen auf.
- Die Wahrscheinlichkeit für Teilentladungen war etwas höher im Bereich der Spannungsnulldurchgänge (vgl. Fig. 3).
- Die mechanisch vorgestressten Stäbe wiesen nach der dielektrischen Prüfung jeweils einen Durchschlag auf (vgl. Fig. 8a/b). Die nicht mechanisch vorbelasteten Stäbe zeigten hingegen nur geringfügige Ansengungen an der Materialoberfläche, welche eindeutig auf einen Überschlag zurückzuführen sind.

Im weiteren stützt die geringe Amplitude ( $< 1$  pC) der gemessenen Teilentladungen das Vorhandensein von Hohlräumen im Mikrometerbereich.



**Fig. 8a**  
Mechanisch nicht  
gestresste Probe,  
Überschlag



**Fig. 8b**  
Mechanisch gestresste  
Probe, Durchschlag

## Schlussfolgerungen

Obwohl viele Parameter, wie etwa der Gasdruck im Hohlraum, die Gaszusammensetzung, der Rückwirkungskoeffizient, die Feldverhältnisse, nur grob abgeschätzt werden konnten, und obschon die Anzahl der betrachteten Proben noch äusserst gering ist, konnte gezeigt werden, dass auch in qualitativ hochwertigen Faserverbund-Isolierstoffen Teilentladungen auftreten, sofern sie mechanisch extrem beansprucht werden.

Es konnte eine Korrelation zwischen der Abmessungen der Risse (mikroskopische Untersuchung) und den auftretenden Teilentladungen aufgezeigt werden. Deshalb sollte ein Qualitätstest für faserverstärkte Isolationsmaterialien sowohl das mechanische wie dielektrische Verhalten berücksichtigen.

Auch bei sehr hohen mechanischen Belastungen waren die Teilentladungen bei den untersuchten Faserverbundstoffen sowohl in der Amplitude als auch in der Häufigkeit gering. Aus diesem Grund und weil bei den fabrikneuen Rohren bis zum Überschlag keine Teilentladungen detektiert werden konnten, stellt sich die Frage, ob diese Materialien nicht mit höheren Betriebsbeanspruchungen beaufschlagt werden könnten, als dies heute üblich ist.

Modellversuche mit wohldefinierten Parametern (Druck, Gaszusammensetzung, usw.) sind geplant.

## Literatur

- [1] A. Kutil, "Qualification of Fibre-reinforced Insulating Materials Based on PD Analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 4, August 1998, pp. 603 - 611.
- [2] A. Kutil, K. Fröhlich, "Partial-Discharge Measurement on Composite Insulators for GIS Application", 9<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, 1995, pp. 5585-1 - 5585-4.

- [3] H. Gram, K. Fröhlich, "A Multi-Stress Aging Method for Fibre Reinforced Insulation Materials", 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Montréal / Québec, Canada, 1997, pp. 359 - 362.
- [4] L. Niemeyer, "A Generalized Approach to Partial Discharge Modelling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, August 1995, pp. 510 - 528.
- [5] K. Engel, "Bewertung von Teilentladungen in spaltförmigen Isolierstoffdefekten", Dissertation, Universität Dortmund, Shaker Verlag, Aachen, 1998.