

1. Einleitung

Faserverstärkte Isolierstoffe sind heute in der Elektrotechnik als mechanisch hoch beanspruchbare Konstruktionselemente nicht mehr wegzudenken. So werden solche Materialien in Apparaten der elektrischen Energieversorgung, wie z.B. gasisolierten Schaltanlagen oder Hochspannungsleistungsschaltern bei relativ hoher mechanischer und elektrischer Spannung eingesetzt. Auch in der Elektronik und Leistungselektronik finden diese Materialien z.B. als Printplattenmaterial mit steigendem Anspruch Verwendung. Durch die Faserverstärkung wird im Vergleich zu homogenen Materialien das mechanische Verhalten entscheidend verbessert, was allerdings zu Lasten der dielektrischen Festigkeit geht. Eine Verbesserung der Spannungsfestigkeit wäre daher ganz allgemein wünschenswert. Um hier einen Innovationsschritt zu setzen, sind zwei Massnahmen erforderlich:

- es muss das physikalische Verständnis der dielektrischen Versagermechanismen verbessert werden;
- damit interaktiv verbunden, werden Kriterien/Prüfverfahren benötigt, welche eine Beurteilung der Materialien erlauben und auch die Lebenserwartung des Werkstoffes zumindest relativ abschätzen lassen.

Bisher in der Industrie verwendete Prüfmethoden sind darauf beschränkt, die Stossdurchschlagsspannung sowie die Durchschlagswechselspannung zu messen, was natürlich nur wenige Hinweise auf das Alterungsverhalten gibt. In diesem Bericht wird nun ein Verfahren präsentiert, mit welchem das Teilentladungsverhalten verschiedener Materialproben praxisnaher Abmessungen erfasst wird. Diese Teilentladungen (TE) werden mit einem phasenauflösenden System registriert und statistisch ausgewertet. Für eine praxisnahe Beanspruchung wird das Material gleichzeitig zum dielektrischen Stress auch mechanisch beansprucht. Die Philosophie dabei ist, dass in einem Verbundmaterial naturgemäss stets eine grosse Anzahl von Imperfektionen vorhanden sind, welche an Zahl und Grösse durch die Wahl der Ausgangsstoffe und durch den Produktionsprozess bestimmt sind. Diese stochastisch verteilten und u.U. zunächst nicht offenkundigen Fehlstellen gilt es aufzuspüren und ihr Potential als Durchschlagsauslöser zu beurteilen.

2. Messapparatur

Zur Untersuchung verschiedener Materialien wird ein mit SF_6 (600 kPa) gefülltes Experimentiergefäss eingesetzt, mit dem an rohrförmigen Proben ein quasi homogenes Feld von max. $120 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{cm}$ angelegt werden kann. Oberflächeneffekte sind durch den hohen Gasdruck weitgehend vermeidbar. Effekte im Inneren des Materials werden durch eine hochempfindliche Teilentladungsmessung (schmalbandige Messung in der Resonanzfrequenz der Anlage) mit einer relativen Auflösungsgrenze von kleiner $0,1 \text{ pC}$ angezeigt. Die Apparatur ist in Abb. 1 gezeigt. Sechs Rohrproben von ca. 450 mm Länge und 34 mm Durchmesser können eingebracht werden und simultan über eine 4-Punkt-Auflage gebogen werden. Die Biegekraft würde reichen, um die zulässige Dehnung des jeweiligen Materials zu überschreiten, was zum Bruch der äussersten Fasern führen kann. In der Regel werden jedoch die Versuche, in Anlehnung an die Praxis, unter dieser Bruchgrenze durchgeführt. Die Spannung führende Elektrode reitet frei auf der Mitte der Probe, siehe Abb. 1. Dadurch entstehen zwischen den rechts und links gegenüberstehenden geerdeten Elektroden pro Rohr zwei Prüfpalte von je 20 mm bis 40 mm Länge. Insgesamt umfasst daher eine

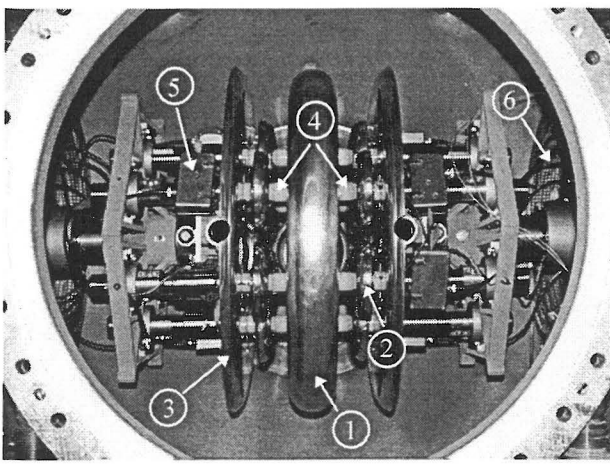


Abb. 1
Innenansicht des Prüfgefäßes

1... Hochspannungselektrode
2... Auskopplungselektrode
3... Erdelektrode
4... Testspalte
5... Auskopplungsvierpol
6... Heizung

Charge 12 Prüfspalte, womit zumindest eine bescheidene Statistik möglich wird. Zur Auskopplung der Teilentladungssignale in jedem Prüfspalt ist jeder Erdelektrode eine ebenfalls freireitende Elektrode vorgelagert. Die jeweiligen TE-Signale werden über einen Multiplexer einer entsprechenden Auswerteelektronik zugeführt [2]. Für Dauerversuche ist es so möglich jeden Prüfspalt getrennt zu überwachen. Abb.2 zeigt das elektrische Prinzipschaltbild der Versuchsanordnung. - Das Versuchsgefäß ist zudem auf ca. 100 °C heizbar, um dem mechanischen und dielektrischen Stress auch thermische Belastung hinzuzufügen. Entsprechende Versuche sind jedoch noch ausstehend.

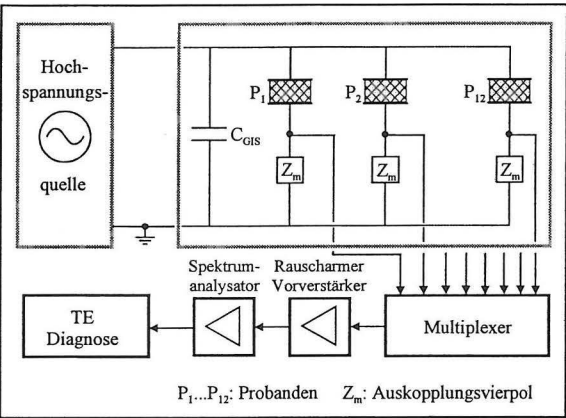


Abb. 2
Elektrisches Prinzipschaltbild der Versuchsanordnung

3. TE-Verhalten verschiedener Materialien

3.1 Kurzzeitverhalten im Bereich der TE-Einsatzfeldstärke

Zur Abtastung des Materials wird zunächst stufenweise die Feldstärke solange erhöht, bis messbare Teilentladungen auftreten, womit ein erstes Qualifikationskriterium gegeben ist. Beim ersten Anzeichen von Teilentladungen wird das Feldstärkeniveau gehalten und die zeitliche Entwicklung während einiger Minuten beobachtet. Abb. 3 zeigt als Beispiel die auf die reduzierte Hintergrundfeldstärke bezogene max. scheinbare Ladungsamplitude als Funktion der Einsatzfeldstärke für verschieden gefertigte Materialien. Durch diese Normierung wird der Einfluss einer variablen Spaltlänge eliminiert. Wie zu erwarten ist, haben mit dem Heisspressverfahren hergestellte Produkte eine deutlich tiefere Einsatzfeldstärke als im Vakuum gegossene. Eine Korrelation zur Durchschlagsfeldstärke bei Wechselspannung (50 Hz) ist ebenfalls erkennbar (Abb. 4). Diese Zusammenhänge sind nicht weiter verwunderlich, da die Schlifffbilder der Materialien zeigen, dass das beste Material (vakuumgegossen, mit Polyesterfaser) die kleinsten Lunker in geringster Anzahl hat, während das schlechteste Material (Glasfaser, Heisspressverfahren) die grössten Lunker in hoher Anzahl aufweist (Abb. 5). Die TE-Messung ergibt also in diesem Kurzzeitprüfverfahren

sicherlich eine qualitative vergleichende Reihung der Materialien, ohne dass der Werkstoff dabei zerstört wird.

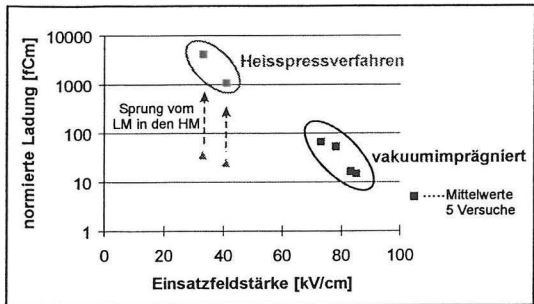


Abb. 3
Normierte Ladung
als Funktion der
Einsatzfeldstärke
(Daten aus [1])

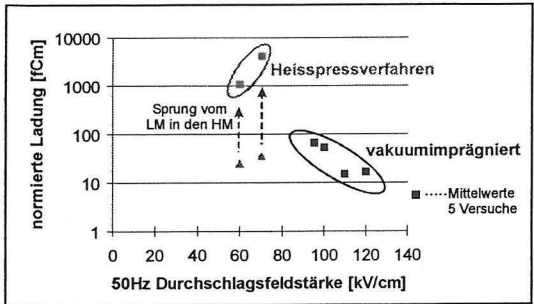


Abb. 4
Normierte Ladung
als Funktion der 50 Hz
Durchschlagsfeldstärke
(Daten aus [1])

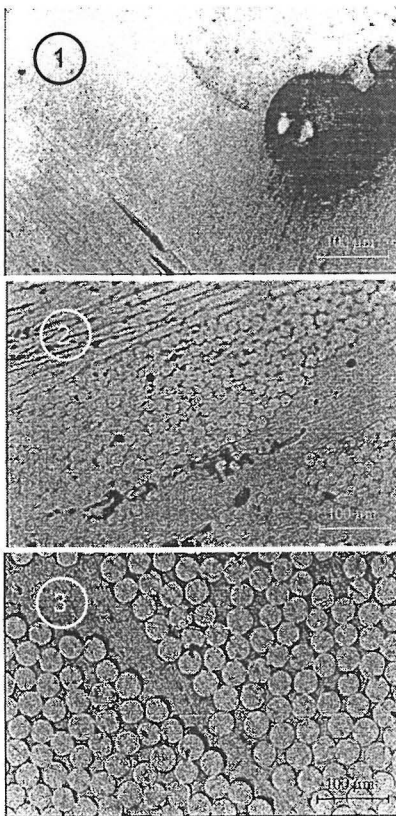


Abb. 5
Schliffbilder verschiedener
Isolortypen (aus [1])

- 1... Glasfaser
heissgepresst
- 2... Glasfaser
vakuumimprägniert
- 3... Polyesterfaser
vakuumimprägniert

Bemerkenswert ist auch, dass bei den in dielektrischer Hinsicht weniger guten Materialien in der Regel nach einigen Minuten ein sprunghaftes Ansteigen der TE-Aktivität (Amplitude und Impulszahl) auftritt (Abb. 6). Es sind also offenbar zwei verschiedene Modi vorhanden (im folgenden sowie in Abb. 3 und 4 „Low Mode“ LM und „High Mode“ HM genannt). Liegt die Spannung weiter an, so bildet sich generell die TE-Aktivität sukzessive zurück, und das eher flächige TE-Muster geht in ein strichförmiges über (Abb. 6). Nach einigen weiteren Minuten erfolgt dann in der Regel ein Durchschlag. Der sprunghafte Transit in den „High Mode“ ist ganz offensichtlich der messbare Auslöser für kurz darauf erfolgendes Versagen des Materials. Interpretieren lässt sich das wie folgt:

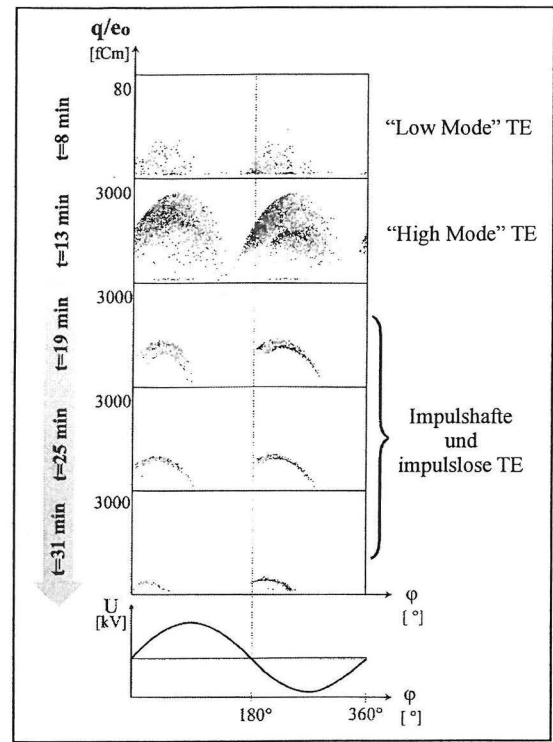


Abb. 6
Zeitliche Entwicklung
der TE-Muster (aus [1])

Die anfänglich niedrige Teilentladungsaktivität bewirkt eine Vergrößerung des Lunkers, wie in Abb. 7 schematisch dargestellt ist. Unter Umständen wird dadurch die Anlaufstrecke für Ladungsträger (Elektronen) soweit erhöht, dass ein Streamermechanismus einsetzt, was durch den Transit in den „High Mode“ messbar ist [1]. Als Folge der Entladungsvorgänge wird die Wandleitfähigkeit des betroffenen Lunkers erhöht, wodurch die Impulsamplitude reduziert wird und potentiell kleinere Impulse nicht mehr auftreten können. Dieses Verhalten konnte mit einer Computersimulation unter Variation der Wandleitfähigkeit nachvollzogen werden [1].

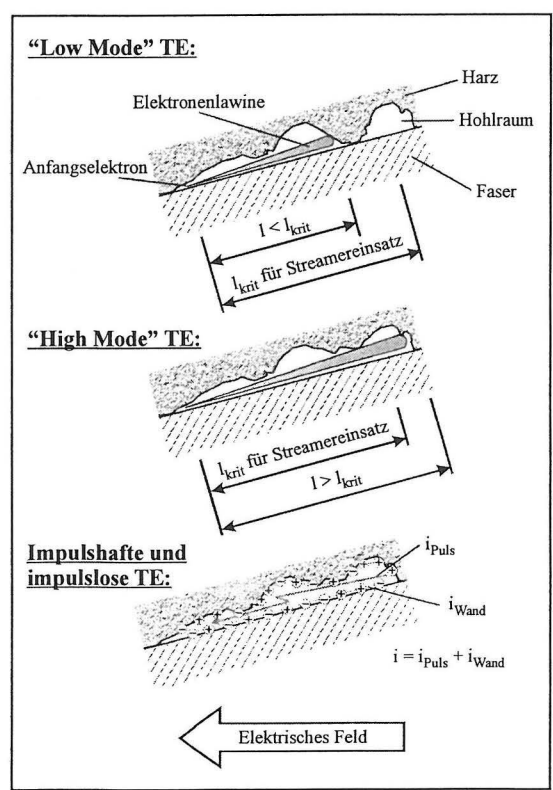


Abb. 7
Verschiedene Arten
von TE (aus [1])

Vakuumgegossene Materialien zeigen in der Regel den Transit in den „High Mode“ nicht. Oftmals waren (wegen Erreichen der Anlagegrenze) bei hochqualitativen Materialien zunächst gar keine TE messbar. Erst durch mechanische Beanspruchung konnten TE provoziert werden. Als Beispiel zeigt Abb.8 ein Muster, bei welchem TE durch mechanischen Stress signifikant verstärkt wurden. Die mechanische Belastung erzeugt offenbar neue Lunker oder vergrößert vorhandene. Der kombinierte Stress ist daher ein wirksames Mittel, um Materialien hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung zu beurteilen.

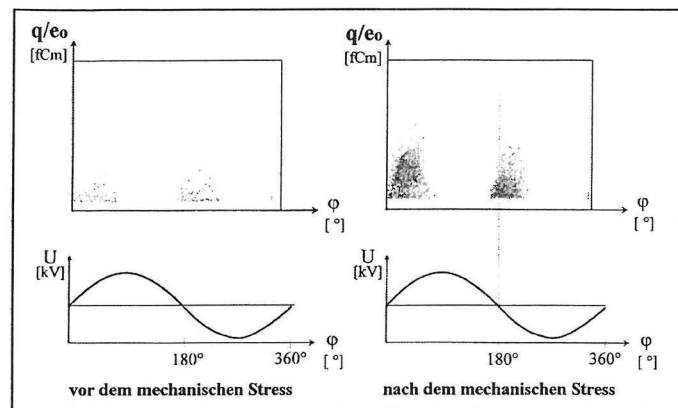


Abb. 8
Einfluss der mechanischen Belastung
(nach [1])

3.2 Verhalten bei länger andauernder dielektrischer und mechanischer Belastung

Die bisher angestellten Betrachtungen gelten für einen kurzen Zeitbereich des frisch fabrizierten Materials, wo mit hoher Feldstärke sofort in den Bereich signifikanter TE gegangen wird. Die Resultate lassen dabei sehr wohl qualitative Unterschiede klar erkennen, jedoch ist eine schlüssige Aussage über das Langzeitverhalten der Materialien nur durch Plausibilität möglich (wie das heute auch in den Standards durch den Einbau von Sicherheitsmargen gemacht wird). Um im konkreten Fall mehr Information über das Langzeitverhalten zu gewinnen, wurde eine Langzeittestserie begonnen, in der jeweils 12 Prüflinge (2 x 6, siehe Abs. 1) über mehrere 100 Stunden dielektrisch und mechanisch beansprucht wurden. Die Feldstärke wurde dabei etwa 15% niedriger gewählt als die aus der Erfahrung mit dem jeweiligen Material erhaltene TE-Einsatzfeldstärke. Damit soll ein neuer Punkt in der Lebensdauerkurve gewonnen werden, bei dem die Feldstärke näher an der Betriebsfeldstärke liegt und somit die Wahrscheinlichkeit, dass eine Veränderung des Fehlermechanismus stattfindet, kleiner ist. Abb. 9b zeigt einen typischen Verlauf der TE-Aktivität über der Zeit für ein in Vakuum gegossenes Material (mit Glasfaser). Nach etwa 210 Stunden traten erste TE auf, welche nach etwa 240 Stunden signifikant anstiegen und in der Folge wieder auf beinahe unmessbare Werte abklagen. Etwa zehn Stunden später erfolgte ein Durchschlag. Dieser Verlauf ist sowohl für die Amplitude der Impulse (Abb. 9b), als auch für deren Häufigkeit (Abb. 9a) beobachtbar. Der starke Anstieg der Amplitude entspricht in seiner Erscheinungsform wohl dem Übergang in den „High Mode“ bei ursprünglich minderwertigeren Materialien, jedoch handelt es sich hier nur um einen Faktor von ca. 7. Es kann daher angenommen werden, dass diese Amplitudenerhöhung wohl von einer Lunkererweiterung herrührt, welche aber wegen der relativ geringen Abmessungen der Lunker noch zu keiner Streamerentladung führt.

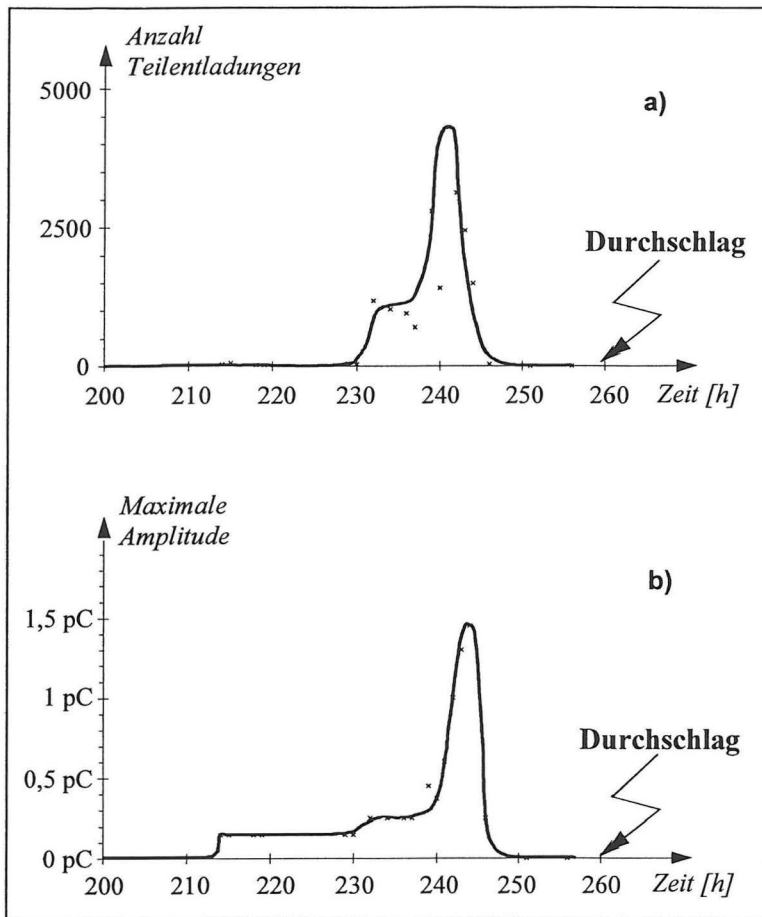


Abb. 9

a) TE-Häufigkeit
b) max. TE-Amplitude
als Funktion der Beanspruchungsdauer

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Mit der beschriebenen Apparatur sind an faserverstärkten Isolierstoffen jedweder Machart Teilentladungen unterhalb der Durchschlagsfeldstärke entweder sofort oder nach mechanischer Beanspruchung messbar. Die Einsatzfeldstärke ist je nach Material stark unterschiedlich und kann somit als Kriterium für eine qualitative Reihung herangezogen werden. Allerdings ist für die praktische Anwendung ein aus der Betriebserfahrung bekanntes Material zum Vergleich erforderlich.
- Mechanische Beanspruchung erhöht bestehende TE-Aktivität oder löst sie erst aus. Die Empfindlichkeit der Werkstoffe ist damit, auch wieder relativ gesehen, erfassbar.
- In allen Fällen geht einem Durchschlag ein deutliches Ansteigen und nachfolgendes Abfallen der TE-Aktivität voran. Es ist wohl je nach Qualität des Materials eine Frage der Lunkergrösse, bei welcher Feldstärke und wie schnell der Vorgang abläuft. Bei dielektrisch schlechteren Materialien geht das schnell und schon bei geringerer Feldstärke vor sich, wobei der Übergang in den „High Mode“ ein Hinweis auf die geometrische Abmessung der Fehlstelle ist.
- Relative Beurteilungskriterien sind daher sicherlich:
 - TE-Einsatzfeldstärke
 - Übergang in den „High Mode“, ja/nein
 - Reaktion auf mechanische Belastung

- Für eine Abschätzung des Lebensdauerverhaltens sind noch weitere Untersuchungen erforderlich und zwar mit Feldstärkewerten, welche auf der Lebensdauerkurve noch weiter als 15% von der TE-Einsatzfeldstärke entfernt sind. Zudem ist der Einfluss der Temperatur zu klären, möglichst bei zyklischer Belastung. Entsprechende Untersuchungen sind im Gange.

Literatur:

- [1] Kutil A. (1996): „Die Bedeutung von Teilentladungen in faserverstärkten Isolierstoffen“, Dissertation, TU-Wien.
- [2] Fröhlich K., Gram H. (25.-29. August, 1997): „A Multi-stress Aging Method for Fibre Reinforced Insulation Materials“, Proc. 10th International Symposium on High Voltage Engineering, vol. 2, pp. 359-362, Montréal, Québec.