

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit nanoskaliger SiO₂-Partikel auf die Erosionsbeständigkeit von gefüllten Epoxidharzformstoffen

Influence of the surface properties of silica nanofillers on the resistance to surface erosion of epoxy resins

Dipl.-Ing. Johannes Seiler, Technische Universität München, Deutschland, johannes.seiler@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger, Technische Universität München, Deutschland, josef.kindersberger@tum.de

Kurzfassung

Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und dem Füllgrad nanoskaliger SiO₂-Füllstoffpartikel sowie dem Zusatz eines Haftvermittlers wurde die Beständigkeit von Epoxidharzformstoffen gegenüber Oberflächenteilentladungen untersucht. Für die Untersuchungen wurden pyrogene SiO₂-Füllstoffpartikel verwendet, bei denen durch geeignete Oberflächenbehandlung unterschiedliche Oberflächeneigenschaften (hydrophil, hydrophob) erzielt werden konnten. Ferner wurde der Einfluss eines zusätzlich verwendeten Haftvermittlers auf die Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen untersucht. Für die Untersuchungen wurden plattenförmige Prüfkörper mit einer Dicke von 1 mm in einer Stab-Platte-Anordnung geprüft. Die Prüfkörper wurden für eine Zeitdauer von 100 h unter Laborbedingungen mit Oberflächenteilentladungen belastet, welche bei Anlegen einer Spannung von 11 kV_{eff} und einer Frequenz von 50 Hz an die Stab-Elektrode am Triple-Punkt entstehen. Mittels eines Laserprofilometers wurden das erodierte Volumen sowie die 95%-Erosionstiefe ermittelt. Für den Epoxidharzformstoff mit den hydrophilen SiO₂-Füllstoffpartikeln steigt die Erosionsbeständigkeit bis zu einigen Gew.-% an Füllstoffpartikeln und bleibt für höhere Füllgrade nahezu unverändert wohingegen für das Epoxidharzformstoff mit den hydrophoben SiO₂-Füllstoffpartikeln die Erosionsbeständigkeit monoton mit dem Füllgrad steigt. Ein lokales Maximum an Erosionsbeständigkeit wird für die gefüllten Epoxidharzformstoffe beim geringsten untersuchten Füllgrad erreicht, wenn zusätzlich zu den nanoskaligen Füllstoffpartikeln ein Haftvermittler verwendet wird. Die Beobachtungen werden mit dem Interphasenvolumenmodell erklärt.

Abstract

Depending on the surface properties and the filling degree of SiO₂ nanofillers as well as the additional use of a coupling agent the resistance to surface erosion of epoxy resins was investigated. For the experiments fumed silica particles were used. Different surface properties (hydrophilic, hydrophobic) have been implemented by suitable surface treatment and the influence of a coupling agent in addition to the nanofillers on the resistance to surface erosion was investigated. Plate shaped samples with a thickness of 1 mm were tested in a rod-plane arrangement. The samples were stressed for 100 hours by surface discharges originating under normal laboratory conditions in air at the triple point when energizing the rod with a sinusoidal voltage of 11 kV_{rms} at a frequency of 50 Hz. The degree of surface erosion is quantified by the eroded volume and the 95%-erosion depth which is determined by means of a scanning profilometer. For epoxy resin with hydrophilic SiO₂ nanofillers the erosion resistance increases with the filler loading up to a few percent by weight while no further increase can be observed for higher filler loadings. For epoxy resin with the hydrophobic filler particles the resistance to surface erosion increases monotonously up to the highest filler loadings used. A local maximum of the resistance to surface erosion is achieved for the lowest filler loading investigated if a coupling agent is used in addition to the nanofillers. The observations are explained by means of the Interphase Volume Model.

1 Einleitung

Nanokomposite, d.h. Werkstoffe, welche mit wenigen Gewichtsprozent meist anorganischer Nanofüllstoffe gefüllt sind (z. B. [1], [2]), können gegenüber üblicherweise verwendeten Mikrokompositen und ungefüllten Werkstoffen verbesserte Eigenschaften aufweisen. In vorausgegangenen Untersuchungen konnten beispielsweise eine verbesserte Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen und Treeing (z. B. [3]-[6]) sowie gegenüber Hochspannungslichtbögen und Kriechwegbildung und Erosion (z. B. [7]) nachgewiesen werden. Um die Wirkungsweise nanoskaliger Füllstoffe in einer Polymer-

matrix zu erklären wurden unterschiedliche Modelle entwickelt ([7]-[11]), welche alle auf der Annahme eines Grenzflächengebietes, der so genannten Interphase zwischen den Füllstoffpartikeln und der Polymermatrix basieren. Die Eigenschaften dieser Interphase können sich von den Eigenschaften der Polymermatrix und der Füllstoffpartikel unterscheiden. Aufgrund der hohen spezifischen Oberflächen von Nanopartikeln kann die Interphase einen volumenmäßig so großen Anteil am gesamten Werkstoffvolumen einnehmen, dass die Eigenschaften der Interphase die Eigenschaften des Nanokomposites maßgeblich beeinflussen.

Welche Einflussgrößen die Ausdehnung der Interphase bestimmen konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. Wechselwirkungen zwischen den Füllstoffpartikeln und der Polymermatrix könnten beispielsweise über Oberflächengruppen der Füllstoffe stattfinden. Um den Einfluss verschiedener Oberflächengruppen zu untersuchen, wurden für die vorliegende Untersuchung Nanokomposite verwendet, bei denen durch gezielte Oberflächenbehandlung unterschiedliche Oberflächeneigenschaften von SiO₂-Füllstoffpartikeln erreicht werden konnten. Ferner wurden Werkstoffe untersucht, bei denen zusätzlich ein Haftvermittler verwendet wurde, welcher die Anbindung der verwendeten Füllstoffpartikel an die Polymermatrix gewährleisten soll. Zu Vergleichszwecken wurde das ungefüllte Polymer untersucht. Sämtliche Werkstoffe basieren auf dem gleichen Epoxidharzsystem.

2 Untersuchte Werkstoffe

Für die durchgeführten Untersuchungen wurde ein cyclaliphatischer Epoxidharzformstoff als Basispolymer verwendet. Bei den eingesetzten nanoskaligen Füllstoffpartikeln handelt es sich um pyrogenes Siliziumdioxid (SiO₂) mit einem Primärpartikeldurchmesser von 12 nm. Durch geeignete Nachbehandlung konnten unterschiedliche Oberflächeneigenschaften der SiO₂-Füllstoffpartikel erreicht werden:

- Füllstoff F1: nanoskalige SiO₂-Füllstoffpartikel mit hydrophiler Partikeloberfläche
- Füllstoff F2: nanoskalige SiO₂-Füllstoffpartikel mit hydrophober Partikeloberfläche

Es wurden jeweils Epoxidharzformstoffe mit einem Füllgrad von 1,5 Gew.-%, 3 Gew.-%, 6 Gew.-% und 9 Gew.-% der unterschiedlichen Füllstoffe untersucht. Ferner wurden für die Untersuchungen Epoxidharzformstoffe verwendet, welche neben den unterschiedlichen Konzentrationen des Füllstoffes F1 einen Haftvermittler (3-Glycidylxypropyltrimethoxysilan) enthalten. Dieser soll zu einer Anbindung der Polymerketten an die Füllstoffpartikel führen, seine Konzentration beträgt 10 Gew.-% des jeweiligen Füllgrades. Die verwendeten Füllstoffe wurden mit einem Planetendissolver unter hohen Scherkräften nach immer dem gleichen Mischverfahren eingearbeitet. Als Referenzwerkstoff wurde außerdem der ungefüllte Epoxidharzformstoff untersucht.

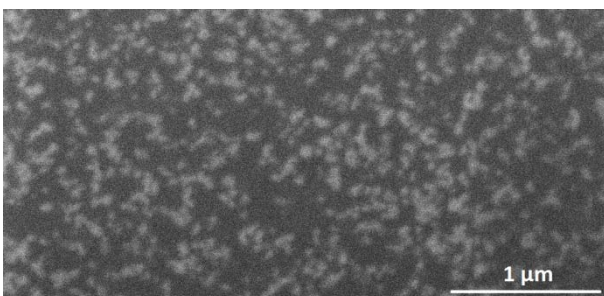


Bild 1: FIB-Aufnahme eines Epoxidharzformstoffes mit 9 Gew.-% des Füllstoffes F1

Die Füllstoffverteilung wurde mittels FIB (Focused Ion Beam) untersucht [5]. In den FIB-Aufnahmen erscheinen die nanoskaligen Füllstoffpartikel als weiße Punkte, das Polymer erscheint schwarz (**Bild 1**).

Unabhängig vom verwendeten Füllstoff und der Verwendung eines Haftvermittlers sind sowohl kleine Partikel als auch Agglomerate erkennbar. Allgemein zeigen die untersuchten Werkstoffe eine homogene Füllstoffverteilung. Dabei steigt der Homogenitätsgrad mit zunehmendem Füllgrad.

3 Untersuchung der Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen

Die Untersuchungen zur Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen wurden in Anlehnung an IEC 60343 durchgeführt. Die verwendeten Elektroden bestehen aus rostfreiem Stahl, besitzen einen Durchmesser von 6 mm und haben eine scharfe Kante (**Bild 2**).

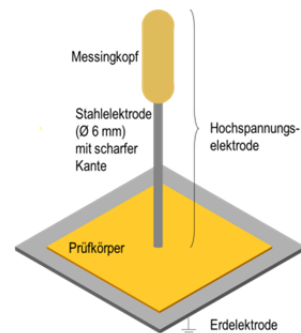


Bild 2: Elektrodenanordnung zur Untersuchung der Beständigkeit fester Isolierwerkstoffe gegenüber Oberflächenteilentladungen

Die Prüfungen an den untersuchten Werkstoffen wurden mit einer sinusförmigen Wechselspannung von 11 kV_{eff} bei 50 Hz durchgeführt, welche 100 h unter Laborbedingungen an die Stahlelektroden angelegt wurde.

Die Stahlelektroden wurden direkt auf die Prüfkörperoberfläche aufgesetzt. Die plattenförmigen Prüfkörper besitzen eine Dicke von 1 mm. Bei Anlegen einer Spannung an die Elektroden werden die Prüfkörper durch Oberflächenteilentladungen belastet, welche am Triplepunkt entstehen. Im Anschluss an die Belastung werden die Prüfkörperoberfläche mit einem Laserprofilometer untersucht ("Nanofocus µscan AF"), die für die Auswertung verwendete Auflösung betrug 10 nm in x- und y-Richtung sowie 0,5 µm in z-Richtung. Aus den mit dem Laserprofilometer erhaltenen Messwerten werden das erodierte Volumen sowie die 95%-Erosionstiefe in einem Bereich ermittelt, der durch einen inneren Radius r und einen äußeren Radius R begrenzt ist (**Bild 3**). Die 95%-Erosionstiefe ist dabei diejenige Erosionstiefe, im Vergleich zu welcher 95% aller Messwerte kleiner und 5% größer sind [5].

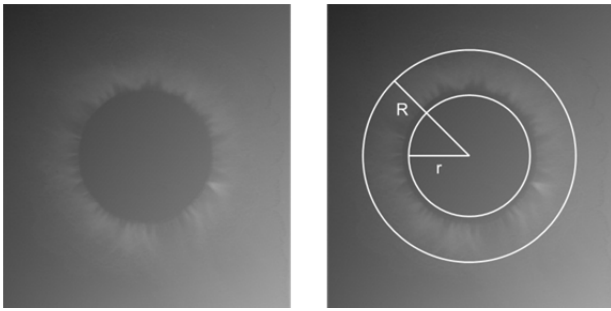


Bild 3: Oberfläche eines mit Oberflächenteilentladungen belasteten Prüfkörpers mit Auswertebereich begrenzt durch den inneren Radius r und den äußeren Radius R

Eine direkte Vermessung der Prüfkörperoberfläche mit dem Laserprofilometer ist nur dann möglich, wenn diese intransparent ist. Da die untersuchten Werkstoffe jedoch transparent sind, ist eine direkte Vermessung der Oberfläche mit dem Laserprofilometer nicht möglich. Um das erodierte Volumen und die 95%-Erosionstiefe der untersuchten transparenten Prüfkörper zu bestimmen wurde ein eingefärbter Abguss der belasteten Stelle aus RTV-Silikonelastomer angefertigt, der ein Negativ der belasteten Stelle darstellt und dieser vermessen.

4 Messergebnisse

Zur Untersuchung der Beständigkeit gegenüber Kriechwegbildung und Erosion wurde das in **Abschnitt 3** beschriebene Verfahren angewendet. Die verwendeten Elektroden bestanden aus rostfreiem Stahl, besaßen einen Durchmesser von 6 mm und eine scharfe Kante. An die Elektroden wurde für 100 Stunden unter Laborbedingungen eine Spannung von $11 \text{ kV}_{\text{eff}}$ bei 50 Hz angelegt. Durch Oberflächenteilentladungen, welche im Triplepunkt entstehen, wurden die 1 mm dicken, plattenförmigen Prüfkörper belastet. Von jedem Werkstoff (**Abschnitt 2**) wurden jeweils fünf Prüflinge untersucht und aus den Messwerten für das erodierte Volumen und die 95%-Erosionstiefe Median und Spannweite gebildet (**Bild 4**, **Bild 5**). Zur besseren Lesbarkeit sind im Diagramm die Werte jeweils leicht versetzt zum tatsächlichen Füllgrad dargestellt. Für die Auswertung der Erosion wurde ein innerer Radius r von 2 mm und ein äußerer Radius R von 5 mm verwendet (Abschnitt 3).

Die Messergebnisse zeigen, dass Füllstofftyp, Oberflächeneigenschaften des Füllstoffes, der Zusatz eines Haftvermittlers und der Füllgrad an nanoskaligen Füllstoffpartikeln die Beständigkeit des untersuchten Epoxidharzformstoffes gegenüber Oberflächenteilentladungen beeinflussen (**Bild 4**, **Bild 5**).

Sämtliche gefüllte Werkstoffe weisen eine geringe Erosion auf als der ungefüllte Referenzwerkstoff. Die Medianwerte des erodierten Volumens und der 95%-Erosionstiefe nehmen tendenziell mit zunehmendem Füllgrad ab. Für Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F1 wird im untersuchten Füllgradbereich ein Minimum an Erosion bei einem Füllgrad von 3 Gew.-% bzw. 6 Gew.-% erreicht. Für Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F2

nehmen das erodierte Volumen und die 95%-Erosionstiefe im untersuchten Füllgradbereich monoton mit dem Füllgrad ab. Der Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F1 und dem Haftvermittler (HV) weist ein Minimum an Erosion bereits bei einem Füllgrad von 1,5 Gew.-% auf.

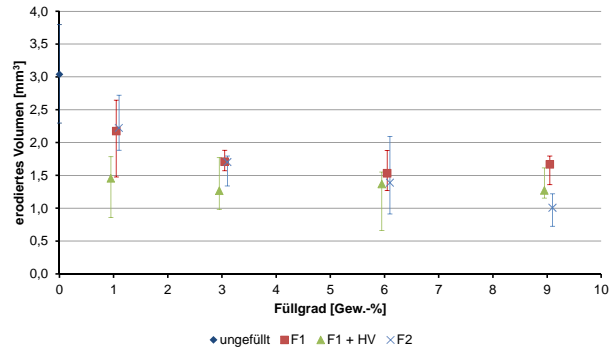


Bild 4: Erodierendes Volumen (Median und Spannweite aus jeweils fünf Messwerten) für plattenförmige Prüfkörper aus Epoxidharzformstoff (Dicke 1 mm) mit unterschiedlichen Füllgraden der Füllstoffe F1 und F2 sowie dem Füllstoff F1 und einem zusätzlichem Haftvermittler (HV)

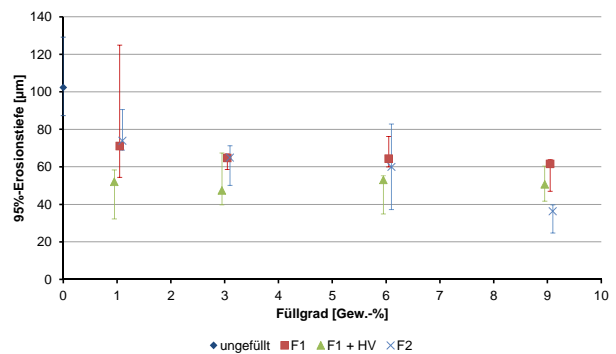


Bild 5: 95%-Erosionstiefe (Median und Spannweite aus jeweils fünf Messwerten) für plattenförmige Prüfkörper aus Epoxidharzformstoff (Dicke 1 mm) mit unterschiedlichen Füllgraden der Füllstoffe F1 und F2 sowie dem Füllstoff F1 und einem zusätzlichem Haftvermittler (HV)

Da das erodierte Volumen und die 95%-Erosionstiefe das prinzipiell gleiche tendenzielle Verhalten in Abhängigkeit des Füllstoffes und des Füllgrades aufweisen, wird im Folgenden ausschließlich das erodierte Volumen betrachtet.

Mittels eines Kolmogorow-Smirnow-Tests wurde gezeigt, dass die Nullhypothese einer Normalverteilung der Messwerte nicht verworfen werden kann. Für eine Normalverteilung der Messwerte und einen Konfidenzbereich der Messwerte von 95% wurde das Wahrscheinlichkeitsdiagramm ermittelt (**Bild 6**, **Bild 7**, **Bild 8**, **Bild 9**).

Für den Epoxidharzformstoff mit einem Füllgrad von 1,5 Gew.-% der Füllstoffe F1 und F2 tritt eine starke Überlappung der Konfidenzbereiche auf und auch das 50%-Quantil des erodierten Volumens unterscheidet sich nur geringfügig (Bild 6). Der Konfidenzbereich des Epoxidharzformstoffes mit dem Füllstoff F1 und einem Haft-

vermittler (HV) hingegen überlappt weniger stark mit den Konfidenzbereichen der Epoxidharzformstoffe mit den Füllstoffen F1 und F2 und auch das 50%-Quantil des erodierten Volumens ist für den Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F1 und einem Haftvermittler (HV) deutlich geringer als für die beiden Epoxidharzformstoffe ohne Haftvermittler (Bild 6).

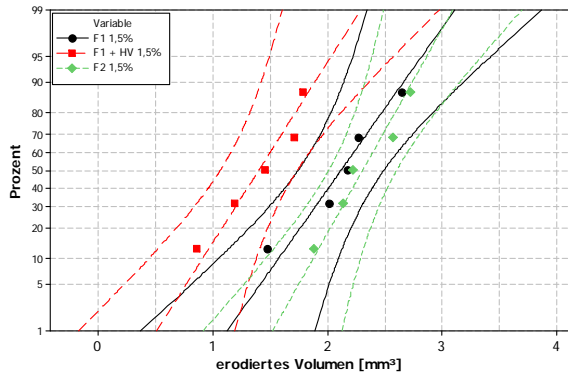


Bild 6: Wahrscheinlichkeitsverteilung mit 95%-Konfidenzbereich des erodierten Volumens plattenförmiger Epoxidharzformstoffe (Dicke 1 mm) für einen Füllgrad von 1,5 Gew.-% der Füllstoffe F1 und F2 sowie dem Füllstoff F1 und einem zusätzlichen Haftvermittler (HV)

Der Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F1 weist ein deutlich reduziertes erodiertes Volumen gegenüber dem ungefüllten Werkstoff auf (Bild 4, Bild 7). Ab einem Füllgrad von 3 Gew.-% überlappen die Konfidenzbereiche so stark, dass keine Unterscheidung des erodierten Volumens in Abhängigkeit des Füllgrades mehr möglich ist und von einem Minimum an erodiertem Volumen bei einem Füllgrad von 3 Gew.-% ausgegangen werden muss.

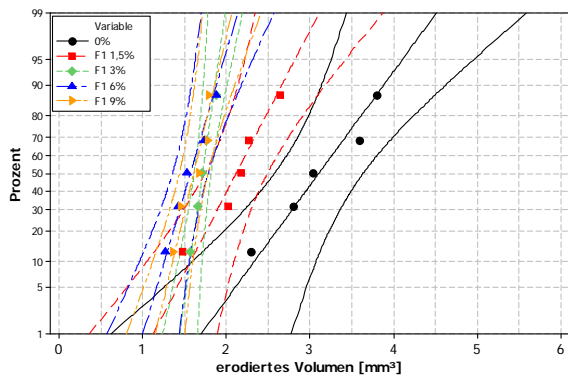


Bild 7: Wahrscheinlichkeitsverteilung mit 95%-Konfidenzbereich des erodierten Volumens plattenförmiger Epoxidharzformstoffe (Dicke 1 mm) für unterschiedliche Füllgrade des Füllstoffes F1

Der Epoxidharzformstoff, welcher zusätzlich zum Füllstoff F1 einen Haftvermittler (HV) enthält, weist bereits bei einem Füllgrad von 1,5 Gew.-% ein Minimum an erodiertem Volumen auf (Bild 4, Bild 8).

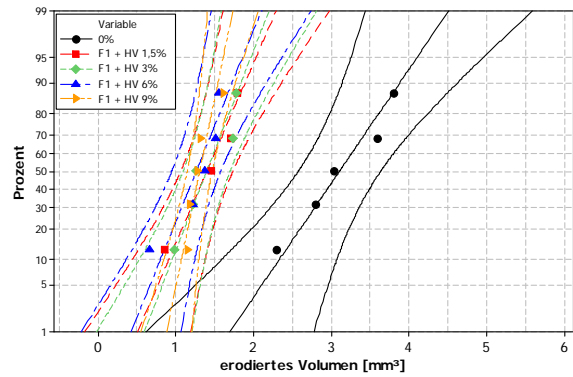


Bild 8: Wahrscheinlichkeitsverteilung mit 95%-Konfidenzbereich des erodierten Volumens plattenförmiger Epoxidharzformstoffe (Dicke 1 mm) für unterschiedliche Füllgrade des Füllstoffes F1 und eines zusätzlichen Haftvermittlers (HV)

Für Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F2 wird kein Minimum an erodiertem Volumen erreicht, sondern das erodierte Volumen sinkt monoton mit dem Füllgrad (Bild 4, Bild 9)

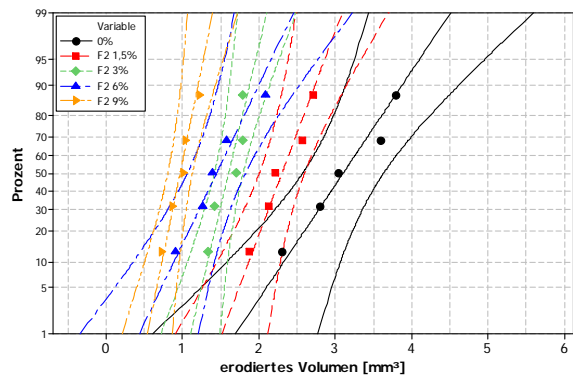


Bild 9: Wahrscheinlichkeitsverteilung mit 95%-Konfidenzbereich des erodierten Volumens plattenförmiger Epoxidharzformstoffe (Dicke 1 mm) für unterschiedliche Füllgrade des Füllstoffes F2

5 Diskussion der Messergebnisse

Das Interphasenvolumen in einem Kompositwerkstoff kann mittels des Interphasenvolumenmodells abgeschätzt werden [7]. Dieses geht davon aus, dass alle Füllstoffpartikel den gleichen Durchmesser besitzen und homogen im Matrixmaterial verteilt sind. Parameter in diesem Modell sind die Dichte des Matrixmaterials ($1,2 \text{ g/cm}^3$) und der Füllstoffpartikel (SiO_2 : $2,2 \text{ g/cm}^3$) sowie die Primärpartikeldurchmesser der Füllstoffpartikel (12 nm). Abhängig von der Interphasendicke i , welche die Füllstoffpartikel umgibt, wird ein Maximum an Interphasenvolumen im Werkstoff bei unterschiedlichen Füllgraden erreicht (**Bild 10**).

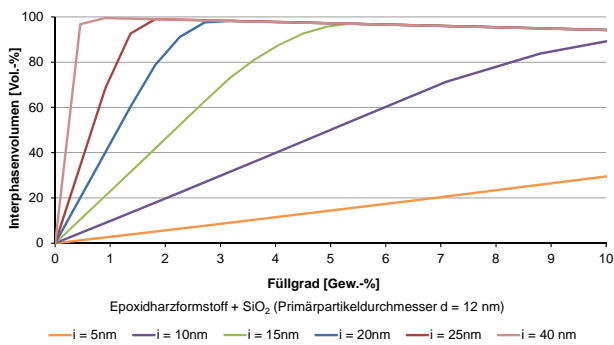


Bild 10: Interphasenvolumen in einem Nanokomposit abhängig von der Interphasendicke, dem Partikeldurchmesser, dem Matrixmaterial und dem Füllgrad nach dem Interphasenvolumenmodell

Für einen Primärpartikeldurchmesser von 12 nm wird das Maximum an Interphasenvolumen für eine Interphasendicke von 20 nm bei einem Füllgrad von ca. 3 Gew.-% der SiO_2 -Füllstoffpartikel erreicht. Für kleine Interphasendicken (≤ 10 nm in Bild 10) steigt der Interphasenvolumenanteil monoton mit dem Füllgrad an, so dass kein Maximum an Interphasenvolumen für Füllgrade kleiner als 9 Gew.-% auftritt.

Es wird davon ausgegangen, dass die größte Verbesserung der Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen dann auftritt, wenn das Interphasenvolumen im Kompositwerkstoff maximal ist. Folglich sollte die maximale Beständigkeit der unterschiedlich gefüllten Epoxidharzformstoffe gegenüber Oberflächenteilentladungen (Bild 4 bis Bild 9) in der Nähe des Maximums an Interphasenvolumen erreicht werden (Bild 10).

Von den untersuchten Werkstoffen weist der ungefüllte Epoxidharzformstoff das höchste erodierte Volumen auf.

Für den Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F1 wird ein lokales Minimum an Erosion für einen Füllgrad von ca. 3 Gew.-% erreicht. Für einen Füllgrad von 3 Gew.-% der SiO_2 -Füllstoffpartikel mit einem Durchmesser von 12 nm weist das Interphasenvolumen nach dem Interphasenvolumenmodell für eine Interphasendicke von ca. 20 nm ein lokales Maximum auf. Für Füllgrade des Füllstoffes F1, die höher sind als 3 Gew.-%, bleibt die Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen annähernd konstant, gleiches gilt für den Interphasenvolumenanteil für eine Interphasendicke von 20 nm um die nanoskaligen SiO_2 -Füllstoffpartikel herum.

Beim Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F2 nimmt das erodierte Volumen monoton mit dem Füllgrad bis zu einem Füllgrad von 9 Gew.-% ab. Dies lässt sich mit einem Interphasenvolumenanteil erklären, welcher monoton mit dem Füllgrad zunimmt und der kein lokales Maximum für Füllgrade kleiner als 9 Gew.-% erreicht. Dies ist der Fall für Dicken der die nanoskaligen SiO_2 -Füllstoffpartikel umgebenden Interphase von 10 nm und geringer.

Der Epoxidharzformstoff, welchem zusätzlich zum nanoskaligen Füllstoff F1 ein Haftvermittler (HV) zugesetzt wurde, weist bereits bei einem Füllgrad von 1,5 Gew.-% ein lokales Minimum des erodierten Volumens auf. Dies kann durch ein Interphasenvolumen erklärt werden, welches ein lokales Maximum bei einem Füllgrad von 1,5 Gew.-% oder geringer aufweist. Da der niedrigste untersuchte Füllgrad 1,5 Gew.-% beträgt, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob das lokale Minimum des erodierten Volumens bereits für Füllgrade kleiner als 1,5 Gew.-% erreicht werden würde. Die Messergebnisse für den Epoxidharzformstoff mit dem Füllstoff F1 und dem Haftvermittler (HV) können mit einer Interphase um die SiO_2 -Füllstoffpartikel erklärt werden, welche eine Dicke von mindestens 25 nm besitzt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Unterschiede der unterschiedlich gefüllten Werkstoffe in Bezug auf ihre Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen mit unterschiedlichen Interphasendicken erklärt werden können, welche die Füllstoffpartikel in den jeweiligen Fällen umgeben. Die Abhängigkeit der Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen für die untersuchten Werkstoffe vom Füllgrad ist in guter Übereinstimmung mit dem füllgradabhängigen Interphasenvolumenanteil am gesamten Werkstoffvolumen. Die Oberflächeneigenschaften der Füllstoffpartikel sowie der Zusatz eines Haftvermittlers beeinflussen die Messergebnisse und scheinen deshalb die Dicke der sich um die Füllstoffpartikel ausbildenden Interphase zu beeinflussen.

6 Zusammenfassung

Die Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen von Epoxidharzformstoffen mit nanoskaligen SiO_2 -Füllstoffpartikeln unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit wurde in Anlehnung an IEC 60343 mit einer Stabplatte-Anordnung untersucht.

Aus den Messergebnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Beständigkeit von Epoxidharzformstoffen gegenüber Oberflächenteilentladungen wird durch den Zusatz nanoskaliger SiO_2 -Füllstoffpartikel positiv beeinflusst.
- Die Oberflächenbeschaffenheit der nanoskaligen SiO_2 -Füllstoffpartikel beeinflusst die Beständigkeit gegenüber Oberflächenteilentladungen. Abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit wird im untersuchten Füllgradbereich ein lokales Minimum an Erosion erreicht oder die Erosion nimmt monoton mit dem Füllgrad ab.
- Durch die Verwendung eines zusätzlichen Haftvermittlers zu den nanoskaligen SiO_2 -Füllstoffpartikeln konnte ein Minimum an Erosion für geringere Füllgrade erreicht werden als ohne Verwendung eines Haftvermittlers.

- Der Einfluss des Füllgrades auf die Beständigkeit nanoskalig gefüllter Epoxidharzformstoffe gegenüber Oberflächenteilentladungen kann mit Hilfe des Interphasenvolumenmodells erklärt werden.

- [10] Andritsch, T.: Epoxy Based Nanocomposites for High Voltage DC Applications – Synthesis, Dielectric Properties and Space Charge Dynamics; Dissertation TU Delft; 2010
- [11] Tanaka, T.; Imai, T.: Advances in Nanodielectric Materials Over the Past 50 Years; IEEE Electrical Insulation Magazin; Vol. 29, No.1, pp.10-23; 2013

7 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Dr. M. Scholz, U. Schachtely und C. Schlegelmilch (EVONIK Industries) für die Bereitstellung nanoskaliger Füllstoffpartikel und die Anfertigung von Prüfkörpern.

Weiter gilt unser Dank Dr. H. Wilbers (HUNTSMAN) für die Bereitstellung des Epoxidharzformstoffes.

Ferner bedanken wir uns bei Prof. Dr. D. Schmitt-Landsiedel und Dr. M. Becherer (Lehrstuhl für Technische Elektronik, TU München) für die Anfertigung der FIB-Aufnahmen.

8 Literatur

- [1] Nelson, J.K.: Dielectric Polymer Nanocomposites; Springer New York; 2010
- [2] CIGRE WG D1.24: Polymer Nanocomposites - Fundamentals and possible applications to Power Sectors; Technical Brochure No 451; 2011
- [3] Rätzke, S.; Ohki, Y.; Imai, T.; Tanaka, T.; Kindersberger, J.: Tree Initiation Characteristics of Epoxy Resin and Epoxy/Clay Nanocomposite; IEEE TDEI, Vol. 16, No. 5; pp. 1473 – 1480; 2009
- [4] Weidner, J.R.; Pohlmann, F.; Gröppel, P.; Hildinger, T.: Nanotechnology in High Voltage Insulation Systems for Turbine Generators – First Results; Proc. XVII. ISH; Hannover, Germany; August 22-26; 2011
- [5] Anglhuber, M.; Kindersberger, J.: Quantification of Surface Erosion and Microscopic Analysis of Particle Distribution in Polymer Nanocomposites; IEEE TDEI, Vol. 19, No. 2; April 2012
- [6] Krivda, A.; Kindersberger, J.; Tanaka, T.; et al.: Characterization of Epoxy Microcomposite and Nanocomposite Materials for Power Engineering Applications; IEEE Electrical Insulation Magazine; Vol., 28, No. 2, pp. 38-51; 2012
- [7] Raetzke, S.; Kindersberger, J.: Role of Interphase on the Resistance to High-voltage Arcing, on Tracking and Erosion of Silicone/SiO₂ Nanocomposites; IEEE TDEI, Vol. 17, Issue 2, pp. 607-614, 2010
- [8] Lewis, T.J.: Interfaces are the Dominant Feature of Dielectrics at the Nanometric Level; IEEE TDEI; Vol. 11, No. 5, pp. 739-753; 2004
- [9] Tanaka, T.; Kozako, M.; Fuse, N.; Ohki, Y.: Proposal of Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics; IEEE TDEI; Vol. 12, No. 4, pp. 669-681; 2005