

UNTERSUCHUNG ZUM TEILENTLADUNGSVERHALTEN VON GLASFASERVERSTÄRKTEN EPOXIDHARZEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES GLASFASER-HARZ VERHÄLTNISSSES UND DER VERGUSSMETHODE

Javier Torres*

*Leibniz Universität Hannover, Schering Institut für Hochspannungstechnik
Callinstr. 25A, 30167 Hannover*

Laureen Stahl, Peter Werle

*Leibniz Universität Hannover, Schering Institut für Hochspannungstechnik
Callinstr. 25A, 30167 Hannover*

Das primäre Ziel dieser Studie besteht darin, einen Beitrag zu den Möglichkeiten für die Analyse des Teilentladungsverhaltens von Verbundstoffisolierungen für die Anwendung in Trockentransformatoren zu erbringen. Eine Methode für die Herstellung der notwendigen Prüfkörper, welche infolge der hohen Kosten die Untersuchungen dieser Art einschränken, wird diskutiert. Diese sollte in erster Stelle ermöglichen, das Verhältnis zwischen organischer Matrix (Harz) und anorganischer Komponente (Glasfaser) genau zu bestimmen. Es werden die unterschiedlichen Aspekte von zwei Prüfanordnungen, welche sich in der Art des Umbettungsmittels unterscheiden, vorgestellt. Bei der ersten Konfiguration wird ein mit Isolierflüssigkeit gefülltes Gefäß, das zwei Rogowski-Profil-Elektroden beherbergt, zwischen denen die Prüfkörper gespannt werden, verwendet. Bei der zweiten Konfiguration werden die Prüfobjekte im Epoxidharz vergossen und in einem mit Isolierflüssigkeit gefüllten Gefäß getestet. Ziel dabei ist, Oberflächenentladungen am Tripelpunkt (Isolierflüssigkeit, Verbundstoff, Metall), auszuschließen. Es wird auf die Vorteile der Anwendung natürlicher Estere als Einbettmittel im Gegensatz zu Mineralöl bei den Messungen eingegangen. Zur Detektion der Teilentladungsphänomene wird eine Messkonfiguration gemäß der Norm IEC 60270 eingesetzt.

1. Allgemeines

Die zunehmende Präsenz erneuerbarer Energiequellen in den Stromnetzen führt zu einer Veränderung der Topologie und der Hauptmerkmale der traditionellen Übertragungs- und Verteilungssysteme [1]. Das traditionelle Konzept für den Netzbetrieb mit großen zentralen Erzeugungsanlagen und weit verteilten Verbrauchern entwickelt sich tendenziell zu einem dezentralen Erzeugungssystem mit lokal verteilten Erzeugern in der Nähe der Verbraucher. Die sich daraus ergebenden Betriebsbedingungen, bei denen hohe Lastschwankungen und niedrigere Leistungen an den entsprechenden Anlagen zu erwarten sind, und die immer anspruchsvoller werdenden [2], Umweltauforderungen fördern einen höheren Einsatz von Trockentransformatoren als eine robuste und sichere Alternative zu den herkömmlichen mit Mineralöl gefüllten Transformatoren.

Die elektrische Isolation stellt eine der wesentlichsten Kernkomponenten in einem Transformator dar. Trockentransformatoren, die mit Feststoffen isoliert sind, gewinnen aufgrund ihrer geringen Entflammbarkeit und hohen mechanischen Belastbarkeit neben den ölasierten Transformatoren zunehmend an Bedeutung. Allerdings weisen Feststoffisolierungen einen entscheidenden Nachteil auf: Teilentladungen (TE) in Feststoffisolierungen führen zu einer fortschreitenden Erosion, da sie im Gegensatz zu flüssigen Isoliersystemen nicht die Fähigkeit zur Selbstregeneration besitzen. Aus diesem Grund sind Teilentladungsmessungen ein wichtiger Aspekt bei der Prüfung von Isolationsmaterialien, insbesondere bei Trockentransformatoren.

Die höhere Variabilität der Einspeisung liegt in der Natur der meisten erneuerbaren Energiequellen. Eine unmittelbare Folge dieser

Tatsache ist, dass das Lastprofil des Transformators in der Regel nicht mehr konstant ist, was zu starken Lastschwankungen und elektrischen und mechanischen Beanspruchungen der Gerätestruktur führt. Die mit dem Betrieb unter den oben genannten Bedingungen verbundenen Beanspruchungen können den natürlichen Alterungsprozess der Isolation beschleunigen und zu einem vorzeitigen Ausfall der Anlage führen. Dabei sind Teilentladungen von besonderer Relevanz. Diese können in Hohlräumen, die während der Herstellung der Isolation entstanden sind, oder durch Delaminationen als Konsequenz mechanischer Beanspruchungen auftreten. Aus diesem Grund ist die Entwicklung mechanisch und elektrisch widerstandsfähiger Isoliermaterialien, die es ermöglichen, die Ausfallwahrscheinlichkeit zu verringern, ein wichtiges Anliegen der aktuellen Hochspannungstechnik.

Verbundwerkstoffe, die derzeit im Mittelspannungsbereich weit verbreitet sind, könnten eine sinnvolle Alternative für robustere Isolationssysteme im Hochspannungsbereich darstellen. Verbundwerkstoffe bestehen aus mindestens zwei verschiedenen Materialien und weisen Eigenschaften, die sich von denen der Einzelkomponenten unterscheiden, auf. Insbesondere harzbasierte glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) eignen sich aufgrund ihrer wirtschaftlichen Herstellungsbedingungen und ihrer günstigen mechanischen und elektrischen Eigenschaften auch bei hoher thermischer Beanspruchung für den Einsatz in Hochspannungsgeräten.

Die unmittelbare Analyse eines Isolierstoffes in Trockentransformatoren ist aufgrund der technischen und finanziellen Anwendungen in vielen Fällen nicht umsetzbar, insbesondere, wenn es darum geht, Verbundstoffe zu untersuchen. Eine direkte Extraktion von Material aus dem Transformator, ohne die Isolationsfunktion zu beeinträchtigen, ist nicht möglich und somit beschränken sich Untersuchungen fast ausschließlich auf Messungen des gesamten Transformators und im besten Fall der einzelnen Spulen.

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag ein Ansatz für die Herstellung von Prüfkörpern aus einem faserbasierten Verbundstoff oder Faserverbundstoff und ihre Untersuchung bezogen auf das Teilentladungsverhalten diskutiert.

2. Prüfbjekte

Um den Einfluss unterschiedlicher Parameter, wie beispielsweise Änderungen im Herstellungsprozess, auf die Eigenschaften der Isolation zu untersuchen, sind zahlreiche Prüfkörper notwendig, um eine statistische Sicherheit zu gewährleisten [3]. Wenn die zu untersuchenden Prüfkörper Spulen oder Modellspulen sind, bedingt diese Tatsache hohe Kosten bei der Durchführung der Untersuchungen.

Auf der anderen Seite weisen Faserverbundstoffe eine besondere Geometrie auf, welche durch die Richtung und die Zusammenlegung der Faser bedingt ist. Diese Geometrie ist für das dielektrische Verhalten des Materials relevant. Bei der Untersuchung solcher Materialien ist es notwendig, diese Eigenschaften zu berücksichtigen und dafür das echte Herstellungsverfahren so realitätsnah wie möglich nachzubilden.

Das zu untersuchende Material basiert auf der Technik des Faserwickelverfahrens. Verbundstoffe, die mit diesem Verfahren hergestellt werden, bestehen aus Filamenten (Faser höherer Länge), welche als Bündel um einen zylindrischen Körper (Dorn) nach einem vorigen Harzbad gewickelt und ausgehärtet werden [4]. Die Anordnung, welche für die Herstellung der Prüfkörper entwickelt wurde, bestand aus zwei Messingplatten, die durch Abstandshalter aus Polytetrafluorethylen (PTFE) mit einer Dicke von 1 mm getrennt waren. Die Anordnung ist in Abbildung 1 dargestellt.

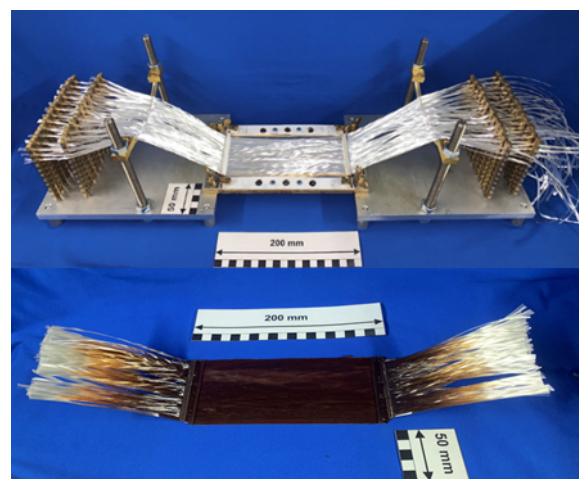


Abbildung 1: Anordnung für die Herstellung von Prüfkörpern für Untersuchungen an Verbundstoffen

Aufgrund des höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten von PTFE gewährleistet die Verwendung dieses Abstandshalters in der Gussanordnung deren

vollständige Abdichtung. Die Glasfasern werden fixiert und einer mechanischen Spannung unterworfen. Diese Tatsache ermöglicht es, die Bedingungen, die während des Faserwickelverfahrens entstehen, zu reproduzieren. Durch die Bündelhalter an jeder Seite der Anordnung ist es möglich, die Anzahl der verwendeten Filamentenbündel und damit das genaue Gewichtsverhältnis der einzelnen Komponenten des Verbundstoffes zu bestimmen. Die Anordnung ist für die Verwendung mit thermisch härtenden Harzen vorgesehen und kann unter Berücksichtigung der verwendeten Materialien bis zu Temperaturen von 200 °C eingesetzt werden.

3. Messanordnung

Die für die Messungen verwendete Elektrodenanordnung ist in der Abbildung 2 dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein Behältnis, das mit einer Isolierflüssigkeit gefüllt ist. Durch die hohe elektrische Festigkeit von Isolierflüssigkeiten wird die Entstehung von nicht innerhalb des Prüflings auftretenden Teilentladungen verhindert. Innerhalb des Flüssigkeitsbads befinden sich Rogowski - Elektroden, wobei sich die obere Elektrode auf Potential befindet, während die untere Elektrode auf Erdpotential liegt (siehe Abbildung 4). Ein bedeutender Aspekt dieser Anordnung ist, dass die obere Elektrode herausnehmbar ist, was den Austausch der Prüflinge ermöglicht und somit eine flexible Nutzung der Anordnung gewährleistet. Ein herausnehmbarer Flansch sorgt in diesem Kontext für die präzise Positionierung der oberen Elektrode, wodurch beide Elektroden aufeinander ausgerichtet sind und somit die intendierte Konfiguration für die Messungen hergestellt wird. Darüber hinaus ist über den Flansch eine zuverlässige Verbindung der oberen Elektrode mit dem Hochspannungspotential gewährleistet.

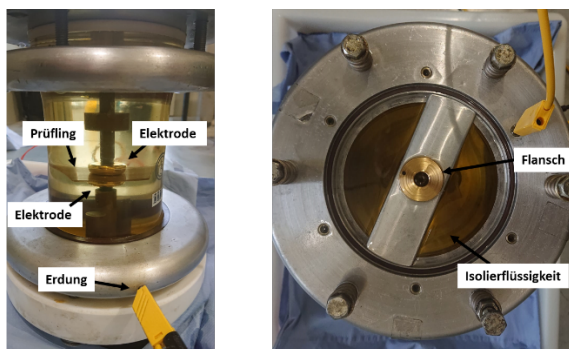


Abbildung 2: Elektrodenanordnung für die Teilentladungsmessung

Die verwendete Messkonfiguration ist in der Abbildung 3 dargestellt. Als Spannungsquelle wird ein Transformator mit stufenloser einstellbarer Ausgangsspannung genutzt. Der Koppelkondensator C_k verfügt über eine Kapazität von 1500 pF. In der vorliegenden Messkonfiguration wird ein Tiefpassfilter R mit einem Widerstand von 50 k Ω eingesetzt, welcher zwei wesentliche Aufgaben erfüllt: Er blockiert zum einen hochfrequente Störungen, die von der Hochspannungsversorgung ausgehen könnten, und verhindert zum anderen das Abfließen der TE-Impulse über die Parallelkapazitäten des Prüftransformators. Dies führt zu einer gesteigerten Messempfindlichkeit. Die verwendete Messkonfiguration entspricht der Teilentladungs-Prüfschaltung nach IEC 60270 [5].

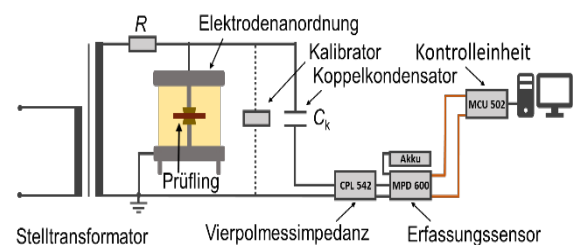


Abbildung 3: Schaltung für die Erfassung von Teilentladungen

4. Einbettmittel

In erster Instanz wurde als erste verwendete Flüssigkeit inhiertes Mineralöl vorgesehen. Dennoch wurde dabei das mögliche Auftreten von Teilentladungen am Tripelpunkt zwischen dem Prüfkörper, der Elektrode und der Flüssigkeit als Problem in Betracht gezogen. Teilentladungen könnten am Tripelpunkt durch die erhöhte Feldstärke in der Isolierflüssigkeit auftreten (ϵ_r von Mineralöl beträgt ca 2 und ϵ_r des Prüfobjekts ca 5). Die Art von Teilentladungen und das resultierende phasenaufgelöste Muster (PRPD) würden von Teilentladungen im Inneren des Prüfkörpers praktisch ununterscheidbar.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurde ein natürliches Ester als alternative Flüssigkeit verwendet. Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass solche Flüssigkeiten eine hemmende Wirkung auf die Entstehung von Teilentladungen aufweisen [6]. Teilentladungen, die in einem natürlichen Ester auftreten zeigen ein konstant intermittierendes Verhalten. Diese Tatsache ermöglicht eine schnelle Erkennung von Teilentladungen, die innerhalb des Prüflings auftreten.

Auch wenn die dielektrische Festigkeit einer Isolierflüssigkeit die Entstehung von

Teilentladungen verhindern sollte, ist es in einer ersten Betrachtung nicht möglich auszuschließen, dass diese am Tripelpunkt auftreten. Aus diesem Grund wurde eine alternative Anordnung implementiert. Dabei wurden die Elektroden und der Prüfkörper in Epoxidharz eingegossen und unter Vakuum ausgehärtet. Durch die höhere elektrische Festigkeit des Epoxidharzes und vor allem durch die ähnliche Dielektrizitätszahl des Einbettmittels im Vergleich zu derjenigen des Prüfkörpers, was eine niedrigere Belastung am Tripelpunkt bedingt, wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Teilentladungen an der Stelle reduziert. Abbildung 4 zeigt schematisch die verwendeten Anordnungen.

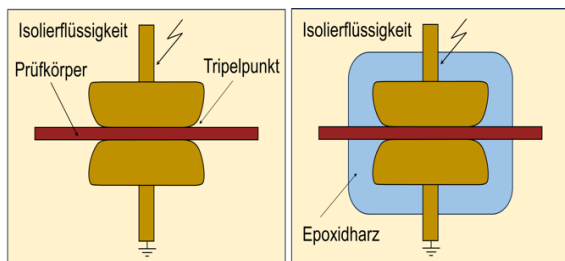


Abbildung 4: Elektrodenanordnung für die Teilentladungsmessung

Abbildung 5 zeigt einen in Epoxidharz eingebetteten Prüfkörper. Dennoch weist diese Konfiguration einige Nachteile. Auch wenn der Unterschied der Dielektrizitätszahlen des Prüfkörpers und des Einbettmittels geringer ist, sind Veränderungen der Positionierung des Prüfkörpers nicht mehr möglich. Die verwendeten Elektroden werden auch miteingegossen und somit nicht mehr verwendbar.

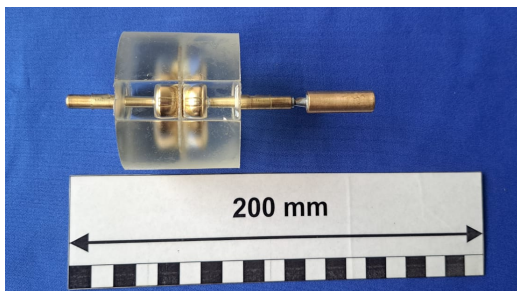


Abbildung 5: In Epoxidharz eingebettetes Prüfobjekt

Abbildung 6 zeigt die Einsetzspannung, die für einen Teilentladungspegel von 5 pC bestimmt wurde, von Prüfkörpern gleicher Art bei den drei unterschiedlichen Einbettmitteln.

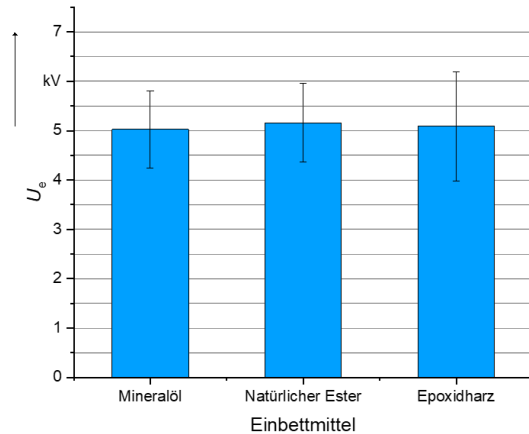


Abbildung 6: Einsetzspannung bei unterschiedlichen Einbettmitteln

Die Einsetzspannungen sind für die drei Einbettmittel nahezu gleich und somit ist es möglich abzuleiten, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit, die gemessenen Teilentladungen im Inneren des Prüfkörpers auftreten. Abbildung 7 zeigt das resultierende PRPD, welches die Hypothese der inneren Teilentladungen bestätigt.

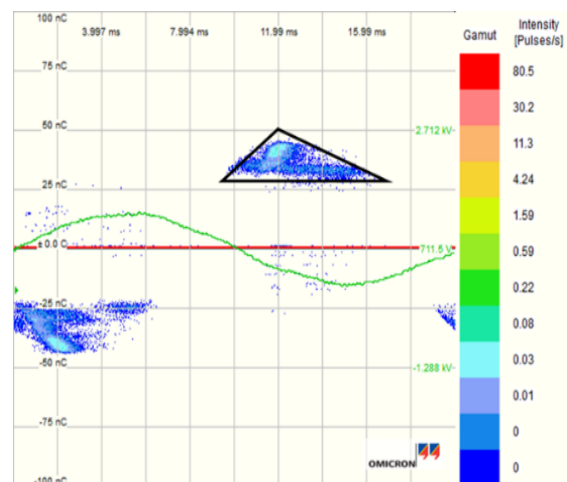


Abbildung 7: Phasenaufgelöstes Diagramm von der Messung am Verbundstoff

5. Ergebnisse

Es wurden vier unterschiedliche Glasfaser-Harz-Verhältnisse untersucht. Dafür wurden 5 Prüfkörper pro Verhältnis gemessen. Dabei wurde die Spannung mit einer Steigungsrate von 100 V/s erhöht, bis ein Pegel von mindestens 5 pC erreicht wurde. Die Einsetzspannung wurde für jeden Prüfling als der Mittelwert fünf hintereinander laufender Messungen bestimmt. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

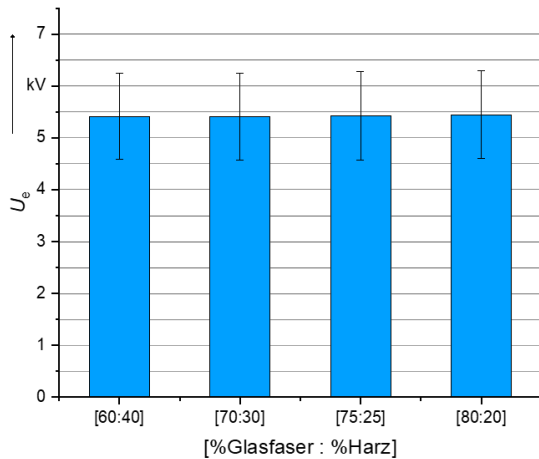


Abbildung 8: Einsetzspannung für unterschiedliche Glasfaser-Harz-Verhältnisse

Aus der Grafik ist abzuleiten, dass die Einsetzspannung am untersuchten Material unabhängig vom Glasfaser-Harz-Verhältnis ist.

Diese Beobachtung legt nahe, dass nur eine geringe Anzahl von Hohlräumen vorhanden sein muss, um Teilentladungen zu verursachen, auch wenn eine höhere Anzahl von Glasfasern die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Hohlräumen erhöht.

Zusätzlich wurden auch drei Varianten des Gussverfahrens untersucht. Bei einer Variante wurde das Harz ohne Vorbehandlung gegossen. Bei der zweiten Variante wurde eine thermische Behandlung des Harzes vorgenommen. Bei der dritten Variante wurde das Harz mechanisch vorbehandelt. Die Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

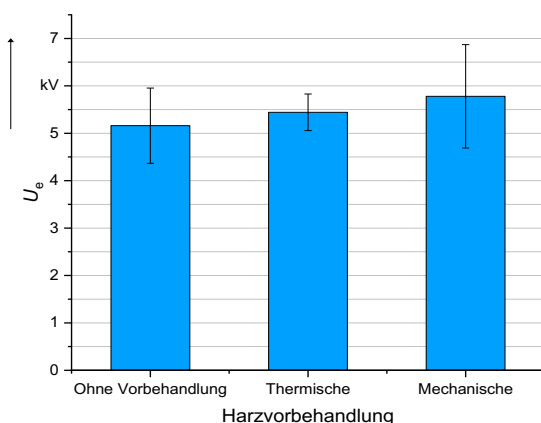


Abbildung 9: Einsetzspannung für unterschiedliche Variationen des Gussverfahrens

Die mechanische Vorbehandlung des Harzes zeigt eine Wirkung auf die Einsetzspannung der Prüfkörper. Veränderungen in der Oberflächenspannung des Harzes im flüssigen Zustand können dazu beitragen, dass sich das Harz besser über der Faser verteilt und die

möglichen entstehenden Mikrohohlräume reduziert werden, sowohl in Anzahl als auch in Größe [7].

6. Zusammenfassung

Eine Anordnung zur Herstellung von Prüfkörpern für die Untersuchung von Verbundstoffen für den Einsatz in Trockentransformatoren, der mit der Technik der Faserwickelverfahren hergestellt wird, wurde vorgeschlagen. Mit Hilfe dieser Anordnung könnten Veränderungen des Herstellungsparameters des Verbundstoffes reproduzierbar untersucht werden, ohne die Kostenintensivität der Herstellung von Spulen in Betracht zu ziehen.

Eine Anordnung zur Messung von Teilentladungen in flachen Prüfkörpern und die Anwendung von drei Einbettmitteln wurden diskutiert. Es wurde in erster Instanz Mineralöl vorgesehen. Da eine Unterscheidung zwischen den Teilentladungen, die im inneren des Prüfkörpers auftreten würden, und Entladungen am Trippelpunkt nicht gewährleistet war, wurde zusätzlich ein natürliches Ester als Einbettflüssigkeit getestet. Diese Flüssigkeit neigt zur Hemmung der Entladungen, was in intermittierende Entladungen resultiert und eine schnelle Unterscheidung von inneren Teilentladungen ermöglicht, die eher ein konstantes Verhalten aufweisen. Dennoch ist die Feldstärkeverdrängung am Tripelpunkt, die durch die sehr unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen bedingt, zu hoch. Um dieser Problematik entgegenzuwirken wurde eine Einbettung in Epoxidharz untersucht. Mit den drei Einbettmitteln wurde für Prüfkörper gleicher Art eine ähnliche Einsetzspannung gemessen. Dieses ermöglicht festzustellen, dass es sich bei den gemessenen Teilentladungen mit großer Wahrscheinlichkeit um innere Teilentladungen handelt.

Um die Einigkeit der Anordnung zu untersuchen, wurden vier Glasfaser-Harz-Verhältnisse eines Verbundstoffes getestet. Die gemessenen Einsetzspannungen waren für die vier Verhältnisse nahezu gleich. Zusätzlich wurden drei Varianten der Vergussmethode untersucht. Bei einer mechanischen Behandlung des Harzes vor dem Imprägnieren der Glasfaser konnte die Einsetzspannung erhöht werden.

Die vorgeschlagene Methode für die Untersuchung von Teilentladungen an Verbundstoffen stellt eine günstige und praktische Alternative für die Entwicklung neuer Verbundstoffe unter reproduzierbaren Bedingungen.

Literatur

- [1] Y. Zhang, Dynamic Reactive Power Configuration of High Penetration Renewable Energy Grid Based on Transient Stability Probability Assesment, IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2020.
- [2] A. Küchler, Hochspannungstechnik: Grundlagen -Technologie – Anwendungen, 3. Auflage, Springer-Verlag, 2017.
- [3] J. Torres, M. Aganbegovic, P. Werle, Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von glasfaserverstärktem Harz zur Anwendung in Trockentransformatoren, VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, 2020.
- [4] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Handbuch Faserverbundkunststoffe/ Composite:Grundlagen und Verarbeitung, 4. Auflage, 2017.
- [5] IEC 60270 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, Norm, 2015
- [6] K. Homeier „Investigation on Gassing Behavior of Various Insulation Liquids in Power Transformers”, IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), 2019
- [7] M. Köppen, Der Effekt der Silanisierung auf die Haftung zwischen Aufbaumaterialien und verschiedenen faserverstärkten Kompositwurzekanalstiften, Dissertation, Charité – Universitätsmedizin Berlin, 2011.