

# Wasserdampfdurchlässigkeit von Komposit-Hohlisolatoren

Vom Fachbereich 18  
-Elektrotechnik und Informationstechnik-  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

**Dissertation**

**Dipl.-Ing. Nicole Möhring**  
geb. am 28.06.1976 in Wolfsburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen

Koreferent Prof. Dr.-Ing. M. Kurrat

Tag der Einreichung: 13. Oktober 2009

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Februar 2010

D 17

Darmstädter Dissertationen



Berichte aus der Energietechnik

**Nicole Möhring**

**Wasserdampfdurchlässigkeit  
von Komposit-Hohlisolatoren**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9142-6

ISSN 0945-0726

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Das IGF-Vorhaben 14121 N der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen, der die Idee zu diesem Projekt hatte und es in jeder Hinsicht immer unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Kurrat danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats verbunden mit der gewissenhaften Durchsicht der Arbeit sowie für seine Anmerkungen. Dass auch auf diese Art die Verbindung zu meiner Ursprungsuniversität und meinem »alten Institut« an der Technischen Universität Braunschweig bestehen bleibt, freut mich besonders.

Des Weiteren danke ich der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projektes. Mein Dank gilt auch allen Mitgliedern des Arbeitskreises des AIF-Forschungsprojektes 14121 N für die vielen hilfreichen Diskussionen, die bereitgestellten Informationen und die aktive Begleitung dieses Forschungsprojektes. In diesem Zusammenhang danke ich besonders Herrn Haupt von der MPA Darmstadt. Die von ihm durchgeführten Versuche zur mechanischen Belastbarkeit von Komposit-Hohlisolatoren waren ein wichtiger Bestandteil diese Projektes.

Den Werkstattmitarbeitern des Fachgebiets Hochspannungstechnik danke ich für ihre Unterstützung, die erfolgreiche Umsetzung meiner Ideen und das konstruktive Engagement. Insbesondere danke ich allen Beteiligten für die Vorsicht beim Bestücken der Versuchskammern.

Ebenso danke ich allen Studenten, die in Form von Studien- oder Diplomarbeiten oder auch durch die umfangreichen HiWi-Tätigkeiten an diesem Projekt beteiligt waren und zu seinem Gelingen beigetragen haben.

Meinen Kollegen, insbesondere unserer »ersten Generation«, möchte ich für die gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am Fachgebiet danken. Viele gute Ideen sind bei unseren gemeinsamen Gesprächen entstanden und einige Dinge wären ohne die Unterstützung durch Kollegen nur schwer möglich gewesen.

Ich danke allen Verwandten, Freunden und Bekannten, die sich die Mühe gemacht haben, mein Manuskript vorab zu lesen und danke ihnen für ihre vielen fachlichen oder manchmal auch weniger fachlichen Rückmeldungen.

Ganz besonders möchte ich meiner Familie danken.

Meinen Eltern danke ich für Ihre ständige Unterstützung und auch dafür, dass sie mir mein Studium und damit auch meine Promotion ermöglicht haben.

Auch meinem Bruder danke ich für seine Unterstützung und die guten fachlichen Kommentare.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mann Arne, für seine Unterstützung, sein Verständnis, seine Bereitschaft, sich mit diesem ihm fremden Thema zu beschäftigen und den Rückhalt, den er mir beim Entstehen dieser Arbeit gegeben hat.

Schriesheim, im Februar 2010

Nicole Möhring

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Übersicht</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Forschungsziel . . . . .	1
1.2 Einordnung der Arbeit in das Gesamtforschungsprojekt . . . . .	3
1.3 Struktur der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Komponenten und Materialien in Verbundisolatoren</b>	<b>7</b>
2.1 Komposit-Hohlisolatoren . . . . .	7
2.2 Glasfaserverstärkter Kunststoff . . . . .	8
2.2.1 Glasfasern . . . . .	8
2.2.2 Epoxidharz . . . . .	11
2.2.2.1 Glasübergang . . . . .	12
2.2.3 GFK als Isolatorenmaterial . . . . .	15
2.2.3.1 GFK-Stäbe für Komposit-Langstabisolatoren . . . . .	15
2.2.3.2 GFK-Rohre für Komposit-Hohlisolatoren . . . . .	16
2.3 Silikonelastomer . . . . .	18
2.4 O-Ringe . . . . .	20

<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen zur Wasserdampfdurchlässigkeit</b>	<b>23</b>
3.1	Wasserdampfdurchlässigkeit des Gesamtsystems . . . . .	23
3.2	Permeation . . . . .	25
3.3	Diffusion . . . . .	26
3.4	Die Fickschen Gesetze . . . . .	28
3.4.1	Der Fall einer Platte . . . . .	30
3.4.2	Der Fall eines Zylinders . . . . .	31
3.4.3	Löslichkeit . . . . .	32
3.4.4	Permeation von Dämpfen . . . . .	33
3.5	Nicht-Ficksche Diffusion . . . . .	33
3.6	Temperaturabhängigkeit der Permeation . . . . .	35
3.7	Diffusionswiderstandszahl . . . . .	37
3.8	Permeations- und Diffusionsraten . . . . .	38
3.8.1	Permeationsraten aus Komplettmessung . . . . .	39
3.9	Literaturwerte zur Diffusion und Permeation . . . . .	39
3.9.1	Bisherige Messungen am Gesamtsystem Komposit-Hohlisolator	39
3.9.2	Eine Diffusionswiderstandszahl aus der Bauphysik . . . . .	40
3.9.3	Weitere Literaturwerte und Erkenntnisse . . . . .	41
3.9.4	Diskussion der Literaturwerte . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Versuchseinrichtungen und -verfahren</b>	<b>45</b>
4.1	Wasser . . . . .	45
4.2	Stablagerungseinheit . . . . .	46
4.3	Rohrlagerungseinheit . . . . .	48
4.4	Versuchskammern . . . . .	49
4.4.1	Gesamtaufbau . . . . .	49
4.4.2	Die Messung der eingedrungenen Wassermenge . . . . .	51
4.4.2.1	Die Gewichtsmessung des eingebrachten Trockenmittels . . . . .	53
4.4.3	Messtechnische Erfassung . . . . .	55
4.4.3.1	Die Erfassung der Gewichtswerte . . . . .	55
4.4.4	Die Erfassung der einzelnen Strecken, über die Wasser eindringt	57
4.5	Mechanische Belastung . . . . .	58

4.5.1	Untersuchung der Helium-Leckrate . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Untersuchungen an Materialproben</b>	<b>65</b>
5.1	Untersuchungen an Stäben . . . . .	65
5.2	Untersuchungen an Rohrabschnitten . . . . .	67
5.3	Das Dichtsistem des Deckels . . . . .	72
5.4	Die Kabeldurchführung . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Untersuchungen an Hohlisolatoren</b>	<b>79</b>
6.1	Randbedingungen . . . . .	79
6.1.1	Klima . . . . .	79
6.1.2	Prüfkörper . . . . .	80
6.1.3	Versuchsdauer . . . . .	81
6.2	Die erste Charge neuwertiger Prüfkörper . . . . .	82
6.2.1	Vorkommnisse während der Prüfung . . . . .	82
6.2.2	Veränderungen als Folge der Prüfung der ersten Charge . . . . .	86
6.2.3	Erläuterungen zur Auswertung der Messwerte . . . . .	87
6.2.4	Ergebnisse der ersten Charge . . . . .	88
6.3	Die zweite Charge neuwertiger Prüfkörper . . . . .	90
6.3.1	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	91
6.3.1.1	Möglicher Einfluss der Kammertemperatur . . . . .	93
6.3.1.2	Möglicher Einfluss der Kammerfeuchte . . . . .	95
6.3.1.3	Beachtung der Dichtigkeitmessungen der Einzelaufbauten . . . . .	96
6.4	Mechanisch vorbelastete Prüfkörper . . . . .	99
6.5	Prüfkörper mit vereinfachtem Versuchsverfahren . . . . .	102
6.5.1	Vereinfachung des Versuchsverfahrens . . . . .	102
6.5.2	Messergebnisse . . . . .	105
6.6	Zusammenfassung der Messergebnisse . . . . .	106
<b>7</b>	<b>Folgerungen aus den Untersuchungen</b>	<b>109</b>
7.1	Die Beschleunigung . . . . .	109
7.1.1	An dickwandigen Komposit-Hohlisolatoren . . . . .	110

7.1.2	An dünnwandigen Komposit-Hohlisolatoren . . . . .	112
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>115</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>119</b>
	<b>Anhang</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Bilder der Versuchsaufbauten</b>	<b>129</b>
A.1	Die Klimakammern . . . . .	129
A.2	Die Probekörper . . . . .	131
A.3	Der servohydraulische Prüfstand . . . . .	132
<b>B</b>	<b>Veröffentlichungen</b>	<b>133</b>
<b>C</b>	<b>Studentische Arbeiten</b>	<b>135</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Der schematische Aufbau eines Komposit Hohlisolators im Querschnitt.	2
2.1	Das Düsenziehverfahren zur Herstellung von Endlostextilglasfasern [ZOR 03].	9
2.2	Die Epoxidgruppe.	11
2.3	Darstellung der thermischen Relaxation bei einer stufenförmigen Abkühlung im Bereich des Glasübergangs [USE 99].	14
2.4	Das Strangziehverfahren zur Herstellung von GFK-Stäben.	15
2.5	Die Definition der Wickelwinkel [SCH 75].	16
2.6	Das Wickelverfahren zur Herstellung von GFK-Rohren [SCH 75].	17
2.7	Die Siloxaneinheit mit dem gebräuchlichsten Rest, der Methylgruppe.	19
2.8	Dichtsystem des Deckels mit O-Ring.	21
3.1	Die möglichen Eindringstrecken für Feuchtigkeit in einen Komposit-Hohlisolator.	24
3.2	Die Permeation und ihre Zwischenschritte am Beispiel einer Wand.	25
3.3	Verschiedene Verläufe der Diffusion anhand der Kurven der normierten Massenaufnahme [NEO 96].	35
4.1	Eine beheizbare Lagerungseinheit für GFK-Stäbe.	47
4.2	Eine beheizbare Lagerungseinheit für GFK-Rohrabschnitte.	48
4.3	Aufbau der Versuchskammern.	50
4.4	Aufbau des Gewichtsmess- und Entlastungssystems.	53
4.5	Durchführung für Messkabel und Spannungsversorgung in das Innere des Komposit-Hohlisolators.	54
4.6	Ablaufdiagramm der elektronischen Messdatenerfassung.	56

4.7	Beziehung zwischen den Biegelasten nach [IEC 61462]. . . . .	60
4.8	Komposit-Hohlisolator mit servohydraulischer Prüfmaschine. . . . .	62
5.1	Die relative Gewichtszunahme der reinen GFK-Stäbe als Durchschnittswerte aller gemessenen Stäbe. . . . .	66
5.2	Die relative Gewichtszunahme von GFK-Rohrabschnitten bei 75 °C. . . . .	69
5.3	Die relative Gewichtszunahme von GFK-Rohrabschnitten bei 75 °C und 20 °C im Vergleich. . . . .	70
5.4	Eine verschweißte, mit Trockenmittelbeuteln befüllte Armatur. . . . .	73
5.5	Eine Kabeldurchführung im Einzelmessaufbau und mehrere im Exsikator zur Ofenlagerung. . . . .	76
5.6	Der Gewichtsanstieg der Aluminiumröhren mit Durchführungen. . . . .	77
6.1	Die unsilikonisierten Prüfkörper. . . . .	80
6.2	Optische Eindrücke nach der Entnahme der Prüfkörper von Charge 1 aus Kammer 1. . . . .	82
6.3	Oberflächenuntersuchung an Prüfkörpern der Charge 1 mit Aceton. . . . .	84
6.4	Diagramm der Messergebnisse eines kurzen dünnwandigen Prüfkörpers der ersten Charge. . . . .	87
6.5	Diagramm der Messergebnisse der Prüflinge 3 und 5 aus der zweiten Charge. . . . .	90
6.6	Auswertung der Messergebnisse einer Kammer der zweiten Charge neuwertiger Prüfkörper. . . . .	92
6.7	Alle Messwerte nach Prüfkörper und mechanischer Belastung getrennt. . . . .	107
A.1	Der Blick von oben in eine Versuchskammer mit Prüflingen. . . . .	129
A.2	Die Heizwendel in einer leeren Versuchskammer. . . . .	129
A.3	Die Heizwendel. . . . .	130
A.4	Mehrere Prüflinge auf dem Standtisch im Reservoir beim Darüberheben der Kammer. . . . .	130
A.5	Unsilikonisierter langer Komposit-Hohlisolator. . . . .	131

A.6	Zwei kurze gestapelte Komposit-Hohlisolatoren, einer silikonisiert, einer unsilikonisiert. . . . .	131
A.7	Komposit-Hohlisolator mit servohydraulischer Prüfmaschine. . . . .	132
A.8	Integrale Heliumlecksuche. . . . .	132



# Tabellenverzeichnis

3.1	Unterscheidungen der Diffusionsarten nach Formel 3.20. . . . .	34
3.2	Vergleich von Diffusionskoeffizienten aus der Literatur. . . . .	43
3.3	Vergleich von Werten bezüglich der eindringenden Feuchtigkeitsmenge aus der Literatur. . . . .	43
4.1	Werte für die mechanische Belastung der Komposit-Hohlisolatoren.	62
5.1	Rohrarten der untersuchten Abschnitte. . . . .	68
5.2	Durchlässigkeit der O-Ring-Dichtung zwischen Armatur und Deckel.	73
5.3	Durchlässigkeit der Messkabel-Durchführungen. . . . .	78
6.1	Ergebnisse der ersten Charge von Prüfkörpern. . . . .	89
6.2	Ergebnisse der ersten Charge von Prüfkörpern in Matrixform. . . . .	89
6.3	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern. . . . .	93
6.4	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform. . . . .	93
6.5	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform bezogen auf die Prüfkammern. . . . .	94
6.6	Ergebnisse der zweiten Charge von Prüfkörpern in Matrixform bezogen auf die Prüfkammern, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung. . . . .	96
6.7	Ergebnisse der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper. . . . .	99
6.8	Ergebnisse der mechanisch vorbelasteten Prüfkörper in Matrixform bezogen auf die mechanische Vorbelastung und die Rohrlänge, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung. . . . .	100

6.9	Ergebnisse aller dickwandigen Prüfkörper in Matrixform bezogen auf die mechanische Vorbelastung und die Rohrlänge, abzüglich der Wassermengen durch Deckel und Durchführung. . . . .	101
6.10	Ergebnisse der Prüfkörper nach vereinfachtem Verfahren. . . . .	105
7.1	Abschätzung für die durch das GFK in einen dickwandigen Komposit-Hohlisolator eindringende Wassermenge in der »worst-case-Betrachtung« bei verschiedenen Umgebungstemperaturen. . . . .	113
7.2	Abschätzung für die durch das GFK in einen dünnwandigen Komposit-Hohlisolator eindringende Wassermenge in der »worst-case-Betrachtung« bei verschiedenen Umgebungstemperaturen. . . . .	114

# Übersicht

In der vorliegenden Arbeit wird über die Wasserdampfdichtigkeit von Komposit-Hohlisolatoren berichtet. In der Hochspannungstechnik gewinnen diese aufgrund ihrer vielen Vorteile gegenüber Keramik-Hohlisolatoren immer größeren Einfluss. Da die eingesetzten Materialien jedoch organisch und somit nicht wasserdampfdiffusionsdicht sind, stellt sich die Frage, ob die eindringenden Wassermengen im Laufe der Lebensdauer der Isolatoren eine Gefahr darstellen.

Die hier geschilderten Untersuchungen sollen die jahrzehntelangen positiven Erfahrungen aus der Praxis auch wissenschaftlich belegen. Dafür werden Untersuchungen am Gesamtsystem von Komposit-Hohlisolatoren, wie sie in industriellen Anwendungen üblich sind, vorgenommen. Diese müssen auf Grund der langen Lebensdauer dieser Geräte zeitraffend vorgenommen werden. Hierfür wird eine geeignete Versuchstechnik entwickelt, verbessert und bewertet.

Da aus Gründen der Kostenersparnis auch vielfach über eine Verringerung der Wanddicke von Komposit-Hohlisolatoren nachgedacht wird, wird auch dieser Gesichtspunkt untersucht. Es zeigt sich jedoch keine signifikante Abhängigkeit der eindringenden Wassermenge von der untersuchten Wanddicke.

Des Weiteren sind Komposit-Hohlisolatoren während ihrer Lebensdauer vielfältigen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Deshalb wird auch deren Auswirkung auf die Dichtigkeit untersucht. Hierzu werden Hohlisolatoren erst mechanisch vorgeschädigt und danach auf Ihre Dichtigkeit hin untersucht. Auch dies bewirkt keine signifikanten Änderungen.

Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse zur Wasserdampfdichtigkeit mit Hilfe mathematischer Zusammenhänge auf die Lebensdauer von Komposit-Hohlisolatoren ausgedehnt. Hierbei zeigt sich, dass die Feuchtemengen, die in die untersuchten Hohlisolatoren eindringen, bei einer üblichen Ausstattung mit Trockenmittel, gut beherrschbar sind und die Lebensdauer nicht verringern.

# **Abstract**

## **Water vapor permeability of hollow composite insulators**

This work reports on the water vapor impermeability of composite hollow insulators. These are gaining more and more influence because of their advantages over porcelain insulators. However, because the used materials are organic and in result not water vapor proof, the question arises, if the permeating amount of water might be a danger over the course of a lifetime of a composite hollow insulator.

The described experimental series are to prove the positive practical experience of decades scientifically. Therefore, complete systems of the composite hollow insulator will be examined, as they are commonly used in the industry. This has to be done in accelerated tests due to the long durability of this hardware. For this the adequate experimental technology is developed, improved and evaluated.

Due to cost optimization the reduction of the wall thickness of composite hollow insulators is often considered. This is also tested, however it can be shown that there is no significant dependency between the amount of permeating water and the wall thickness.

Furthermore, composite hollow insulators are exposed to varied mechanical loads. Therefor the effect of this on the impermeability is also tested, stressing the hollow insulators mechanically befor testing them again for permeability. This also does not show significant variation.

In conclusion, the gained results for water vapor impermeability are expanded to the entire lifetime of composite hollow insulators with mathematical correlations. Hereby it is shown, that the amount of water penetrating the researched composite hollow insulators can easily be controlled by the common amount of drying agent and does not reduce their durability.