

**Entwicklungsmöglichkeiten der Normung  
für die Querwasserdichtheit von Unterwasserkabeln,  
abgeleitet von experimentellen Messungen**

**Habilitationsschrift**

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur habitatus (Dr.-Ing. habil.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
der Universität Rostock

vorgelegt von

Dr. oec. Dipl.-Ing. Uwe Rudorf, geb. am 26.01.1956 in Berlin

aus Ahrensfelde

Rostock, 24.08.2008



Rostocker Meerestechnische Reihe  
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen

Band 6/2010

**Uwe Rudorf**

**Entwicklungsmöglichkeiten der Normung für die  
Querwasserdichtheit von Unterwasserkabeln,  
abgeleitet von experimentellen Messungen**

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.: Rostock, Univ., Habil.-Schr., 2009

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 978-3-8322-8923-2

ISSN 1868-7636

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)

# Gutachter

- Prof. Dr.-Ing. Mathias Paschen  
Universität Rostock  
Lehrstuhl für Meerestechnik
- Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharf  
Universität Rostock  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau
- Prof. Dr.-Ing. Günter Ackermann  
Technische Universität Hamburg-Harburg  
Institut für Elektrische Energiesysteme und Automation

**Verteidigungstermin: 17.11.2009**

## **Eidesstattliche Versicherung**

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder veröffentlicht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Rostock, 24.08.2008

Dr. oec. Dipl.-Ing. Uwe Rudolf

# Danksagung

Die vorliegende Habilitationsschrift ist Teil eines langfristigen Forschungsvorhabens, das die Entwicklung von Methoden zur Vorhersage des Langfristverhaltens von Isolations- und Mantelwerkstoffen für Unterwasserkabel, basierend auf Zeitrafferprüfverfahren zum Ziel hat. Diese Verfahren sollten zukünftig auch normen-seitig untersetzt sein.

Das Forschungsvorhaben wurde durch die LEONI AG über einen Zeitraum von 4 Jahren finanziell sowie durch die Bereitstellung von Materialproben und Kabel-mustern unterstützt. Dafür möchte ich mich bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Paschen danke ich für die Übernahme des Forschungsauf-trages sowie für hilfreiche Gespräche im Rahmen der Fertigstellung der Habilitati-onsschrift sowie die Erstellung des Gutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ackermann danke ich für die im Rahmen der Arbeit gegebene inhaltlichen Hinweise und die Erstellung des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Scharr danke ich für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Besonders möchte ich mich bei Frau Dr.-Ing. C. Koldrack bedanken, die im Rah-men der Bearbeitung des Forschungsvorhabens an der Universität Rostock eine Vielzahl von Messungen vorgenommen hat sowie diese Messungen mathematisch theoretisch bearbeitet und dargestellt hat.

Bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Meerestechnik sowie Herrn Dr. Niedzwiedz vom Lehrstuhl für Meeresbiologie für die Unterstützung, die mir während der sehr angenehmen Zeit der Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsvorhabens zuteil geworden ist.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie, vor allem bei Inge, für die Unterstützung in den Jahren der Erstellung dieser Arbeit sowie bei Martin für die mehrmalige Durchsicht des Textes.

Dr. oec. Dipl.-Ing. Uwe Rudorf

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation zur Bearbeitung des Themas .....	1
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	3
1.3 Eigene Arbeiten .....	16
<b>2 Belastungen und Beanspruchungen an Unterwasserkabeln .....</b>	<b>21</b>
2.1 Biologische Belastungen .....	25
2.2 Chemische Belastungen und Beanspruchungen .....	27
2.3 Physikalische Belastungen und Beanspruchungen .....	31
2.3.1 Optische Belastungen .....	31
2.3.2 Mechanische Belastungen und Beanspruchungen.....	32
2.3.3 Elektrische und elektromagnetische Belastungen.....	38
2.3.4 Thermische Belastungen.....	39
<b>3 Bestandteile eines Unterwasserkabels und ihre Wasseranfälligkeit.....</b>	<b>42</b>
3.1 Bestandteile eines Unterwasserkabels .....	42
3.1.1 Metallische Leiter .....	43
3.1.2 Aderisolation .....	44
3.1.3 Lichtwellenleiter.....	45
3.1.4 Elektrischer Schirm .....	45
3.1.5 Längswasserdichtende Füllungen.....	46
3.1.6 Kabelmantel.....	46
3.1.7 Zugentlastungselemente .....	46
3.1.8 Behänderungen .....	47
3.1.9 Füllelemente .....	47

3.1.10	Metallische Bandierungen und Armierungen .....	48
3.2	Einwirkungsmöglichkeiten des Wassers .....	48
3.2.1	Wassereinwirkung quer zur Kabelachse (Querwasserdichtheit) ....	49
3.2.2	Wassereinwirkung in Kabellängsrichtung (Längswasserdichtheit)	53
3.2.3	Lebensdauerbeeinflussung durch die Wassereinwirkung .....	54
3.3	Die Bestimmung des Grades der Querwasserdichtheit über den Isolationswiderstand .....	55
3.3.1	Bedeutung in der Kabeltechnik.....	55
3.3.2	Definition des Isolationswiderstands .....	56
3.3.3	Einflussfaktoren auf den Isolationswiderstand .....	60
3.3.4	Herleitung des Durchgangswiderstands für extrudierte Kabelmaterialien.....	62
3.3.5	Messung an Kabeln.....	65
3.3.6	Wirkunterschiede von Meer- und Leitungswasser bei Querwasser- einwirkung .....	68
<b>4</b>	<b>Stand der internationalen Normung im Bereich Unterwasserkabel .....</b>	<b>70</b>
4.1	Ziviler Normungsstand .....	71
4.1.1	Messung des Isolationswiderstands .....	71
4.1.2	Wasserdichtheitsprüfungen.....	74
4.1.3	Weitere nationale Standards anderer Länder .....	76
4.1.4	Internationale IEC-Normung für Schiffskabel.....	77
4.2	Militärische Normung.....	78
4.2.1	Deutsche VG-Normung .....	78
4.2.2	Britische militärische Normung.....	84
4.2.3	Amerikanische MIL-Normung .....	90
4.3	Zusammenfassung .....	93
<b>5</b>	<b>Ergebnisse von Messungen an Kabeln und Kabelmaterialien .....</b>	<b>97</b>
5.1	Messergebnisse zur Querwasserdichtheit .....	97
5.1.1	Messungen an Kabeln ohne Druckbeaufschlagung .....	97
5.1.2	Ergebnisse zum Temperaturverhalten der Messungen .....	109

5.1.3	Diskussion und Schlussfolgerungen aus den Messungen ohne Druckbeaufschlagung .....	110
5.1.4	Querwasserdichtheit bei Druckbeaufschlagung.....	113
5.1.5	Diskussion und Schlussfolgerungen aus dem Verhalten von Kabeln bei Druckbeaufschlagung .....	116
5.2	Längswasserdichtheit bei Unterwasserkabeln .....	117
5.2.1	Wirkmechanismus und Abdichtprinzipien der Längswasserabdichtung .....	118
5.2.2	Messmethoden und vorhandene Messergebnisse .....	125
5.2.3	Diskussion und Schlussfolgerungen .....	126
<b>6</b>	<b>Weiterentwicklung der bestehenden Normung.....</b>	<b>129</b>
6.1	Die Begriffe Gebrauchsdauer und Lebensdauer .....	130
6.2	Prüfkonditionen und Prüfungskriterien .....	132
6.3	Vorschläge zur Ergänzung und Änderung der bestehenden Normung zur Querwasserdichtheit .....	136
6.4	Vorschläge zur Ergänzung und Änderung der bestehenden Normung zur Längswasserdichtheit .....	142
6.5	Verkürzung der Dauer der Prüfung auf Querwasserdichtheit.....	145
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>149</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>153</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Beispiel für den komplexen Aufbau eines fest verlegten Unterseekabels aus [43].....	5
Abbildung 1.2	Typische Bestandteile eines hybriden Werkstoffes.....	6
Abbildung 1.3	Prinzipdarstellung des Aufbaus eines dreiadrigen, geschirmten Kupferleiterkabels .....	7
Abbildung 1.4	Schleppkabel für ein Minendektionssystem im Einsatz .....	13
Abbildung 1.5	Beispiel eines Verbindungskabels von einem Langsystem zu einem Pipelineinspektionstraktor.....	13
Abbildung 2.1	Erwünschte Reduzierung des Wirkniveaus von der Primärbelastung bis zur Sekundärbeanspruchung .....	22
Abbildung 2.2	Prinzipdarstellung eines ROV-Kabels im Einsatz.....	34
Abbildung 2.3	Prinzipdarstellung eines Zugkabels im Einsatz.....	36
Abbildung 3.1	Aufbauelemente eines dreiadrigen, geschirmten Kabels.....	42
Abbildung 3.2	Elemente und Lage der Aderisolation, dargestellt an einem britischen Marinekabel .....	44
Abbildung 3.3	Kabelarmierung aus einem außenliegenden Stahldrahtgeflecht .....	48
Abbildung 3.4	Prinzipdarstellung von Längs- und Querwasserdichtheit an einem Kabel.....	49
Abbildung 3.5	Diffusionsrichtungen des Wassers in den Kabelmantel bei Nutzung von unterschiedlichen Prüfkörpern .....	51
Abbildung 3.6	Kabelmantel zur Untersuchung des Diffusionsverhaltens.....	51
Abbildung 3.7	Beispiele der hantelförmigen Prüfkörper.....	52

Abbildung 3.8	Prinzipdarstellung des idealen Widerstandswegs in der Isolation eines elektrischen Leiters.....	57
Abbildung 3.9	Darstellung des Isolationswiderstands als Parallelschaltung von elektrischen Widerständen.....	57
Abbildung 3.10	Diskontinuitäten der Kabelmanteloberfläche nach der Extrusion am Beispiel von vernetztem Thermoplast.....	59
Abbildung 3.11	Beispiel eines hybriden Isolationswerkstoffes als Polymerblend mit aktiven Füllwerkstoffen.....	60
Abbildung 3.12	Prinzipdarstellung für die Messung des Isolationswiderstands .. .....	66
Abbildung 3.13	Prinzipdarstellung zur Messung des Isolationswiderstands eines Kabels bei Wasserlagerung .....	68
Abbildung 4.1	Prinzipau der Prüfanordnung nach DIN EN 60794-1-2 zur Prüfung vufbaon Lichtwellenleiterkabeln auf Längswasserdichtheit .....	75
Abbildung 4.2	Zeitverlauf der Druckbeaufschlagung von Kabeln bei der Prüfung auf Querwasserdichtheit .....	76
Abbildung 5.1	Veränderung des Isolationswiderstands zwischen zwei Adern nach einer Stunde der Einlagerung in Leitungswasser .....	99
Abbildung 5.2	Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Isolationswiderstands des Mantelmaterials während der Messungen zwischen dem Wasser und dem Schirm in Leitungswasser (begrenzt auf 63 Tage).....	100
Abbildung 5.3	Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Isolationswiderstands zwischen zwei benachbarten Adern in Leitungswasser (begrenzt auf 63 Tage).....	100

Abbildung 5.4	Darstellung des Verhaltens des Isolationswiderstands der Aderisolationenmaterialien nach dem Rücktrocknen aus der Leitungswasserlagerung im Vergleich zu den trockenen Ausgangswerten.....	101
Abbildung 5.5	Foto des Messaufbaus mit den in Containern gelagerten Kabeln.....	103
Abbildung 5.6	Ausgewählte Messergebnisse des Isolationswiderstands der Mantelmaterialien bei Lagerung in künstlichem Meerwasser .....	104
Abbildung 5.7	Messergebnisse des Isolationswiderstands der Aderisolationenmaterialien, bei Lagerung in künstlichem Meerwasser .....	105
Abbildung 5.8	Zeitliche Messkurve des Isolationswiderstands des Mantels beim Kabel LMGSGO 3x1,5.....	107
Abbildung 5.9	Zeitliche Messkurve des Isolationswiderstands des Mantels beim Kabel MPRXCX 3x1,5.....	107
Abbildung 5.10	Zeitliche Messkurve des Isolationswiderstands zwischen zwei benachbarten Adern des Kabels LMGSGO 3x1,5.....	108
Abbildung 5.11	Zeitliche Messkurve des Isolationswiderstands zwischen zwei benachbarten Adern des Kabels MPRXCX 3x1,5.....	108
Abbildung 5.12	Messwert und mögliche Zusammenhänge für das Verhalten des Isolationswiderstands bei einem Kabel aus EVA-Mantel und HEPR-Isolation, das einer Druckbeaufschlagung unterliegt.....	114
Abbildung 5.13	Verlauf des gemessenen Isolationswiderstands bei einem Kabel mit Polyurethanmantel [61] über den Zeitraum von 73 Tagen .....	115
Abbildung 5.14	Verlauf des gemessenen Isolationswiderstands aus Abbildung 5.13 innerhalb des ersten Tages.....	115

Abbildung 5.15	Darstellung der Räume, die in einem 3-adrigen, geschirmten Kupferkabel der Längswasserabdichtung unterliegen müssen ...	118
Abbildung 5.16	Zweiadriges Kabel mit festem, längswasserabdichtendem Material gefüllt .....	119
Abbildung 5.17	Kabelkomponente mit selbsthärtendem Gel .....	121
Abbildung 5.18	Dauerflexibles Tiefseekabel, gefüllt mit Flüssiggel .....	122
Abbildung 5.19	3-adriges, geschirmtes Kabel gefüllt mit trockenen, wasserabsorbierenden Bandierungen und Fäden.....	123
Abbildung 5.20	Prinzipieller Geräteaufbau zur Prüfung der Längswasserdichtheit von Kabeln.....	125
Abbildung 6.1	Vorschlag zum grundsätzlichen Aufbau von Normen für Unterwasserkabel.....	135

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1	Minimal zulässige Werte des Isolationswiderstands in der Norm IEC 60092-351 für verschiedene Werkstoffe.....	77
Tabelle 4.2	Normative Festlegungen in der VG 95218-2 [70] zu Isolationswiderstandsmessungen an Kabeln .....	80
Tabelle 4.3	Normative Festlegungen in der VG 95218-2 [70] zur Wasserdichtheit von Kabeln.....	82
Tabelle 4.4	Normative Festlegung in der VG 95218-29 [80] zur Prüfung auf Meerwasserbeständigkeit.....	84
Tabelle 4.5	Vorgaben für den Isolationswiderstand in der MIL-Normung (aus [54]).....	92
Tabelle 4.6	Maximal zulässiges Wasseraustrittsvolumen bei längswasserdichten Kabeln gemäß MIL-DTL-24640B und MIL-DTL-24643B .....	93
Tabelle 4.7	Vergleich der Festlegungen in verschiedenen Normungskreisen zu Unterwasserkabeln .....	95
Tabelle 5.1	Aufstellung der bei den Prüflingen eingesetzten Isolations- und Mantelmaterialien .....	98
Tabelle 5.2	Verwendete Prüflinge für die Isolationswiderstandsmessung in künstlichem Meerwasser .....	104
Tabelle 5.3	Abweichungen der einzelnen Messwerte für den Isolationswiderstand zwischen zwei Adern für das Kabel LMGSGO* 3x1,5 bei Lagerung in Normseewasser bei 60 °C.....	106

Tabelle 6.1	Formulierungsvorschläge zur Ergänzung der Norm VG 95218 Teil 2 zur Querswasserdichtheitsprüfung.....	140
Tabelle 6.2	Formulierungsvorschläge zur Ergänzung der Norm VG 95218 Teil 29 zur Querswasserdichtheitsprüfung.....	141
Tabelle 6.3	Formulierungsvorschläge zur Ergänzung der Norm VG 95218 Teil 2 zur Längswasserdichtheitsprüfung .....	144
Tabelle 6.4	Formulierungsvorschläge zur Ergänzung der Norm VG 95218 Teil 29 zur Längswasserdichtheitsprüfung .....	145
Tabelle 6.5	Mögliche Idealtabelle zur Bestimmung von Verlängerungs- faktoren für die Gebrauchsdauer bei zeitverkürzten Prüfungen unter Erhöhung der Prüftemperatur .....	146

## Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society for Testing and Materials (Gleichnamige US-amerikanische Norm u.a. zu elektrotechnischen Sachverhalten)
AWG	American Wire Gage (Durchmesser-Maß in der amerikanischen Drahtlehre)
Def-St	Defence Standard (Britischer Militärstandard, Nachfolgezeichnung für NES)
DIN	Deutsche Industrie Norm
EN	Europäische Norm
EPDM	Ethylenpropylen-Dien-Kautschuk
EPR	Ethylen-Propylen Rubber
EVA	Ethyl-Venyl-Acetat
HEPR	Hardgrade Ethylen-Propylen Rubber
HF 90	Halogenfreies Material für 90 °C Dauergebrauchstemperatur
HF EPR	Halogenfreier Ethylen-Propylen Rubber
HF HEPR	Halogenfreier Hardgrade Ethylen-Propylen Rubber
HF XLPE	Halogenfreies vernetztes Polyethylen
HF S 95	Halogenfreies Silicon für 95 °C Dauergebrauchstemperatur
IEC	International Electrotechnical Commission (Gleichnamige internationale Norm zu elektrotechnischen Sachverhalten)
LWL	Lichtwellenleiter
MIL	Military Standard (in den USA)
MIL-DTL	Bauartnorm in Rahmen des Military Standard
NES	Naval Engineering Standard (Britischer Militärstandard)
PE	Polyethylen

PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
ROV	Remotely Operated Vehicle
S-EPR	Silanvernetztes Ethylen-Propylen-Rubber-Compound
S 95	Silicon für 95 °C Dauergebrauchstemperatur
TPE-E	Thermoplastisches Elastomer auf Esterbasis
TPE-O	Thermoplastisches Elastomer auf Olefinbasis
TPE-U	Thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis (Polyurethan)
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Gleichnamige deutsche Norm zu elektrotechnischen Sachverhalten)
VG	Verteidigungsgerätenorm (Deutschland)
VPE	Vernetztes Polyethylen (Alternativbezeichnung für XLPE)
XLPE	Vernetztes Polyethylen (Alternativbezeichnung für VPE)