

Fabian Schober

**Elektrische Leitfähigkeit und dielektrisches Verhalten von Pressspan in
HGÜ-Isoliersystemen**

Ilmenauer Beiträge zur elektrischen Energiesystem-, Geräte- und Anlagentechnik (IBEGA)

Herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann

(Fachgebiet Elektrische Energieversorgung) und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger

(Fachgebiet Elektrische Geräte und Anlagen)

an der Technischen Universität Ilmenau.

Band 16

Fabian Schober

**Elektrische Leitfähigkeit und
dielektrisches Verhalten von Pressspan
in HGÜ-Isoliersystemen**



Universitätsverlag Ilmenau
2016

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 10. August 2015
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger
(Technische Universität Ilmenau, Deutschland)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler
(Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt)
3. Gutachter: Dr.-Ing. Wolfgang Exner
(Wicor Holding AG, Rapperswil, Schweiz)
Tag der Verteidigung: 9. Februar 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
www.mv-verlag.de

ISSN 2194-2838 (Druckausgabe)
ISBN 978-3-86360-133-1 (Druckausgabe)
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000076

Titelfotos:

© iStockphoto.com : JLGutierre ; timmy ; 3alexnd ; Elxeneize ; tap10
yuyang/Bigstock.com
M. Streck, FG EGA | F. Nothnagel, FG EGA | D. Westermann, FG EEV

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als externer Doktorand am Fachgebiet „Elektrische Geräte und Anlagen“ der Technischen Universität Ilmenau bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger in Kooperation mit dem Institut für Energie- und Hochspannungstechnik der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt bei Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler und dem Schweizer Unternehmen Weidmann Electrical Technology AG bei Dr.-Ing. Wolfgang Exner.

Zuallererst danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Berger für sein Interesse an dieser Arbeit, für seine Betreuung sowie für die produktiven gemeinsamen Diskussionen während der Doktorandenkolloquien und der regelmäßigen Projektbesprechungen.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler für die tatkräftige Unterstützung während des gesamten Projekts und für seine wertvollen fachlichen Ratschläge, welche wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Er stand ununterbrochen hinter mir und meiner Arbeit und hat mich jederzeit fachlich wie persönlich beraten. Danke an dieser Stelle auch den aktiven und den ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für Energie- und Hochspannungstechnik, besonders Herrn Adrian Wolpert sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus H. Zink.

Den Herren Dr.-Ing. Wolfgang Exner, Christoph Krause, Tobias Wolfinger sowie Dr. techn. Stefan Jauer vom Unternehmen Weidmann Electrical Technology AG danke ich für die Unterstützung durch zahlreiche Diskussionen und Anregungen, für ihren hoch geschätzten akademischen Beitrag sowie für die Fertigung der projektspezifischen Prüflinge.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Liebschner von der Hochschule Aalen für den regen fachlichen Gedankenaustausch sowie für die persönlichen Hilfestellungen.

Im Besonderen möchte ich die Leistung sowie die gute Zusammenarbeit mit Herrn Gjergj Lala herausstellen, der mich bei mühsamer und zeitintensiver Laborarbeit tatkräftig unterstützt hat. Außerdem möchte ich Herrn Stephan Harrer meinen besonderen Dank aussprechen, der seine Kenntnisse aus den Bereichen der Physik und der Chemie in dieses Projekt eingebracht und mir bei fachlich neuen Wegen beratend geholfen hat. Ihm gilt mein Dank in noch größerem Maße für seinen persönlichen Einsatz für dieses Projekt und sein Engagement.

Die Verwirklichung meiner akademischen Laufbahn verdanke ich in erster Linie der Unterstützung, dem Verständnis und der Geduld meiner Eltern, meiner Schwester Marina sowie meiner Freundin Christine. Nicht zuletzt haben diese Unterstützung und diese Nachsicht maßgeblich zum Gelingen meines Promotionsvorhabens und zur Verwirklichung meiner beruflichen Ziele beigetragen und mir den nötigen Rückhalt für die Erstellung dieser Arbeit gegeben. Danke!

Kurzfassung

Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) wird als effektive Übertragungsart für große Leistungen immer wichtiger. Die Isoliersysteme von HGÜ-Betriebsmitteln werden sowohl mit Wechsel- als auch mit Gleichspannung beansprucht. Neben den Permittivitäten müssen dann auch die elektrischen Leitfähigkeiten der Materialien berücksichtigt werden. Das Isoliersystem von Konvertertransformatoren enthält ölimprägnierten Pressspan, welcher im Fokus dieser Arbeit liegt.

Bisher bestand ein erhebliches Verständnisdefizit bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit und des dielektrischen Materialverhaltens von Pressspan. Besonders die dominanten Leitungsprozesse sind bislang nicht ausreichend verstanden. In dieser Arbeit werden die Leitungsprozesse Ionen-, Elektronen-Loch- und Protonenleitung am Pressspan diskutiert, sowie die relevanten Polarisationsmechanismen behandelt.

Zur Erforschung des Materialverhaltens von Pressspan unter Gleichspannungsbelastung wurde dieser chemisch und physikalisch analysiert. Pressspan setzt sich mikroskopisch größtenteils aus den Komponenten Zellulose, Hemizellulosen und Lignin zusammen, und besteht makroskopisch aus einer Vielzahl von Fasern und Imprägniervolumina. Es wurden interdisziplinäre Messmethoden wie die UV/Vis-Spektroskopie und die Rasterelektronenmikroskopie angewandt, um relevante Materialinformationen zu erhalten und geometrische Verhältnisse im Pressspan abzuschätzen.

Um einen Bezug zwischen der Struktur und den elektrischen Eigenschaften zu schaffen, wurden elektrische Leitfähigkeiten mittels Sprungantwortmessungen im Zeitbereich erfasst. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einflussgrößen auf die elektrische Leitfähigkeit wurden in die anwendungstechnischen Parameter Wassergehalt, Temperatur und Feldstärke, in den mikroskopischen Parameter Ligningehalt sowie in die makroskopischen Parameter Dichte, Faserorientierung und imprägnierendes Fluid unterteilt.

Der Wassergehalt hat den größten Einfluss auf das Materialverhalten von Pressspan, gefolgt von der Temperatur. Von nachgeordneter Bedeutung sind der Ligningehalt des Pressspans und dessen Dichte, die während der Zellstoff- bzw. Pressspanherstellung verändert werden können, woraus sich geänderte Leitfähigkeiten ergeben. Die Faserorientierung hingegen ist im Transformator kaum beeinflussbar. Ebenso kann sich die Feldstärkebelastung je nach Last und Leitfähigkeitsverhältnis von Öl zu Pressspan ändern.

Die Quantifizierung und das Verständnis der Einflussfaktoren auf das elektrische Verhalten von Pressspan stellen den ersten Schritt da, um in Zukunft Materialien mit definierten Leitfähigkeiten und erwünschtem dielektrischen Verhalten für HGÜ-Betriebsmittel herzustellen.

Abstract

High Voltage Direct Current (HVDC) transmission is becoming more important as an effective way of power transmission. Insulating systems in HVDC applications are stressed both with alternating and direct voltage. Beside the permittivities, electrical conductivities of the materials have to be considered also. The insulation system of converter transformers consists of oil-impregnated pressboard, which is the focus of this thesis.

To date there has been a distinct lack of knowledge regarding the electrical conductivity and the dielectric material behaviour of the pressboard. Especially the dominant conduction processes are not known so far. The conduction processes are ionic conduction, electron-hole conduction and protonic conduction, which are discussed in this thesis in the case of pressboard, and the relevant polarisation mechanisms are treated here.

For the purpose of research in the field regarding material behaviour of pressboard under direct stress, pressboard is analysed from a chemical and physical point of view. Pressboard is microscopically mainly composed of cellulose, hemicelluloses and lignin and macroscopically consists of various fibres and impregnating volumes. Interdisciplinary measuring methods such as UV/Vis spectroscopy and scanning electron microscopy have been used to obtain relevant material information and to give an estimation of the geometric conditions in pressboard.

In order to create links between pressboard structure and electrical properties, step-response measurements in the time domain have been performed and conductivities have been calculated. The parameters, which affect the pressboard conductivity and which are examined in this thesis, have been split into application parameters such as water content, temperature and field strength, and in microscopic parameters such as lignin content as well as in macroscopic parameters such as density, fibre orientation and impregnating fluid.

The water content exhibits the major influence on the material behaviour of pressboard, followed by the temperature. The lignin content of pressboard and pressboard density, which can be modified during pulp and pressboard manufacturing, resulting in revised conductivities, are of secondary importance. It is hard to modify the fibre orientation or to orientate the fibres in the transformer insulating system. Moreover, the field stresses change according to load changes and to changing conductivity ratios of oil and pressboard.

A quantification and an understanding of the parameter influences on the electrical behaviour of pressboard are the first step to develop materials with predefined conductivities and desired dielectric behaviour for HVDC equipment.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Kurzfassung	VI
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Hochspannungsgleichstromübertragung	1
1.1.1 Einführung	1
1.1.2 Prinzip und Problematik	2
1.1.3 HGÜ-Beanspruchung	4
1.2 Werkstoff Pressspan	13
1.2.1 Herstellung von Zellstoff und Pressspan	14
1.2.2 Pressspanzusammensetzung	16
2 Stand der Wissenschaft und Technik	19
2.1 Elektrische Leitfähigkeit	19
2.2 Leitungsprozesse	22
2.2.1 Boltzmannsche Transportgleichung	22
2.2.2 Ionenleitung	24
2.2.3 Elektronenleitung	26
2.2.4 Protonenleitung	29
2.3 Polarisationsmechanismen	30
2.3.1 Einführung	31
2.3.2 Elektronenpolarisation	32
2.3.3 Ionenpolarisation / Gitterpolarisation	33
2.3.4 Orientierungspolarisation	34
2.3.5 Grenzflächenpolarisation	35
2.4 Modellbildung	36
2.4.1 Allgemeines	36
2.4.2 Feldsimulation	37
2.4.3 RC-Netzwerkmodell	38

3	Ziel der Arbeit und methodisches Vorgehen	39
4	Experimentelle Methoden und Auswertungsmethoden	43
4.1	Leitfähigkeitsmessungen	43
4.1.1	Messmethoden der elektrischen Leitfähigkeit	43
4.1.2	Versuchsaufbauten	47
4.1.3	Prozesstechnik	49
4.1.4	Prüflingsübersicht	52
4.2	Modellbildung für Pressspan	54
4.3	Rasterelektronenmikroskopie	57
4.3.1	Prinzip	57
4.3.2	Probenpräparation	58
4.4	UV/Vis-Spektroskopie	59
5	Strukturaufklärung Pressspan	63
6	Elektrische Leitfähigkeit und dielektrisches Verhalten von Pressspan	67
6.1	Parameterübersicht	67
6.2	Leitfähigkeitsmessungen an unimprägniertem Pressspan	69
6.3	Leitfähigkeitsmessungen an luftimprägniertem Pressspan	72
6.4	Einfluss der Faserorientierung	76
6.4.1	Potenzielle Strompfade durch Pressspan	76
6.4.2	Experimentelle Untersuchungen und Interpretation	81
6.5	Variation der Pressspandichte	86
6.5.1	Materialdaten	86
6.5.2	Einfluss der Pressspandichte bei Luftimprägnierung	89
6.5.3	Einfluss der Pressspandichte bei Ölimprägnierung	91
6.6	Einfluss der Ölleitfähigkeit	93
6.7	Einfluss des Ligningehalts im Pressspan	100
6.7.1	Hintergrund und Prüflingstypen	100
6.7.2	Untersuchungen mittels UV/Vis-Spektroskopie	103
6.7.3	Einfluss des Ligningehalts auf die elektrische Leitfähigkeit	106
6.8	Einfluss des Wassergehalts	111
6.9	Einfluss der Temperatur	121
6.9.1	Hintergrund	121
6.9.2	Modellbildung und Simulation des Temperaturverhaltens	125
6.10	Einfluss der Feldstärke	129
7	Zusammenfassung, Folgerungen und Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	147

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

A	Fläche	m	Masse
A_{Rel}	relative Absorption	μ	Beweglichkeit von Ladungsträgern
α_i	verschiedene Koeffizienten	n	Anzahl, Konzentration
\vec{B}	magnetische Flussdichte, magnetisches Feld	\vec{P}	Polarisation, Polarisationsfeld
C	Kapazität	\vec{p}	Dipolmoment
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	p	Druck
\vec{D}	dielektrische Verschiebungsdichte	Q	Ladung
d	Abstand, Dicke	R	elektrischer Widerstand, Rest
\vec{E}	elektrische Feldstärke, elektrisches Feld	R_{Rel}	relative Reflexion
E_A	Aktivierungsenergie	r	Radius, Abstand
E_F	Fermienergie	ρ	spezifischer Widerstand, Dichte
e	Elementarladung	S	Entropie
e^-	Elektron	σ	elektrische Leitfähigkeit
ε_0	Permittivität des Vakuums	σ_{app}	scheinbare Leitfähigkeit, vorzeitig aus Polarisationsströmen nach definierter Zeit t ermittelt
ε_r	relative Permittivität	T	Temperatur
G	Gibbs-Energie	t	Zeit
H	Enthalpie	τ	Transitzeit, Zeitkonstante
h	Plancksches Wirkungsquantum	U	Spannung
\hbar	reduziertes Plancksches Wirkungsquantum	V	Volumen
η	Viskosität	\vec{v}	Geschwindigkeit
I	Strom	w	Wassergehalt
i	Zählindex	\vec{x}	ortsveränderliche Größe, Abstand
\vec{j}	Stromdichte im Strömungsfeld	ω	Kreisfrequenz
k_B	Boltzmann-Konstante	∇	Nabla-Operator
λ	Wellenlänge		

Abkürzungen

4A	Öl Nynas Nytro 4000A	IP	Ionenpolarisation
AC	Wechselstrom (englisch: Alternating Current)	L	Leitungsband
CAD	rechnerunterstütztes Konstruieren (englisch: Computer-Aided Design)	LB	luftimprägnierter Pressspan (Board)
CCD	ladungsgekoppeltes Bauteil (englisch: Charge-Coupled Device)	LCC	netzgeführter Umrichter (englisch: Line Commutated Converter)
CDM	Ladungsdifferenzmethode (englisch: Charge Difference Method)	LDPE	niederdichtes Polyethylen (englisch: Low Density Polyethylen)
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques	LX	Öl Nynas Nytro Lyra X
DC	Gleichstrom (englisch: Direct Current)	NX	Öl Nynas 10X
DP	Polymerisationsgrad (englisch: Degree of Polymerisation)	OB	ölimprägnierter Pressspan (Board)
EP	Elektronenpolarisation	OP	Orientierungspolarisation
FEM	Finite-Elemente-Methode	PDC	Polarisations- / Depolarisationsstrom (englisch: Polarisation / Depolarisation Current)
HDÜ	Hochspannungsdrehstromübertragung	PTFE	Polytetrafluorethylen
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung	REM	Rasterelektronenmikroskop
HVDC	siehe HGÜ (englisch: High Voltage Direct Current)	S4	Öl Shell Diala S4 ZX-I
IEC	International Electrotechnical Commission	SCLC	raumladungsbegrenzter Transport (englisch: Space Charge Limited Current)
ISO	International Organization for Standardization	TE	Teilentladung
		UV	ultraviolettes Licht
		V	Valenzband
		Vis	sichtbares Licht
		VSC	Spannungsumrichter (englisch: Voltage Source Converter)

1 Einleitung

Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) wird immer häufiger eingesetzt, um Energie über große Entfernungen relativ verlustarm zu übertragen. Dabei erfahren die Isoliersysteme einiger HGÜ-Betriebsmittel sowohl eine Wechsel- als auch eine Gleichspannungsbelastung. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Isolierstoff Pressspan, welcher beispielsweise im Isoliersystem des Konvertertransformators eingesetzt wird. Im Folgenden werden die HGÜ und die HGÜ-Beanspruchungen behandelt, sowie der Werkstoff Pressspan näher betrachtet.

1.1 Hochspannungsgleichstromübertragung

Nach einer kurzen Einführung in die HGÜ werden das Prinzip sowie die Problematik der HGÜ diskutiert. Die Wechsel- und Gleichspannungsbeanspruchung der Isoliersysteme bedingen die Beachtung sowohl von Permittivitäten als auch von elektrischen Leitfähigkeiten beim Design und der Diagnose von HGÜ-Isoliersystemen.

1.1.1 Einführung

Erstmals wird eine Leistung von 7,2 GW bei der Spannung von ± 800 kV von der südwestchinesischen Provinz Sichuan mittels HGÜ über eine Strecke von 2090 km in die Provinz Jiangsu im Osten Chinas übertragen. Sowohl die Übertragungsspannung als auch die Übertragungsstrecke sind sehr groß. Die zu übertragende Energie wird aus Wasserkraft erzeugt. Weltweit bauen viele Staaten regenerative Energiequellen weiterhin massiv aus. Damit soll die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen reduziert und außerdem der CO₂-Ausstoß vermindert werden.

Ein Vergleich der HGÜ zu einer entsprechenden Wechselspannungsübertragung (Hochspannungsdrehstromübertragung, HDÜ) dient der Abschätzung, ab welcher Entfernung die HGÜ geringere Kosten verursacht als eine entsprechende Drehstromübertragung. Bei einer Gleichstromübertragung muss nur die benötigte und tatsächlich nutzbare Wirkleistung übertragen werden. Der gesamte Leiterquerschnitt kann genutzt werden, da es keine Stromverdrängung (Skin-Effekt) gibt. Allerdings entstehen hohe Kosten bei den Stromrichterstationen zur Gleichrichtung und Glättung bzw. zur Wechselrichtung sowie bei den benötigten Filtereinrichtungen. Bei der Suche nach dem wirtschaftlichen Schnittpunkt (englisch: Break-Even Point) müssen Faktoren wie die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen sowie der aktuelle Entwicklungsstand von HGÜ- und HDÜ-Systemen berücksichtigt werden. Okba et al. [1] publizierten eine umfangreiche Liste mit Vor- und Nachteilen einer HGÜ-Verbindung.

Die Energieübertragung zwischen zwei Punkten mittels Freileitungen lässt sich in der Regel im Bereich bis 600 km wirtschaftlicher mit Hilfe der Drehstromtechnik realisieren. Dies gilt unabhängig von der übertragenen Leistung [2]^{S.898}. Einerseits sind die Kosten der HGÜ-Stationen wesentlich höher als die Stationskosten der Drehstromtechnik, andererseits sind die Verluste und damit die Verlustkosten bei der Wechselstromübertragung höher. Der Kostenschnittpunkt wird bei einer Übertragungsleistung von 500 MW bei 700 km Übertragungsstrecke angegeben, wohingegen er bei einer Übertragungsleistung von 2 GW bei einer Übertragungslänge von ungefähr 1000 km abgeschätzt wird [2]^{S.898}.

Neben den wirtschaftlichen Kriterien gibt es Anwendungsfälle, in denen sich die HGÜ als die einzige, technisch sinnvolle Lösung herausstellt. In Hochspannungsdrehstromnetzen mit hohem Kabelanteil kommt es aufgrund der vorherrschenden großen Kapazitäten zu einem Blindleistungsüberschuss, der eine Kompensation durch Induktivitäten notwendig macht [3]^{S.408ff.}. Die Installation dieser Kompensationseinrichtungen ist bei längeren Seekabelverbindungen technisch sehr aufwändig und macht die HGÜ, die naturgemäß ohne Kompensationseinrichtungen auskommt, für die Übertragung von elektrischer Energie über Seekabel beispielsweise bei der Anbindung von Offshore-Windparks oder Bohrplattformen wichtig. Der wirtschaftliche Schnittpunkt für die Energieübertragung mittels Land- oder Seekabel wird im Bereich von 40 bis 150 km Übertragungsstrecke gesehen [2]^{S.898}.

Heutzutage existieren unterschiedliche Ausführungsformen von HGÜ-Verbindungen. Diese reichen von sogenannten Back-to-Back-Systemen (Kurzkupplungen für die Verbindung asynchroner Netze oder Netze unterschiedlicher Frequenzen) über monopolare bis hin zu bipolaren Ausführungen. Außerdem wird zwischen der Verwendung selbstgeführter Umrichter (Spannungsumrichter, englisch: Voltage Source Converter, VSC) mit Gleichspannungszwischenkreis und netzgeführter Umrichter (englisch: Line Commutated Converter, LCC) mit Gleichstromzwischenkreis unterschieden.

1.1.2 Prinzip und Problematik

Sehr wichtige Komponenten der HGÜ sind die Stromrichtertransformatoren (englisch: converter transformers), von denen häufig mehrere drehstromseitig parallel geschaltet und abwechselnd in Stern/Stern und Stern/Dreieck verschalten sind. Sie speisen die in Reihe geschalteten Stromrichter, welche als Gleich- oder als Wechselrichter betrieben werden können. Eine HGÜ-Anlage wandelt den vom Wechsellspannungsnetz 1 (AC-Netz 1) transformierten Drehstrom in Gleichstrom um, glättet diesen, filtert Oberschwingungen heraus und überträgt den Gleichstrom per Freileitung oder Kabel zur anderen HGÜ-Station via Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Die Gegenstation wandelt den Gleichstrom wieder in Wechselstrom um. Dies geschieht in den Stromrichtern. Anschließend wird der Wechselstrom in Transformatoren transformiert und in das AC-Netz 2 eingespeist. Dies ist in Abbildung 1.1-1 zu sehen.

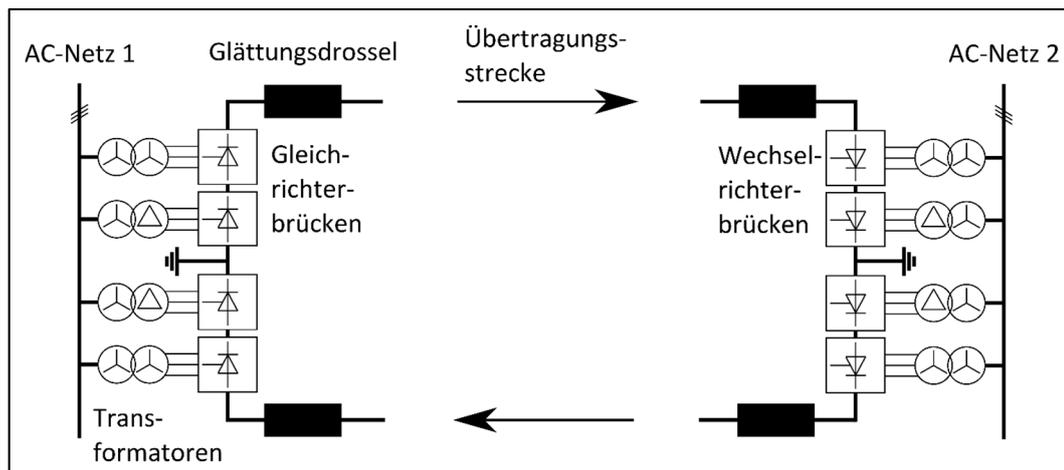


Abbildung 1.1-1: Prinzip einer bipolaren HGÜ-Verbindung bei Energieübertragung von AC-Netz 1 zu AC-Netz 2

Da die Transformatoren für die HGÜ (HGÜ-Transformatoren) mehrstufige Stromrichterbrücken speisen, sind die Sekundärwicklungen dieser Transformatoren mit der induzierten Wechselspannung der Transformatoren und zusätzlich mit einer Gleichspannung belastet. Somit ergeben sich für die Isoliersysteme in den HGÜ-Transformatoren Mischbeanspruchungen aus Wechselspannung und zusätzlicher Gleichspannung. Eine Quantifizierung der Wechsel- und der Gleichspannungsanteile ist verallgemeinernd nicht möglich, da diese Belastungen abhängig von der angeschlossenen Brückenstufe und der Übertragungsspannung sind. Diese Beanspruchungen können nach Norm IEC 61378-2 [4] und IEC 61378-3 [5] für den jeweiligen Anwendungsfall ermittelt werden.

Die Isolation und insbesondere die geschichteten Dielektrika aus Feststoff und flüssigem Isoliermedium müssen für beide Belastungsarten ausgelegt werden. Neben dem in dieser Arbeit betrachteten inneren Isoliersystem eines HGÜ-Transformators aus Öl und Pressspan müssen auch die Isoliersysteme und Isoliermaterialien von anderen HGÜ-Komponenten für eine Gleichspannungsbelastung ausgelegt sein. Die Isolation von Transformatorausleitungen besteht ebenfalls aus einem Öl-Pressspan-System. Bei Durchführungen hingegen wird meist Epoxidharz mit eingelegten Steuerbelägen für die Isolation verwendet. Auf der dem Transformator zugewandten Seite wird der Anschluss des Innenleiters häufig auch mit einem Öl-Pressspan-System isoliert, wohingegen die Isolation auf der Freiluftseite der Durchführung mittels Verbundisolatoren ausgeführt wird. Drosseln sind im Prinzip ähnlich einem Transformator aufgebaut und besitzen das gleiche Isoliersystem aus Öl und Pressspan. Spannungswandler werden für die Messung von Gleichspannungen häufig als ohmsche Spannungsteiler ausgeführt und Stromwandler messen den Gleichstrom mit Hilfe eines Messshunts, an dem bei bekanntem niederohmigen Widerstand die Messspannung abfällt. Für den Fall, dass die Energie mittels Kabel übertragen wird, sind heutzutage noch Kabel mit Öl-Papier-Dielektrikum im Einsatz, die auch mit Gleichspannung belastet werden. Diese Kabel werden für den höchsten Spannungsbereich eingesetzt. Neuere Ausführungen besitzen meist ein Isoliersystem aus Kunststoff, beispielsweise aus vernetztem Polyethylen. Diese

Kunststoffkabel werden aktuell noch nicht für höchste Spannungen verwendet. Die Isoliersysteme aller genannten Komponenten müssen für eine Gleichspannungsbelastung ausgelegt sein. Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Isoliersystem aus Öl und Pressspan.

Im Speziellen unterscheiden sich die elektrischen Feldbelastungen der Isolierwerkstoffe je nach Belastungsart. Die einzelnen Isoliermedien müssen in vielen Fällen jeweils für einen großen Anteil der Gesamtspannung ausgelegt werden, da für alle Belastungsarten dimensioniert werden muss. Außerdem sind die feldbestimmenden dielektrischen Eigenschaften der flüssigen und festen Isolierstoffe wie beispielsweise die Leitfähigkeiten bisher nur ungenau erfasst und weisen vielfältige Parameterabhängigkeiten auf, welche sich außerdem im Laufe des Betriebs der HGÜ-Transformatoren ändern können. Daraus resultieren sowohl erhebliche Überdimensionierungen der Isoliersysteme als auch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der langfristigen Betriebssicherheit der bereits in Betrieb befindlichen HGÜ-Transformatoren [6], [7].

1.1.3 HGÜ-Beanspruchung

Ablagerungen von Staub und Verschmutzung bilden Fremdschichten auf der Freiluftseite von Komponenten der HGÜ, wie zum Beispiel auf einer Durchführung. Diese Fremdschichten verursachen Probleme bei der äußeren Isolation, da sich aufgrund von vergleichsweise hohen Leitfähigkeiten der Fremdschichten Potentiale verschieben bzw. elektrische Felder verzerren. Es entstehen wie in einer Gleitanordnung extreme tangentielle und radiale Feldstärkeüberhöhungen, die einen Überschlag oder einen radialen Durchschlag der Durchführung zur Folge haben [8]^{S.101}. Für diese Probleme an der äußeren Isolation schafft beispielsweise die Verwendung von Verbundisolatoren mit hydrophober Silikonbeschirmung Abhilfe.

Hingegen besteht bei der inneren Isolation von HGÜ-Isoliersystemen noch immer ein Verständnisdefizit, im Besonderen bei den feldbestimmenden dielektrischen Eigenschaften der Isoliermaterialien Öl und Pressspan. Besonders die Tatsache, dass HGÜ-Transformatoren neben der Wechselspannung auch Gleichspannung isolieren müssen, führt zu gegensätzlichen Anforderungen an das Isoliersystem im Transformator. Es ist deshalb unerlässlich, eine vertiefte Kenntnis der elektrischen Feldbelastungen im Isoliersystem zu erlangen und die elektrische Feldverteilung gezielt so einzustellen, dass für alle Belastungsarten jeder Bereich der Isolation einen definierten Anteil der Gesamtbelastung trägt. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der inneren Isolation von HGÜ-Komponenten.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen feldbestimmenden Materialeigenschaften der Isolierung für Wechselspannungs- und Gleichspannungsbelastung diskutiert. Für Isoliersysteme setzt sich die „wahre“ elektrische Stromdichte \vec{J}_{wahr} aus zwei Anteilen zusammen,

nämlich aus der zeitlichen Änderung der Verschiebungsdichte im dielektrischen Verschiebungsfeld \vec{D} und aus der stationären Stromdichte im stationären Strömungsfeld \vec{j} :

$$\vec{j}_{\text{wahr}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (1.1-1)$$

Der Strom, der aufgrund der zeitlichen Änderung des Verschiebungsfeldes zustande kommt, wird als Verschiebungsstrom $I_{\text{Verschiebung}}$ bezeichnet, der aufgrund des stationären Strömungsfeldes heißt Leitungsstrom I_{Leitung} . Der Gesamtstrom durch das Isoliersystem besteht immer aus einer Überlagerung des Verschiebungsstroms und des Leitungsstroms:

$$I_{\text{gesamt}} = I_{\text{Verschiebung}} + I_{\text{Leitung}} \quad (1.1-2)$$

Für den Fall, dass das elektrische Feld zeitunabhängig ist, kann der Verschiebungsfeldanteil vernachlässigt werden. Somit entfällt der erste Term in Gleichung (1.1-1).

Der Leitungsstrom durch eine Fläche A berechnet sich im stationären Strömungsfeld \vec{j} zu:

$$I_{\text{Leitung}} = \int_A \vec{j} d\vec{A} \quad (1.1-3)$$

Die Materialgleichung für das stationäre Strömungsfeld, bei welchem Ladungsträger durch das Isoliersystem aufgrund eines angelegten elektrischen Feldes \vec{E} transportiert werden, lautet:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (1.1-4)$$

Hierbei wird der Zusammenhang zwischen der Stromdichte \vec{j} und dem angelegten elektrischen Feld durch den Proportionalitätsfaktor elektrische Leitfähigkeit σ beschrieben.

$$I_{\text{Leitung}} = \int_A \vec{j} d\vec{A} = \int_A \sigma \cdot \vec{E} d\vec{A} \quad (1.1-5)$$

Falls der betrachtete Flächenvektor \vec{A} parallel zum Vektor der elektrischen Feldstärke \vec{E} gerichtet ist, folgt aus Gleichung (1.1-5) unter Berücksichtigung der Beträge der jeweiligen Größen:

$$I_{\text{Leitung}} = \sigma \cdot E \cdot A \quad (1.1-6)$$

In dieser Arbeit wird die Leitfähigkeit des Isoliersystems durch eine Messung des Isolierstoffs in Plattenkondensatoranordnung bestimmt. Damit ergibt sich makroskopisch eine konstante elektrische Feldstärke aus der angelegten Spannung U und aus dem Plattenabstand (Prüflingsdicke) d :

$$I_{\text{Leitung}} = \sigma \cdot \frac{U}{d} \cdot A \quad (1.1-7)$$

Wenn hingegen eine netzfrequente Wechselspannung angelegt wird, muss der Verschiebungsstromanteil berücksichtigt werden. In der Regel überwiegt der Verschiebungsstromanteil $\vec{J}_V = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E}$ sogar den Leitungsstromanteil $\vec{J}_L = \sigma \cdot \vec{E}$. Somit kann der zweite Term in Gleichung (1.1-1) vernachlässigt werden und es ist nur noch das dielektrische Verschiebungsfeld zu betrachten.

Der Verschiebungsstrom im dielektrischen Verschiebungsfeld \vec{D} berechnet sich zu:

$$I_{\text{Verschiebung}} = \int_A \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{A} \quad (1.1-8)$$

Die Materialgleichung für das dielektrische Verschiebungsfeld, welche die Polarisation des Materials beschreibt, lautet:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (1.1-9)$$

Hierbei überlagert sich ein Polarisationsfeld \vec{P} dem Feld im Vakuum $\varepsilon_0 \cdot \vec{E}$. Der zusätzliche Anteil aufgrund der Polarisation kann vereinfachend durch die Größe relative Permittivität ε_r ausgedrückt werden. Diese ist eine materialspezifische Größe und beschreibt den Einfluss des Materials auf das dielektrische Verschiebungsfeld. Auf den Begriff der Polarisation sowie auf die unterschiedlichen Polarisationsmechanismen wird in Kapitel 2.3 näher eingegangen.

Damit beträgt der Verschiebungsstrom als Funktion der angelegten Feldstärke:

$$I_{\text{Verschiebung}} = \int_A \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d\vec{A} \quad (1.1-10)$$

Die innere Isolierung von HGÜ-Komponenten wie dem HGÜ-Transformator besteht oftmals aus verschiedenen Isoliermaterialien mit unterschiedlichen Dielektrika. Hier beeinflusst die Spannungsart merklich die elektrische Feldverteilung [9]. Im Fall einer Wechselspannungsbeanspruchung ist das elektrische Feld durch den Materialparameter relative Permittivität ε_r eindeutig festgelegt, da die Verschiebungsströme überwiegen. Die elektrische Feldverteilung stellt sich aufgrund des Verhältnisses der Permittivitäten der Isoliermedien ein. Im quergeschichteten Dielektrikum wird das elektrische Feld in das Medium mit der niedrigeren Permittivität gedrängt. Überwiegen hingegen Leitungsströme, was bei einer ausreichend lang andauernden Gleichspannungsbelastung der Fall ist, dann wird die elektrische Feldverteilung durch die Leitfähigkeiten σ der Isoliermedien bestimmt. Im quergeschichteten Dielektrikum drängt sich nun das Feld in das Medium mit der niedrigeren

Leitfähigkeit. Das Verhältnis der Leitfähigkeiten weicht vom Verhältnis der relativen Permittivitäten häufig merklich ab. Zwischen diesen beiden Extremfällen, bei denen entweder nur die Verschiebungs- oder nur die Leitungsströme durch das Isoliersystem relevant sind, liegt der Bereich der Mischfeldbeanspruchungen. Dazu gehören im erweiterten Sinne einerseits transiente Beanspruchungen, beispielsweise nach einer Spannungsänderung, andererseits die bei HGÜ-Transformatoren häufige Belastung mit Wechsel- und überlagerter Gleichspannung. In diesen Fällen sind sowohl relative Permittivitäten als auch Leitfähigkeiten relevant. Beide Terme in Gleichung (1.1-1) müssen dann beachtet werden.

Wenn das Isoliersystem beispielsweise beim Einschalten einer HGÜ-Leitung (Spannungssprung) mit einer überlagerten Spannung aus Gleich- und Wechselanteilen belastet wird, treten in der Folge transiente Vorgänge auf. Der stationäre Gleichspannungsfall stellt sich erst ein, wenn alle Verschiebungsströme im Isoliersystem abgeklungen sind, also wenn alle Polarisationsmechanismen beendet sind. Dies kann bis zu mehreren Stunden oder Tagen dauern. Eine aussagekräftige Messung des Isolierverhaltens eines Materials sollte folglich den gesamten relevanten Zeitbereich abdecken. Dies ist beispielsweise durch eine Sprungantwortmessung möglich, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und in Kapitel 4.1.1 beschrieben wird.

Pressspan und Öl sind die wesentlichen Bestandteile der inneren Isolierung von Transformatoren. Die Flüssigkeit hat unter anderem die Aufgabe, die nach Anlegen einer Spannung an den Transformator entstehende Wärme abzuführen. Die Funktion der festen Isolierung ist eine Erhöhung der elektrischen Festigkeit durch Unterteilung großer Ölspalte in kleinere Ölkanäle mit erhöhter elektrischer Festigkeit [10], [11]. Nach Anlegen eines elektrischen Feldes ist ein Ladungstransport in beiden Materialien vorhanden. Im Folgenden werden allgemein die Verhältnisse am Übergang von zwei Materialien für ein schräg geschichtetes Dielektrikum (Winkel zwischen quer- und längsgeschichtet einstellbar) beschrieben. Die benötigten Größen sind in Abbildung 1.1-2 eingetragen. Feldlinien werden an der Grenzfläche Öl zu Pressspan gebrochen.

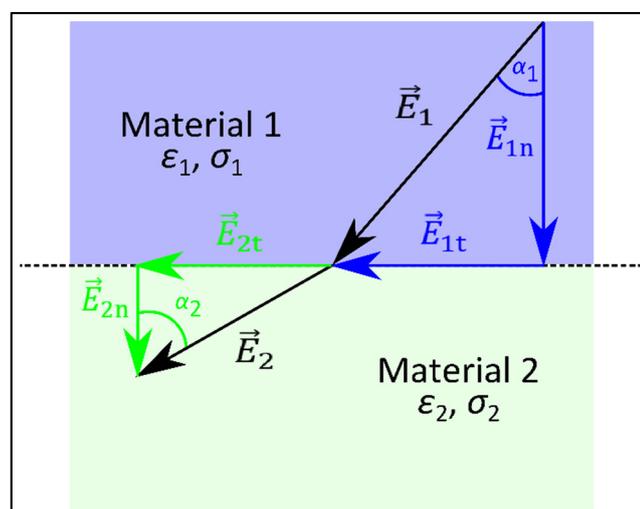


Abbildung 1.1-2: Schräggeschichtetes Dielektrikum aus zwei Materialien

Aus den Überlegungen der Stromkontinuität zu einem quergeschichteten Dielektrikum folgt, dass die Normalkomponenten (Index n) der wahren Stromdichte von Material 1 und Material 2 stetig ineinander übergehen:

$$\frac{\partial D_{1n}}{\partial t} + J_{1n} = \frac{\partial D_{2n}}{\partial t} + J_{2n} \quad (1.1-11)$$

Werden mit Hilfe der Materialgleichungen (1.1-4) und (1.1-9) die Stromdichten ausgedrückt, ergibt sich aus Gleichung (1.1-11):

$$\frac{\partial E_{1n}}{\partial t} \cdot \varepsilon_1 + \sigma_1 \cdot E_{1n} = \frac{\partial E_{2n}}{\partial t} \cdot \varepsilon_2 + \sigma_2 \cdot E_{2n} \quad (1.1-12)$$

mit $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r1,2}$.

Darin sind nun die Materialgrößen relative Permittivität und elektrische Leitfähigkeit der beiden beteiligten Materialien enthalten. Nach einer kurzen Umformung folgt:

$$E_{1n} \cdot \left(\frac{\frac{\partial E_{1n}}{\partial t}}{E_{1n}} \cdot \varepsilon_1 + \sigma_1 \right) = E_{2n} \cdot \left(\frac{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t}}{E_{2n}} \cdot \varepsilon_2 + \sigma_2 \right) \quad (1.1-13)$$

Aus den Überlegungen zum Umlaufintegral $\oint_x \vec{E} \cdot d\vec{x} = 0$ zu beiden Seiten einer Grenzfläche eines längsgeschichteten Dielektrikums folgt, dass die tangentialen Komponenten der Feldstärke in den beiden Medien gleich sind:

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (1.1-14)$$

Nun wird das Verhältnis aus Normalkomponente (Gleichung (1.1-13)) und Tangentialkomponente (Gleichung (1.1-14)) gebildet:

$$\frac{1}{\tan \alpha_1} = \frac{E_{1n}}{E_{1t}} \text{ bzw. } \frac{1}{\tan \alpha_2} = \frac{E_{2n}}{E_{2t}} \quad (1.1-15)$$

So entsteht ein Ausdruck für die Winkel α_1 in Material 1 und α_2 in Material 2 des schräggeschichteten Dielektrikums (siehe Abbildung 1.1-2) in allgemeiner Form:

$$\frac{1}{\tan \alpha_1} \cdot \left(\frac{\frac{\partial E_{1n}}{\partial t}}{E_{1n}} \cdot \varepsilon_1 + \sigma_1 \right) = \frac{1}{\tan \alpha_2} \cdot \left(\frac{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t}}{E_{2n}} \cdot \varepsilon_2 + \sigma_2 \right) \quad (1.1-16)$$

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\left(\frac{\partial E_{1n}}{\partial t} \cdot \varepsilon_1 + \sigma_1 \right)}{\left(\frac{\partial E_{2n}}{\partial t} \cdot \varepsilon_2 + \sigma_2 \right)} \quad (1.1-17)$$

Somit sind Tangential- und Normalkomponenten der elektrischen Feldstärke an der Grenzfläche eines schräggeschichteten Dielektrikums für Winkel $0 \leq \alpha_{1,2} < 90^\circ$ für einen Verschiebungs- und einen Strömungsfeldanteil ganz allgemein beschrieben.

Zum besseren Verständnis werden im Folgenden drei Fälle explizit diskutiert. Kann das zeitabhängige dielektrische Verschiebungsfeld vernachlässigt werden, dann ist nur noch das stationäre Strömungsfeld relevant. Gleichung (1.1-17) vereinfacht sich zu:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (1.1-18)$$

Die Winkel stellen sich somit nur aufgrund des Verhältnisses der Leitfähigkeiten der beiden Materialien ein.

Überwiegt hingegen das dielektrische Verschiebungsfeld im Vergleich zum stationären Strömungsfeld bei Weitem, dann wird aus Gleichung (1.1-17) der folgende Ausdruck:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\frac{\partial E_{1n}}{\partial t} \cdot \varepsilon_1}{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t} \cdot \varepsilon_2} \quad (1.1-19)$$

Das elektrische Feld kann nun wieder durch die Verschiebungsfelder ausgedrückt werden und es ergibt sich in Zähler und Nenner der Gleichung (1.1-19) jeweils:

$$\frac{\frac{\partial}{\partial t} E_{1n}}{E_{1n}} = \frac{\frac{\partial}{\partial t} \frac{D_{1n}}{\varepsilon_1}}{\frac{D_{1n}}{\varepsilon_1}} = \frac{\frac{\partial D_{1n}}{\partial t}}{D_{1n}} \quad (1.1-20)$$

bzw.

$$\frac{\frac{\partial}{\partial t} E_{2n}}{E_{2n}} = \frac{\frac{\partial}{\partial t} \frac{D_{2n}}{\varepsilon_2}}{\frac{D_{2n}}{\varepsilon_2}} = \frac{\frac{\partial D_{2n}}{\partial t}}{D_{2n}} \quad (1.1-21)$$

Im reinen Verschiebungsfeld sind die Normalkomponenten der Ableitung der Verschiebungsstromdichte sowie die Normalkomponenten der Verschiebungsstromdichte an sich in beiden Materialien gleich. Damit vereinfacht sich Gleichung (1.1-19) zu:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\frac{\frac{\partial E_{1n}}{\partial t}}{E_{1n}} \cdot \varepsilon_1}{\frac{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t}}{E_{2n}} \cdot \varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \quad (1.1-22)$$

Die Winkel stellen sich somit nur aufgrund des Verhältnisses der relativen Permittivitäten der beiden Materialien ein.

Zwischen diesen beiden Extremfällen liegen die Fälle, in denen sowohl das dielektrische Verschiebungsfeld als auch das stationäre Strömungsfeld beachtet werden müssen. Die Winkel $\alpha_{1,2}$ sind dann zeitabhängig.

Als letzter Spezialfall wird das Laden einer Kapazität über einen Widerstand als quergeschichtetes Dielektrikum ($\alpha_1 = \alpha_2$) betrachtet. Das im Widerstand vorhandene stationäre Strömungsfeld in Material 1 geht vollständig in das dielektrische Verschiebungsfeld in Material 2 über. Die Kontinuitätsgleichung für die Verschiebungs- und Leitungsstromdichte besagt:

$$\oint_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) d\vec{A} = 0 \quad (1.1-23)$$

Das bedeutet, dass die „wahre“ elektrische Stromdichte $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$ quellenfrei ist.

Es entsteht für diesen Spezialfall ebenfalls eine Vereinfachung aus Gleichung (1.1-17):

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\frac{\sigma_1}{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t}}}{\frac{\sigma_1 \cdot E_{2n}}{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t} \varepsilon_2}} = \frac{\sigma_1 \cdot E_{2n}}{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t} \varepsilon_2} \quad (1.1-24)$$

Da die beiden Winkel α_1 und α_2 gleich sind, ist das Verhältnis in Gleichung (1.1-24) gleich 1. Daraus folgt:

$$\frac{\frac{\partial E_{2n}}{\partial t}}{E_{2n}} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_2} \quad (1.1-25)$$

Diese Gleichung kann durch die Spannung U_2 ausgedrückt werden. Außerdem lässt sich das Verhältnis $\frac{\sigma_1}{\varepsilon_2}$ als Funktion des Widerstands in Material 1 und der Kapazität in Material 2 schreiben:

$$\frac{\frac{\partial U_2}{\partial t}}{U_2} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_2} = \frac{1}{R_1 \cdot C_2} \quad (1.1-26)$$

Die drei hier diskutierten Fälle werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Bestimmungsgleichungen für schräggeschichtete Dielektrika in drei Spezialfällen

Fallunterscheidung	Gleichung	Gleichungsnummer
<i>reines Strömungsfeld</i>	$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	(1.1-18)
<i>reines Verschiebungsfeld</i>	$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}}$	(1.1-22)
<i>Übergang Strömungsfeld zu Verschiebungsfeld</i>	$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\sigma_1 \cdot E_{2n}}{\varepsilon_2 \cdot \frac{\partial E_{2n}}{\partial t}}$	(1.1-24)

Tabelle 2 quantifiziert die Größen relative Permittivität und elektrische Leitfähigkeit der für die Transformatorisolation verwendeten Materialien Pressspan und Öl mit typischen und häufig verwendeten Richtwerten. Im konkreten Anwendungsfall können im Besonderen die Leitfähigkeiten um mehrere Größenordnungen von diesen Richtwerten abweichen.

Tabelle 2: Typische Werte der relativen Permittivitäten und der Gleichstromleitfähigkeiten von Pressspan und Mineralöl

Größe	ölimprägnierter Pressspan	Mineralöl
<i>relative Permittivität</i>	3,5 - 4,4	2,2
<i>typische DC-Leitfähigkeit bei Raumtemperatur</i>	10^{-15} S/m	10^{-12} S/m

Aus Tabelle 2 wird deutlich, dass sich das elektrische Feld in Isoliersystemen der HGÜ bei Wechselspannungsbeanspruchung in die Flüssigkeit (Mineralöl) drängt, da ihre relative Permittivität kleiner ist als die des Pressspans. Bei stationärer Gleichspannungsbelastung befindet sich die elektrische Belastung hingegen im Feststoff (Pressspan) und das Mineralöl ist entlastet, da die Leitfähigkeit des Pressspans meist um mehrere Größenordnungen kleiner ist als die des Mineralöls [12]. Somit muss die Dicke des Feststoffs groß genug sein, um nahezu die gesamte Spannung zu isolieren [11].

Abbildung 1.1-3 zeigt das Isolationsdesign eines Öl-Pressspan-Barrierensystems am oberen Ende einer Wicklung eines HGÜ-Transformators. Äquipotentialflächen werden als Linien verdeutlicht und die Höhe der Feldbelastungen findet sich in der Farbgebung wieder. Die

Simulationen sind sowohl für das quasistationäre Verschiebungsfeld (links) als auch für das stationäre Strömungsfeld (rechts) dargestellt.

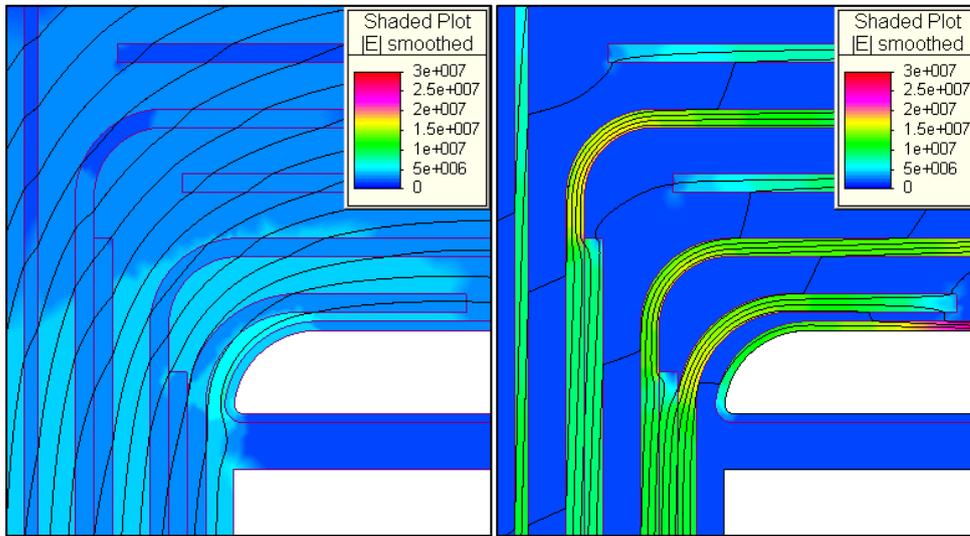


Abbildung 1.1-3: Numerische Feldberechnung (Finite-Elemente-Methode) einer Barrierenanordnung am oberen Ende einer Wicklung eines HGÜ-Transformators für das dielektrische Verschiebungsfeld (links) und das stationäre Strömungsfeld (rechts) [13]

Im Fall der Wechselspannungsbeanspruchung (links in Abbildung 1.1-3) sollen die Barrieren idealerweise den Äquipotentialflächen folgen und somit eine gute Feldverteilung ermöglichen. Es sind keine Feldüberhöhungen sichtbar. Die Barrieren unterteilen die Ölströme in kleinere Spalten, ohne die Zirkulation des Öls zu verhindern. Dies ist für Wechselspannung eine praktikable Isolieranordnung.

Im Fall der Gleichspannungsbeanspruchung (rechts in Abbildung 1.1-3) hingegen drängt sich nahezu das gesamte Feld in die relativ dünnen Barrieren, da die Leitfähigkeit der festen Isolierung gegenüber dem Öl bedeutend niedriger ist. Diese resistive Feldsteuerung muss bei der Auslegung von Gleichspannungsisoliersystemen aus Öl und Pressspan berücksichtigt werden. Da die Isoliersysteme in HGÜ-Transformatoren aber nicht ausschließlich mit Gleichspannungen beansprucht werden, kann auf Barrieren nicht verzichtet werden. Dies wäre auch nicht wünschenswert, da die Barrieren mechanische Stabilität, definierte Ölkanäle und eine Zirkulation des Öls im Transformator garantieren sowie eine Feldsteuerung bewirken.

Während die Werte der relativen Permittivitäten bekannte Materialeigenschaften sind, welche sich in den meisten Anwendungsfällen nicht merklich ändern, handelt es sich bei den Werten der Leitfähigkeiten der Isoliermaterialien, im Besonderen des Pressspans, nicht um Materialkonstanten. Sie sind schwierig mess- und kontrollierbar. Aus diesem Grund wurden die stationären Leitfähigkeiten sowie die Verhältnisse der Leitfähigkeiten von Öl zu Pressspan in der Vergangenheit intensiv erforscht [14], [15], [16], [17].

Es zeigte sich, dass Leitfähigkeiten je nach Zustand der Isolieranordnung und je nach Belastung des Systems (Wassergehalt, Temperatur, elektrische Feldstärke, Dauer der Belastung)

um mehrere Größenordnungen variieren und sich im Laufe des Betriebes verändern. Dies bringt eine starke Unsicherheit in die Dimensionierung der Geräte und in die Frage nach der Relation zwischen Prüf- und Betriebsbelastungen [18]. Beispielsweise wurde die Veränderung der Ölleitfähigkeit von einer internationalen CIGRÉ Working Group als Hauptproblem identifiziert [7]. Leider entsprechen die Bedingungen von Leitfähigkeitsmessungen nach den heutigen Normen häufig nicht den Bedingungen der HGÜ-Beanspruchungen [19], weshalb diese Normen im Fokus von Forschungsaktivitäten bei Herstellern und Betreibern stehen und eine weitere CIGRÉ Working Group das Thema der Leitfähigkeitsmessungen aufgegriffen hat [20]. Auf eine Norm zur Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit und auf ihre Problematik wird in Kapitel 4.1.1 näher eingegangen. Darüber hinaus spielen komplexe Polarisationsmechanismen in Feststoffen (zum Beispiel Pressspan) sowie Ionendriftprozesse in Flüssigkeiten (zum Beispiel Mineralöl) eine entscheidende Rolle [21]. Sie müssen bei Modellbildungen berücksichtigt werden.

Einerseits wird das Design der HGÜ-Isoliersysteme oftmals aus einem modifizierten Design für Wechsellspannungsisoliersysteme gewonnen. Andererseits wird das HGÜ-Isoliersystem aufwändig berechnet und simuliert. Es kann aber noch weiter optimiert werden, wenn das Materialverhalten der Isolierstoffe besser verstanden ist. Um ein effektives Design der HGÜ-Isoliersysteme zu erreichen, ist ein physikalisches Verständnis des komplexen Verhaltens der Isoliermaterialien mit den sich verändernden Leitfähigkeiten essentiell. Folglich müssen die Leitungsprozesse in den Isolierstoffen erforscht werden. Nur eine geeignete Auslegung des Isoliersystems, zum Beispiel im HGÜ-Transformator, garantiert eine sichere und nachhaltige elektrische Energieversorgung.

In Kapitel 1.2 wird der Werkstoff Pressspan behandelt und dessen Komponenten werden näher betrachtet. Dadurch wird es möglich, relevante Leitungsprozesse in Pressspanisolierungen zu verstehen sowie die Parametereinflüsse auf die elektrische Leitfähigkeit zu erfassen und richtig zu beurteilen.

1.2 Werkstoff Pressspan

Pressspan wird als Isolierstoff in ölimprägnierter Form in Konvertertransformatoren eingesetzt. Die Herstellung wird in zwei Prozesse unterteilt: Im ersten wird aus Holz der sogenannte Zellstoff und im zweiten aus Zellstoff der Isolierstoff Pressspan hergestellt. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Herstellung von Pressspan, dessen chemische Zusammensetzung sowie dessen geometrischen Aufbau näher eingegangen.

1.2.1 Herstellung von Zellstoff und Pressspan

Der Isolierstoff Pressspan basiert größtenteils auf pflanzlichen Fasern. Diese kommen in der Natur in großen Mengen vor. Als Ausgangsmaterial für den zellulosehaltigen Pressspan wird Holz verwendet, wobei zwischen Laub- und Nadelholz unterschieden wird. Je nach Anforderung an die elektrischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften des Pressspans werden bestimmte Baumarten aus bestimmten Regionen für die Herstellung bevorzugt.

Nadelholz besitzt im Allgemeinen eine größere Faserlänge als Laubholz, woraus sich im Laufe des Herstellungsprozesses von Pressspan ein ausgedehntes Netzwerk von Fasern bildet, welches zu einer höheren mechanischen Festigkeit führt. Dies ist einer der Gründe, warum für die Pressspanherstellung hauptsächlich Nadelhölzer verwendet werden. Aufgrund des langsamen Wachstums haben Nadelhölzer beispielsweise aus Skandinavien und Kanada besonders dicht gewachsene Zellen. Daher werden sie als Ausgangsstoff für die Pressspanherstellung favorisiert [22]^{S.21}.

Tabelle 3 zeigt die Bestandteile von Holz sowie die Bestandteile des Isolierstoffs Pressspan im Vergleich. Hauptbestandteil von Holz, von Zellstoff sowie von Pressspan ist die Zellulose. Daneben kommen Hemizellulosen, Lignin, Harze und in geringen Mengen anorganische Bestandteile vor.

Tabelle 3: Bestandteile von Holz und Pressspan [23]

Bestandteile	unbehandeltes Nadelholz	Zellstoff, Pressspan
<i>Zellulose</i>	41 – 58 %	75 – 85 %
<i>Hemizellulosen</i>	11 – 25 %	10 – 20 %
<i>Lignin</i>	26 – 30 %	2 – 6 %
<i>Harze</i>	2 – 4 %	0 %
<i>anorganische Bestandteile</i>	1 %	< 0,5 %

Ziel der Pressspanherstellung ist es, einen Isolierstoff mit möglichst großem Zellulosegehalt herzustellen. Dies sollte zu einer geringen Leitfähigkeit und damit zu guten Isolationseigenschaften führen. Außerdem werden sowohl der Anteil an Lignin, was eine Art „biologischer Kleber“ ist, der die Einzelfasern miteinander verbindet, als auch der Anteil weiterer Inhaltsstoffe reduziert.

Zuerst wird aus Holz Zellstoff hergestellt, aus dem in weiteren Prozessschritten schließlich der Isolierstoff Pressspan entsteht. Diese Schritte werden im Folgenden näher erläutert.

Zellstoffherstellung

Zu Beginn wird die Rinde des Nadelholzes entfernt und die Stämme werden in kleine Stücke (sogenannte Hackschnitzel) zerkleinert. Durch diesen Prozess wird die Oberfläche deutlich vergrößert, was die im nächsten Schritt zum chemischen Aufschluss des Holzes hinzugegebenen Chemikalien schneller eindringen lässt. Es wird zwischen mechanischem Aufschluss (Ergebnis ist der sogenannte Holzstoff) und chemischem Aufschluss (Ergebnis ist der Zellstoff) unterschieden. Für die Isolierstoffherstellung wird ein chemisches Aufschlussverfahren genutzt, um die für die Pressspanherstellung unerwünschten Bestandteile wie Lignin und Harze herauszulösen. Die verschiedenen chemischen Verfahren unterscheiden sich in den verwendeten Chemikalien (saurer oder alkalischer Aufschluss), den Aufschlussbedingungen (Zeit, Druck, Temperatur etc.) sowie den Prozessschritten. Für die Pressspanherstellung wird meist das Sulfatverfahren angewandt [22]^{S.21}, auf welches im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird. Stattdessen wird auf die Literatur [24], [25] verwiesen. Es werden Extraktstoffe herausgelöst und der Ligningehalt wird auf wenige Prozent reduziert, siehe Tabelle 3. Das so entstandene Produkt wird Zellstoff (englisch: pulp) genannt. Die Fasern haben Durchmesser zwischen 20 und 30 μm [26] und eine Länge von bis zu einigen wenigen Millimetern.

Pressspanherstellung

Nun wird der Zellstoff in Wasser gegeben (Suspension), in Einzelfasern zerlegt und gereinigt. Die Schichten aus Zellulosefasern werden auf ein Sieb gebracht, durch den das überschüssige Wasser abläuft. Die Faserschichten werden durch einen endlosen Filz zur Formatwalze gebracht und die einzelnen dünnen, wässrigen Schichten werden aufgewickelt. Somit liegen viele Faserschichten übereinander und die Fasern sind mehr oder weniger symmetrisch in der Schichtebene verteilt. Aufgrund des Aufbringens der Fasern auf das Sieb und des Wickelprozesses gibt es dennoch eine leichte Vorzugsrichtung in Maschinenrichtung. Es werden so lange Schichten übereinander gewickelt, bis die gewünschte Schichtdicke erreicht ist. Die Schichten werden nass gegautscht [22]^{S.25}, wodurch ein Verkleben vermieden werden kann. Im anschließenden Trocknungs- und Verdichtungsprozess wird das Restwasser aus dem Pressspan herausgepresst bzw. ausgeheizt. Dies geschieht je nach gewünschter Pressspanqualität und Anforderung zeitgleich oder nacheinander. Da der Wassergehalt einen erheblichen Einfluss auf die elektrischen Kenngrößen des Pressspans hat, wird das Isoliersystem vor dem Einbau in die HGÜ-Komponenten nachgetrocknet.

1.2.2 Pressspanzusammensetzung

Pressspan besteht hauptsächlich aus Zellulose, Hemizellulosen und in geringen Mengen aus Lignin, siehe Tabelle 3. Grundbaustein der Zellulose ist D-Glucose. Dieser Zucker besteht aus einer Kohlenstoffkette (C_1 bis C_6), an welcher mehrere Hydroxygruppen (OH-Gruppen) hängen. Das Kohlenstoffatom C_1 liegt in der offenkettigen Form als sogenannte Aldehydgruppe vor. Die Carbonylfunktion ($C=O$ -Gruppe) dieser funktionellen Gruppe ist sehr reaktiv und reagiert deshalb mit der OH-Gruppe am C_5 zu einem sechsgliedrigen Ring. Sobald die Kette zu einem Ring wird, ändert sich die Konfiguration (räumliche Anordnung der Bindung am Kohlenstoffatom). Als Ergebnis der räumlichen Anordnung wird zwischen α -D-Glucose und β -D-Glucose unterschieden. In der Zellulose kommt allerdings nur die β -D-Glucose vor. Dieses Monomer bildet damit den Grundbaustein des Zellulosemoleküls.

Der Monomer-Grundbaustein β -D-Glucose wird durch eine Polykondensation zum Zellulosemolekül bzw. Zellulosepolymer. Als Polykondensation werden Reaktionen bezeichnet, bei denen Monomere unter Abspaltung eines kleinen Moleküls zu Polymeren reagieren [27]^{S.11}. Im vorliegenden Fall der Zellulose wird Wasser abgespalten und es bildet sich eine Sauerstoffbrücke zwischen den einzelnen Glucosemolekülen aus (Glykosidbindung).

Prinzipiell könnte jede OH-Gruppe des einen Monomers mit jeder des anderen Monomers reagieren. Da der Zusammenbau von Zellulose jedoch ein natürlicher, von Enzymen gesteuerter Prozess ist, entstehen nur definierte Polymere mit den Reaktionszentren C_1 und C_4 . Deshalb wird diese Verknüpfung eine 1,4-Verknüpfung genannt. Zusammen mit dem Monomer, β -D-Glucose, wird die Bezeichnung β -1,4-glykosidische Bindung verwendet. Um die Bindung zu ermöglichen, muss das eine Glucosemolekül um 180° um die horizontale Achse gedreht werden, da sonst die entsprechenden OH-Gruppen nicht in die gleiche Richtung zeigen. Damit ergibt sich, dass bei der Zellulose jeder zweite β -D-Glucose-Baustein um 180° gedreht vorliegt. Somit ist aus dem Glucosemonomer ein Polymer entstanden, welches zur Gruppe der Polysaccharide gezählt wird. Abbildung 1.2-1 zeigt einen Strukturausschnitt aus einem Zellulosestrang.

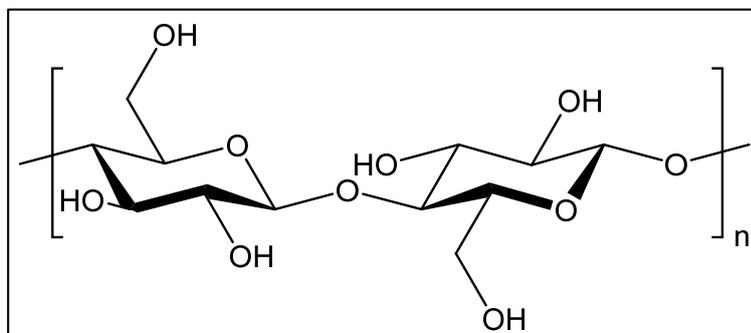


Abbildung 1.2-1: Strukturausschnitt aus einem Zellulosestrang

Die durchschnittliche Anzahl der Monomere in einem Makromolekül wird Polymerisationsgrad (englisch: Degree of Polymerisation, DP) genannt. Das Makromolekül besteht aus einer

Vielzahl von Glucosemonomeren. Liegen zwei Zellulosestränge nahe beieinander, so bilden sich Wasserstoffbrückenbindungen zwischen dem Wasserstoffatom einer Hydroxygruppe und dem Sauerstoffatom einer anderen Hydroxygruppe aus, wodurch die Molekülstränge in starker Wechselwirkung miteinander stehen, was wiederum zu einer hohen Ordnung innerhalb des Materials führt.

Anmerkung: Die Bestimmung des Polymerisationsgrades kann über eine Viskositätsmessung erfolgen. Dazu wird ein Stück des Pressspanprüflings beispielsweise in Kupferethyldiamin [25] gelöst. Daraufhin fließt eine definierte Menge des gelösten Zellstoffs durch eine Kapillare und es wird die Durchlaufzeit gemessen, woraus die Viskosität (bzw. die Grenzviskosität) rechnerisch ermittelt wird. Die Viskosität ist somit ein Maß für die durchschnittliche Kettenlänge der Zellulosemoleküle.

Neben reiner Zellulose kommen im Pressspan Hemizellulosen vor. Dies ist ein Überbegriff für eine Mischung verschiedener Zuckermomere, die ebenso wie die Zellulose β -1,4-verknüpft sind. Die genaue Struktur und Zusammensetzung der Hemizellulosen variiert stark zwischen den verschiedenen Holz- und Zellarten [28]. Es kommen neben der β -D-Glucose unter anderem auch die Xylose, Galactose, Fucose und Gluconsäure vor. Diese Zucker unterscheiden sich zum einen in der Anzahl an Kohlenstoffatomen, zum anderen in der Konfiguration der Hydroxygruppen.

Die Hemizellulosen haben einen im Vergleich zur Zellulose deutlich geringeren Polymerisationsgrad von circa 200 und aufgrund ihrer amorphen Struktur eine größere Affinität zu Wasser. Das spielt bei der Quellung der Fasern eine Rolle. In der Papierherstellung tragen die Hemizellulosen wie ein natürlicher Leim zur Bindung zwischen den Fasern bei [25].

Lignin hat einen merklich anderen chemischen Aufbau als Zellulose und Hemizellulosen und der Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit ist bisher nur unzureichend erforscht. Unter dem Namen Lignin, welches eigentlich die Kittsubstanz (mit hydrophober Oberfläche) in der Pflanzenzelle ist, werden verschiedene Moleküle zusammengefasst [29]. Viele dieser Moleküle bestehen aus Kohlenstoffsechsringen mit delokalisierten Elektronen (π -Elektronen). Diese π -Elektronen können durch sichtbares Licht angeregt werden. Damit ist Lignin für die braune Färbung des Pressspans verantwortlich [30].

Aufgrund der Tatsache, dass es in den Komponenten des Pressspans eine Vielzahl von Hydroxygruppen gibt, können Wassermoleküle an die Zellstofffasern gebunden werden. Je nach Wassergehalt des Pressspans gibt es demnach eine bestimmte Anzahl an noch freien Hydroxygruppen, die mit anderen Hydroxygruppen des gleichen Polymerstrangs oder des benachbarten Strangs wechselwirken bzw. Wasserstoffbrücken bilden können.

Durch freie Hydroxygruppen an der Oberfläche einer Faser ist diese hygroskopisch, da durch die Ausbildung von Wasserstoffbrücken die Oberflächenenergie herabgesetzt wird. Ein getrockneter Zelluloseprüfling wird folglich stets Feuchtigkeit aufnehmen, wenn er dieser ausgesetzt ist.

Aufgrund der Herstellung von Pressspan aus Zelluloseeinzelfasern bzw. aus Faserschichten soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit die geometrische Struktur der Fasern und die geometrische Orientierung der Fasern im Pressspan erforscht und mit Leitungsprozessen und Polarisationsmechanismen in Verbindung gebracht werden. Außerdem ist im Besonderen die Pressspankomponente Lignin näher zu betrachten, da ihre chemische Struktur mit dem vorhandenen π -Elektronensystem auf eine tendenziell höhere Leitfähigkeit als bei den anderen Komponenten hindeutet. Des Weiteren resultiert die Eigenschaft der Hygroskopie von Pressspan in einer Untersuchung des Wassergehalts von Pressspan und dessen Einfluss auf die Leitfähigkeit.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan muss verstanden sein, um den Isolierstoff bestmöglich einsetzen zu können. Dazu wird die elektrische Leitfähigkeit kurz beschrieben und potenzielle Leitungsprozesse werden diskutiert. Hinzu kommen Polarisationsmechanismen, die in elektrischen Messungen den Leitungsprozessen überlagert sind. Aus dem Verständnis der Leitungsprozesse und Polarisationsmechanismen lassen sich im Anschluss Modelle aufstellen, die das Verständnis über den Isolierstoff Pressspan verbessern.

2.1 Elektrische Leitfähigkeit

HGÜ-Isoliersysteme erfahren neben der nicht vermeidbaren Wechsellastspannungsbelastung häufig zusätzlich eine Gleichspannungsbelastung (vergleiche Kapitel 1.1.2). Der im Fall der Gleichspannungsbelastung für die elektrische Feldverteilung relevante Isolierstoffparameter ist die elektrische Leitfähigkeit σ . Sie gibt an, wie gut das Material einen elektrischen Strom leitet. Wie bereits in Kapitel 1.1.3 erwähnt wurde, ist die elektrische Leitfähigkeit der Proportionalitätsfaktor zwischen der Stromdichte \vec{j} und der elektrischen Feldstärke \vec{E} :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.1-1)$$

Immer dann, wenn der Leitungsstrom nicht gegen den dielektrischen Verschiebungsstrom vernachlässigt werden kann, müssen die Leitfähigkeiten der Isoliermedien für die Feldberechnung und die Dimensionierung der HGÜ-Komponenten berücksichtigt werden.

Jedes Material besitzt eine bestimmte Leitfähigkeit. Diese kann von Material zu Material um mehrere Größenordnungen variieren, abhängig von der chemischen Zusammensetzung (mikroskopische Betrachtungsweise) und der makroskopischen Struktur. Zur groben Einteilung werden die Stoffe nach Leitern, Halbleitern und Isolatoren unterschieden. Elektrische Leiter (zum Beispiel Metalle) haben eine hohe Leitfähigkeit, wohingegen Isolatoren (Isolierflüssigkeit, feste Isolierung) im Allgemeinen eine sehr geringe Leitfähigkeit aufweisen. Die Leitfähigkeit von Halbleitern liegt zwischen diesen beiden Stoffgruppen.

Es stellt sich die Frage, auf welche Art und Weise die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan zu erfassen ist. Wie bereits in Kapitel 1.1.3 beschrieben wurde, muss das Isoliersystem mit Gleichspannung belastet werden, um einen Leitungsstrom zu detektieren. Dies ist erst möglich, wenn sich ein stationärer Zustand im Isoliersystem eingestellt hat. Eine solche Messung dauert bei Raumtemperatur erfahrungsgemäß mehrere Stunden. Messmethoden der Leitfähigkeit werden in Kapitel 4.1.1 beschrieben. In der vorliegenden Arbeit werden Leitfähigkeiten, die vor Erreichen des stationären Zustandes ermittelt werden, als scheinbare

Leitfähigkeiten bezeichnet, weil die gemessenen Ströme nicht nur den Leitungsstrom, sondern auch Verschiebungs- bzw. Polarisationsströme enthalten. Dieser Tatsache wird mit dem Index „app“ (englisch: apparent) Rechnung getragen.

Küchler [8] gibt einen Überblick über die Leitfähigkeiten relevanter Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik (siehe Abbildung 2.1-1). Dort wird der Bereich von entionisiertem Wasser bis zu Gasen angegeben. In dieser Abbildung befinden sich auch die beiden für HGÜ-Komponenten wichtigen Materialien Isolieröl und Pressspan.

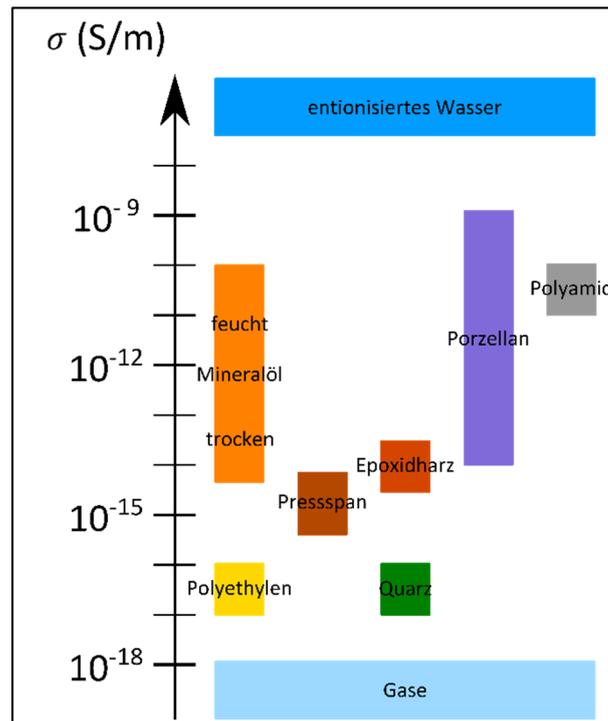


Abbildung 2.1-1: Überblick über die elektrischen Leitfähigkeiten für verschiedene Isolierstoffe bei Raumtemperatur, angelehnt an [8]^{S.267}

Leitfähigkeit wird durch bewegliche Ladungsträger verursacht, die unter Kraftwirkung des elektrischen Feldes beschleunigt und durch Stöße und Streuprozesse wieder abgebremst werden. Je mehr Ladungsträger verfügbar sind, die zum Stromtransport beitragen können, desto höher ist die Leitfähigkeit. Es wird zwischen verschiedenen Leitungsprozessen unterschieden. Auf diese wird in Kapitel 2.2 näher eingegangen, in welchem auch der Bezug zu dem in dieser Arbeit verwendeten Isoliermaterial Pressspan geschaffen wird. Bisher wurden für Pressspan keine Leitungsprozesse in der Literatur diskutiert.

Die Leitfähigkeiten von Isolierstoffen wurden in der Vergangenheit intensiv gemessen [14], [31], [32], [33], [34]. Dabei ergab sich, dass sie sehr stark von verschiedenen Parametern abhängen, beispielsweise von Temperatur, elektrischer Feldstärke, Belastungsdauer, Wassergehalt, Alterungszustand und Vorhandensein von Fremdstoffen bzw. Verunreinigungen. Auch die Elektrodenanordnung und die Vorbehandlung des Isoliersystems [35] haben einen Einfluss auf die gemessene Leitfähigkeit.

In der Literatur findet sich beispielsweise die Idee, die Parametereinflüsse Temperatur T , Feldstärke E und Wassergehalt w auf die elektrische Leitfähigkeit von festen Isolierstoffen mittels Exponentialfunktionen nachzubilden [9]:

$$\sigma(T, E, w) = \sigma_0 \cdot e^{\alpha_T(T-T_0)} \cdot e^{\alpha_E(E-E_0)} \cdot e^{\alpha_w(w-w_0)} \quad (2.1-2)$$

Hierzu werden aus empirischen Messdaten Gewichtungsfaktoren für die drei Exponentialfunktionen bestimmt. Beispielsweise gibt Ohshima [36] für Pressspan einen Wert von $\alpha_T = 0,0978 \text{ K}^{-1}$ für den Temperaturkoeffizienten sowie $\alpha_E = 0,016 \text{ mm/kV}$ für den Feldstärkekoeffizienten bei diversen Untersuchungsbedingungen an. Für den Wassergehaltskoeffizient α_w finden sich in der Literatur keine belastbaren Werte. Für Kabelisoliersysteme werden in der Literatur ähnliche Werte für die Temperatur- und Feldstärkekoeffizienten angegeben [37], obwohl es sich um einen anderen Isolierstoff (hier: vernetztes Polyethylen) handelt. Diese Werte finden erfolgreich in Simulationen Anwendung [38].

Allerdings beschreiben die mittels Gleichung (2.1-2) ermittelten Abhängigkeiten nicht die physikalischen Prozesse im Isolierstoff, sondern sind berechnete Abhängigkeiten, die jeweils nur für die den Funktionen zu Grunde liegenden Versuche mit den jeweiligen Versuchsparametern gültig sind.

Darüber hinaus kann sich die Leitfähigkeit im Laufe des Betriebes einer HGÜ-Komponente beispielsweise aufgrund von Alterung der Materialien stark verändern. Diese Änderungen sind in Gleichung (2.1-2) nicht enthalten und auch nur schwer ermittelbar. Sie bringen eine Unsicherheit in die Dimensionierung der HGÜ-Komponenten und in die Frage nach der Relation zwischen Prüf- und Betriebsbelastung.

Hier knüpft die Idee an, den spezifischen Widerstand und folglich die elektrische Leitfähigkeit von Isolierstoffen zu ändern. Ideal wären gleiche Leitwertverhältnisse kapazitiv (Permittivität) und ohmsch (Leitfähigkeit), was bei einem DC-Sprung und im stationären Fall denselben Feldzustand und somit keinerlei Raumladungsbildung auf Grenzflächen ergäbe [39]^{S.71ff.}. Bemühungen, die elektrische Leitfähigkeit gezielt einzustellen, haben bisher, zumindest auf dem Gebiet der festen Isolierung aus Zellulose, keinen industriellen Erfolg gehabt, auch wenn dies schon seit vielen Jahren versucht wird [39], [40]. Das Hauptproblem liegt darin, dass ein grundlegendes physikalisches Verständnis der Leitungsvorgänge fehlte und es papiertechnologisch nicht gelang, Pressspan mit stabilen, modifizierten Eigenschaften herzustellen. Dieses Verständnis ist für neue technologische Ansätze und für die Umsetzung bisheriger und künftiger Erkenntnisse in industriell verwertbare Lösungen essentiell. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Die potenziellen Leitungsprozesse sowie die Polarisationsmechanismen werden in den Kapiteln 2.2 und 2.3 theoretisch behandelt.

2.2 Leitungsprozesse

Um das Isolierverhalten von Pressspan und seine relevanten Einflussgrößen zu verstehen, wird die Boltzmannsche Transportgleichung herangezogen und auf den Pressspan übertragen. Die potenziellen Leitungsprozesse der Ionen-, Elektronen-Loch- und Protonenleitung werden in den folgenden Kapiteln beschrieben und prinzipielle Abhängigkeiten erörtert.

2.2.1 Boltzmannsche Transportgleichung

In diesem Kapitel wird der Transport von Ladungsträgern theoretisch betrachtet. Dazu wird die Boltzmannsche Transportgleichung herangezogen, welche die grundlegende, physikalische Gleichung zur exakten Beschreibung von Transportprozessen ist. Mit ihrer Hilfe ist die statistische Verteilung von Teilchen in einem Material beschreibbar. Sie wird beispielsweise für die Beschreibung der Teilchenbewegung bei Diffusionsvorgängen verwendet [41]^{S.714f.}. Im Folgenden werden prinzipielle Abhängigkeiten dieser Transportgleichung betrachtet und für das Isoliermaterial Pressspan diskutiert, um eine Vorstellung vom Transportprozess zu bekommen.

Diese Transportgleichung beschreibt Änderungen einer Gleichgewichtsverteilungsfunktion von Ladungsträgern durch äußere Einwirkungen und durch Stoß- bzw. Streuprozesse. Die Verteilungsfunktion f ist abhängig von der Zeit t , dem Ort \vec{x} und dem Impuls \vec{k} : $f(t, \vec{x}, \vec{k})$. Die im Rahmen dieser Arbeit mittels der PDC-Methode (englisch: Polarisation / Depolarisation Current, PDC) durchgeführten Messungen (siehe Kapitel 4.1.1) detektieren die Leitfähigkeit zeitabhängig. Deshalb ist eine zeitliche Änderung der Verteilungsfunktion interessant. Diese wird durch die totale Zeitableitung $\frac{df}{dt}$ beschrieben:

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial t} \vec{x} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{x}} f \right) + \left(\frac{\partial}{\partial t} \vec{k} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{k}} f \right) \quad (2.2-1)$$

mit $\vec{\nabla}_{\vec{x}} f = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} f$ und $\vec{\nabla}_{\vec{k}} f = \begin{pmatrix} \partial/\partial k_x \\ \partial/\partial k_y \\ \partial/\partial k_z \end{pmatrix} f$, wobei ∇ den Nabla-Operator bezeichnet.

Mit $\frac{\partial}{\partial t} \vec{x} = \vec{v}$ und $\frac{\partial}{\partial t} \vec{k} = \frac{\vec{F}}{\hbar}$ in Gleichung (2.2-1) ergibt sich die Boltzmannsche Transportgleichung:

$$\left(\frac{\delta f}{\delta t} \right) + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{x}} f) + \left(\frac{\vec{F}}{\hbar} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{k}} f \right) = \left(\frac{\delta f}{\delta t} \Big|_{\text{Stoß}} \right) \quad (2.2-2)$$

Gleichung (2.2-2) beschreibt das Systemverhalten eines Stoffes, wenn Kräfte auf das System wirken. Die einzelnen Einflussgrößen befinden sich in den jeweiligen Termen dieser Gleichung.

Die Funktion f beschreibt beispielsweise die Verteilung von Elektronen in einem Festkörper, in dem Elektronen zur Leitfähigkeit beitragen, gemäß der Fermi-Dirac-Statistik. Hier sind bereits prinzipielle Abhängigkeiten, wie zum Beispiel die Temperaturabhängigkeit, enthalten.

Der erste Term der Gleichung (2.2-2) beschreibt eine explizite zeitliche Änderung der Verteilungsfunktion. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise Ladungsträger zu unterschiedlichen Zeiten in das System eingebracht werden oder Ladungsträger zeitabhängig abgezogen werden. Somit ändert sich die Verteilungsfunktion zeitlich.

Für $\frac{\partial f}{\partial t} = 0$ befindet sich das System in einem stationären Zustand. Die Verteilungsfunktion ändert sich somit zeitlich nicht. Dies bedeutet jedoch nicht zwingend, dass die Ladungsträger in Ruhe sein müssen. Für den Fall, dass sich genauso viele Phasenraumpunkte, d. h. Ladungsträger mit einem bestimmten Ort und Impuls, in ein Phasenraumelement (anderer Ort und Impuls) hineinbewegen, wie Phasenraumpunkte dieses Element verlassen, ist die Bedingung $\frac{\partial f}{\partial t} = 0$ ebenfalls erfüllt. Für $\frac{\partial f}{\partial t} \neq 0$ ändert sich folglich die Verteilung im Phasenraum. Dies hat aber nicht zwingend etwas mit der Anzahl an Ladungsträgern zu tun.

Der zweite Term der Gleichung (2.2-2), der Driftterm, beschreibt die Änderung der Verteilungsfunktion mit dem Ort. Falls im Festkörper ortsabhängige Ladungsträgerkonzentrationen auftreten (zum Beispiel durch Materialinhomogenitäten oder Metall-Isolator-Kontakt), kommt es zu einer Bewegung der Ladungsträger und damit zu einer Driftgeschwindigkeit \vec{v} . Mit diesem Term können Diffusionsprozesse beschrieben werden, die proportional zur Änderung der Ladungsträgerkonzentration sind. Die Temperaturabhängigkeit der Verteilungsfunktion führt zu einer Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger, falls im Material ein Temperaturgradient auftritt.

Bei dem dritten Term der Gleichung (2.2-2), dem Feldterm, handelt es sich um den Einfluss eines äußeren Feldes (zum Beispiel eines elektrischen Feldes), beschrieben durch die Kraft \vec{F} , die zu einer Beschleunigung von Ladungsträgern führt. In der Gleichung wird mit dem Symbol \hbar das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum bezeichnet. Die Kraft \vec{F} auf einen Ladungsträger, beispielsweise auf ein Elektron mit der Elementarladung e , kann durch ein elektrisches Feld \vec{E} und durch ein magnetisches Feld \vec{B} verursacht werden:

$$\vec{F} = e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.2-3)$$

Der Term auf der rechten Seite von Gleichung (2.2-2) heißt Stoßterm und trägt der Veränderung der Verteilungsfunktion aufgrund von Stößen (elastisch, inelastisch), beispielsweise veranlasst von der Streuung der Elektronen an Gitterdefekten oder Gitterschwingungen (Phononen), Rechnung.

Im Folgenden erfolgt eine qualitative Übertragung dieser prinzipiellen Abhängigkeiten auf das Isoliersystem aus imprägniertem Pressspan und auf die durchgeführten elektrischen Messungen:

Bei den Experimenten in dieser Arbeit wird ein Spannungssprung auf das Isoliersystem gegeben, weshalb sich nach einem kurzen Einschwingvorgang makroskopisch ein stationäres elektrisches Feld einstellt, welches sich mit der Zeit nicht mehr ändert. Der Feldterm vereinfacht sich deshalb, da der Einfluss eines Magnetfeldes in erster Näherung vernachlässigt werden kann.

Zwar werden Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, jedoch wird eine ausreichend bemessene Zeit zur Einstellung von Temperaturen verwendet, damit eine homogene Temperaturverteilung im Pressspan vorliegt. Somit kann eine von Temperaturgradienten veranlasste Drift der Ladungsträger ausgeschlossen werden.

Dennoch kann der Driftterm nicht vernachlässigt werden, da sich aufgrund der inhomogenen Materialprobe Ladungsträgerkonzentrationen örtlich unterscheiden. Außerdem führt der Driftterm dazu, dass sich zwischen Metallelektrode und Isolator ein Kontaktwiderstand ausbilden kann.

Inhomogene Injektionsprozesse an den Elektroden aufgrund von Elektrodenrauigkeiten bewirken eine zeitliche und örtliche Veränderung der Verteilungsfunktion von Ladungsträgern und beeinflussen somit den Feldterm sowie den Driftterm und damit den gemessenen zeitabhängigen Gesamtstrom. Die Injektionsprozesse an den Elektroden sind beispielsweise durch die Fowler-Nordheim-Gleichung beschreibbar [42].

Diese prinzipiellen Abhängigkeiten zeigen die Komplexität der Transportprozesse durch einen Isolator, die durch injizierte Ladungsträger und durch solche, die im Materialvolumen generiert werden, hervorgerufen werden. Zusätzlich wird die Situation durch inhomogene Proben (Faser- und Hohlraumvolumen) kompliziert, wodurch eine theoretische Beschreibung der stattfindenden Prozesse nur bedingt möglich scheint.

In den Kapiteln 2.2.2, 2.2.3 und 2.2.4 werden verschiedene Ladungsträgerarten näher betrachtet und auf ihr Vorkommen für das in dieser Arbeit betrachtete System eines imprägnierten Pressspans bezogen.

2.2.2 Ionenleitung

Wenn die Leitung durch einen Isolierstoff auf Ionen beruht, wird dieser Vorgang Ionenleitung genannt. Ionen sind geladene Atome, Moleküle oder Cluster, welche die Ladungsmenge Q tragen. Diese ist ein Vielfaches n der Elementarladung e . Nach Anlegen eines elektrischen Feldes \vec{E} an eine Isolieranordnung wirkt auf die Ionen eine Kraft \vec{F} :

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} = n \cdot e \cdot \vec{E} \quad (2.2-4)$$

Diese Kraft führt dazu, dass die Ionen unter dem Einfluss des elektrischen Feldes entsprechend der Polarität ihrer Ladung zur Kathode bzw. Anode transportiert werden, falls sie frei beweglich und nicht an ein Molekül gebunden sind.

Ionen-transport fordert also das Vorhandensein von freien Ionen bzw. die Ionisierung von Atomen oder Molekülen. Dies ist beispielsweise für Flüssigkeiten wie Mineralöl gegeben [14], [43], das im Rahmen dieser Arbeit als Imprägnierflüssigkeit verwendet wird. Für gas-imprägnierten Pressspan ist Ionen-transport kaum vorstellbar, da aufgrund der chemischen Zusammensetzung und der Bindungen im Pressspan keine freien Ionen vorhanden sind (vergleiche Kapitel 1.2.2). Deshalb wird die Ionenleitung im Weiteren in Flüssigkeiten betrachtet.

Einerseits führt die auf die Ionen einwirkende Kraft zu einer Ionenbeschleunigung. Andererseits unterliegt die Bewegung in einer viskosen Flüssigkeit einer Reibungskraft \vec{F}_{Reib} , die gemäß dem Stokesschen Gesetz proportional zur Geschwindigkeit \vec{v} der Ionen ist und der beschleunigenden Kraft des elektrischen Feldes entgegen wirkt. Hier gehen des Weiteren der Ionenradius r und die temperaturabhängige Viskosität der Flüssigkeit η ein. Diese Stokes-Reibung beträgt:

$$\vec{F}_{\text{Reib}} = -6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot \vec{v} \quad (2.2-5)$$

Wenn die beschleunigende Kraft \vec{F} , die aufgrund des elektrischen Feldes entsteht, betragsmäßig gleich der Stokesschen Reibungskraft \vec{F}_{Reib} ist, stellt sich eine Gleichgewichtsdriftgeschwindigkeit der Ionen \vec{v}_{Drift} ein:

$$\vec{F} + \vec{F}_{\text{Reib}} = 0 \quad (2.2-6)$$

$$\vec{v}_{\text{Drift}} = \frac{n \cdot e \cdot \vec{E}}{6\pi \cdot \eta \cdot r} \quad (2.2-7)$$

Diese Driftgeschwindigkeit ist also unter anderem abhängig von der Ladung der Ionen, vom angelegten elektrischen Feld und von der Viskosität der Flüssigkeit, welche eine materialabhängige Größe ist.

Die durch das elektrische Feld gerichtete Bewegung der Ionen ist überlagert von einer statistischen Brownschen Molekularbewegung, welche durch die kinetische Energie der Ionen aufgrund der Temperatur der Flüssigkeit zustande kommt. Die Ionen stoßen mit Molekülen der Flüssigkeit und mit anderen Ionen zusammen und werden dadurch von ihrem Kurs in Richtung der Elektroden abgelenkt. Die reale Geschwindigkeit der einzelnen Ionen ist deshalb deutlich größer als die durch die Driftbewegung in einem elektrischen Feld beobachtete Geschwindigkeit.

Driftgeschwindigkeit \vec{v}_{Drift} und elektrische Feldstärke \vec{E} hängen über einen Faktor, die Beweglichkeit der Ionen μ , zusammen:

$$\vec{v}_{\text{Drift}} = \mu \cdot \vec{E} \quad (2.2-8)$$

Die Beweglichkeit der Ionen ist keine Konstante, sondern unter anderem von der Ionenkonzentration und der chemischen Natur der übrigen, anwesenden Ionen abhängig. Häufig wird für Isolierflüssigkeiten eine Hauptionensorte angenommen, deren Beweglichkeit in der Literatur mit $10^{-9} - 10^{-7} \text{ m}^2/\text{Vs}$ angegeben wird [33], [43], [44].

Die Zeit, die ein Ion benötigt, um bei einem angelegten elektrischen Feld E die Gegenelektrode zu erreichen, wird als Transitzeit τ bezeichnet. Sie berechnet sich aus dem Driftweg d und der Ionenbeweglichkeit μ wie folgt:

$$\tau = \frac{d}{\mu \cdot E} \quad (2.2-9)$$

Nun stellt sich die Frage nach der Erzeugung von Ionen. Hierfür gibt es nach Alj et al. [14] prinzipiell zwei Möglichkeiten. Das Verhalten wird im Folgenden anhand von Elektronen exemplarisch für eine Metallkathode beschrieben.

Einerseits können Elektronen an der Grenzschicht zwischen Metallelektrode und Flüssigkeit aus der Elektrode in die Flüssigkeit injiziert werden. Diese lagern sich an bisher neutrale Moleküle an und erzeugen so ein entsprechendes Ion. Diese Ionen bilden eine Raumladungszone in unmittelbarer Nähe zu der Injektionselektrode, da die Injektion schneller ist als die Drift der Ionen zur Gegenelektrode. Erst wenn sie diese Raumladungszone verlassen, tragen sie zum Ladungstransport durch die Flüssigkeit bei [14].

Andererseits werden aufgrund eines angelegten elektrischen Feldes Ionen aus neutralen, im Volumen der Flüssigkeit vorhandenen Ionenpaaren gebildet, die zuerst noch gebunden sind [43]. Im Anschluss werden diese Ionen mit entgegengesetzter Polarität voneinander getrennt [14], was als Dissoziation bezeichnet wird.

Für den Fall des ölprägnierten Pressspans kann Ionenleitung, zumindest in den ölgefüllten Volumina des Isolierstoffs, zum Ladungsträgertransport beitragen. Dabei sind beide Erzeugungsarten der Ionen denkbar.

2.2.3 Elektronenleitung

Bei der Elektronenleitung tragen Elektronen zum Ladungstransport bei. Elektronenleitung durch freie Elektronen, welche nicht an Atome gebunden, sondern ionisiert sind, ist in Flüssigkeiten erst bei sehr hohen Feldstärken denkbar [14]. Ansonsten werden diese an Moleküle gebunden und es bewegt sich somit nicht das Elektron, sondern das Ion durch die Flüssigkeit.

Eine Elektronenleitung in Energiebändern kommt allerdings in kristallinen Festkörpern vor. Wie bei Metallen werden Elektronen im Leitungsband transportiert. Dieses Band kann schon teilweise mit Elektronen besetzt sein (vergleiche Abbildung 2.2-1).

Die Fermienergie E_F beschreibt denjenigen Energiezustand, den Elektronen im betrachteten System und in dessen Grundzustand maximal haben können. Die benötigte Energie E , um ein Elektron in ein höheres Energieniveau zu bringen, in dem es dann zum Ladungstransport beiträgt, ist im Fall von Metallen gering. Es gibt keine Bandlücke zwischen besetzten und unbesetzten Zuständen und die Elektronen knapp über der Fermikante tragen zum Ladungstransport bei. Die Energie für diesen kleinen „Sprung“ liefert bereits die Umgebungstemperatur. Auf eine detaillierte Herleitung und Darstellung der Energiebänder wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und stattdessen auf die Literatur [45] verwiesen.

Anmerkung: Metalle müssen nicht zwingend ein teilweise besetztes Leitungsband haben. Es ist auch eine Überlappung von Valenz- und Leitungsband möglich [46], woraus ebenfalls die hohe elektrische Leitfähigkeit resultiert.

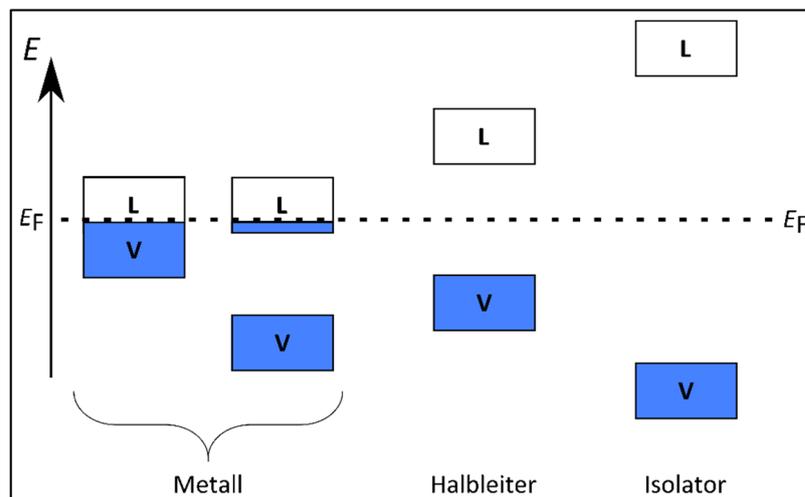


Abbildung 2.2-1: Energiebänder für die Stoffklassen Metall, Halbleiter und Isolator schematisch nebeneinander dargestellt. Mit Elektronen besetzte Zustände sind blau eingefärbt, unbesetzte Zustände weiß. L steht für Leitungsband, V für Valenzband und E_F für Fermienergie.

Der Ladungstransport in Halbleitern erfolgt auch mittels elektronischer Prozesse. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden darunter Transportprozesse verstanden, an denen Elektronen beteiligt sind. Das Valenzband und das Leitungsband berühren oder überlappen einander nicht. Es gibt eine Bandlücke zwischen diesen beiden Energiebändern. Das Valenzband ist ganz mit Valenzelektronen gefüllt (blau). Das Leitungsband ist leer (weiß). Durch das Zuführen von Energie (zum Beispiel in Form von Photonen) werden Valenzelektronen in das höhere Energieniveau des Leitungsbandes gehoben und es entstehen Löcher im Valenzband. Die so erzeugten Elektronen-Loch-Paare können beim Anlegen einer Spannung zum Ladungstransport beitragen.

Der prinzipielle Unterschied zum Isolator, wie er in dieser Arbeit betrachtet wird, ist die Lage und die Größe der Bandlücke zwischen den beiden Bändern. Bei kristallinen Isolatoren ist

die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsbandkante relativ groß. Als Richtwert kann eine Größe der Bandlücke von mehr als 2,6 eV genannt werden [45]. Elektronen können nicht ohne Weiteres über diese Bandlücke gehoben werden. Die thermische Energie ist dafür zu gering. Um ein Elektron in das Leitungsband anzuregen, ist folglich eine sehr hohe Energie nötig. Diese kann nicht durch thermische Energie aufgebracht werden, da die notwendige Temperatur um Größenordnungen über der Zersetzungstemperatur von Pressspan liegt.

Im Folgenden wird die chemische Struktur des Pressspans betrachtet und auf Möglichkeiten der Elektronen-Loch-Leitung hin untersucht:

Pressspan ist kein homogenes, kristallines Material mit definierten Strukturen. Somit sind auch keine scharfen Bandkanten von Valenz- und Leitungsband gegeben, da diese die Folge einer kristallinen Struktur sind. Vielmehr existiert eine Vielzahl von lokalen „Haftstellen“ (englisch: Electronic Traps), von denen sich die meisten in der Gegend der Bänder (flache Haftstellen) befinden. Einige liegen allerdings auch in der Verarmungszone, die in Analogie zum Transport in Bändern als Bandlücke bezeichnet wird. Es handelt sich dort um tiefe Haftstellen. Abbildung 2.2-2 zeigt schematisch die Energiezustände in nichtkristallinen, polymeren Isolatoren.

Des Weiteren können quantenmechanische Tunneffekte vorkommen, bei denen sich Elektronen zwischen zwei lokalisierten Haftstellen bewegen und damit zum Ladungstransport beitragen, auch wenn die Energie des Elektrons kleiner ist als die Potential- bzw. Energiebarriere zwischen diesen beiden Zuständen. Zusätzlich kann es einen Ladungstransport von Elektronen durch Hopping-Prozesse geben, zum Beispiel wenn Ladungsträger thermisch über die Potentialbarriere angeregt werden. Elektronen bewegen sich in diesem Fall nicht kontinuierlich durch das „Leitungsband“, sondern „hüpfen“ von Atom zu Atom bzw. von Molekül zu Molekül.

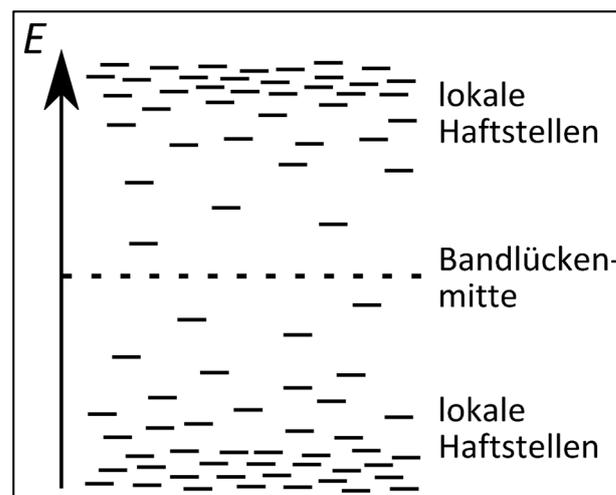


Abbildung 2.2-2: Lokalisierte Energiezustände im nichtkristallinen, polymeren Isolator, angelehnt an [47]

Nun werden zwei unterschiedliche chemische Bindungsarten (σ -Bindung, π -Bindung) näher betrachtet. In den Ketten der Zellulose und auch bei den Hemizellulosen sind Atome über kovalente Einfachbindungen miteinander verknüpft. Die Elektronen sind an die beiden Bindungspartner gebunden und dort lokalisiert (σ -Elektronen). Wenn allerdings Doppelbindungen oder sogar konjugierte Doppelbindungen auftreten, gibt es eine Anzahl an Elektronen (π -Elektronen), die nicht nur zwei Bindungspartnern zuzuordnen sind. Diese Elektronen sind delokalisiert und somit weniger stark gebunden. Allerdings ist bei dieser Bindungsart die räumliche Ausdehnung des Elektronensystems wichtig, da innerhalb dieses Systems die Elektronen gut transportiert werden können [48]. Wenn in einem Molekülverband die Orbitale, in denen sich die π -Elektronen bewegen, überlappen, ist ein Elektronentransport von einem Molekül zum nächsten möglich. Da die Pressspankomponente Lignin aus einem Kohlenstoffsechsering mit delokalisierten Elektronen (π -Elektronen) besteht (vergleiche Kapitel 1.2.2), ist die Elektronen-Loch-Leitung im Isolierstoff Pressspan ein relevanter Leitungsprozess.

2.2.4 Protonenleitung

Wie bereits in Kapitel 1.2.2 erwähnt wurde, besitzt der Isolierstoff Pressspan eine Vielzahl von Hydroxygruppen (OH-Gruppen). Diese können miteinander wechselwirken und dadurch Wasserstoffbrücken ausbilden. Diese Eigenschaft des Pressspans führt zu einem weiteren potenziellen Leitungsprozess, der Protonenleitung.

Wie schon der Name sagt, werden bei der Protonenleitung keine Elektronen transportiert, sondern Protonen (H^+). Das Vorhandensein von Protonen im Isolierstoff ist durch die Autoprotolyse zu erklären. Dabei zerfällt Wasser (H_2O) in einer Gleichgewichtsreaktion zu Oxoniumionen (H_3O^+) und Hydroxidionen (OH^-):



Neben den Hydroxygruppen, die Protonen für den Leitungsprozess in (trockener) Zellulose zur Verfügung stellen [49], können auch die Säuregruppen, die in Hemizellulosen vorhanden sind [50], Protonen im Isolierstoff liefern.

Beim Oxoniumion (H_3O^+) handelt es sich um ein Wassermolekül, welches ein Proton (H^+) aufgenommen hat. Dieses „überschüssige“ Proton wird nun durch Anlegen eines elektrischen Feldes durch den Isolierstoff transportiert. Um das Gleichgewicht aufrecht zu erhalten (siehe Gleichung (2.2-10)), werden stetig Protonen im Pressspanvolumen nachgebildet. Das Proton wird schließlich an der Gegenelektrode durch injizierte Elektronen (e^-) neutralisiert, wobei dimerisierter Wasserstoff (H_2) entsteht:



Der Nachweis von Wasserstoff ist ein Indiz, dass es sich beim betrachteten Leitungsprozess um die Protonenleitung handelt. Dies ist Murphy [49] gelungen. Allerdings berichten andere Autoren von der Schwierigkeit, die unterschiedlichen Effekte, die eine Wasserstoffproduktion hervorrufen, voneinander zu trennen [51].

Der Protonentransport ist mit dem Grotthuß-Mechanismus beschreibbar. Demnach wandern Protonen schneller durch eine wässrige Lösung als andere Ionen. Der Grotthuß-Mechanismus ist in Abbildung 2.2-3 schematisch dargestellt [51]. Im Detail ist er Gegenstand der Forschung [52], [53].

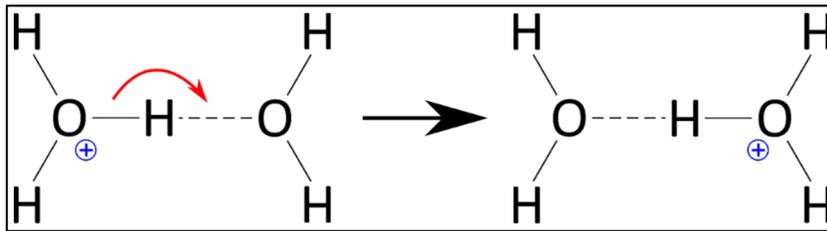


Abbildung 2.2-3: Prinzipieller Ablauf des Grotthuß-Mechanismus. Durch „Umklappen“ von Bindungen kann Ladung transportiert werden.

Das Proton hat eine knapp 2000fach größere Masse im Vergleich zu einem Elektron und damit eine kleinere Beweglichkeit. Allerdings wird bei der Protonenleitung nicht das eigentliche Proton transportiert, sondern es werden Wasserstoffbrückenbindungen gelöst und neu geknüpft [54]. Dadurch scheinen die Bindungen „umzuklappen“, Elektronen verschieben sich und die Ladung wird sehr schnell durch den Isolierstoff transportiert. Ein Proton bzw. ein Elektron muss nicht durch den ganzen Isolierstoff hindurch transportiert werden, sondern nur bis zur nächsten Bindung (vergleiche Abbildung 2.2-3).

In der Literatur wird die Protonenleitung bei verschiedenen Materialien, unter anderem bei Biopolymeren [51] wie der Zellulose erwähnt [49]. Vermutlich kommt es nicht auf die absolute Anzahl an Wasser und Wasserstoffbrückenbindungen an, sondern auf einen durchgängigen Kanal von Wassermolekülen und Wasserstoffbrückenbindungen. Aus der Textilindustrie sind Forschungsarbeiten veröffentlicht, die einen elektrolytischen Prozess als Leitungsprozess in Zellulose formulieren, ähnlich wie er in Wasser und in Eis vorkommt [55]. Für diese beiden Fälle ist die Protonenleitung bereits nachgewiesen.

2.3 Polarisationsmechanismen

Nach einer kurzen Einführung in die Polarisierung von Isolierstoffen werden in den folgenden Kapiteln die Polarisationsmechanismen Elektronen-, Ionen-, Orientierungs- und Grenzflächenpolarisation erklärt. Einige dieser Mechanismen sind bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen detektierbar.

2.3.1 Einführung

Bei der Messung der Leitfähigkeit von Isolierstoffen (siehe Kapitel 4.1.1) werden nicht nur Leitungsvorgänge, sondern auch Polarisationsmechanismen detektiert. Polarisation bewirkt eine Ladungsspeicherung im Material. Erst wenn die Polarisation abgeklungen ist, sind nur noch Leitungsvorgänge messbar.

Bei der Diskussion von Leitungsprozessen werden immer Bewegungen von Ladungsträgern durch den Isolierstoff betrachtet. Diese Ladungsträger können Ionen, Elektronen (Löcher) oder Protonen sein. Im Fall von Polarisation handelt es sich meist um ortsfest gebundene Ladungsträger. Erfahren diese Ladungsträger aufgrund des angelegten elektrischen Feldes eine Kraft, dann werden sie gegeneinander verschoben bzw. ein Stück weit durch den Isolierstoff transportiert, aber nicht vollständig bis zur Gegenelektrode. Letzteres wäre wieder ein Leitungsprozess im eigentlichen Sinne.

Es gibt verschiedene Polarisationsmechanismen. Deshalb wird zuerst eine kurze Einführung in die Wirkungsweise und Begrifflichkeit gegeben, um im Weiteren die unterschiedlichen Polarisationsmechanismen explizit zu diskutieren.

Wie bereits in Kapitel 1.1.3 erwähnt wurde, ist die Permittivität im Vakuum ε_0 die Proportionalitätskonstante zwischen der Verschiebungsdichte \vec{D} und der elektrischen Feldstärke \vec{E} und ist eine Naturkonstante:

$$\vec{D}_0 = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}_0 \quad (2.3-1)$$

Ein äußeres elektrisches Feld richtet die permanenten Dipole aus. Außerdem verschiebt es Ladungsschwerpunkte gegeneinander, was zu sogenannten induzierten Dipolen führt. Permanente, orientierte Dipole und induzierte Dipole wirken dem äußeren elektrischen Feld entgegen und schwächen das Gesamtfeld ab. Die dielektrische Verschiebungsdichte hingegen bleibt konstant, wenn angenommen wird, dass die Ladung auf den Elektroden konstant bleibt.

Somit kommt zu Gleichung (2.3-1) ein weiterer Term \vec{P} hinzu, der elektrische Polarisation bzw. Polarisationsfeld genannt wird. Er ist dem angelegten elektrischen Feld \vec{E} proportional und zeigt in die gleiche Richtung. Es ergibt sich für die gesamte Verschiebungsdichte im Isolierstoff:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (2.3-2)$$

Der Vektor \vec{P} kann als derjenige Anteil der Verschiebungsdichte \vec{D} interpretiert werden, für den das elektrische Feld \vec{E} durch die polarisierten Ladungen kompensiert wird [8].

Zweckmäßigerweise werden die Polarisationsseigenschaften in einem Faktor ε_r zusammengefasst, der als relative Permittivität des Dielektrikums bezeichnet wird, und es wird deshalb definiert:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (2.3-3)$$

Diese relative Permittivität ist allerdings keine Konstante, sondern beispielsweise von Material, Temperatur und Frequenz des angelegten Feldes abhängig. Die relativen Permittivitäten der in dieser Arbeit verwendeten Isolierstoffe liegen zwischen $\varepsilon_r \approx 1$ für Gase (zum Beispiel Luft) und $\varepsilon_r \approx 6,1$ für Zellulosefasern [56]^{S.221}. Je nach Imprägniermedium des Pressspans und je nach Volumenanteil der Imprägnierung nimmt die relative Permittivität des Systems aus Fasern und Imprägnierung Werte zwischen 3 und 5 [56], [57] an.

Im Folgenden wird eine Übersicht über die verschiedenen Polarisationsmechanismen von Isolierstoffen gegeben. Die einzelnen Mechanismen werden bezüglich ihres physikalischen Hintergrunds separiert und qualitativ erläutert. Einige der Polarisationsmechanismen können anschaulich anhand von Formeln dargestellt werden. Die Gesamtpolarisation \vec{P}_{gesamt} setzt sich aus der Addition aller Polarisationsmechanismen \vec{P}_i zusammen, die im jeweils betrachteten Material unter den jeweils betrachteten Bedingungen auftreten:

$$\vec{P}_{\text{gesamt}} = \sum_i \vec{P}_i \quad (2.3-4)$$

Für tiefergehende Herleitungen wird auf die Literatur [45], [58] verwiesen.

2.3.2 Elektronenpolarisation

Ein Atom besteht aus dem Atomkern und der Atomhülle. Der Kern beinhaltet geladene Teilchen (Protonen) und neutrale Teilchen (Neutronen) und ist somit positiv geladen. In der Atomhülle befinden sich negativ geladene Teilchen, die Elektronen. Wirkt nun ein elektrisches Feld auf das Atom, so kommt es zu einer Deformation, da sich der Schwerpunkt der negativen Elektronenhülle gegen den positiven Kern verschiebt. Abbildung 2.3-1 zeigt schematisch die Elektronenpolarisation (EP).

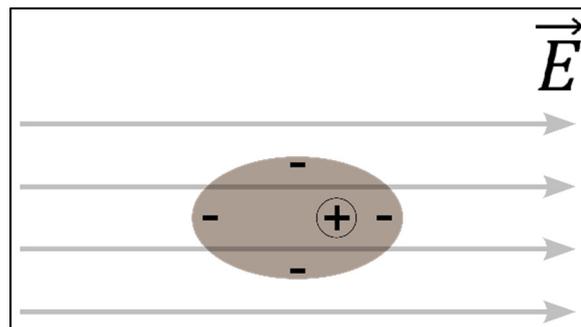


Abbildung 2.3-1: Elektronenpolarisation

Diese Verschiebung aus dem Gleichgewichtszustand ist mittels der Kraftwirkung auf das Atom aufgrund des elektrischen Feldes und mittels der rücktreibenden Kraft aufgrund der Verschiebung der Elektronenhülle gegenüber dem Atomkern berechenbar. Der Atomkern wird infolge der größeren Masse im Vergleich zur Elektronenwolke in erster Näherung nicht verschoben. Umso größer diese Verschiebung der Elektronenwolke ist, desto stärker wird der Werkstoff polarisiert. Fasching [45] zeigt, dass die Elektronenpolarisation formal durch die Konzentration der Atome n , den Radius der Elektronenhülle r , sowie das angelegte elektrische Feld \vec{E} beschreibbar ist:

$$\vec{P}_{EP} = n \cdot 4\pi\epsilon_0 \cdot r^3 \cdot \vec{E} \quad (2.3-5)$$

Diese Art der Polarisation läuft wegen der kleinen Masse der Elektronen in sehr kurzen Zeiten ab. In der Literatur finden sich hier Werte zwischen 10^{-16} s und 10^{-14} s [59]. Da die Elektronen in solch kurzen Zeiten auf die Veränderung des elektrischen Feldes reagieren, ist diese Art der Polarisation in den in Kapitel 6 durchgeführten Leitfähigkeitsmessungen nicht erfassbar. Die Ströme werden aufgrund des Messprinzips der PDC-Methode erst ab einer Sekunde nach Zuschalten der Spannung detektiert.

2.3.3 Ionenpolarisation / Gitterpolarisation

Werden Atome unterschiedlicher Polarität in einem Molekül oder im Kristallgitter bei angelegtem elektrischen Feld gegeneinander verschoben, so wird von Ionenpolarisation oder Gitterpolarisation gesprochen. Abbildung 2.3-2 veranschaulicht diesen Polarisationsmechanismus anhand von regelmäßig angeordneten Ionen im zweidimensionalen Kristallgitter.

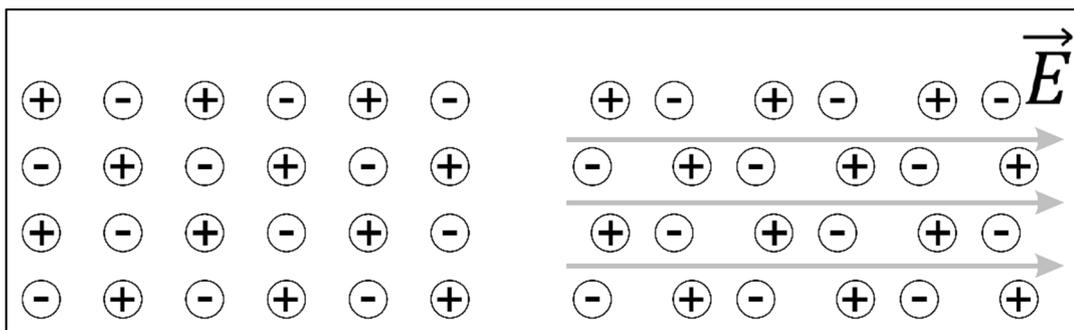


Abbildung 2.3-2: Ionenpolarisation / Gitterpolarisation, regelmäßiges Kristallgitter links, verschobene Ionen rechts

Auch diese Verschiebung der Ionen im Gleichgewicht zwischen der Kraftwirkung und der rücktreibenden Kraft ist als induziertes Dipolmoment zu beschreiben. Fasching [45] stellt folgende Gleichung für die Ionenpolarisation (IP) auf:

$$\vec{P}_{IP} = n \cdot \frac{Q^2}{k_{IP}} \cdot \vec{E} \quad (2.3-6)$$

Dabei ist n die Konzentration, k_{IP} eine Konstante, welche u.a. die Kristallstruktur, den Ionenabstand und die Bindungsenergie berücksichtigt, Q die Ladung des Ions und \vec{E} das angelegte elektrische Feld.

Dieser Polarisationsmechanismus ist zwischen 10^{-14} s und 10^{-11} s [59] abgeschlossen und somit bei den in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen ebenso nicht detektierbar.

2.3.4 Orientierungspolarisation

Befinden sich im Isolierstoff permanente Dipole wie zum Beispiel polare Moleküle, polare Molekülgruppen oder polare Partikel, so werden sie durch Anlegen eines elektrischen Feldes ausgerichtet. Dies wird als Orientierungspolarisation (OP) bezeichnet und ist in Abbildung 2.3-3 dargestellt.

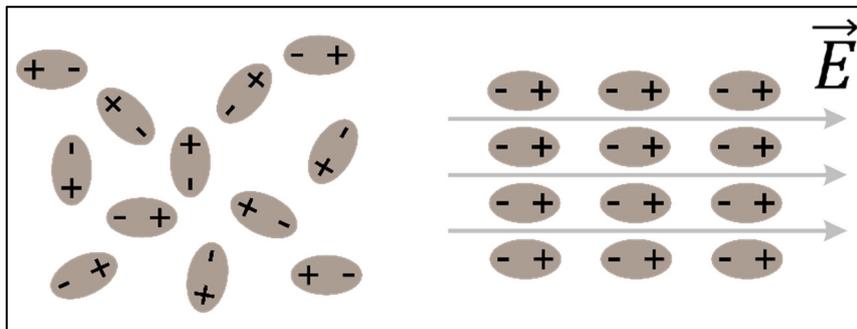


Abbildung 2.3-3: Orientierungspolarisation, ungeordnete Dipole links, ausgerichtete Dipole rechts

Es müssen wiederum zwei Kräfte betrachtet werden: Einerseits die Kraft auf die permanenten Dipole aufgrund des elektrischen Feldes und andererseits die rücktreibende Kraft, welche aufgrund der thermischen Energie zustande kommt, die eine Gleichverteilung der Dipole anstrebt. Die Orientierungspolarisation ist nach Fasching [45] wie folgt beschreibbar:

$$\vec{P}_{OP} = n \cdot \frac{(\vec{p})^2}{3 k_B T} \cdot \vec{E} \quad (2.3-7)$$

Dabei bezeichnet n die Konzentration, \vec{p} das jeweilige Dipolmoment, welches abhängig vom Winkel zwischen permanentem Dipol und angelegtem elektrischen Feld \vec{E} ist, k_B die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur. Auf die Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf Fasching [45] verwiesen.

Bei diesem Polarisationsmechanismus wechselwirken Moleküle oder ganze Molekülgruppen mit dem angelegten elektrischen Feld und die Relaxationszeit beträgt in der Regel zwischen 10^{-11} und 10^{-9} s [46].

Ein typisches polares Molekül ist Wasser, welches in Isolierstoffen auf Zellulosebasis wie dem hier untersuchten Pressspan enthalten ist. Je nach Trocknungsgrad kann die Menge

der gebundenen Wassermoleküle variieren. Außerdem besitzen Zellulose und Hemizellulosen eine große Anzahl an OH-Gruppen, die mehr oder weniger freie, rotierbare, permanente Dipole sind [60]. Wenn ein elektrisches Feld auf eine OH-Gruppe wirkt, greift an beiden Enden des Dipols eine Kraft an, die ein Drehmoment hervorruft und damit eine Ausrichtung der OH-Gruppe bewirkt. Allerdings muss beachtet werden, dass im Pressspan nicht nur freie OH-Gruppen vorkommen, sondern auch viele dieser OH-Gruppen eine Wasserstoffbrückenbindung zum Nachbarzellulosestrang oder zu Wasser eingehen. Somit können diese Bindungen die Orientierung der Dipole behindern.

Beigert [59] gibt benötigte Zeiten für die Ausrichtung dieser permanenten Dipole zwischen 10^{-5} s bis 10^{-2} s für Wasser an. Im Vergleich zu anderen polaren Molekülen oder Molekülgruppen ist das relativ lang. Die Ausrichtungsdauer für OH-Gruppen ist von der Lage im Molekül und den benachbarten Molekülen und Bindungen abhängig. Die genaue Orientierung aller Dipole in einem Isolierstoff ist nur schwer vorhersagbar [58]. Somit kann die Orientierungspolarisation im Vergleich zur Elektronen- und Ionenpolarisation in den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen prinzipiell eine Rolle spielen.

2.3.5 Grenzflächenpolarisation

Isolierstoffe sind nicht völlig homogen. Die Pressspanfaser ist beispielsweise nur in grober Näherung zylinderförmig. In Wirklichkeit gibt es entlang der Faser Orte mit größerem und mit kleinerem Faserdurchmesser und damit mit unterschiedlichen Widerstandswerten. Es gibt Stellen im Pressspan, die begrenzend für die Leitfähigkeit wirken und an denen sich Ladungsträger anhäufen. Der Übergang von einer Faser auf die nächste kann ebenfalls als geänderter Widerstand beschrieben werden.

Makroskopisch betrachtet besteht das Isoliermaterial Pressspan aus Einzelfasern und einem Imprägniermedium (zum Beispiel Mineralöl). Hier treten Grenzflächen auf: Ladungsträger im Öl driften aufgrund des angelegten elektrischen Feldes zu den Gegenelektroden, erreichen diese aber meist nicht, da eine Pressspanfaser früher oder später den Weg versperrt. Somit kommt es zur Ladungsträgeranhäufung an den Grenzflächen Flüssigkeit zu Feststoff, was als Grenzflächenpolarisation bezeichnet wird. Abbildung 2.3-4 verdeutlicht die Grenzflächenpolarisation, bei der driftende Ladungsträger an Barrieren gestaut werden.

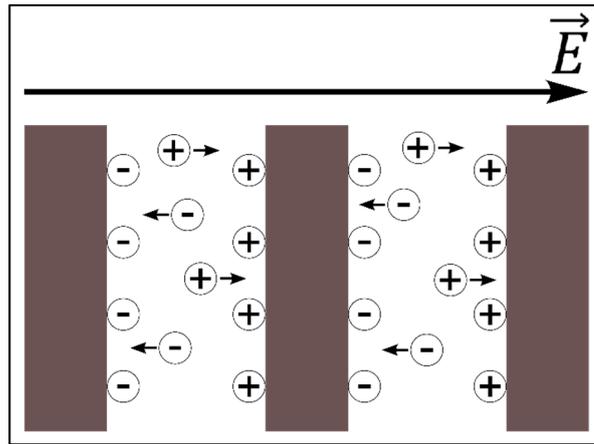


Abbildung 2.3-4: Grenzflächenpolarisation

Dabei ist das Laden von hochohmigen Pressspanfasern über niederohmige Ölkanäle in guter Näherung mit dem Laden eines Kondensators vergleichbar. Da die geometrischen Verhältnisse im Pressspan nicht ausreichend bekannt bzw. zu komplex sind, ist eine analytische Beschreibung der Grenzflächenpolarisation nur bedingt möglich.

Die Zeiten zur Ausbildung der Grenzflächenpolarisation betragen zwischen 10^{-2} s und 10^4 s [59] oder mehr. Diese Zeiten passen zu den empirischen Beobachtungen, dass sich während der Leitfähigkeitsmessungen an Isoliersystemen oft über mehrere Stunden abklingende Ströme zeigen. Somit scheint dieser Polarisationsmechanismus der dominanteste für Pressspanisolierungen zu sein.

2.4 Modellbildung

Die Modellbildung soll das theoretische Wissen über den Isolierstoff Pressspan in Modellen abbilden und mittels Simulation das Verständnis von Leitungsprozessen und Polarisationsmechanismen erweitern. Hier werden die beiden prinzipiellen Modellbildungsverfahren der Feldsimulation und der Netzwerksimulation beschrieben.

2.4.1 Allgemeines

Die Verbindung von dielektrischen Messungen mit Modellen stellt eine geeignete Möglichkeit für eine Optimierung von Isoliersystemen dar. Messdaten bilden die Grundlage, um dielektrisches Materialverhalten mit physikalischen Vorstellungen zu erklären. Die physikalischen Phänomene wie Leitungsprozesse und Polarisationsmechanismen können danach in ein vereinfachtes Modell des Isoliersystems gebracht werden. Anschließend wird das Modell wiederum mit den Messungen verifiziert. Es deckt nun die betrachteten Einflussgrößen und Systemeigenschaften des Isolierstoffs ab und ermöglicht die simulationstechnische Generierung von Parameterabhängigkeiten, ohne weitere Messungen durchführen zu müssen.

Prinzipiell eignen sich zwei Wege zur Beschreibung des Isoliersystems aus imprägniertem Pressspan:

Eine Möglichkeit stellt die Nachbildung der makroskopischen Verhältnisse im Isolierstoffvolumen, bestehend aus Fasern und Imprägniervolumina, in einem geeigneten Simulationstool und die numerische Berechnung des Materialverhaltens mittels Differenzialgleichungen bzw. Differenzialgleichungssystemen dar. Die Programme arbeiten beispielsweise nach der Finite-Elemente-Methode (FEM). Der Vorteil dieser Programme liegt in der direkten Nachbildung der physikalischen Prozesse im Isolierstoff. Nachteilig ist der hohe Aufwand an Voruntersuchungen, um alle Eingangsgrößen wie zum Beispiel Fasergeometrien und -lagen im Pressspan hinreichend genau zu beschreiben. Dies ist für den Isolierstoff Pressspan bisher nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Eine andere Möglichkeit ist die Beschreibung des Isolierstoffs als Black-Box, welche von außen betrachtet das gemessene Materialverhalten zeigt. Die Elemente innerhalb dieser Box werden mit einem Netzwerkmodell gefüllt, die das Materialverhalten hinreichend genau beschreiben, allerdings die Physik der Isolierstoffkomponenten nicht nachbilden können. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass nicht alle Materialkomponenten wie beispielsweise die genaue Lage und Geometrie der Fasern bis ins kleinste Detail erforscht und bekannt sein müssen, das System aber mittels Gleichungen mathematisch genau beschrieben werden kann. Hierbei macht man sich zunutze, dass im Netzwerkmodell idealisierte Bauelemente mit bekanntem Verhalten verwendet und diese deshalb mathematisch korrekt beschrieben werden können. Für den Isolierstoff Pressspan hat sich ein Netzwerk aus Kondensatoren und Widerständen etabliert [34], [58]. Die Kondensatoren stellen dabei in erster Näherung die Pressspankapazität dar, die hauptsächlich über die Ölkanalwiderstände geladen bzw. entladen werden. Einerseits ergeben sich Zeitkonstanten aus Widerständen und Kapazitäten, die das Polarisationsverhalten des Isolierstoffs widerspiegeln, andererseits geben die verwendeten Widerstände eine Information über den Leitungsprozess, wenn die Polarisation abgeklungen und damit alle Kapazitäten geladen sind.

2.4.2 Feldsimulation

Es ist heute Stand der Technik, Verschiebungsfelder, stationäre Strömungsfelder, Umpolfelder und transiente Feldmigrationen mit Finite-Elemente-Programmen zu berechnen. Dabei wird jedoch immer davon ausgegangen, dass sich die Materialien durch eine relative Permittivität ϵ_r und durch eine Leitfähigkeit σ beschreiben lassen. Diese Materialwerte sind zudem oftmals nicht genau genug bekannt und ändern sich bei unterschiedlichen Einflüssen (Temperatur, Feldstärke etc.). Heutzutage werden Feldberechnungen meist nur für die Beschreibung von Sonderfällen wie eines reinen Verschiebungsfeldes, eines reinen Strömungsfeldes und für Grenzflächenpolarisation angewandt.

2.4.3 RC-Netzwerkmodell

Ein RC-Netzwerkmodell von festen Isolierstoffen ist in Abbildung 2.4-1 dargestellt. Die Ersatzschaltbildelemente werden im Folgenden interpretiert, wenn, wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit, Sprungantwortmessungen an Pressspan durchgeführt wurden:

Während des Spannungssprungs fließt ein theoretisch unendlich hoher Strom, allerdings nur für sehr kurze Zeit. Die Vakuumkapazität C_0 ist relevant. Anschließend klingt der Strom (exponentiell) mit der Zeit ab. Hierbei werden Polarisationsmechanismen (siehe Kapitel 2.3) aktiviert. Die Kapazitäten C_i des festen Isoliermaterials werden über Widerstände R_i aufgeladen. Wenn alle Kapazitäten geladen sind, stellt sich ein stationärer Zustand ein, der nur noch von der Leitfähigkeit und damit vom Widerstand R_∞ bestimmt ist. Daraus ergibt sich das dargestellte RC-Netzwerkmodell für einen festen Isolierstoff.

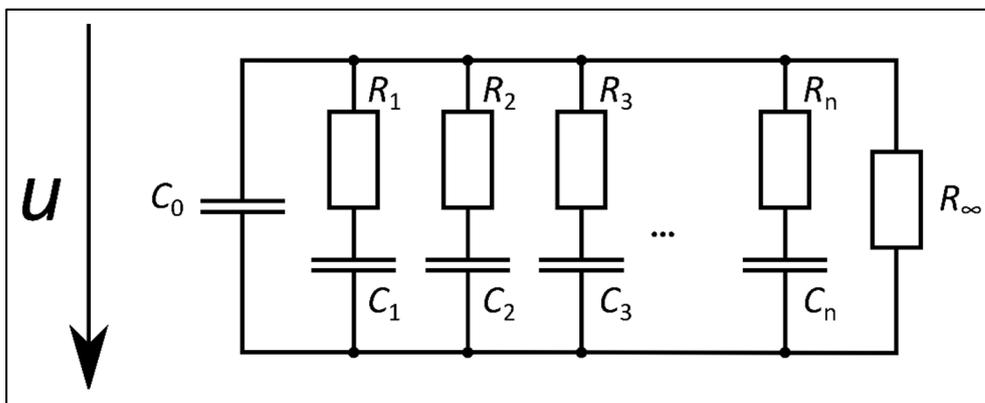


Abbildung 2.4-1: RC-Netzwerkmodell für feste Isolierstoffe

Jedes RC-Glied bildet eine Zeitkonstante $\tau_i = R_i \cdot C_i$, die den i -ten Polarisationsmechanismus beschreibt, indem C_i über R_i geladen und entladen wird. Die Werte der Bauelemente können aus den Sprungantwortmessungen gewonnen werden, indem die gemessenen Ströme durch mehrere Exponentialfunktionen angenähert und deren Zeitkonstanten in die Elemente R_i und C_i mittels eines Algorithmus zerlegt werden. Allerdings handelt es sich hier um ein mathematisches Näherungsverfahren, weshalb die Zeitkonstanten der Exponentialfunktionen keine physikalischen Eigenschaften des Isolierstoffs beschreiben [61].

Anmerkung: Es sei darauf hingewiesen, dass die Kapazität C_0 nicht nur die Vakuumkapazität beinhaltet, sondern darin auch Polarisationsmechanismen zu finden sind, die aufgrund des schnellen Zeitablaufs nicht in die Betrachtung des HGÜ-Isoliersystems einbezogen werden.

Ein auf diese Art und Weise erzeugtes RC-Netzwerkmodell kann für Simulationen herangezogen werden und wird in Kapitel 6.9.2 verwendet. Dabei können beispielsweise Parameter über einen großen Bereich, in dem das Modell gültig ist, variiert werden. Dies würde bei Messungen einen erheblichen zeitlichen Mehraufwand bedeuten.

3 Ziel der Arbeit und methodisches Vorgehen

Betriebsmittel der Hochspannungsgleichstromübertragung, insbesondere Konvertertransformatoren, erfahren neben der Wechsellastbelastung eine überlagerte Gleichspannungsbelastung. Letztere führt dazu, dass nicht nur die Permittivitäten der Materialien, sondern auch die elektrischen Leitfähigkeiten betrachtet werden müssen. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Isoliermaterial Pressspan, dessen von vielen Parametern abhängende elektrische Leitfähigkeit bisher unzureichend erforscht ist. Für das Isoliersystem aus imprägniertem Pressspan sind die Leitungsprozesse bisher nicht ausreichend verstanden. Hieraus ergaben sich die eigenen, wissenschaftlichen Fragestellungen, von denen die erste lautet:

Welche Leitungsprozesse sind im Pressspan denkbar?

Zur Beantwortung dieser Frage wurde eine fundierte Literaturrecherche durchgeführt. Als potenzielle Leitungsprozesse kommen demnach Ionenleitung, Elektronen-Loch-Leitung und Protonenleitung ähnlich dem Grotthuß-Mechanismus in Frage. Hierbei wurden die Erkenntnisse aus anderen Fachdisziplinen, zum Beispiel aus der Textilforschung, auf den in dieser Arbeit untersuchten Pressspan übertragen. In der Materialforschung für die Hochspannungstechnik wurde das Themenfeld der Leitungsprozesse für elektrisch isolierende Feststoffe bislang ungenügend behandelt.

Bisher wurde Pressspan nahezu ausschließlich in ölimprägnierter Form untersucht, da dies die häufigste Einsatzform von Pressspan als elektrische Isolierung ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein völlig neuer Weg gegangen: Es wurde Wert auf die Separation des Einflusses von Pressspan und des Einflusses der Ölimprägnierung auf die elektrische Leitfähigkeit des Isoliersystems gelegt. Nur so kann Pressspan charakterisiert werden und so können fertigungs- sowie anwendungsorientierte Parametereinflüsse auf die Leitfähigkeit mit ausreichender Sicherheit auf die Komponente Pressspan zurückgeführt werden. Hieraus ergab sich die zweite wissenschaftliche Fragestellung:

Wie kann die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan unter unterschiedlichen Fluiden erfasst werden?

Hierfür wurde ein neuer Versuchsstand entwickelt, der die Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit von Pressspan, welcher nicht ölimprägniert ist, ermöglicht. Viele Parameter beeinflussen die Leitfähigkeit von Pressspan. Deshalb müssen viele dieser Größen, im Besonderen der Wassergehalt des Prüflings und seine Temperatur, bei den Messungen der elektrischen Leitfähigkeit konstant gehalten werden. Hierbei lag die Schwierigkeit im Aufbau eines neuen Versuchsstands. Es musste ein hermetisch abgeschlossenes System aufgebaut werden, in dem die Leitfähigkeit von Pressspan unter definierten Versuchsbedingungen detektiert werden konnte. Zur Gewährleistung der Konstanz anderer Parameter sollte der Versuchsstand

zusätzlich eine Ölbefüllung ermöglichen, die es erlaubt, ölimprägnierten Pressspan zu messen, ohne den Prüfling oder Prüfstand wechseln zu müssen. Damit wurde es möglich, den Einfluss der Imprägnierung auf die Leitfähigkeit von Pressspan zu ermitteln.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Pressspan herangezogen, um eine Vorstellung der Geometrieverhältnisse der Fasern und Hohlräume im Material zu erhalten und damit potenzielle Wege des Ladungstransports zu identifizieren. Daraus ergab sich die dritte wissenschaftliche Fragestellung:

Welchen Einfluss hat der geometrische Aufbau des Pressspans aus Fasern und Hohlräumen auf die elektrische Leitfähigkeit?

Zu diesem Zweck sollte eine Vorstellung der potenziellen Wege des Ladungstransports im Pressspan geschaffen werden. Dazu mussten Prüflinge modifiziert werden, um die Leitfähigkeit von Pressspan mehrheitlich entlang der Fasern (in Faserrichtung) und mehrheitlich quer zu den Fasern zu erfassen. Dieses Experiment setzte die geometrische Faserlage mit der elektrischen Größe Leitfähigkeit in Beziehung. Darüber hinaus konnte der Volumenanteil der Fasern zum Volumenanteil der Hohlräume im Pressspan einen Aufschluss über den Leitungsprozess geben. Hierzu wurden Prüflinge mit unterschiedlicher Dichte elektrisch charakterisiert. Eine weitere Möglichkeit für die Gewichtung der beiden Komponenten Fasermaterial und Imprägniermedium stellte die Variation der Ölleitfähigkeit dar. Deshalb wurde Pressspan mit unterschiedlichen Ölen bekannter Leitfähigkeit imprägniert und der Effekt auf die Leitfähigkeit des Gesamtsystems untersucht.

Außerdem wurden die chemische Struktur und die Zusammensetzung des Pressspans näher betrachtet, um gezielt potenzielle Leitungsprozesse untersuchen zu können. Es ergab sich die vierte wissenschaftliche Fragestellung:

Wie beeinflusst die chemische Pressspanzusammensetzung die elektrische Leitfähigkeit?

Pressspan besteht chemisch gesehen hauptsächlich aus Zellulose, Hemizellulosen und Lignin. Dem Lignin werden in der Literatur halbleitende Eigenschaften zugeschrieben, weshalb die Betrachtung dieses Bestandteils für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit relevant war. Zu diesem Zweck wurden Prüflinge aus Pressspan mit unterschiedlichem Ligningehalt hergestellt. Die UV/Vis-Spektroskopie konnte zur Identifizierung des unterschiedlichen Ligningehalts der Prüflinge erfolgreich herangezogen werden. Im Anschluss sollte der Einfluss des Ligningehalts auf die Leitfähigkeit von Pressspan untersucht werden. Lignin wurde in der Literatur bisher nicht als möglicher Einflussparameter auf die elektrische Leitfähigkeit betrachtet.

Darüber hinaus beeinflussen viele anwendungstechnische Parameter die Leitfähigkeit von Pressspan. Hier ist an erster Stelle der Wassergehalt zu nennen. Außerdem sind die Parameter Temperatur und elektrische Feldstärke in diesem Zusammenhang interessant.

Es ergab sich die fünfte wissenschaftliche Fragestellung:

Wie beeinflussen anwendungstechnische Parameter die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan? Welches sind die relevanten Einflussgrößen?

Es wurden Pressspanprüflinge mit unterschiedlichem Wassergehalt präpariert und anschließend elektrisch charakterisiert. Die Ergebnisse wurden mit möglichen Leitungsprozessen in Verbindung gebracht. Der Leitungsprozess in Pressspan ist thermisch aktiviert. Folglich ist die Leitfähigkeit eine temperaturabhängige Größe. Ein geeignetes Netzwerkmodell sollte es ermöglichen, die zeitabhängigen Leitfähigkeiten nachzubilden und die Temperaturabhängigkeit ausreichend genau zu beschreiben. Dies hat den großen Vorteil, dass die oft sehr geringe Endleitfähigkeit von Pressspan durch eine geeignete Simulation bestimmt werden kann. Außerdem wurde der Feldstärkeinfluss auf die Leitfähigkeit von unimprägniertem Pressspan und von ölimprägniertem Pressspan erfasst und verglichen, um eine Information über den Transportmechanismus zu erhalten.

Die Beantwortung der oben genannten Fragen soll einen Beitrag dazu leisten, die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan mit der makroskopischen Struktur aus Fasern und Hohlräumen und mit der mikroskopischen Pressspanzusammensetzung in einen physikalisch begründbaren und messtechnisch erfassbaren Zusammenhang zu bringen. Außerdem soll sie eine Bewertung der einzelnen Einflussgrößen im Hinblick auf die Leitungsprozesse im Pressspan ermöglichen. Die Quantifizierung und das Verständnis der Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan stellen den ersten Schritt dar, um in Zukunft Materialien mit definierten Leitfähigkeiten und erwünschtem dielektrischen Verhalten herzustellen. Denn dies ist erst möglich, wenn die Prozesse und Mechanismen hinter den messtechnisch erfassbaren Größen verstanden sind.

4 Experimentelle Methoden und Auswertungsmethoden

Dieses Kapitel beschreibt die experimentellen Methoden und die angewandten Auswertungsmethoden der vorliegenden Arbeit. Hierbei wird auf Leitfähigkeitsmessungen und auf die Übertragung der theoretischen Grundlagen der Modellbildung auf den Isolierstoff Pressspan eingegangen. Außerdem werden die Rasterelektronenmikroskopie und die UV/Vis-Spektroskopie als Hilfsmittel zur Erlangung eines tief gehenden physikalischen Verständnisses der Leitungsprozesse und der Polarisationsmechanismen im Pressspan beschrieben.

4.1 Leitfähigkeitsmessungen

Die Kenntnis der elektrischen Leitfähigkeiten wird benötigt, um das Materialverhalten von Isolierstoffen unter Gleichspannungsbelastung beschreiben zu können. Zu diesem Zweck werden eine Norm sowie die sogenannte PDC-Methode (englisch: Polarisation / Depolarisation Current, PDC) herangezogen. Dazu sind neue Versuchsstände entwickelt und die Prozesstechnik weiterentwickelt worden, was in den folgenden Unterkapiteln beschrieben wird. Außerdem wird eine Übersicht über die verwendeten Prüflinge präsentiert.

4.1.1 Messmethoden der elektrischen Leitfähigkeit

Die Erfassung des spezifischen Widerstands bzw. der elektrischen Leitfähigkeit kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Das Messverfahren nach Norm IEC 60093 [62] sowie das im Rahmen dieser Arbeit verwendete PDC-Verfahren dienen der Bestimmung der Materialleitfähigkeit und werden im Folgenden erklärt.

Messung des Durchgangswiderstands nach IEC 60093

Die Norm IEC 60093 [62] beschreibt ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Durchgangs- und des Oberflächenwiderstands von festen, elektrischen Isolierstoffen. Aus den gemessenen Größen Strom und Spannung sind der spezifische Durchgangswiderstand und der spezifische Oberflächenwiderstand zu ermitteln. Aus dem spezifischen Durchgangswiderstand ist die Leitfähigkeit berechenbar. Sie ist der Kehrwert des spezifischen Durchgangswiderstands. Somit ist das Prüfverfahren dieser Norm auch auf Leitfähigkeitsmessungen an Pressspan anwendbar.

Gemäß der Norm sollen die Widerstände ermittelt werden, sobald ein konstanter Strom durch das Isoliermedium fließt. Die Strom-Spannungsmessung wird als geeignete, direkte Messung vorgeschlagen. Alternativ ist ein Messverfahren mittels Brückenschaltung und

Stromabgleich möglich, welches als indirekte Messung bezeichnet wird. Als Messzeiten werden 1, 2, 5, 10, 50 und 100 Minuten genannt, je nachdem, wann sich ein stationärer Zustand im Isoliersystem eingestellt hat. Ist dieser Zustand auch nach 100 Minuten noch nicht erreicht, so soll nach Norm der Durchgangswiderstand als Funktion der Zeit nach Anlegen der Spannung angegeben werden. Die Spannungen sollen 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 oder 15000 V annehmen, wobei die Spannungsquelle stabilisiert und deren Verschiebungsstrom gegen die zu erwartenden Ströme durch das Isoliermedium zu vernachlässigen sein müssen. Die am häufigsten verwendeten Spannungen sind nach Norm 100, 500 und 1000 V.

Anmerkung: Aufgrund lang andauernder Polarisationsmechanismen in Feststoffen ergeben sich Ströme durch das Isoliersystem, die mit der Zeit nur langsam abklingen. Die daraus berechneten Leitfähigkeiten hängen nicht nur vom Leitungsstrom durch das Isoliersystem ab, sondern erfahren eine Überlagerung mit Polarisationsströmen verschiedener Polarisationsmechanismen. Leitfähigkeiten, die vorzeitig aus Polarisationsströmen nach endlichen Zeiten ermittelt werden, sollten eigentlich als scheinbare Leitfähigkeiten bezeichnet werden.

Diese Norm lässt verschiedene Elektrodenmaterialien und -geometrien zu, abhängig von der Form und der Zusammensetzung des Isolierstoffs. Um vom gemessenen Durchgangswiderstand R auf den spezifischen Widerstand ρ schließen zu können, müssen des Weiteren Elektrodenflächen A und Prüflingsdicke d hinreichend genau erfasst werden. Über folgende Gleichung ist dieser Materialwert anschließend zu berechnen:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{d} \quad (4.1-1)$$

Die Norm führt außerdem an, dass sich die so ermittelten Widerstände mit der Temperatur des Isolierstoffs und mit dessen Wassergehalt ändern können. Eine geeignete Konditionierung der Prüflinge sowie guter Elektrodenkontakt mit dem Materialprüfling ist wichtig.

Leitfähigkeitsmessungen nach den heutigen Normen (zum Beispiel IEC 60093 [62], IEC 60247 [63] oder IEC 61620 [64]) entsprechen im Besonderen bei Isolieröl und Feststoff auf Zellulosebasis (zum Beispiel Pressspan) nicht den Bedingungen der HGÜ-Beanspruchungen, da für Leitfähigkeitsmessungen oft nicht die Betriebsfeldstärken verwendet werden und die Messdauer nicht ausreicht, um stationäre Zustände zu erreichen. Deshalb wird ein Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Rahmen dieser Arbeit verwendet, welches diese Unterschiede zwischen HGÜ-Beanspruchung und Messbeanspruchung minimiert.

Neben den in der Norm IEC 60093 [62] vorgeschlagenen Strommessverfahren mit konstanter Spannung gibt es weitere Messverfahren, beispielsweise Strommessungen im Frequenzbereich oder Messverfahren, die andere dielektrische Kenngrößen erfassen, mit deren Hilfe auf die Leitfähigkeit geschlossen werden kann. Sie sollen hier jedoch nicht weiter betrachtet werden und es wird stattdessen auf die Literatur [65] verwiesen.

Erfassung der Leitfähigkeit mittels Messungen im Zeitbereich

Im Folgenden wird das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit näher betrachtet, bei dem Ströme bzw. Leitfähigkeiten im Zeitbereich erfasst werden und das sowohl in der Forschung als auch in der Industrie Anwendung findet. Dieses Verfahren wird PDC-Analyse (Polarisations- und Depolarisationsstromanalyse) genannt.

Bei der PDC-Analyse wird ein Spannungssprung an eine zu testende Anordnung gelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Plattenkondensatoranordnung mit homogenem elektrischen Feld zwischen den Elektroden verwendet. Der Strom durch das sich zwischen den Elektroden befindliche Isoliermaterial, bestehend aus Polarisations- und Leitungsströmen, wird kontinuierlich erfasst. Wie in der Norm IEC 60093 [62] postuliert, handelt es sich um einen zeitlich abklingenden Strom. Anfangs dominieren bei polarisierbaren Isoliermaterialien mit ausreichend großen Zeitkonstanten die Verschiebungsströme aufgrund von Polarisationsmechanismen. Dem kleinen Leitungsstrom wird ein größerer Polarisationsstrom überlagert. Im stationären Zustand besteht der Strom nur noch aus dem Leitungsstrom, da Verschiebungsströme abgeklungen sind (vergleiche Kapitel 1.1.3). Mit dieser Messmethode lassen sich die für HGÜ-Betriebsmittel relevanten flüssigen und festen Isolierstoffe untersuchen.

Abbildung 4.1-1 zeigt das Spannungsprofil und die Stromantwort einer PDC-Messung. Es werden hier drei Bereiche unterschieden.

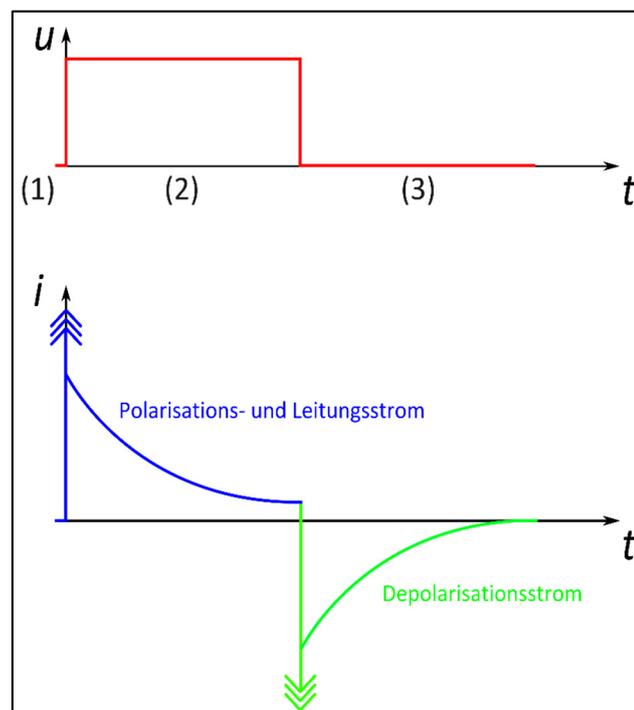


Abbildung 4.1-1: Prinzip der PDC-Messung. Oben: Spannungsverlauf, unten: Stromantwort

In Phase (1) liegt noch keine Spannung am Prüfling an. Diese Phase dient der Herstellung eines Gleichgewichtszustands, wie zum Beispiel der Entladung aller Polarisierung und elektrostatischer Aufladung, die durch das Einbringen des Prüflings in die Testzelle oder durch vorherige Beanspruchungen entstanden sind. Außerdem muss solange gewartet werden, bis die Materialprobe die gewünschte Temperatur angenommen hat. Phase (2) wird Polarisationsphase genannt. Hier wird ein positiver Spannungssprung an die Anordnung gelegt und ein Strom wird aufgrund von Polarisierung und Wanderung von Ladungsträgern getrieben, welcher mit der Zeit abklingt. Der Strom besteht aus der Summe von Leitungs- und Polarisationsstrom. Nach einer gewünschten, vordefinierten Zeit wird die Spannung abgeschaltet und der Prüfling kurzgeschlossen, Phase (3). Jetzt fließt ein Entladestrom, der Depolarisationsstrom, welcher das entgegengesetzte Vorzeichen des Stroms in Phase (2) besitzt. Da der Gleichstromwiderstand kurzgeschlossen ist, gibt es keinen Leitungsstromanteil mehr. Der Depolarisationsstrom beinhaltet die Information über die während der Phase (2) gespeicherte Ladungsmenge.

Aus den ermittelten Messwerten für Spannung U und Strom i in Phase (2) lässt sich im stationären Zustand die elektrische Leitfähigkeit σ aus dem Stromendwert mit Hilfe der Geometriedaten der Messanordnung (Prüflingsdicke d , effektive Elektrodenfläche A) berechnen, siehe auch die Herleitung in Kapitel 1.1.3:

$$\sigma = \frac{d}{A} \cdot \frac{1}{R} = \frac{d}{A} \cdot \frac{i_{t \rightarrow \infty}}{U} \quad (4.1-2)$$

Leitfähigkeiten, die vorzeitig aus Polarisationsströmen nach endlichen Zeiten ermittelt werden, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit als scheinbare Leitfähigkeiten bezeichnet (englisch: apparent, Index „app“ in den Diagrammen). Falls der stationäre Zustand zum Ende der Messung nicht erreicht wurde, ist eine Abschätzung dieser Endwerte aus den letzten gemessenen Stromwerten möglich. Eine schnellere Konvergenz gegen einen Endwert wird durch die Bildung der Betragsdifferenz aus dem Polarisationsstrom und dem um die Ladezeit verschobenen Depolarisationsstrom für $t > 0$ erreicht. Zur Unterdrückung von Störeinflüssen dient die Betrachtung der Differenz der Ladungsmengen, die während der Phase (2) und der Phase (3) geflossen sind (englisch: Charge Difference Method, CDM [66]). Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen reichte die Berechnung von Leitfähigkeiten aus Stromwerten aus und die Betrachtung der Ladungsmengen führte nicht zu deutlich besseren Abschätzungen der Leitfähigkeiten. Aus diesem Grund wurde die CDM nicht angewandt.

Kernpunkt dieser Arbeit ist die Bestimmung der Leitfähigkeit, weshalb auf die Messung im Frequenzbereich verzichtet werden kann, da schnelle Vorgänge nicht erfasst werden müssen. Die Beanspruchungen des Isoliersystems bei Messungen nach der PDC-Methode sind bezüglich der Feldstärkebelastung ähnlich den HGÜ-Beanspruchungen. Außerdem wird die

Messdauer meist so lang gewählt, dass stationäre Zustände erreicht werden. Messungen nach der PDC-Methode reichen aus, um die nötigen Systeminformationen zu ermitteln.

4.1.2 Versuchsaufbauten

Die verwendete Messzelle für die Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit von Isolierstoffen mittels einer Sprungantwortmessung ist in Abbildung 4.1-2 zu sehen. Hierbei liegt der Feststoffprüfling (zum Beispiel Pressspan) auf der hochspannungsführenden Elektrode bzw. wird eine definierte Spaltbreite bei der Messung an Flüssigkeiten (zum Beispiel Isolieröl) mittels Abstandshalter eingestellt. Zur Strommessung wird die Messelektrode auf den Prüfling bzw. auf die Abstandshalter gesetzt. Diese ist in Schutzringanordnung zur Vermeidung von Feldinhomogenitäten ausgeführt. Im Fall von Feststoffprüflingen wird die Messelektrode mit Bleigewichten beschwert. Durch den erzeugten Anpressdruck der Elektrode auf den Prüfling wird ein Spalt zwischen Elektrode und Prüfling vermieden, der beispielsweise aufgrund einer Wölbung des Prüflings entsteht. Diese Elektrodenanordnung wird in einen Glasexsikkator gebaut, durch welchen die Zuleitungen für Spannung und Strom sowie ein Temperaturfühler zur Überwachung der Prüflingstemperatur geführt werden. Dieser Aufbau wird in einen Wärmeschrank bzw. Vakuum-Wärmeschrank zur Einstellung definierter Versuchsparameter gebaut. Neben der Temperaturüberwachung ist auch eine Überwachung von Teilentladungen (TE) möglich. Das Spannungskabel sowie die Messleitungen werden gut geschirmt verlegt und gegen Überspannungen und Überstrom geschützt. Entsprechende Schutzeinrichtungen sind in die Versuchsstände eingebaut.

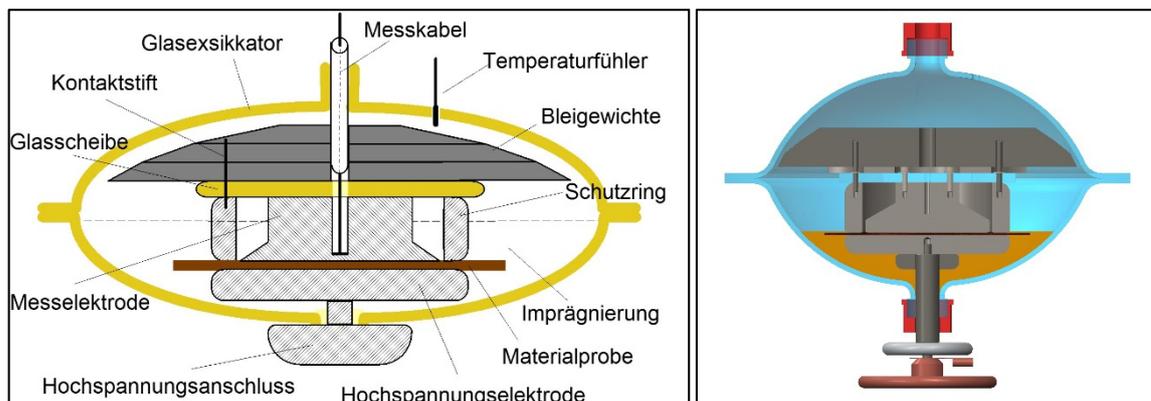


Abbildung 4.1-2: Querschnitt der Messzelle für Leitfähigkeitsmessungen, schematisch links, CAD-Zeichnung rechts

In der Polarisationsphase wird über eine stabilisierte Spannungsquelle die Hochspannung an die untere der beiden Elektroden (siehe Abbildung 4.1-2) angelegt. Mit dem PDC-Analyser [67] wird der Strom aufgezeichnet, der auf den Prüfling fließt und sich aus dem Polarisationsstromanteil und dem Leitungsstromanteil zusammensetzt. Die Auflösung dieses Geräts liegt bei 1 pA und bei maximal 0,5 % des gemessenen Stromes. Der Messstrom von 1 pA entspricht bei einer angelegten Spannung von 0,1 kV und bei der verwendeten

Elektrodenanordnung einer Leitfähigkeit von circa 2,5 fS/m. In der anschließenden Depolarisationsphase wird die Hochspannungselektrode auf Erdpotential gelegt und der Depolarisationsstrom gemessen. Das Messprinzip ist detaillierter in Kapitel 4.1.1 beschrieben.

Da die Ströme durch Isoliersysteme wie den in dieser Arbeit verwendeten Pressspan meist einen exponentiell abnehmenden Verlauf zeigen, bietet sich für grafische Darstellungen der PDC-Messungen ein Diagramm im doppellogarithmischen Maßstab an. Dabei werden die Ströme im Betrag und der Depolarisationsstrom um die Ladezeit verschoben dargestellt, um Polarisations- und Depolarisationsphase besser miteinander vergleichen zu können.

Für die Leitfähigkeitsversuche wurden zwei Prüfstände aufgebaut. Abbildung 4.1-3 zeigt schematisch die Versuchszelle (1). Hier besteht die Möglichkeit, mittels Klimagerät und Wärmeschrank die Temperatur von 15 °C bis circa 100 °C einzustellen. Die Messzelle befindet sich während der Messung im Wärmeschrank, in welchem die Luft, die die Messanordnung umgibt, temperiert wird. In dieser Versuchszelle sind Spannungen bis 65 kV möglich, indem die interne Spannungsquelle des PDC-Analyzers als Steuerspannung für ein externes Hochspannungsnetzteil verwendet wird. Die am Prüfling angelegte Spannung, die Temperatur und eventuelle Teilentladungen werden protokolliert.

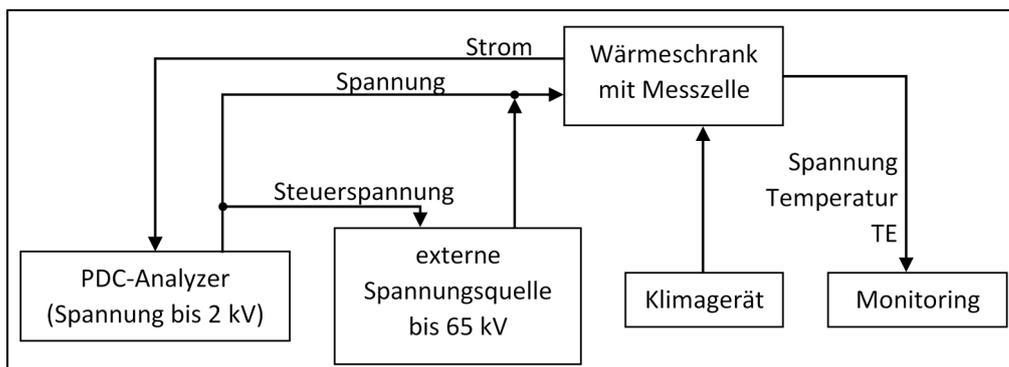


Abbildung 4.1-3: Schematische Darstellung des Prüfstands für Leitfähigkeitsmessungen, Versuchszelle (1), mit Spannungen bis zu 65 kV

In Abbildung 4.1-4 ist die Versuchszelle (2) dargestellt, in welcher ein vakuum- und gasdichter Wärmeschrank zur Verfügung steht. Auch hier dienen Klimagerät und Wärmeschrank zur Erreichung von Temperaturen zwischen 20 °C und circa 95 °C. Mit dieser Versuchszelle sind Messungen der Leitfähigkeit unter Vakuum (0,1 mbar) durchführbar, wie es bisher nicht möglich war und auch in der Literatur nicht berichtet wird. Ein fester Isolierstoff (zum Beispiel Pressspan) kann nun erstmals unter verschiedenen, imprägnierenden Fluiden gemessen werden. Eine Befüllung des Vakuum-Wärmeschranks und damit der Messzelle mit Gasen (zum Beispiel getrocknete Luft, synthetische Luft bestehend aus 80 % Stickstoff und 20 % Sauerstoff oder Edelgasen) ist ebenfalls möglich. Außerdem ist eine Vorrichtung zur Ölbefüllung der Messzelle inklusive Filter und Dosierventil eingebaut. Nun kann der Einfluss der imprägnierenden Fluide auf den Pressspan untersucht werden, ohne den Prüfling und den Versuchsstand wechseln zu müssen. Somit sind die Prüfbedingungen sowie der Prüfling

für alle Imprägnierarten gleich. In dieser Versuchszelle sind aufgrund begrenzender Isolationsabstände Spannungen bis 2 kV möglich.

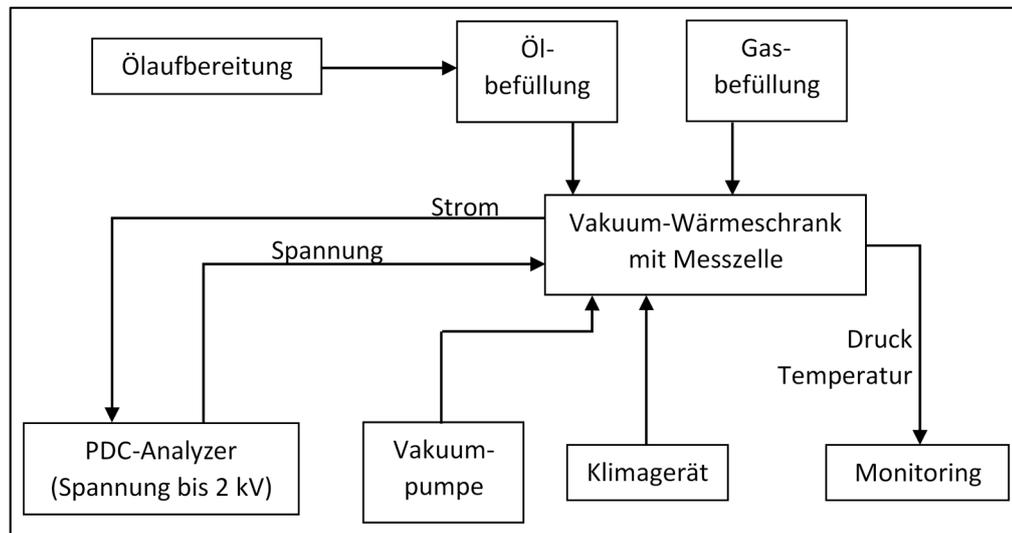


Abbildung 4.1-4: Schematische Darstellung des Prüfstands für Leitfähigkeitsmessungen, Versuchszelle (2), mit der Möglichkeit zur Evakuierung und zur Gas- und Ölbefüllung

Mit diesen beiden Versuchszellen ist es möglich, Leitfähigkeiten von HGÜ-Isolierkomponenten systematisch zu untersuchen, indem die relevanten Parameter wie zum Beispiel die Temperatur, die Beanspruchungszeit, die elektrische Feldstärke, der Wassergehalt der Prüflinge und nun erstmals auch das Imprägnierfluid gezielt verändert werden. Allerdings sind die Vorbereitung der Messzelle (Dauer der Reinigung: 2 Stunden, Dauer der Vortrocknung: circa 12 Stunden), die Konditionierung der Prüflinge (Dauer abhängig vom gewünschten Zustand) sowie die Messungen (Dauer in dieser Arbeit üblicherweise 9 Stunden pro Einzelmessung) relativ zeitaufwändig.

4.1.3 Prozesstechnik

Im Folgenden werden die Reinigung der verwendeten Messzelle, die Trocknung und die Konditionierung der Prüflinge sowie das Imprägnierverfahren beschrieben. Mit Hilfe dieser Verfahrensschritte ist eine reproduzierbare Bestimmung von Leitfähigkeiten möglich.

Reinigung

Bevor eine Leitfähigkeitsmessung gestartet werden kann, müssen Messeinrichtungen vorbereitet und Prüflinge konditioniert werden, um repräsentative, aussagekräftige und reproduzierbare Resultate zu erhalten. Verunreinigungen können die Leitfähigkeitsmesswerte erhöhen, weshalb Messeinrichtungen gründlich gereinigt werden müssen. Besonders diejenigen Komponenten, die in direktem Kontakt zum Prüfling stehen, beispielsweise die Elektroden und der Schutzring, aber auch alle anderen Komponenten dürfen keine Schmutzreste, Entladespuren oder andere Fremdstoffe enthalten. In Anlehnung an die

Norm IEC 60247 [63], welche die Messung des Gleichstromwiderstands von Isolierflüssigkeiten behandelt, wird die Messzelle in Einzelteile zerlegt und zuerst mit Aceton gereinigt, um unpolare Stoffe wie Isolieröl zu entfernen. Anschließend werden alle Komponenten mit heißem Leitungswasser gesäubert, unter anderem um mögliche Acetonreste zu beseitigen. Zuletzt folgt ein Reinigungsdurchgang mit destilliertem Wasser zum Abwaschen möglicher Ionenrückstände und Fremdpartikel, die im Leitungswasser enthalten waren.

Trocknung und Konditionierung

Neben der Reinigung der Messzelle müssen die Prüflinge definierte und reproduzierbare Zustände annehmen. Dafür spielen Trocknung und Konditionierung eine wichtige Rolle, da durch beide Prozesse der Wassergehalt im Pressspan beeinflusst wird. Der Wassergehalt der hygroskopischen Prüflinge hat einen leitfähigkeitserhöhenden Einfluss und wird in Kapitel 6.8 näher behandelt.

Zuerst müssen die Prüflinge aus Pressspan auf die gewünschte Geometrie zugeschnitten werden. Hierbei soll der Prüflingsdurchmesser größer als der Elektrodendurchmesser sein, um mittels einer ausreichend langen Kriechstrecke Überschlänge zu vermeiden und das Abschneiden eines Pressspanstreifens zum Zwecke der Wassergehaltsbestimmung zu ermöglichen [26]. Nach dem Zuschneiden der Prüflinge werden nach Norm IEC 60641-2 [68] vor jeder Messreihe eine Trocknung und eine Konditionierung der Prüflinge durchgeführt. Prüflinge aus Pressspan mit einer Dicke von 1 mm werden im Wärmeschrank bei 105 °C und 0,1 mbar mindestens 24 Stunden vorgetrocknet. Bei Prüflingen mit höherer Dicke wurden die Trocknungszeiten verlängert. Überhöhte Temperaturen führen zur Zersetzung der Pressspankomponenten. Aus diesem Grund wird bevorzugt, bei 70 °C und 0,1 mbar, dafür dann aber für längere Zeiten (mehrere Tage), vorzutrocknen. Nach der Vortrocknung werden die Prüflinge in die Messzelle eingebaut und nachgetrocknet. Hierbei wird die Messzelle in einen Vakuumofen eingebaut und einige Stunden auf 75 °C temperiert. Anschließend erfolgt eine Evakuierung bei dieser Temperatur. Dieser Prozessschritt wird als Vakuumtrocknung bezeichnet, bei 0,1 mbar durchgeführt und dauert 24 Stunden. Dabei wird die Feuchtigkeit, welche während des Einbaus zugetreten ist, abgeführt sowie alle weiteren Messkomponenten wie Elektroden getrocknet. Die Messungen des Wassergehalts der Prüflinge belegen, dass mit dieser Prozedur Prüflinge ausreichend getrocknet werden können. Es werden Wassergehalte unter 0,1 % gemessen. Somit ist es gelungen, trockene Prüflinge herzustellen. Damit sind Untersuchungen an diesen Prüflingen praxisrelevant.

Die Bestimmung des Wassergehalts jedes Prüflings erfolgt mittels coulometrischer Karl-Fischer-Titration. Als Titrationsreagenz wurde HYDRANAL®-Coulomat AG der Firma Sigma-Aldrich verwendet. Zu diesem Zweck wird ein kleines Stück des Prüflings abgeschnitten (meist mehrere Stücke zwecks Vergleichbarkeit) und der Wassergehalt bestimmt. Dabei wird das Wasser bei 140 °C aus der Probe ausgeheizt und mittels Trägergasstrom in das Titrationsgefäß geführt.

Die Zeit zwischen dem Abschneiden des Pressspanstücks und dem Beginn der Titration soll weniger als eine Minute betragen, um die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft so gering wie möglich zu halten. So werden Abweichungen des Wassergehalts des kleinen Pressspanstücks gegenüber dem Prüfling ausgeschlossen.

Imprägnierung

HGÜ-Isoliersysteme bestehen meist aus zellulosehaltigem Pressspan imprägniert mit einem Mineralöl. Die getrockneten und konditionierten Prüflinge werden deshalb mit einem Öl imprägniert, um die Verhältnisse in HGÜ-Betriebsmitteln nachzubilden. Das Öl soll ebenso wie die Pressspanprüflinge trocken sein. Außerdem sollte es möglichst wenige, gelöste Gase enthalten. Zu diesem Zweck wird das Öl in einem Wärmebad auf 65 °C vorgewärmt und durch einen Mikrofilter in einen unter Vakuum stehenden, 60 °C warmen Wärmeschrank gezogen. Der Filter verhindert das Einbringen von Verunreinigungen und Rückständen im Öl in die Messzelle.

Das warme Öl wird im unter Vakuum (Druck 0,1 mbar) stehenden Wärmeschrank auf einem leicht geneigten Blech über eine relativ große Fläche (circa 700 cm²) verteilt. Es fließt mit mäßiger Geschwindigkeit in eine Sammelrinne, welche das Öl über ein Fallrohr entweder direkt in die Messzelle oder in ein Transportgefäß hineinlaufen lässt (siehe Abbildung 4.1-5 links). Langsame Fließgeschwindigkeit, großflächige Verteilung, erhöhte Temperatur sowie niedriger Druck führen zu einer Dünnschichtentgasung und zur Trocknung des Öls [35].

Falls das Öl in einem Transportgefäß aufgefangen wird, wird dieses anschließend unter Vakuum zur Versuchszelle (2) transportiert und dort durch einen weiteren Mikrofilter in die Messzelle geleitet (siehe Abbildung 4.1-5 rechts).



Abbildung 4.1-5: links: Ölaufbereitung (Trocknung und Entgasung) und direkte Befüllung der Messzelle für die Versuchszelle (1), rechts: Befüllung der Messzelle mit aufbereitetem Öl für die Versuchszelle (2)

Anmerkung: Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht nur ölimprägnierter Pressspan verwendet, bei welchem sich ein Stromfluss durch den Pressspan und durch das Öl ergibt, sondern es werden auch die Leitfähigkeiten der beiden Bestandteile Pressspan und Öl unabhängig voneinander gemessen. Dies ist durch den neu entwickelten Versuchsstand (2) möglich.

Damit die Prüflinge und das Imprägniermedium auch während der gesamten Messreihe keine Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen, wird ein mit Silicagel gefülltes Leinensäckchen in die Messzelle gelegt.

4.1.4 Prüflingsübersicht

In den folgenden Kapiteln werden Leitfähigkeitsmessungen an Pressspan vorgestellt. Hierbei handelt es sich um Pressspanprüflinge, die einerseits aus Pressspan nach IEC 60641-3-1 [69] herausgeschnitten oder die andererseits zur Untersuchung von speziellen Materialeigenschaften und -zusammensetzungen gefertigt wurden. Abbildung 4.1-6 zeigt eine Maßzeichnung der Prüflinge. Hier sind bewusst keine Prüflingsdicken aufgeführt, da diese sich je nach Anforderung im Rahmen dieser Arbeit unterscheiden.

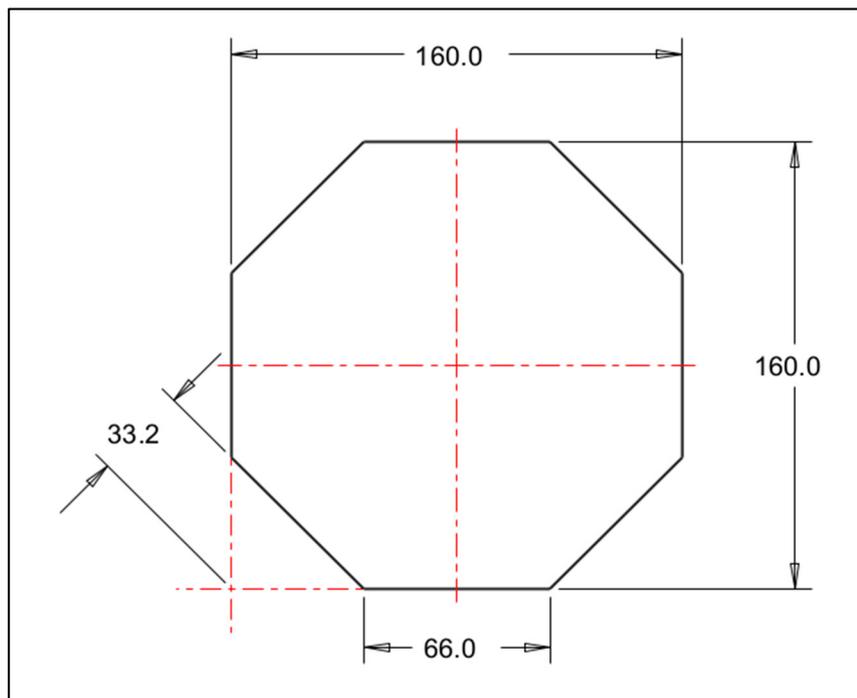


Abbildung 4.1-6: Maßzeichnung der Prüflinge aus Pressspan (hier verkleinert dargestellt)

Darüber hinaus wurden besondere Prüflingsgeometrien für die Untersuchung des Einflusses der Faserorientierung auf die Leitfähigkeit präpariert, auf die in Kapitel 6.4 näher eingegangen wird. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Prüflingstypen aus Pressspan sowie die eingesetzten Ölsorten.

Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Pressspantypen und Isolieröle

Bezeichnung	Bemerkung	Verwendung
Transformerboard TI, Weidmann Electrical Technology AG	nach IEC 60641-3, Typ B 2.1 [69], kalt gepresst, frei ge- trocknet, nachverdichtet, hochdicht	Kapitel 4.2, Kapitel 6.2, Kapitel 6.3, Kapitel 6.5, Kapitel 6.6, Kapitel 6.10
Transformerboard TIII, Weidmann Electrical Technology AG	nach IEC 60641-3, Typ B 4.1 [69], kalt gepresst, frei ge- trocknet, niederdicht	Kapitel 6.5
Transformerboard TIV, Weidmann Electrical Technology AG	nach IEC 60641-3, Typ B 3.1 [69], heiß gepresst, getrock- net, hochdicht	Kapitel 6.4, Kapitel 6.5, Kapitel 6.8, Kapitel 6.9, Kapitel 6.10
Pressspanstäbchen	gefertigt aus Transformer- board TIV, Weidmann Electrical Technology AG	Kapitel 6.4
Ligninprüflinge A, B, C aus Pressspan	Spezialanfertigungen mit unterschiedlichem Ligninge- halt, Herstellungsprozess ähnlich dem von Transformer- board TIV	Kapitel 6.7
Öl Shell Diala S4 ZX-I (S4)	inhibiertes, gas-to-liquid Mineralöl	Kapitel 4.2, Kapitel 6.6, Kapitel 6.10
Öl Nynas Nytro Lyra X (LX)	inhibiertes, naphthenisches Mineralöl	Kapitel 6.6, Kapitel 6.10
Öl Nynas 10X (NX)	inhibiertes, naphthenisches Mineralöl	Kapitel 6.5, Kapitel 6.6, Kapitel 6.10
Öl Nynas Nytro 4000A (4A)	spureninhibiertes, naphtheni- sches Mineralöl	Kapitel 6.5, Kapitel 6.6, Kapitel 6.7, Kapitel 6.8, Kapitel 6.9, Kapitel 6.10

Zur Bestimmung von Leitfähigkeiten werden Sprungantwortmessungen nach Kapitel 4.1.1 im unter Kapitel 4.1.2 beschriebenen Versuchsaufbau an den verschiedenen Prüflingstypen durchgeführt.

4.2 Modellbildung für Pressspan

Wie in Kapitel 2.4.3 bereits erwähnt wurde, kann ein Isoliersystem bestehend aus einem festen Isolierstoff mit Hilfe eines RC-Netzwerkmodells beschrieben werden, falls das Material im betrachteten Zeitbereich polarisierbar ist. Diese Art der Beschreibung ist auch für den in dieser Arbeit verwendeten Pressspan möglich.

Der Stromverlauf nach Anlegen eines Spannungssprungs an einen festen Isolierstoff (siehe Phase (2) in Abbildung 4.1-1) ist in Abbildung 4.2-1 vergrößert dargestellt.

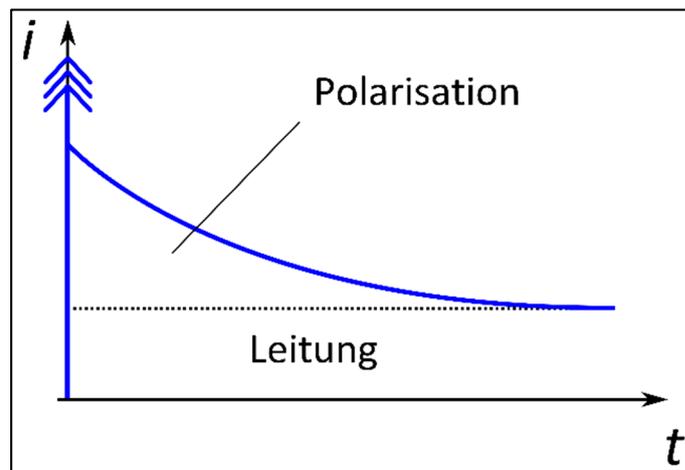


Abbildung 4.2-1: Stromverlauf nach Anlegen eines Spannungssprungs, logarithmische Achsen

Der Anteil der Polarisation ist nicht zu vernachlässigen. Verschiedene Polarisationsmechanismen (siehe Kapitel 2.3) mit unterschiedlichen Zeitkonstanten werden aktiviert und tragen zum gemessenen Strom bei. Erst wenn alle Polarisationsmechanismen mit den unterschiedlichen Zeitkonstanten $\tau_i = R_i \cdot C_i$ abgeschlossen sind, ist die stationäre Leitfähigkeit detektierbar. Diese wird durch den Widerstand R_∞ beschrieben.

Abbildung 4.2-2 zeigt die nach der PDC-Methode gemessenen Polarisations- und Depolarisationsströme eines ölimprägnierten Pressspans bei 90 °C und 1 kV/mm in doppellogarithmischer Darstellung, wobei der Depolarisationsstrom im Betrag und um die Ladezeit verschoben dargestellt ist. Außerdem ist der simulierte Polarisationsstrom eingetragen, nachdem RC-Netzwerkelemente aus dem Polarisationsstrom ermittelt und das Netzwerk simuliert wurde.

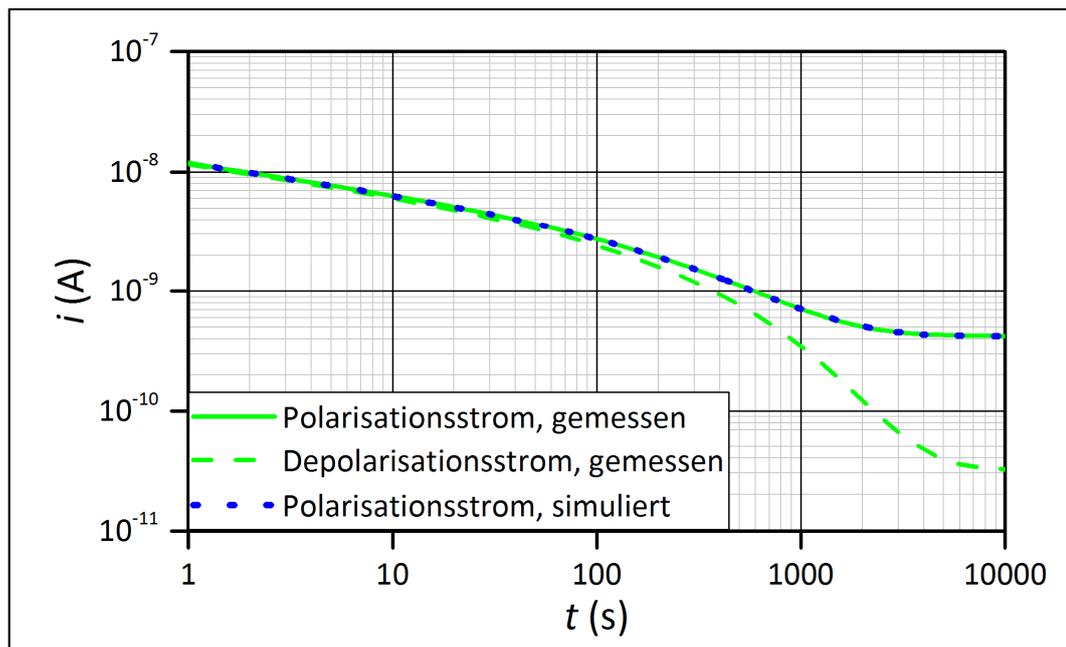


Abbildung 4.2-2: Ströme durch einen ölprägnierten Pressspan bei 90 °C und 1 kV/mm, gemessen und simuliert

Wird der Prüfling kurzgeschlossen, so bedeutet dies, dass der Gleichstromwiderstand R_{∞} kurzgeschlossen wird. Die im Prüfling gespeicherte Ladungsmenge, beispielsweise durch Ausrichtung von Dipolen (Orientierungspolarisation) und Verschiebung von Ladungsträgern zu Grenzflächen (Grenzflächenpolarisation), fließt wieder heraus und ist als Strom mit negativem Vorzeichen am Messsystem detektierbar. Dieser Strom ist in Abbildung 4.2-2 gestrichelt dargestellt. Er hat über einen langen Zeitbereich in etwa den gleichen Betrag wie der Polarisationsstrom. Beim Pressspan handelt es sich folglich um einen im betrachteten Zeitbereich polarisierbaren Stoff. Somit ist eine Modellbildung unter der Annahme von Polarisationsgliedern sinnvoll. Erst wenn der Leitungsanteil nicht mehr gegenüber dem Polarisationsanteil vernachlässigt werden kann (in der Abbildung etwa ab $t = 200$ s), weichen Polarisations- und Depolarisationsstrom sichtbar voneinander ab. Da in Phase (3) der PDC-Methode der Gleichstromwiderstand kurzgeschlossen ist, klingt der Strom auf null ab. Dazu bedarf es allerdings einer Messzeit, die länger ist als die in diesem Fall verwendete Zeit. Polarisations- und Depolarisationsstrom liefern mit Ausnahme des Gleichstromwiderstands die gleiche Information über das Isoliersystem.

Anmerkung: Im Fall einer Messung an Öl ist der Depolarisationsstrom nach wenigen Sekunden verschwindend gering. Erfahrungsgemäß speichert Öl keine Ladungen, weshalb nach dem Kurzschluss des Prüflings auch keine Ladungsträger zurückfließen können.

Im Folgenden wird beispielhaft für die in Abbildung 4.2-2 dargestellte Messung des Polarisationsstroms ein RC-Netzwerkmodell erstellt. Mittels des Algorithmus des PDC-Analyzers zur Erzeugung von Anpassungsfunktionen werden die Bauteilwerte des Netzwerkmodells bestimmt. In diesem Fall besteht das Modell (siehe Abbildung 2.4-1) aus acht Polarisationsgliedern (R_i und C_i), aus einer Anfangskapazität C_0 sowie aus einem

Gleichstromwiderstand R_{∞} . Zusätzlich zu den Kapazitäts- und Widerstandswerten sind in Tabelle 5 auch die sich ergebenden Zeitkonstanten aufgeführt.

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den Werten der Ersatzschaltbildelemente nicht um Werte mit physikalischem Bezug zu den Materialeigenschaften handelt, sondern diese durch Anpassungsfunktionen mathematisch erzeugt werden.

Tabelle 5: Werte der RC-Netzwerkparameter für die Nachbildung des Polarisationsstroms aus Abbildung 4.2-2

C_0 :	$2,65 \cdot 10^{-10}$ F	R_{∞} :	$2,36 \cdot 10^{12}$ Ω		
C_1 :	$3,01 \cdot 10^{-12}$ F	R_1 :	$1,87 \cdot 10^{11}$ Ω	τ_1 :	0,56 s
C_2 :	$5,58 \cdot 10^{-12}$ F	R_2 :	$3,19 \cdot 10^{11}$ Ω	τ_2 :	1,78 s
C_3 :	$1,46 \cdot 10^{-11}$ F	R_3 :	$3,84 \cdot 10^{11}$ Ω	τ_3 :	5,61 s
C_4 :	$3,52 \cdot 10^{-11}$ F	R_4 :	$5,05 \cdot 10^{11}$ Ω	τ_4 :	17,78 s
C_5 :	$1,15 \cdot 10^{-10}$ F	R_5 :	$4,88 \cdot 10^{11}$ Ω	τ_5 :	56,12 s
C_6 :	$1,55 \cdot 10^{-10}$ F	R_6 :	$1,15 \cdot 10^{12}$ Ω	τ_6 :	178,25 s
C_7 :	$3,83 \cdot 10^{-10}$ F	R_7 :	$8,26 \cdot 10^{11}$ Ω	τ_7 :	316,36 s
C_8 :	$6,39 \cdot 10^{-10}$ F	R_8 :	$1,56 \cdot 10^{12}$ Ω	τ_8 :	996,84 s

Die Zeitkonstanten τ_i werden von τ_1 bis τ_8 größer, wobei die letzte Zeitkonstante bei circa 1000 s liegt. Wird nun ein Netzwerkmodell mit acht Polarisationsgliedern, der Anfangskapazität und dem Gleichstromwiderstand aufgebaut und mit den Werten aus Tabelle 5 bestückt, dann ergibt sich bei einer Simulation des Netzwerkmodells eine modellierte Kurve für den Polarisationsstrom (gepunktete Kurve in Abbildung 4.2-2). Diese Kurve ist quasi identisch mit der gemessenen Polarisationskurve. Isolierpressspan ist folglich mit diesem RC-Netzwerkmodell ausreichend genau beschreibbar.

Der dominante Polarisationsmechanismus im Pressspan ist die Grenzflächenpolarisation, da diese einerseits bis zu sehr langen Zeiten auftreten kann (vergleiche Kapitel 2.3.5) und andererseits viele Grenzflächen im Pressspan vorhanden sind. So werden einerseits Fasern über andere Fasern geladen, also Ladungsträger verschoben und akkumuliert, andererseits die Grenzflächen von Fasern zu Öl über niederohmige Ölspalte geladen. Hier ergeben sich eine Vielzahl von Widerstands- und Kapazitätskombinationen mit jeweils eigenen Zeitkonstanten. Diese mehr oder weniger statistisch verteilten physikalischen Zeitkonstanten spiegeln sich nur bedingt in den mathematisch bestimmten Zeitkonstanten in Tabelle 5

wider. Dort sind einige diskrete Zeitkonstanten herausgegriffen, die lediglich zur mathematischen Beschreibung der gemessenen Kurve dienen.

Ein Netzwerkmodell kann beispielsweise dazu herangezogen werden, die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von Pressspan zu bestimmen und die Leitfähigkeit bei Temperaturen zu simulieren, die nicht gemessen wurden oder mit dem verwendeten Aufbau oder Strommessgerät nicht gemessen werden können. Dies wird in Kapitel 6.9.2 durchgeführt. Hier liegt der große Mehrwert dieser Simulationen.

4.3 Rasterelektronenmikroskopie

Im Folgenden werden das Prinzip der Rasterelektronenmikroskopie vorgestellt sowie die Probenpräparation erläutert. Dieses in den Materialwissenschaften häufig verwendete Mikroskopieverfahren wird erstmals dazu genutzt, mittels Informationen über die Lage der Fasern im Pressspan (siehe Kapitel 5) Leitungsprozesse und Polarisationsmechanismen zu erforschen.

4.3.1 Prinzip

Bei der Rasterelektronenmikroskopie handelt es sich um die Abtastung der Oberfläche des Prüflings mit einem Elektronenstrahl in einem sogenannten Rasterelektronenmikroskop (REM). Das Schema des REM ist in Abbildung 4.3-1 zu sehen. Die Auflösung des Mikroskops wird hauptsächlich vom Elektronenstrahldurchmesser bestimmt, der relativ klein ist, weshalb sehr gute Auflösungen bis in den Nanometerbereich erzielt werden können.

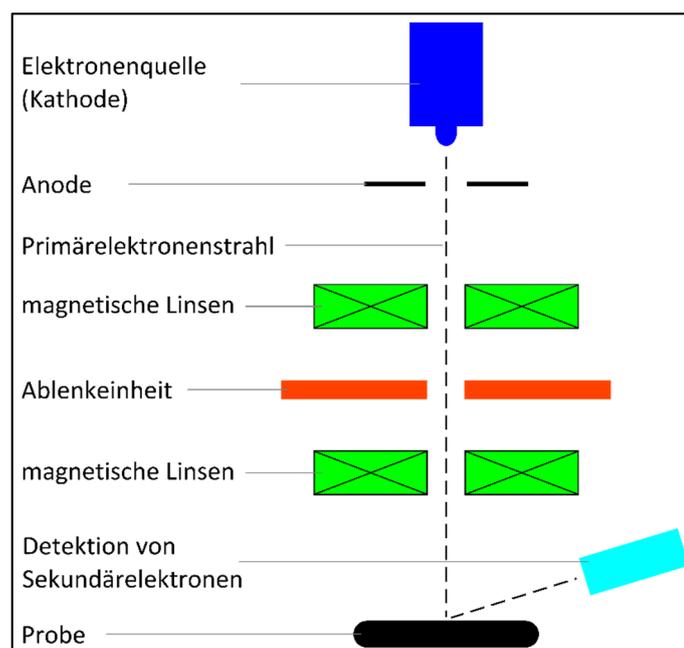


Abbildung 4.3-1: Schema des Rasterelektronenmikroskops

Ziel ist die Detektion der Wechselwirkung der Elektronen mit der Prüflingsoberfläche, wobei ein hoch auflösendes, vergrößertes Bild der Topografie erzeugt wird. Die Aufnahmen in dieser Arbeit wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop Supra 25 der Firma Zeiss erstellt.

Elektronen werden aus einer thermischen Elektronenquelle emittiert und beschleunigt. Diese Beschleunigung erfolgt mittels eines elektrischen Feldes (Beschleunigungsspannung bis zu einigen zehn kV). Die beschleunigten Elektronen werden mit Hilfe von Magnetspulen (magnetische Linsen) fein gebündelt und fokussiert auf die Probe gelenkt. Die Probe wird im Folgenden abgerastert, indem der Elektronenstrahl gezielt abgelenkt wird. Um eine Streuung der Elektronen an Luftmolekülen zu verhindern, ist das REM evakuiert. Je besser die Evakuierung ist (Hochvakuum), also je weniger Moleküle bzw. Atome sich zwischen Elektronenquelle und Probe befinden, desto größer ist folglich die freie Weglänge der Elektronen.

Wenn der Elektronenstrahl auf oberflächennahe Atome der Feststoffprobe trifft, kann er andere Elektronen aus den Schalen der Atome in das Vakuumniveau befördern. Diese Elektronen verlieren somit die Bindung zu den Atomen. Sie werden Sekundärelektronen genannt und mit Hilfe eines Detektors erfasst.

Nach softwaretechnischer Verarbeitung der Intensität des erfassten Signals entsteht die Information über die Topografie des Prüflings. Da diese detektierten Sekundärelektronen eine niedrige Energie aufweisen, liegt ihr Ursprungsort auf der Oberfläche des Prüflings. Sekundärelektronen aus tieferen Schichten kommen nicht durch das Material an die Oberfläche (Absorption aufgrund relativ geringer kinetischer Energie der Sekundärelektronen), weshalb sie vom Detektor nicht erfasst werden. Somit ist mit dem REM eine Beschreibung der Topografie des Prüflings möglich. Die Lage der Fasern im Pressspan wurde bisher nicht mit Leitungsprozessen und mit der elektrischen Leitfähigkeit in Zusammenhang gebracht. Im Rahmen dieser Arbeit wird die in der Werkstofftechnik häufig verwendete Rasterelektronenmikroskopie dazu genutzt, Geometrien im Pressspan abzuschätzen und es ergeben sich erste Erkenntnisse und Zusammenhänge, die zu einem physikalischen Verständnis der Leitfähigkeit im Pressspan mit Bezug auf die makroskopische Struktur führen.

4.3.2 Probenpräparation

Die Signalintensität am Detektor und damit die Sekundärelektronen sind abhängig vom untersuchten Material. Es wird versucht, den Primärelektronenstrahl energiereich zu konfigurieren, um eine möglichst gute Signalstärke zu erhalten. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass bei der Untersuchung von Isolierstoffen Elektronen kaum durch den Isolierstoff abgeleitet werden können. Es kommt beim Beschuss der Probe mit Elektronen folglich zu einer Aufladung der Probe bis zu deren Zerstörung. Außerdem wird der Elektronenstrahl durch Aufladungen an der Oberfläche abgelenkt, was zu sogenannten Artefakten im Bild führt.

Um das zu vermeiden, werden Isolierstoffe mit einer dünnen Edelmetallschicht überzogen, die im vorliegenden Fall aus Platin besteht. Die Oberfläche der Probe wird somit leitfähig und kann die auftreffenden Elektronen gut ableiten. Dies funktioniert allerdings nur, falls die Metalloberfläche mit dem geerdeten Probenteller verbunden ist. Die Probe wurde deshalb mittels Silberleitlack mit dem Probenteller kontaktiert. Eine Aufladung und eine Zerstörung des Isolierstoffs werden dadurch effektiv reduziert oder ganz vermieden.

Die Beschichtung mit Platin mittels Sputtern (Kathodenstrahlzerstäubung) ist ein unverzichtbarer Schritt in der Probenvorbereitung. Dabei wird das Präparat in einer Kammer unter Argon evakuiert (Druck kleiner als 0,1 mbar). Eine an diese Kammer angelegte Spannung bewirkt die Beschleunigung und Ionisation von Argonionen, welche auf ein sogenanntes Target (in diesem Fall aus Platin) geschossen werden und dort Atome des Beschichtungsmetalls herauslösen. Diese herausgelösten Atome scheiden sich anschließend auf dem Präparat ab und es entsteht eine sehr dünne Edelmetallschicht auf dem Prüfling. Die Qualität dieser Beschichtung ist unter anderem von der Dauer des Vorgangs, der angelegten Spannung, der sich ergebenden Stromstärke, vom Weg der Argonionen und vom eingestellten Druck abhängig.

Der Vollständigkeit halber soll angemerkt werden, dass unter einem Rasterelektronenmikroskop nur vakuumstabile Proben untersucht werden können, also beispielsweise keine Flüssigkeiten.

4.4 UV/Vis-Spektroskopie

Bei der UV/Vis-Spektroskopie handelt es sich um ein optisches Verfahren, bei dem elektronische Anregungen in den äußeren Schalen von Atomen in Form von elektromagnetischen Wellen detektiert werden. Unter einer elektronischen Anregung wird der Vorgang verstanden, wenn Elektronen über die Bandlücke auf ein höheres Energieniveau gehoben werden. Dabei werden die Prüflinge mit einer weißen Quelle (Emission im gesamten betrachteten Wellenlängenbereich) angestrahlt und die Reflexion oder Transmission gemessen. Das Licht wird anschließend im Monochromator spektral aufgespalten und vom Sensor (meist ein CCD-Sensor, Charge-Coupled Device) detektiert. Die Aufspaltung kann entweder durch ein Prisma oder durch ein Gitter erfolgen. Damit entsteht die Information über die Farbe und die Farbstoffkonzentration im Prüfling im betrachteten Wellenlängenbereich und über elektronische Anregungsenergien. Abbildung 4.4-1 zeigt das Schema der UV/Vis-Spektroskopie.

Eine solche photonische Anregung lässt Aussagen über die Bandlücke des untersuchten Materials zu, sodass sie zur Untersuchung von elektronischen Leitungsprozessen im Pressspan geeignet ist. Besonders die Ligninkomponente im Pressspan stellt delokalisierte Elektronen zur Verfügung, wie es bereits in Kapitel 1.2.2 beschrieben wurde. Die Ergebnisse der UV/Vis-Spektroskopie werden im Rahmen dieser Arbeit erstmals mit den Messungen

der elektrischen Leitfähigkeit von Pressspan mit unterschiedlichem Ligningehalt in Verbindung gebracht.

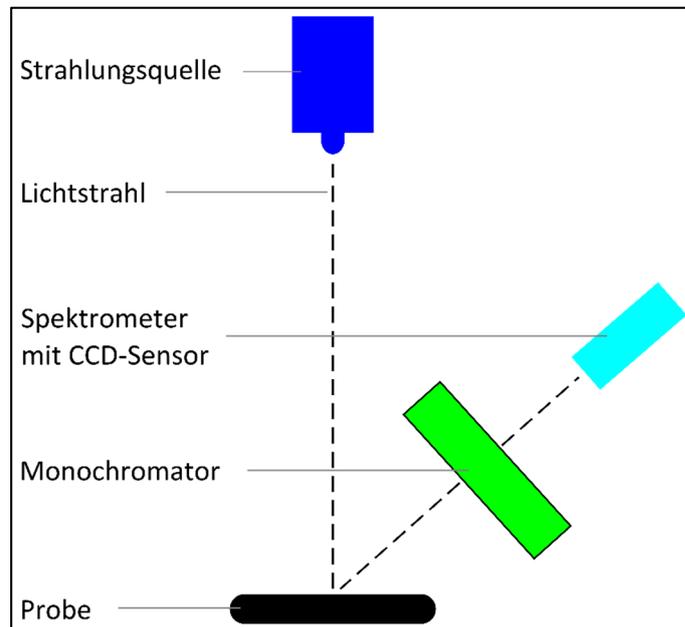


Abbildung 4.4-1: Schema der UV/Vis-Spektroskopie

Für die durchgeführten UV/Vis-Messungen wurde ein Spektrometer der Firma Andor (Model: SR-303i-B) mit CCD-Sensor (Model: DV420_OE, $T = -50\text{ °C}$) verwendet. Als Lichtquelle diente eine Xenonlampe. Der Vorteil der Xenonlampe im Vergleich zu einer Halogenlampe liegt in einer größeren Signalstärke bei kleinen Wellenlängen (UV-Bereich). Sobald die Leistung der Lichtquelle zu gering wird, werden Streulichteffekte relevant und verfälschen die Messergebnisse.

Es wurden Wellenlängen zwischen 300 nm und 600 nm untersucht. Es handelt sich hierbei folglich eher um Messungen im visuellen Bereich (Vis), als um Messungen im ultravioletten Bereich (UV), der schon bei merklich kürzeren Wellenlängen beginnt. Außerdem wurde ein Filter aus Polystyrol eingebaut, um Fluoreszenz zu vermeiden. Dieser Filter begrenzt die Einstrahlung bei Wellenlängen kleiner als circa 320 nm.

Für Feststoffe, die undurchsichtig sind, wie das Isoliermaterial Pressspan, kann keine Transmission gemessen werden. Hingegen ist die Messung der Reflexion möglich. Dabei wird der Teil des Lichts reflektiert, welcher nicht mit dem Prüfling wechselwirkt, also nicht absorbiert wird.

Anmerkung: Vor der Materialmessung muss ein Referenzspektrum aufgenommen werden. Dazu strahlt die verwendete, weiße Lichtquelle auf ein hoch reflektierendes Material (hier: Polytetrafluorethylen, PTFE). Aus Referenzspektrum und gemessenem Prüflingsspektrum wird anschließend die tatsächliche Reflexion des Prüflings berechnet.

Zu Auswertungszwecken werden die aus den Spektren ermittelten Reflexionsgrade R_{Rel} üblicherweise über die Kubelka-Munk-Gleichung (4.4-1) in die relative Absorption A_{Rel} umgerechnet [70]:

$$A_{\text{Rel}} = \frac{(1 - R_{\text{Rel}})^2}{2 \cdot R_{\text{Rel}}} \quad (4.4-1)$$

Dies ist gerechtfertigt, solange der Anteil der Transmission gegenüber der Reflexion gering ist [71]. Daraus folgt, dass die untersuchten Prüflinge eine gewisse minimale Schichtdicke aufweisen müssen. Außerdem liefert die Umrechnung nach Gleichung (4.4-1) nur für gemessene relative Reflexionen zwischen 20 % und 70 % berechnete Werte für die relative Absorption, welche zwischen 0 % und 100 % liegen [71]. Jenseits dieser Grenzen können sich höhere Werte für die berechnete relative Absorption ergeben. Für das Verständnis solcher Werte ist es wichtig zu bedenken, dass sie aus den Umrechnungen mittels Kubelka-Munk entstanden sind.

Aus der Reflexion lassen sich außerdem die Bandlücken der Materialien bestimmen, indem die Wellenlängen λ über Gleichung (4.4-2) mittels den Größen Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und Plancksches Wirkungsquantum h in Energien E umgerechnet werden:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (4.4-2)$$

Das sind dann die Energien, die nötig sind, um einen elektronisch angeregten Zustand in einem Molekül zu erreichen. Falls die Energien des eingestrahlt Lichts ausreichen, um Elektronen über die Bandlücke des Materials vom Valenzband ins Leitungsband zu transportieren, entstehen Elektronen-Loch-Paare. Diese Absorption von Photonen aus der Lichtquelle durch das Material wird detektiert. Auf die Impulserhaltung bei der Anregung, infolge der neben einem Photon zur Energiebereitstellung in bestimmten Fällen auch ein Phonon zum Impulsausgleich benötigt wird, wird an dieser Stelle nicht eingegangen und stattdessen auf Grundlagenliteratur verwiesen, zum Beispiel [72].

Anmerkung: Da bei der photonischen Anregung jeweils Elektronen und Löcher erzeugt werden, beträgt die Energie zur Erzeugung eines Ladungsträgers (Elektron oder Loch) theoretisch jeweils die Hälfte der Energiedifferenz der nach Gleichung (4.4-2) berechneten Bandlücke.

5 Strukturaufklärung Pressspan

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben wurde, handelt es sich bei Pressspan um ein Material, welches durch chemische und mechanische Bearbeitungsschritte aus Holz hergestellt wird. Aus den Faserkomponenten Zellulose, Hemizellulosen und Lignin entsteht eine mehrere Mikrometer dicke Schicht aus abgeflachten Fasern. Die REM-Aufnahme in Abbildung 5-1 zeigt, dass sich innerhalb dieser dünnen Pressspannschichten eine Vielzahl von Fasern befindet, welche augenscheinlich keine Vorzugsrichtung in dieser Ebene aufweisen. Da die Fasern einerseits nicht perfekt horizontal in der Ebene liegen, sondern kleine Winkel gegen die Ebene annehmen können, sodass eine Faser mit einer ungewissen Dicke in die Materialschicht eindringt, ist die Bestimmung der Faserorientierung eigentlich in allen drei Raumrichtungen durchzuführen und der Stichprobenumfang zu erhöhen. Andererseits deckt sich die visuelle Beschreibung von mehr oder weniger gleichverteilten Fasern in der Schichtebene mit Untersuchungen des Pressspanherstellers.

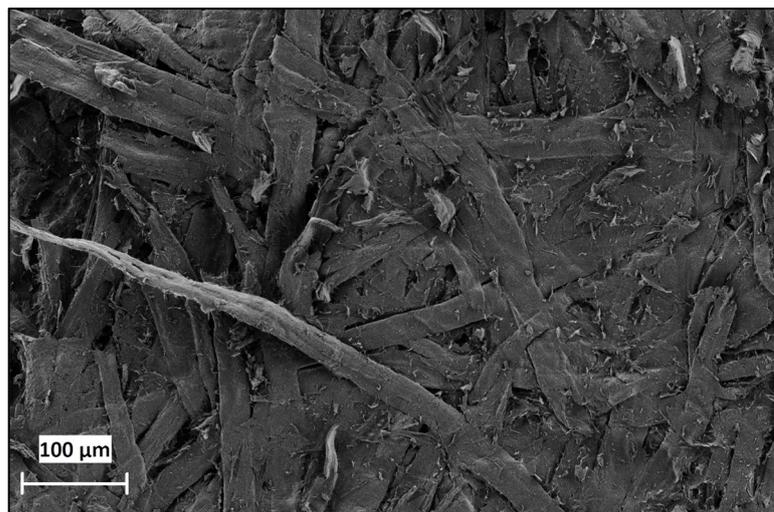


Abbildung 5-1: REM-Aufnahme einer Pressspananlage, angelehnt an [73]. Es zeigt sich eine Vielzahl von Fasern, die mehr oder weniger gleichverteilt in der Ebene liegen.

In Abbildung 5-2 ist eine weitere REM-Aufnahme gezeigt. Hier ist zufällig eine aus der Schicht herausstehende Faser, die möglicherweise durch die Probenpräparation herausgelöst wurde, zu sehen. Anhand dieser Beispielfaser sollen Geometrien abgeschätzt werden: Die Dicke der Faser beträgt an der schmalsten Stelle $8\ \mu\text{m}$ und an der breitesten $30\ \mu\text{m}$. Die Faser scheint verdrillt zu sein, sodass in erster Näherung davon ausgegangen wird, dass die Faser über die gesamte Länge näherungsweise einen elliptischen Querschnitt hat, bei dem die beiden Halbachsen $8\ \mu\text{m}$ und $30\ \mu\text{m}$ betragen. Die Abschätzung einer Faser als zylindrisches Objekt entspricht demnach nur bedingt der Realität. Der elliptische Faserquerschnitt entsteht während der Trocknung der Fasern, wenn das Lumen (Hohlraum einer pflanzlichen Faser) in den Fasern mit zunehmendem Unterdruck, beispielsweise im Vakuumtrocknungsprozess, kollabiert. Dieser Druck wirkt nicht gleichverteilt auf alle Stellen der Faser.

Die Fasergeometrien wurden prinzipbedingt für eine relativ kleine Anzahl von Einzelfasern mittels REM-Aufnahmen abgeschätzt. Abbildung 5-2 verdeutlicht beispielhaft die Lage der Fasern und die geometrischen Verhältnisse. In der Literatur finden sich Faserdurchmesser diverser Holzarten im Bereich von wenigen bis einigen zehn Mikrometern [74].

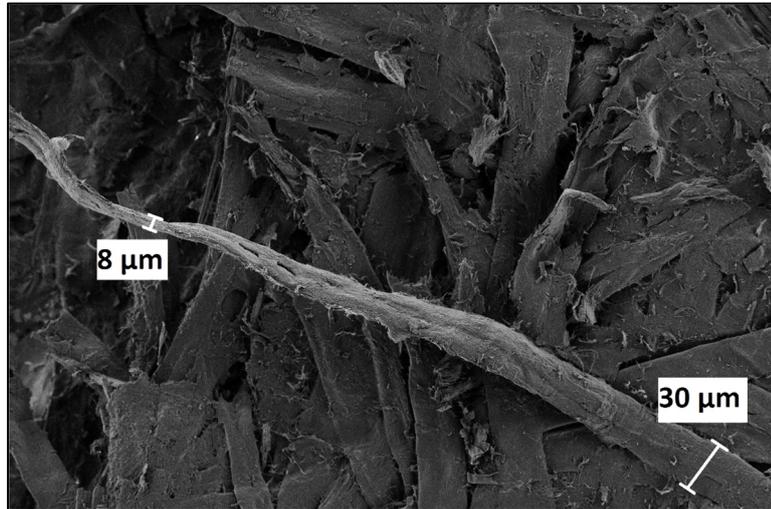


Abbildung 5-2: REM-Aufnahme einer Einzelfaser mit elliptischem Faserquerschnitt [73]

Die Faserlänge kann in dieser hohen Vergrößerung nicht gemessen werden. Allerdings wird anhand weiterer Aufnahmen bei geringerer Vergrößerung sowie durch Materialuntersuchungen des Pressspanherstellers eine Faserlänge im Bereich 0,5 mm bis zu 3,0 mm angenommen. Die Faserlänge ist allerdings statistisch verteilt und von vielen Bearbeitungsschritten abhängig. Diese Information reicht für eine grobe Vorstellung der geometrischen Verhältnisse im Pressspan zunächst aus.

Die dünnen Faserlagen werden nun bei der Pressspanherstellung in wässrigem Zustand übereinander geschichtet, bis die gewünschte Materialdicke erreicht ist. Die anschließenden Vorgänge der Pressung und Trocknung (in einem Prozessschritt oder in zwei aufeinanderfolgenden) sind maßgebend für die Eigenschaften des entstehenden Isoliermaterials.

Die einzelnen Zellulose- und Hemizellulosenstränge besitzen OH-Gruppen, die Wasserstoffbrückenbindungen eingehen können. Eine Wasserstoffbrückenbindung bildet sich immer zwischen einem Wasserstoffdonator (zum Beispiel R-OH) und einem Wasserstoffakzeptor (zum Beispiel R'-OH), wenn diese geometrisch günstig (Abstand, Winkel) zueinander angeordnet sind. Voraussetzung für eine Wasserstoffbrücke ist eine polarisierte Bindung (d. h. ein Dipolmoment). Wechselwirken zwei OH-Gruppen verschiedener Zellulosestränge miteinander, so wird von einer intermolekularen Wasserstoffbrücke gesprochen. Außerdem können sich Wassermoleküle an freie OH-Gruppen anlagern und folglich Wasserstoffbrückenbindungen bilden. Interessant ist die Betrachtung der Trocknung, Entwässerung und Pressung von Pressspan. Im Folgenden wird zwischen zwei Herstellungsverfahren von hochdichtem Pressspan unterschieden:

Typ TIV (Produktbezeichnung der Firma Weidmann): Zellstoffvliese (einzelne Pressspan-schichten) werden zu einem Nassbogen aufeinander gelegt und unter Temperatur verpresst. Sowohl der Pressdruck als auch die Temperaturbehandlung führen zu einer Trocknung des entstehenden Pressspans, der über den Pressdruck auch seine gewünschte Dichte erhält. Die Dichte wird demnach durch zeitgleiches Pressen und Ausheizen von Wasser erzeugt.

Typ TI (Produktbezeichnung der Firma Weidmann): Zellstoffvliese werden zu einem Nassbogen aufeinander gelegt, leicht verpresst und damit vorentwässert. In einem nachfolgenden Schritt werden die entwässerten Pressspanbögen der Temperatur ausgesetzt und in Kalandern auf die gewünschte Dichte verpresst.

Im Fall von TIV sind die Einzelfasern noch nass, während sie mit anderen Fasern verpresst werden, um die gewünschte Dichte zu erzeugen. Die Fasern sind deshalb noch relativ biegsam. Dies ist schematisch in Abbildung 5-3 1a) zu sehen. Bei TI sind die Fasern schon merklich steifer, wenn sie mit den Nachbarfasern verpresst werden, da sie in einem ersten Schritt bereits entwässert wurden. Analog ist dies in Abbildung 5-3 2a) dargestellt. Das weitere Verpressen führt zwar zu einer makroskopischen Dichtezunahme, bringt die Fasern aber nicht mehr effektiv auf Molekülebene einander näher. Es werden keine neuen Bindungen geknüpft.

Dieser Unterschied in der Herstellungstechnologie führt zwar zu Pressspantypen, die in etwa die gleichen Dichten erreichen und damit das gleiche Faser-zu-Hohlraum-Verhältnis besitzen. Aber sie sollten sich in der Größe der Kontaktflächen von einer Faser zur nächsten Faser aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Stabilität während der Verpressung unterscheiden. Zum besseren Verständnis sind die beiden Herstellungsarten schematisch dargestellt. Dabei werden die Fasern vereinfacht als Zylinder dargestellt.

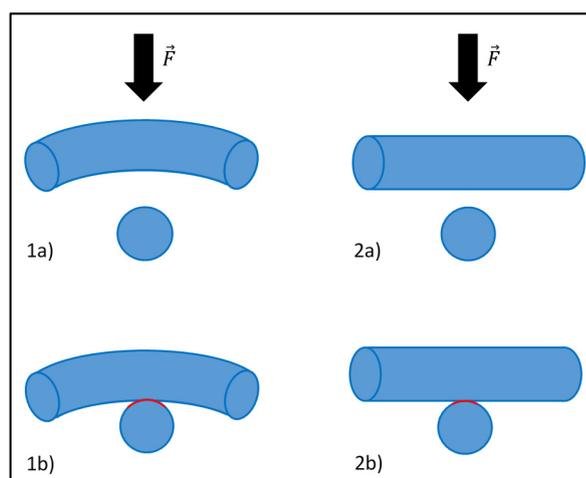


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung von Pressspanfasern von Typ TIV und Typ TI.

1a): flexible, etwas feuchte Faser bei Herstellung von TIV. Wirkt auf diese Faser eine Kraft, entsteht eine große Faserkontaktstelle 1b).

2a): Spröde, trockene Faser bei Herstellung von TI. Wirkt auf diese Faser eine Kraft, entsteht eine kleinere Faserkontaktstelle 2b).

Zugfestigkeitsversuche an beiden Pressspanotypen gleicher Dichte belegen, dass Pressspan vom Typ TIV eine höhere mechanische Festigkeit aufweist als Pressspan vom Typ TI. Die mechanische Festigkeit erhöht sich von TI zu TIV um circa 25 %.

Im Folgenden wird ein möglicher, eigener Erklärungsansatz gegeben: Durch das Eindringen von Wasser in das Material werden intermolekulare Wasserstoffbrücken zwischen den Zellulosesträngen durch Bindungen zu Wasser ersetzt. Das führt zu flexibleren Fasern, die beim Verpressen und gleichzeitigen Ausheizen besser angenähert werden können (größerer Faserkontakt). Dies ist in Abbildung 5-3 1b) zu sehen. Somit können sich an den Faserkontakten aufgrund der gleichzeitigen Druck- und Temperaturbelastung mehr Wasserstoffbrücken zwischen Zellulosesträngen aufbauen. Dies resultiert in einer hohen mechanischen Festigkeit. Im Fall von TI sind die Fasern zum Zeitpunkt des Pressens bereits trocken und damit steifer. Deshalb können die Fasern nicht mehr so gut in Kontakt gebracht werden und der Zusammenhalt der Einzelfasern ist damit schlechter. Dies ist in Abbildung 5-3 2b) dargestellt. In Konsequenz ergibt sich eine geringere mechanische Festigkeit des Pressspans TI im Vergleich zum Pressspan TIV.

Außerdem ist die Sättigungsfeuchte der entstandenen Pressspanprodukte, gemessen und gelagert unter Raumtemperatur und bei circa 40 – 50 % relativer Luftfeuchtigkeit, unterschiedlich. Wenn beide Typen solange der Umgebungsfeuchtigkeit ausgesetzt werden, bis die Sättigung des Wassergehalts im Pressspan erreicht ist, kann festgestellt werden, dass Pressspan TIV deutlich geringere Feuchtwerte aufweist als Pressspan TI. Die Sättigungsfeuchte liegt bei diesem Pressspanotyp zwischen 5 und 6 % bei Raumtemperatur und 40 – 50 % relativer Luftfeuchtigkeit, die Sättigungsfeuchte von TI hingegen zwischen 6,5 und 7,5 % bei den gleichen Bedingungen, was durch eine größere Anzahl an freien OH-Gruppen bei TI erklärt werden kann.

6 Elektrische Leitfähigkeit und dielektrisches Verhalten von Pressspan

In diesem Kapitel werden die experimentellen Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit und zum dielektrischen Verhalten von Pressspan als Isolierstoff in HGÜ-Betriebsmitteln vorgestellt und interpretiert. Damit wird ein tief gehendes physikalisches Verständnis der Leitfähigkeit erzeugt. Zuerst wird eine Parameterübersicht über die untersuchten Einflussgrößen auf das Verhalten von Pressspan gegeben, um im Anschluss alle Einflussgrößen explizit zu behandeln.

6.1 Parameterübersicht

Im Folgenden werden Leitfähigkeitsmessungen an Pressspan vorgestellt, um die in der Zielsetzung beschriebenen offenen Fragen zu beantworten. Abbildung 6.1-1 zeigt eine Übersicht über Parametereinflüsse auf die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelten Parameter werden im Folgenden kurz benannt und den jeweiligen Kapiteln der Arbeit zugeordnet.

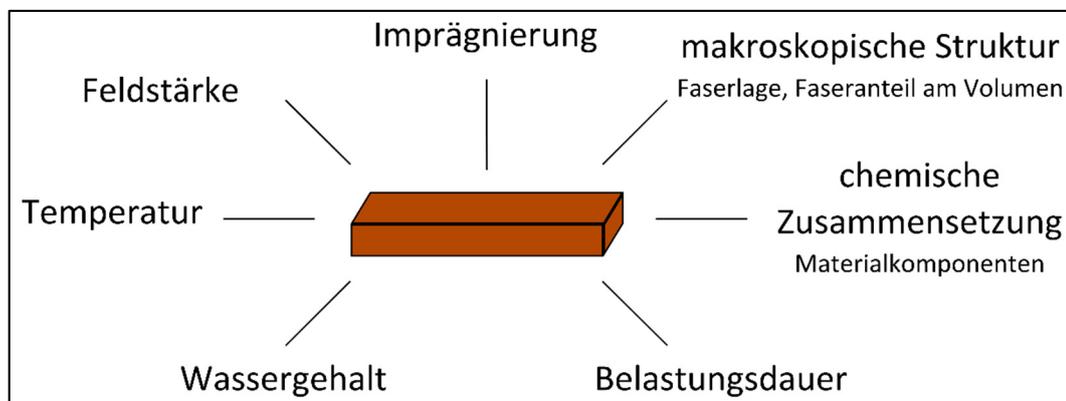


Abbildung 6.1-1: Parametereinflüsse auf die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan

Die im Rahmen der Literaturrecherche (siehe Kapitel 2.2) ermittelten Leitungsprozesse Ionenleitung, Elektronen-Loch-Leitung und Protonenleitung werden in der vorliegenden Arbeit für das Isoliermaterial Pressspan diskutiert. Dazu war es in einem ersten Schritt nötig, den Pressspan getrennt vom Imprägniermedium Öl zu betrachten und die Leitfähigkeit des Pressspans ohne Öl zu detektieren. Dies war im neuen Versuchsstand (siehe Kapitel 4.1.2) möglich. Die Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit von unimprägniertem Pressspan befindet sich in Kapitel 6.2.

In einem nächsten Schritt wurde die Messung an unimprägniertem Pressspan vereinfacht, indem Gas als Imprägniermedium benutzt wurde. Das hatte unter anderem den Vorteil,

dass höhere Spannungen verwendet werden konnten. Der Einfluss der Gasimprägnierung auf die Leitfähigkeit von Pressspan wird in Kapitel 6.3 behandelt.

Die makroskopische Struktur der Pressspanfasern wurde mit Hilfe von REM-Aufnahmen erfasst (siehe Kapitel 5). Die Fasergeometrien sowie die geometrische Orientierung der Fasern im Pressspan wurden herangezogen, um den Einfluss des makroskopischen Aufbaus des Pressspans aus Fasern und Hohlräumen auf die elektrische Leitfähigkeit zu untersuchen. Dazu diente die Untersuchung zum Einfluss der Faserorientierung, die in Kapitel 6.4 beschrieben ist.

Des Weiteren wurden Versuche mit unterschiedlichen Pressspandichten durchgeführt und die Leitfähigkeiten von Pressspan unter verschiedenen Fluiden bestimmt sowie interpretiert. Kapitel 6.5 hilft bei der Beantwortung der Frage nach dem Einfluss des Verhältnisses von Fasern zu Hohlräumen auf die elektrische Leitfähigkeit.

Kapitel 6.6 beschäftigt sich mit dem Einfluss der Ölleitfähigkeit auf die Leitfähigkeit von ölimprägniertem Pressspan. Dieses Kapitel behandelt somit den Einflussparameter der Imprägnierung und ist nicht getrennt von der makroskopischen Struktur des Pressspans aus Einzelfasern zu betrachten, da beispielsweise der Ölanteil im Pressspan je nach Volumen des Öls im Vergleich zum Faservolumen einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Leitfähigkeit des Gesamtsystems aus Pressspanfasern und Öl hat.

Nach der Diskussion der makroskopischen Struktur des Pressspans wird die chemische Zusammensetzung des Pressspans betrachtet. Von den im Pressspan vorhandenen Bestandteilen schien Lignin derjenige zu sein, der aufgrund seiner chemischen Struktur eine höhere Leitfähigkeit als die übrigen Komponenten erwarten ließ. Zu diesem Zweck wird in Kapitel 6.7 eine Veränderung des Ligningehalts in Pressspan behandelt und die Pressspanleitfähigkeiten werden unter verschiedenen Fluiden erfasst.

Des Weiteren wurden anwendungstechnische Parameter auf die elektrische Leitfähigkeit untersucht. Da zur Bestimmung der Leitfähigkeiten zeitabhängige Messungen durchgeführt wurden, waren transiente Vorgänge prinzipbedingt erfassbar.

Der Wassergehalt von ölimprägniertem Pressspan wurde verändert und Leitfähigkeiten in Abhängigkeit des Wassergehalts werden in Kapitel 6.8 untersucht. Diese Abhängigkeit wird dort im Hinblick auf die potenziellen Leitungsprozesse interpretiert.

In Kapitel 6.9 werden Leitfähigkeiten von Pressspan unter verschiedenen Fluiden bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen 30 °C und 90 °C präsentiert. Diese Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit betrifft nicht nur die Leitungsprozesse, sondern auch die Polarisationsmechanismen. Die Abhängigkeit konnte simulationstechnisch nachgebildet werden.

Anschließend wird in Kapitel 6.10 die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Pressspan von der angelegten Feldstärke unter verschiedenen Fluiden behandelt.

6.2 Leitfähigkeitsmessungen an unimprägniertem Pressspan

Die Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan steht seit einiger Zeit im Fokus weltweiter Forschung. Hierzu wurde beispielsweise eine internationale CIGRÉ Working Group eingerichtet, welche die Bestimmung von Leitfähigkeiten nach Norm und mittels alternativer Messverfahren untersucht und bewertet [20]. In dieser Arbeit wird ein neuartiger Ansatz gewählt, um ein physikalisches Verständnis der Leitungsprozesse im Pressspan zu erlangen. Zu diesem Zweck wurde die Leitfähigkeit von Pressspan ohne Ölprägnierung bestimmt. Hier war es zielführend, den Pressspan mit einem Gas (Luft) zu imprägnieren, da dieses eine erheblich geringere Leitfähigkeit als Pressspan besitzt (vergleiche Abbildung 2.1-1 in Kapitel 2.1), oder unter Vakuum (0,1 mbar) zu messen. Dann muss der Ladungstransport hauptsächlich durch den Pressspan und nicht durch ein leitfähigeres Medium (wie es Öl ist) stattfinden. Dies ist für den in Deutschland mehrheitlich eingesetzten ölgefüllten Transformator kein relevanter Fall. Allerdings werden beispielsweise in Japan gasgefüllte Transformatoren verwendet. Untersuchungen unter Gas helfen, die Leitfähigkeit von Pressspan mit der des Isolieröls zu vergleichen und beide Einflüsse in Bezug zur Leitfähigkeit des ölprägnierten Pressspans zu setzen.

Ein Pressspanprüfling wurde demzufolge nach Kapitel 4.1.3 vorgetrocknet, in die Messzelle in Versuchszelle (2) eingebaut und nachgetrocknet. Anschließend wurde die Temperatur auf 30 °C gestellt und nach einer Wartezeit bis zum Erreichen dieser Temperatur eine Leitfähigkeitsmessung nach der PDC-Methode durchgeführt. Die Messparameter befinden sich in Tabelle 6. Anzumerken ist, dass sich die Temperatur aufgrund der evakuierten Messanordnung nur relativ langsam änderte (keine Konvektion, kaum Wärmeleitung, hauptsächlich Wärmestrahlung), sodass eine Wartezeit von circa 24 h eingehalten wurde.

Tabelle 6: Parameter für Leitfähigkeitsmessungen

Temperatur	elektrische Feldstärke	Imprägnierung
30 °C	0,1 kV/mm	keine, Vakuum 0,1 mbar

In Abbildung 6.2-1 sind die Ströme durch einen unimprägnierten Pressspanprüfling bei 30 °C und einer Feldstärke von 0,1 kV/mm dargestellt. Der Wassergehalt des Prüflings betrug 0,02 %. Es handelt sich um eine Messung unter Vakuum (0,1 mbar). Der Polarisations- und der Depolarisationsstrom wurden jeweils 10800 s (drei Stunden) lang gemessen.

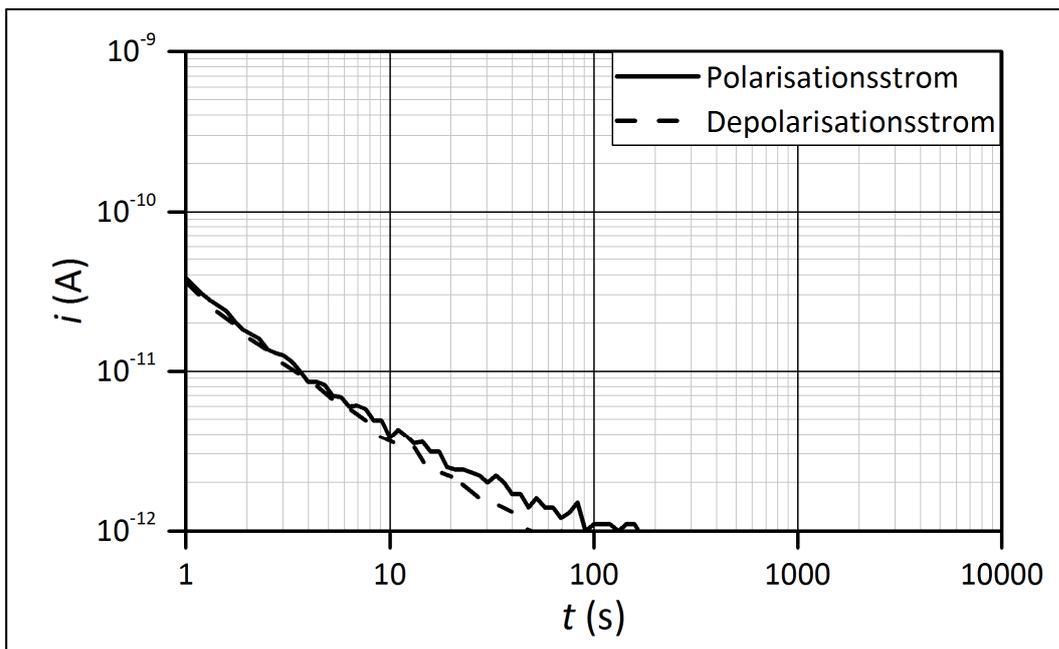


Abbildung 6.2-1: Ströme durch einen trockenen Pressspanprüfling unter Vakuum (0,1 mbar), gemessen nach der PDC-Methode bei 30 °C und 0,1 kV/mm. Der Polarisationsstrom ist mit einer durchgezogenen Linie, der Depolarisationsstrom mit einer gestrichelten Linie dargestellt.

Beide Ströme zeigen nahezu das gleiche Zeitverhalten. Sie starten in etwa beim gleichen Anfangswert und klingen mit der Zeit vergleichbar ab. Dieser Stromabfall kann damit erklärt werden, dass das Material während der Polarisationsphase geladen wird. In der Depolarisationsphase, in welcher der Prüfling kurzgeschlossen ist, können die angesammelten Ladungsträger in die entgegengesetzte Richtung wandern und der Prüfling wird somit entladen. Diese zeitabhängigen Prozesse der Ladungsträgerbewegung und -akkumulation werden unter dem Begriff der Polarisation zusammengefasst, worauf in Kapitel 2.3 näher eingegangen wurde. Es treten mehrere Polarisationsmechanismen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten auf, die letztendlich zu diesen exponentiell abfallenden Strömen führen [75]. Es ist nicht nur eine einzige Zeitkonstante ersichtlich und die Messkurve ist nicht nur mittels einer einzigen Exponentialfunktion zu beschreiben.

Diejenigen Polarisationsmechanismen, die mittels der PDC-Methode detektiert werden können, sind die Orientierungs- und die Grenzflächenpolarisation. Bei ersterer richten sich polarisierbare Moleküle aufgrund des angelegten elektrischen Feldes aus. Bei letzterer wird die Grenzfläche zwischen zwei Fasern oder der Übergang Faser-Luft (bei 0,1 mbar) polarisiert. Ladungsträger werden entlang von Fasern bzw. entlang der Molekülketten transportiert, bis der Transportprozess an der Grenzfläche endet. Die Ladungsträger können kaum in die Luft übergehen, da die Leitfähigkeit von Luft gering ist und die Ionisierungsbedingungen für Luft für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Feldstärken bei Weitem noch nicht erfüllt waren.

Die angelegte Spannung von 0,1 kV an den 1 mm dicken Pressspanprüfling führte zu einem sehr kleinen Stromfluss durch den Isolierstoff, der nach etwa 200 s mit dem verwendeten

Strommessgerät nicht mehr erfasst wurde. Innerhalb dieser 200 s war noch kein stationärer Zustand erreicht. Deshalb kann keine Aussage über die Leitfähigkeit getroffen werden.

Anmerkung: Wie in Gleichung (4.1-2) beschrieben wurde, wird die Gleichstromleitfähigkeit aus der angelegten Spannung, der effektiven Elektrodenfläche, der Prüflingsdicke sowie aus dem gemessenen stationären Stromendwert berechnet. Wird dieser Endwert aufgrund einer zu geringen Messzeit oder zu kleiner Ströme nicht erfasst, kann mittels der Ladungsdifferenzmethode (CDM) ein Schätzwert für den Stromendwert angegeben werden [76]. Aus diesem wird im Anschluss die Gleichstromleitfähigkeit berechnet. Allerdings handelt es sich hier nur um eine Leitfähigkeitsberechnung aus einem Schätzwert für den Strom. Im Rahmen dieser Arbeit wird mittels Simulation ein effektiverer Weg zur Erlangung von Stromendwerten vorgeschlagen. Dieses Vorgehen befindet sich in Kapitel 6.9.2.

Um der Unsicherheit bei kleinen Strömen aus dem Weg zu gehen, muss der Stromfluss erhöht werden, sodass er mit der verwendeten Messeinrichtung detektierbar ist. Hier bietet sich beispielsweise eine Erhöhung der Spannung an. Eine höhere Spannung führt zu einer höheren Feldstärkebelastung und damit zu einem höheren Strom durch das Isoliersystem.

Eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke um mehrere 0,1 kV/mm war allerdings nicht möglich, da es zu sichtbaren Entladungserscheinungen kam. Die Durchschlagsspannung ist eine Funktion des Druckes und des Abstands (Gesetz von Paschen [77]). Bei kleinen Drücken und kleinen Abständen ist die Durchschlagsspannung sehr hoch, sinkt dann zu einem Minimum ab, welches von der Art des Gases abhängt, und steigt darüber hinaus wieder für größere Drücke und Abstände an. Die Messung unter Vakuum liegt bei kleinen Drücken (0,1 mbar) im Bereich vor dem Minimum [8]^{S.171}. Somit wird es immer einen Abstand d in der Versuchszelle (2) geben, der multipliziert mit dem Druck p genau das Paschen-Minimum (pd) ergibt, woraufhin ein Durchschlag auftritt, wenn die Durchschlagsspannung überschritten wird. Erst unter Hochvakuum und bei sehr großen Abständen wird das Minimum nicht mehr erreicht und eine Messung wäre auch bei erhöhten Spannungen möglich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war es nicht möglich, die Spannung so weit zu erhöhen, dass sich unter Vakuum messbare Stromendwerte ohne Gasdurchschläge ergaben.

Ein weiteres Problem bei Messungen an Pressspanprüflingen unter Vakuum war die korrekte Bestimmung des Wassergehalts. Nach der letzten Messung einer Messreihe wurde der unter Vakuum befindliche Prüfling mit trockener Luft geflutet, um den Prüfling aus dem Vakuumschrank herausnehmen zu können. Anschließend wurde ein kleines Pressspanstück vom Prüfling abgeschnitten und der Wassergehalt mittels Karl-Fischer-Titration bestimmt. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 erwähnt wurde, muss bei der Prüflingentnahme der Zutritt von Feuchtigkeit (zum Beispiel aus der Umgebungsluft) so gering wie möglich gehalten werden, um Änderungen des Wassergehalts des kleinen Pressspanstücks gegenüber dem Prüfling während der Leitfähigkeitsmessung auszuschließen.

Mit diesem Vorgehen wurden minimale Wassergehalte von 0,5 % bis 1 % ermittelt. Diese Werte schienen sehr hoch und nicht plausibel, da die Prüflinge mehrere Stunden oder Tage getrocknet wurden. Allerdings war es vorstellbar, dass das Pressspanstück in der Zeit zwischen Ausbau des Prüflings und Beginn der Titration des kleinen Pressspanstücks (einige

zehn Sekunden) Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufnahm, die aufgrund des relativ hohen Feuchtegradienten (sehr trockenes Pressspanstück gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft zwischen 30 % und 60 %) verhältnismäßig schnell die Feuchtigkeit im Pressspan erhöhte.

Diese Vermutung wurde durch das folgende Experiment bestätigt und das Problem der Bestimmung des Wassergehalts bei Prüflingen, die unter Luft gemessen werden, wurde behoben: Die Versuchszelle (2) wurde wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben um eine Ölbefüllung erweitert. Nach der letzten Messung jeder Messreihe unter Vakuum wurde die Messzelle inklusive des jeweiligen Pressspanprüflings mit Öl befüllt. Zu diesem Zweck wurde das Öl vorgetrocknet und über einen Mikrofilter unter Vakuum in die Messzelle eingefüllt. Nach anschließender Belüftung der Versuchszelle (2) mit trockener Luft, Ausbau der Messzelle aus dem Versuchsstand sowie Abschneiden eines Pressspanstücks zur Wassergehaltbestimmung konnte der Wassergehalt der Pressspanprüflinge mittels Titration zu Wassergehalten kleiner als 0,1 % bestimmt werden. Diese Werte entsprachen wesentlich besser den Erwartungen. Das Isolieröl fixierte folglich die Feuchte im Prüfling und verlangsamte die Aufnahme von Wassermolekülen aus der Luft in der Zeit zwischen dem Ausbau der Messzelle und der Titration effektiv. Somit wurde eine Bestimmung des Wassergehalts des Prüflings möglich, welcher repräsentativ für den Wassergehalt des Prüflings zur Zeit der Leitfähigkeitsmessungen war [75]. Diese Erkenntnis trug wesentlich zur Vermeidung von Fehlinterpretationen und zum Prozesshandling bei. Der Wassergehalt des Prüflings in Abbildung 6.2-1 wurde mit diesem Verfahren zu 0,02 % bestimmt. Es muss angemerkt werden, dass die kurze Evakuierung möglicherweise den Wassergehalt leicht beeinflusst, dieser Einfluss aber aufgrund der kurzen Dauer der Evakuierung als gering eingeschätzt wird. Die ermittelten Wassergehalte korrelieren darüber hinaus mit Bestimmungen des Wassergehalts von ölimprägniertem, trockenem Pressspan. Somit wird empfohlen, die Bestimmung des Wassergehalts bei Pressspan unter Öl durchzuführen.

6.3 Leitfähigkeitsmessungen an luftimprägniertem Pressspan

Da Leitfähigkeitsmessungen an Pressspan unter Vakuum nur für kleine Spannungen (vergleiche das Gesetz von Paschen) für die gegebene Messanordnung möglich sind, wurde der Einfluss von Gasen, allen voran von Luft, auf die Leitfähigkeit des Pressspans untersucht. Die elektrische Festigkeit von Luft bei Normaldruck liegt bedeutend höher als diejenige bei 0,1 mbar [77], sodass Messungen bei erhöhten Feldstärken und Temperaturen möglich werden. Inwieweit die Leitfähigkeit des Pressspans durch das Imprägniermedium Luft beeinflusst wird und wie groß der Einfluss der Luft auf die Leitfähigkeitsmessungen an luftimprägniertem Pressspan ist, sollte empirisch untersucht werden.

Zu diesem Zweck wurde ein nach Kapitel 4.1.3 vorgetrockneter Pressspanprüfling in die Messzelle in Versuchszelle (2) eingebaut und bei 75 °C und 0,1 mbar für 24 Stunden nachgetrocknet. Anschließend wurde die Temperatur auf 30 °C gestellt und nach einer Wartezeit

bis zum Erreichen dieser Temperatur eine Leitfähigkeitsmessung unter Vakuum durchgeführt. Anschließend wurde die Messzelle mit Luft gefüllt, die dabei über eine Trockenvorlage aus Silicagel getrocknet wurde, und eine weitere Leitfähigkeitsmessung wurde gestartet. Die Parameter der Leitfähigkeitsmessungen nach der PDC-Methode sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Parameter für Leitfähigkeitsmessungen

Temperatur	elektrische Feldstärke	Imprägnierung
30 °C	0,1 kV/mm	keine, Vakuum 0,1 mbar
30 °C	0,1 kV/mm	getrocknete Luft 1 bar
30 °C / 50 °C / 90 °C	1 kV/mm	getrocknete Luft 1 bar

Abbildung 6.3-1 zeigt die Ströme durch einen Pressspanprüfling bei 30 °C und einer Feldstärke von 0,1 kV/mm. Die Messungen wurden unter Vakuum (0,1 mbar) und unter atmosphärischem Druck (im Folgenden als 1 bar bezeichnet) durchgeführt. Der Polarisations- und Depolarisationsstrom wurden jeweils 10800 s lang erfasst.

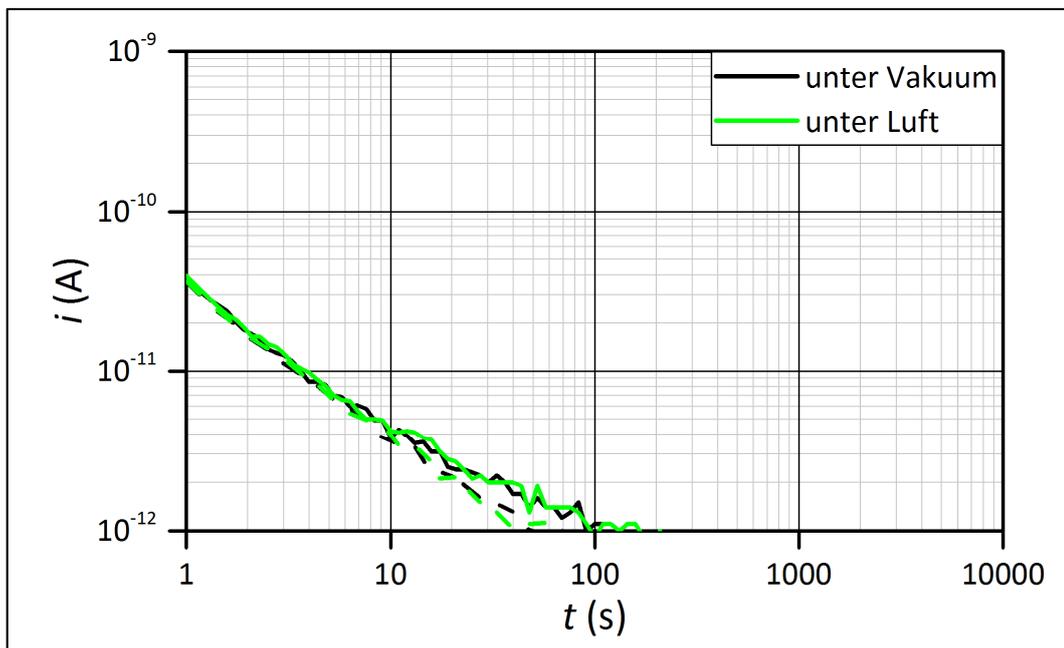


Abbildung 6.3-1: Ströme durch einen Pressspanprüfling unter Vakuum (0,1 mbar) und unter getrockneter Luft (1 bar), gemessen nach der PDC-Methode bei 30 °C und 0,1 kV/mm. Die Polarisationsströme sind mit durchgezogenen Linien, die Depolarisationsströme mit gestrichelten Linien dargestellt.

Sowohl die Stromanfangswerte, die zeitlichen Abfälle der Kurven sowie die letzten detektierbaren Stromwerte sind unter 0,1 mbar und unter 1 bar Luftimprägnierung (trocken) im Rahmen der Messunsicherheit identisch [75]. Die PDC-Messungen zeigen, dass der Einfluss des Imprägniermediums Luft bei 1 bar der Gleiche ist wie bei 0,1 mbar und Messungen zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Pressspan deshalb auch unter Luft bei Umgebungsdruck

durchgeführt werden können. Grund hierfür ist die Leitfähigkeit des Imprägniermediums Luft, welche in der Größenordnung 10^{-18} S/m angenommen wird [8] und demnach um einige Größenordnungen unter der Leitfähigkeit der Pressspanprüflinge liegt [75]. Bei den Versuchen unter Vakuum sowie unter getrockneter Luft wird also hauptsächlich die Leitfähigkeit des Pressspans (Fasern) ermittelt. Dies bedeutet, dass der Leitungsprozess maßgeblich in den Fasern und entlang der Fasern stattfindet. Hier ist Elektronen-Loch-Leitung sowie Protonenleitung zu erwarten [78]. Eine Ionenleitung aufgrund von ionisierten und frei beweglichen Pressspanbestandteilen, die durch den Pressspan driften, ist schwer vorstellbar. Ebenso ist die Luft für die in dieser Arbeit angelegten Feldstärken noch nicht ionisiert.

Anmerkung: Genauso wie bei den Messungen unter Vakuum sind die relevanten Polarisationsmechanismen unter Luftimprägnierung die Orientierung von polarisierbaren Bestandteilen im Pressspan sowie die Aufladung von Grenzflächen zwischen Fasern und luftgefüllten Hohlräumen [78].

Um die im Vergleich zur Messung unter 0,1 mbar höhere Durchschlagsfestigkeit von trockener Luft auszunutzen, wurden weitere Leitfähigkeitsmessungen an Pressspan bei drei Temperaturen (30 °C, 50 °C, 90 °C) und bei einer Feldstärke von 1 kV/mm unter 1 bar Luftimprägnierung durchgeführt. Die zeitabhängigen Polarisations- und Depolarisationsströme zeigt Abbildung 6.3-2 für alle drei Temperaturen. Nach der Versuchsreihe wurde die Versuchszelle kurzzeitig (wenige Minuten) evakuiert und mit einem trockenen Isolieröl befüllt, um den Wassergehalt im Pressspan zu konservieren und korrekt bestimmen zu können. Die Messung ergab einen Wassergehalt von 0,07 %.

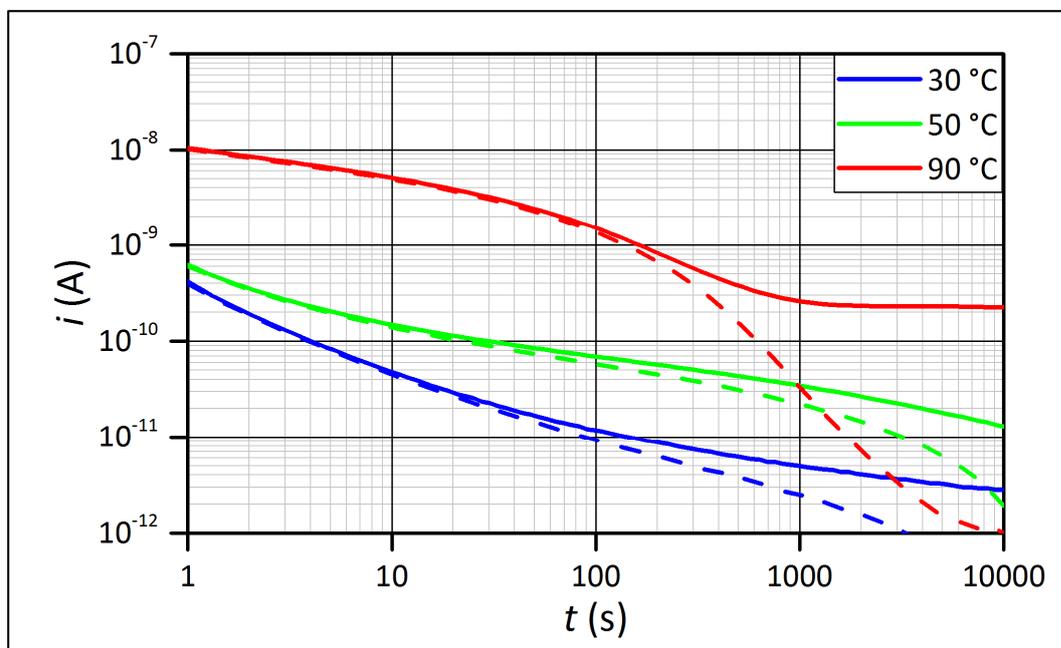


Abbildung 6.3-2: Ströme durch einen trockenen Pressspanprüfling bei Luftimprägnierung (trocken), gemessen nach der PDC-Methode bei drei Temperaturen und einer Feldstärke von 1 kV/mm. Die Polarisationsströme sind mit durchgezogenen Linien, die Depolarisationsströme mit gestrichelten Linien dargestellt.

Die im Vergleich zu Abbildung 6.3-1 um den Faktor 10 höhere Feldstärke führt auch zu proportional höheren Strömen, da luftimprägnierter Pressspan im betrachteten Feldstärkebereich in erster Näherung ein ohmsches Verhalten aufweist (siehe Kapitel 6.10). Innerhalb der ersten Sekunden liegen Polarisations- und Depolarisationsströme für jede Temperatur nahezu identisch, differieren allerdings wie erwartet für längere Messzeiten.

Bei erhöhter Temperatur ergeben sich prinzipiell höhere Ströme. Im Detail wird der Einfluss der Temperatur auf die scheinbare Leitfähigkeit von Pressspan in Kapitel 6.9 behandelt. Ein positiver Nebeneffekt der Messungen bei erhöhten Temperaturen ist die Tatsache, dass die Ströme größer sind und daher mit geringerer Unsicherheit detektiert werden können. Die Untergrenze des Strommessgeräts wurde bei höheren Temperaturen nicht mehr unterschritten. Die Polarisationsströme sind bei 90 °C um bis zu zwei Größenordnungen höher als bei 30 °C (Temperaturdifferenz 60 K). Somit hat die Temperatur einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Ströme bzw. auf die Leitfähigkeiten von Pressspan ohne Öl, wie es beispielsweise auch in [73] beschrieben ist. Die nach Gleichung (4.1-2) bestimmten Leitfähigkeiten sind in Abbildung 6.3-3 dargestellt.

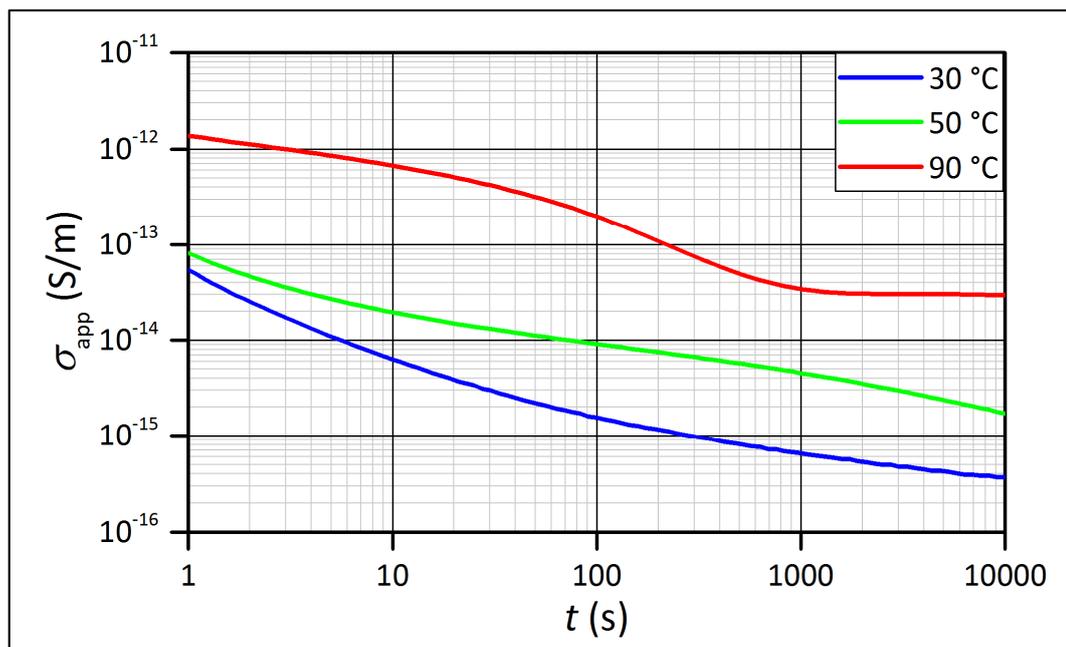


Abbildung 6.3-3: Mittels PDC-Methode ermittelte Ströme werden in scheinbare Leitfähigkeiten umgerechnet und werden für einen Pressspanprüfling unter trockener Luft und einer Feldstärke von 1 kV/mm bei verschiedenen Temperaturen gezeigt.

Die scheinbare Leitfähigkeit eines luftimprägnierten Pressspans liegt bei 30 °C und 1 kV/mm unterhalb von 10^{-15} S/m und damit unter der unteren Grenze des Auflösungsvermögens des Strommessgeräts. Bei 50 °C ist ebenso wie bei 30 °C noch keine stationäre Leitfähigkeit erreicht, auch wenn die Messungen bereits eine dreistündige Polarisations- und Depolarisationsphase beinhalten. Eine weitere Verlängerung der Messzeit führt für 30 °C und 50 °C dazu, dass die Stromwerte nicht mehr erfassbar sind und verlängert die Versuche in nicht akzeptabler Weise, da die Polarisationsmechanismen exponentiell abklingen. Hingegen ist

bei 90 °C bereits nach circa 3600 s eine stationäre Leitfähigkeit erreicht. Die Polarisation ist folglich abgeschlossen.

Messungen der Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan unter Atmosphärendruck (1 bar) sind also auf Messungen unter Vakuum (0,1 mbar) und damit auf Messungen der reinen Pressspanbestandteile ohne messbare Interaktion mit dem Imprägniergas übertragbar. Bei Atmosphärendruck konnten nun erstmals die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von gasimprägniertem Pressspan und diese bei anwendungsrelevanten elektrischen Feldstärken untersucht werden, da die leitfähigere Ölkomponente nicht mitgemessen wurde. Somit konnten im Folgenden Leitungsprozesse im Pressspan gezielt unter Luft untersucht werden.

6.4 Einfluss der Faserorientierung

Die Untersuchung des Einflusses der Faserorientierung auf die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan wird in diesem Kapitel behandelt, wozu in [79] die Grundlagen gelegt wurden. Nach der Entwicklung phänomenologischer Modelle zur Veranschaulichung potenzieller Transportwege im Pressspan werden die elektrischen Untersuchungen präsentiert und interpretiert.

6.4.1 Potenzielle Strompfade durch Pressspan

In Kapitel 1.2.1 wurde die Herstellung von Pressspan behandelt. Pressspan besteht demnach aus einer Vielzahl von Fasern, die in der Ebene mehr oder weniger gleichmäßig verteilt sind und einen Pressspanlayer (bzw. Pressspanlage) bilden. Viele dieser Layer werden bei der Pressspanherstellung aufeinander gelegt und gegautscht, bis die gewünschte Dicke erreicht ist. Für die im Rahmen dieser Arbeit von dem Unternehmen Weidmann hergestellten Prüfmuster gibt es in erster Näherung keine Vorzugsrichtung der Fasern in der Layerebene. Es kann also von einer statistisch verteilten Faserorientierung in dieser Ebene ausgegangen werden. Dies verdeutlichen die REM-Aufnahmen aus Kapitel 5. Die geometrische Ausrichtung der Fasern im Pressspan ist in Abbildung 6.4-1 schematisch dargestellt. Hierbei wird vernachlässigt, dass die einzelnen Layer nicht nur übereinander liegen, sondern miteinander verbunden sind, indem einige Fasern in andere Layer eindringen und dort gebunden werden. Eine dreidimensionale Betrachtung der Orientierung der Fasern im Pressspanvolumen war im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich.

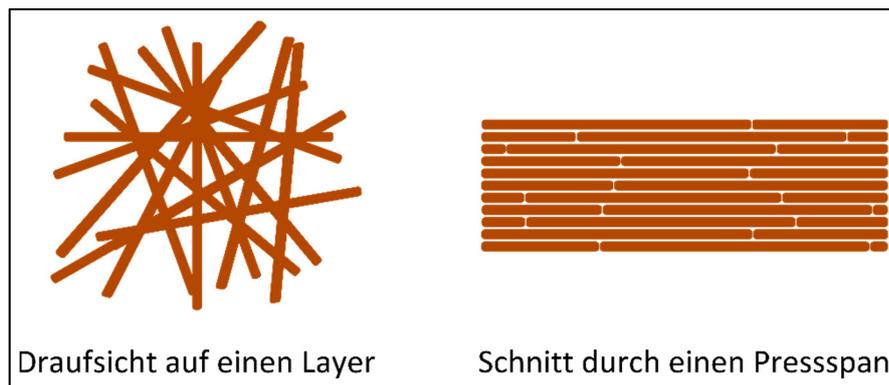


Abbildung 6.4-1: Schematische Darstellung der geometrischen Ausrichtung der Fasern im Pressspan; links: Draufsicht auf einen Layer, rechts: Schnitt durch einen Pressspan mit übereinander gestapelten Layern

Bisher wurde das Material Pressspan im Rahmen dieser und auch anderer Forschungsarbeiten nahezu ausschließlich senkrecht zu den Layern elektrisch belastet und untersucht. Auf die übereinander geschichteten Layer wurde eine Spannungselektrode gelegt und unter den Layern befand sich eine Messelektrode (oder umgekehrt). Somit wurden hauptsächlich Ströme gemessen, die in erster Näherung senkrecht zu den Fasern und von Fasern über Kontaktstellen zu anderen Fasern flossen. Dabei wurde kaum entlang von Fasern gemessen.

Für den Fall von luftimprägniertem Pressspan wird neben der Leitfähigkeit der Fasern auch die Leitfähigkeit der Kontaktstellen zwischen den Einzelfasern relevant. Der Ladungstransport soll von einer Faser auf die nächste erfolgen, damit nach Anlegen einer Spannung Ladung durch den Pressspan zur Gegenelektrode transportiert werden kann. Dazu muss ein Ladungsträger von einem Molekül der einen Faser auf ein Molekül der anderen übergehen. Es wird angenommen, dass der Abstand beider Moleküle im Allgemeinen größer ist als der Abstand von zwei Molekülen der gleichen Faser. Somit sollten die Kontaktstellen einen erhöhten Widerstand bzw. eine geringere Leitfähigkeit haben als die Einzelfasern. Dadurch kann es zu einer Widerstandserhöhung aufgrund der Übergänge Faser-Kontaktstelle-Faser kommen. Da, wie es bereits erwähnt wurde, die Fasern in den Layern auch aus der jeweiligen Layerebene herausstehen und sich mit Nachbarlayern verbinden, wird ein durchgängiger Faserkanal von einer Elektrode zur anderen ermöglicht. Die Engstellen, welche jeweils durch den Übergang von einer Faser auf die nächste Faser charakterisiert werden, bilden Orte, an denen sich Ladungsträger anhäufen können (vergleiche Kapitel 2.3.5). Der Strom fließt in erster Näherung entlang einer Faser, bis diese an eine andere Faser stößt, welche auf niedrigerem Potential liegt (also der Gegenelektrode näher ist), überwindet die „Engstelle“ des Faserübergangs und fließt auf der nächsten Faser weiter. Abbildung 6.4-2 zeigt modellhaft einen möglichen Strompfad durch den Pressspan in einer sehr vereinfachten Darstellung mit horizontalen Modellfasern.

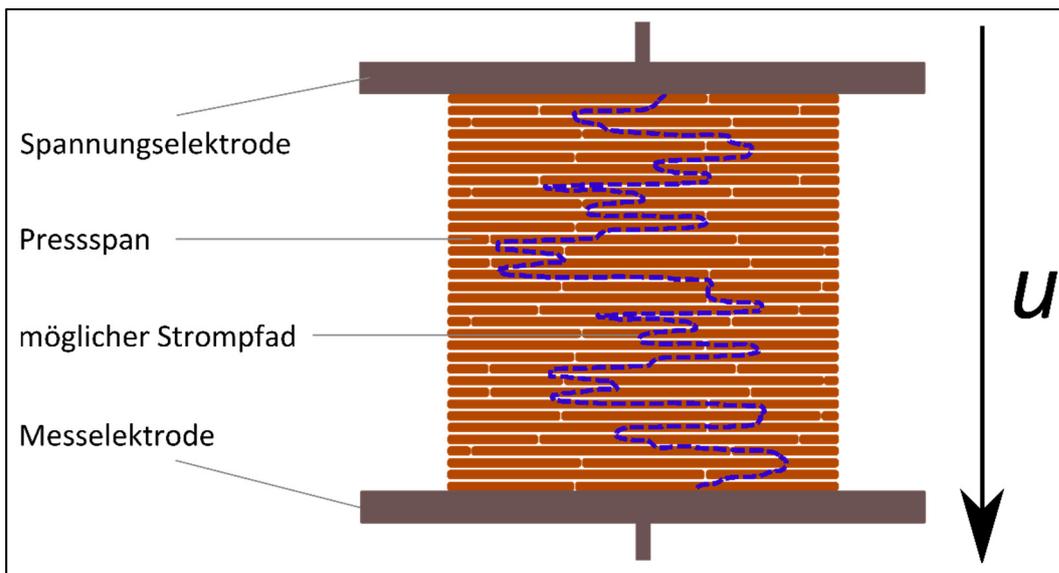


Abbildung 6.4-2: Möglicher Strompfad (blau) durch einen Pressspan bei horizontaler Messung (Elektroden auf Layeroberflächen)

Um die Anzahl und die Geometrie der Übergangsstellen von einer zur anderen Faser zu untersuchen, kann der Pressspan um 90° gedreht werden und die Elektroden können auf die Kanten der Layer (und nicht mehr auf die Oberflächen) gelegt werden. Dies zeigt Abbildung 6.4-3, in welchem auch wieder ein möglicher Strompfad entlang der vertikalen Modellfasern eingezeichnet ist.

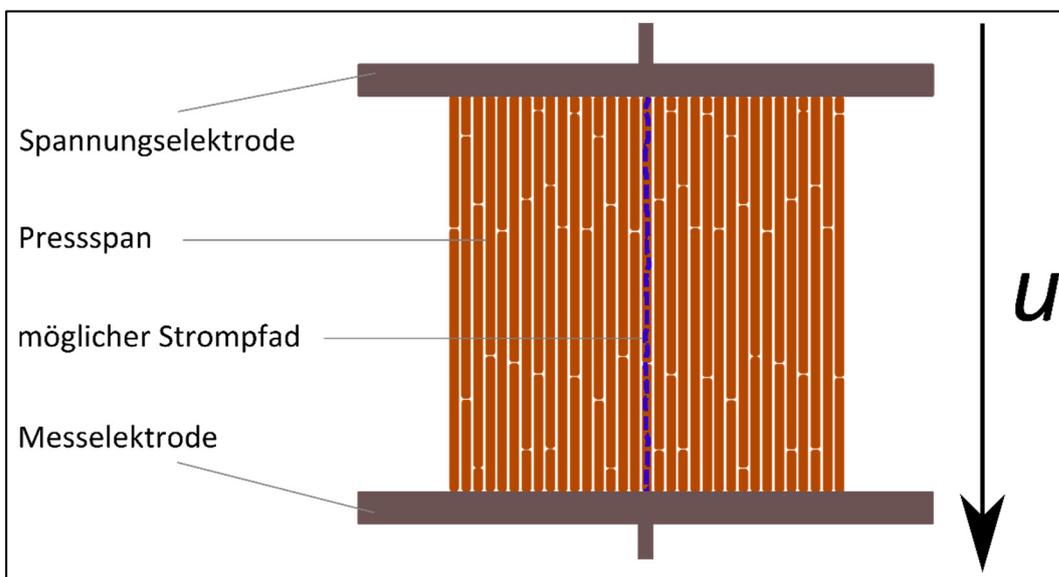


Abbildung 6.4-3: Möglicher Strompfad (blau) durch einen Pressspan bei vertikaler Messung (Elektroden auf Layerkanten)

Hier fließt der Strom über eine geringere Anzahl an Fasern und auch über eine geringere Anzahl an Faser-Faser-Kontaktstellen, da die Fasern um ein bis zwei Größenordnungen länger sind als dick.

Die Realität liegt zwischen diesen beiden Extremfällen, da einerseits Fasern in Nachbarlayer hineinragen und der Pressspan andererseits nicht nur und nicht an allen Einsatzorten im Transformator die elektrische Feldstärke senkrecht zu den Layern erfährt. Aus diesem Grund ist die vertikale Messung an Pressspan auch für den Anwendungsfall relevant und wurde in Zusammenarbeit mit [79] empirisch untersucht.

Abbildung 6.4-4 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für die Leitfähigkeitsmessungen an Pressspanstäbchen, welche zur Untersuchung des Einflusses der Faserorientierung auf die elektrische Leitfähigkeit hergestellt wurden [79]. Dabei wird die Messung der Pressspanstäbchen, bei denen die Layer parallel zu den Elektroden und damit senkrecht zum elektrischen Feld liegen, als horizontale Messung bezeichnet. Wenn die Stäbchen um 90 ° gedreht werden und die Layer somit in Feldrichtung zeigen, handelt es sich um vertikale Messungen.

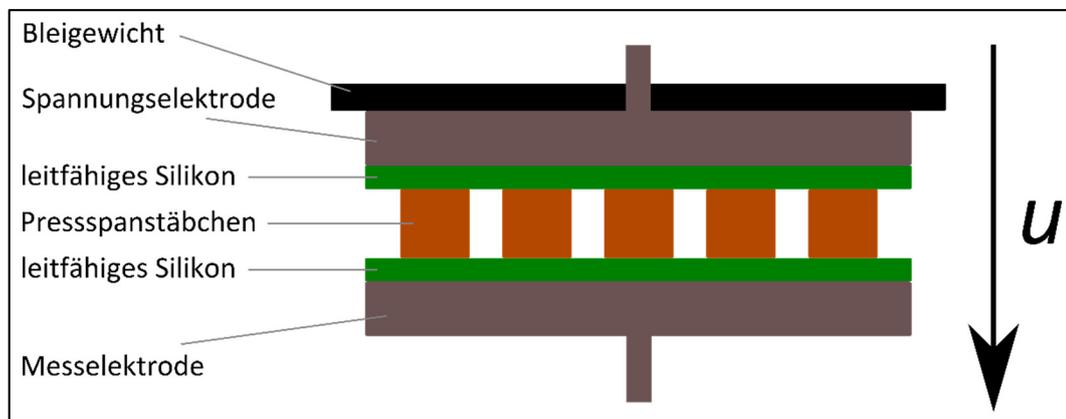


Abbildung 6.4-4: Aufbau zur Leitfähigkeitsmessung an Pressspanstäbchen, angelehnt an [79]

Zur Quantifizierung des Einflusses der Faserorientierung auf die elektrische Leitfähigkeit waren einige Vorüberlegungen, sowie Umbaumaßnahmen und Vorversuche nötig, die in Tabelle 8 beschrieben sind.

Tabelle 8: Herausforderungen bei der Untersuchung der Faserorientierung auf die Leitfähigkeit

Problem	Erklärung	Abhilfemaßnahme, Voruntersuchung
Leitfähigkeit von Isolieröl liegt über der von Pressspan.	Die Leitfähigkeit von Öl liegt über der von Pressspan. Folglich würde der Stromfluss im Fall der vertikalen Pressspanmessung unter Öl hauptsächlich im Öl stattfinden. Es ergäbe sich ein starker Einfluss der Ölleitfähigkeit.	Messungen mussten unter einem hochohmigeren Imprägniermedium durchgeführt werden, um allein den Pressspan zu charakterisieren. Hierzu eignete sich trockene Luft. Die Messungen wurden deshalb in Versuchszelle (2) unter Luftimprägnierung durchgeführt.
kleine Leitfähigkeit von Pressspan	Die Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan ist bei 30 °C sehr gering (vergleiche Kapitel 6.3).	Messungen wurden bei erhöhter Temperatur (50 °C) und bei möglichst großen Elektrodenflächen durchgeführt.

Problem	Erklärung	Abhilfemaßnahme, Voruntersuchung
Prüflings- geometrie	Pressspan wird bis zu einer Dicke von 8 mm gefertigt. Größere Dicken entstehen durch das Verkleben von Pressspanplatten (Blockspan). Der Einfluss dieser Klebeschicht und ihre Leitfähigkeit sind allerdings unbekannt.	Zur Vermeidung der Klebeschicht wurde ein 8 mm dicker Pressspan verwendet. Um dennoch detektierbare Ströme auch bei vertikalen Messungen [79] (deutlich kleinere Messfläche) erfassen zu können, wurde dieser in kleine Stäbchen zu je 8 mm Dicke gesägt. Für die Messungen wurden jeweils mehrere Stäbchen mit Abstand nebeneinander gelegt. Es ergab sich so auch für die vertikale Messung eine ausreichend große effektive Elektrodenfläche.
Schutzring	Der Schutzring soll Oberflächenströme von der Messelektrode abhalten. Da mehrere Stäbchen parallel zwischen den Elektroden liegen, müsste jedes Stäbchen eine eigene Elektrode mit Schutzringanordnung besitzen.	Voruntersuchungen belegen, dass der Schutzring für Messungen von Pressspan unter Gas nicht benötigt wird und sich nahezu identische Ströme mit und ohne Schutzring ergeben [79].
Prüflings- oberfläche	TIV hat an den Oberflächen (horizontale Messung) eine Strukturierung, die durch das Presssieb bedingt ist. Bei vertikalen Messungen ist die Oberfläche glatt.	Zur Herstellung von vergleichbaren Oberflächen für horizontale und vertikale Messungen [79] wurden alle vier Oberflächen der Stäbchen auf die gleiche Art und Weise gefräst (gleicher Fräser, gleiche Drehzahl, gleicher Vorschub, gleiche Zustelltiefe).
Vergleich- barkeit	Die fertigungsbedingten Unterschiede in der Prüflingsgeometrie können zu unterschiedlichen Strömen führen.	Die Stäbchen wurden mehrfach gedreht und vermessen, um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Die Spannung wurde jeweils an die Dicke angepasst, sodass die gleiche Feldstärke für horizontale und vertikale Messungen anlag. Eventuelle kleine Unterschiede in der Dicke der Stäbchen wurden durch ein leitfähiges Silikon zwischen Elektroden und Stäbchen ausgeglichen. Außerdem wurde die obere Elektrode beschwert. Es wurde in Vorversuchen nachgewiesen, dass das leitfähige Silikon den Kontakt zu den Stäbchen verbessert und Unebenheiten ausgleicht [79].

6.4.2 Experimentelle Untersuchungen und Interpretation

Die folgenden Messungen an Pressspanstäbchen entstanden in Zusammenarbeit mit [79]. Nach der Herstellung der Stäbchen wurden deren Geometrien gemessen. Für Leitfähigkeitsmessungen wurden diejenigen Stäbchen genutzt, welche zueinander die kleinsten Abweichungen in Höhe und Breite hatten. Anschließend wurden die Stäbchen unter 0,1 mbar und 70 °C im Vakuumschrank für circa 30 Tage getrocknet. Der Trockenvorgang wurde aufgrund der relativ großen Pressspandicken von noch circa 6 mm nach dem Fräsen und Sägen auf diese Zeit erweitert, um trockene Prüflinge zu gewährleisten. Zudem lagen Gewichte auf den Stäbchen, die eine Verformung der Stäbchen während des Trocknens verhinderten.

Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Faserorientierung auf die Leitfähigkeit wurden nach der PDC-Methode durchgeführt. Tabelle 9 listet die Messbedingungen auf.

Tabelle 9: Parameter für Leitfähigkeitsmessungen

Temperatur	elektrische Feldstärke	Imprägnierung	Reihenfolge
50 °C	0,075 kV/mm 0,1 kV/mm 0,3 kV/mm	Vakuum 0,1 mbar Luft 1 bar	horizontal (1) vertikal (1) horizontal (2) vertikal (2)

Nach dem Einbau der Stäbchen in die Messzelle wurden diese drei Tage unter Vakuum (Druck kleiner als 0,1 mbar) und bei 50 °C gelagert, um alle Komponenten nachzutrocknen. Auch die Leitfähigkeitsmessungen wurden bei 50 °C durchgeführt. Der Beginn jeder Messreihe (2 x horizontal, 2 x vertikal) war eine Messung unter 0,1 mbar bei 0,075 kV/mm. Anschließend folgte eine Belüftung der Versuchszelle mit trockener Luft, um Messungen bei höheren Feldstärken zu ermöglichen. Es wurde unter trockener Luft (1 bar) bei 0,075 kV/mm, 0,1 kV/mm und 0,3 kV/mm gemessen. Danach wurden die Versuchszelle geöffnet, die Stäbchen um 90 °C gedreht und die Zelle wieder unter 50 °C für drei Tage nachgetrocknet. Dann wurden die vertikalen Messungen, zuerst unter 0,1 mbar, dann unter trockener Luft (1 bar), sowie die anderen beiden Messreihen (2. Messreihe horizontal und 2. Messreihe vertikal) durchgeführt.

Bei jedem Öffnen der Versuchszelle wurde ein kleines Stück von einem Stäbchen, das als Referenz neben der Messzelle eingebaut war, abgeschnitten, um den Wassergehalt zu bestimmen. Diese Testmessungen bei den Umbaumaßnahmen von horizontal auf vertikal und umgekehrt sowie die Messung der Messstäbchen nach Ablauf aller Messreihen ergaben Wassergehalte der Stäbchen von kleiner als 0,1 %. Während der Messungen und der Umbaumaßnahmen erfolgte somit kein detektierbarer Anstieg des Wassergehalts in den Prüflingen, was die Messergebnisse verfälscht hätte.

Die Messergebnisse unter 0,1 mbar unterschieden sich von den jeweiligen Messungen unter 1 bar bei 0,075 kV/mm nicht. Erstere dienten lediglich der Kontrolle. Im Folgenden werden nur Messungen unter Luft (1 bar) miteinander verglichen, da unter Luft höhere Feldstärken angelegt werden können und Messunsicherheiten weniger ins Gewicht fallen als bei Messungen von sehr kleinen Strömen bei kleineren Feldstärken.

Abbildung 6.4-5 zeigt die zeitabhängigen, scheinbaren Leitfähigkeiten der Pressspanstäbchen, gemessen bei 50 °C und 0,1 kV/mm. Es sind jeweils beide horizontale Messungen (Elektroden auf Pressspanlayer) und beide vertikale Messungen (Elektroden senkrecht zu Pressspanlayer) gezeigt. Die Reihenfolge der Auflistung der Messungen in der Legende entspricht der Messreihenfolge.

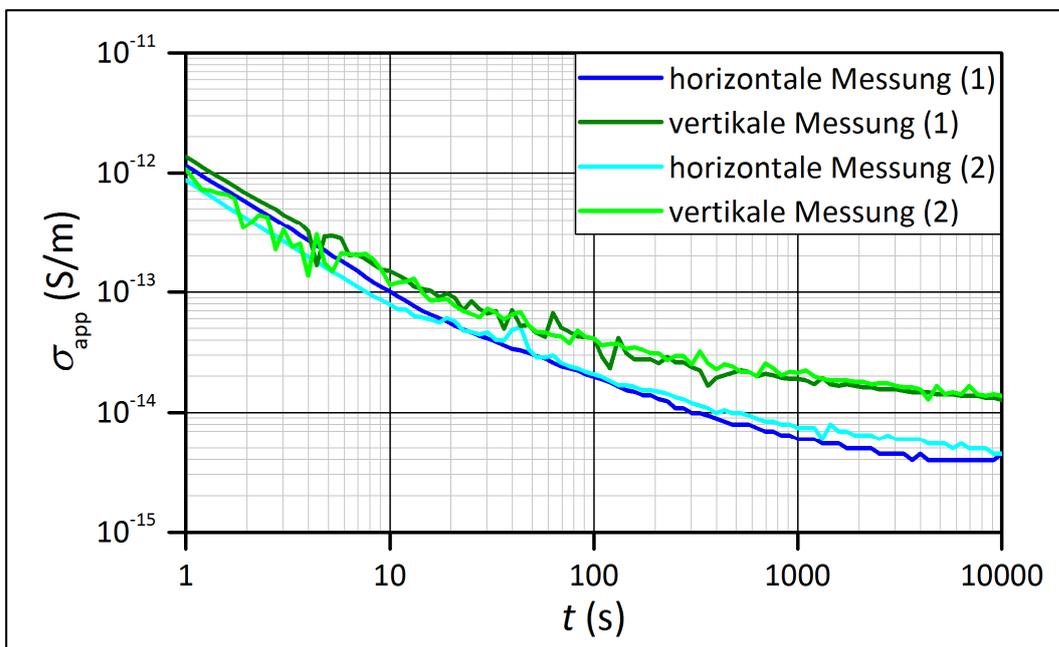


Abbildung 6.4-5: Scheinbare Leitfähigkeiten von Pressspanstäbchen (horizontal und vertikal gemessen) bei 50 °C und 0,1 kV/mm, Rohdaten aus [79]

Die scheinbaren Leitfähigkeiten sinken mit zunehmender Messdauer und die Kurven sehen im ersten Moment ähnlich aus wie die Messungen an luftimprägniertem Pressspan aus Kapitel 6.3. Die beiden horizontalen Messungen (blau) und auch die beiden vertikalen Messungen (grün) unterscheiden sich kaum voneinander. Somit kann festgehalten werden, dass sich keine Materialeigenschaften der Pressspanprüflinge über die langen Trocken- und Messzeiten veränderten und die entsprechenden Leitfähigkeiten reproduzierbar bestimmt wurden.

Bei einem Vergleich der horizontalen Messungen mit den vertikalen Messungen fällt auf, dass alle vier Kurven anfangs nahe beieinander liegen. Ab circa 10 s ist ein kleiner Unterschied erkennbar. Für lange Zeiten liegen die scheinbaren Leitfähigkeiten der vertikalen Messungen deutlich über denen der horizontalen Messungen. Zwischen Messungen der

beiden Messaufbauten liegt ungefähr der Faktor 3 in der Leitfähigkeit. Dieser Faktor ist reproduzierbar und resultiert damit aus einer Materialeigenschaft.

Hier ist trotz der geänderten Strompfade in erster Näherung das gleiche Polarisationsverhalten zu beobachten. Anfangs ist die Orientierungspolarisation relevant, die bei beiden Orientierungsrichtungen der Fasern gleich ist. Für lange Zeiten wird das Polarisationsverhalten durch die Grenzflächenpolarisation bestimmt. Die Geometrie und Zahl der für den Stromtransport relevanten Kontaktstellen sollte bei horizontalen und vertikalen Messungen deutlich unterschiedlich sein.

Das gleiche Verhalten zeigt sich für eine Feldstärke von 0,3 kV/mm in Abbildung 6.4-6. Aufgrund der höheren Feldstärke und damit auch höheren Ströme sind die Kurven augenscheinlich glatter.

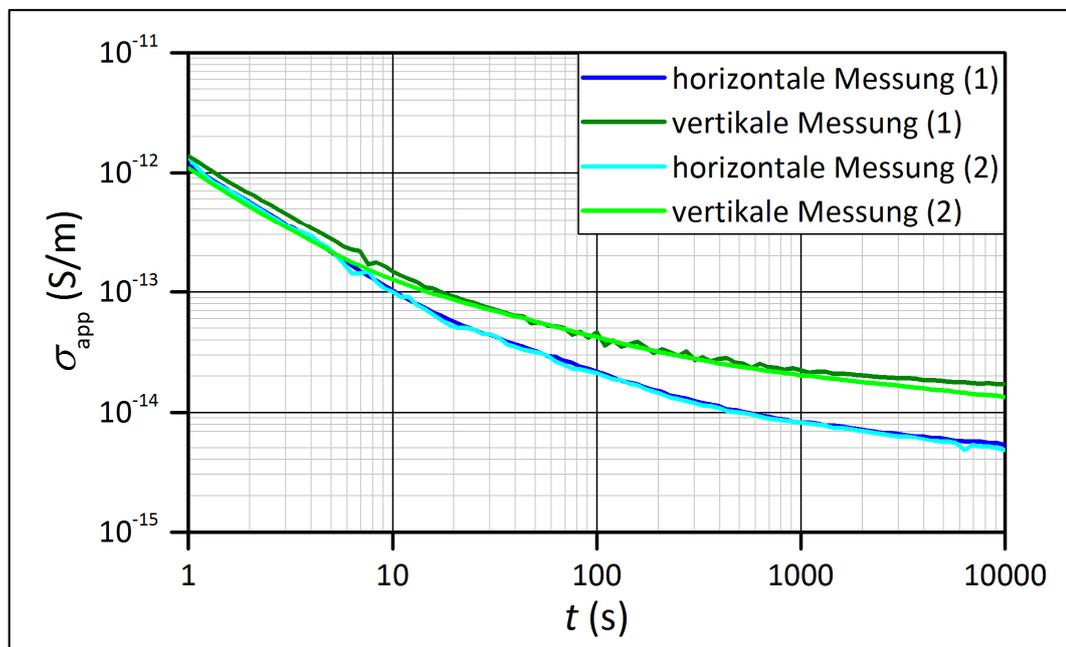


Abbildung 6.4-6: Scheinbare Leitfähigkeiten der Pressspanstäbchen (horizontal und vertikal gemessen) bei 50 °C und 0,3 kV/mm, Rohdaten aus [79]

Auch hier zeigt sich die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, da die beiden horizontalen Messungen und die beiden vertikalen Messungen eng beieinander liegen. Der kleine Unterschied in den Endwerten der beiden vertikalen Messungen ist im Rahmen der Messunsicherheit zu vernachlässigen.

Die vertikalen Messungen liegen bei kleinen Messzeiten ähnlich wie die horizontalen Messungen. Bei längerer Messdauer ist allerdings wieder der Unterschied (ungefähr Faktor 3) ersichtlich. Es muss angemerkt werden, dass es sich bei den Leitfähigkeiten nach drei Stunden noch nicht um Endwerte handelt, sondern die Kurven vermutlich noch weiter fallen würden. Somit können Aussagen über die Endleitfähigkeit nicht mit Sicherheit getroffen werden.

Anmerkung: Die Pressspanstäbchen wurden auch bei einer kleinen Feldstärke von 0,075 kV/mm gemessen. Auch hier lagen die Leitfähigkeiten bei den vertikalen Messungen knapp um den Faktor 3 über den Leitfähigkeiten der horizontalen Messungen.

Tabelle 10 zeigt einen Vergleich der Leitfähigkeiten der Stäbchenversuche unter Luft (1 bar) nach drei Stunden Messdauer für alle gemessenen Feldstärken (0,075 kV/mm, 0,1 kV/mm, 0,3 kV/mm) und jeweils alle vier Messreihen (2 x horizontal, 2 x vertikal).

Tabelle 10: Leitfähigkeitswerte nach einer Messdauer von drei Stunden, Rohdaten aus [79]

Messreihen bei 0,075 kV/mm	Leitfähigkeit (S/m)		Leitfähigkeit (S/m), gemittelt	Faktor $\frac{\sigma_{\text{vertikal}}}{\sigma_{\text{horizontal}}}$
horizontal (1)	$4,65 \cdot 10^{-15}$	horizontale Ausrichtung	$4,65 \cdot 10^{-15}$	2,84
horizontal (2)	$4,65 \cdot 10^{-15}$			
vertikal (1)	$1,23 \cdot 10^{-14}$	vertikale Ausrichtung	$1,32 \cdot 10^{-14}$	
vertikal (2)	$1,40 \cdot 10^{-14}$			
Messreihen bei 0,1 kV/mm	Leitfähigkeit (S/m)		Leitfähigkeit (S/m), gemittelt	Faktor $\frac{\sigma_{\text{vertikal}}}{\sigma_{\text{horizontal}}}$
horizontal (1)	$4,48 \cdot 10^{-15}$	horizontale Ausrichtung	$4,48 \cdot 10^{-15}$	2,99
horizontal (2)	$4,48 \cdot 10^{-15}$			
vertikal (1)	$1,29 \cdot 10^{-14}$	vertikale Ausrichtung	$1,34 \cdot 10^{-14}$	
vertikal (2)	$1,38 \cdot 10^{-14}$			
Messreihen bei 0,3 kV/mm	Leitfähigkeit (S/m)		Leitfähigkeit (S/m), gemittelt	Faktor $\frac{\sigma_{\text{vertikal}}}{\sigma_{\text{horizontal}}}$
horizontal (1)	$5,31 \cdot 10^{-15}$	horizontale Ausrichtung	$5,06 \cdot 10^{-15}$	3,04
horizontal (2)	$4,81 \cdot 10^{-15}$			
vertikal (1)	$1,72 \cdot 10^{-14}$	vertikale Ausrichtung	$1,54 \cdot 10^{-14}$	
vertikal (2)	$1,35 \cdot 10^{-14}$			

Für alle drei Feldstärken und nach drei Stunden Messdauer liegen die Leitfähigkeiten bei horizontalen und vertikalen Messungen um den Faktor 3 auseinander. Wird in Faserrichtung gemessen (vertikale Messungen), dann werden größere Leitfähigkeiten erreicht als parallel zu den Layern (horizontale Messungen). Der Gesamtwiderstand des Pressspans ist niedriger, wenn in Faserrichtung gemessen wird. Es fließt demnach ein höherer Strom, wenn weniger (lange) Fasern und damit auch weniger Übergangsstellen (Kontaktstellen) von einer Faser zur anderen Faser überwunden werden müssen. Das legt den Schluss nahe, dass der Übergang von einer Faser auf eine andere Faser der begrenzende Widerstand im Pressspan ist.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse ist nicht eindeutig vorhersehbar, wie sich die Faserorientierung auf ölprägnierten Pressspan auswirkt. Takahashi [80] postulierte deutliche Unterschiede in der Leitfähigkeit bei der Belastung von geometrisch unterschiedlich ausgerichtetem Papier und Pressspan. Allerdings fehlen wesentliche Angaben und Versuchsparameter zur Übertragung der Experimente auf die im Rahmen dieser Arbeit für Pressspanstäbchen unter Luft durchgeführten Untersuchungen. Das oben beschriebene Experiment ist nicht für ölprägnierten Pressspan durchführbar, da aufgrund der Stäbchenanordnung bei der Messung zusätzlich ein durchgängiger Ölkanal gemessen würde.

Nun werden die horizontalen und die vertikalen Messungen mit einem Pressspan vom Typ TIV verglichen, der nicht in Streifen geschnitten wurde. Den Vergleich mit den Versuchen zur Faserorientierung bei 50 °C und einer Feldstärke von 0,1 kV/mm zeigt Abbildung 6.4-7.

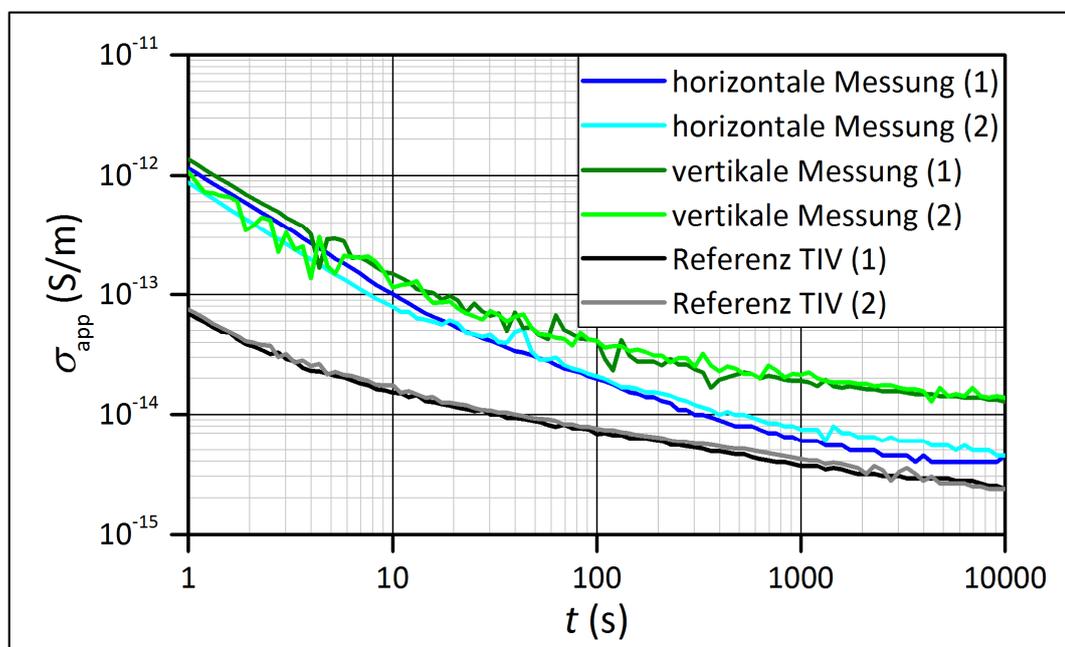


Abbildung 6.4-7: Scheinbare Leitfähigkeiten von Pressspanstäbchen (horizontal und vertikal gemessen) und von zwei Messungen an Pressspan vom Typ TIV bei 50 °C und 0,1 kV/mm

Bei einem Vergleich der Stäbchenmessungen mit den beiden Messungen der Pressspanprüflinge vom Typ TIV fällt auf, dass sich die Endleitfähigkeiten der horizontalen Stäbchenmessungen und der Messungen bei TIV kaum unterscheiden. Das ist insofern verständlich, als dass die TIV-Prüflinge ebenso wie die horizontalen Stäbchenprüflinge aus geschichteten Pressspanlayern bestehen, auf deren Oberflächen die Elektroden zur Messung gelegt wurden. In beiden Fällen wird also eine ähnliche Faserlage gemessen. Somit ist nachgewiesen, dass sich die Pressspanstäbchen in ihren Leitungsprozessen annähernd gleich verhalten wie ein nicht zersägter Pressspan.

Die scheinbaren Leitfähigkeiten der Prüflinge aus TIV sind für Messzeiten kleiner als 400 s niedriger als die scheinbaren Leitfähigkeiten der horizontal gemessenen Stäbchen. Dieses Verhalten kann beispielsweise mit den verschiedenen Volumina der Prüflinge oder mit der unterschiedlichen Anzahl an Grenzflächen und folglich mit einem anderen Polarisationsverhalten zusammen hängen. Außerdem ist der Elektrodenkontakt möglicherweise leicht anders. Hierzu besteht bisher noch keine belastbare Theorie und dies bietet Stoff für weiterführende Arbeiten.

6.5 Variation der Pressspandichte

Das Zusammenspiel von Fasern und Hohlräumen im Pressspan beeinflusst dessen elektrisches Verhalten. Deshalb wird im Folgenden der Einfluss der Pressspandichte auf die elektrische Leitfähigkeit unter Luft- und Ölimprägnierung untersucht.

6.5.1 Materialdaten

In den Kapiteln 6.2 und 6.3 wurden erstmals die Leitfähigkeitsmessungen an Pressspan ohne Ölimprägnierung präsentiert und diskutiert. Außerdem wurde der Einfluss der Geometrie und der Lage der Fasern im Pressspan auf den Leitungsprozess und auf die elektrische Leitfähigkeit in Kapitel 6.4 behandelt. Dieses Kapitel beschäftigt sich nun mit dem Unterschied im Volumenverhältnis Faser zu Hohlraum (Pressspandichte).

Zu diesem Zweck wurden Prüflinge aus Pressspan mit gleicher Materialdicke von 1 mm, aber mit unterschiedlicher Materialdichte elektrisch gemessen. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der verwendeten Prüflinge und einige charakteristische Größen.

Tabelle 11: Prüflingsübersicht und ermittelte Prüflingeigenschaften

Eigenschaftsprüfung	Prüfmethode	Material TI	Material TIII	Material TIV
<i>Leitfähigkeit des wässrigen Auszugs (mS/m)</i>	IEC 60641-2 [68]	1,9	1,9	1,4
<i>pH-Wert</i>	IEC 60641-2 [68]	7,2	7,2	7,1
<i>Polymerisationsgrad</i>	IEC 60450 [81]	1346	1369	1411
<i>Ligningehalt (%)</i>	ISO 302 [82]	5,5	5,5	5,5
<i>Dichte unter Luft (g/cm³)</i>	IEC 60641-2 [68]	1,2	0,9	1,1

Material TI ist durch einen zusätzlichen Verdichtungsprozess (Kalandrieren) aus Material TIII entstanden. Die Materialien TIII (bzw. TI) und TIV sind hinsichtlich ihrer Herstellungsschritte (Maschine, Temperatur- und Druckbelastung etc.) verschieden. Dies ist detailliert in Kapitel 5 beschrieben. Sie sind allerdings aus dem gleichen Zellstoff (englisch: pulp) gefertigt.

Anmerkung: Eine Untersuchung der Faserlängenverteilung der drei je 1 mm dicken Prüflinge ergab im Rahmen der Messtoleranzen keine Unterschiede. Der Ligningehalt, der möglicherweise den Leitungsprozess beeinflusst, ist ebenfalls identisch, da der gleiche Zellstoff verwendet wurde.

Die Prüflinge unterscheiden sich in der Dichte, die unter Luft, bei einer Temperatur von circa 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von circa 50 % bestimmt wurde. TIII ist das niedrigste Material, TI aufgrund der Kalandrierung das dichteste. Die Dichte von TIV liegt zwischen den anderen beiden Prüflingstypen.

Nun musste das Verhältnis des Faservolumens zum Ölvolumen im ölprägnierten Pressspan ermittelt werden, um eine Größenvorstellung der Verhältnisse im Isolierstoff zu bekommen. In einem ersten Schritt wurden von jedem Pressspanstyp TI, TIII und TIV fünf Stücke abgeschnitten, um zufällige, statistische Abweichungen in den Messungen mitteln zu können. Laut Norm IEC 60641-2 [68] sind mindestens drei Probenstücke zur Bestimmung der Dichte nötig. Dann wurden die Pressspanstücke unter Vakuum (Druck kleiner als 0,1 mbar) bei 70 °C mehrere Stunden getrocknet. Nach dem Trockenvorgang wurden der Vakuumschrank mit getrockneter Luft (Index LB, luftprägnierter Pressspan) belüftet und die Geometrien sowie die Massen $m_{LB,i}$ der Pressspanstücke bestimmt. Die Genauigkeit der Geometriemessung betrug 50 µm und die der Massenmessung 100 µg. Die Bestimmung der Masse musste möglichst schnell vonstattengehen, um eine Befeuchtung der Proben durch die Luftfeuchtigkeit so gering wie möglich zu halten. Die jeweiligen Volumina der luftprägnierten Pressspanstücke $V_{LB,i}$ und die mittlere Dichte $\bar{\rho}_{LB}$ konnte dann berechnet werden:

$$\bar{\rho}_{\text{LB}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{\text{LB},i}}{V_{\text{LB},i}} \quad (6.5-1)$$

Anschließend wurden die Pressspanstücke wieder im Vakuumofen bei einem Druck kleiner als 0,1 mbar und 70 °C circa zwei Stunden nachgetrocknet und dann mit einem Mineralöl unter Vakuum imprägniert. Nach Belüftung des Vakuumschranks wurde die Masse der ölimprägnierten Pressspanstücke (Index OB, ölimprägnierter Pressspan) gemessen. Zusätzlich wurde die Geometrie der ölimprägnierten Pressspanstücke erfasst. Die Messungen zeigten nur sehr kleine Abweichungen zwischen der Geometrie der luftimprägnierten $V_{\text{LB},i}$ und der ölimprägnierten Pressspanstücke $V_{\text{OB},i}$, sodass die beiden Volumina, wie es zu erwarten war, annähernd gleich waren.

$$\bar{V}_{\text{OB},i} \stackrel{!}{=} \bar{V}_{\text{LB},i} \quad (6.5-2)$$

$$\bar{\rho}_{\text{OB}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{\text{OB},i}}{V_{\text{LB},i}} \quad (6.5-3)$$

In einem dritten Schritt wurde die Dichte des Isolieröls bestimmt. Hierzu wurde eine μl -Spritze mit bekannter Geometrie (Volumen $V_{\text{Öl},i}$) mit Öl gefüllt, gewogen ($m_{\text{Öl},i}$) und die Dichte berechnet:

$$\bar{\rho}_{\text{Öl}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{\text{Öl},i}}{V_{\text{Öl},i}} \quad (6.5-4)$$

Nun musste die durchschnittliche Masse des im ölimprägnierten Pressspan vorhandenen Öls $\bar{m}_{\text{Öl in Board}}$ berechnet werden. Sie ergab sich als Differenz aus der gemessenen Masse des ölimprägnierten \bar{m}_{OB} und des luftimprägnierten Pressspans \bar{m}_{LB} , da deren Volumina identisch waren. Daraus wurde dann das Ölvolumen im ölimprägnierten Pressspan $\bar{V}_{\text{Öl in Board}}$ bestimmt:

$$\bar{m}_{\text{Öl in Board}} = \bar{m}_{\text{OB}} - \bar{m}_{\text{LB}} \quad (6.5-5)$$

$$\bar{V}_{\text{Öl in Board}} = \frac{\bar{m}_{\text{Öl in Board}}}{\bar{\rho}_{\text{Öl}}} \quad (6.5-6)$$

Hierbei handelte es sich nun um das tatsächliche, gemittelte Ölvolumen der Pressspan-typen.

Zuletzt musste nur noch das Volumen, welches die Fasern im Pressspan einnehmen $\bar{V}_{\text{Faser in Board}}$, bestimmt werden. Es wurde aus der Differenz des Volumens von ölimprägniertem Pressspan $V_{\text{OB},i}$ (bzw. von luftimprägniertem Pressspan $\bar{V}_{\text{LB},i}$) und dem Ölvolumen im Pressspan $\bar{V}_{\text{Öl in Board}}$ berechnet:

$$\bar{V}_{\text{Faser in Board}} = \bar{V}_{\text{OB}} - \bar{V}_{\text{Öl in Board}} \quad (6.5-7)$$

Dieses Volumen beschreibt ein Faservolumen, in dem alle Fasern zusammengepresst sind und es keine Poren und Hohlräume mehr gibt, das sogenannte Feststoffvolumen. Nun ergab sich das Verhältnis des Faservolumens zum Ölvolumen:

$$\bar{V}_{\text{Faser in Board}} : \bar{V}_{\text{Öl in Board}} \quad (6.5-8)$$

Anmerkung: Dabei wird angenommen, dass das Öl in alle Hohlräume dringt.

Das Verhältnis des Volumens der Fasern zum Volumen des Öls beträgt bei niederdichtem Material (TIII) in etwa 75 % : 25 % (± 5 %), bei den anderen beiden hochdichten Pressspan-typen TI und TIV in etwa 83 % : 17 % (± 5 %). Ein Unterschied in der Dichte zwischen TI und TIV war im Rahmen der Messunsicherheit und der statistischen Beschränkungen nicht feststellbar.

6.5.2 Einfluss der Pressspandichte bei Luftimprägnierung

Pressspan besteht vereinfacht aus einer Schichtung von Pressspanfasern und Hohlräumen. Je nach Materialdichte variiert somit der Anteil der Hohlräume am Gesamtvolumen. Da die Fasern in einem Layer mehr oder weniger gleichverteilt sind und die Layer in der Produktion auf der Formatwalze aufgerollt werden, sollte sich in erster Abschätzung in etwa eine Gleichverteilung der Fasern und Hohlräume in Pressspanprodukten einstellen.

Alle drei Prüflinge wurden nach Kapitel 4.1.3 getrocknet und in die Messzelle eingebaut. Nach einer Nachrocknungsphase wurde der Vakuum-Wärmeschrank mit trockener Luft belüftet und die Prüflinge bei 50 °C mit den Feldstärken 0,1 kV/mm und 1 kV/mm belastet (siehe Tabelle 12). Nach den Messungen wurden die Prüflinge ölimprägniert, um den Wassergehalt korrekt bestimmen zu können. Die Wassergehalte der drei Prüflinge lagen unter 0,1 % und die Prüflinge sind somit als trocken zu bezeichnen.

Tabelle 12: Parameter für Leitfähigkeitsmessungen

Temperatur	elektrische Feldstärke	Imprägnierung
50 °C	0,1 kV/mm, 1 kV/mm	Luft, 1 bar

Abbildung 6.5-1 zeigt die scheinbare Leitfähigkeit der drei Prüflinge TI, TIII und TIV unter 50 °C und bei 1 kV/mm in Abhängigkeit der Zeit. Die Feldstärke wurde zu 1 kV/mm gewählt,

um größere Ströme zu erhalten, die mit einer tolerierbaren Messunsicherheit erfasst werden können. Die Kurven zeigen für 0,1 kV/mm das gleiche Zeitverhalten und liegen ähnlich bis auf die (relativ) höheren Messunsicherheiten aufgrund kleinerer Ströme.

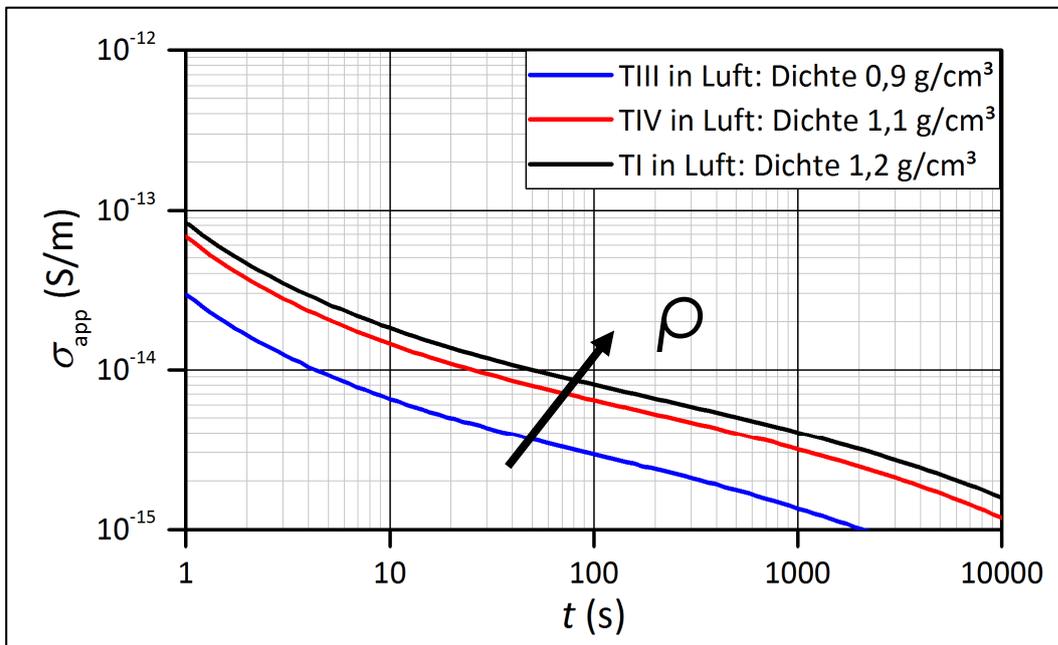


Abbildung 6.5-1: Scheinbare Leitfähigkeit bei 50 °C und 1 kV/mm in Abhängigkeit der Zeit für die verschiedenen Prüflinge TI, TIII und TIV bei Luftimprägnierung

Die scheinbaren Leitfähigkeiten der luftimprägnierten Pressspanprüflinge klingen mit der Zeit ab. Ein stationärer Zustand ist nach drei Stunden noch nicht erreicht. Die Kurvenform ist für alle Prüflinge ähnlich, sodass die Kurven parallelverschoben scheinen. Die Polarisationsmechanismen sind somit für alle drei Prüflinge gleich.

Pressspan TI zeigt die höchste scheinbare Leitfähigkeit und TIV weicht nur geringfügig davon ab. Bei TIII wird hingegen eine deutlich geringere scheinbare Leitfähigkeit gemessen. Die scheinbare Leitfähigkeit von TI und die von TIV liegen um einen Faktor 2 bis 3 höher als bei TIII. [83]

Wird dieses Verhalten mit den jeweiligen Dichten in Verbindung gebracht, so zeigt sich, dass das Material mit der niedrigsten Dichte (TIII) auch die geringste Leitfähigkeit besitzt. Die Hohlräume sind luftgefüllt, wobei die Leitfähigkeit von trockener Luft nach Abbildung 2.1-1 in der Größenordnung 10^{-18} S/m (Wert bei Raumtemperatur) angenommen wird [8]^{S.267}. Die Leitfähigkeit von Pressspan liegt folglich um mehrere Größenordnungen höher. Die Kurven in Abbildung 6.5-1 ordnen sich also von kleiner zu größerer scheinbarer Leitfähigkeit mit der Zunahme der Dichte des Prüfmaterials. Es ergibt sich folglich eine Schichtung von Fasern und luftgefüllten Hohlräumen, wobei sich der Anteil des Fasermaterials am gesamten Volumen mit der Dichte ändert. Das Gesamtvolumen war bei allen Prüflingen nahezu identisch (gleiche Messfläche, gleiche Prüflingsdicke). Mehr Fasermaterial führt in der Konsequenz zu einer erhöhten scheinbaren Leitfähigkeit.

6.5.3 Einfluss der Pressspandichte bei Ölimprägnierung

In Kapitel 6.5.2 wurde der Einfluss der Dichte auf die Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan behandelt. Nun wurden die drei Pressspanprüflinge TI, TIII und TIV ölimprägniert und wiederum im Kontext der unterschiedlichen Dichten interpretiert. Als Imprägniermedium wurden zwei mineralische Isolieröle verwendet. Die Leitfähigkeit des hochohmigen Öls liegt bei 50 °C und 0,1 kV/mm in der Größenordnung 10^{-14} S/m. Die Leitfähigkeit des niederohmigen Öls beträgt bei der gleichen Parameterkombination 10^{-12} S/m.

Die getrockneten Pressspanprüflinge wurden mit den getrockneten und entgasten Isolierölen imprägniert und anschließend wurde die Leitfähigkeit nach der PDC-Methode bei 50 °C und 0,1 kV/mm sowie 1 kV/mm bestimmt (siehe Tabelle 13). Die Wassergehalte der Prüflinge lagen unter 0,1 %.

Tabelle 13: Parameter für Leitfähigkeitsmessungen

Temperatur	elektrische Feldstärke	Imprägnierung
50 °C	0,1 kV/mm, 1 kV/mm	hochohmiges Mineralöl
50 °C	0,1 kV/mm, 1 kV/mm	niederohmiges Mineralöl

Abbildung 6.5-2 zeigt die scheinbare Leitfähigkeit der unterschiedlich dichten Pressspanprüflinge bei 50 °C und einer Feldstärke von 0,1 kV/mm als Funktion der Zeit, nachdem sie mit dem hochohmigen Öl imprägniert wurden.

Die Leitfähigkeit aller drei Prüflinge liegt unabhängig von ihrer Dichte über die gesamte Messdauer ähnlich. Die Werte bei 10800 s unterscheiden sich nicht wesentlich. Polarisations- und Leitungsprozesse sind für alle drei Prüflinge gleich. Allerdings liegen alle drei Kurven höher als bei Luftimprägnierung. Bei einer Ölimprägnierung kommt neben den Leitungsprozessen von Elektronen-Loch-Leitung und Protonenleitung im Pressspan noch die Ionenleitung in ölgefüllten Volumina im Pressspan hinzu. Außerdem werden zusätzliche Polarisationsmechanismen detektiert, da viele Faser-Öl-Grenzflächen aufgeladen werden. Detailliertere Untersuchungen zum Einfluss der Ionenleitung auf die Leitungsprozesse von imprägniertem Pressspan befinden sich in Kapitel 6.6.

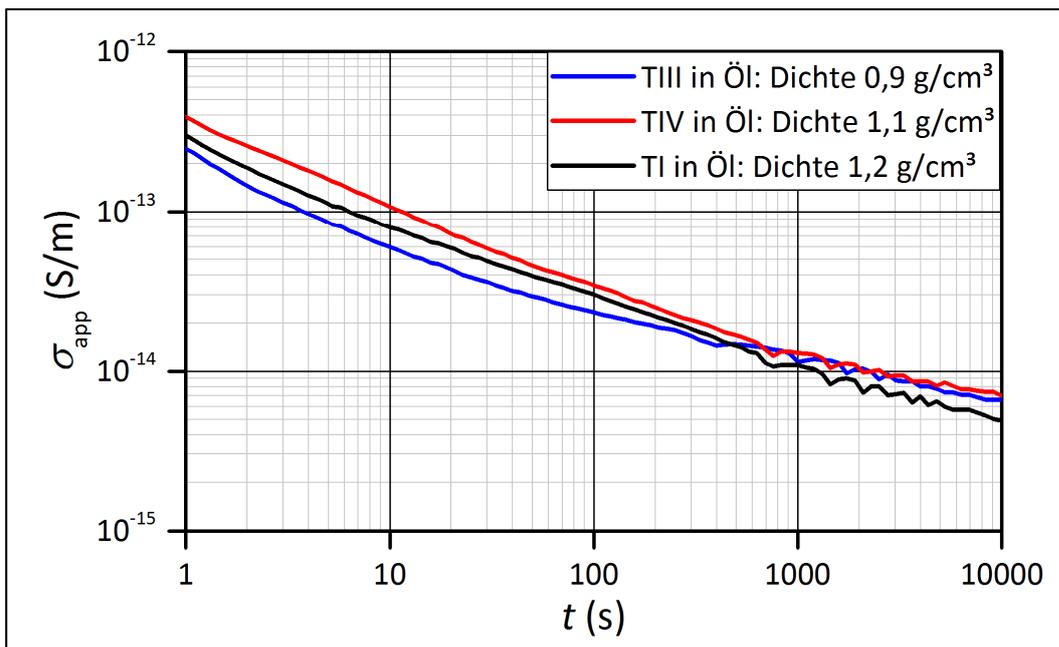


Abbildung 6.5-2: Scheinbare Leitfähigkeit bei 50 °C und 0,1 kV/mm in Abhängigkeit der Zeit für die verschiedenen Prüflinge TI, TIII und TIV imprägniert mit einem hochohmigen Mineralöl

Im Vergleich zu Abbildung 6.5-1 hatte das Imprägniermedium hochohmiges Mineralöl eine Leitfähigkeit, die in der gleichen Größenordnung liegt wie die Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan. Somit kommt es zu einer verhältnismäßig homogenen Feldverteilung im Pressspan. Aufgrund der Tatsache, dass der Faseranteil deutlich höher ist als der Anteil der zu imprägnierenden Hohlräume, fällt die Leitfähigkeit des Imprägniermediums nur dann ins Gewicht und wird in Leitfähigkeitsmessungen deutlich, wenn sich die Leitfähigkeiten des Pressspans und des Imprägniermediums deutlich unterscheiden [83]. Dies war im Fall der Imprägnierung mit dem hochohmigen Mineralöl nicht gegeben.

Anmerkung: Auch für die Feldstärke 1 kV/mm zeigte sich ein ähnliches Verhalten.

In Abbildung 6.5-3 ist die scheinbare Leitfähigkeit der verschieden dichten Pressspanprüflinge bei Imprägnierung mit einem niederohmigen Mineralöl zu sehen. Die Messungen wurden ebenfalls bei 50 °C und 0,1 kV/mm durchgeführt.

Nun ist der Einfluss des Imprägniermediums wieder deutlich ersichtlicher. Die Leitfähigkeit des Mineralöls liegt um mehrere Größenordnungen über der scheinbaren Leitfähigkeit des luftimprägnierten Pressspans. Die scheinbare Leitfähigkeit des Prüflings mit dem größten Ölanteil (also TIII, niederdicht) liegt um den Faktor 3 über den scheinbaren Leitfähigkeiten der hochdichten Pressspanprüflinge (TI und TIV). Die Messkurven scheinen die gleiche zeitliche Abhängigkeit zu haben und sehen weitgehend parallelverschoben aus.

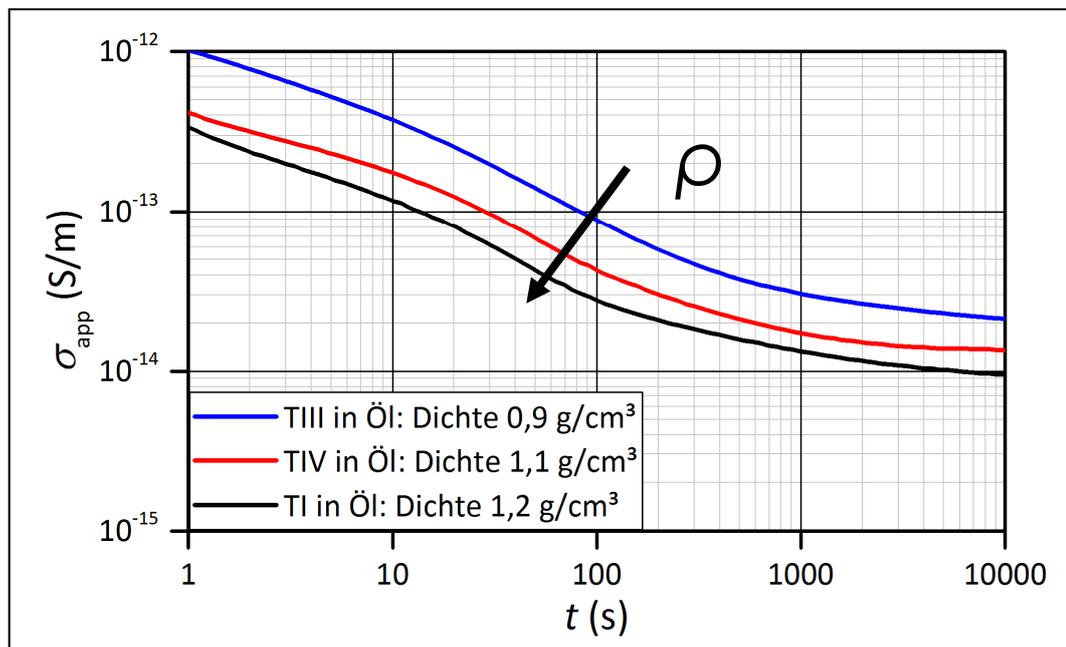


Abbildung 6.5-3: Scheinbare Leitfähigkeit bei 50 °C und 0,1 kV/mm in Abhängigkeit der Zeit für die verschiedenen Prüflinge TI, TIII und TIV imprägniert mit einem niederohmigen Mineralöl

Somit kann die Erkenntnis festgehalten werden, dass die Dichte des Pressspans wie erwartet einen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit hat und sich je nach Imprägnierung unterschiedlich in den Leitfähigkeitsmessungen des imprägnierten Pressspans zeigt. Denn die Leitfähigkeit des Pressspans setzt sich aus der Leitfähigkeit des Fasermaterials und der Leitfähigkeit des Imprägniermediums zusammen. Je größer der Unterschied in den Leitfähigkeiten dieser beiden Materialien ist, desto deutlicher kann der Effekt der Dichte (Änderung Volumenanteil Faser zu Hohlraum) aufgezeigt werden. Somit könnte über die Variation der Pressspandichte im Rahmen der fertigungstechnischen Möglichkeiten und der thermischen und mechanischen Anforderungen sowie über die Variation des Imprägniermediums die Leitfähigkeit des imprägnierten Pressspans gezielt eingestellt werden.

6.6 Einfluss der Ölleitfähigkeit

Kapitel 6.5 behandelte den Einfluss der Dichte auf die Leitfähigkeit von Pressspan unter unterschiedlichen Fluiden. Die Bestimmung der Dichte inklusive der Feststoffdichte ergab ein Verhältnis des Faservolumenanteils zum Imprägniervolumenanteil zwischen 75 % : 25 % (± 5 %) und 83 % : 17 % (± 5 %). In diesem Kapitel bleibt nun die Pressspandichte unverändert. Es handelt sich um einen hochdichten Pressspan mit dem Verhältnis Faservolumen zu Imprägniervolumen von 83 % zu 17 %. Diese Pressspanprüflinge wurden mit Ölen unterschiedlicher Leitfähigkeit imprägniert und der Einfluss auf die Leitfähigkeit der ölprägnierten Prüflinge ermittelt. Allerdings ändert sich die Leitfähigkeit des Gesamtsystems nur über die Variation der 17 % Öl im Pressspan und die anderen 83 % Faservolumen bleiben in

erster Näherung gleich. Es wurden die Ölsorten Nynas Nytro Lyra X (LX), Nynas Nytro 4000A (4A), Nynas 10X (NX) und Shell Diala S4 ZX-I (S4) untersucht.

Anmerkung: Nynas 10X ist nicht mehr kommerziell erhältlich und wurde circa 30 Jahre in einem von der Umgebungsluft abgeschlossenen Ölfass gelagert.

Tabelle 14 gibt eine Übersicht der Leitfähigkeiten dieser vier Ölsorten nach 10800 s, bei einer Feldstärke von 1 kV/mm und für verschiedene Temperaturen.

Tabelle 14: Ölleitfähigkeiten nach 10800 s, bei 1 kV/mm und für verschiedene Temperaturen

Ölsorte	30 °C	50 °C	90 °C
<i>Nynas Nytro Lyra X (LX)</i>	$2,6 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$	$9,1 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$	$2,3 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$
<i>Nynas Nytro 4000A (4A)</i>	$2,0 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$	$7,3 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$	$6,4 \cdot 10^{-13} \text{ S/m}$
<i>Nynas 10X (NX)</i>	$2,5 \cdot 10^{-13} \text{ S/m}$	$7,2 \cdot 10^{-13} \text{ S/m}$	$6,5 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$
<i>Shell Diala S4 ZX-I (S4)</i>	$8,4 \cdot 10^{-16} \text{ S/m}$	$4,5 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$	$2,3 \cdot 10^{-14} \text{ S/m}$

Abbildung 6.6-1 zeigt die Leitfähigkeiten von Öl Nynas Nytro Lyra X (gepunktete Kurve), von Pressspan TI unter Luft (gestrichelte Kurve) sowie von TI imprägniert mit dem Öl Nynas Nytro Lyra X (durchgezogene Kurve) bei 1 kV/mm und bei 30 °C (blau), 50 °C (grün) und 90 °C (rot).

Zuerst wird die Ölleitfähigkeit näher betrachtet. Die gepunkteten Kurven fallen zunächst mit der Messdauer ab und es sind ausgeprägte Transitzeiten zu erkennen. Die Transitzeit liegt bei 30 °C bei $\tau = 7 \text{ s}$ und verkleinert sich bei erhöhter Temperatur (50 °C) zu $\tau = 4,5 \text{ s}$. Bei 90 °C ist sie nicht mehr eindeutig bestimmbar ($\tau < 1,5 \text{ s}$). Diese Verringerung der Transitzeit bei Temperaturzunahme ist vom Leitungsprozess der Ionenleitung bekannt, da Ionen bei erhöhter Temperatur beweglicher werden und schneller transportiert werden können. Für alle drei Temperaturen sind Endwerte noch nicht erreicht. Bei 30 °C sind die Leitfähigkeitswerte nach drei Stunden sehr gering, sodass Messunsicherheiten relevant werden. Bei 90 °C ist ein deutlicher Anstieg der Leitfähigkeit ab circa 200 s zu sehen, was mit dem Ohmschen Gesetz nicht mehr zu erklären ist. Hier verändert sich das Isoliersystem. Die Zunahme der Leitfähigkeit lässt vermuten, dass neue Ladungsträger zur Verfügung gestellt werden, die zu Beginn der Messung noch nicht vorhanden waren. Dies kann beispielsweise durch Dissoziation von Verunreinigungen erfolgen. Als Ursache ist deshalb möglicherweise eine Alterung dieses Öls bei Temperatur- und Feldstärkebelastung zu nennen.

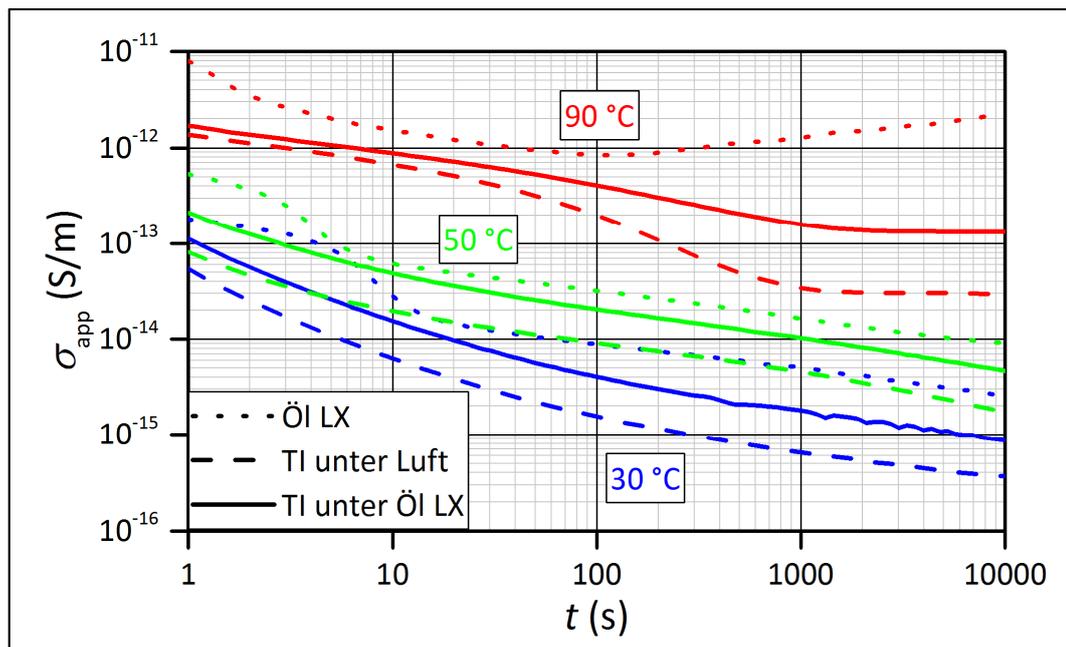


Abbildung 6.6-1: Scheinbare Leitfähigkeiten von Öl Nynas Nytro Lyra X (gepunktete Kurve), von Pressspan TI unter Luft (gestrichelte Kurve) und von TI in Öl Nynas Nytro Lyra X (durchgezogene Kurve) bei 1 kV/mm und bei 30 °C, 50 °C und 90 °C

Die Leitfähigkeiten von luftimprägniertem Pressspan liegen zu allen Messzeitpunkten unter denen von Öl und von ölimprägniertem Pressspan. Bei luftimprägniertem Pressspan fließt Strom nur über den Faseranteil, da die Leitfähigkeit von Luft um mehrere Größenordnungen kleiner ist. Hier kommt es zu einem Ladungsträgertransport in und entlang der Fasern und über Faserkontaktstellen. Dies wurde in Kapitel 6.4 näher erläutert.

Die Kurvenformen für luftimprägnierten Pressspan zeigen eine Überlagerung verschiedener Polarisationsmechanismen und Grenzflächen werden zu unterschiedlichen Zeiten aufgeladen. Dadurch entstehen abklingende Stromverläufe und es gibt keine eindeutige Transitzeit mehr. Ein Endwert ist nur für 90 °C zu erkennen. Allerdings wird in Kapitel 6.9 gezeigt, dass die prinzipielle Kurvenform der Leitfähigkeit über der Zeit bei allen drei Temperaturen ähnlich ist. Messkurven bei 90 °C können deshalb mittels Umrechnungsverfahren auf niedrigere Temperaturen übertragen werden. Dabei werden die Kurven sowohl zu niedrigeren Leitfähigkeiten als auch zu längeren Zeiten verschoben.

Ölimprägnierter Pressspan verhält sich ähnlich wie luftimprägnierter Pressspan. Der Einfluss der Ölleitfähigkeit bewirkt eine Erhöhung der scheinbaren Leitfähigkeiten im Vergleich zur Messung unter Luft. Besonders die Endwerte sind unter Ölimprägnierung höher als unter Luftimprägnierung. Wird der Pressspan mit Öl imprägniert, so können Leitungsprozesse sowohl im Öl als auch an und in den Fasern sowie über Faserkontaktstellen den Strom bestimmen [78].

Die in den Ölmessungen erkennbaren Transitzeiten sind in den Messungen des ölimprägnierten Pressspanns (nahezu) nicht mehr vorhanden. Dies liegt daran, dass es nun eine Vielzahl von Ölkanälen gibt, in denen Ionen driften (Ionenleitung). Der kleinere Abstand bis zur nächsten Barriere (Elektrode oder Faser) führt folglich auch zu kleineren Transitzeiten, was Gleichung (2.2-9) aus Kapitel 2.2.2 beschreibt. Außerdem ergeben sich je nach Abstand unterschiedliche Transitzeiten. Somit ist keine eindeutige Transitzeit mehr zu beobachten. Auch für ölimprägnierten Pressspan wird ein ähnlicher Kurvenverlauf für alle drei Temperaturen mittels Simulationen in Kapitel 6.9 postuliert, der nur aufgrund der beschränkten Messdauer nicht ersichtlich ist.

Anmerkung: Es stellt sich die Frage, warum der ölimprägnierte Pressspann bei 90 °C keinen Anstieg der Leitfähigkeit für längere Messdauern zeigt, wie es bei der Messung von Öl der Fall ist. Eine mögliche Erklärung ist die geänderte Feldverteilung. Das Öl im ölimprägnierten Pressspann wird anders belastet als bei einer reinen Ölleitfähigkeitsmessung. Der größte Teil der Feldstärke befindet sich unter diesen Bedingungen im Pressspann, weil die Ölleitfähigkeit größer ist als die Pressspanleitfähigkeit. Damit werden die Ölvolumina entlastet. Folglich fällt die Ölalterung aufgrund des Zusammenwirkens von Temperatur- und Feldstärkebelastung in der Leitfähigkeitsmessung nicht mehr so stark ins Gewicht.

Da bei ölimprägniertem Pressspann sowohl die Leitungsprozesse im Öl als auch in den Fasern relevant sind, liegt die Idee nahe, die Leitungsprozesse beider Materialien zu überlagern. Eine Überlagerung muss die Volumenverhältnisse Fasern zu Öl (83 % : 17 %, jeweils ± 5 %) berücksichtigen. Allerdings führte eine lineare Superposition aus der Ölleitfähigkeit und der Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspann nicht zur gemessenen Gesamtleitfähigkeit des ölimprägnierten Pressspanns. Die beiden Volumina können nicht getrennt voneinander betrachtet und dann zu einem Gesamtvolumen zusammengesetzt werden. Das rührt daher, dass sich die Leitungsprozesse von Öl und Pressspann nicht nur überlagern, sondern im Gesamtsystem zusätzliche und modifizierte Strompfade auftreten können, welche so nicht explizit in den beiden Einzelsystemen vorhanden sind [78]. Die Leitungsprozesse beeinflussen sich folglich gegenseitig. Dies ist beispielsweise mit der oben erwähnten unterschiedlichen Feldbelastung in den Teilsystemen aus Öl und Pressspann zu erklären, weshalb die Superposition alleine aufgrund geometrischer Faktoren nicht zum Erfolg führt. Da der Einfluss der Ölleitfähigkeit nicht mittels Gewichtung der beiden Komponenten Faser und Öl aufgrund der Dichteverhältnisse berechnet werden kann, wird im Folgenden die makroskopische Struktur des Pressspanns bestehend aus Fasern und Imprägnierolumina betrachtet.

Abbildung 6.6-2 zeigt schematisch potenzielle Transportwege der Ladungsträger im stationären Fall. Das Verhältnis Öl zu Faser sowie die absolute Anzahl an Fasern wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht berücksichtigt.

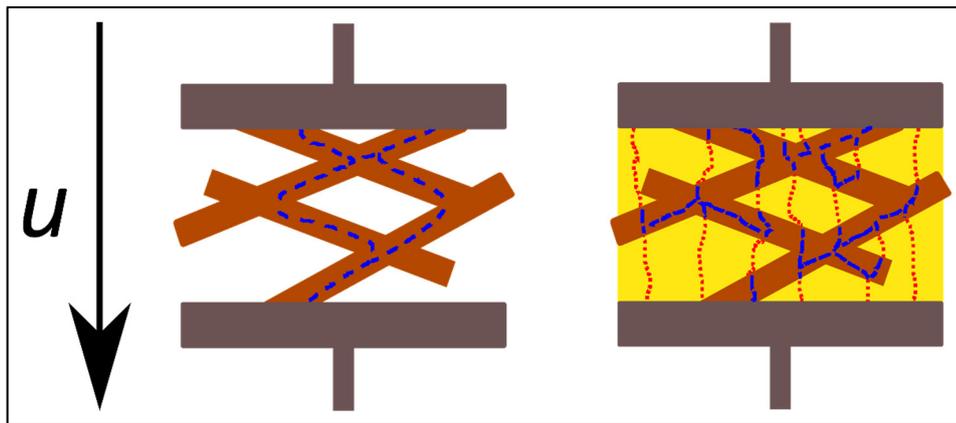


Abbildung 6.6-2: Leitungsprozesse durch luftimprägnierten Pressspan (links) und durch ölprägnierten Pressspan (rechts)

Links in Abbildung 6.6-2 sind exemplarisch vier Pressspanfasern zwischen zwei Elektroden bei hochohmiger Imprägnierung (zum Beispiel Luft) dargestellt. Ladungsträger bewegen sich auf dem Weg des geringsten Widerstands und damit im stationären Fall in und entlang der Fasern. Wird das System mit einem Öl imprägniert (rechts in Abbildung 6.6-2), dann bewegen sich Ladungsträger im stationären Fall hauptsächlich durch das Öl, weil dieses den kleineren Widerstand besitzt. Die Ladungsträger können im Öl allerdings nicht bis zur Gegenelektrode driften, da sie von Barrieren (Pressspanfasern) aufgehalten werden. Sie sammeln sich dort an und verändern damit das Potential an den Barrieren. Daraufhin werden auch Ladungsträger an den Fasern verschoben bzw. transportiert. Das Isoliersystem aus ölprägniertem Pressspan ist also keine Überlagerung der Verhältnisse im Öl (Ladungstransport durch durchgängigen Ölkanal) und im Pressspan (Ladungsbewegung in und entlang der Fasern). Vielmehr ermöglicht die Interaktion von Ölspalten und Fasern einen Ladungstransport auf neuen Transportwegen, die vorher weder für Öl noch für den luftimprägnierten Pressspan günstig waren.

In Abbildung 6.6-3 sind die Leitfähigkeiten von Öl Shell Diala S4 ZX-I (gepunktete Kurve), von Pressspan TI unter Luft (gestrichelte Kurve) und von TI in Öl Shell Diala S4 ZX-I (durchgezogene Kurve) bei 1 kV/mm und bei 30 °C, 50 °C und 90 °C im doppellogarithmischen Maßstab zu sehen. Wie Tabelle 14 zeigt, liegt die Ölleitfähigkeit von Shell Diala S4 ZX-I von allen untersuchten Ölsorten am niedrigsten und damit am nächsten an der Leitfähigkeit von Pressspan unter Luft.

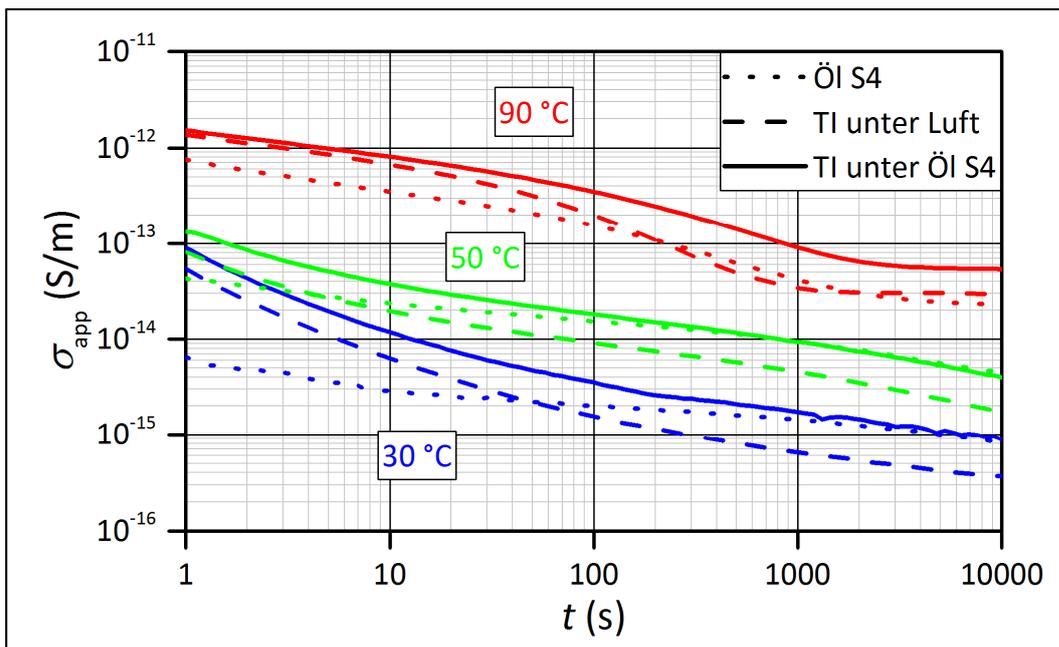


Abbildung 6.6-3: Scheinbare Leitfähigkeiten von Öl Shell Diala S4 ZX-I (gepunktete Kurve), von Pressspan TI unter Luft (gestrichelte Kurve) und von TI in Öl Shell Diala S4 ZX-I (durchgezogene Kurve) bei 1 kV/mm und bei 30 °C, 50 °C und 90 °C

Die Leitfähigkeit des ölimprägnierten Pressspans liegt nicht mehr zwischen den Leitfähigkeiten von Öl und von luftimprägniertem Pressspan. Bei 30 °C und 50 °C sind die Leitfähigkeiten von Öl und von ölimprägniertem Pressspan nach einer Messdauer von drei Stunden nahezu identisch. Die Anfangswerte unterscheiden sich hingegen. Hier liegt die Ölleitfähigkeit deutlich tiefer.

Für die Messungen bei 90 °C werfen die Kurvenverläufe Fragen auf. Die Leitfähigkeit von ölimprägniertem Pressspan liegt nach einer Messdauer von drei Stunden höher als die Leitfähigkeiten der beiden Komponenten Öl und Pressspan unter Luft, die dieses Gesamtsystem bilden. Die Leitfähigkeit dieses Öls und die Leitfähigkeit des luftimprägnierten Pressspans liegen bei 90 °C fast gleich. Somit gibt es kaum Feldverdrängung, da das Leitfähigkeitsverhältnis von Pressspan und Öl sehr gering ist. Dies unterscheidet das Öl Shell Diala S4 ZX-I von allen anderen untersuchten Ölen.

Die Anfangswerte der drei Kurven unterscheiden sich bei 90 °C leicht. Diese ungewohnte Lage der Kurven bei 90 °C zueinander kann mit Abbildung 6.6-2 erklärt werden. Die Leitfähigkeiten des luftimprägnierten TI und des Öls addieren sich nicht im ermittelten Volumenverhältnis Faser zu Öl, sondern es ändern sich Leitungsprozesse und Strompfade kommen hinzu.

Im Rahmen dieser Arbeit wird trotz der oben beschriebenen, prinzipiellen Schwierigkeiten versucht, eine qualitative Aussage über den Einfluss der Ölleitfähigkeit auf die Leitfähigkeit des ölimprägnierten Pressspans zu geben. Zu diesem Zweck wurden die Ölleitfähigkeiten mit den Leitfähigkeiten der mit den jeweiligen Ölsorten imprägnierten Pressspanprüflingen

nach einer Messdauer von drei Stunden in Beziehung gesetzt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6.6-4. Die x-Koordinate der Punkte quantifiziert die Ölleitfähigkeit, wohingegen die y-Koordinate die Leitfähigkeit des ölimprägnierten Pressspans darstellt. Dies wird für alle vier Ölsorten und alle drei Temperaturen gezeigt. Darüber hinaus wurde eine Funktion bestimmt, die alle diese Punkte für die jeweilige Temperatur annähernd beschreibt.

Es ist darauf zu achten, dass die Feldstärken, die zu den jeweiligen Messpunkten führen, nicht gleich gewählt sind. Hintergrund ist die Tatsache, dass das elektrische Feld im Gleichspannungsfall in das Medium mit der kleineren Leitfähigkeit (hier Pressspan) gedrängt wird. Pressspan wird folglich stärker belastet, wenn er mit Öl imprägniert wird. Somit sind möglicherweise annähernd gleiche Feldverhältnisse gegeben, wenn die Messdaten der Ölleitfähigkeit bei 0,5 kV/mm und der Leitfähigkeit von ölimprägniertem Pressspan bei 6 kV/mm betrachtet werden. Damit ergibt sich ein Verhältnis von 1:12, welches im Rahmen dieser Arbeit nicht empirisch oder simulationstechnisch bestimmt wurde. Es entstand lediglich aus einer groben Abschätzung der Leitfähigkeitsverhältnisse und aus der Verfügbarkeit von Messdaten. Dieses Verhältnis ändert sich außerdem mit der Ölleitfähigkeit, was aber an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden kann.

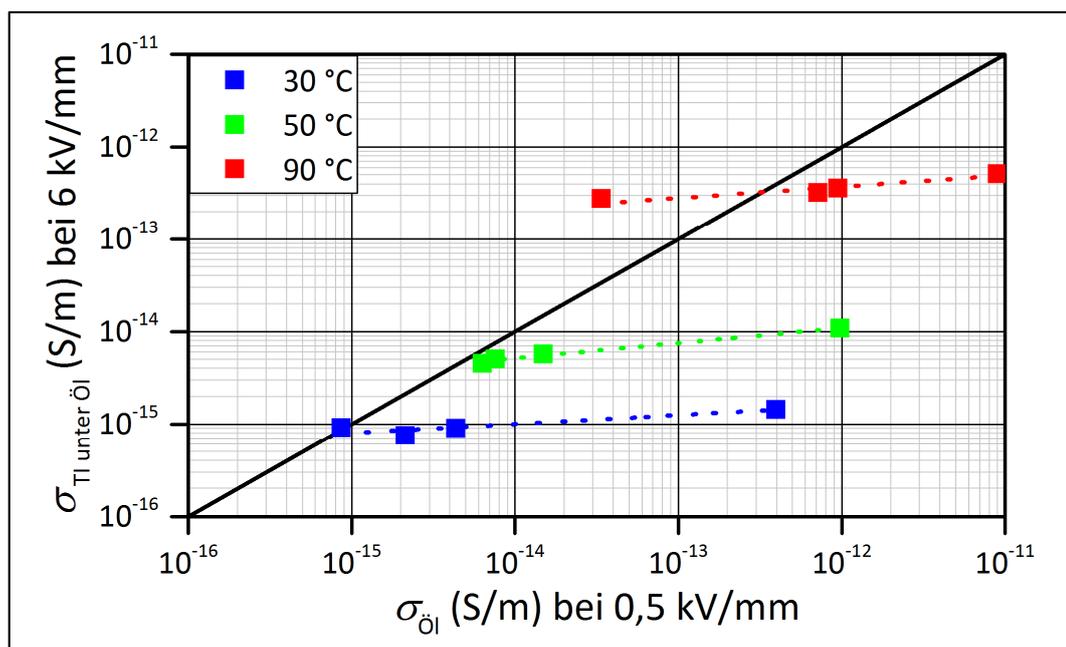


Abbildung 6.6-4: Einfluss der Ölleitfähigkeit auf die Leitfähigkeit von ölimprägniertem Pressspan TI im Fall einer Feldverdrängung vom Öl in den Pressspan mit den angenommenen Feldstärken 0,5 kV/mm im Öl (abweichend zu den Werten in Tabelle 14) und 6 kV/mm im Pressspan

Es fällt auf, dass eine Variation der Ölleitfähigkeit um 2,5 Größenordnungen eine Änderung in der Leitfähigkeit des ölimprägnierten Pressspans von unter einer halben Größenordnung für alle drei Temperaturen ergibt. Aus der Bestimmung der Dichte könnte gefolgert werden, dass der Leitungsprozess zu 17 % durch die Ionenleitung im Öl und zu 83 % durch Leitungsprozesse an den Fasern bzw. an den Kontaktstellen zwischen Fasern bestimmt wird. Damit würden sich allerdings andere Leitfähigkeiten des ölimprägnierten Pressspans ergeben als

gemessen wurden. Auch hier wird deutlich, dass die Vorstellung der Überlagerung von Öl und Pressspan zu vereinfacht ist.

Die Steigungen der Ausgleichskurven haben für die drei Temperaturen in Abbildung 6.6-4 annähernd den gleichen Wert, sodass die Leitfähigkeit für alle Ölsorten in etwa im gleichen Maße mit der Temperatur zunimmt und das gleiche Temperaturverhalten für alle ölprägnierten Pressspanprüflinge zu erwarten ist. Die Diagonale in Abbildung 6.6-4 beschreibt ein System, in dem die Leitfähigkeit des ölprägnierten Pressspans die gleiche Größe annimmt wie die Ölleitfähigkeit, allerdings immer noch für Messungen bei unterschiedlichen Feldstärken. Dies kann für viele Konstruktionen von HGÜ-Isoliersystemen wünschenswert sein, da somit das gesamte verfügbare Isolierstoffvolumen zumindest für die reine Gleichspannungsbeanspruchung bestmöglich ausgenutzt werden kann. Die entstehende Feldverdrängung ist darin schon mittels des Feldstärkeverhältnisses 1:12 berücksichtigt.

Die Punkte am rechten Rand aller Ausgleichskurven repräsentieren das relativ leitfähige Öl Nynas 10X. Trotz der im Vergleich zu luftprägniertem Pressspan sehr viel höheren Leitfähigkeit dieser Ölsorte wird die Leitfähigkeit des ölprägnierten Pressspans nicht massiv erhöht. Die Steigung der Ausgleichskurve ist relativ gering.

Somit kann gefolgert werden, dass die Ölleitfähigkeit einen Beitrag zum Ladungsträgertransport im ölprägnierten Pressspan leistet. Der für Öle oft sehr große Unsicherheitsbereich bei der Quantifizierung der Ölleitfähigkeit, die sich schon zwischen zwei Gebinden derselben Ölsorte um eine Größenordnung oder mehr unterscheiden kann, führt bei der Quantifizierung der Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan zu bedeutend kleineren Unterschieden.

6.7 Einfluss des Ligningehalts im Pressspan

Lignin kommt im Pressspan in kleinen Mengen (wenige Gewichtsprozent) vor. Da Lignin aufgrund seiner chemischen Struktur ein ausgeprägtes π -Elektronensystem besitzt (siehe Kapitel 1.2.2), wird der Variation des Ligningehalts eine große Bedeutung für das gezielte Einstellen einer gewünschten Pressspanleitfähigkeit beigemessen. In den folgenden Kapiteln werden Untersuchungen mittels UV/Vis-Spektroskopie herangezogen, um elektrische Eigenschaften zu erklären und es wird der Bezug zur elektrischen Leitfähigkeit von Pressspan bei unterschiedlichem Ligningehalt hergestellt.

6.7.1 Hintergrund und Prüflingstypen

Die chemische Struktur der Pressspankomponenten Zellulose, Hemizellulosen und Lignin wurden bereits in Kapitel 1.2.2 erläutert. Zusammenfassend sei hier erwähnt, dass es sich bei der Zellulose um ein natürliches, lineares, teilkristallines Polysaccharid handelt.

Hemizellulosen sind relativ ähnlich aufgebaut, aufgrund ihrer unregelmäßigen chemischen Struktur allerdings amorph. Beide haben jedoch ein β -1,4-verknüpftes Zuckerrückgrat und sind aufgrund der polaren OH-Gruppen hygroskopisch. Lignin unterscheidet sich von diesen beiden Hauptbestandteilen des Pressspans bezüglich der auftretenden chemischen Bindungen. Die in Zellulose und Hemizellulosen vorhandenen Einfachbindungen, sogenannte σ -Bindungen, verbinden die Atome der Moleküle kovalent. Die Bindungen sind räumlich gerichtet und über die Distanz zu den Nachbaratomen stark lokalisiert. Diese Bindungsart führt deshalb theoretisch zu einer sehr geringen Leitfähigkeit, da dafür eine chemische Bindung gespalten werden müsste. Bei Lignin finden sich zusätzlich sogenannte π -Elektronen und damit π -Bindungen. Diese führen zusammen mit σ -Bindungen zu Doppelbindungen. Die π -Elektronen sind schwächer gebunden. Bei der π -Bindung kommt es zudem auf die räumliche Ausdehnung des Elektronensystems an, da innerhalb dieses Systems die Elektronen praktisch widerstandsfrei transportiert werden können [48]. Somit ist eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit von Lignin gegenüber den anderen beiden Komponenten Zellulose und Hemizellulosen zu erwarten. Als Ladungsträger dienen in diesem Fall Elektronen und/oder Löcher.

Lignin ist ein Polymer mit chromophoren Anteilen [84]. Lignin kann deshalb als organischer Halbleiter bezeichnet werden. Die physikalischen Theorien zum Ladungstransport in organischen Halbleitern werden hier deshalb in Grundzügen auch für Lignin angenommen. Die Temperaturabhängigkeit der Elektronen-Loch-Leitung wird in Ergänzung zu Kapitel 2.2.3 hier nochmals aufgegriffen.

Beim herkömmlichen Bandtransport, wie beispielsweise bei Metallen, nimmt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur ab, da die Elektronen und Löcher zunehmend an den Phononen gestreut und dadurch abgebremst werden. Bei amorphen organischen Molekülen wie Lignin hingegen gibt es keine Kristallstruktur. Dort ist eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Temperatur zu erwarten [85]. Ursache dafür ist die Tatsache, dass die Ladungsträger durch Phononen Energie aufnehmen und so weiter transportiert werden können. Da die Elektronen im Leitungsband sowie die Löcher im Valenzband zwischen verschiedenen Zuständen „springen“ müssen, wird dieser Ladungstransport thermisch aktiviertes Hüpfen (Hopping) genannt. Die Leitfähigkeit steigt so gemäß dem Arrhenius-Gesetz exponentiell mit der Temperatur [86]. Die Verifikation dieser Abhängigkeit der Pressspanleitfähigkeit von der Temperatur erfolgt in Kapitel 6.9.

Das π -Elektronensystem ist in der Chemie bekannt. Allerdings wurde es bisher nicht bei der Diskussion der Leitfähigkeit von Pressspan verwendet und Lignin deshalb bisher nicht als möglicher Einflussparameter auf die Leitfähigkeit von Pressspan berücksichtigt. Aufgrund der Vorüberlegungen ist es allerdings erfolversprechend, sich genauer mit der chemischen Struktur des Lignins sowie dem Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit auseinanderzusetzen. Die physikalischen Eigenschaften der π -Bindungen im Lignin und die experimentell

bestimmte elektrische Leitfähigkeit von Pressspan wurden im Rahmen dieser Arbeit erstmals zusammengebracht.

Die Primärstruktur von natürlichem Lignin wird für die Pressspanherstellung durch den Sulfatprozess chemisch gebrochen und damit verändert, sodass die exakte Struktur des im Pressspan verbleibenden Lignins nicht genau angegeben werden kann [87]. Deshalb werden in Abbildung 6.7-1 nur Strukturen der Monolignole gezeigt, bevor sie durch die Pflanzen zum fertigen Lignin aufgebaut werden.

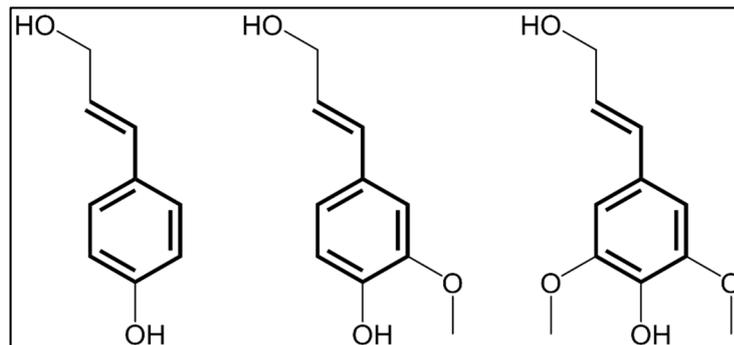


Abbildung 6.7-1: Monolignole von Lignin, angelehnt an [88]

In den in Abbildung 6.7-1 hervorgehobenen Bereichen gibt es neben den σ -Bindungen auch π -Bindungen. Der Transport von Elektronen entlang von Bindungen geht sehr schnell. Bei einem Transport von Molekül zu Molekül kommt es darauf an, wie nahe sich die Moleküle sind. Folglich können Elektronen sowohl entlang der Bindung, als auch von einem Molekül zum nächsten transportiert werden. Voraussetzung dafür ist, dass sich die Moleküle ausreichend nahe kommen, sodass sich die π -Orbitale teilweise überlappen [89].

Um eine Verbindung zwischen der chemischen Zusammensetzung, also der Bestandteile im Pressspan, und den elektrischen Leitungsprozessen herzustellen, wurden erstmals Pressspanprüflinge mit unterschiedlichem Ligningehalt auf der Versuchsanlage der Firma Weidmann hergestellt und elektrische Leitfähigkeiten bei verschiedenen Temperaturen gemessen. Pressspan A hatte einen Ligningehalt von 4,2 % und Pressspan B von 6,2 %, ermittelt nach ISO 302 [82]. Der Ligningehalt des handelsüblichen Pressspans liegt in etwa in der Mitte dieser beider Werte. Das Herstellungsverfahren vom Zellstoff zum Pressspanprodukt war in beiden Fällen identisch. Um die Vergleichbarkeit der beiden Ausgangsmaterialien zu gewährleisten, wurden Kenngrößen des Pressspans bzw. der Pressspanherstellung wie die Leitfähigkeit des wässrigen Auszugs, der pH-Wert, der Polymerisationsgrad sowie die Dichte analysiert (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Prüflingsübersicht und ermittelte Prüflingeigenschaften

Eigenschaftsprüfungen	Prüfmethode	Prüfling A	Prüfling B
<i>Leitfähigkeit des wässrigen Auszugs (mS/m)</i>	IEC 60641-2 [68]	2,4	2,8
<i>pH-Wert</i>	IEC 60641-2 [68]	7,1	7,0
<i>Polymerisationsgrad</i>	IEC 60450 [81]	1318	1336
<i>Ligningehalt (%)</i>	ISO 302 [82]	4,2	6,2
<i>Dichte unter Luft (g/cm³)</i>	IEC 60641-2 [68]	1,1	1,1

Alle Kenngrößen mit Ausnahme des Ligningehalts unterscheiden sich bei den beiden Prüflingen A und B kaum. Der Zellstoff kam von unterschiedlichen Herstellern. Somit ist die Herkunft des Ausgangsmaterials Holz nicht unbedingt identisch, wird jedoch als vernachlässigbar angesehen. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen (vergleiche Tabelle 15) sowie auf der Grundlage weiterer chemischer Analysen scheint eine Vergleichbarkeit der beiden Prüflinge A und B gewährleistet zu sein.

An den Prüflingen wurden einerseits UV/Vis-spektroskopische Untersuchungen durchgeführt, andererseits wurden die elektrischen Leitfähigkeiten ermittelt, um den Einfluss des Ligningehalts auf die elektrischen Eigenschaften von Pressspan zu erfassen. Damit zeigt sich, ob es sich um Elektronen-Loch-Leitung handelt und ob diese einen relevanten Einfluss auf die Transportprozesse in Pressspan hat.

6.7.2 Untersuchungen mittels UV/Vis-Spektroskopie

Drei Prüflinge aus Pressspan wurden mittels UV/Vis-Spektroskopie untersucht: Die beiden Prüflinge A (Ligningehalt 4,2 %) und B (Ligningehalt 6,2 %), sowie ein Prüfling C (Standardpressspan TIV, Ligningehalt 5,5 %), dessen Ligningehalt zwischen dem der Prüflinge A und B lag.

Eingestrahktes Licht kann absorbiert, reflektiert und transmittiert werden. Wenn Transmission auftritt, geht Signalstärke bei der Detektion der Reflexion bzw. bei der Umrechnung nach der Kubelka-Munk-Gleichung (4.4-1) in die Absorption verloren. Es wurden für jeden Prüfling 0,5 mm dicke Schichten präpariert. Die Dicke der Prüflinge musste ausreichend groß gehalten werden, um eine Transmission des eingestrahkten Lichts durch die Prüflinge ausschließen zu können.

Die Prüflinge wurden nun an mehreren Stellen der Prüflingsschicht mit einer Xenonlampe bestrahlt und die Reflexionsspektren aufgenommen. Aus mehreren Aufnahmen wurden gemittelte Spektren erzeugt. Daraus wurden die relativen Reflexionen R_{Rel} bestimmt und nach Gleichung (4.4-1) die relativen Absorptionen A_{Rel} für die drei Prüflingstypen berechnet.

Darüber hinaus wurde ein Prüfling aus Meta-Aramid untersucht, der eine weiße Farbe besaß. Hier wurde folglich keine Absorption im sichtbaren Bereich erwartet. Außerdem wurde eine Holzfaserverplatte sowie ein ölprägnierter Prüfling C (TIV) analysiert, welcher dunkler war als der luftprägnierete Prüfling C.

Abbildung 6.7-2 zeigt die nach Kubelka-Munk berechneten relativen Absorptionen der Prüflinge im Wellenlängenbereich zwischen 320 nm und 600 nm.

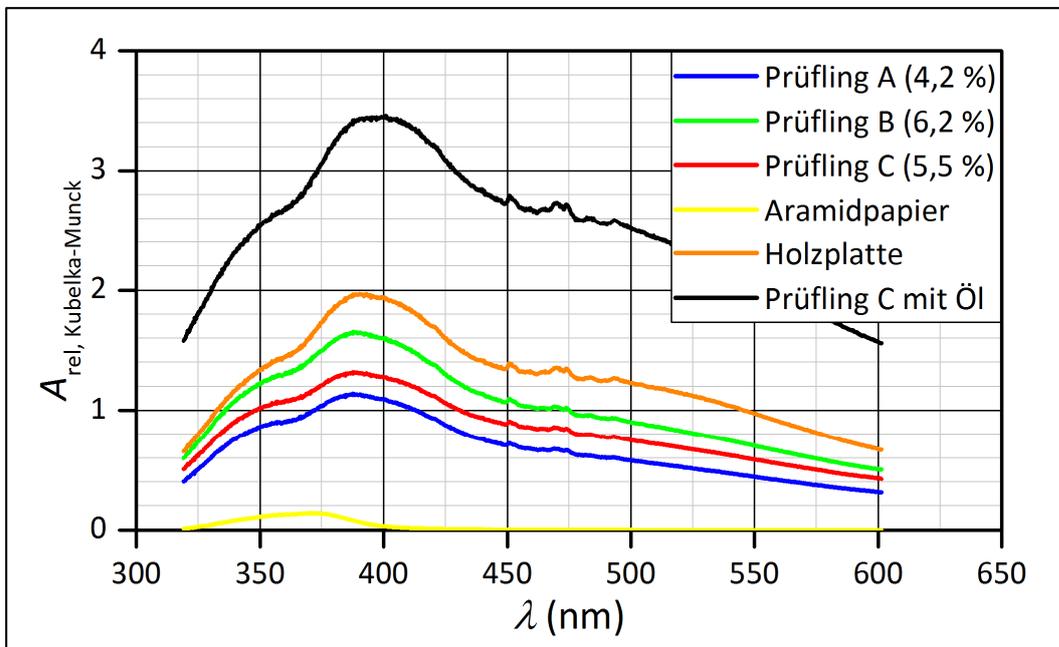


Abbildung 6.7-2: Absorptionsspektren von Prüfling A, Prüfling B, Prüfling C sowie von Aramidpapier und Holz

Zellulose und auch Hemizellulosen zeigen keine Lichtabsorption im sichtbaren Bereich [90]. Deshalb ist die in Abbildung 6.7-2 dargestellte Absorption dem Lignin zuzuordnen. Des Weiteren kann aus der Absorption im sichtbaren Bereich geschlossen werden, dass geringe Lichtenergien ausreichend sind, um einen elektronisch angeregten Zustand im Lignin zu erhalten. Je leichter die Anregung, also je kleiner die Bandlücke des Materials ist, desto weiter ist die Absorption in den längerwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums verschoben. Die Bandlücke wird mit der Größe des π -Elektronensystems kleiner.

Die Messungen lassen sich dahingehend interpretieren, dass im Pressspan Elektronen vorhanden sind, die durch die Absorption von sichtbarem Licht einen angeregten Zustand einnehmen. Da diese Energie zu gering für die Anregung von σ -Elektronen ist, sind dafür π -Elektronen verantwortlich, welche fast ausschließlich im Lignin zu finden sind. Dies passt

zur Vorüberlegung der Bindungsarten bei Lignin mit den zusätzlich locker gebundenen π -Elektronen.

Anmerkung: Im Spektrum sind keine diskreten Absorptionspeaks zu sehen, sondern es ist ein verbreitertes Spektrum erkennbar. Die sogenannte inhomogene Verbreiterung kommt dadurch zustande, dass das Material aus einer Vielzahl von Bestandteilen und Konfigurationen besteht, die jeweils eigene Absorptionspeaks besitzen und sich zu dem in Abbildung 6.7-2 dargestellten Spektrum überlagern.

Ein Vergleich der Spektren der drei Prüflinge A, B und C in Abbildung 6.7-2 zeigt, dass Prüfling B mit dem höchsten Ligningehalt unter den Prüflingen aus Pressspan auch die höchste Absorption aufweist. Je höher der Ligningehalt ist, desto höher ist die relative Absorption. Daraus lässt sich schließen, dass im Leitungsband (bzw. Valenzband) von Lignin besetzbare Zustände existieren, in die durch das Anlegen einer Spannung Elektronen (bzw. Löcher) injiziert werden können [85].

Somit wurde der Ligningehalt der Prüflinge, der nach der Norm ISO 302 [82] bestimmt wurde, durch die spektroskopischen Untersuchungen in den Zusammenhang mit dem elektronischen Verhalten dieses Isolierstoffs gesetzt. Allerdings absorbieren die Prüflinge nicht in einem definierten Wellenlängenbereich, sondern in einer Absorptionsbande mit Zwischenmaxima. Die leicht bräunliche Farbe des Pressspans kommt aufgrund einer Absorption in einem breiten Bereich des sichtbaren Lichts zustande. Der Prüfling A mit dem geringsten Ligningehalt hat den hellsten Branton, wohingegen Prüfling B mit dem höchsten Ligningehalt von Pressspan visuell am dunkelsten erscheint.

Die weiße Farbe des Prüflings aus Aramidpapier ist ebenfalls in Abbildung 6.7-2 spektroskopisch nachweisbar. Es zeigt sich kaum Absorption im sichtbaren Wellenlängenbereich. Da das Aramidpapier ausschließlich aus Meta-Aramid besteht, ist der Ligningehalt als null beziffert. Die im Vergleich zu den anderen Prüflingen viel kleinere Absorption kann beispielsweise mit dem Vorhandensein von Verunreinigungen erklärt werden.

Die Holzplatte, welche einen im Vergleich zu den Pressspanprüflingen A, B und C dunkleren Branton aufweist, zeigt die höchste Absorption [91]. Der Ligningehalt der Holzplatte wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht bestimmt. Es werden aber deutlich höhere Werte erwartet als bei den Pressspanprüflingen, da im chemischen Aufschlussverfahren ein Großteil des Lignins aus dem Holz entfernt wird.

Ein Vergleich des luftimprägnierten und des ölimprägnierten Prüflings C zeigt, dass die Absorption bei ölimprägniertem TIV deutlich höher ist als bei luftimprägniertem. Hier ist wieder der Unterschied in der Farbe zu nennen und zu detektieren. Die Ölimprägnierung bewirkt eine Erhöhung der Absorption im gesamten Wellenlängenbereich. Die Benetzung mit der Flüssigkeit führte zu Mehrfachreflexion an den Grenzflächen Luft-Flüssigkeit, wodurch der Lichtstrahl häufiger mit dem Prüfling wechselwirkte und die Absorption erhöht wird [92]. Die Prüflingsfarbe erscheint somit dunkler, wie man es aus dem Alltag von nassen Oberflächen kennt.

Es kommt allerdings zu keiner Verschiebung der Maxima. Die Kurven scheinen ähnlich zu verlaufen. Daraus wird gefolgert, dass die Ölimprägnierung den Leitungsprozess der Elektronen-Loch-Leitung aufgrund der ligninreichen Stellen im Pressspan nicht beeinflusst.

Die eingestrahlten Wellenlängen können über Gleichung (4.4-2) in Energien umgerechnet werden. Eine Wellenlänge von 320 nm führt damit zu einer Energie von 3,9 eV, eine Wellenlänge von 600 nm zu 2,1 eV. Aufgrund der spektroskopischen Untersuchungen wurden Bandlücken von mehr als 3 eV erwartet, da dort die höchste Absorption auftritt. Allerdings ist eine definierte Bandlücke nicht vorhanden, sondern nur ein Bereich, in dem die Bandlücke liegt. Dies ist mit der Zusammensetzung des Lignins zu begründen, da dort verschiedene chromophore Strukturen auftreten [84]. Da mit einer Anregung über diese Bandlücke zwei Ladungsträger (ein Elektron, ein Loch) entstehen, wäre eine Aktivierungsenergie von etwas über 1,5 eV zu erwarten. Die Aktivierungsenergie E_A des luftimprägnierten Pressspans wurde mit Hilfe von Messungen und Simulationen in Kapitel 6.9.2 zu circa 1,3 eV bestimmt. Folglich kann der Ladungstransport durch den Pressspan nicht nur aufgrund des Lignins erfolgen. Die Elektronen-Loch-Leitung durch Lignin scheint nicht der alleinige Transportmechanismus zu sein.

Die Absorption der Prüflinge A, B und C legte den Schluss nahe, dass auch bei diesen relativ geringen Ligningehalten im Pressspan (wenige Prozent) Zustände im Leitungsband aufgrund der photonischen Anregung durch das eingestrahlte, weiße Licht besetzt werden können. Es ist zu erwarten, dass der geringe Ligningehalt ausreicht, um eine detektierbare Menge an Ladungsträgern durch den Pressspan zu transportieren.

In der Anwendung der Pressspanisolierung im Transformator ist eine photonische Anregung ausgeschlossen, da sich die Isolierung im Stahlkessel des Transformators befindet. Ladungsträger können folglich nur durch die Elektroden in das Material eingebracht werden oder im Volumen der Isolierung aufgrund der elektrischen Feldstärkebelastung oder der Temperatur entstehen.

Deshalb werden im Folgenden Leitfähigkeitsmessungen nach der PDC-Methode durchgeführt und der Einfluss des Ligningehalts auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan wird unter Luft sowie unter Öl untersucht. Damit kann zum einen der Einfluss des Ligningehalts quantifiziert und zum anderen der relevante Leitungsprozess (im Fall Lignin: Elektronen-Loch-Leitung) identifiziert werden.

6.7.3 Einfluss des Ligningehalts auf die elektrische Leitfähigkeit

Im Folgenden werden Untersuchungen zum Einfluss des Ligningehalts auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan präsentiert. Nach einer Übersicht über die Messparameter werden Leitfähigkeiten von Pressspan unter Luft- und Ölimprägnierung diskutiert.

Messparameter

Der Einfluss des Ligningehalts auf die elektrische Leitfähigkeit von getrocknetem Pressspan wird im Folgenden behandelt. Zu diesem Zweck wurden die speziell hergestellten Prüflinge A (Ligningehalt 4,2 %) und B (Ligningehalt 6,2 %) gemäß Kapitel 4.1.3 auf Restwassergehalte unter 0,1 % getrocknet. Anschließend wurden PDC-Messungen nach Kapitel 4.1.1 in Versuchszelle (2) durchgeführt. Nach Versuchsreihenende wurden die Wassergehalte der Prüflinge A und B mittels Karl-Fischer-Titration zu Werten kleiner als 0,1 % bestimmt. Die Prüflinge werden daher als trocken bezeichnet und Unterschiede in den Leitfähigkeiten nicht auf einen unterschiedlichen Wassergehalt zurückgeführt.

Das an die Prüflinge A und B angelegte elektrische Feld betrug 1 kV/mm. Es wurden darüber hinaus Versuche bei 0,1 kV/mm durchgeführt. Diese Versuche zeigen für 30 °C und 50 °C die gleichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten wie die Messungen bei 1 kV/mm, weshalb bei diesen beiden Temperaturen im Folgenden ausschließlich Messungen bei 1 kV/mm dargestellt sind. Die Diskussion einer möglichen Feldstärkeabhängigkeit, wie sie bei 90 °C messtechnisch erfasst wurde, erfolgt in Kapitel 6.10. Die Prüflinge wurden jeweils 10800 s elektrisch belastet und anschließend kurzgeschlossen. Während der Kurzschlussphase wurden die Ströme ebenfalls 10800 s lang aufgezeichnet. Tabelle 16 stellt die Parameter der Untersuchung zusammen.

Tabelle 16: Parameter für Leitfähigkeitsmessungen

Temperatur	elektrische Feldstärke	Imprägnierung
30 °C	0,1 kV/mm, 1 kV/mm	Luft, hochohmiges Mineralöl
50 °C	0,1 kV/mm, 1 kV/mm	Luft
90 °C	0,1 kV/mm, 1 kV/mm	Luft

Messungen unter trockener Luft

Abbildung 6.7-3 zeigt die scheinbaren Leitfähigkeiten von luftimprägniertem Pressspan (Prüfling A und B mit unterschiedlichem Ligningehalt) als Funktion der Zeit bei 30 °C und 50 °C.

Die scheinbaren Leitfähigkeiten klingen zeitlich ab. Ein stationärer Endwert ist aufgrund der sehr kleinen Ströme unter 1 pA mit dem verwendeten Strommessgerät nicht mehr erfassbar. Alle Kurven in Abbildung 6.7-3 haben den stationären Zustand noch nicht erreicht. Die scheinbaren Leitfähigkeiten der luftimprägnierten Prüflinge sind bei erhöhter Temperatur allerdings über einen längeren Zeitbereich detektierbar.

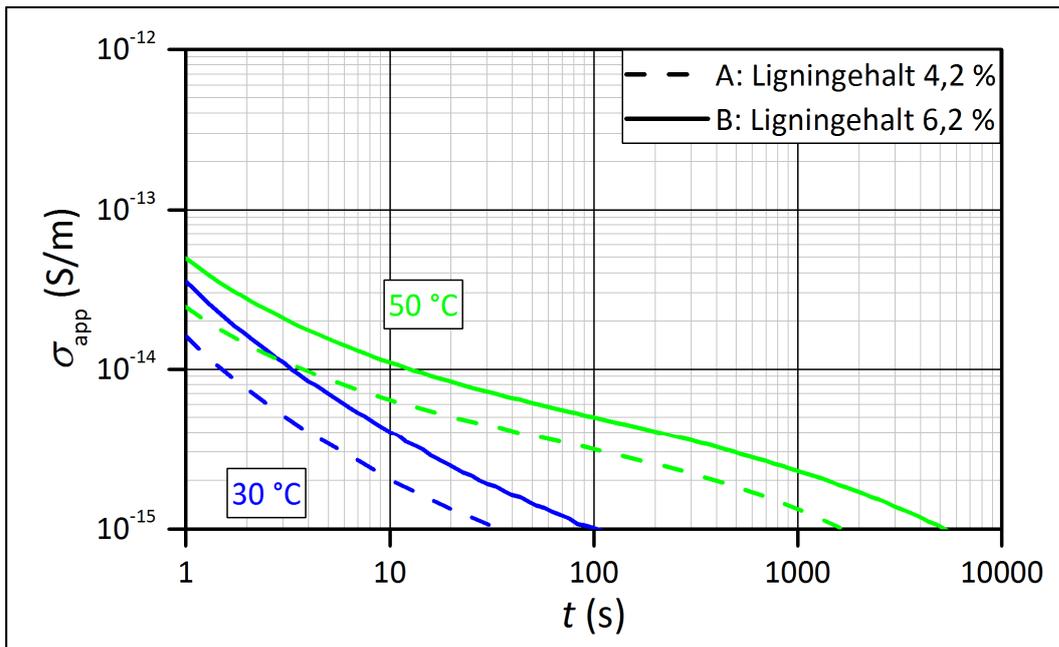


Abbildung 6.7-3: Scheinbare Leitfähigkeiten von Prüfling A und B bei 1 kV/mm, 30 °C und 50 °C sowie Imprägnierung mit trockener Luft

Bei einem Vergleich der Kurven der Prüflinge A und B bei verschiedenen Temperaturen zeigt sich die Abhängigkeit der scheinbaren Leitfähigkeit von Pressspan von der Temperatur. Mit Erhöhung der Temperatur nehmen auch der Strom respektive die scheinbare Leitfähigkeit zu, wie es in Kapitel 6.7.1 vorhergesagt wurde. Grund hierfür ist die Elektronen-Loch-Leitung, welche ein thermisch aktivierter Prozess ist und die aufgrund der chemischen Struktur des Lignins im Pressspan relevant ist. Deswegen war zu erwarten, dass die Leitfähigkeit exponentiell mit der Temperatur anstieg. Die experimentellen Daten des Anstiegs der Leitfähigkeit mit der Temperatur unterstreichen die Theorie aus Kapitel 2.2.3, dass der Ladungstransport durch thermisch aktiviertes Hüpfen (Hopping) geschieht.

Interessant ist der Bezug des Ligningehalts zur elektrischen Leitfähigkeit: Die scheinbaren Leitfähigkeiten der beiden Prüflinge liegen für alle Messzeitpunkte in etwa um den Faktor 2 auseinander [85]. Prüfling A mit niedrigem Ligningehalt zeigt eine kleinere scheinbare Leitfähigkeit als Prüfling B mit höherem Ligningehalt. Die Überlegungen in Kapitel 6.7.1 zum Einfluss des Ligningehalts auf die Leitfähigkeit von Pressspan sind somit richtig und der Einfluss des Lignins mit dem dazugehörigen Leitungsprozess der Elektronen-Loch-Leitung ist nun experimentell nachgewiesen.

Für eine Temperatur von 90 °C (siehe Abbildung 6.7-4) ist die Leitfähigkeit im Vergleich zur Leitfähigkeit bei niedrigeren Temperaturen anfangs deutlich höher und konvergiert bei Prüfling B scheinbar zu einem detektierbaren Endwert. Dieser liegt ebenfalls höher als die in Abbildung 6.7-3 zu erwartenden Endwerte bei 30 °C und 50 °C. Der Endwert für Prüfling A ist auch bei 90 °C nicht erfassbar. Die scheinbaren Leitfähigkeiten von Prüfling B liegen

immer noch über denen von Prüfling A [85]. Somit ist auch für 90 °C der Einfluss der Pressspanzusammensetzung, im Besonderen der Ligningehalt, von Bedeutung.

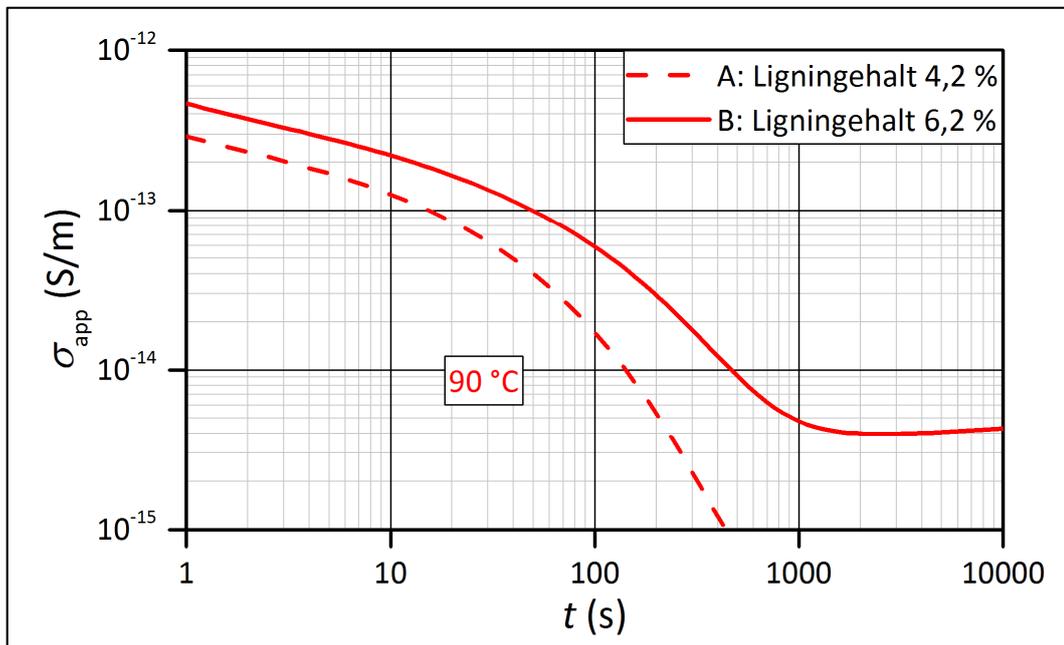


Abbildung 6.7-4: Scheinbare Leitfähigkeit von Prüfling A und B bei 1 kV/mm, 90 °C und Imprägnierung mit trockener Luft

Für Prüfling B wurde bei 90 °C beobachtet, dass die Kurven bei den Feldstärken von 0,1 kV/mm und 1 kV/mm nicht mehr aufeinander lagen. Hier kam eine Feldstärkeabhängigkeit ins Spiel, die bei tieferen Temperaturen nicht gemessen wurde, aber trotzdem vorhanden ist, was mittels Umrechnung von Ersatzschaltbildelementen im RC-Netzwerkmodell von Pressspan in Kapitel 6.10 nachgewiesen wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Ligningehalt die Leitfähigkeit von Pressspan für alle untersuchten Temperaturen und für die beiden Feldstärken von 0,1 kV/mm und 1 kV/mm beeinflusst. Höhere Feldstärken konnten aufgrund der Isolationsabstände mit dem verwendeten Aufbau nicht realisiert werden. Der Parameter Ligningehalt wurde demzufolge zu Unrecht in Wissenschaft und Forschung bei der Untersuchung und der Diskussion von Leitungsmechanismen bzw. der elektrischen Leitfähigkeit vernachlässigt. Die hier erstmals durchgeführten Untersuchungen weisen den Leitungsprozess einer Elektronen-Lochleitung im Pressspan nach. Dies muss nicht der einzige relevante Leitungsprozess sein. Dieser trägt jedoch offensichtlich zum Gesamttransport bei.

Bisher wurde die Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan bezüglich des Ligningehalts der Prüflinge untersucht und interpretiert. Der Einfluss des Ligningehalts war deutlich ersichtlich. Diese Untersuchung wurde erweitert, indem die Prüflinge mit Öl imprägniert wurden. Dadurch wird die Relevanz der Untersuchungen für die Bedingungen in Komponenten der HGÜ, in denen Pressspan mit Isolieröl imprägniert vorkommt, aufgezeigt.

Messungen unter Mineralöl

Abbildung 6.7-5 zeigt die scheinbare Leitfähigkeit der beiden Prüflinge A und B bei 30 °C und 1 kV/mm, nachdem die Prüflinge mit einem hochohmigen Mineralöl (Leitfähigkeit: $2 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$) imprägniert wurden. Die Ölimprägnierung sollte das π -Elektronensystem und damit die Elektronen-Loch-Leitung nicht verändern, wie es in Kapitel 6.7.2 beschrieben wurde.

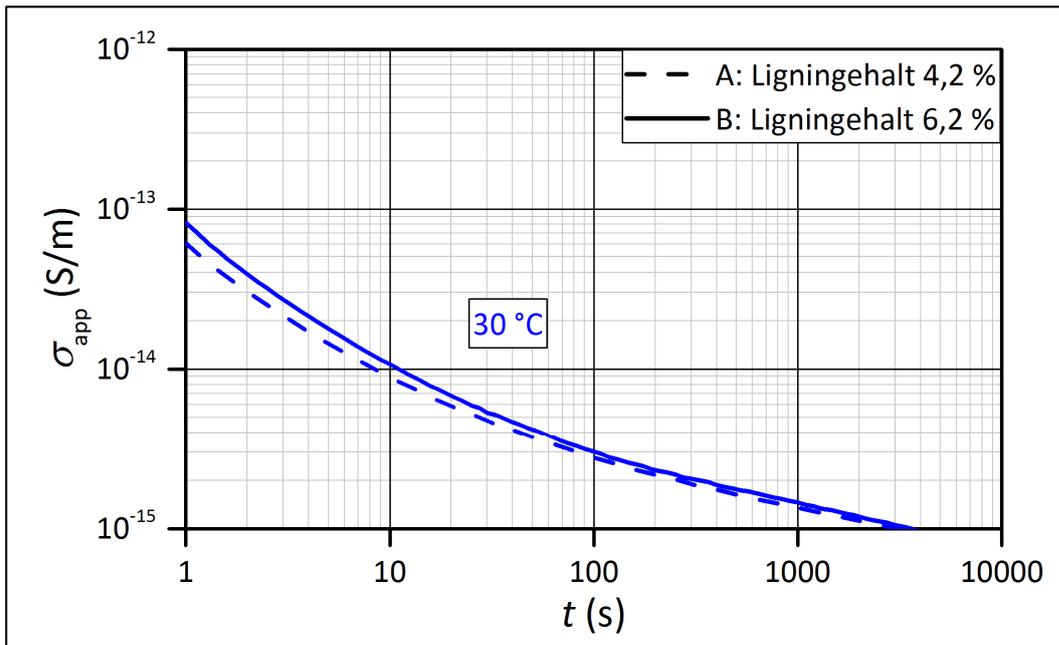


Abbildung 6.7-5: Scheinbare Leitfähigkeit von Prüfling A und B bei 1 kV/mm, 30 °C und Imprägnierung mit einem hochohmigen Mineralöl

Die scheinbaren Leitfähigkeiten der beiden Prüflinge A und B fallen wiederum mit der Belastungsdauer ab. Die Ölimprägnierung bewirkt, wie bereits diskutiert, eine Erhöhung der scheinbaren Leitfähigkeit über die gesamte Messdauer (vergleiche mit Abbildung 6.7-3), da das im Vergleich zu Luft leitfähigere Isolieröl die Räume zwischen den einzelnen Fasern füllt und neue Strompfade hinzukommen.

Darüber hinaus wird die elektrische Feldverteilung durch das Imprägniermedium verändert, da sich das Leitfähigkeitsverhältnis der beiden Isoliermedien Pressspan und Imprägnierung ändert. Aufgrund der im Vergleich zu Luft höheren Leitfähigkeit der Ölimprägnierung werden die Pressspanfasern unter Öl elektrisch anders belastet und es fließen größere Stromanteile durch das leitfähigere Medium Öl. Folglich fällt der Einfluss des Ligningehalts des Pressspans auf die Leitfähigkeit unter Ölimprägnierung deutlich schwächer ins Gewicht. [85]

In Abbildung 6.7-5 ist weiterhin ein Unterschied der beiden Prüflinge zu sehen. Die Leitfähigkeit liegt bei Prüfling A mit geringerem Ligningehalt unter der von Prüfling B mit höherem Ligningehalt [85]. Zur besseren Übersicht sind einige ausgewählte Werte in

Tabelle 17 dargestellt. Hier werden die scheinbaren Leitfähigkeiten bei 30 °C und 1 kV/mm von beiden Prüflingen A und B herangezogen und es wird die Differenz gebildet.

Aufgrund der Auflösung des Messgeräts wurden die Messwerte nach 10800 s nicht ausgewertet. Dort könnten sich Differenzen zwischen Messungen von Prüfling A und B unter Luft sowie unter Öl ergeben, welche mit verhältnismäßig großen Unsicherheiten behaftet sein könnten.

Tabelle 17: Differenz der scheinbaren Leitfähigkeiten von Prüfling A und Prüfling B für ausgewählte Messzeitpunkte bei 30 °C und 1 kV/mm

Messzeitpunkt	Leitfähigkeitsdifferenz zwischen Prüfling A und B <u>unter Luft</u> (S/m)	Leitfähigkeitsdifferenz zwischen Prüfling A und B <u>unter Öl</u> (S/m)
1 s	$19 \cdot 10^{-12}$	$20 \cdot 10^{-12}$
100 s	$0,3 \cdot 10^{-12}$	$0,2 \cdot 10^{-12}$
1000 s	$0,1 \cdot 10^{-12}$	$0,1 \cdot 10^{-12}$

Tabelle 17 zeigt, dass die unter Luftimprägnierung gemessenen Leitfähigkeitsdifferenzen zwischen Prüfling A und B bei 30 °C und 1 kV/mm für alle drei Auswertezeitpunkte durchaus auch bei Ölimprägnierung vorhanden sind. Die allgemein höheren Leitfähigkeiten unter Ölimprägnierung führen dazu, dass diese Differenz in der grafischen Aufbereitung der Messdaten in Abbildung 6.7-5 kaum sichtbar wird. Somit ist der Einfluss des Ligningehalts auf die Pressspanleitfähigkeit sowohl unter Luft- also auch unter Ölimprägnierung nachgewiesen.

Wie es beschrieben wurde, favorisiert die chemische Struktur des Lignins eine Elektronen-Loch-Leitung. Aufgrund theoretischer Ansätze war mit einer Erhöhung der Leitfähigkeit mit steigendem Ligningehalt im Pressspan zu rechnen. Dies hat sich sowohl bei Luftimprägnierung als auch bei Ölimprägnierung messtechnisch erstmals bestätigt. Die PDC-Messungen bei Luft- und Ölimprägnierung zeigen bei 30 °C, 50 °C und 90 °C höhere Leitfähigkeiten für Prüflinge mit höherem Ligningehalt. Somit sind die theoretischen Überlegungen zum Leitungstransport bei Lignin in Einklang mit den elektrischen Messungen zu bringen. Der Ligningehalt beeinflusst folglich das elektrische Verhalten des Isoliermaterials Pressspan.

6.8 Einfluss des Wassergehalts

Da der getrocknete Pressspan hygroskopisch ist (vergleiche Kapitel 1.2.2), nimmt er stets Feuchtigkeit auf, wenn er dieser ausgesetzt ist. In Kapitel 6.2 wurde bereits nachgewiesen, dass trockene Prüflinge ohne Ölimprägnierung innerhalb kürzester Zeit Feuchtigkeit aus der

Umgebungsluft aufnehmen können und dadurch die Titrationsergebnisse verfälscht werden.

Wird die Isolierung beispielsweise aufgrund von Leckage feucht, dann ist es denkbar, dass die im Vergleich zu trockenem Pressspan hohe Leitfähigkeit von Wasser (siehe Kapitel 2.1) die Leitfähigkeit des Gesamtsystems erhöht. In diesem Kapitel wird der Einfluss des Wassergehalts auf die Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan untersucht. Voruntersuchungen bei nicht vollständig getrocknetem Pressspan ergaben höhere Leitfähigkeiten im Vergleich zu Messungen von trockenem Pressspan. Deshalb wurde eine Zunahme der Leitfähigkeit mit dem Wassergehalt auch für die folgenden Untersuchungen erwartet.

Zu diesem Zweck wurden Prüflinge des Pressspantyps TIV getrocknet, anschließend mit aufbereitetem Öl Nynas Nytro 4000A imprägniert und in ölgefüllte, dicht verschließbare Edelstahlbehälter eingebaut. Je zwei Prüflinge befanden sich in einem Behälter. In jeden Behälter wurde ein Volumen von 5 ml zweifach destilliertem Wasser, aufgeteilt in Wassertropfen, mittels einer Mikroliterpipette eingebracht. Diese setzten sich am Behälterboden ab, was in Abbildung 6.8-1 zu sehen ist.

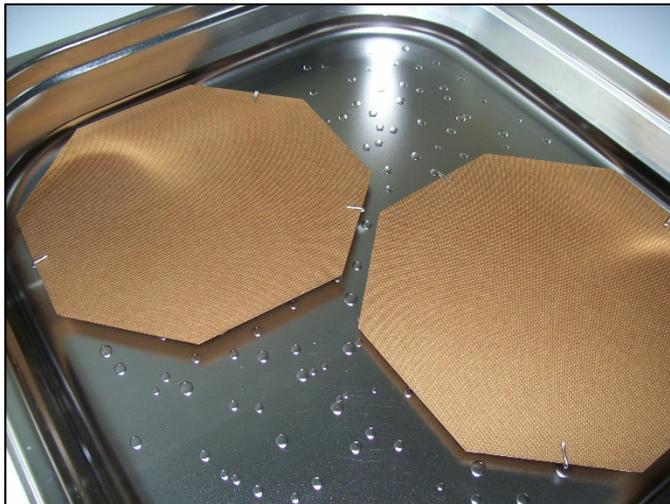


Abbildung 6.8-1: Einbau zweier ölprägnierter Pressspanprüflinge in den Edelstahlbehälter bei zugegebenem Öl und Wasser

Der Wassergehalt der Pressspanprüflinge wurde eingestellt, indem die Prüflinge nach unterschiedlichen Anzahlen an Temperaturzyklen dem Wärmeschrank entnommen wurden. Die Funktionsfähigkeit der Befeuchtung wurde in Voruntersuchungen bewiesen [93]. Damit eventuelle Wasserverluste durch Dichtungen etc. nicht ins Gewicht fielen, wurde eine größere Wassermenge in die Behälter eingebracht, als diejenige Menge, die abgeschätzt wurde, um einen gewünschten Wassergehalt im Pressspan im Bereich 0,5 bis 4 % zu erzeugen.

Abbildung 6.8-2 zeigt den Temperaturverlauf zur Befeuchtung, der solange wiederholt wurde, bis alle Prüflinge ausgebaut waren.

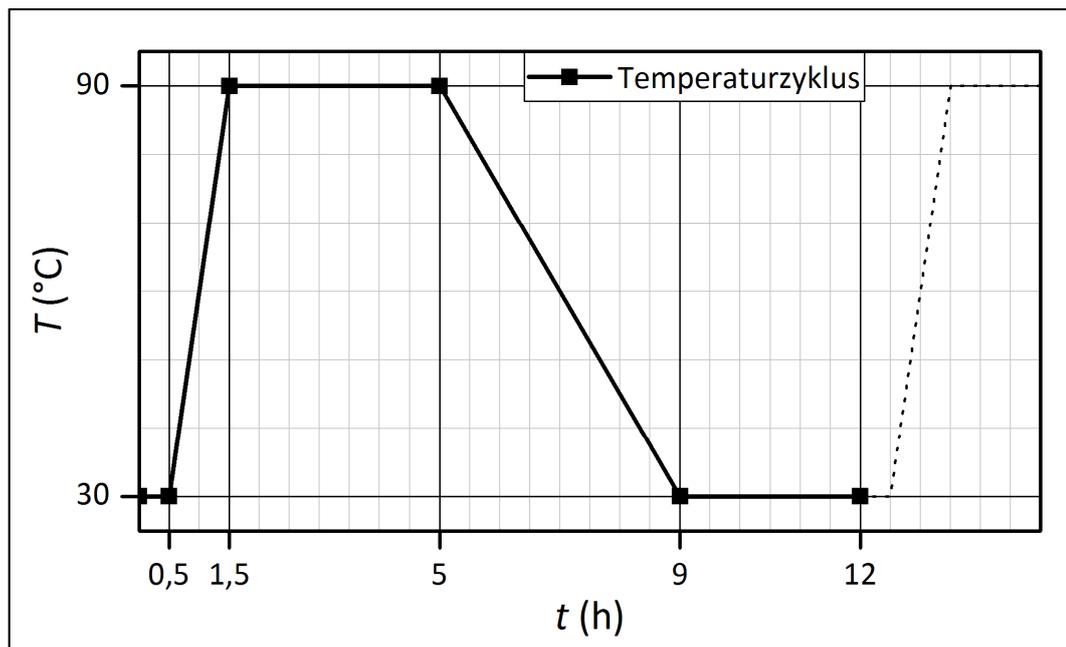


Abbildung 6.8-2: Schematische Darstellung eines Zyklus des Solltemperaturverlaufs zur Befeuchtung von Pressspanprüflingen

Nach einer Beruhigungsphase von einer halben Stunde wurden die Behälter in einem Wärmeschrank innerhalb von einer Stunde auf eine Temperatur von 90 °C geheizt und verblieben dort für 3,5 Stunden. Innerhalb dieser Zeit ging Wasser ins Öl über. Anschließend folgte die Abkühlphase auf 30 °C, welche vier Stunden dauerte, und die Temperatur von 30 °C wurde für drei Stunden gehalten. Nun ging das Wasser vom Öl in den Pressspan über. Danach wurde der Zyklus wiederholt.

Anmerkung: Die Begründung für diesen Wassertransport und damit auch für den durchgeführten Befeuchtungszyklus liefert die Gibbs-Helmholtz-Gleichung. Sie wird auf das System von Wasser in Öl bzw. in Pressspan angewandt. Die Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Enthalpieänderung ΔH und der Entropieänderung ΔS , woraus sich die Änderung der Gibbs-Energie ΔG ergibt. Die Entropieänderung wird dabei mit der Temperatur T gewichtet:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (6.8-1)$$

Zuerst wird die Enthalpie H näher betrachtet. Wird Wasser in Öl gelöst, so müssen dafür zunächst Wasserstoffbrückenbindungen im Wasser gebrochen werden. Dieser Vorgang ist energetisch ungünstig, sodass für diesen Vorgang die Enthalpieänderung positiv ist [94]. Es muss folglich Energie aufgebracht werden, um Wasser in Öl zu lösen. Würde nur die Enthalpieänderung betrachtet werden, würde sich das Wasser im Öl nicht lösen, da dieser Vorgang enthalpisch ungünstig ist.

Unter der Entropie S kann man sich ein Maß für die Zahl an möglichen energetisch gleichwertigen Zuständen vorstellen, welche das System einnehmen kann. Sie ist damit ein Maß für die Unordnung des Systems. Das System strebt von sich aus in einen Zustand, in dem möglichst viele Mikrozustände auf ähnlichem Energieniveau sind und folglich nach einer hohen Entropie. Die Änderung der Entropie ΔS , also die Änderung an Zuständen, wird mit der Temperatur gewichtet und geht negativ in die Gibbs-Energie ein.

Betrachtet werden nun die drei Fälle, sodass der Zusammenhang mit der Befeuchtung deutlich wird:

Für $\Delta G = 0$ befindet sich das System im Gleichgewicht. Es findet kein Austausch von Wassermolekülen statt. Bei $\Delta G < 0$ spricht man von einem exergonischen Vorgang, der freiwillig ablaufen kann. Wird $\Delta G > 0$, dann läuft der Vorgang unter Zufuhr von Gibbs-Energie ab und wird endergonisch genannt. Dies ist ein thermodynamisch ungünstiger Vorgang.

Wenn die Temperatur erhöht wird, dann wird der Term $T \cdot \Delta S$ in Gleichung (6.8-1) größer. Da er negativ in die Gibbs-Energie eingeht, kann diese nun negativ werden oder zumindest weniger positiv. Die Löslichkeit von Wasser in Öl wird damit erhöht [94] und Wasserstoffbrückenbindungen im kondensierten Wasser werden gebrochen. Wasser vermischt sich mit Öl, bis das Öl im Volumen einen gleichverteilten Wassergehalt hat. Dies ist der Fall in der Aufheizphase des Temperaturzyklus.

Bei der Abkühlung im Temperaturzyklus verringert sich die Löslichkeit wieder, da die Gibbs-Energie wieder größer wird. Wasser fällt folglich aus und kondensiert entweder an den Behälterwänden oder es bildet Wasserstoffbrückenbindungen mit OH-Gruppen im Pressspan oder mit den schon im Pressspan vorhandenen Wassermolekülen. Somit wird der Wassergehalt im Pressspan während der Abkühlphase des Temperaturzyklus erhöht. Dies geschieht im besten Fall gleichverteilt.

Mit Hilfe dieser Befeuchtung konnten unterschiedliche Wassergehalte im Pressspan eingestellt werden. Die Befeuchtungsart war praxisrelevant, da das Isoliersystem aus Öl und Pressspan im Transformator einerseits Temperaturzyklen aufgrund von Lastschwankungen und Umgebungsbedingungen erfährt, andererseits Feuchtigkeit beispielsweise von außen über Leckagen eindringen kann.

Nach den jeweiligen Temperaturzyklen wurden die Behälter jeweils für sieben Tage bei 50 °C in einem anderen Wärmeschrank gelagert. Diese Lagerzeit diente der Homogenisierung der Feuchtigkeit in den Prüflingen. Danach wurde der Wassergehalt eines Prüflings mittels Karl-Fischer-Titration bestimmt. Der zweite Prüfling des jeweiligen Behälters wurde in eine Messzelle eingebaut, mit aufbereitetem Öl geflutet und stand für Leitfähigkeitsmessungen zur Verfügung. Nach der letzten Messung wurde auch der Wassergehalt dieses Prüflings bestimmt. Somit lieferte der zuerst titrierte Prüfling den Wassergehalt vor der Messung, der zuletzt titrierte denjenigen nach der Messung. Darüber hinaus wurde ein Prüfling nicht befeuchtet, sondern stattdessen im trockenen Zustand (0,02 % Wassergehalt) gemessen.

Tabelle 18 gibt eine Übersicht über die Wassergehalte der Prüflinge vor und nach der Leitfähigkeitsmessung. Angegeben ist jeweils der Wassergehalt in der Mitte sowie am Rand der Prüflinge. Für die weiteren Diskussionen wurde der Mittelwert der Wassergehalte aus der Titration beider Prüflinge in der Prüflingsmitte berechnet, da sich diese Messpunkte unter der Messelektrode befanden, an welcher der Strom detektiert wurde. Außerdem wurden die Wassergehalte der Isolieröle bestimmt. Sie lagen für alle Messungen mit Ausnahme der Messung an trockenem, unbefeuchtetem Pressspan bei wenigen ppm vor den Messungen und zwischen 10 und 18 ppm nach den Messungen. Die Messungen wurden jeweils in abgekühltem Zustand durchgeführt.

Tabelle 18: Wassergehalt der Prüflinge vor und nach den Leitfähigkeitsmessungen in der Mitte sowie am Rand der jeweiligen Prüflinge. Pressspan 1 und Pressspan 5 haben eine sehr homogene Verteilung des Wassergehalts und werden deshalb in der Tabelle sowie in den Legenden der Auswertungen blau markiert.

Pressspan-Nr.	$W_{\text{vorher, Rand}}$	$W_{\text{vorher, Mitte}}$	$W_{\text{nachher, Rand}}$	$W_{\text{nachher, Mitte}}$	$W_{\text{mittel, Mitte}}$
1	---	---	0,05 %	0,02 %	0,02 %
2	1,01 %	0,97 %	0,96 %	0,69 %	0,83 %
3	1,73 %	1,42 %	1,34 %	0,99 %	1,21 %
4	2,66 %	1,86 %	1,18 %	2,00 %	1,93 %
5	1,92 %	1,88 %	1,98 %	1,97 %	1,93 %
6	2,47 %	2,31 %	2,50 %	2,47 %	2,39 %
7	3,12 %	2,84 %	3,20 %	3,09 %	2,97 %
8	3,53 %	3,16 %	3,48 %	3,36 %	3,26 %
9	3,02 %	3,31 %	3,39 %	3,89 %	3,60 %
10	3,90 %	3,59 %	3,69 %	4,16 %	3,88 %

Pressspan 1 mit 0,02 % Wassergehalt wies eine homogene Wasserverteilung auf, da er getrocknet und anschließend homogen imprägniert wurde. Er ist in der Tabelle und in den Legenden der Auswertungen blau markiert. Außerdem ist bei Pressspan 5 mit 1,93 % Wassergehalt die Verteilung sehr homogen. Auch dieser Pressspan ist in den Legenden der Auswertungen blau gekennzeichnet. Grund für die Homogenität ist die zusätzliche Lagerung dieses Prüflings bei 90 °C für eine Woche. Die Messwerte dieses Pressspans sind in den folgenden Abbildungen mit dunkelgrüner Linienfarbe dargestellt. Interessant ist, dass zufällig ein weiterer Pressspan, nämlich Pressspan 4, auch einen gemittelten Wassergehalt von 1,93 % aufwies. Hier war die Verteilung des Wassergehalts von innen (Mitte) nach außen (Rand) sowie von vorher zu nachher merklich unterschiedlich, sodass die Wasserverteilung im Vergleich zu Pressspan 5 als inhomogen bezeichnet wird. Die Messwerte dieses Pressspans sind in den folgenden Abbildungen mit roter Linienfarbe verdeutlicht.

Abbildung 6.8-3 zeigt die scheinbaren Leitfähigkeiten der Prüflinge 1 bis 10 bei 30 °C und einer Feldstärke von 1 kV/mm. Die Kurven unterscheiden sich im Wassergehalt.

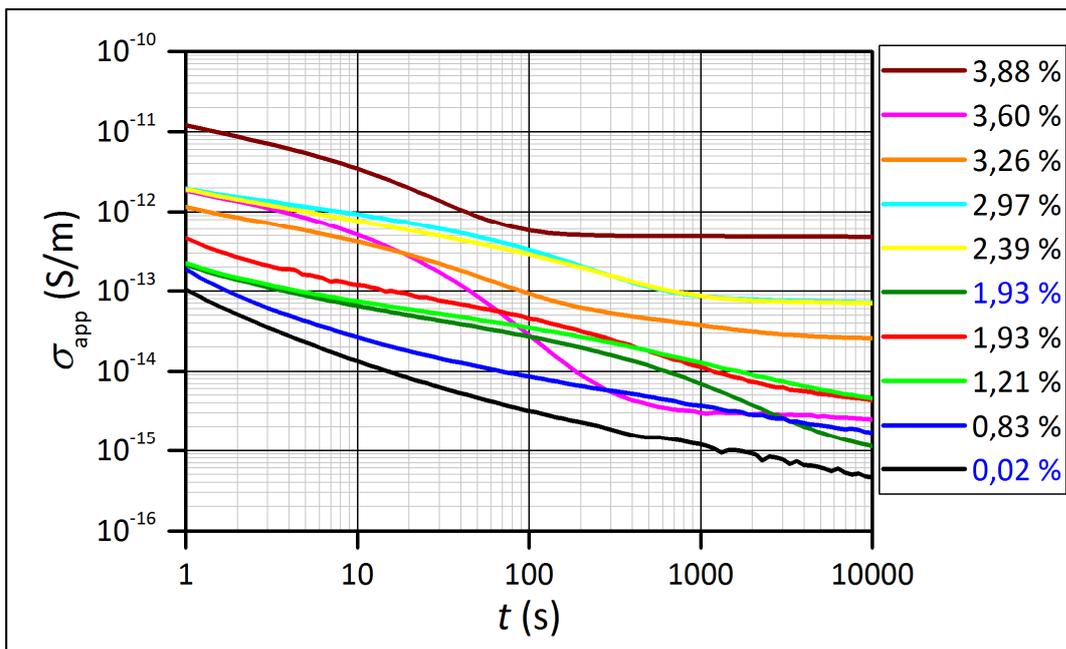


Abbildung 6.8-3: Scheinbare Leitfähigkeit von ölimprägniertem Pressspan bei 30 °C, 1 kV/mm und verschiedenen Wassergehalten. Die Prüflinge mit sehr homogener Wasserverteilung sind in der Legende blau markiert.

Es zeigen sich mit der Zeit abfallende Ströme und somit auch zeitlich abklingende scheinbare Leitfähigkeiten. Der Pressspan mit 0,02 % Wassergehalt hat die kleinste scheinbare Leitfähigkeit und ein stationärer Endwert ist nicht erreicht. Auffällig ist das unterschiedliche Zeitverhalten bei Pressspan 9 mit 3,60 % Wassergehalt, denn dort ist eine ausgeprägte Transitzeit erkennbar. Eine solche zeigte sich bisher nur für Leitfähigkeitsmessungen an Öl. Der stationäre Leitfähigkeitsendwert dieses Pressspans ist nach 10800 s bereits erreicht und diese Kurve liegt zwischen den Kurven mit den Wassergehalten von 0,83 % (Pressspan 2) und 1,93 % (Pressspan 4). Hier ist kein eindeutiger Zusammenhang der Leitfähigkeit mit dem Wassergehalt ersichtlich.

Auch für die Anfangswerte nach 1 s passen die Wassergehalte nicht zur Höhe der scheinbaren Leitfähigkeiten. Die Erwartung, dass die Leitfähigkeit mit dem Wassergehalt steigt, kann aufgrund dieser Messungen bei 1 kV/mm nicht belegt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass einige Kurven nach 10800 s bereits stationäre Zustände erreicht haben und folglich die Gleichstromleitfähigkeit abgelesen werden kann, andere Kurven aber augenscheinlich noch weiter sinken würden.

Um das Verhalten bei höheren Feldstärken zu untersuchen, wurden Messungen bei 30 °C und 10 kV/mm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.8-4 zu sehen. Dafür wurde eine externe Spannungsquelle in Versuchszelle (1) benutzt, die nach dem Zuschalten der Spannung einige Sekunden zum Erreichen der Spannungsstabilität benötigte. Während dieser Zeit wurden Verschiebestrome detektiert, die sich den Polarisations- und Leitungsströmen überlagerten und das Stromsignal verfälschten. Deshalb werden hier und im Folgenden Messdaten erst ab zehn Sekunden präsentiert.

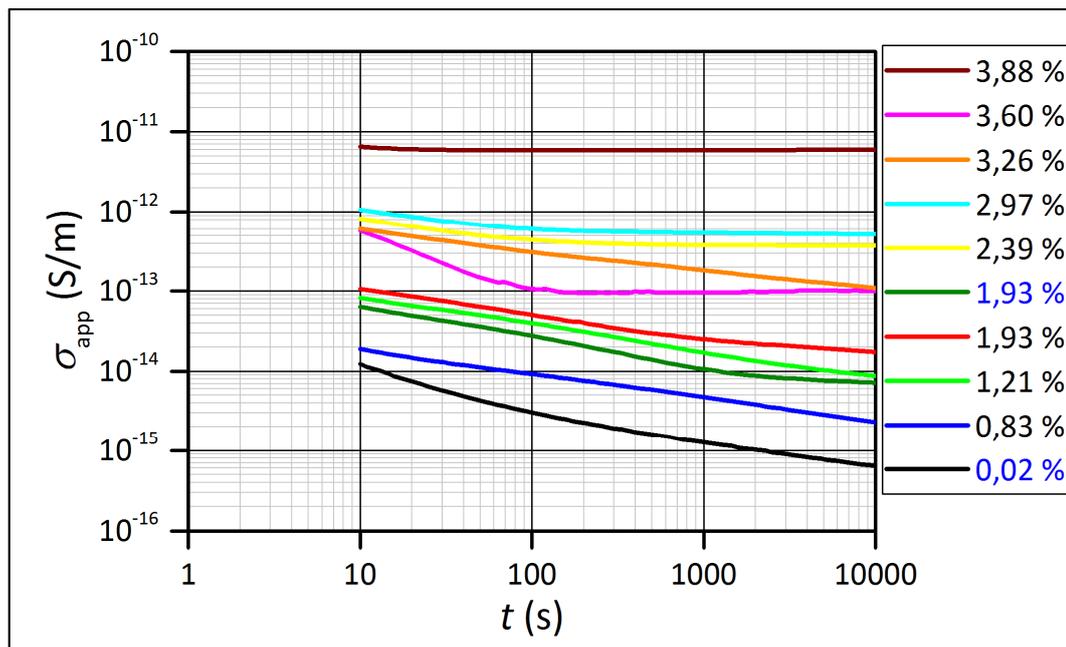


Abbildung 6.8-4: Scheinbare Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan bei 30 °C, 10 kV/mm und verschiedenen Wassergehalten. Die Prüflinge mit sehr homogener Wasserverteilung sind in der Legende blau markiert.

Auch hier zeigen sich wieder mit der Zeit abfallende Ströme bzw. scheinbare Leitfähigkeiten. Polarisationsvorgänge klingen ab, bis ein stationärer Zustand erreicht ist, der nur noch von der Gleichstromleitfähigkeit bestimmt wird. Die Transitzeit von Pressspan 9 mit 3,60 % Wassergehalt ist kleiner als bei 1 kV/mm und der Leitfähigkeitsendwert wird früher angenommen. Die meisten Kurven sind dem stationären Zustand näher gekommen bzw. haben diesen erreicht. Beispielsweise zeigt Pressspan 5 mit 1,93 % Wassergehalt (dunkelgrün) nun einen Endwert. Die Leitfähigkeitsendwerte beginnen sich gemäß dem Wassergehalt der Prüflinge einzureihen. Zwischen der Leitfähigkeit von Pressspan 1 mit 0,02 % Wassergehalt und der von Pressspan 10 mit 3,88 % Wassergehalt liegen nun vier Größenordnungen. In Abbildung 6.8-3 waren es nur drei Größenordnungen. Der Wassergehalt hat folglich einen großen Einfluss auf die Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan.

Darüber hinaus zeigt Abbildung 6.8-5 die scheinbaren Leitfähigkeiten von ölprägniertem Pressspan bei 30 °C und 20 kV/mm. Bis auf die Leitfähigkeitskurven bei hohen Wassergehalten haben sich alle Kurven gemäß ihrem Wassergehalt eingeordnet. Die Leitfähigkeit steigt nun mit zunehmendem Wassergehalt für alle Messzeitpunkte. Der Unterschied zwischen der Leitfähigkeit des Pressspans mit dem kleinsten und mit dem größten Wassergehalt beträgt nun über vier Größenordnungen.

Die Leitfähigkeitskurven der beiden Pressspanprüflinge bei 1,93 % Wassergehalt laufen mit zunehmender Feldstärke zusammen. Aufgrund dieser Messergebnisse scheint der Unterschied in der Homogenität des Wassergehalts im Pressspan für große Feldstärken weniger relevant zu sein als für kleine Feldstärken.

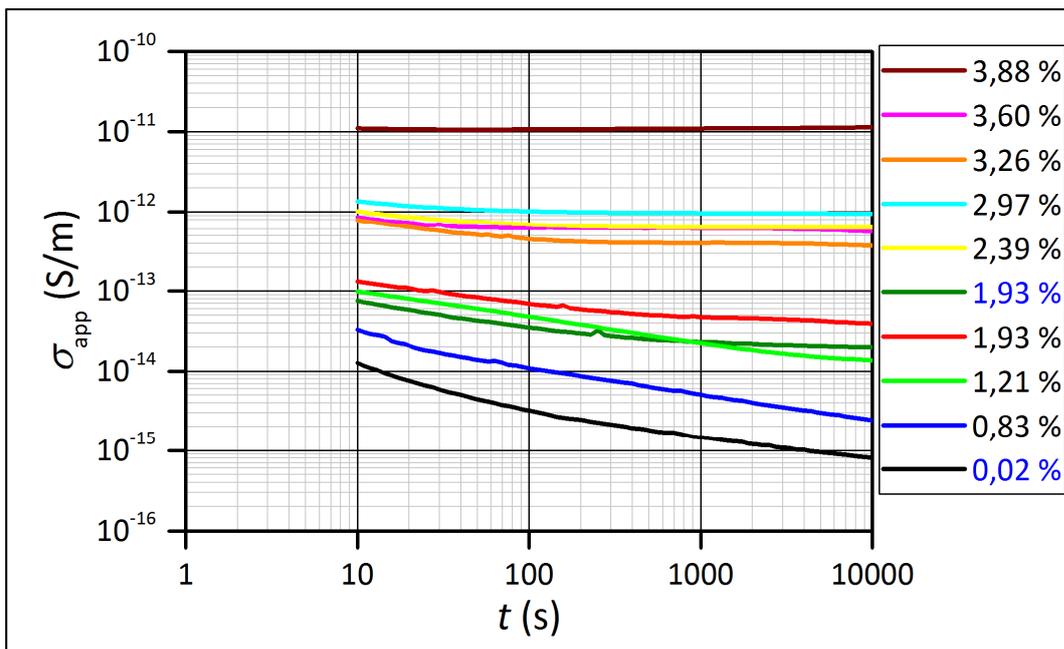


Abbildung 6.8-5: Scheinbare Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan bei 30 °C, 20 kV/mm und verschiedenen Wassergehalten. Die Prüflinge mit sehr homogener Wasserverteilung sind in der Legende blau markiert.

Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 6.8-6 alle Leitfähigkeiten nach 10800 s für die unterschiedlich feuchten Prüflinge eingetragen. Die Farben und Symbole repräsentieren die verschiedenen Feldstärken 1, 10 und 20 kV/mm.

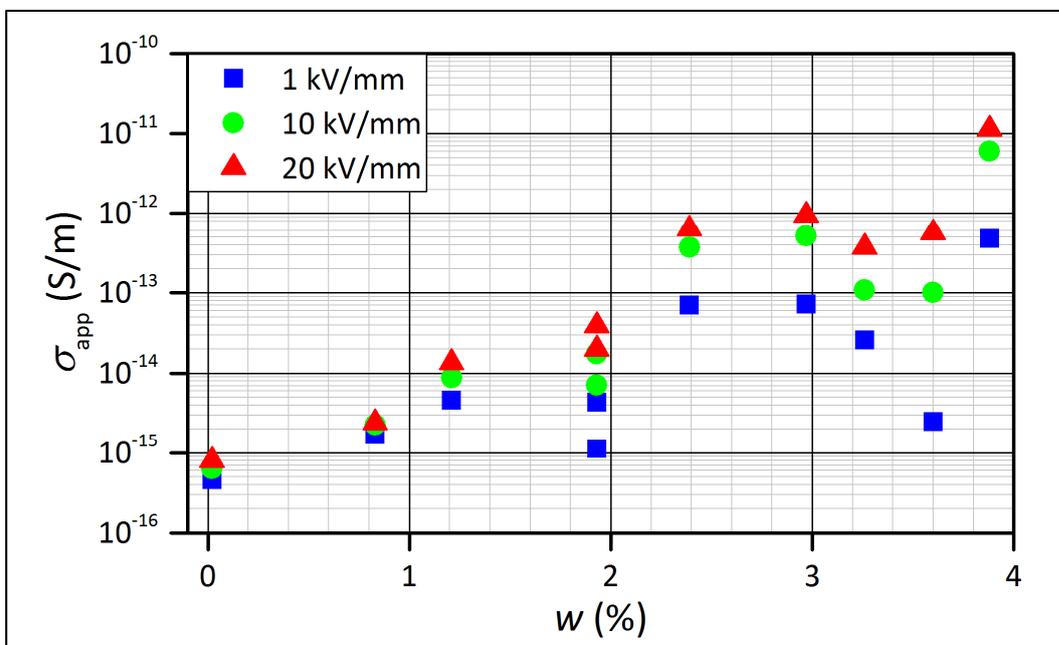


Abbildung 6.8-6: Scheinbare Leitfähigkeiten von ölprägnierten Pressspanprüflingen nach einer Messzeit von 10800 s bei 30 °C und verschiedenen Feldstärken

Bei 1 kV/mm ist aufgrund der vorliegenden Messdaten nur ein schwacher Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit und dem Wassergehalt erkennbar. Erst bei hohen Feldstärken,

explizit bei 20 kV/mm, zeigt sich eine exponentielle Zunahme der Leitfähigkeit mit dem Wassergehalt, was den Erwartungen entspricht. Interessant ist außerdem, dass die Leitfähigkeiten beider Prüflinge mit 1,93 % Wassergehalt erst bei hohen Feldstärken nahe beieinander liegen und sich beispielsweise bei 1 kV/mm um den Faktor 4 unterscheiden (siehe Abbildung 6.8-3). Bei 20 kV/mm, Abbildung 6.8-5, beträgt dieser Faktor in etwa nur noch 1,8.

Es wurden außerdem Messungen bei 50 °C und 1 kV/mm durchgeführt. Durch einen Vergleich mit den Messungen bei 30 °C und 1 kV/mm wurde die Temperaturabhängigkeit mittels Simulation unter Zuhilfenahme des Arrhenius-Gesetzes bestimmt. Das Vorgehen wird in Kapitel 6.9.2 detailliert beschrieben. An dieser Stelle soll nur das Ergebnis erwähnt werden: Es ergaben sich nahezu die gleichen Aktivierungsenergien für alle Prüflinge unabhängig vom Wassergehalt [93], [95]. Daraus folgt, dass derselbe Leitungsprozess für alle ölimprägnierten Pressspanprüflinge relevant ist.

Das Verhalten der Pressspanprüflinge mit unterschiedlichem Wassergehalt (homogen und inhomogen) wird nun mit dem erwarteten Leitungsprozess der Protonenleitung in Verbindung gebracht. Die Protonenleitung gemäß dem Grotthuß-Mechanismus wurde in Kapitel 2.2.4 theoretisch behandelt. Demnach wandern Protonen schneller durch eine wässrige Lösung als andere Ionen. Der Nachweis von Wasserstoff wurde als Indiz gesehen, dass es sich um Protonenleitung handelt. Dieser Nachweis war Murphy [49] für Zellulose gelungen. Außerdem beschrieben Krasucki et al. [96] die Entwicklung von Gas für eine Isolation aus ölimprägniertem Papier, wenn diese mit einer Gleichspannung belastet wird. Diese Autoren fanden heraus, dass mit zunehmendem Wassergehalt der festen Isolation auch mehr Gas gebildet wird. Dieses Gas kam allerdings nicht aus dem Öl, sondern aus der Zellulose, da die Art des Imprägniermediums keinen Einfluss auf die Bildung von Gas hatte. Bei Feststoffen mit kleinem Wasserabsorptionsvermögen wurde indes keine Gasbildung beobachtet. Deshalb wurde die Gasbildung dem Wasser zugeschrieben, welches an die Zellulose gebunden ist.

Die gemessenen Ströme setzen sich, wie es bereits erwähnt wurde, aus Polarisations- und Leitungsströmen zusammen. Bei Leitungsströmen müssen zwei relevante Prozesse beachtet werden: Transport der Ladungsträger durch das Isolierstoffvolumen und Neutralisierung der Ladungsträger an den Elektroden. Der erste Prozess wird vom Volumenwiderstand begrenzt und ist damit eine direkte Materialinformation. Der zweite Prozess wird von der Injektion der Ladungsträger an den Elektroden bestimmt. Wenn die Ladungsträger mehr oder weniger barrierefrei in das Material eingebracht werden können, spricht man von einem ohmschen Kontakt [47].

In Zellulose sind aufgrund der Autoprotolyse von Wasser Ionen (d. h. Protonen) vorhanden. Diese werden bei angelegter Spannung durch den Isolierstoff transportiert. Wenn sich Ladungsträger durch das Isolierstoffvolumen besser bewegen können, als diese an den

Elektroden neutralisiert bzw. Elektronen injiziert werden, dann bilden sich vor den Elektroden Raumladungszonen aus. Ist dies der Fall, dann ergibt sich eine quadratische Abhängigkeit des Stroms von der angelegten Spannung. Dies wird empirisch in Kapitel 6.10 nachgewiesen. Dieser Spannungseffekt ist nach Glasser [51] ein weiteres Indiz für die Protonenleitung.

Bei der Autoprotolyse zerfällt Wasser in einer Gleichgewichtsreaktion zu Hydroxidionen (OH^-) und Oxoniumionen (H_3O^+). Letztere haben ein Proton (H^+) zu viel, welches nach Anlegen eines elektrischen Feldes durch den Isolierstoff transportiert wird. Bei der Autoprotolyse von Wasser handelt es sich um eine Gleichgewichtsreaktion. Werden Protonen abtransportiert, dann werden sofort neue nachgebildet, um das Gleichgewicht zwischen Hydroxidionen und Oxoniumionen aufrechtzuerhalten. Kurz nach Anlegen des elektrischen Feldes werden die Protonen sowie die Hydroxidionen, welche im Isolierstoffvolumen gleichverteilt sind, zu den Gegenelektroden transportiert. Protonen sind aufgrund ihrer im Vergleich zu Hydroxidionen kleineren Masse und auch ihres kleineren Volumens beweglicher und kommen somit als erstes an der Gegenelektrode an. Der Transport durch den Feststoff ist vom Volumenwiderstand des Pressspans bestimmt und von der absoluten Anzahl an Protonen, welche wiederum direkt proportional zum Wassergehalt ist.

An der Elektrode werden die Protonen neutralisiert, indem Elektronen aus der Elektrode injiziert werden. Zwei Protonen reagieren mit zwei Elektronen zu dimerisiertem Wasserstoff (H_2). Je nachdem, wie effektiv dieser Injektionsprozess ist, werden alle ankommenden Protonen neutralisiert oder nicht. Falls mehr Protonen an der Elektrode ankommen als Elektronen injiziert werden, lagern sich die Protonen in einer Raumladungszone vor der Elektrode an. Dies ist links in Abbildung 6.8-7 zu sehen. Zur Vereinfachung ist nur die Kathode gezeigt und es werden lediglich die Protonen dargestellt.

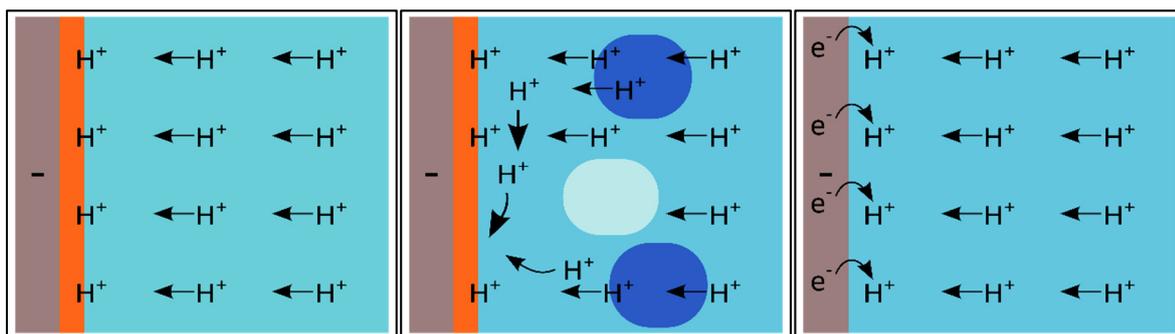


Abbildung 6.8-7: Protonenleitung im Pressspan, schematisch dargestellt. Links: kleine Feldstärke, homogene Wasserverteilung; Mitte: kleine Feldstärke, inhomogene Wasserverteilung; Rechts: große Feldstärke, Wasser- und Protonenverteilung irrelevant

Der oben beschriebene Prozess wird bei inhomogener Wasserverteilung leicht geändert. An den wasserreichen Stellen werden verhältnismäßig viele Protonen erzeugt und diese Stellen werden leitfähiger. An weniger wasserreichen Stellen werden hingegen wenige Protonen

erzeugt. Es kommt mit der Zeit einerseits zu einem Ausgleichsvorgang der Protonenkonzentration im gesamten Isolierstoffvolumen, andererseits werden die an der Elektrode ankommenden Protonen bei kleinen Feldstärken in der Raumladungszone angehäuft und verteilen sich gleichmäßig vor der Elektrode. Dazu können sie Wege entlang der Elektrode zurücklegen und Stellen auffüllen, an denen aufgrund der zufällig geringeren Wasserkonzentration im Pressspan weniger Protonen zur Elektrode transportiert wurden [95]. Die Verhältnisse bei kleiner Feldstärke und einer inhomogenen Wasserverteilung zeigt Abbildung 6.8-7 Mitte. Das dielektrische Verhalten des Pressspans wird folglich von der Anzahl und der geometrischen Lage der wasserreichen bzw. weniger wasserreichen Stellen im Pressspan dominiert. Diese sind bei den unterschiedlichen Proben verschieden und deshalb kann bei niedrigen Feldstärken die Leitfähigkeit nicht mit dem durchschnittlichen Wassergehalt der Pressspanprüflinge in Verbindung gebracht werden.

Bei hohen Feldstärken werden die Protonen beim Auftreffen an der Elektrode sofort neutralisiert und alle auftreffenden Protonen tragen zum Ladungstransport bei. Eine Raumladungszone existiert nicht, wie Abbildung 6.8-7 rechts zeigt. Somit spielt eine mögliche inhomogene Wasserverteilung bei hohen Feldstärken keine große Rolle mehr wie bei niedrigen Feldstärken [95]. Damit ist die Annäherung der beiden Leitfähigkeitskurven der Pressspanproben von 1,93 % Wassergehalt bei 20 kV/mm erklärt.

6.9 Einfluss der Temperatur

Der Leitungsprozess ist bei Pressspan thermisch aktiviert. Deshalb wird in den folgenden Kapiteln der Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan betrachtet. Simulationen helfen, um stationäre Zustände und damit Endwerte auch bei niedrigen Temperaturen zu ermitteln.

6.9.1 Hintergrund

Wie schon in Kapitel 6.3 vorgestellt, ist die scheinbare Leitfähigkeit von der Temperatur abhängig. Es handelt sich um einen thermisch aktivierten Transportprozess und es wird eine exponentielle Zunahme der Leitfähigkeit mit der Temperatur bzw. eine Abnahme des Gleichstromwiderstands erwartet.

Mit erhöhter Temperatur ändert sich nicht nur der Leitungsanteil des gemessenen Stromverlaufs, sondern auch das Polarisationsverhalten. Die Polarisationsmechanismen laufen theoretisch schneller ab und die Zeitkonstanten $\tau_i = R_i \cdot C_i$ werden mit steigender Temperatur kleiner, wenn angenommen wird, dass die Widerstände kleiner werden und die Kapazitäten in erster Näherung gleich bleiben [97]. Als Begründung für die annähernd gleichbleibenden Kapazitäten bei einer Temperaturerhöhung ist zum einen das Dipolmoment der polarisierbaren Bestandteile im Pressspan anzuführen, welches sich mit der

Temperatur kaum ändert, da die Ladungsmengen und die Molekülabstände nur schwach temperaturabhängig sind. Zum anderen ändert sich auch die Probengeometrie mit der Temperatur kaum. Mit der Temperatur nimmt die Leitfähigkeit hingegen exponentiell zu und damit der Widerstand exponentiell ab.

Abbildung 6.9-1 zeigt die scheinbare Leitfähigkeit eines luftimprägnierten Pressspans als Funktion der Zeit für Temperaturen zwischen 50 °C und 90 °C bei der Feldstärke 1 kV/mm.

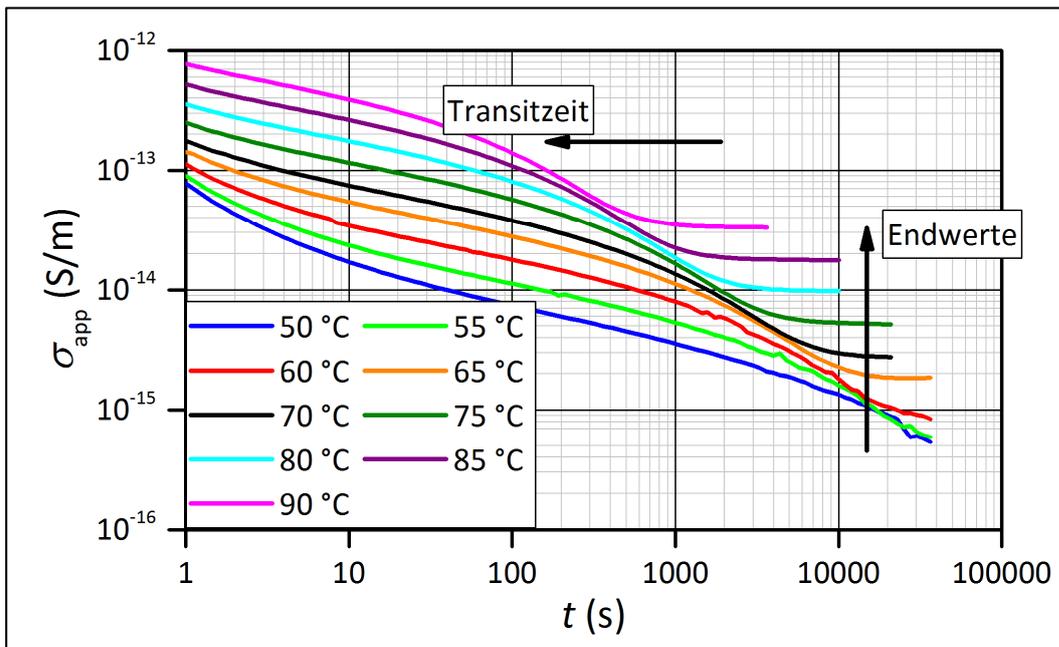


Abbildung 6.9-1: Scheinbare Leitfähigkeiten eines luftimprägnierten Pressspans bei 1 kV/mm und verschiedenen Temperaturen

Die Messdauer wurde bei niedrigeren Temperaturen verlängert, um möglichst stationäre Zustände zu erreichen. Aufgrund der kleinen Ströme durch das Isoliersystem waren Stromendwerte dennoch erst ab 65 °C zu detektieren. Endwerte werden für höhere Temperaturen früher erreicht als für tiefere Temperaturen.

Neben dem Anstieg des Stromendwertes ist auch eine Verkürzung der Transitzeiten verdeutlicht durch den in Abbildung 6.9-1 eingezeichneten Pfeil zu sehen. Dies kann dazu führen, dass sich Leitfähigkeitskurven unterschiedlicher Temperatur überschneiden.

Im Fall der Orientierungspolarisation ist es vorstellbar, dass eine Temperaturerhöhung der intra- und intermolekularen Dipol-Dipol-Wechselwirkung und den Wasserstoffbrückenbindungen entgegenwirkt, da in den beteiligten Molekülen zunehmend Phononen aktiviert werden. Somit können die Dipole leichter ausgerichtet werden und der Polarisationsvorgang beschleunigt sich. Die gespeicherte Ladungsmenge, die ein Maß für die Polarisation darstellt, müsste eigentlich nach Gleichung (2.3-7) in Kapitel 2.3.4 mit der Temperatur kleiner werden. Dies war in den empirischen Untersuchungen nicht nachweisbar. Aus diesem Grund wird die Orientierungspolarisation zwar als vorhandener, aber untergeordneter Polarisationsmechanismus in Pressspan bewertet.

Im Hinblick auf die Grenzflächenpolarisation verkleinert sich aufgrund der gestiegenen Leitfähigkeit der Materialwiderstand und die Ladungsträger können schneller zu den Grenzschichten transportiert werden, an denen sie sich anstauen. Diese anschauliche Vorstellung kann die bei erhöhten Temperaturen empirisch beobachteten, schneller ablaufenden Polarisationsmechanismen erklären. Hier wurde die theoretische Vorhersage, dass es sich bei dem relevanten Leitungsprozess um einen thermisch aktivierten Prozess handelt, bestätigt, da sich die Endleitfähigkeit mit der Temperatur erhöht. Dies ist in Abbildung 6.9-2 zu sehen. Zur Verifikation der Abhängigkeit ist außerdem eine exponentielle Anpassung eingezeichnet.

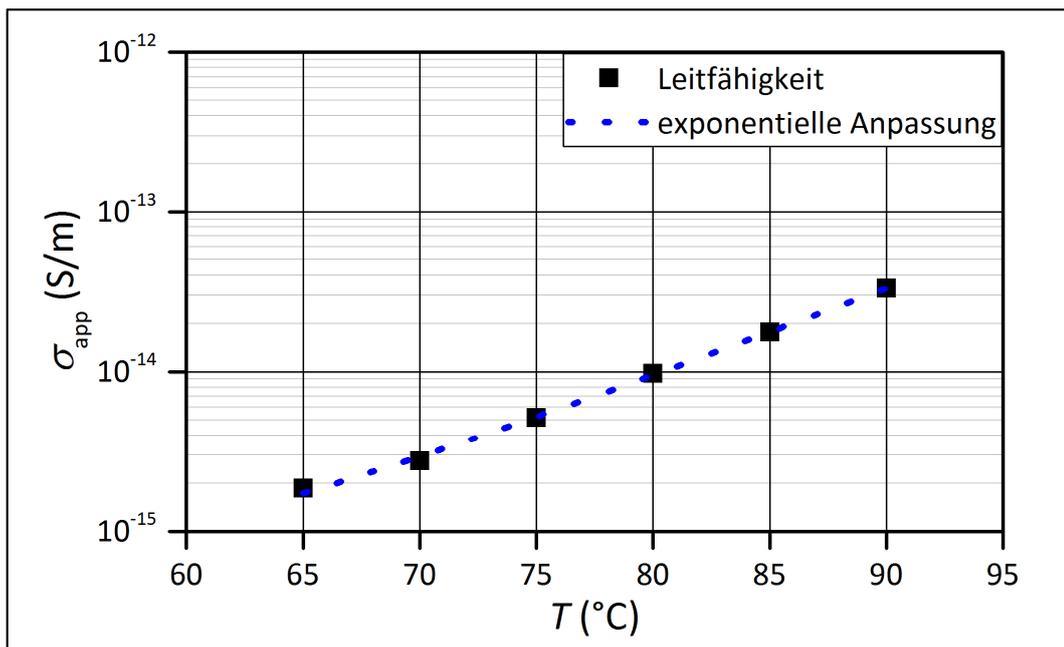


Abbildung 6.9-2: Endleitfähigkeiten eines luftimprägnierten Pressspans bei 1 kV/mm und verschiedenen Temperaturen, gemessen und exponentiell angenähert

Die beste Übereinstimmung mit den Messpunkten ergibt sich für einen exponentiellen Anstieg der Leitfähigkeit mit der Temperatur. Somit liegt es nahe, die Abhängigkeit der scheinbaren Leitfähigkeit mit Hilfe des Arrhenius-Gesetzes zu beschreiben:

$$\sigma_{DC} \sim e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T}} \quad (6.9-1)$$

Die weiteren Größen in der Gleichung sind die Aktivierungsenergie E_A , die Boltzmann-Konstante k_B sowie die Temperatur T in Kelvin. Die Aktivierungsenergie E_A ist ein Maß für die mittlere Energie, die ein "eingefrorener" (lokalisierter) Ladungsträger braucht, um zum Ladungstransport beizutragen. Je höher die Temperatur T ist, umso mehr Ladungsträger tragen zum Transport bei.

Anmerkung: Die Aktivierungsenergie ist theoretisch ebenfalls von der Temperatur abhängig. Allerdings kann diese Abhängigkeit im Temperaturbereich, der in dieser Arbeit betrachtet wird, vernachlässigt werden.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Aktivierungsenergie war wie folgt:

1. Messung der Stromendwerte für zwei unterschiedliche Temperaturen T_1, T_2
 $\rightarrow i_1, i_2$
2. Berechnung der Leitfähigkeiten aus den Stromendwerten gemäß Gleichung (4.1-2)
 $\rightarrow \sigma_1, \sigma_2$
3. Heranziehen des Arrhenius-Gesetzes: $\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T_1}}$, wobei σ_0 eine Bezugsleitfähigkeit darstellt.
4. Aufstellen eines Gleichungssystems mit den zwei Unbekannten σ_0 und E_A :

$$\text{I.: } \sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T_1}}$$

$$\text{II.: } \sigma_2 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T_2}}$$

5. Lösen des Gleichungssystems:

$$\text{III.: } \sigma_0 = \sigma_2 \cdot e^{+\frac{E_A}{k_B \cdot T_2}}$$

$$\text{VI.: } \sigma_1 = \sigma_2 \cdot e^{+\frac{E_A}{k_B \cdot T_2}} \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T_1}} = \sigma_2 \cdot e^{+\frac{E_A}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} = \sigma_2 \cdot e^{+\frac{E_A}{k_B} \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2}\right)}$$

$$\text{VII.: } E_A = k_B \cdot \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \quad (6.9-2)$$

Die Aktivierungsenergie für luftimprägnierten Pressspan wurde im Rahmen dieser Arbeit mehrfach berechnet. Die Werte liegen im Bereich $1,28 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$ und sind damit in sehr guter Genauigkeit bestimmt. In der Literatur finden sich kaum Werte der Aktivierungsenergie von reinen Fasern. Baxter [98] gibt eine Abschätzung aus dem Bereich der Textilindustrie an, in dessen Rahmen (1,1 eV - 1,35 eV je nach Wasseraufnahmevermögen) sich auch die hier ermittelte Aktivierungsenergie von 1,28 eV befindet. Die Aktivierungsenergie ist für alle betrachteten Pressspantypen gleich und besitzt kaum bis keine Abhängigkeit von der angelegten elektrischen Feldstärke.

Des Weiteren wurde die Aktivierungsenergie des ölimprägnierten Pressspans bestimmt. Sie liegt im Bereich $0,9 \text{ eV} \pm 0,05 \text{ eV}$ und ist damit kleiner als die Aktivierungsenergie von luftimprägniertem Pressspan. Ähnliche Werte werden für Öl-Papier- oder Öl-Pressspan-Isoliertsysteme in der Literatur angegeben [61], [97], [99]. Diese Differenz zum luftimprägnierten Pressspan ist dem Einfluss des Öls und damit der Ionenleitung geschuldet. Der hier gemessene Einfluss der Temperatur kam sowohl aufgrund der Änderungen im Öl, weil Ionenbeweglichkeit und Dissoziation mit der Temperatur zunehmen, als auch aufgrund der

thermisch aktivierten Leitungsprozessen in den Fasern (Aktivierungsenergie von circa 1,28 eV, siehe oben) zustande.

6.9.2 Modellbildung und Simulation des Temperaturverhaltens

Im Folgenden wurde das RC-Netzwerkmodell aus Kapitel 2.4.3 herangezogen. In erster Näherung werden die Kapazitäten C_i durch die Geometrie der Anordnung (Elektrodenfläche, Prüflingsdicke, relative Permittivität des Materials) bestimmt. Die Widerstände R_i hängen über ihre spezifischen Widerstände bzw. ihre Leitfähigkeiten mit der Temperatur zusammen.

Zink [97] bestimmte für eine Durchführung mit Öl-Papier-Dielektrikum aus einem bestehenden Netzwerkmodell für T_1 ein neues RC-Netzwerkmodell für eine Temperatur T_2 , in dem alle Kapazitäten des Netzwerkmodells unverändert blieben und alle Widerstände nach dem Arrhenius-Gesetz in Werte bei T_2 umgerechnet wurden. Dieses Verfahren wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf das Isoliersystem aus ölprägniertem Pressspan angewandt.

Die Vorgehensweise war wie folgt:

1. PDC-Messung bei Temperatur T_1
2. Erzeugung der Ersatzschaltbildwerte (C_i, R_i) bei T_1 mittels Anpassungsalgorithmus des PDC-Analyzers
3. Umrechnung aller Widerstände im Ersatzschaltbild auf die Temperatur T_2 mittels Arrhenius-Gesetz ($E_A = 1,28$ eV), Kapazitäten bleiben gleich
4. Implementierung des neuen RC-Netzwerkmodells bei T_2 in ein Simulationstool
5. Vergleich der gemessenen Ströme bei T_2 mit den simulierten Stromkurven, die aus Netzwerkelementen erzeugt bei T_1 und umgerechnet auf T_2 entstanden sind

Für die in Abbildung 6.9-1 dargestellte Messreihe (luftprägnierter Pressspan, 1 kV/mm) wurden die Werte für ein RC-Netzwerkmodell für 90 °C erzeugt (Anpassungsalgorithmus). Anschließend wurden alle Widerstände mittels Arrhenius-Gesetz umgerechnet und zusammen mit den unveränderten Kapazitäten in ein Simulationstool importiert. Ein Vergleich der gemessenen und der simulierten Stromkurven für verschiedene Temperaturen ist in Abbildung 6.9-3 zu sehen. Hier stellen die durchgezogenen Linien die Messwerte und die gepunkteten Linien die Simulationen dar.

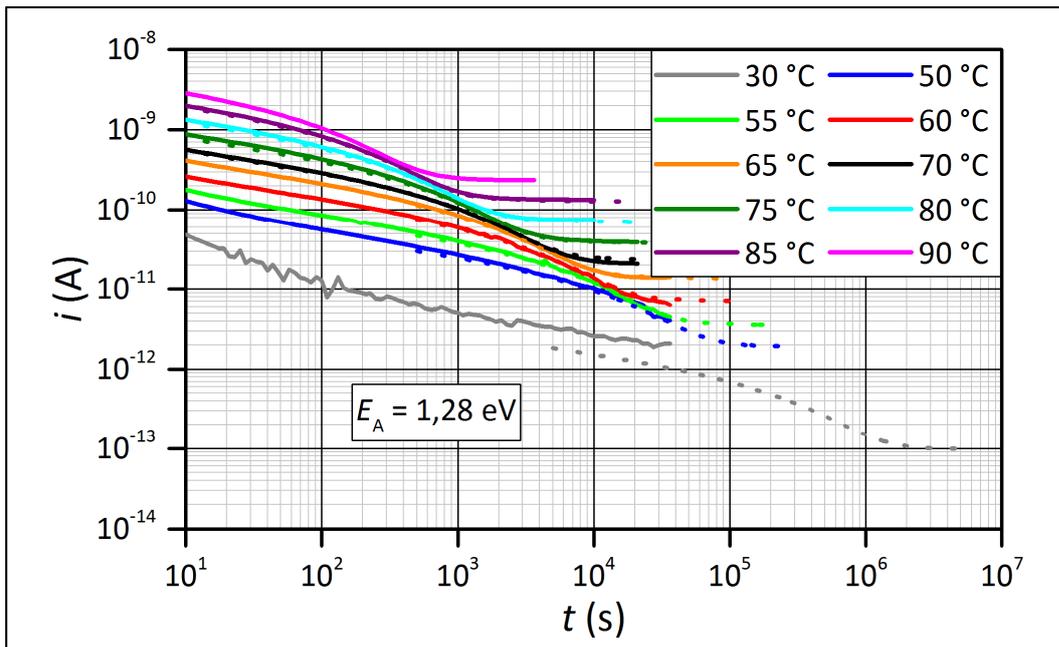


Abbildung 6.9-3: Vergleich von Messung (durchgezogene Linien) und Simulation (gepunktete Linien) bei luftimprägniertem Pressspan bei 1 kV/mm und verschiedenen Temperaturen

Wie Abbildung 6.9-3 zeigt, kommt es zu einer sehr guten Übereinstimmung von Messung und Simulation. Die kleine Abweichung bei 30 °C ist mit Messunsicherheiten an der Auflösungsgrenze des verwendeten PDC-Analyzers erklärbar. Folglich ist die Annahme, die Kapazitäten nicht zu ändern und alle Widerstände im RC-Netzwerk nach dem Arrhenius-Gesetz mit der Temperatur umzurechnen, für das Isoliersystem aus luftimprägniertem Pressspan gerechtfertigt. Dies wurde hiermit erstmals nachgewiesen.

Wenn die Temperatur von 90 °C aus verringert wird, zeigen die Kurven niedrigere Stromendwerte (höhere Widerstände). Da die Widerstände R_i mit sinkender Temperatur steigen und die Kapazitäten C_i konstant angenommen werden, ergeben sich größere Zeitkonstanten $\tau_i = R_i \cdot C_i$. Es muss deshalb für die Interpretation dieser simulierten Kurven beachtet werden, dass die Kurven bei 90 °C für kleinere Temperaturen zu längeren Zeiten und zu kleineren Strömen verschoben werden. Daher liefern die zu niedrigeren Temperaturen verschobenen Kurven keine Informationen über das Isoliersystem aus Pressspan in den ersten Sekunden [91]. Falls diese ersten Sekunden dennoch mitsimuliert werden, entstehen hier Näherungslösungen, die kaum Bezug zu den Messungen haben. Bei 90 °C werden keine Transitzeiten gemessen, die vor einer Sekunde relevant sind, nach der Verschiebung aber im Bereich von mehreren Sekunden sichtbar wären. Aus diesem Grund wurden die Simulationen nicht für kleine Zeiten durchgeführt.

Anmerkung: Es ist auch möglich, von Messungen bei tiefen Temperaturen rechnerisch auf Leitfähigkeiten bei höheren Temperaturen zu schließen. Dabei werden die Kurven unter anderem zu kleineren Zeiten verschoben. Dies ist jedoch bei der Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeit im Rahmen dieser Arbeit uninteressant, da Leitfähigkeiten erst bei stationären Zuständen und damit nach längeren Zeiten ermittelt werden können.

Diese postulierte Temperaturumrechnung kann man sich bei der Diagnostik der Betriebsmittel zunutze machen, beispielsweise wenn diese im Betrieb hohe Temperaturen aufweisen, die Diagnosemessungen aber nur bei tieferen Temperaturen durchgeführt werden können. Allerdings muss beachtet werden, dass sich das Gleichgewicht der Wassergehalte im Pressspan und im Öl temperaturabhängig einstellt. Außerdem muss die Gültigkeit der Temperaturumrechnung mittels Arrhenius-Gesetz gewährleistet sein. Dies wurde für das Isoliersystem aus imprägniertem Pressspan im Rahmen der vorliegenden Arbeit für Temperaturen zwischen 30 °C und 90 °C nachgewiesen.

Ein weiterer Vorteil der Temperaturumrechnung ist die Tatsache, dass bei hohen Temperaturen frühzeitig Endwerte erreicht werden, die zudem besser detektierbar sind. Bei tiefen Temperaturen wären Messzeiten von mehreren Tagen nötig, um stationäre Endwerte zu erhalten und es ist oftmals nicht möglich, diese stationären Endwerte aufgrund der sehr kleinen Ströme messtechnisch zu erfassen. Simulation bietet nun aber die Möglichkeit, aus einer Kurzzeitmessung bei hoher Temperatur rechnerisch auf einen stationären Endwert des Stromes und damit auf die Gleichstromleitfähigkeit bei niedrigerer Temperatur zu schließen. Dies wird besonders deutlich, wenn die Kurven bis 60 °C in Abbildung 6.9-3 betrachtet werden. Nach einer Messzeit von circa 12 Stunden (43200 s) ist bei 65 °C der Endwert gerade erreicht. Niedrigere Temperaturen sind in realistischer Messzeit kaum erfassbar.

Interessant ist außerdem der Vergleich zwischen Messung und Simulation bei 30 °C. Die Simulation zeigt deutlich, dass das verwendete Picoamperemeter bei Weitem nicht ausreicht, um eine Endleitfähigkeit bei 30 °C zu bestimmen. Der Stromendwert liegt im Bereich 0,1 pA. Es sei angemerkt, dass die kleine Abweichung zwischen Messung und Simulation (Abweichung circa 1 pA bei drei Stunden Messdauer) darauf zurückzuführen war, dass die Messung nur mit einer Genauigkeit von circa 1 pA durchgeführt werden konnte. Kleine Offsetströme bedingt durch den Messaufbau oder die verwendeten Messgeräte könnten die hier beobachtete Abweichung erklären [91].

Für ölimprägnierten Pressspan wurden Messungen zwischen 50 °C und 90 °C sowie eine Messung bei 30 °C durchgeführt. Die Feldstärke betrug 1 kV/mm. Ausgehend von den Messungen bei 90 °C wurden Simulationen bei anderen Temperaturen durchgeführt, indem alle Widerstände im RC-Netzwerkmodell mit Hilfe des Arrhenius-Gesetzes (Aktivierungsenergie 0,9 eV) umgerechnet wurden und alle Kapazitäten gleich blieben. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6.9-4.

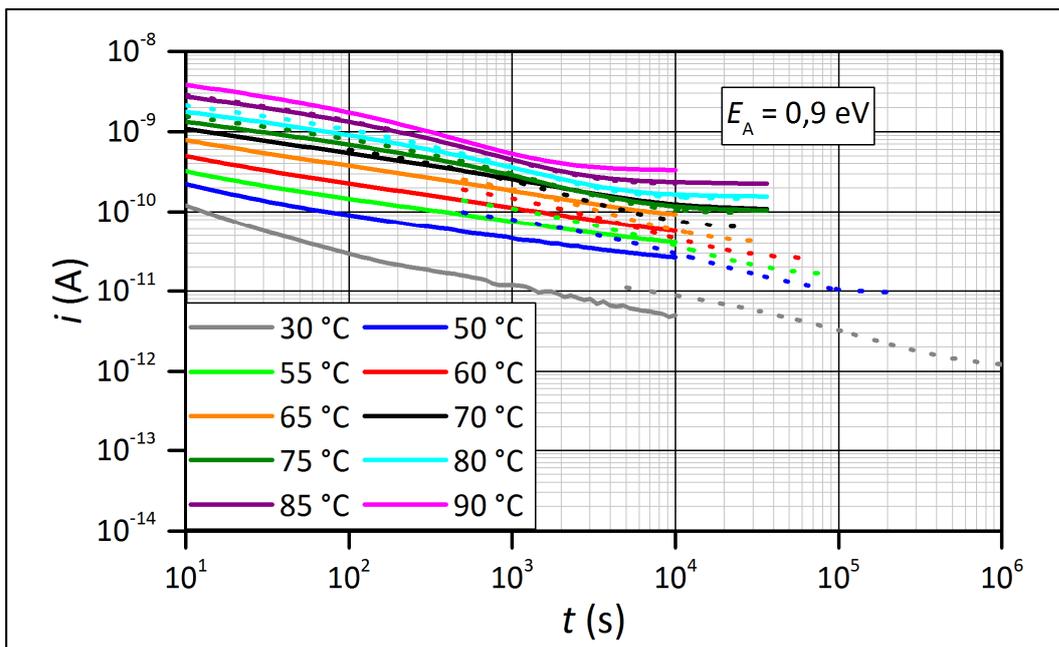


Abbildung 6.9-4: Vergleich von Messung (durchgezogene Linien, Rohdaten aus [100]) und Simulation (gepunktete Linien) bei ölprägniertem Pressspan bei 1 kV/mm und verschiedenen Temperaturen

Für die Temperaturen 75 °C bis 90 °C werden bereits Stromendwerte und damit Leitfähigkeiten gemessen. Für tiefere Temperaturen sind die Endwerte nur durch die Simulationen abschätzbar. Die Ströme würden demnach noch weiter abfallen, wenn deutlich länger gemessen würde.

Die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ist für hohe Temperaturen sehr gut. Die Messkurven bei 70 °C und 75 °C scheinen übereinander zu liegen. Diese Überlagerung könnte damit erklärt werden, dass die stationäre Temperatur bei 70 °C nicht erreicht war, als die Messung gestartet wurde. Diese Messung wird deshalb als Messfehler gewertet. Die Simulation zeigt, dass die Stromkurve für 70 °C deutlich tiefer liegen müsste. Somit ist eine Plausibilitätskontrolle der empirisch ermittelten Messwerte mit Hilfe von Simulationen möglich.

Anmerkung: Diese Simulationen wurden auch für die Messwerte bei einer Feldstärke von 10 kV/mm durchgeführt. Dabei zeigte sich eine ähnliche Übereinstimmung der Kurvenverläufe sowie der Stromendwerte zwischen Messung und Simulation wie bei 1 kV/mm. Deshalb werden diese Daten nicht präsentiert.

Die unterschiedlichen Aktivierungsenergien von luftprägniertem (0,9 eV) und ölprägniertem (1,28 eV) Pressspan müssen näher betrachtet werden. Die Aktivierungsenergie E_A beschreibt die mittlere Energie, die ein Ladungsträger braucht, um zum Ladungstransport beizutragen. Somit wird aus den Simulationen geschlossen, dass die einzubringende Energie für ölprägnierten Pressspan geringer ist. Die relevanten Leitungsprozesse unterscheiden sich jedoch und werden hier nochmals aufgegriffen und im Bezug zur Aktivierungsenergie interpretiert.

Im ölimprägnierten Pressspan driften Ionen aufgrund des angelegten elektrischen Feldes zu den Gegenelektroden bzw. bis zur nächsten Barriere (Pressspanfaser). Dort häufen sie sich an und verschieben Ladungsträger auf bzw. in der Faser, die dann dort weiter transportiert werden. Es sind mehrere Transportprozesse relevant, nämlich der Transport im Öl und der im Pressspan, welche jeweils unterschiedliche Aktivierungsenergien besitzen. Für luftimprägnierten Pressspan fehlt dieser Transport durch das Porenvolumen, da Luft eine sehr geringe Leitfähigkeit besitzt. Es ist nur ein dominierender Transportprozess mit einer dazugehörigen Aktivierungsenergie relevant. Die Aktivierungsenergie von Öl wurde im Rahmen dieser Arbeit zu Werten zwischen 0,45 eV und 0,65 eV (je nach Ölsorte und Ölzustand) bestimmt. Sie liegt demzufolge deutlich niedriger als die Aktivierungsenergie von Pressspan (öl- und luftimprägniert). Die relativ große Schwankungsbreite der Aktivierungsenergie von Öl ist einerseits darauf zurückzuführen, dass jede Ölsorte andere chemische Zusammensetzungen hat, sich jedes Gebinde leicht unterschiedlich verhalten kann, und andererseits einige Ölsorten Alterungseffekte auch schon bei 90 °C zeigen. Somit ist erklärt, warum die Aktivierungsenergie von ölimprägniertem Pressspan zwischen den Aktivierungsenergien von Öl und von luftimprägniertem Pressspan liegt.

6.10 Einfluss der Feldstärke

In Kapitel 6.7.3 wurden Messungen unter Luft bei 30 °C, 50 °C und 90 °C für die beiden Feldstärken 0,1 kV/mm und 1 kV/mm durchgeführt. Bei 30 °C und 50 °C konnte keine Feldstärkeabhängigkeit beobachtet werden. Bei 90 °C hingegen zeigte sich eine Abhängigkeit. Zur Klärung dieser Beobachtung wurden Messungen an einem luftimprägnierten Pressspan bei 90 °C durchgeführt. Hierbei wurden Feldstärken zwischen 0,1 kV/mm und 1 kV/mm in Schritten von 0,1 kV/mm variiert. Die Messergebnisse befinden sich in Abbildung 6.10-1.

Anschließend wurde für jede Feldstärke mittels des Anpassungsalgorithmus des PDC-Analyzers ein RC-Netzwerkmodell nach Kapitel 2.4.3 aufgestellt. Alle Widerstände dieser Netzwerkmodelle wurden dann nach dem Arrhenius-Gesetz auf die Temperatur von 50 °C umgerechnet, wobei sich auch hier zeigte, dass die in Kapitel 6.9.2 ermittelte Aktivierungsenergie von 1,28 eV für luftimprägnierten Pressspan die beste Übereinstimmung von Messung und Simulation ergibt.

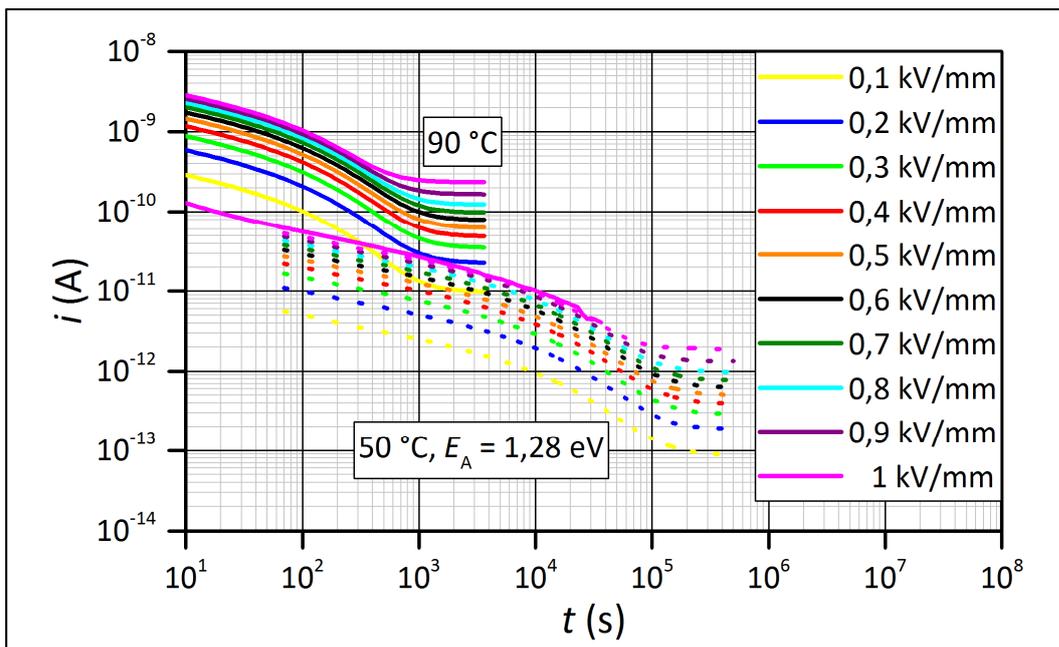


Abbildung 6.10-1: Vergleich von Messung bei 90 °C (durchgezogene Linien) und Simulation bei 50 °C (gepunktete Linien) bei luftimprägniertem Pressspan und verschiedenen Feldstärken

Wenn nun scheinbare Leitfähigkeiten aus den gemessenen und simulierten Stromkurven berechnet werden, ergibt sich Abbildung 6.10-2.

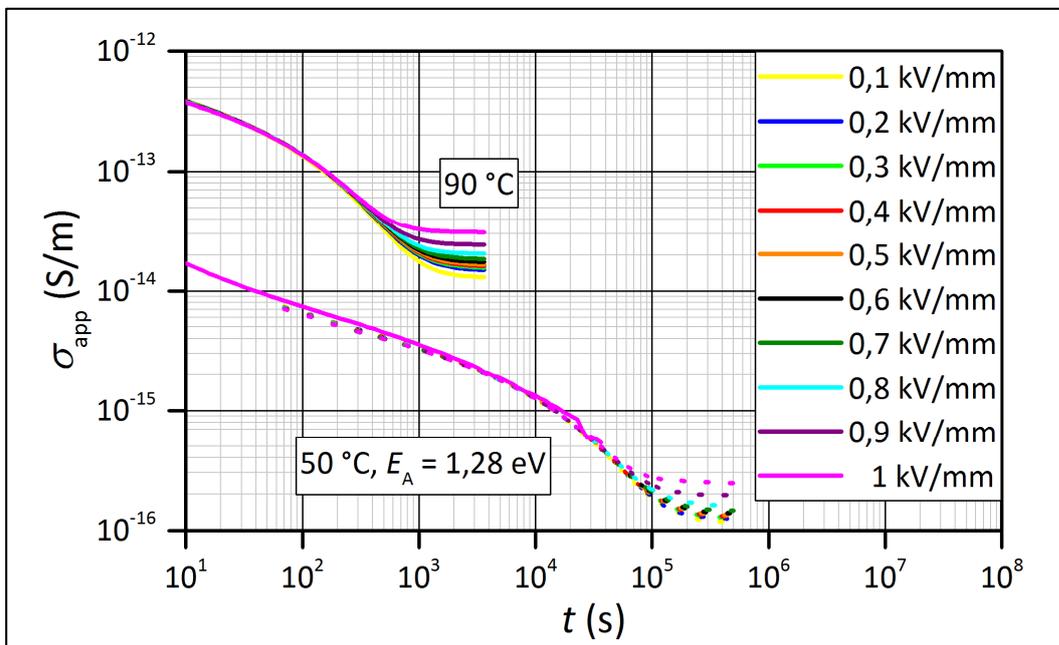


Abbildung 6.10-2: Scheinbare Leitfähigkeiten von luftimprägniertem Pressspan bei 50 °C und 90 °C bei verschiedenen Feldstärken

Die scheinbaren Leitfähigkeiten sind bei 90 °C für die ersten 400 s identisch. Somit zeigt der Prüfling für diese Feldstärken das gleiche Polarisationsverhalten und damit die gleichen Polarisationsmechanismen. Ebenso sind die Kurven für die ersten 60000 s bei 50 °C

identisch. Danach ist eine Feldstärkeabhängigkeit sichtbar. Wird für 50 °C allerdings eine Messzeit kleiner als 60000 s gewählt, so ist die Feldstärkeabhängigkeit nicht in den Kurven erkennbar und kann zum falschen Schluss einer von der Feldstärke unabhängigen Leitfähigkeit führen. Bis zu dieser Messzeit wird bei 50 °C noch Polarisation mitgemessen und der Unterschied in der Leitfähigkeit ist noch nicht separierbar. Erst bei deutlich längerer Messzeit wäre die Polarisation abgeklungen und die Leitfähigkeitsendwerte wären messbar. Diese sind, wie die Simulationen in Abbildung 6.10-2 zeigen, feldstärkeabhängig. Je höher die Feldstärke ist, desto höher ist die Endleitfähigkeit. Der Strom steigt folglich nicht mehr linear mit der Spannung und der Pressspan verhält sich nicht mehr linear.

Luftimprägnierter Pressspan scheint demnach eine Feldstärkeabhängigkeit zu zeigen und zwar nicht nur für die messtechnisch erfassten Endwerte bei 90 °C, sondern auch für tiefere Temperaturen (in Abbildung 6.10-2: 50 °C), da die simulierten Kurven bei 50 °C gut mit den Messkurven übereinstimmen.

Zur besseren Interpretation sind in Abbildung 6.10-3 die Endwerte der Ströme bei 90 °C über der angelegten Spannung aufgetragen. Neben den Messdaten sind verschiedene Anpassungsfunktionen eingetragen. Der Verlauf des Stroms über der Spannung bzw. Feldstärke (Dicke 1 mm) scheint auf den ersten Blick exponentiell zu sein, weshalb eine exponentielle Anpassung durchgeführt wird (rote Kurve). Diese ergibt jedoch bei genauerer Betrachtung die Feldstärke- bzw. Spannungsabhängigkeit nur ungenügend wieder.

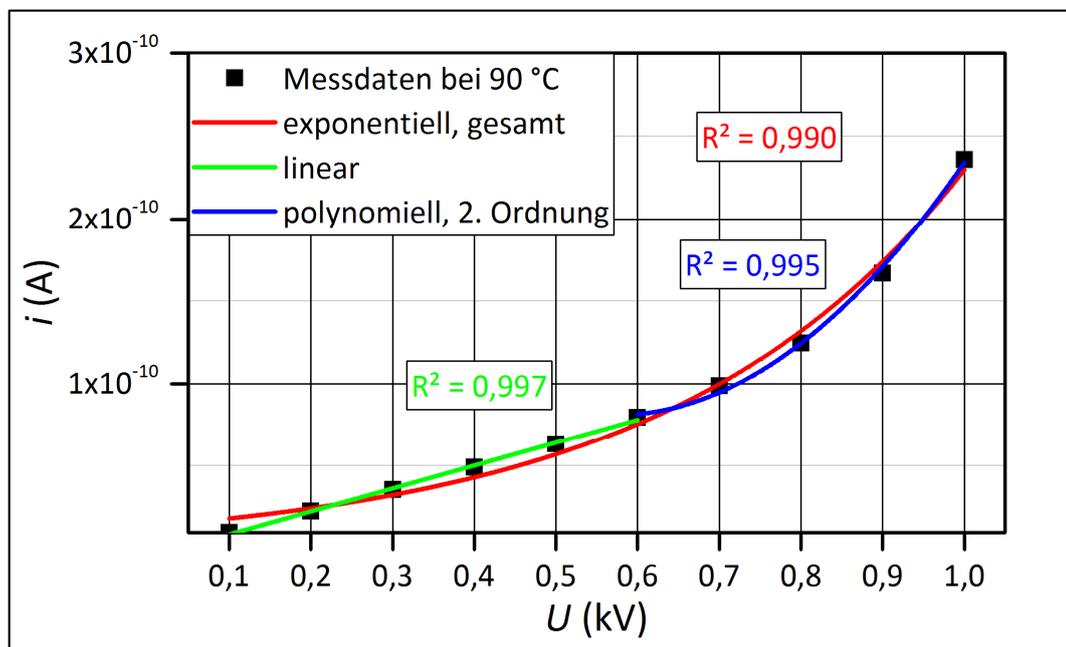


Abbildung 6.10-3: DC-Ströme von luftimprägniertem Pressspan bei 90 °C für unterschiedliche Spannungen, lineare Skalierung, Messung und Anpassungsfunktionen

In Abbildung 6.10-3 scheint sich die Feldstärkeabhängigkeit des Gleichstroms bei Spannungen zwischen 0,5 kV und 0,7 kV zu ändern. Für kleine Spannungen bis etwa 0,6 kV ist eine lineare Approximation der gemessenen Stromendwerte zufriedenstellend möglich

(grüne Kurve). Ab einer Spannung von circa 0,6 kV wird die Abhängigkeit stärker. Dieser Tatsache wird Rechnung getragen, indem ab dieser Spannung bzw. Feldstärke eine Approximation mittels eines Polynoms 2. Ordnung verwendet wird (blaue Kurve). Bei der Betrachtung der Abweichung der Approximation von den Messdaten fällt auf, dass die Anpassung mit polynomieller Anpassungsfunktion auch besser mit den Messpunkten übereinstimmt als bei einer exponentiellen Näherung.

Für kleine Feldstärken zeigt sich folglich ein lineares Verhalten des Stroms mit der Spannung und damit keine Feldstärkeabhängigkeit der Leitfähigkeit. Es handelt sich hier um den ohmschen Bereich:

$$i \sim U \quad (6.10-1)$$

Um einen Ladungstransport zu detektieren, müssen Ladungsträger sowohl durch den Pressspan transportiert werden, als auch aus den Elektroden austreten bzw. in die Elektroden übergehen können (Injektion). Sowohl Transportprozesse durch das Isolierstoffvolumen als auch Injektionsprozesse können das limitierende Element des Stromtransports sein.

Ist die angelegte Spannung klein, dann kann an den Elektroden nur eine begrenzte Anzahl an Elektronen von der Elektrode in das Material übergehen bzw. von der Elektrode aufgenommen werden. Allerdings stehen aufgrund des wenig leitfähigen Isoliermaterials Pressspan (trockener Zustand) auch nur relativ wenige Ladungsträger zur Verfügung. Die an den Elektroden ankommenden Ladungsträger können mit injizierten Ladungsträgern rekombinieren. Dies ist schematisch in Abbildung 6.10-4 dargestellt. Dort sind zur Vereinfachung nur die Verhältnisse an der Kathode dargestellt.

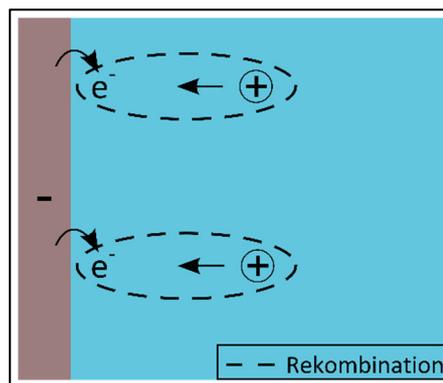


Abbildung 6.10-4: Rekombination von Ladungsträgern im trockenen Pressspan bei kleinen Feldstärken

Wird die Spannung weiter erhöht, werden auch mehr Ladungsträger an der Elektrode injiziert. Die Anzahl an injizierten Ladungsträgern kann die Anzahl der an der Elektrode ankommenden Ladungsträger, welche durch den trockenen Pressspan transportiert wurden, überschreiten. Es bildet sich aufgrund des Überschusses an injizierten Ladungsträgern eine Raumladungszone mit gleichnamigen Ladungsträgern (homocharges) [101]. Die Verhältnisse zeigt Abbildung 6.10-5.

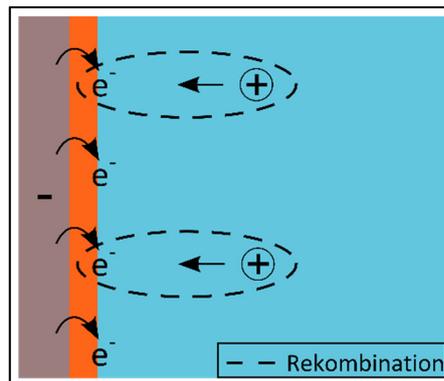


Abbildung 6.10-5: Rekombination von Ladungsträgern im trockenen Pressspan und Ausbildung einer Raumladungszone mit gleichnamigen Ladungsträgern (homocharges) bei großen Feldstärken

Die Raumladung, die sich im Isolierstoff anhäuft, verringert das elektrische Feld vor der Elektrode, sodass der Injektionsstrom wieder abnimmt und damit nicht beliebig viele Ladungsträger injiziert werden [101]. Es entsteht ein neues Gleichgewicht.

Bei hohen Feldstärken handelt es sich hier um den raumladungsbegrenzten Transport von Ladungsträgern (englisch: Space Charge Limited Current, SCLC). Der Strom ist gemäß dem Gesetz von Child bzw. dem Child-Langmuir-Gesetz proportional zum Quadrat der angelegten Spannung und die Leitfähigkeit würde sich somit linear mit der angelegten Spannung ändern:

$$i \sim U^2 \quad (6.10-2)$$

Der Übergang vom linearen (ohmschen) Verhalten zur quadratischen Abhängigkeit des Stroms von der Spannung geschieht ab dem Punkt, an dem die injizierte Ladungsträgerdichte die intrinsische Ladungsträgerdichte übersteigt [51], [102]. Die ohmsche Abhängigkeit des Stroms von der angelegten Spannung für kleine Spannungen und die quadratische Abhängigkeit für große Spannungen finden sich in der Literatur beispielsweise für niederdichtes Polyethylen (englisch: Low Density Polyethylen, LDPE) [103].

Bei ölprägniertem Pressspan ist das System noch komplizierter als bei luftprägniertem Pressspan. Im Öl werden Ladungsträger durch Dissoziation im Ölvolumen und durch Injektion an den Elektroden erzeugt (siehe Kapitel 2.2.2). Ionenleitung kommt hinzu. Das führt zu einem System aus zwei völlig unterschiedlichen Materialien (Pressspan und Öl), die unterschiedliche Transportprozesse aufweisen, die noch dazu miteinander interagieren (siehe Kapitel 6.6). Die exakte, analytische Beschreibung dieses komplexen Systems aufgrund physikalischer Theorien ist daher schwierig. Öl weist außerdem eine charakteristische Feldstärkeabhängigkeit auf [31], [34]: Für kleine Feldstärken werden die erzeugten Ladungsträger aufgrund des elektrischen Feldes zu den Gegenelektroden transportiert und die Ladungsträger sammeln sich dort in Raumladungszonen an [35]. Diese werden nun als heterocharges bezeichnet. Es stellt sich ein neues Gleichgewicht zwischen Generation und Rekombination von Ladungsträgern ein und die Leitfähigkeit hat ihren kleinsten Wert

erreicht. Ab einer bestimmten Feldstärke werden mehr Ladungsträger erzeugt, als abgezogen werden können, und es stellt sich ein neues Gleichgewicht auf höherem Leitfähigkeitsniveau ein.

Hinzu kommt, dass das Öl aufgrund der im Vergleich zu Pressspan höheren Leitfähigkeit das elektrische Feld bei einer Gleichspannungsbelastung vom Öl in die Faser drängt. Die Faser wird folglich stärker belastet und das Öl entlastet. Eine Entlastung des Öls führt allerdings wie beschrieben zu einem Leitfähigkeitsanstieg des Öls. Je nach Volumenverhältnis Öl zu Faser, abhängig von der Pressspandichte, und je nach geometrischer Anordnung werden die Fasern in unterschiedlicher Höhe stärker belastet und das Öl entlastet. Die zeitliche Änderung der Feldbelastung führt dazu, dass das System aus Öl und Pressspan nicht mehr durch eine einfache Überlagerung der Verhältnisse im Öl und im Pressspan beschrieben werden kann (siehe Kapitel 6.6).

In Abbildung 6.10-6 sind die DC-Ströme durch einen Pressspan imprägniert mit vier verschiedenen Ölsorten über der angelegten Spannung dargestellt. Es sind nur Ströme bei 90 °C ausgewertet, um zu gewährleisten, dass alle Polarisationsvorgänge abgeschlossen sind und die Ströme nur noch von den Leitfähigkeiten bestimmt werden. Die Ölsorten sind:

a) Nynas Nytro Lyra X (LX)

b) Nynas Nytro 4000A (4A)

c) Nynas 10X (NX)

d) Shell Diala S4 ZX-I (S4)

Es ist in erster Näherung aufgrund der Spannungsabhängigkeit der Fasern (siehe Abbildung 6.10-3) nicht mehr von einer ohmschen, sondern von einer polynomiellen Abhängigkeit des Stroms von der Spannung zu rechnen.

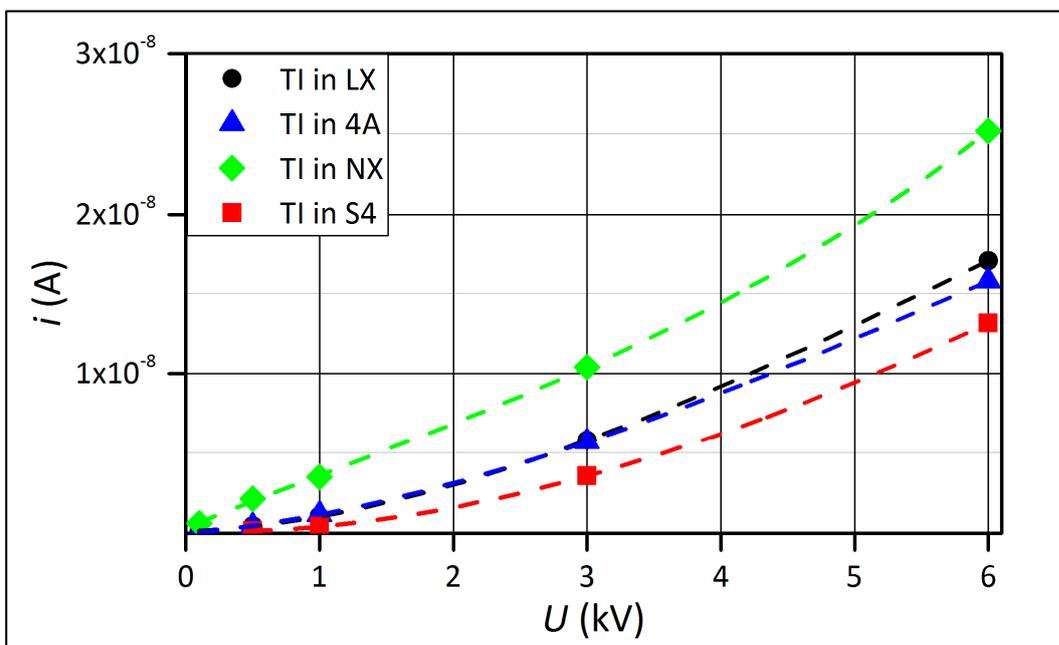


Abbildung 6.10-6: DC-Ströme von ölprägniertem Pressspan bei 90 °C für unterschiedliche Spannungen und mit polynomieller Anpassungsfunktion 2. Grades, lineare Skalierung der Achsen

Eine Anpassung der Messpunkte mit einem Polynom 2. Grades zeigt die beste Übereinstimmung mit den Messdaten. Auch hier scheint es sich um den raumladungsbegrenzten Transport zu handeln, da der Strom proportional zum Quadrat der angelegten Spannung ist (Gesetz von Child). Im betrachteten Spannungsbereich ist ein ohmscher Bereich nicht mehr zu erkennen. Vorstellbar wäre es, dass sich zum einen durch die geänderte Feldverteilung im Vergleich zu luftimprägniertem Pressspan Raumladungen bereits bei niedrigeren Feldstärken ausbilden. Zum anderen würden auch akkumulierte Ladungsträger im Öl, welche an den Elektroden nicht effektiv entladen werden können, zu dem in Abbildung 6.10-6 dargestellten Verhalten führen.

Diese Feldstärkeabhängigkeit (bzw. Spannungsabhängigkeit) des ölprägnierten Pressspans ist für alle vier Ölsorten ersichtlich. Die Ölleitfähigkeit erhöht die Leitfähigkeit des Gesamtsystems und damit den gemessenen Strom. Das Verhältnis von Ölleitfähigkeit zur Pressspanleitfähigkeit ist ein Maß für die Feldverdrängung. Die Leitfähigkeit des Öls liegt in der Regel über der Leitfähigkeit des Pressspans, sodass die Ölkanäle kurz nach dem Anlegen eines elektrischen Feldes stärker belastet werden und sich im stationären Zustand nahezu die gesamte Feldbelastung im Pressspan wiederfindet. Bezogen auf die in Abbildung 6.10-6 dargestellten Stromendwerte wird der Pressspan je nach Ölleitfähigkeit und damit je nach Ölsorte unterschiedlich stark belastet und das Öl unterschiedlich stark entlastet. Das Zusammenspiel von feldstärkeabhängiger Ölleitfähigkeit und der Feldstärkeabhängigkeit von Pressspan führt letztlich zu einem nichtlinearen Verhalten der Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan. Deshalb sind die Anpassungsfunktionen für die vier ölprägnierten Pressspanproben in Abbildung 6.10-6 nicht exakt parallelverschoben.

Anmerkung: Die Feldstärkeabhängigkeit von ölprägniertem Pressspan ist beispielsweise deutlich geringer als die Temperaturabhängigkeit, welche in Kapitel 6.9 betrachtet wurde. Dies muss bei der Auslegung von Isoliersystemen beachtet werden.

In Abbildung 6.10-7 sind die Leitfähigkeiten von Pressspan imprägniert mit verschiedenen Ölsorten bei 90 °C, nach 10800 s und bei unterschiedlichen Feldstärken dargestellt. Das Isolieröl Nynas 10X (NX) bewirkt bei Imprägnierung eines Pressspans eine nahezu badewannenförmige Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Spannung. Dieses Verhalten ist dem Öl zuzuschreiben, bei dem diese sogenannte Badewannenkurve bekannt ist [31], [34]. Da das Öl bei einer Gleichspannungsbelastung mit einer sehr geringen Spannung belastet wird, ist die Ölleitfähigkeit relativ groß. Dies kann den Verlauf in Abbildung 6.10-7 erklären. Das Öl Nynas 10X hat die höchste Leitfähigkeit von den hier verwendeten Isolierölen und mit diesem Öl imprägnierter Pressspan zeigt die höchste Leitfähigkeit unter den hier untersuchten ölprägnierten Pressspanproben. Der Pressspanprüfling imprägniert mit Nynas Lyra X (LX) zeigt eine leichte Badewannenkurve. Diese Abhängigkeit ist bei Imprägnierung mit Shell Diala S4 ZX-I (S4) und Nynas Nytro 4000A (4A) nicht mehr zu sehen. Hier steigen die Leitfähigkeiten der ölprägnierten Pressspanprüflinge in etwa linear mit der angelegten Feldstärke. Die Leitfähigkeit dieser beiden hochohmigen Ölsorten liegt am nächsten an der

Leitfähigkeit des unimprägnierten Pressspans (vergleiche Kapitel 6.3). Folglich ist im stationären Zustand die Feldverdrängung vom Öl in den Pressspan geringer und die Ölleitfähigkeit steigt aufgrund der weniger stark entlasteten Ölkanäle nicht so deutlich an wie bei Imprägnierung mit Nynas 10X oder Nynas Lyra X.

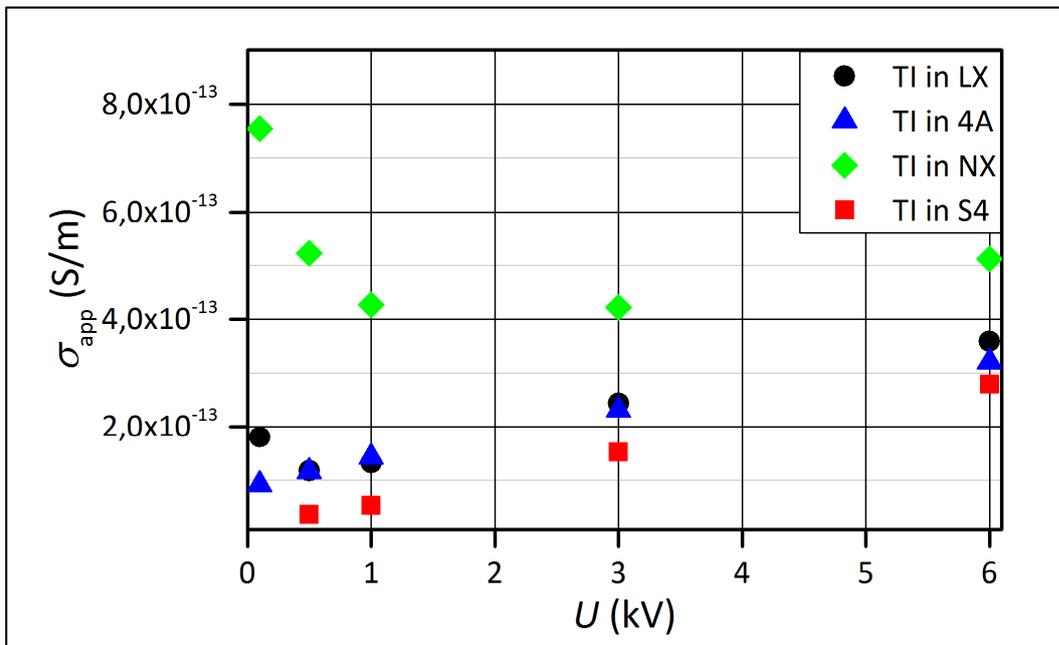


Abbildung 6.10-7: Leitfähigkeiten von ölprägniertem Pressspan bei 90 °C für unterschiedliche Spannungen, lineare Skalierung

Durch diese Untersuchungen wurde gezeigt, dass das System aus Öl und Pressspanfasern analytisch schwer zu beschreiben ist, da es keine lineare Abhängigkeit der Leitfähigkeit mit der Feldstärke gibt, was aus den polynomiellen Anpassungsfunktionen der Ströme in Abbildung 6.10-6 gefolgert werden kann. Das Gesetz nach Child, welches den raumladungsbegrenzten Transport beschreibt, ist nicht imstande, das komplexe System aus Ladungstransport im Feststoff, Injektion von Ladungsträgern in den Feststoff, Injektion von Ladungsträgern ins Öl, Dissoziation von (geladenen) Molekülen im Öl und Ionendrift durch das Öl ausreichend genau zu beschreiben. Diese Beschreibung funktioniert nur für den luftimprägnierten Pressspan, da die Ladungsträger in erster Näherung lediglich durch den Feststoff transportiert werden und kein weiterer Ladungstransport durch die Luft auftritt. Beim luftimprägnierten Pressspan ist für kleine Feldstärken keine Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Feldstärke ersichtlich und diese wird für größere Feldstärken wie vorhergesagt zu einer linearen Abhängigkeit.

7 Zusammenfassung, Folgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde Pressspan als Isoliermedium für HGÜ-Betriebsmittel optisch, mechanisch, chemisch und elektrisch charakterisiert. Die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan hängen im Wesentlichen vom Aufbau aus Fasern und Imprägniermolekülen, von der geometrischen Lage der Fasern, von den chemischen Bestandteilen, von den Herstellungsparametern, vom Imprägniermedium und von den anwendungstechnischen Parametern wie Wassergehalt, Temperatur und Feldstärke ab. Um den Pressspan korrekt zu beschreiben, wurden deshalb verschiedene Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse quantitativ in Abbildung 7-1 zusammengefasst sind. Dort werden Faktoren für jede Einflussgröße dargestellt, die das maximale Verhältnis zwischen größter und kleinster Leitfähigkeit quantifizieren. Zur Bestimmung der scheinbaren Leitfähigkeit und des dielektrischen Verhaltens wurden Sprungantwortmessungen im Zeitbereich (PDC-Methode) herangezogen. Hierbei wurden exponentiell abfallende Ströme erfasst, welche anschließend in scheinbare Leitfähigkeiten umgerechnet wurden.

Einfluss der Imprägnierung

Pressspan wird in HGÜ-Betriebsmitteln hauptsächlich ölimprägniert eingesetzt. Zur Separierung des Materialverhaltens von Pressspan und des Verhaltens des Imprägniermediums entstand im Rahmen dieser Arbeit ein neuer, hermetisch geschlossener Versuchsstand, mit dessen Hilfe es möglich wurde, die Leitfähigkeit von Pressspan unter verschiedenen Fluiden und Parametern zu untersuchen. Als imprägnierende Fluide wurden Vakuum bei 0,1 mbar und getrocknete Luft bei atmosphärischem Druck (circa 1 bar) sowie verschiedene Ölsorten gewählt. Es zeigten sich keine Unterschiede der Leitfähigkeiten von Pressspan gemessen unter Vakuum und unter atmosphärischem Druck. Folglich konnten die PDC-Messungen dahingehend vereinfacht werden, dass bei Umgebungsluftdruck gemessen und die Beschränkung der angelegten Spannung auf kleine Werte bei kleinen Drücken (siehe Gesetz von Paschen) umgangen werden konnten.

Die Messungen unter Luftimprägnierung zeigten bei 30 °C Ströme, die nach wenigen hundert Sekunden unter die detektierbaren Werte (Auflösungsgrenze des Strommessgeräts) abgesunken waren. Aus diesem Grund wurden Messungen bei erhöhten Temperaturen und erhöhten elektrischen Feldstärken durchgeführt. Ein ausgeprägtes Polarisationsverhalten des luftimprägnierten Pressspans wurde ersichtlich, welches im betrachteten Zeitbereich hauptsächlich von Grenzflächenpolarisation bestimmt ist. Der Leitfähigkeitsanteil des gemessenen Stromes lag häufig um mehrere Größenordnungen unter den Stromanfangswerten.

Einfluss der Faserorientierung

Eine Vorstellung der Geometrieverhältnisse der Fasern und Hohlräume im Pressspan ist essentiell für ein tief gehendes, physikalisches Verständnis der Polarisationsmechanismen und Leitungsprozesse im Pressspan und dient der Identifizierung potenzieller Wege des Ladungstransports. Zu diesem Zweck wurden der Herstellungsprozess von Pressspan näher betrachtet und Aufnahmen von Pressspan mit dem Rasterelektronenmikroskop erstellt.

Dabei zeigte sich, dass Einzelfasern zu Layern geschichtet und mehrere Layer verpresst werden, um die gewünschte Pressspandicke zu erhalten. Die Fasern hatten aufgrund des kollabierten Lumens einen nahezu elliptischen Querschnitt und waren teilweise verdrillt. Die beiden Halbachsen waren $8\ \mu\text{m}$ und $30\ \mu\text{m}$ lang, wohingegen die Faserlänge bis zu einigen Millimetern betrug. Innerhalb eines Layers lagen die Fasern nahezu gleichmäßig in der Ebene verteilt. Der Einfluss der geometrischen Ausrichtung der Fasern auf die Leitfähigkeit von Pressspan wurde im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmt. Hierzu wurden Prüflinge mit unterschiedlicher Faserorientierung untersucht und Leitfähigkeiten ermittelt.

Das Polarisationsverhalten bei den Messungen entlang der Layer und senkrecht zu den Layern war nahezu identisch. Es werden Dipole im Pressspan ausgerichtet und Grenzflächen geladen, beispielsweise wenn sich Faserwiderstände oder Übergangswiderstände im Volumen des Pressspans ändern und sich deshalb Ladungen an Engstellen anhäufen. Die Leitfähigkeit entlang eines Layers bei $50\ ^\circ\text{C}$ lag um den Faktor 3 über der Leitfähigkeit, die senkrecht zu den Layern gemessen wurde. Der Strompfad wird folglich von der Faserorientierung bestimmt und beeinflusst. Es kommt je nach geometrischer Ausrichtung der Fasern zu unterschiedlichen Transportwegen der Ladungsträger. Da das Isoliersystem im Transformator nicht nur senkrecht zu den Layern sondern je nach Konstruktion unter einem bestimmten Winkel beansprucht wird, ist der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Einfluss der Faserorientierung praxisrelevant. Damit wurde die geometrische Ausrichtung der Fasern mit der elektrischen Leitfähigkeit und dem dielektrischen Verhalten von Pressspan in Verbindung gebracht.

Für weitergehende Untersuchungen wäre es interessant, die Faserorientierung bewusst in der Pressspanherstellung zu verändern, denn der im Rahmen dieser Arbeit gefundene Zusammenhang zwischen der geometrischen Ausrichtung der Fasern, der Fasergeometrie und der Materialgröße elektrische Leitfähigkeit eröffnet ein neues Feld bei der Suche nach Pressspanprodukten mit gezielt eingestellten Leitfähigkeitswerten.

Darüber hinaus wäre es denkbar, die Faserlänge zu verkleinern, um in der Layerebene eine größere Anzahl an Übergangsstellen von einer Faser auf die nächste Faser zu generieren. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen lassen den Schluss zu, dass die von der Oberfläche eines Layers durch die einzelnen Layer bis zur Gegenelektrode (horizontale Messung) gemessene Leitfähigkeit unter Luft einen noch kleineren Wert annehmen würde.

Allerdings muss beachtet werden, dass sich das Verhältnis unter Öl möglicherweise umkehrt. Wenn viele kurze Fasern im Pressspan vorhanden sind, gibt es zwar viele Übergänge von einer Faser auf die nächste Faser, doch der mögliche Zwischenraum zwischen zwei Fasern ist dann ölgefüllt und hat demnach einen kleineren Widerstand im Vergleich zur Füllung mit Luft. Der Ladungstransport würde dort nicht über den relativ großen Kontaktwiderstand der Fasern, sondern über das leitfähigere Öl vonstattengehen.

Einfluss der Dichte

Darüber hinaus wurde der Volumenanteil der Fasern zum Volumenanteil der Hohlräume im Pressspan variiert, indem Pressspanprüflinge mit unterschiedlicher Dichte ($0,9 - 1,2 \text{ g/cm}^3$) untersucht wurden. Unter Luftimprägnierung lag die Leitfähigkeit von hochdichtem Pressspan über der Leitfähigkeit von niederdichtem. Grund hierfür ist die je nach Dichte unterschiedliche Anzahl an Fasern, über die der Leitungsprozess abläuft, da das Imprägniermedium Luft eine um mehrere Größenordnungen kleinere Leitfähigkeit besitzt als der Pressspan und der Ladungstransport somit in guter Näherung nur über die Fasern im Pressspan erfolgt. Bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Messzeit von 2000 s (letzter erfassbarer Messwert) lag die Leitfähigkeit von hochdichtem, luftimprägniertem Pressspan um den Faktor $3,1$ über der Leitfähigkeit von niederdichtem, luftimprägniertem Pressspan. Wurden diese Pressspanprüflinge mit einem niederohmigen Mineralöl mit der Leitfähigkeit in der Größenordnung von 10^{-12} S/m imprägniert, dann lag die Leitfähigkeit des hochdichten Pressspans um den Faktor $2,2$ unter der Leitfähigkeit des niederdichten Pressspans. In diesem Fall wurde das relativ große Hohlraumvolumen bei niederdichtem Pressspan mit dem sehr niederohmigen Öl imprägniert und erhöhte damit prozentual stärker die Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan als es bei einem hochdichten Material zu beobachten war. Über eine Variation der Dichte lässt sich folglich die Leitfähigkeit von Pressspan einstellen. Allerdings müssen fertigungstechnische Grenzen der Dichtevariation beachtet werden und die mechanische Stabilität des Pressspans erhalten bleiben.

Einfluss der Ölleitfähigkeit

Die Variation der Ölleitfähigkeit stellt eine weitere Möglichkeit da, die Einflüsse der beiden Komponenten Fasermaterial und Imprägniermedium auf die Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan zu gewichten. Eine Gegenüberstellung des Einflusses der Imprägnierung Luft mit der Imprägnierung Öl auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan ergab, dass sich die niedrige Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan bei $90 \text{ }^\circ\text{C}$ um den Faktor $14,5$ erhöhte, wenn mit einem niederohmigen Öl mit der Ölleitfähigkeit in der Größenordnung von 10^{-12} S/m bis 10^{-11} S/m imprägniert wurde. Neben den Strompfaden entlang der Fasern kommen bei Ölprägnierung weitere Pfade im Öl hinzu. Dabei handelt es sich um den Mechanismus der Ionenleitung. Ladungsträger driften aufgrund des angelegten elektrischen Feldes durch die Ölkanäle, sammeln sich an den Grenzflächen Öl zu

Faser an und verschieben Ladungen an den Fasern. Dieser zusätzliche Leitungsprozess überlagert sich den Leitungsprozessen im Pressspan. Die unterschiedlichen Leitungsprozesse in Öl und im Pressspan können allerdings nicht zur Beschreibung des Gesamtsystems aus öl-imprägniertem Pressspan überlagert werden, da eine Ölprägnierung die Transportwege im Pressspan verändert. Je näher die Ölleitfähigkeit an der Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan liegt, desto kleiner wird der Einfluss des Öls auf die Leitfähigkeit des Gesamtsystems. Diese theoretische Vorhersage wurde durch die Variation der Ölsorte und damit durch die Variation der Leitfähigkeit des Imprägnieröls untersucht. Hierbei wurde die Leitfähigkeit des Imprägnieröls über eine Variation der Ölsorte unter anderem bei 90 °C um 2,5 Größenordnungen erhöht und jeweils Pressspan mit diesen Ölen imprägniert. Es zeigte sich, dass die Leitfähigkeit der ölprägnierten Pressspanprüflinge bei der Feldstärke von 6 kV/mm trotz der großen Änderung der Ölleitfähigkeit nur um den Faktor 1,8 anstieg. Zusammenfassend ist der Einfluss des Öls auf die Leitfähigkeit von Pressspan beim Übergang von Luft- zu Ölprägnierung deutlich zu sehen. Der Einfluss der einen gegenüber einer anderen Ölsorte wird allerdings als untergeordneter Effekt bewertet, wenn nur die Leitfähigkeiten betrachtet werden. Allerdings werden an das Isolieröl noch weitere Anforderungen wie Langzeitstabilität oder Gasaufnahmevermögen gestellt, die an dieser Stelle nicht im Fokus lagen.

Einfluss des Ligningehalts

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die chemische Struktur und die Zusammensetzung des Pressspans aus Zellulose, Hemizellulosen und Lignin näher betrachtet. Da es sich um einen organischen Feststoff handelt, kommt prinzipiell die Elektronen-Loch-Leitung als Leitungsprozess in Betracht. Zellulose und Hemizellulosen sind hygroskopische Bestandteile des Pressspans, die freie OH-Gruppen aufweisen und aufgrund der kovalenten σ -Bindungen eine sehr geringe Leitfähigkeit erwarten lassen. Lignin hingegen wird in der Literatur als organischer Farbstoff beschrieben, dem halbleitende Eigenschaften bescheinigt werden. Deshalb war die Betrachtung dieses Bestandteils erfolgversprechend. Lignin besitzt neben den σ -Bindungen zusätzlich ein konjugiertes π -Elektronensystem. Die Eigenschaften von π -Elektronen sind in der Chemie und in der Physik der organischen Halbleiter bekannt. Diese theoretischen Überlegungen wurden hier erstmals auf die Leitfähigkeit von Pressspan übertragen.

Zur Untersuchung des Einflusses des Ligningehalts auf die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan wurden Prüflinge mit unterschiedlichem Ligningehalt herangezogen. Mittels UV/Vis-Spektroskopie wurde die Absorption der Prüflinge den unterschiedlichen Ligningehalten zugeordnet. Eine Lichtabsorption im sichtbaren Bereich bedingt eine relativ kleine Bandlücke. Somit reichen relativ geringe Energiemengen aus, um Ladungsträger vom Valenz- ins Leitungsband zu bringen. Außerdem führen die Eigenschaften der π -Elektronen zu einer theoretisch höheren Beweglichkeit der Ladungsträger. Der

erwartete Unterschied in der Leitfähigkeit konnte durch die durchgeführten Leitfähigkeitsmessungen experimentell bestätigt werden. Dabei zeigte sich, dass bei 90 °C die Leitfähigkeit des luftimprägnierten Prüflings mit einem Ligningehalt von 6,2 % um einen bis zu 7,4-fachen Wert höher ist als bei einem Prüfling mit 4,2 % Ligningehalt. Das Polarisationsverhalten beider Prüflinge war ähnlich, wohingegen sich die Endleitfähigkeiten allerdings deutlich unterschieden. Bei einem Ligningehalt von 4,2 % war selbst bei 90 °C noch kein Endwert messbar, sodass dieser berechnete Faktor 7,4 vermutlich noch höher liegt. Nach einer Ölimprägnierung betrug der Faktor zwischen 4,2 % und 6,2 % Ligningehalt im Pressspan bei 30 °C nur noch 1,1. Der Einfluss ist somit verschwindend gering, auch wenn er in absoluten Werten immer noch ersichtlich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Ligningehalt der Prüflinge erstmals verändert. Für weiterführende Untersuchungen zum Einfluss des Ligningehalts auf die elektrische Leitfähigkeit wäre ein noch größerer Unterschied im Ligningehalt erstrebenswert, der dann voraussichtlich zu weiteren, größeren Unterschieden in den Leitfähigkeiten von ölimprägniertem Pressspan führen wird. Dies wäre beispielsweise mit Bleichen erreichbar. Hier sollte ein Bereich von ungebleichtem (viel Lignin) bis zu sehr stark gebleichtem Zellstoff (sehr wenig Lignin) angestrebt werden. Es muss angemerkt werden, dass potenzielle Bleichprozesse immer auch weitere Zellstoffeigenschaften beeinflussen und verändern können, beispielsweise durch die Behandlung mit unterschiedlichen Chemikalien über unterschiedliche Zeiträume, weshalb im Rahmen dieser Arbeit davon Abstand genommen wurde.

Einfluss des Wassergehalts

Eine Wassergehaltserhöhung des ölimprägnierten Pressspans von 0,02 % auf 3,88 % bewirkte einen Anstieg der Leitfähigkeit um den Faktor 14200 bei 30 °C und 20 kV/mm. Der Wassergehalt ist somit der bedeutendste von den in dieser Arbeit untersuchten Einflussgrößen auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan. Erst bei höheren Feldstärken war der Ladungstransport durch den Pressspan vom Volumenwiderstand des Pressspans abhängig. Bei kleineren Feldstärken und bei inhomogener Wasserverteilung war eine eindeutige Zuordnung der Leitfähigkeiten zu den Wassergehalten nicht möglich. Deshalb wurde an dieser Stelle der Faktor bei 20 kV/mm berechnet.

Als Leitungsprozess kommt die Protonenleitung in Frage, die im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig nachgewiesen wurde, die allerdings mit Hilfe von Literaturstellen und theoretischen Überlegungen begründbar und äußerst wahrscheinlich ist. Demnach tragen Protonen, die eine größere Beweglichkeit besitzen als andere Ionen, zum Ladungstransport bei. Eine Protonenleitung kann somit dafür verantwortlich sein, dass die Leitfähigkeit von Pressspan eine solch ausgeprägte Abhängigkeit vom Wassergehalt zeigt. Für alle untersuchten Wassergehalte war nach Analyse der Messdaten vom gleichen, thermisch aktivierten Leitungsprozess auszugehen, da die Leitfähigkeiten aller Prüflinge die gleiche Temperaturabhängigkeit zeigten.

Der starke Einfluss des Wassergehalts des Pressspans auf dessen Leitfähigkeit ist für die Praxis relevant und sollte durch ein Monitoringsystem im Betrieb erfasst werden. In weiterführenden, chemischen Experimenten könnte der Nachweis der Bildung von Wasserstoff und damit die Protonenleitung bei elektrischer Belastung des Isoliersystems als wichtiger Leitungsprozess tiefer gehend untersucht werden. Dies bedarf allerdings aufgrund der kleinen zu erwartenden Wasserstoffkonzentration sowie der Schwierigkeit der Separation verschiedener Prozesse, die zur Wasserstoffproduktion führen können, ausführlicher Untersuchungen.

Einfluss der Temperatur

Des Weiteren wurde der Einfluss des anwendungstechnischen Parameters Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan untersucht. Da im Pressspan die Leitungsprozesse Ionen-, Elektronen-Loch- und Protonenleitung thermisch aktiviert sind, war in jedem Fall mit einem exponentiellen Anstieg der Leitfähigkeit mit der Temperatur zu rechnen. Dieses Verhalten konnte experimentell nachgewiesen werden. Die Leitfähigkeit von luftimprägniertem Pressspan stieg exponentiell mit der Temperatur und konnte mittels Arrhenius-Gesetz ausreichend genau beschrieben werden. Die Aktivierungsenergie wurde im Rahmen dieser Arbeit zu 1,28 eV bestimmt. Neben der Erhöhung des Leitfähigkeitsendwertes mit steigender Temperatur wurde eine Verschiebung der Kurven der scheinbaren Leitfähigkeit über der Messzeit zu kürzeren Zeiten beobachtet. Polarisationsmechanismen laufen damit bei erhöhten Temperaturen schneller ab. Dies ist zu erklären, da durch die Leitfähigkeitserhöhung der Fasern die Grenzflächen schneller geladen werden können. Zudem bewirkt die Temperaturzunahme eine Zunahme der Beweglichkeit der Dipole, sodass diese leichter durch das äußere elektrische Feld ausgerichtet werden können.

Das dielektrische Verhalten des Pressspans wurde mittels RC-Netzwerkanalyse modelliert. Um von einer Temperatur rechnerisch auf eine andere zu schließen, wurden alle Widerstände im Netzwerkmodell mittels Arrhenius-Gesetz umgerechnet, alle Kapazitäten in erster Näherung gleich gelassen und diese neuen Werte einer transienten Netzwerkanalyse zugeführt. Dies ergab eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und Simulationen, sodass diese Vereinfachung gerechtfertigt ist. Somit wurde es möglich, aus Messungen bei erhöhter Temperatur auf Leitfähigkeiten bei tieferen Temperaturen zu schließen, auch wenn diese messtechnisch mit dem verwendeten Strommessgerät oder dem Aufbau nicht erfassbar waren. Bei einer Temperaturänderung von 30 °C auf 90 °C erhöhte sich die gemessene scheinbare Leitfähigkeit nach 10800 s um den Faktor 112. Bei der Berechnung der Endwerte für 30 °C mittels Arrhenius-Gesetz und Netzwerkanalyse betrug dieser Faktor 2400.

Im Fall von ölimprägniertem Pressspan erfolgte das Vorgehen analog. Hier ergab sich ebenfalls ein exponentieller Anstieg der Leitfähigkeit mit steigender Temperatur und die

Aktivierungsenergie betrug 0,9 eV. Sie ist kleiner als die Aktivierungsenergie von luftimprägniertem Pressspan und größer als die Aktivierungsenergie von Öl. Diese Aktivierungsenergie lag aufgrund der Zusammensetzung aus Öl und Pressspan zwischen den beiden Einzelbestandteilen. Der Faktor zwischen der Leitfähigkeit von ölprägniertem Pressspan bei 30 °C und bei 90 °C betrug 67, bei Berechnung der Endwerte für 30 °C mittels Arrhenius-Gesetz und Netzwerkanalyse 275. Der Anstieg der Leitfähigkeit mit der Temperatur ist folglich ein wichtiger anwendungstechnischer Parameter mit großem Einfluss auf die Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan. Bei einer Temperaturerhöhung im Transformator beispielsweise aufgrund einer größeren Last wird sowohl das Öl als auch der Pressspan leitfähiger. Durch die unterschiedlichen Aktivierungsenergien von Öl und Pressspan ist mit einer temperaturabhängigen Feldverteilung im ölprägnierten Pressspan zu rechnen, was bei der Konstruktion berücksichtigt werden muss. Nur so ist ein zuverlässiger Betrieb bei allen Betriebstemperaturen gewährleistet.

Einfluss der elektrischen Feldstärke

Zuletzt wurde der Feldstärkeeinfluss auf die Leitfähigkeit betrachtet. Im Fall von luftimprägniertem Pressspan zeigte sich, dass die Feldstärke von 0,1 kV/mm bis 0,6 kV/mm keinen Einfluss auf die Leitfähigkeit hat und sich Pressspan ohmsch verhält. Ab 0,6 kV/mm stieg die Leitfähigkeit linear mit der Feldstärke. Hier handelt es sich um den raumladungsbegrenzten Transport. Dieses Verhalten des Pressspans zeigt dessen nichtlineare Eigenschaften bei hohen Feldstärken. Die Messungen konnten aufgrund der geometrischen Verhältnisse der Messanordnung unter Luft nur bis zu Feldstärken von 1 kV/mm durchgeführt werden. Es ergab sich ein Faktor 2,4 zwischen der Leitfähigkeit bei 0,1 kV/mm und der bei 1 kV/mm.

Bei einem mit hochohmigem Öl (Leitfähigkeit zwischen 10^{-13} S/m und 10^{-12} S/m bei 90 °C) imprägnierten Pressspan zeigte sich ein linearer Anstieg der Leitfähigkeit mit der Feldstärke zwischen 0,1 kV/mm und 6 kV/mm. Daher ergab sich ein Faktor von 3,5. Bei einer Ölprägnierung mit einem niederohmigen Öl (Leitfähigkeit zwischen 10^{-12} S/m und 10^{-11} S/m bei 90 °C) fiel die Leitfähigkeit zuerst von 0,1 kV/mm bis zu 3 kV/mm ab und stieg anschließend wieder an. Der Faktor zwischen der kleinsten Leitfähigkeit bei 3 kV/mm und der größten bei 0,1 kV/mm beträgt 1,8. Auch bei ölprägniertem Pressspan handelt es sich um ein Isoliermaterial, welches einen raumladungsbegrenzten Transport zeigt. Hinzu kommt, dass sich die Feldverteilung aufgrund des Leitfähigkeitsverhältnisses von Pressspan und Öl einstellt. Wenn sich die Ölleitfähigkeit feldstärkeabhängig um mehrere Größenordnungen ändert, kann damit die fallende Leitfähigkeit des Pressspans, der mit niederohmigem Öl imprägniert ist, für kleine Feldstärken erklärt werden. Da Pressspan je nach konstruktiver Gestaltung des Isoliersystems an unterschiedlichen Stellen im Transformator unterschiedlich stark belastet wird, muss das Isoliermaterial Pressspan einen großen Bereich der Feldstärkebelastung abdecken.

Diese Arbeit bringt die elektrische Leitfähigkeit und das dielektrische Verhalten von Pressspan mit der mikroskopischen Zusammensetzung und der makroskopischen Struktur in einen physikalisch begründbaren und messtechnisch erfassbaren Zusammenhang und gibt eine Bewertung der einzelnen Einflussgrößen auf Leitungsprozesse und Polarisationsmechanismen im Pressspan. Die Quantifizierung und das Verständnis der Parametereinflüsse auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan stellen den ersten Schritt dar, um in Zukunft Materialien mit definierten Leitfähigkeiten und erwünschtem dielektrischen Verhalten herzustellen.

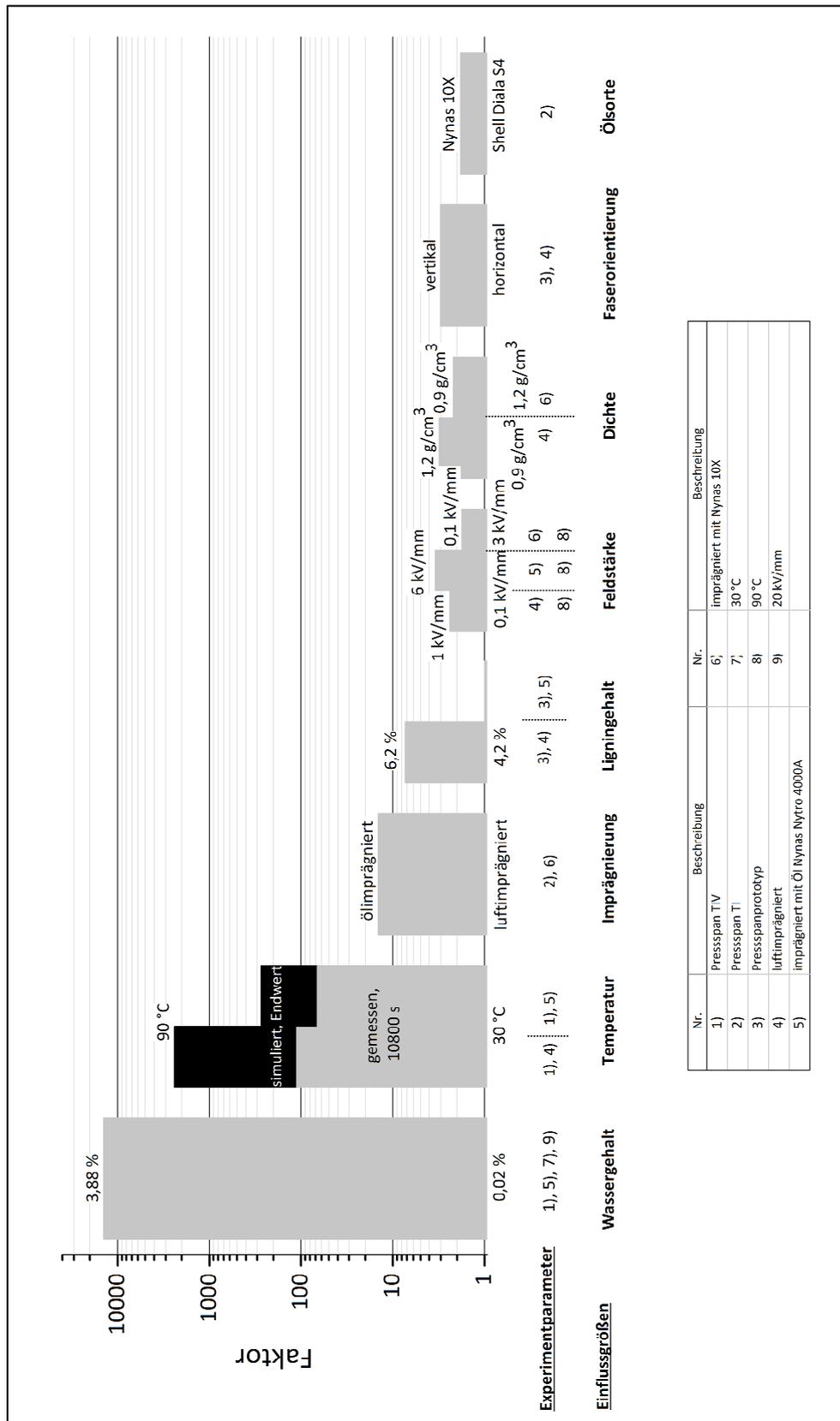


Abbildung 7-1: Quantitative Zusammenstellung der untersuchten Parametereinflüsse auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan. Die Faktoren werden für jede Einflussgröße getrennt berechnet und bezeichnen das maximale Verhältnis zwischen größter und kleinster Leitfähigkeit für das hier betrachtete Parameterfeld.

Literaturverzeichnis

- [1] M.H. Okba, M.H. Saied, M.Z. Mostafa, T.M. Abdel-Moneim; High Voltage Direct Current Transmission - A Review, Part I; IEEE EnergyTech, Cleveland, OH, USA, 2012
- [2] D. Oeding, B.R. Oswald; Elektrische Kraftwerke und Netze; 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011
- [3] V. Crastan; Elektrische Energieversorgung 1; 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
- [4] IEC 61378-2: Convertor transformers - Part 2: Transformers for HVDC Applications; IEC Standard, 2001
- [5] IEC 61378-2: Convertor transformers - Part 3: Application Guide; IEC Standard, 2006
- [6] M.G. Bennett, N.S. Dhaliwal, A. Leirbukt; A Survey of the Reliability of HVDC Systems throughout the World during 2007-2008, CIGRÉ Report B4-209, 2010
- [7] M. Saravolac, G.M. Bastos, M. Bridger, P.W. Christensen, R. Cormack, N.S. Dhaliwal, T. Freyhult, Y.H. Fu, J.F. Graham, J. Hajek, A.C. Hall, P. Heintzig, C. Peixoto, U. Piovan, V. Prasher, S.E. Santo, S. Yukiyasu, L. Zehong; HVDC Converter Transformers: Design Review, Test Procedures, Ageing Evaluation and Reliability in Service / Guidelines for Conducting Design Reviews for HVDC Converter Transformers; CIGRÉ TB 406-407, Electra, No. 248, 2010
- [8] A. Küchler; Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologie – Anwendungen; 3. Auflage, Springer Verlag, Dordrecht Heidelberg London New York, 2009
- [9] R. Bärsch, A. Küchler; Beanspruchungen und elektrisches Verhalten von Isoliersystemen bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchungen; ETG-Fachtagung „Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung“, Köln, 2010
- [10] V. Dahinden, K. Schultz, A. Küchler; Function of Solid Insulation in Transformers; Transform 98, Munich, Germany, 1998
- [11] H.P. Moser, H.J. Kirch, E. Schneider; Transformerboard Insulation under HVDC; 2nd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Beijing, China, 1988, pp. 721-725
- [12] P. Hessen, W. Lampe; Insulating Problems in H.V.D.C.-Converter Transformers; Direct Current, Vol. 2, No. 1, 1971, pp. 30-44

- [13] Ch. Krause; Isolierstoffe aus Zellulose für die elektrische Isolierung von Leistungstransformatoren; e&i elektrotechnik und informationstechnik, Vol. 129, Nr. 5; Springer Verlag, Wien New York, 2012
- [14] A. Alj, A. Denat, J.P. Gosse, B. Gosse; Creation of Charge Carriers in Nonpolar Liquids; IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-20, No. 2, 1985, pp. 221-231
- [15] S. Theoleyre, R. Tobazéon; Ion Injection by Metallic Electrodes in Highly Polar Liquids of Controlled Conductivity; IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. EI-20, No. 2, 1985, pp. 213-220
- [16] A. Küchler, M. Liebschner, A. Reumann, Ch. Krause, U. Piovan, B. Heinrich, R. Fritsche, J. Hoppe, A. Langens, J. Titze; Evaluation of Conductivities and Dielectric Properties for Highly Stressed HVDC Insulating Materials; CIGRÉ Session, Paris, France, 2010
- [17] L. Yang, S.M. Gubanski, Y.V. Serdyuk, J. Schiessling; Dielectric Properties of Transformer Oils for HVDC Applications; IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 6, 2012, pp. 1926-1933
- [18] A. Lindroth, B. Åström, A. Bhardwaj, T.A. Bickley, S. Calabro, G.L. Desilets, T. Fogelberg, A.C. Hall, R.E. Harrison, T.H. Harrison, W.N. Kennedy, A.K. Lokhanin, E.T. Norton, K. Okuyama, C.A.O. Peixoto, G.S. Polovick, F.C. Pratt, G. Preininger, C.M. Sharma, W.W. Stein, K. Tada, E.J. Yasuda; The Relationship between Test and Service Stresses as a Function of Resistivity Ratio for HVDC Converter Transformers and Smoothing Reactors; Electra, No. 157, 1994, pp. 33-57
- [19] F. Schober, A. Küchler, M. Liebschner, Ch. Krause; Oil-Conductivity Measuring Methods for the Condition Assessment of HVDC Insulation Systems; 2012 CIGRÉ Canada Conference on Technology and Innovation for the Evolving Power Grid, Montréal, Canada, 2012
- [20] A. Küchler, U. Piovan, I. Atanasova-Höhlein, M. Berglund, G. Chen, A. Denat, J. Fabian, R. Fritsche, T. Grav, S. Gubanski, S. Jaufer, M. Kadowaki, Ch. Krause, A. Langens, S. Mori, B. Noirhomme, H. Okubo, Ch. Perrier, M. Rösner, F. Scatiggio, J. Schiessling, F. Schober, P. Smith, P. Wedin (A2/D1.41); HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity; CIGRÉ Technical Brochure 646, 2016
- [21] M. Liebschner, A. Küchler, Ch. Krause, B. Heinrich, C. Leu, F. Berger; Interaction of Oil Ducts and Solid Insulation in HVDC Barrier Systems; 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, 2009, pp. 546-551
- [22] H.P. Moser; Transformerboard; Scientia Electrica / H. Weidmann AG, Rapperswil, Switzerland, 1979

- [23] H.P. Gasser, Ch. Krause, T. Prevost; Water Absorption of Cellulosic Insulating Materials used in Power Transformers; International Conference on Solid Dielectrics, Winchester, UK, 2007, pp. 289-293
- [24] P. Lengyel, S. Morvay; Chemie und Technologie der Zellstoffherstellung; Güttinger-Verlag, Biberach/Riß, 1973
- [25] J.H. Bos, P. Veenstra, H. Verhoeven, P.D. de Vos; Das Papierbuch – Handbuch der Papierherstellung; 2. Auflage, Wolters-Noordhoff Verlag, Houten, Niederlande, 2006
- [26] F. Schober, A. Kuchler, F. Berger, W. Exner, Ch. Krause; Pressboard in HVDC Transformer Insulation; 31st International Conference “Science in Practice”, Bremen, 2013
- [27] P.C. Hiemenz, T.P. Lodge; Polymer Chemistry; 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2007
- [28] H.V. Scheller, P. Ulvskov; Hemicelluloses; Annual Review of Plant Biology, Vol. 61, 2010, pp. 263-289
- [29] J.-L. Faulon, P.G. Hatcher; Is There Any Order in the Structure of Lignin?; Energy & Fuels, Vol. 8, 1994, pp. 402-407
- [30] S.V. Mohan, J. Karthikeyan; Removal of Lignin and Tannin Colour from Aqueous Solution by Adsorption onto Activated Charcoal; Environmental Pollution, Vol. 978, No. 1-2, 1997, pp. 183-187
- [31] B. Gänger, G. Maier; Widerstandsverhalten von Isolieröl im Gleichspannungsfeld; BBC Mitteilungen, 1969, S. 525-533
- [32] A. Kurita, E. Takahashi, J. Ozawa, M. Watanabe, K. Okuyama; DC Flashover Voltage Characteristics and their Calculation Method for Oil-Immersed Insulation Systems in HVDC Transformers; IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, pp. 184-190
- [33] R. Tobazéon, J.C. Filippini, C. Marteau; On the Measurement of the Conductivity of Highly Insulating Liquids; IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 1, 1994
- [34] A. Kuchler, F. Hüllmandel, J. Hoppe, D. Jähnel, Ch. Krause, U. Piovan, N. Koch; Impact of Dielectric Material Responses on the Performance of HVDC Power Transformer Insulations; 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Netherlands, 2003
- [35] M. Liebschner; Interaktion von Ölspalten und fester Isolation in HVDC-Barriersystemen; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 390, VDI Verlag, Düsseldorf, 2009

- [36] Y. Ohshima, Y. Maikawa, T. Hamano, O. Sakakura, M. Honda; HVDC Field Characteristics with and without AC Superposed in Converter Transformers; 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, Italy, 1979
- [37] F.H. Buller; Calculation of Electrical Stresses in DC Cable Insulation; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 10, 1967, pp. 1169-1178
- [38] K. Fuchs, F. Berger, A. Fischer, D. Drummer; Influencing Factors on Field Inversion in HVDC Cables; 9th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, France, 2015
- [39] H.P. Moser, V. Dahinden; Transformerboard II; 2nd Edition, H. Weidmann AG, Rapperswil, Switzerland, 1987
- [40] EPRI Research Report: HVDC Converter Transformer Insulation; Electric Power Research Institute, EPRI EL-4004, Project 1424-1, 1985
- [41] Ch. Kittel; Einführung in die Festkörperphysik; 14. Auflage, Oldenbourg Verlag, München Wien, 2006
- [42] B. Jüttner; Über die Gültigkeit der Fowler-Nordheim-Gleichung bei der Feldemission von Mikrospitzen auf ausgedehnten Metalloberflächen; Beiträge aus der Plasma-physik, Vol. 9, Nr. 2, 1969, S. 179-188
- [43] T.J. Lewis; The Basic Processes of Conduction in Dielectric Liquids; IEEE 11th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Baden-Dättwil, Switzerland, 1993, pp. 32-41
- [44] U. Gäfvert, A. Jaksts, C. Törnkvist, L. Walfridsson; Electrical Field Distribution in Transformer Oil; IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, 1992, pp. 647-660
- [45] G. Fasching; Werkstoffe für Elektrotechnik: Mikrophysik, Struktur, Eigenschaften; 4. Auflage, Springer Verlag, Wien New York, 2005
- [46] H. Fischer, H. Hofmann, J. Spindler; Werkstoffe in der Elektrotechnik; 7. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [47] L.A. Dissado, J.C. Fothergill; Electrical Degradation and Breakdown in Polymers; IEE materials and devices series 9, P. Peregrinus Ltd., Stevenage, UK, 1992
- [48] W. Brütting; Organic Semiconductors; Universität Augsburg, 2005
- [49] E.J. Murphy; Conduction and Electrolysis in Cellulose; Canadian Journal of Physics, Vol. 41, No. 7, 1963, pp. 1022-1035

- [50] B.C. Saha; Hemicellulose Bioconversion; *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Vol. 30, No. 5, 2003, pp. 279-291
- [51] L. Glasser; Proton Conduction and Injection in Solids; *Chemical Reviews*, Vol. 75, No. 1, 1975, pp. 21-65
- [52] N. Agmon; The Grotthuss Mechanism; *Chemical Physics Letters* 224, 1995, pp. 456-462
- [53] A. Hassanali, F. Giberti, J. Cuny, T.D. Kühne, M. Parrinello; Proton Transfer through the Water Gossamer; *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol. 110, No. 34, 2013, pp. 13723-13728
- [54] J.F. Nagle, S. Tristram-Nagle; Hydrogen Bonded Chain Mechanisms for Proton Conduction and Proton Pumping; *The Journal of Membrane Biology*, Vol. 74, No. 1, 1983, pp. 1-14
- [55] J.H. Christie, I.M. Woodhead; A New Model of DC Conductivity of Hygroscopic Solids - Part I: Cellulosic Materials; *Textile Research Journal*, Vol. 72, No. 3, 2002, pp. 273-278
- [56] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl; *Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung*; Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1986
- [57] D.A.G. Bruggeman; Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen; *Annalen der Physik*, Vol. 5, Nr. 24, 1935, S. 636-664
- [58] T.W. Dakin; Conduction and Polarization Mechanisms and Trends in Dielectrics; *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 22, No. 5, 2006, pp. 11-28
- [59] M. Beigert; *Mikrodielektrometrische zerstörungsfreie Alterungsdiagnostik von PE- und VPE-isolierten Mittelspannungskabeln*; Dissertation Universität Wuppertal, 1995
- [60] D.D. Nelson, A. Schiffman, D.J. Nesbitt, J.J. Orlando, J.B. Burkholder; H+O₃ Fourier-transform Infrared Emission and Laser Absorption Studies of OH ($X^2\pi$) Radical: An Experimental Dipole Moment Function and state-to-state Einstein A coefficients; *Journal of Chemical Physics*, Vol. 93, No. 10, 1990, pp. 7003-7019
- [61] V. Der Houhanessian; *Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems*; PhD Thesis, ETH Zürich, Switzerland, 1998
- [62] IEC 60093: *Methods of Test for Volume Resistivity and Surface Resistivity of Solid Electrical Insulating Materials*; IEC Standard, 1980

- [63] IEC 60247: Insulating Liquids – Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor ($\tan \delta$) and D.C. Resistivity; IEC Standard, 2004
- [64] IEC 61620: Insulating Liquids – Determination of the Dielectric Dissipation Factor by Measurement of the Conductance and Capacitance – Test Method; IEC Standard, 1998
- [65] S.M. Gubanski, J. Blennow, B. Holmgren, M. Koch, A. Kuchler, R. Kutzner, J. Lapworth, D. Linhjell, S. Tenbohlen, P. Werelius; Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings; CIGRÉ Technical Brochure 414, 2010
- [66] A. Kuchler, F. Hüllmandel, K. Böhm, N. Koch, P. Brupbacher, Ch. Krause; Das dielektrische Verhalten von Öl-Papier-Isolationen unter der Wirkung von Grenzflächen-, Material- und Prüfparametern; ETG-Fachtagung „Grenzflächen in elektrischen Isolationssystemen“, Hanau, 2005
- [67] J.-J. Alff, V. Der Houhanessian, W. Zaengl, A. Kachler; A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus; IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA, USA, 2000, pp. 161-167
- [68] IEC 60641-2: Pressboard and Presspaper for Electrical Purposes - Part 2: Methods of Tests; IEC Standard, 2004
- [69] IEC 60641-3-1: Pressboard and Presspaper for Electrical Purposes - Part 3: Specifications for Individual Materials - Sheet 1: Requirements for Pressboard, Types B.0.1, B.0.3, B.2.1, B.2.3, B.3.1, B.3.3, B.4.1, B.4.3, B.5.1, B.5.3 and B.6.1; IEC Standard, 2008
- [70] G. Kortüm, J. Vogel; Quantitative Auswertung von Papierchromatogrammen durch Reflexionsmessungen; Angewandte Chemie, Vol. 71, Nr. 14, 1959, S. 451-455
- [71] F.M. Mirabella; Modern Techniques in Applied Molecular Spectroscopy; Wiley-Verlag, New York, 1998
- [72] R. Gross, A. Marx; Festkörperphysik; Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 2014
- [73] F. Schober, S. Harrer, A. Kuchler, F. Berger, M. Liebschner, Ch. Krause, W. Exner; Conductivity of Pressboard for HVDC Insulation Systems; IJECES International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems, Vol. 4, No. 2, 2013, pp. 1-7
- [74] J. Blechschmidt (Hrsg.); Taschenbuch der Papiertechnik; Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2010

- [75] F. Schober, A. Küchler, W. Exner, Ch. Krause, M. Liebschner, F. Berger; Interaction of Pressboard with Impregnating Fluids in HVDC Insulation Systems; IEEE Electrical Insulation Conference, Philadelphia, PA, USA, 2014, pp. 276-280
- [76] A. Küchler, F. Hüllmandel, K. Böhm, C. Neumann, N. Koch, K. Loppach, Ch. Krause, J.-J. Alff; Condition Assessment of Aged Transformer Bushing Insulations; CIGRÉ Session, Paris, France, 2006
- [77] F. Paschen; Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlens ure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz; Annalen der Physik, Vol. 273, Nr. 5, 1889, S. 69-96
- [78] F. Schober, A. Küchler, M. Liebschner, F. Berger, W. Exner, Ch. Krause, R. Fritsche, R. Wimmer; Dielectric Behaviour of HVDC Insulating Materials, Polarization and Conduction Processes in Mineral Oil and in Pressboard Impregnated with Different Fluids; 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015
- [79] Gj. Lala; Electrical Conductivity of Pressboard in HVDC Insulation Systems; Master-Thesis Hochschule Würzburg-Schweinfurt, 2015
- [80] E. Takahashi, Y. Shirasaka, K. Okuyama; Analysis of an Anisotropic Nonlinear Electric Field with a Discussion of Dielectric Tests for Converter Transformers and Smoothing Reactors; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, 1994, pp. 1480-1486
- [81] IEC 60450: Measurement of the Average Viscometric Degree of Polymerization of New and Aged Cellulosic Electrically Insulating Materials; IEC Standard, 2004
- [82] ISO 302: Pulps - Determination of Kappa Number; ISO Standard, 2004
- [83] F. Schober, A. Küchler, W. Exner, Ch. Krause, F. Berger; Influence of Board Density on the Conductivity of Oil-Impregnated Pressboard for HVDC Insulation Systems; IEEE Electrical Insulation Conference, Seattle, WA, USA, 2015, pp. 61-64
- [84] D.N.-S. Hon, W. Glasser; On Possible Chromophoric Structures in Wood And Pulps - a Survey of the Present State of Knowledge; Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 12, No. 2, 1979, pp. 159-179
- [85] F. Schober, S. Harrer, A. Küchler, Ch. Krause, T. Wolfinger, W. Exner, F. Berger; Leitfähigkeit von Pressspan als diagnostische Kenngr o e für HG -Betriebsmittel; ETG Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, Berlin, 2014

- [86] V. Coropceanu, J. Cornil, D.A. da Silva Filho, Y. Olivier, R. Silbey, J.-L. Brédas; Charge Transport in Organic Semiconductors; *Chemical Reviews*, Vol. 107, No. 4, 2007, pp. 926-952
- [87] J. Gierer; Chemical Aspects of Kraft Pulping; *Wood Science and Technology*, Vol. 14, 1980, pp. 241-266
- [88] L.B. Davin, N.G. Lewis; Lignin Primary Structures and Dirigent Sites; *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 16, No. 4, 2005, pp. 407-415
- [89] S. Grimme; Gibt es spezielle nicht-kovalente π - π -Stapelwechselwirkungen wirklich?; *Angewandte Chemie*, Vol. 120, Nr. 18, 2008, S. 3478-3483
- [90] J. Kumirska, M. Czerwicka, Z. Kaczyński, A. Bychowska, K. Brzozowski, J. Thöming, P. Stepnowski; Application of Spectroscopic Methods for Structural Analysis of Chitin and Chitosan; *Marine Drugs*, Vol. 8, No. 5, 2010, pp. 1567-1636
- [91] F. Schober, S. Harrer, A. Küchler, Ch. Krause, F. Berger; Einfluss von Temperatur und Ligningehalt auf die elektrische Leitfähigkeit von Pressspan als HGÜ-Isolierwerkstoff; 6. RCC-Fachtagung „Werkstoffe zur Anwendung in der el. Energietechnik unter den besonderen Anforderungen der HGÜ“, Berlin, 2015, S. 268-273
- [92] H.W. Jensen, J. Legakis, J. Dorsey; Rendering of Wet Materials; *Proceedings of the 10th Eurographics Workshop*, Granada, Spain, 1999, pp. 273-282
- [93] S. Harrer; Elektrische Leitfähigkeit zellulosebasierter Isolierwerkstoffe für Hochspannungsgleichstromanwendungen; *Master-Thesis Universität Würzburg*, 2014
- [94] D.E. Metzler, C.M. Metzler; *Biochemistry, The Chemical Reactions of Living Cells*; Vol. 1, 2nd edition, Academic Press, San Diego, CA, USA, 2001
- [95] S. Harrer, F. Schober, A. Küchler, T.E.M. Staab, G. Sextl, W. Exner, Ch. Krause; Influence of Water Content of Cellulosic Material on Dielectric Behaviour of HVDC Insulation; 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015
- [96] Z. Krasucki, H.F. Church, C.G. Garton; A New Explanation of Gas Evolution in Electrically Stressed Oil-Impregnated Paper Insulation; *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 107, No. 7, 1960, pp. 598-602
- [97] M.H. Zink; Zustandsbewertung betriebsgealterter Hochspannungstransformator-durchführungen mit Öl-Papier-Dielektrikum mittels dielektrischer Diagnose; *Dissertation Technische Universität Ilmenau, Universitätsverlag Ilmenau*, 2013

-
- [98] S. Baxter; Electrical Conduction of Textiles; Transactions of the Faraday Society, Vol. 39, 1943, pp. 207-214
- [99] P. Zukowski, T.N. Koltunowicz, K. Kierczynski, J. Subocz, M. Szrot, M. Gutten; Assessment of Water Content in an Impregnated Pressboard based on DC Conductivity Measurements. Theoretical Assumptions; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 3, 2014, pp. 1268-1275
- [100] A. Krieg; Modellierung von Leitungsmechanismen im Pressspan für HGÜ-Anwendungen; Master-Thesis Hochschule Würzburg-Schweinfurt, 2015
- [101] A. Kühler; Ausbildung und Steuerung elektrischer Felder bei Gleichspannungsbeanspruchung; 6. RCC-Fachtagung „Werkstoffe zur Anwendung in der el. Energietechnik unter den besonderen Anforderungen der HGÜ“, Berlin, 2015, S. 12-50
- [102] M.A. Lampert; Simplified Theory of Space-Charge-Limited Currents in an Insulator with Traps; Physical Review, Vol. 103, No. 6, 1956, pp. 1648-1656
- [103] R.M. Neagu, J.N. Marat-Mendes, E.R. Neagu; Electric Charge Transport Mechanism at Medium Fields in Low-Density Polyethylene; International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, 2004, pp. 25-28