Tobias Gabler

Beitrag zum dielektrischen Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleich- und Mischspannungsbelastung

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

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

Digitale Fassung

Die elektronische Version dieser Arbeit ist über den sächsischen Dokumenten- und Publikationsserver Qucosa® (<http://www.qucosa.de/>) frei zugänglich.
Direkter Zugriff: <https://nbn-resolving.org/html/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-763240>

Selbstverlag

Tobias Gabler · Dresden
tobias_gabler@gmx.net

Diese Arbeit wurde unter einer Creative-Commons-Lizenz (CC BY-ND 4.0) veröffentlicht (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>).

DOI: 10.25368/2021.87

Veröffentlicht:

Dresden · Oktober 2021

Bilder Umschlagseite (v. l. n. r.):

- Oben: Schematische Darstellung der genutzten Elektrodenanordnung mit papierisolierten Elektroden // Schematische Ladungsträgerverteilung der Anordnung mit papierisolierten Elektroden im stationären Zustand unter Gleichspannungsbelastung
- Unten: Schematische Feldstärkeverteilung der Anordnung mit papierisolierten Elektroden im stationären Zustand unter Gleichspannungsbelastung: Berechnung auf Grundlage konstanter elektrischer Leitfähigkeiten κ der Isoliermedien // Berechnung auf Grundlage des ladungsträgerbasierten Poisson-Nernst-Planck-Modells (PNP)
Keine einheitliche Skalierung. Bilder sind abgewandelte Formen der in der Arbeit verwendeten Darstellungen.

Beitrag zum dielektrischen Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleich- und Mischspannungsbelastung

Dipl.-Ing.
Tobias Gabler

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann
Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler

Tag der Einreichung: 17. Februar 2021
Tag der Verteidigung: 09. Juli 2021

*All models are approximations. Assumptions – whether implied or clearly stated – are never exactly true.
All models are wrong, but some models are useful.
So the question you need to ask is not “Is the model true?” (it never is) but “Is the model good enough for
this particular application?”*

– George E.P. Box –

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Hochspannungs- und Hochstromtechnik der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden. Da eine solche Arbeit zu einem solch komplexen Themengebiet nie das Werk eines Einzelnen sein kann, möchte ich mich bei allen Personen herzlich bedanken, die den Grundstein dazu gelegt, mich während dieser Zeit begleitet und damit zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr.-Ing. Karsten Backhaus, der mit seiner Dissertation nicht nur das Fundament für meine Arbeit legte, sondern mich auch fachlich betreute und als Teamleiter unterstützte. Durch sein großes Interesse an der Arbeit stand er stets mit gutem Rat beiseite, unterstützte mich bei diversen Herausforderungen und verhalf mir zum tiefen Verständnis dieses komplexen Themas. Weiterhin gilt mein tiefer Dank Herrn Dr.-Ing. Joachim Speck, der aufgrund seiner jahrzehntelangen Erfahrung und wertvolle, fachliche Anstöße und Hinweise gab und dabei stets motivierte, Ergebnisse kritisch zu hinterfragen.

Großer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann, der mir sein Vertrauen und als einstiger Inhaber der Professur den nötigen Freiraum schenkte, meine Ergebnisse international vorstellen zu dürfen und mich damit nicht nur fachlich, sondern auch persönlich weiterzuentwickeln. Weiterhin danke ich ihm für das fortwährende Interesse an der Arbeit sowie für die Übernahme des Gutachtens.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt bedanken, der mich mit der Übernahme des Zweitgutachtens sehr ehrte, meine Arbeit mit großem Interesse verfolgte und weitere nützliche Anmerkungen zur Arbeit lieferte.

Weiterhin möchte ich mich sehr bei Herrn Ronny Fritsche vom Transformatorenwerk der Siemens Energy Global GmbH & Co. KG (ehemals SIEMENS AG) in Nürnberg für die sehr gute und reibungslose Zusammenarbeit und die wertvollen und offenen Diskussionen bedanken. Mein Dank gilt auch seiner uneingeschränkten Unterstützung der Forschungen innerhalb der Industriekooperation sowie der Organisation der fachlichen als auch der finanziellen Grundlage der Arbeit.

Mein herzlicher Dank gilt auch allen ehemaligen Kolleg:innen der Professur für die sehr gute Zusammenarbeit, die großartige Arbeitsatmosphäre und die stete Hilfsbereitschaft in meinen gut fünfeinhalb Jahren als Mitarbeiter an der Professur. Im Besonderen möchte mich bei Thomas Götz als langjährigen Bürokollegen bedanken, der mir nicht nur fachliche Ratschläge gab und die Hürden im LaTeX zur Erstellung der Arbeit nahm, sondern auch den Arbeitsalltag und Konferenzreisen angenehmer gestaltete. Großer Dank gilt ebenfalls meinen weiteren Team- und Bürokollegen Thomas Linde sowie Andreas Dowbysch und Lena Elspaß für ihre große Hilfsbereitschaft, die stets guten, angeregten Diskussionen und die tolle Arbeit im Team.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn PD Dr.-Ing. habil. Stephan Schlegel bedanken, der mich in der Endphase der Promotion und der Anfertigung dieses Schriftstückes unterstützte.

Ich möchte mich auch außerordentlich beim Laborleiter des Instituts, Herrn Hans-Peter Pampel bedanken, der sich während der Bauphase des Institutes in meiner Anfangszeit um einen besonderen Laborarbeitsplatz bemühte, mich beim Umzug in und aus diesem unterstützte und mich die Prüfanlagen des Instituts für meine Arbeiten modifizieren ließ. Ebenfalls gilt mein großer Dank den Mitarbeitern der elektrischen Werkstatt Falk Eusewig, Michael Gläser, Helge Knüpfel, Axel Göres und Peter Wermuth, die mir beim Aufbau meiner Versuche stets behilflich waren und zerstörte Datenlogger fleißig reparierten. Den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt Ralf Dittrich, Gerd Jaroszczyński und Eric Reichelt bin ich für die unkomplizierte Unterstützung beim Vorbereiten neuer Versuchsanordnungen und der Herstellung unzähliger Ringbarrieren ebenfalls zum tiefen Dank verpflichtet.

Besonderer Dank gilt auch Frau Dr.-Ing. Maria Kosse, die mir nicht nur während meiner Diplomarbeit das restliche Handwerkszeug mitgab, was für eine wissenschaftliche Arbeit diesen Umfanges nötig war, sondern mich auch zum Ende meines Studiums zur Promotion motivierte. Mein Dank gilt auch Michael Bauer, Antonia Markl, Tom Fuchs, Rolf Terzan, Anna Ebeling, Johannes Lenk und Maximilian Emmerich, die mich im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten oder als studentische Hilfskraft engagiert unterstützten.

Letztlich gilt mein spezieller, persönlicher Dank meiner Familie: Liebe Marlies, vielen Dank, dass du uns nicht nur unsere Söhne, sondern mir auch den nötigen Freiraum geschenkt hast, der für diese Arbeit notwendig war. Und auch dafür, dass du mir in manch schwierigen Situationen den nötigen Rückhalt gegeben und mich nach Feierabend mit Ölgeruch ertragen hast. Liebe Schwiegereltern, vielen Dank, dass auch ihr mich unterstützt und in stressigen Situationen die Kinderbetreuung übernommen habt. Liebe Eltern, vielen Dank, dass ihr mir so viel mitgegeben habt und euer „Doktorchen“ sowohl im Studium, als auch während der Promotion immer unterstützt habt!

Dresden im Oktober 2021

Tobias Gabler

Kurzfassung

Stromrichtertransformatoren der Hochspannungsgleichstromübertragung bilden das Bindeglied zwischen Gleichspannungs- und Drehstromsystem. Um den ausfallsicheren Betrieb über die gesamte Lebensdauer zu gewährleisten, muss deren Öl-Papier-Isoliersystem entsprechend dimensioniert werden. Eine optimale Dimensionierung setzt ein detailliertes Verständnis über die Beanspruchung des Isoliersystems sowie deren zuverlässige Modellierung sowohl unter Betriebsspannung als auch bei den überlagerten, transienten Überspannungen voraus.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems in Anlehnung an dielektrische Prüfungen sowohl unter Gleichspannungsbelastung als auch unter einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung (einer sog. Mischspannungsbelastung) untersucht.

Der Vergleich von numerischen Berechnungen auf Grundlage eines ladungsträgerbasierten Ansatzes nach *Poisson-Nernst-Planck* (PNP) mit Durchschlagexperimenten gibt dabei Aufschluss über die Beanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems. Weiterhin wird gezeigt, dass der in den etablierten, resistiv-kapazitiven Berechnungsmodellen vernachlässigte Ladungsträgereinfluss in Bezug auf die Beanspruchung des Isoliersystems unzureichende Ergebnisse zur Folge hat und demnach zwingend zu berücksichtigen ist.

Die an realitätsnahen, Öl-Papier-isolierten Anordnungen erzielten Ergebnisse zeigen nicht nur den Einfluss der an Grenzflächen oder im Papier akkumulierten Ladungsträger auf die Beanspruchung des Isoliersystems. Ebenso werden die Annahmen des ladungsträgerbasierten Ansatzes und die Berechnungsergebnisse des PNP-Modells qualitativ bestätigt. Infolge der Ladungsakkumulation im Papier tritt die höchste Beanspruchung im Ölspalt und nicht im Papier auf. Öl-Papier-isolierte Anordnungen werden somit geringer beansprucht, als eine Strömungsfeldberechnung vermuten lässt. Dies widerspricht den Annahmen der etablierten Berechnungsmodelle und wird im Weiteren durch Polaritätseffekte an homogenen, aber unsymmetrischen, papierisolierten Elektrodenanordnungen oder durch den nachweisbaren Einfluss des Ölvolumens im Prüfgefäß auf die Beanspruchung einer Anordnung verdeutlicht.

Unter Mischspannungsbelastung wird weiterhin gezeigt, dass eine Überlagerung der Gleichspannung und damit auch der Polaritätswechsel keine höhere Beanspruchung des Isoliersystems im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung zur Folge hat. Die etablierten, resistiv-kapazitiven Modelle ließen jedoch den Polaritätswechsel als kritischste Beanspruchung vermuten.

Somit wird nicht nur die Anwendbarkeit der ladungsträgerbasierten PNP-Modellierung an Öl-Papier-Isolieranordnungen qualitativ verifiziert. Ebenso wird demonstriert, dass die etablierten Berechnungsmodelle aufgrund der stark vereinfachten Annahmen nicht in der Lage sind, die Beanspruchungen unter Gleich- und der untersuchten Mischspannungsbelastung abzubilden. Der Einsatz klassischer Strömungsfeldberechnungen zur Nachbildung der Beanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleichspannungsbelastung entspricht damit nicht mehr dem Stand der Forschung.

Abstract

Converter transformers of HVDC transmission systems connect HVDC and HVAC systems. To ensure a reliable operation during the entire lifetime, their oil-paper-insulation system must be designed appropriately. An optimized dielectric design demands a fundamental understanding of the dielectric stresses as well as a reliable modeling of the insulation system both under operating voltages and under superimposed, transient overvoltages. Hence, in this work the dielectric behavior of the oil-paper-insulation system is investigated. Based on dielectric tests the investigations are performed under DC voltage stress and a composite voltage stress of a DC voltage in stationary conditions superimposed by a lightning impulse voltage.

The comparison of numerical calculations using a charge-carrier-based approach according to *Poisson-Nernst-Planck* (PNP) with breakdown experiments clarifies the dielectric stress of the oil-paper-insulation system. Furthermore, the comparison with results determined by the established, resistive-capacitive calculation models shows that it is mandatory to take the influence of the charge carrier accumulation into account.

The presented results, which were obtained at oil-paper-insulated arrangements which represent the dielectric stress of real arrangements, show the influence of the charge carriers accumulating at interfaces or in the paper insulation on the dielectric stress. The results confirm the calculations and the assumptions according to the charge-carrier-based model as well. Due to the charge carrier accumulation, the highest dielectric stress occurs in the mineral oil and not in the paper insulation. In contrast, the findings obtained assuming an ohmic conductivity would result in a higher dielectric stress of the oil-paper-insulated arrangements. Furthermore, polarity effects in homogeneous but asymmetrical, paper-insulated electrode arrangements or the influence of the surrounding oil in the test vessel demonstrate the effects of the charge carriers.

Under composite voltage stresses it is also shown, that the applied superimposed voltage as well as the fast polarity reversal does not lead to a higher dielectric stress of the arrangements compared to the pure DC voltage stress. Commonly used calculation models would determine higher stresses due to the fast polarity reversal instead.

Consequently, the applicability of the charge-carrier-based PNP calculation model is verified qualitatively in the presented investigations. Furthermore, it is demonstrated that the commonly used calculation models are incapable of simulating the dielectric stresses under DC voltage stress and under the investigated superimposed voltage stresses due to the simplified assumptions. Hence, the determination of the dielectric stresses of oil-paper-insulation systems under DC voltage stress according to the commonly used calculation models assuming an ohmic conductivity does not correspond to the current state of research.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens	3
2.1	Grundlagen der HGÜ und Belastung der Betriebsmittel	3
2.2	Das Öl-Papier-Mischdielektrikum und dessen Zusammensetzung	5
2.2.1	Mineralisches Isolieröl	6
2.2.2	Pressspan und Isolierpapier auf Zellulosebasis	8
2.3	Dielektrische Eigenschaften des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleichspannungsbelastung	9
2.3.1	Ladungsträgerspezies und deren Verhalten unter Gleichspannungsbelastung	9
2.3.2	Polarisation von Dielektrika und dielektrischen Grenzflächen	15
2.3.3	Elektrische Leitfähigkeitsmechanismen in Öl-Papier-Mischdielektrika	17
2.3.4	Zeitabhängige Leitfähigkeit von Isolierflüssigkeiten	19
2.3.5	Modelle zur Beschreibung des elektrischen Leitfähigkeitsverhaltens der Öl-Papier-Mischdielektrika	20
2.3.6	Entladungsmechanismen und Durchschlagverhalten	26
2.4	Numerische Modellierung des dielektrischen Verhaltens von Isoliersystemen	30
2.4.1	Klassische, resistiv-kapazitive Modellierung	31
2.4.2	Ladungsträgerbasierter Ansatz nach Poisson-Nernst-Planck	33
2.5	Grundlagen der überlagerten Spannungsbelastung	44
2.5.1	Erzeugen überlagerter Spannungsbelastungen	45
2.5.2	Arten der Überlagerung und deren Auswertung	46
3	Ziele und Eingliederung der Arbeit	49
4	Versuchsaufbau	52
4.1	Versuchsanordnungen	52
4.1.1	Untersuchte Anordnungen	52
4.1.2	Elektrodenanordnung und Prüfgefäß	54
4.2	Hochspannungsprüfkreise	57
4.2.1	Gleichspannungsprüfkreis	57
4.2.2	Stoßspannungsprüfkreis	59
4.2.3	Prüfkreis zur Überlagerung von Gleich- und Blitzstoßspannung	60
4.3	Strommesstechnik	62
4.4	Aufbereitung des Isolieröls und Isolierpapiers	63
4.5	Versuchsbedingungen	64

5 Berechnungen auf Basis des ladungsträgerbasierten Ansatzes	66
5.1 Aufbau der Berechnungsmodelle	66
5.1.1 Aufbau der untersuchten Isolieranordnungen	66
5.1.2 Implementierte Spannungsverläufe	68
5.2 Berechnungsergebnisse bei reiner Gleichspannungsbelastung	70
5.2.1 Einfluss der Randbedingungen auf das zeitabhängige Verhalten ein- facher, ölisolierter Anordnungen	70
5.2.2 Vergleich der Öl-Papier isolierten Anordnungen	80
5.2.3 Einfluss eines Ölspaltes zwischen Elektrode und Papierisolierung auf die Feldstärkeverteilung	86
5.2.4 Auswirkungen des polaritätsabhängigen Injektionsverhaltens an un- symmetrischen Anordnungen	88
5.3 Berechnungsergebnisse bei Mischspannungsbelastung	90
5.3.1 Blanke Elektrodenanordnung	91
5.3.2 Isolierte Elektrodenanordnung	94
6 Experimentelle Untersuchungen	102
6.1 Ergebnisse bei reiner Gleichspannungsbelastung	102
6.1.1 Einfluss des umgebenden Ölvolumens und der Spannungssteigerung	102
6.1.2 Vergleich der Öl-Papier-isolierten Anordnungen	112
6.1.3 Einfluss eines Ölspaltes zwischen Elektrode und Papierisolierung . . .	118
6.1.4 Auswirkungen des polaritätsabhängigen Injektionsverhaltens an un- symmetrischen Anordnungen	121
6.2 Ergebnisse bei Mischspannungsbelastung	122
6.2.1 Verhalten des Einstoffsystems mit blanken Elektroden	123
6.2.2 Verhalten des Mehrstoffsystems mit isolierten Elektroden	128
7 Schlussfolgerungen für die technische Anwendung der Ergebnisse	133
8 Zusammenfassung	136
9 Ausblick	140
Literaturverzeichnis	143
Bilderverzeichnis	153
Tabellenverzeichnis	159
A Anhang	160
A.1 Ergänzungen zu Kapitel 4	160
A.2 Ergänzende Berechnungsergebnisse zu Kapitel 5	161
A.2.1 Berechnungsergebnisse bei überlagerter Spannungsbelastung der blan- ken Elektrodenanordnung	161
A.2.2 Berechnungsergebnisse bei überlagerter Spannungsbelastung der An- ordnung mit isolierten Elektroden	161
Thesen zur Dissertation	163
Lebenslauf	167

Nomenklatur

Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
a, b, c	Skalarer Parameter	
A	Fläche	m^2
b	Dicke der Papierbarrieren	mm
C	Kapazität	F ; μF
Γ	Teilchenflussdichte	$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$
d	Elektrodenabstand / Schlagweite	mm
D	Elektrische Flussdichte	As m^{-2}
D	Diffusionskoeffizient	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
E	Elektrische Feldstärke	kV mm^{-1}
ϵ	Permittivität	$\text{As V}^{-1} \text{m}^{-1}$
f	Frequenz	Hz
I	Elektrischer Strom	mA ; A
J	Elektrische Stromdichte	A m^{-2}
η	Viskosität	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
k_{Diss}	Dissoziationskoeffizient	$\text{V m}^{-4} \text{s}^{-1}$
k_{Rekomb}	Rekombinationskoeffizient	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
L	Induktivität	H ; μH
κ	Elektrische Leitfähigkeit	S m^{-1}
μ	Mobilität/Beweglichkeit	$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
n	Teilchen-/Ladungsträgerdichte	m^{-3}
p	(Luft-) Druck	Pa
P	Dielektrische Polarisierung	As m^{-2}
ρ	Ladungsdichte	As m^{-3}
q	Ladung eines Ladungsträgers	As ; C
r	Radius	m
R	Elektrischer Widerstand	Ω ; $\text{M}\Omega$
s	Absenkung der Energiebarriere nach Schottky	J
t	Zeit	s
T	Absolute Temperatur	K
T / τ	Zeitkonstante	s ; μs
u	Zeitabhängige elektrische Spannung	V ; kV
U	Elektrische Spannung	V ; kV
s	Ölsaltweite	mm

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
v	Geschwindigkeit	m s^{-1}
φ	Elektrisches Potential	V
z	Wertigkeit eines Ladungsträgers	

Konstanten

Konstante	Bezeichnung	Wert	Einheit
e	Eulersche Zahl	2,718 282	
e_0	Elementarladung	$1,602\,176 \cdot 10^{-19}$	As
ε_0	Elektrische Feldkonstante	$8,854\,187 \cdot 10^{-12}$	$\text{As V}^{-1} \text{m}^{-1}$
k_B	Boltzmann-Konstante	$1,380\,649 \cdot 10^{-23}$	J K^{-1}
π	Kreiszahl Pi	3,141 593	

Indizes

Index	Bezeichnung
0	fest eingestellter Wert / Startwert
0,5	0,5-fach
0,75	0,75-fach
1	Stirn
2	Rücken
a	Aktivierung
abs	Absolut
AC	Wechselspannung
b	Belastung
bez	bezogen
B1	Barriere 1
B2	Barriere 2
d, D	Dämpfung
DC	Gleichspannung
Diff	Diffusion
Diss	Dissoziation
Drift	Drift
DS	Durchschlag
E	Entlade-
e^-	Elektronen
EA	Elektrodenanordnung
Elektr	Elektrode

Index	Bezeichnung
eff	Effektiv
ERDE	Erde
PG	Prüfgefäß
g	Grenz-
ges	Gesamt
HS	Hochspannung
H2O	Wasser
i, j	Laufvariable
Inj	Injektion
inj	injiziert
intr	intrinsisch
k	kritisch
kap	kapazitiv
L	Lade-
LC	Längskapazität
LI	Blitzstoß
Lö	Löcher
M	Mess-
MS	Mischspannung
max	maximal
mittel	mittlere(r)
n	normal
neg	negativ
offen	offen
P	Prüfling
Pol	Polarisation
p	Pause
pos	positiv
R	Relaxation
r	relativ
Rekomb	Rekombination
res	resistiv
S	Stoß-
SSV	Spannungssteigerungsversuch
stat, ∞	stationär
Σ	Summe

Notation

Notation	Bedeutung
----------	-----------

$\hat{U}$	Scheitelwert einer Größe
$\mathbf{E}; \vec{E}$	Vektorielle Größe

Abkürzungen

AC	Alternating Current – Wechselstrom
DC	Direct Current – Gleichstrom
FEM	Finite-Elemente-Methode
HDÜ	Hochspannungsdrehstromübertragung
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
LCC	Line-Commutated Converter
LI	Lightning Impulse – Blitzstoß
MMC	Modular Multilevel Converter
PA	Polyamid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PNP	Poisson-Nernst-Planck
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetraflourethylen
SSV	Spannungssteigerungsversuch
ToF	Time of Flight
TUP	Thermally Upgraded Paper
VSC	Voltage-Sourced Converter

1 Einleitung

Der steigende Energiebedarf einer modernen, elektrifizierten Gesellschaft erfordert innovative Konzepte, um die gewonnene Elektroenergie in die Verbraucherzentren zu übertragen. Im Rahmen der Energiewende in Europa und dem geplanten Ausstieg Deutschlands aus der Kern- und Kohleenergie bis 2038 [50H-19] erfolgt zudem ein Umstieg hin zu regenerative Energieträgern – wie z. B. zur Gewinnung elektrischer Energie mithilfe von Solar- oder Windkraftanlagen. Dabei wird vor allem auf die Offshore-Windenergiegewinnung zurückgegriffen, da auf hoher See aufgrund der beständigen und starken Winde eine kontinuierliche Energieeinspeisung möglich ist. Dies führt zu einer Bündelung der Elektroenergieerzeugung im Norden Europas. Die gewonnene elektrische Energie muss somit nicht nur über weite Strecken an Land, sondern auch in die Verbraucherzentren im Landesinneren übertragen werden. Als ökonomisch sinnvollste Variante bietet sich dabei die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) an, welche aufgrund ihrer verlustarmen Energieübertragung über große Entfernungen und der somit höheren möglichen Übertragungsleistung der klassischen Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ) überlegen ist [Arr-98, CIG-01, Bah-07, Sch-07]. Für lange Seekabelverbindungen zur Anbindung der Offshore-Energieanlagen oder zur Kupplung asynchroner Netze stellt die HGÜ zudem die einzige realisierbare Möglichkeit dar [Arr-98, CIG-01, Sch-07]. Allein der deutsche Netzentwicklungsplan 2030 sieht dazu zahlreiche Projekte zur Offshore-Anbindung, zur Verteilung der Elektroenergie in Deutschland und zur Stärkung des internationalen Strommarktes mit einem Neubau von HGÜ-Trassen mit einer Gesamtlänge von mehr als 3000 km vor [50H-19]. Zudem bestehen in Europa weitere Bestrebungen, vermaschte HGÜ-Netze zur Offshore-Anbindung auszubauen [PRO-20].

Dabei soll nicht nur eine ressourcenschonende Energiegewinnung und eine ökonomische Energieübertragung erfolgen. Weiterhin muss auch die durchgehende Energieversorgung gewährleistet sein. Daher müssen die in der HGÜ eingesetzten Betriebsmittel entsprechend der auftretenden Belastungen für eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten dimensioniert sein. Als Bindeglied zwischen dem Gleichspannungs- und dem Drehstromsystem erfahren die Stromrichtertransformatoren in den Konverterstationen spezielle Belastungen. So wird deren Isoliersystem z. B. in HGÜ-Netzen mit netzgeführten Stromrichtern ventillseitig mit einer überlagerten Spannung aus Wechsel- und Gleichspannung [CIG-15, Küc-17], das Isoliersystem von Drosselspulen im einem solchen Gleichspannungsnetz sogar mit dem vollen Gleichspannungspotential des Pols belastet [Mos-87, Küc-17].

In HGÜ-Systemen mit netzgeführten Stromrichtern spielt zudem der Polaritätswechsel eine große Rolle, da die Änderung der Leistungsflussrichtung über Spannungsumpolung stattfindet [CIG-15, Fri-16a, Küc-17]. Vor allem der schnelle Polaritätswechsel zur Fehlerklärung auf Übertragungsleitungen [CIG-15] kann somit zu einer transienten Belastung des Isoliersystems führen. Die Stromrichtertransformatoren müssen aufgrund dieser überla-

gerten Belastungen bei den einzelnen Spannungsanteilen, d. h. mit Gleich- und Wechselspannung sowie mit Stoßspannungen und einem Polaritätswechsel geprüft werden. So soll sicher gestellt werden, dass das Isoliervermögen des Transformators den im Betrieb auftretenden Spannungsbelastungen gerecht wird. [CIG-10a, CIG-10b, Fri-15, Cze-19]

Die Modelle der in den Designrichtlinien geforderten Berechnungen [CIG-10a, CIG-10b] zur dielektrischen Dimensionierung des Isoliersystems basieren aufgrund der jahrzehntelangen Erfahrung der Betriebsmittelhersteller unter Wechselspannung oftmals auf einfachen Annahmen über die Materialparameter der Isoliermedien und demnach auf einfachen Netzwerkmodellen [Fri-15]. Die höchsten Feldstärken werden unter Gleichspannungsbelastung somit aufgrund der durchgeführten Strömungsfeldberechnungen oft im geringer leitfähigen Papier vermutet [Küc-17, Cze-19]. Aufgrund dieser Überlegungen wird die Papierisolierung der Transformatoren entsprechend stark ausgeführt.

Vergangene Untersuchungen zeigten jedoch eine starke Feldstärkeabhängigkeit und somit ein nichtlineares Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit des Isolieröls [Lie-09, Bac-16a, Sch-16, Rum-19]. Das Verhalten der Dielektrika kann demnach nicht mit diesen einfachen Annahmen nachgebildet werden. Zudem treten Polarisationserscheinungen auf, die zur Ausbildung von Raum- und Oberflächenladungen und damit zu zeitlich variierenden, lokalen Veränderungen der elektrischen Feldstärkeverteilung im Isoliersystem führen.

Daher wurden ladungsträgerbasierte Berechnungsmodelle entwickelt, die das grundsätzliche Verhalten des Dielektrikums unter Gleichspannungsbelastung nachbilden konnten [Son-12, Hjo-13, Bac-16a, Rum-19]. Zu nennen sei hierbei vor allem die Nachbildung der Leitfähigkeitsmechanismen mithilfe des Poisson-Nernst-Planck-Gleichungssystems (PNP), dessen Anwendung für einfache, ölsolierte Anordnungen bereits verifiziert werden konnte [Bac-16a]. Die Anwendung an realitätsnahen, Öl-Papier-isolierten Anordnungen ist jedoch zwingend notwendig, um das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems für eine optimierte dielektrische Dimensionierung zu verstehen.

Es besteht jedoch nicht nur ein unzureichendes Wissen über die Beanspruchung des Isoliersystems unter Gleichspannungsbelastung, sondern vor allem bei der Überlagerung mit transienten Spannungsbelastungen durch Überspannungen. Diese Unkenntnis über die detaillierten Beanspruchungen des Isoliersystems führt zu Unsicherheiten im langfristigen Betriebsverhalten, weshalb das Isoliersystem der Stromrichtertransformatoren erheblich überdimensioniert ist [CIG-10a, CIG-10b].

Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems bei reiner Gleichspannungsbelastung sowie der überlagerten Spannungsbelastung aus Gleich- und Stoßspannung untersucht werden. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse des ladungsträgerbasierten PNP-Modells mit äquivalenten Durchschlagversuchen soll dabei das Verständnis über das dielektrische Verhalten fördern. Zudem soll damit das PNP-Berechnungsmodell für die Anwendung unter reiner Gleich- und überlagerten Spannungsbelastungen verifiziert werden, um den Unsicherheiten einer klassischen Strömungsfeldberechnung für die dielektrische Dimensionierung entgegenzuwirken. Nur so ist eine optimale Dimensionierung der Betriebsmittel für eine lange Lebensdauer zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit möglich.

2 Stand des Wissens

2.1 Grundlagen der HGÜ und Belastung der Betriebsmittel

Im Rahmen der Energiewende gewinnt die Übertragung der elektrischen Energie mithilfe der HGÜ zunehmend an Bedeutung. Sind lange Übertragungsstrecken notwendig, stellt die HGÜ nicht nur die ökonomisch sinnvollste Alternative dar, sondern oftmals auch die einzig mögliche Übertragungstechnologie. Sei es zur Übertragung der offshore aus Windkraft gewonnenen Elektroenergie per Seekabelverbindung an Land, die Übertragung der so bspw. in der Nordsee gewonnenen Elektroenergie in die Verbraucherzentren u. a. in den Süden Deutschlands oder die Kupplung asynchroner Drehstromnetze oder Netze mit unterschiedlicher Netzfrequenz per Back-to-Back-Verbindung [Arr-98, Sch-12, Fri-16a, 50H-19]. Die Elektroenergieübertragung per HGÜ bietet gegenüber der klassischen HDÜ den Vorteil, dass vorrangig nutzbare Wirkleistung übertragen wird. Damit muss bei der HGÜ keine Blindleistung durch die parasitären Kapazitäten und Induktivitäten der Leiter kompensiert werden, sondern es treten nur Wirkleistungsverluste auf. Ebenso treten keine sekundären Effekte wie z. B. die Stromverdrängung aufgrund des Skin-Effekts auf, welche ebenfalls zusätzliche Verluste verursachen oder größere Leiterquerschnitte bzw. geeignete Leitergeometrien bedingen.

Einerseits sind zwar die Kosten zum Aufbau und Betrieb der HGÜ-Systeme höher, da neben den Stromrichtern zur Gleich- und Wechselrichtung zusätzliche Filteranlagen benötigt werden [Fri-16a, van-19]. Andererseits entstehen vor allem bei langen Übertragungsstrecken geringere Folgekosten, die aufgrund der zusätzlichen Übertragungsverluste der Drehstromübertragung verursacht würden und im Falle der HGÜ entfallen. Ab Freileitungslängen von ca. (500 ... 1.000) km stellt daher die HGÜ die wirtschaftlich sinnvollste Variante dar [Sch-07]. Bei langen Kabelstrecken wäre deren Blindleistungsbedarf unter Wechselspannung bereits bei Kabellängen ab (40 ... 80) km zu hoch, weshalb vor allem für die Offshore-Anbindung über Seekabel die HGÜ die einzig realisierbare Elektroenergieübertragungstechnologie darstellt [Arr-98, Sch-07].

Der Netzentwicklungsplan 2030 sieht dabei in Deutschland einen Neubau von Gleichstrom-Trassen mit einer Gesamtlänge von mehr als 3000 km vor [50H-19]. Neben der Offshore-Anbindung sind u. a. vier große HGÜ-Systeme mit einer Betriebs-Gleichspannung bis zu ± 525 kV geplant, um die im Norden Deutschland erzeugte Energie in die Verbraucherzentren im Süden zu übertragen: der *SuedLink* mit einer Übertragungsleistung von insgesamt 4 GW sowie *A-Nord*, *Ultranet* oder der *SuedOstLink* mit einer Übertragungsleistung von jeweils 2 GW [50H-19].

In Asien und Südamerika sind seit mehreren Jahrzehnten bereits HGÜ-Systeme mit einer Gleichspannung von bis zu ± 600 kV im Betrieb, wie z. B. die Anbindung des Itaipu-

Wasserkraftwerks mit einer Übertragungsleistung von 6,3 GW [CIG-17]. Systeme mit weit höheren Gleichspannungen bis zu ± 1100 kV sind zudem in Planung [CIG-17, Wim-18].

In HGÜ-Systemen gewinnen selbstgeführte Stromrichter – Voltage-Sourced Converter (VSC) – mit modularer Multileveltechnik – Modular Multilevel Converter (MMC) – in den letzten Jahren an Bedeutung (sog. HGÜ-PLUS). Durch die Nutzung der VSC können elektrische Verluste des HGÜ-Systems signifikant reduziert werden, das Beherrschen externer Fehler wird vereinfacht sowie die Filterung von Oberschwingungsanteilen wird weniger aufwändig oder kann ganz entfallen. Zudem ergibt sich die Möglichkeit eines Schwarzstartes, was vor allem bei Offshore-Stromrichterstationen von Vorteil ist. Je nach Übertragungssystem werden dabei MMC mit Halb- oder Vollbrückenmodulen eingesetzt (Bild 2.1a). Dabei werden vorrangig IGBT-Leistungshalbleiter verwendet, da sie schaltbar und somit gezielt steuerbar sind. Diese werden vorzugsweise bei HGÜ-Verbindungen mit Freileitungen eingesetzt. Mithilfe der MMC-Technik ist zudem ein *bipolares Stellen* möglich, d. h. die Leistungsflussumkehr erfolgt durch Stromrichtungsumkehr. [Dor-14]

Aufgrund der jedoch begrenzten Leistung der VSC wird vorrangig die klassische HGÜ mit fremd- bzw. netzgeführten Stromrichtern – Line-Commutated Converter (LCC) – eingesetzt (Bild 2.1b), wenn hohe Leistungen übertragen werden müssen [CIG-17, Cra-18]. Hintergrund sind die geringeren Verluste in den Stromrichter-Stationen mit LCC-Technik im Vergleich zu den verzweigten Strompfaden in VSC-Systemen. Die Leistungsflussumkehr bei LCC-Systemen erfolgt im Gegensatz zur VSC-Technik über Spannungsumpolung durch einen Polaritätswechsel. Dies kann durch die unter Gleichspannungsbelastung aufgebauten Raumladungsschichten aufgrund der durch die Raumladungen beeinflussten elektrischen Feldstärkeverteilung während der Spannungsumkehr jedoch zu erhöhten Beanspruchungen führen [Lie-09, Küc-15, Bac-16a, Küc-17].

Bild 2.1: Beispiele von Brückenschaltungen der VSC- und LCC-Technik

Das Bindeglied zwischen den Netzen der HDÜ und HGÜ bilden die Stromrichtertransformatoren in den Konverterstationen der HGÜ. Im Gegensatz zu klassischen Leistungstransformatoren erfahren die Stromrichtertransformatoren jedoch nicht nur eine Wechsel-

spannungsbelastung. Aufgrund der Kaskadierung der Stromrichtermodule und der somit nicht geerdeten Ventilseite der Transformatoren treten dabei spezielle Belastungen auf. Ventilseitig tritt bei der klassischen HGÜ mit LLC-Technik je nach genutzter Netztopologie oder bei Vorhandensein von separaten Erdungspunkten in der Übertragungsstruktur [Tei-14, Cra-18] eine überlagerte Spannungsbelastung aus einer Gleich- und einer phasenverschobenen, verzerrten Wechselspannung auf [CIG-10b, CIG-15, Bac-16a, Küc-17]. Diese hat nicht nur eine Verschiebung des Arbeitspunktes im magnetischen Kreis zur Folge, sondern auch eine veränderte Beanspruchung des Isoliersystems im Vergleich zur Wechselspannungsanwendung [Sch-10b]. Der überlagerte Gleichspannungsanteil stellt dabei eine besondere Belastung für das Öl-Papier-Isoliersystem dar [Sch-10b, Lie-09, Bac-16a, Sch-16, Küc-17, Rum-19]. Vor allem die Ausbildung und Akkumulation von Raumladungen an Grenzflächen führt zu einer besonderen Beanspruchung, der in Untersuchungen und bei der Dimensionierung Rechnung getragen werden muss.

Aufgrund der überlagerten Belastung aus Gleich- und Wechselspannung werden die Stromrichtertransformatoren daher bei den reinen Spannungsformen unter Wechsel- und Gleichspannung geprüft. Die reine Gleichspannungsbelastung stellt an homogenen oder schwach inhomogenen Anordnungen aufgrund der Raumladungsbildung die stärkere Beanspruchung des Isoliersystems dar [Sch-67]. Transiente Überspannungen sollen durch Stoßspannungsprüfungen abgebildet werden. Durch die reine Spannungsbelastung unter Beaufschlagung der jeweiligen Prüfpegel soll sicher gestellt werden, dass das Isoliersystem den im Betrieb auftretenden Spannungsbelastungen standhält [CIG-10a, CIG-10b, Fri-15]. Je nach genutzter Konvertertopologie können zudem innere und äußere Überspannungen durch Blitzschlag oder Fehlerereignissen der Stromrichter auftreten. Auch wenn diese Tests in den gültigen Prüfrichtlinien bisher nicht vorgegeben sind, rückt bei der Untersuchung des Verhaltens der Stromrichtertransformatoren die Prüfung mit überlagerten Spannungsbelastungen aus Gleich- und Stoßspannung mehr und mehr in den Fokus.

2.2 Das Öl-Papier-Mischdielektrikum und dessen Zusammensetzung

Das Isoliersystem der Leistungstransformatoren – sowohl der HDÜ als auch der HGÜ – ist i. d. R. als Öl-Papier-Isoliersystem ausgeführt. Als flüssiges Isoliermedium werden seit mehreren Jahrzehnten hauptsächlich niederviskose Isolieröle auf Mineralölbasis erfolgreich eingesetzt. Als Nebenprodukt der Erdölraffination ist das mineralische Isolieröl einfach herstellbar. Es ist daher sehr günstig und weist im trockenen Zustand sehr gute dielektrische Eigenschaften auf, wie z. B. eine hohe elektrische Festigkeit und eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Aufgrund der geringen Viskosität und der guten Wärmeleitfähigkeit dient es zudem als Kühlmedium. Durch die Zusammensetzung des Öls sowie durch Beimengungen können die dielektrischen Eigenschaften wiederum beeinflusst werden [Küc-17].

Entsprechend der *Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen* sind Mineralöle als deutlich wassergefährdend in die Wassergefährdungsklasse WGK 2 eingestuft [Bun-17]. Durch diese Auflagen sind in Abhängigkeit des Standortes der Anlage

(z. B. Offshore) geeignete Maßnahmen bei der Aufstellung der Transformatoren zu treffen – u. a. die Befestigung und Abdichtung von Bodenflächen mit entsprechendem Rückhaltevermögen für austretende Flüssigkeiten. Als umweltfreundliche Alternative werden natürliche oder synthetische Ester eingesetzt, die ebenfalls gute dielektrische Eigenschaften aufweisen und unempfindlicher gegen gelöstes Wasser sind. Die Untersuchung der Eignung dieser Flüssigkeiten zur Anwendung in der HGÜ ist Gegenstand aktueller Forschung [Jin-14, Vah-16, Vah-17, Rum-19].

Isolierpapiere aus Pressspan oder Kunststoffen (z. B. Aramidfasern) sollen als festes Dielektrikum im Transformator das Isoliervermögen verbessern und werden u. a. an hoch beanspruchten inhomogenen Geometrien eingesetzt, um Isolierabstände verringern zu können. Ebenso werden Pressspan oder Kunststoffe für mechanische Aufgaben eingesetzt, wenn der Einsatz metallischer Strukturen nicht möglich ist. Die Verwendung von Pressspan bedingt jedoch dessen Imprägnierung, um die produktionsbedingt vorhandenen Hohlräume zwischen den Papierfasern mit dem jeweiligen flüssigen Isoliermedium zu füllen und so die elektrische Festigkeit zu steigern. Weiterhin wird die elektrische Feldstärkeverteilung bei Transienten oder Wechselspannungsbelastung durch die verringerte Permittivität vergleichmäßigt und zudem die elektrische Leitfähigkeit erhöht, was bei Gleichspannungsbelastung die Beanspruchung des Isoliersystems reduziert. Vorrangig werden Isolierpapiere auf Zellulosebasis eingesetzt, da sie aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden und gute dielektrische und mechanische Eigenschaften besitzen. Um auch bei hohen Betriebstemperaturen der Leistungstransformatoren noch belastbar zu sein, kommen sog. thermostabilisierte Isolierpapiere – Thermally Upgraded Paper (TUP) – zum Einsatz. Des Weiteren werden Aramidpapiere eingesetzt, welche ebenso sehr gute elektrische Eigenschaften besitzen und zusätzlich eine höhere thermische Stabilität aufweisen. [Mos-79b, Mos-87]

Beim Isoliersystem der Stromrichtertransformatoren der HGÜ handelt es sich vorrangig um ein Mischdielektrikum aus mineralischem Isolieröl und Pressspan auf Zellulosebasis. Vor diesem Hintergrund beschränkt sich diese Arbeit daher auf die Öl-Papier-Isolierung aus mineralischem Isolieröl und Pressspan-Isolierpapieren, deren grundlegender Aufbau und deren dielektrische Eigenschaften im Folgenden vorgestellt werden.

2.2.1 Mineralisches Isolieröl

Mineralische Isolieröle sind ein Stoffgemisch aus Kohlenwasserstoffen, welches aus der Raffination und Hydrierung von Erdöl gewonnen wird. Dessen Hauptbestandteile sind Paraffine und Naphthene, in geringen Mengen kommen zudem Aromaten und Olefine vor (Bild 2.2) [Bey-92, Küc-17]. Zusätzlich wird es mit verschiedenen Beimengungen (Inhibitoren) versehen, um je nach Einsatzzweck gezielte Eigenschaften für eine bessere thermische Beständigkeit oder eine hohe Alterungsstabilität einzustellen. Hauptelemente des Isolieröls sind demnach Kohlenstoff mit Anteilen um (80 ... 87) % sowie Wasserstoff mit Anteilen von (10 ... 14) %, in geringsten Mengen sind ebenfalls Schwefel, Sauerstoff und Stickstoff enthalten [Bey-92].

Bild 2.2: Strukturformeln der Hauptbestandteile des mineralischen Isolieröls nach [Ekl-10]

Paraffine sind gesättigte, gerad- (Paraffine) und verzweigt-kettige (Isoparaffine) Kohlenwasserstoffe ohne Mehrfachbindungen, d.h. alle Kohlenstoffketten sind mit der maximalen Anzahl an Wasserstoff-Atomen belegt. Sie weisen aufgrund der stabilen C-C- und C-H-Verbindungen eine hohe chemische und elektrische Festigkeit auf. Naphthene sind gesättigte, ringförmige Kohlenwasserstoffe und wie auch die Paraffine aufgrund ihrer stabilen Bindungen elektrisch fest und chemisch beständig. Paraffine und Naphthene sind unpolar und nur gering elektrisch leitfähig, da sich aufgrund der stabilen Einfachbindungen die symmetrischen Ladungsschwerpunkte des Moleküls aufheben [Bac-16a, Küc-17]. Durch ihre chemische Beständigkeit sind sie sehr alterungsbeständig. Aufgrund ihrer schweren Löslichkeit mit Wasser besteht jedoch die Möglichkeit, dass sich Wasser im Öl einlagern kann. Der starke, polare Dipolcharakter des Wassers führt zu einer deutlichen Polarisierbarkeit der Isolierflüssigkeiten, was wiederum zu einer deutlichen Verringerung der elektrischen Festigkeit der Isolierflüssigkeit führen kann. Wird der Sättigungswassergehalt des Öls überschritten, können sich auch Wassertröpfchen ausbilden, die das Isoliervermögen weiter herabsetzen können. Abhängig vom Anteil der Naphthene oder Paraffine im Isolieröl spricht man demnach von paraffinischen, naphthenbasischen oder gemischtbasischen Isolierölen [Bey-92]. [Küc-17]

Um die Löslichkeit von Wasser zu verbessern, werden der Emulsion des Isolieröls Aromaten hinzugefügt, welche Wassermoleküle und Wasserstoff binden können. Ungelöst im Öl vorliegendes Wasser würde bereits ab einem Anteil von 20 ppm dessen elektrische Festigkeit signifikant reduzieren [Kah-88]. Aromatische Verbindungen bestehen aus Kohlenwasserstoffen mit ungesättigten Doppelbindungen, die in Benzolringen angeordnet sind. Nach außen hin sind Aromaten unpolar. Aufgrund der im Benzolring vorhandenen, delokalisierten Elektronen ist jedoch davon auszugehen, dass sich diese Elektronen von ihren Molekülen lösen können bzw. zusätzliche Elektronen angelagert werden können, sodass aromatische Verbindungen zum Leitungsprozess im Isolieröl beitragen können [Bac-16a]. Olefine sind ketten- oder ringförmige Moleküle mit ebenfalls ungesättigten Doppelbindungen, die somit polar und chemisch instabil sind und ebenfalls zum Leitungsprozess beitragen können.

Durch den Eintrag von Sauerstoff, Wasser, Wärme oder ionisierender Strahlung wie UV-Strahlung oder infolge von Teilentladungen kann sich die Isolierflüssigkeit durch verschiedene Oxidationsmechanismen chemisch zersetzen und damit altern [Jud-12, Küc-17].

Aromaten oder Olefine beschleunigen diesen Vorgang, da sie über eine Oxidation mit polaren Molekülen chemisch reagieren können oder Ionen und Moleküle durch das Aufbrechen der Doppelbindungen anlagern können. Somit setzen sie die Alterungsbeständigkeit des Isolieröls deutlich herab, weshalb sie möglichst nur in geringen Mengen im Isolieröl vorhanden sein sollten [Küc-17]. Durch die Zugabe von Inhibitoren hingegen kann die Alterungsbeständigkeit des Isolieröls wiederum verbessert werden. Aus diesem Grund sollte der Eintrag von Wasser und Sauerstoff in die Ölisolierung eines Transformators sowohl durch ausreichende Trocknung im Herstellungsprozess als auch durch Trockenvorlagen und einen vollständigen Luftabschluss vermindert werden. Reaktionsprodukte der Oxidation sind Wasser, Sauerstoff und organische Säuren. Deren funktionelle Gruppe – die Carboxylgruppe – wirkt zwar nach außen hin elektrisch neutral, jedoch bewirkt die Elektronenaffinität des Sauerstoffs, dass das Wasserstoffproton leicht abgegeben werden kann und sich somit Ionen bilden. Infolgedessen steigt die elektrische Leitfähigkeit des Öls irreversibel an und dessen elektrische Festigkeit sinkt. [Bac-16a, Küc-17]

2.2.2 Pressspan und Isolierpapier auf Zellulosebasis

Die Zellulose bildet den Hauptbestandteil des häufig in der Öl-Papier-Isolierung eingesetzten Pressspans, welches sowohl als vergleichsweise dünne Isolierpapiere als auch in den zu stabilen und dicken Strukturen verpressten Pressboards bzw. Transformerboards oder geschichtetem Blockspan Anwendung findet. Zellulose ist ein Naturstoff und wird aus den Pflanzenfasern von Baumhölzern gewonnen. Aufgrund der langen Faserstruktur werden dabei vorrangig Nadelhölzer genutzt [Mos-79b, Sch-16].

Aus dem Grundbaustein der Zellulose, dem Zuckermonomer D-Glucose, werden durch Polykondensation große Zellulosemoleküle mit sehr hohen Polymerisationsgraden – d. h. einer hohen Anzahl an Monomeren im Zellulose-Makromolekül – gebildet (Bild 2.3). Über Wasserstoffbrückenbindungen werden so nahe beieinanderliegende Zellulosestränge verbunden. [Mos-79b, Sch-16]

Bild 2.3: Ausschnitt der Strukturformel eines Zellulosepolymers als Grundstoff des Pressspans nach [Mos-79b]

Eine weitere Komponente ist die Hemizellulose, welche eine Mischung verschiedener Zuckermonomere darstellt. Diese ist wie auch die Zellulose zu einem Polymer verknüpft, deren Zusammensetzung aber je nach Holz- und Zellart variiert [Sch-10a]. Die Polymere aus Hemizellulose haben einen geringeren Polymerisationsgrad und weisen wegen ihrer amorphen Struktur eine erhöhte Affinität zu Wasser auf [Sch-16]. Jedoch bildet es durch eine

erhöhte Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen größere Zellulosestrukturen und erhöht somit die mechanische Festigkeit des Pressspans. [Mos-79b, Sch-16]

Als weiterer natürlicher Bestandteil aus der Pflanzenzelle ist Lignin in geringen Mengen enthalten und verkittet die Zellulosefasern miteinander zu einem stabilen Faserverbund [Mos-79b]. Dessen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften, insbesondere die Leitfähigkeit des Pressspans, ist jedoch noch nicht gänzlich geklärt und Gegenstand der Forschung [Sch-16].

Pressspan ist jedoch aufgrund der Vielzahl an Hydroxygruppen (OH-Gruppen) in den Zellulosemolekülen bzw. an den Oberflächen der Fasern hygroskopisch, wobei Wassermoleküle an die Fasern gebunden werden können. Pressspan aus Zellulose nimmt folglich stets Feuchtigkeit aus dem umgebenden Öl auf [Küc-17]. [Sch-16]

Bei der Pressspanherstellung werden Isolierstoffe mit möglichst hohem Zellulosegehalt angestrebt, da dies zu geringeren Leitfähigkeiten und höheren elektrischen Festigkeiten des Pressspan-Isolierpapiers führt [Sch-16]. Isolierpapiere mit Stärken von wenigen 100 Mikrometern und Transformerboard mit Dicken von bis zu mehreren Millimetern sind aufgrund der Verbundstruktur der Zellulosefasern mit Durchmessern von einigen zehn Mikrometern und Längen von wenigen Millimetern [Sch-16] jedoch keine homogene Masse. Die Zellulosefasern sind mehrfach geschichtet, weshalb sich bei der Herstellung eine prozessbedingte, leichte Vorzugsrichtung in Maschinenrichtung [Mos-79b, Sch-16] ergibt. Dabei ist es möglich, dass sich diese inhomogene Faserstruktur auch auf die Leitfähigkeit des Pressspans auswirkt [Sch-16] und lokal variierende Ladungskonzentrationen bewirken. Um Luft einschließen in den Hohlräumen der Faserstruktur zu vermeiden und die Wassereinlagerung zu reduzieren, ist die Vakuumtrocknung und -imprägnierung mit Isolieröl essentiell für die hohe elektrische Festigkeit des Isolierpapiers und damit das Isoliervermögens des Isoliersystems.

2.3 Dielektrische Eigenschaften des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleichspannungsbelastung

2.3.1 Ladungsträgerspezies und deren Verhalten unter Gleichspannungsbelastung

Die im Öl-Papier-Mischdielektrikum stattfindenden und in der zahlreichen Literatur beschriebenen Prozesse wie z. B. die Aufladung von Grenzflächen unter Gleichspannungsbelastung durch Ladungsakkumulation oder die vorherrschenden Leitfähigkeitsmechanismen (vgl. Abschnitt 2.3.3) werden aufgrund ihres physikalischen Hintergrundes mithilfe bewegender und durch das Isoliermedium driftender Ladungsträger beschrieben und erklärt. Abhängig von deren Herkunft werden in der Literatur verschiedene Ladungsträgerspezies beider Polaritäten unterschieden. Dabei werden sie in öleigene, d. h. im Öl vorhandene bzw. im Ölvolumen durch Dissoziation gebildete Anionen und Kationen – sog. intrinsische Ladungsträger – sowie von den Elektroden emittierte, injizierte Ladungsträger, d. h. Elektronen (injizierte Anionen) und Löcher (injizierte Kationen), unterteilt [Cas-95, Sha-11, Son-12, Hao-15, Bac-16a, Sch-16, Den-11, Küc-17, Rum-19, Zha-19a]. Intrinsische und injizierte La-

Leitfähigkeit des Isolieröls bzw. des ölprägnierten Isolierpapiers aus und beeinflussen somit in unterschiedlicher Art und Weise die Feldstärkeverteilung im Mischdielektrikum.

Intrinsische Ladungsträger

Nach aktuellem Stand der Erkenntnisse wird angenommen, dass die intrinsischen Ladungsträger durch die Dissoziation der polaren Bestandteile des mineralischen Isolieröls gebildet werden und somit u. a. durch gelöstes Wasser, Verunreinigungen sowie infolge der Mineralölalterung gelöste organische Salze oder weitere Alterungsprodukte entstehen können [Bac-16a, Küc-17]. Die Dissoziation wird gemäß des *Wien-Effektes* [Wie-29] durch den Einfluss eines elektrischen Feldes verstärkt [Ons-34]. Da die Dissoziation starker Molekülbindungen hohe Feldkräfte bedingt, ergibt sich daraus eine Feldstärkeabhängigkeit der Generation intrinsischer Ladungsträger.

Es wird dabei angenommen, dass sich an den gebildeten Ionen polare Bestandteile des Mineralöls anlagern, welche aufgrund ihrer funktionellen Gruppen einen Dipolcharakter aufweisen und demnach eine Solvatisierung stattfindet [Ham-05]. Diese polaren Bestandteile können z. B. aus Dissoziationsprodukten wie den organischen Säuren aber auch aus gelösten Metallionen bestehen. Somit können sich von Ölbestandteilen umgebene Mizellen ausbilden (Bild 2.4) [Bac-16a].

Die funktionellen Gruppen entstehen vorrangig an instabilen aromatischen Verbindungen, aber auch aus naphthenischen oder paraffinischen Molekülen durch Sauerstoffeintrag. Dabei ist anzunehmen, dass die äußere Hüllschicht dieser Mizellen aus CH_2 -Ketten gebildet wird und damit isolierend und elektrisch neutral wirkt [Bac-16a]. Neben der Bildung intrinsischer Ladungsträger durch die Dissoziation von polaren Bestandteilen ist die reine Dissoziation von unpolaren Ölbestandteilen aufgrund der hohen Festigkeit der Paraffine und Naphthene sowie der starken Bindungskräfte deren Moleküle aus chemischer Sicht unwahrscheinlich. Jedoch ist eine Dissoziation unter der Wirkung eines hohen elektrischen Feldes nicht vollends auszuschließen.

Dabei ist auszugehen, dass die Dissoziation der Ölbestandteile zeitabhängig ist und mit der Zeit abnimmt. Somit liegen bei hohen elektrischen Feldstärken fast alle dissoziierbaren Bestandteile in dissoziierter Form im Isolieröl vor [Bac-16a] und es bildet sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Dissoziation und der möglichen Rekombination der intrinsischen Ladungsträger aus.

Der Ursprung der intrinsischen Ladungsträger sowie deren Generationsmechanismen sind jedoch zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht vollständig geklärt. Deren differenzierte Bestimmung gestaltet sich zudem sehr schwierig, da die mineralischen Isolieröle Stoffgemische variierender Zusammensetzungen sind.

Infolge der Kraftwirkung auf die mizellischen Ionen durch ein anliegendes elektrisches Feld driften die gebildeten Mizellen zur Gegenelektrode. Aufgrund der isolierenden Hüllschicht wird die Rekombination der intrinsischen Ladungsträger sowohl mit intrinsischen oder injizierten Ladungsträgern als auch an der Gegenelektrode erschwert. Die intrinsischen La-

ladungsträger können damit an der Gegenelektrode akkumulieren und stabile Oberflächenschichten ausbilden (Bild 2.4). Sie werden daher i. d. R. als *Heterocharges* entsprechend ihrer entgegengesetzten Polarität im Vergleich zur angrenzenden Elektrode bezeichnet. [Bac-16a]

Bild 2.4: Akkumulierte, anionische Mizellen an der metallischen Anode nach [Bac-16a]
– δ : Dipolmoment

Aufgrund der Akkumulation der intrinsischen Ladungsträger bildet sich eine sog. Doppelschicht nach Helmholtz [Hel-79] aus [Lew-94, Ham-05]. Die geringen Abstände zwischen den akkumulierten Ladungsträgern und der metallischen Elektrode führen zu hohen Feldstärken, wodurch die lokale Feldstärke im Nahbereich vor der Gegenelektrode stark angehoben wird [Mal-36, Fel-85, Ham-05, Bac-16a]. Im homogenen Grundfeld einer Plattenanordnung kann sich aufgrund des Raumladungseinflusses somit eine „*innere Inhomogenität*“ [Bac-16a] ausbilden. Da die Konzentration der intrinsischen Ladungsträger stark vom Alterungszustand des Öls und dem Vorhandensein polarer Stoffe abhängt, nimmt dieser Effekt mit zunehmender Alterung des Öls zu [Gäf-86]. Nachgewiesen wurde dieser Effekt ebenfalls unter Zugabe von künstlichen Verunreinigungen mithilfe von Kerr-Effekt-basierten Feldstärkemessungen [Hik-96].

Injizierte Ladungsträger

Injizierte Ladungsträger werden an der Elektroden-Öl-Grenzfläche unter hohen Feldstärken durch Elektronenanlagerung oder -ablösung an neutralen Molekülen der Ölbestandteile gebildet [Küc-17]. In Analogie zu den Leitungsprozessen in Halbleitern werden diese daher sinngemäß als Elektronen oder Löcher bezeichnet. Da injizierte Ladungsträger direkt an der Elektrode generiert werden, haben sie zwangsläufig dieselbe Polarität wie die injizierende Elektrode und wirken demnach als *Homocharges*. Die Elektroneninjektion aus der Elektrode wird dabei durch die Austrittsarbeit der Elektronen begrenzt. Ein emittiertes Elektron muss demnach eine hinreichend hohe Geschwindigkeit aufweisen, um den Anziehungskräften der positiven Atomrümpfe des Atomgitters zu entkommen und aus dem Atomverbund austreten zu können [Bac-16a]. Bei der Elektronenanlagerung werden somit die frei beweglichen Valenzelektronen des Elektronengases der metallischen Elektrode durch hohe Feldstärken herausgelöst und an ein neutrales Molekül angelagert [Fas-05].

Die Existenz freier Elektronen ist dabei sehr unwahrscheinlich, da die Anlagerung eines Elektrons an ein neutrales Molekül mit einem Anstieg der Entropie verbunden ist [Fel-85]. Diese Anlagerung an den Ölmolekülen ist jedoch relativ instabil. Dies führt dazu, dass die Ladungsträger durch Elektronenhopping, -trapping und -detrapping zwischen den Molekülen springen können [Min-71, Bel-07, Kwo-19]. Getrieben durch elektrostatische Feldkräfte aufgrund der vorherrschenden elektrischen Feldstärke können sie somit zu den Leitungsprozessen im flüssigen Dielektrikum beitragen. Es kann demnach weiterhin davon ausgegangen werden, dass injizierte Ladungsträger eine sehr hohe Mobilität aufweisen, die dabei größer als die der intrinsischen Ladungsträger sein kann [Lew-94, Kis-99, Sha-11, Yan-12b, Bac-16a, Rum-19]. Die instabile Bindung führt somit zu der Eigenschaft, dass die injizierten Ladungsträger schnell an der Gegenelektrode rekombinieren können [Bac-16a, Sch-16].

Bei Elektronen und Löchern wirken dabei ähnliche Injektionsmechanismen, welche auf der Elektronenemission aus dem Metall ins Vakuum basieren. Nach Schottky wird die Elektronenemission über einen Potentialtrichter visualisiert [Sch-23]. Elektronen, deren Energie hinreichend groß ist, können den Rand des Trichters passieren und entweichen. Die dazu notwendige Energie können Elektronen durch thermische Energie (thermische Emission), hohe elektrische Feldstärken (Feldemission) oder durch Sekundäreffekte aufnehmen, wie das Erhöhen der Energie durch ein auftreffendes Photon (Photoemission) oder geladenes Teilchen (Sekundäremission) [Fas-05]. Der Rand des Trichters, also die notwendige Energie zum Überwinden dieser Barriere und Entweichen aus dem Atomgitter, ist demnach auch stark von der wirkenden, elektrischen Feldstärke (Schottky-Effekt) oder der Temperatur des Metalls abhängig [Fas-05]. Höhere elektrische Feldstärken oder höhere Temperaturen erleichtern das Entweichen von Elektronen und biegen den Rand der Potentialbarriere herunter bzw. verringern diese um den Betrag s (Bild 2.5) [Ger-74, Bey-92]. Die notwendige Austrittsarbeit zum Überwinden der notwendigen Potentialdifferenz sinkt somit. Diese Theorie nach Schottky ist in der Literatur jedoch infrage gestellt worden. Emissionsprozesse können demnach bereits bei Feldstärken stattfinden, die um ein Vielfaches geringer sind, als sie von Schottky berechnet wurden [Fur-05]. Somit käme dieser Mechanismus womöglich vorrangig beim Entladungseinsatz an der Elektrode zum Tragen.

Bild 2.5: Schematische Visualisierung des Trichters nach [Sch-23] mit einer Verringerung der Energiebarriere von a nach c – s : Größe der Absenkung

Die notwendige Austrittsarbeit der Elektronen ist dabei ebenfalls abhängig von der Art des Metalls oder der Legierung bzw. der daraus resultierenden Kristallstruktur sowie der Ober-

flächenrauheit der Elektrode, welche die lokale Feldstärke vor der Elektrode durch Feldüberhöhungen beeinflusst [Tho-75, Fas-05]. Oxidschichten auf der Oberfläche der metallischen Elektrode besitzen ebenfalls einen Einfluss, da sie durch ihre Haftstellen Ladungsträger mit der Isolierflüssigkeit austauschen können und aufgrund der sich ausbildenden elektrochemischen Doppelschichten die Austrittsarbeit herabsenken [Küc-17]. Dies führt somit zu den gemessenen, unterschiedlichen Leitfähigkeiten und damit zu unterschiedlichen Injektionsraten in Abhängigkeit des Elektrodenmaterials [Rum-19, Zha-19b].

Einen weiteren Erklärungsansatz liefert ein quantenmechanischer Ansatz nach Fowler und Nordheim [Fow-28]. Demnach können Elektronen des Metalls unter dem Einfluss eines hohen elektrischen Feldes durch diese Potentialbarrieren hindurchtunneln. Dazu wird angenommen, dass die Barriere höher als die kinetische Energie eines Elektrons ist und diese somit nicht überwunden werden kann. Die Potentialbarriere wird durch das hohe elektrische Feld jedoch verengt [Bey-92, Fas-05, Fur-05]. Die Elektronen können somit in die Barriere eindringen und können diese in den meisten Fällen durchtunneln und damit passieren [Raz-03].

Zwar ist eine Übertragung der genannten Theorien zur Injektion von Ladungsträgern in Vakuum auf die Injektion in Isolierflüssigkeiten nicht direkt möglich, jedoch lassen sich Gemeinsamkeiten finden und ableiten. Nach Felici lagern sich unter der Wirkung des elektrischen Feldes die mizellenartigen intrinsischen Ladungsträger an der Elektrode an [Fel-85]. Durch ihre entgegengesetzte Ladung erhöhen diese lokal die elektrische Feldstärke und rufen Influenzladungen in der äußeren Metallschicht hervor, was zur Ausbildung der genannten Doppelschicht nach Helmholtz führt [Fel-85, Lew-94] (Bild 2.6).

Bild 2.6: Beziehung zwischen Elektronenenergie und Distanz für eine metallische Oberfläche im Fluid unter elektrischer Feldstärkebeanspruchung nach [Fel-85] – W : Austrittsarbeit; s : Verringerung der Barriere nach Schottky

Durch die lokal erhöhte elektrische Feldstärke wird die Potentialbarriere nach Schottky um den Betrag s verringert und so der Energiebedarf der Elektronen geringer, um aus der Elektrode auszutreten. Ohne die feldverstärkende Wirkung der akkumulierten Mizellen wären die Potentialbarrieren deutlich höher und damit die Injektionsraten aufgrund der höheren

benötigten Austrittsenergie geringer. Zudem wird nach Fowler-Nordheim die Potentialbarriere schmäler und Elektronen können vermehrt durch diese Barriere tunneln. Wird die Elektrode von einem Medium mit geringem Akzeptorniveau umgeben, wird die benötigte Austrittsarbeit W weiter verringert. Elektronen können somit leichter durch die Doppelschicht aus der Kathode ins umgebende Volumen emittiert werden. Über einen ähnlichen Mechanismus werden ebenfalls die positiv geladenen Löcher injiziert, indem sich Elektronen aus dem Dielektrikum lösen und in die metallische Anode tunneln können [Alj-19]. Dieser Effekt, welcher durch die Akkumulation von *Heterocharges* und deren Einfluss auf die lokale Feldstärke die Injektion von Ladungsträgern beeinflusst, wird auch als *Malter-Effekt* [Mal-36] bezeichnet. Die Injektion von Ladungsträgern ist aufgrund der beschriebenen Mechanismen stark von der lokalen Feldstärke an Elektroden abhängig und wird aufgrund des *Malter-Effekts* somit stark von der Akkumulation von intrinsischen *Heterocharges* beeinflusst. Da angenommen wird, dass bei hohen Feldstärken der Großteil der intrinsischen Ladungsträger durch Dissoziation bereits gebildet wurde, dominiert unter diesen Umständen die Injektion den Leitfähigkeitsprozess im Isolieröl [Fel-85]. Aus diesem Grund wird die Injektion von Elektronen und Löchern stark von der Zusammensetzung des verwendeten Isolieröls beeinflusst und erreicht für verschiedene Isolierflüssigkeiten bei hohen Feldstärken einen Grenzwert [Gab-19a].

Die Injektion von Ladungsträgern ist dabei stark polaritätsabhängig, wobei die Injektion von Elektronen aus der Kathode vor allem bei hohen Feldstärken stärker ausgeprägt ist als die Injektion von Löchern aus der Anode (Bild 2.7) [Bac-16b, Gab-18a]. Wie im weiteren Verlauf gezeigt werden soll, wird die Leitfähigkeit vorrangig durch die Ladungsträgerinjektion verursacht (vgl. Abschnitt 2.3.5), d. h. es dominieren Elektronenübergänge aus der Doppelschicht an der Metallgrenze in die Flüssigkeit [Fel-85, Bac-16a]. Es wird auch deutlich, dass vor allem bei hohen nominellen Feldstärken die Injektion überproportional zunimmt und dadurch der stationäre Strom bzw. die gemessene elektrische Leitfähigkeit steigt und damit über mehrere Größenordnungen variiert [Lie-09, Küc-15, Bac-16b, Küc-17, Gab-18a].

Bild 2.7: An einer schwach inhomogenen Anordnung gemessene, polaritätsabhängige Injektionsraten Γ bezogen auf die Oberfläche A_{Inj} der injizierenden Elektrode in Abhängigkeit zur lokalen, geometriebedingten Feldstärke an der Elektrode E_{Inj} nach [Bac-16b]

In Öl-Papier-Mischdielektrika wird angenommen, dass sich durch den Tränk- und Imprägnierprozess bei einer an der Elektrode anliegenden Papierisolierung ein Ölfilm zwischen Elektrode und Papier bildet. Demzufolge findet keine direkte Injektion in das ölprägnierte Papier statt, sondern Ladungsträger werden erst in das Isolieröl injiziert und driften anschließend in die anliegende Papierschicht. Die Injektion würde somit durch das an der Elektrode anliegende Papier nicht direkt beeinflusst und verhält sich somit ähnlich wie in reinem Öl [Bac-16a]. Aufgrund der geringen Ladungsträgermobilitäten und der damit verbundenen Ladungsträgerakkumulation im Papier wird jedoch die lokale Feldstärke in diesem Ölfilm beeinflusst. Somit hat eine Papierisolierung an der Elektrode keine direkte Wirkung auf die Injektion von Ladungsträgern, sondern beeinflusst diese nur indirekt durch die lokal veränderte Feldstärke im Ölfilm bzw. an der isolierten Elektrode [Sch-16, Rum-19]. Im Öl-Papier-Mischdielektrikum trägt die Injektion von Ladungsträgern jedoch nicht nur zu den Leitfähigkeitsmechanismen bei vergleichsweise geringen Feldstärken bei. Die Injektion von Ladungsträgern spielt vor allem bei sehr hohen Feldstärken eine Rolle und wird somit häufig zu Beschreibung und Nachbildung der Entladungsentwicklung im mineralischen Isolieröl betrachtet [Li-16, Den-11, Yos-19, Zou-19b].

2.3.2 Polarisierung von Dielektrika und dielektrischen Grenzflächen

Als Polarisierung eines Dielektrikums wird im Allgemeinen die Verschiebung oder Ausrichtung von Ladungen oder Ladungsträgern bezeichnet, die aufgrund des anliegenden und auf sie wirkenden elektrischen Feldes eine Kraftwirkung erfahren. Dies kann u. a. die einfache, lokale Ausrichtung von Ladungen (vorrangig in festen Isolierstoffen) oder die Verschiebung von ortsfesten Ladungen sein [Ger-74, Sch-74]. Jeder Polarisationsmechanismus wird dabei durch dessen Relaxationszeit τ_R charakterisiert, nach der das Ausrichten der Ladungen und damit der jeweilige Mechanismus abgeschlossen ist. Je nach Art der Ladungsverschiebung oder -ausrichtung wird allgemein zwischen verschiedenen Mechanismen der *Verschiebung*- bzw. *Deformationspolarisation* und der *Orientierungspolarisation* unterschieden.

Zur Deformationspolarisation zählt zum einen die Verschiebung von Elektronen der Atomhülle gegenüber dem Atomkern (*Elektronenpolarisation* – Bild 2.8a) oder das Verschieben von Atomen unterschiedlicher Ladungen innerhalb eines Moleküls (*Atom- / Ionenpolarisation*). Die so entstandenen, verschobenen Ladungsschwerpunkte führen zur Bildung eines temporären Dipols. Möglich ist dies unter anderem in Isolierstoffen, in denen elektronenaffine Elemente wie Sauerstoff, Chlor oder Fluor molekular gebunden sind oder in organischen Komplexen, da reaktiv gebundene Metallionen positive Ladungsschwerpunkte innerhalb dieser Verbindung bilden können (sog. induzierte Dipole) [Ger-74, Sch-74].

Die Elektronenpolarisation ist dabei neben der Intensität des wirkenden elektrischen Feldes stark von der Konzentration der Atome sowie deren Größe abhängig. Die Intensität der Ionenpolarisation ist zusätzlich abhängig von der verschobenen Ladung [Fas-05].

Im Fall der *Gitterpolarisation* können sich unterschiedlich geladene Gitterbausteine untereinander verschieben (Bild 2.8b). Dies ist jedoch nur bei kristallinen Festkörpern der Fall und damit bei der technischen Anwendung von Isolierflüssigkeiten wenig relevant.

Mit Relaxationszeiten von $\tau_R = (1 \cdot 10^{-15} \dots 1 \cdot 10^{-12})\text{s}$ sind die genannten Polarisationsmechanismen sehr schnell abgeschlossen und daher bei Gleichspannungsbelastung von untergeordneter Bedeutung [Kah-88, Küc-17].

Bild 2.8: Schematische Visualisierung der schnellen Arten der Deformationspolarisation

Weitere, vor allem bei Gleichspannungsbelastung bedeutende Mechanismen der Verschiebungspolarisation sind die *Raumladungs-* und die daraus folgende *Grenzflächenpolarisation* (Bild 2.9). Freie Ladungsträger bewegen sich zu den Elektroden entgegengesetzter Polarität und können auf makroskopischer Ebene zum Teil erhebliche lokale Ladungsschwerpunkte an der Grenzfläche an den Elektroden bilden (Bild 2.9a). Auch innerhalb des Pressspans bzw. Isolierpapiers ist eine Grenzflächenpolarisation an den Zellulosefasern des inhomogenen, geschichteten Pressspans denkbar [Sch-16]. Im Fall von geschichteten Dielektrika wie der Öl-Papier-Isolierung in Leistungstransformatoren können sich die freien Ladungsträger aufgrund der unterschiedlichen Driftgeschwindigkeiten in den einzelnen Medien auch an dielektrischen Grenzflächen zwischen Öl und Isolierpapier bzw. Transformatorboard anlagern (Bild 2.9b). Je nach Art des Isoliermediums und der Ausführung der Isolierung werden Relaxationszeiten von wenigen Sekunden bis Stunden bei Gas- oder Flüssigisolierungen bis hin zu Stunden oder gar Tagen bei polymeren Feststoffisolierungen erreicht (z. B. an Feststoffisolatoren gasisolierter Schaltanlagen oder in HGÜ-Kabeln) [Kah-88, Bac-16a, Sch-16, Her-16a].

Bild 2.9: Schematische Darstellung der Raumladungspolarisation unter Gleichspannungsbelastung

Bei der *Orientierungspolarisation* richten sich polare Molekülgruppen, Moleküle oder Partikel mit unsymmetrischen Ladungsschwerpunkten (sog. elektrische Dipole) im elektrischen Feld aus (Bild 2.10), was besonders in flüssigen Dielektrika aufgrund deren z. T. hoher Viskosität gegeben ist. Im Gegensatz zu den Mechanismen der Verschiebungspolarisation findet jedoch kein Ladungstransport statt. Aufgrund der kurzen Verschiebungswege stellen sich dabei sehr kurze Relaxationszeiten im Bereich mehrerer Piko- bis Nanosekunden ein.

Die Konzentration der polarisierbaren Dipole, deren Aggregatzustand, Viskosität und damit die Temperatur des Isoliermediums sowie die Dipolmomente der Moleküle wirken sich dabei auf das jeweilige Polarisationsverhalten und die Relaxationszeit aus [Fas-05]. Der starke Dipolcharakter des Wassers bewirkt unter anderem dessen hohe relative Permittivität von $\epsilon_r = 81$, wogegen das mineralische Isolieröl mit dessen zum Großteil unpolaren Bestandteilen eine relative Permittivität von $\epsilon_r = 2,2$ aufweist [Bac-16a, Küc-17].

Pressspan bzw. dessen Zellulosefasern besitzen aufgrund deren Vielzahl an polaren Hydroxygruppen eine relative Permittivität von $\epsilon_r = 7$, ölprägniert sinkt diese aufgrund des zwischen den Papierfasern eingelagerten Isolieröls auf ca. $\epsilon_r = 3,5 \dots 4,4$. Ein hoher Wassergehalt im Isolieröl und vor allem im Pressspan bewirkt somit eine deutliche Zunahme an polaren Bestandteilen im Dielektrikum und somit eine Erhöhung der Permittivität und in deren Folge eine Erhöhung der messbaren scheinbaren Leitfähigkeit. [Sch-16]

Bild 2.10: Schematische Darstellung der Orientierungspolarisation

2.3.3 Elektrische Leitfähigkeitsmechanismen in Öl-Papier-Mischdielektrika

Die Bewegung von Ladungsträgern im Dielektrikum kann in deren Folge verschiedene, physikalische Mechanismen auslösen und somit Ursache für diverse, beobachtbare Phänomene sein. Richten sich in einem Dielektrikum Ladungen im elektrischen Feld aus oder werden aufgrund dessen Kraftwirkung verschoben, ist ein Stromfluss mess- und nachweisbar. Findet dabei keine Rekombination der gebundenen Ladungsträger an den Elektroden statt, spricht man von der Polarisation des Isolierstoffes. Diese hat, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, u. a. die Ausbildung von Raumladungen an dielektrischen Grenzflächen oder an Elektroden-Grenzflächen zur Folge. Da diese Prozesse jedoch endlich und innerhalb der Relaxationszeit abgeschlossen sind, tragen diese nicht zur messbaren, stationären elektrischen Leitfähigkeit eines Dielektrikums bei.

Werden Ladungsträger hingegen unter einer elektrischen Feldwirkung kontinuierlich gebildet, verschoben und rekombinieren anschließend an der Gegenelektrode, spricht man von der elektrischen Leitfähigkeit eines Isolierstoffes. Diese Generation und Rekombination von Ladungen findet somit fortwährend statt, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Die sehr geringe, messbare elektrische Leitfähigkeit des mineralischen Isolieröls wird somit durch eine Ladungsträgerbewegung verursacht, welche u. a. durch die in Abschnitt 2.3.1 genannten Mechanismen generiert werden, zur Gegenelektrode bewegt werden und dort rekombinieren können. Das Verhalten der Dielektrika sowie die detaillierte Beschreibung der Leitungsprozesse im Öl-Papier-Dielektrikum ist jedoch noch nicht vollständig geklärt.

Bei den im Isolieröl stattfindenden Leitfähigkeits- bzw. Ladungstransportmechanismen werden verschiedene Leitungsprozesse unterschieden (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Im Isolieröl und imprägnierten Pressspan relevante Leitfähigkeitsmechanismen

Mechanismus	Ursache
Ionenleitung	Durch elektrisches Feld wirkende Kraft auf Ionen
Elektronen- bzw. Elektronen-Loch-Leitung	Tunneln von Elektronen zwischen Haftstellen bzw. Hopping zwischen Molekülen
Protonenleitung	Bildung und Bewegung von Hydronium-Ionen mit zusätzlichem Proton

Der in den Isolierflüssigkeiten überwiegende und in der Literatur als *Ionenleitung* bezeichnete Leitungsprozess wird hauptsächlich durch die auf die Ionen wirkende Kraft aufgrund des elektrischen Feldes verursacht. Jedoch wird dabei oftmals nicht zwischen verschiedenen Ladungsträgerspezies unterschieden, sondern oft nur die Möglichkeiten für deren Herkunft durch Injektion (Aufnahme oder Abgabe eines Elektrons) oder Dissoziation benannt [Sch-16, Rum-19]. Die Ionenleitung ist daher als Transportmechanismus sowohl für die durch Dissoziation entstandenen, öleigenen (intrinsischen) als auch von den Elektroden injizierten Ladungsträger möglich (vgl. Abschnitt 2.3.1). Dieser Transportmechanismus erfordert somit das Vorhandensein freier Ionen im mineralischen Isolieröl [Alj-85, Lew-94]. Die Beweglichkeit der Ionen und damit deren Driftgeschwindigkeit wird dabei durch deren Größe sowie die Viskosität des Öls [Kok-00] und der damit wirkenden Reibungskraft beeinflusst. Weitere Einflüsse entstehen zudem durch die *Brownsche Molekularbewegung*, also einer Schwingung infolge der durch eine thermische Bewegung vorhandenen kinetischen Energie [Sch-16, Zha-19a].

Ein weiterer Leitungsmechanismus ist die sogenannte *Elektronenleitung*. Häufig wird dadurch die Bewegung von freien Elektronen bezeichnet, wie sie nur bei sehr hohen Feldstärken auftreten [Alj-85, Den-11] und daher hauptsächlich bei der Entladungsentwicklung relevant werden. Bei ausreichender Energieaufnahme unter hohen Feldstärken können Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband gehoben werden und stehen demnach als freie Elektronen zur Verfügung. Jedoch wird damit ebenfalls die Bewegung von an Molekülen gebundenen Elektronen über lokale Haftstellen bezeichnet (sog. *Elektronen-Loch-Leitung* [Sch-16]). Dabei können quantenmechanische Tunneleffekte auftreten (vgl. Bild 2.6), wobei sich die Elektronen zwischen den einzelnen Haftstellen bewegen und so zum Ladungstransport beitragen (Haftstellenleitung) [Sch-16, Rum-19].

Ebenfalls ist ein „Hopping“ von Elektronen zwischen den Molekülen möglich [Sch-16]. Aromaten können z. B. durch deren Ringstruktur und den somit vorhandenen delokalisierten Elektronen einzelne Elektronen für den Leitungsprozess zur Verfügung stellen oder zusätzliche Elektronen unter der Bildung eines Ions anlagern und somit beide Leitungsmechanismen fördern [Bac-16a]. Es wird jedoch angenommen, dass diese Art des Leitungsmechanismus in Isolierflüssigkeiten erst bei sehr hohen Feldstärken auftritt [Alj-85, Küc-17].

Einen weiteren Mechanismus bildet die *Protonenleitung* im Isolieröl. Freie Säuren (HR) und Wasser können nach Gl. (2.1) eine Gleichgewichtsreaktion zur Folge haben, wodurch unter Bildung eines Säurerests (R^-) positiv geladene Hydronium-Ionen (H_3O^+) entstehen, d. h.

Wassermoleküle, die infolge dieser Reaktion ein zusätzliches Wasserstoff-Proton (H^+) aufgenommen haben [Kur-12]:

Ebenso kann eine Autopyrolyse von Wasser stattfinden, wodurch nach Gl. (2.2) ebenfalls Hydronium- und Hydroxyl-Ionen (OH^-) entstehen [Atk-13]. Der Einfluss der Protonenleitung am Leitungsprozess ist daher stark vom Wassergehalt des Isolieröls abhängig, aber bereits bei geringen Wassergehalten nachweisbar. Die Protonen werden so durch die Isolierflüssigkeit transportiert und können an der Kathode mit injizierten Elektronen rekombinieren. Der Transport findet dabei durch Springen der Protonen zwischen Hydronium- und Hydroxyl-Ionen und günstig orientierten, benachbarten Wassermoleküle statt, wobei Wasserstoffbrückenbindungen gelöst und neu geknüpft werden. Bewegende Protonen haben demnach ebenfalls eine hohe Beweglichkeit, die die Ionenbeweglichkeiten übersteigen können [Atk-13]. Es kann somit angenommen werden, dass die Mobilitäten der injizierten Ladungsträger die der intrinsischen Ladungsträger übersteigt.

Aufgrund der Imprägnierung des Pressspans mit dem Isolieröl und den damit vorhandenen, ölgefüllten Kanälen und Zwischenschichten der Pressspanstruktur werden im Papier ähnliche Leitungsprozesse wie im Öl angenommen. Demnach findet in den ölgefüllten Kanälen des Pressspans ebenfalls eine Ionenleitung statt. Im Pressspan ist ebenso eine Elektronen-Loch-Leitung relevant, da zwischen dem Valenz- und Leitungsband unscharfe Bandkanten vorliegen und in den Zellulosemolekülen ebenfalls eine Vielzahl an Haftstellen vorhanden ist. Durch delokalisierte Elektronen der schwachen Doppelbindung des im Pressspan enthaltenen Lignins ist so ein Elektronentransport zwischen den Zellulosemolekülen möglich. Als weiterer und vor allem im Pressspan äußerst relevanter Mechanismus wird in der Literatur die beschriebene Protonenleitung angeführt, welche zum Teil bereits nachgewiesen werden konnte [Mur-63, Sch-16]. Dabei werden Wasserstoffprotonen u.a. durch die Vielzahl an Hydroxygruppen zur Verfügung gestellt. Zudem kann der Ladungstransport des Protons durch stetes Lösen und Knüpfen von Wasserstoffbrückenbindungen der Hydroxygruppen stattfinden [Gla-75], wobei sich das Proton demnach zwischen den Bindungen der Moleküle durch das Dielektrikum bewegt. [Sch-16]

Infolge der Ölimprägnierung wird die Leitfähigkeit im imprägnierten Papier bzw. Pressspan stark durch das nichtlineare Verhalten des Isolieröls geprägt und ist somit ebenfalls stark vom Wassergehalt abhängig, was durch die hydrophilen Eigenschaften des Papiers weiter verstärkt wird [Küc-17].

2.3.4 Zeitabhängige Leitfähigkeit von Isolierflüssigkeiten

Durch die gerichtete Bewegung der Ladungsträger in der Isolierflüssigkeit und der Rückwirkung aufgrund deren möglicher Akkumulation an Grenzflächen ergeben sich somit zeitlich veränderliche Leitfähigkeiten (Bild 2.11) [Bey-92, Küc-17]. Kurze Beanspruchungszeiten oder schnell aufeinanderfolgende Polaritätswechsel führen zu höheren messbaren

Strömen und somit hohen Leitfähigkeiten, da sich diese hauptsächlich aus der Orientierung von Ladungsträgern und aus dem Gleichgewicht aus Ladungsträgergeneration und -rekombination vor den Elektroden ergibt. Es erfolgt demnach kein Abtransport von Ladungsträgern. Wie im Wechselfeld bleibt die Anfangsleitfähigkeit erhalten, man spricht für kurze Beanspruchungszeiten dementsprechend von einer *Wechselstromleitfähigkeit*. Bei längeranhaltender Gleichspannungsbelastung bewegen sich die Ladungsträger anschließend zu den Elektroden, wo sie akkumulieren können. Dadurch erfolgt im Ölvolumen eine Ladungsträgerverarmung, die Ladungsträgerdichte und somit die Leitfähigkeit nimmt ab. Die *Transitzeit* oder *Time of Flight (ToF)*, in der die Ladungsträger durch den Ölspace driften [Yan-12b], ist dabei vorrangig von deren Beweglichkeit, der elektrischen Feldstärke und der Ölspaceweite abhängig. Sind alle frei beweglichen Ladungsträger akkumuliert, wird der stationäre Strom allein durch das Gleichgewicht aus Generation von Ladungsträgern an der Elektrode, deren Bewegung durch den Ölspace und deren Rekombination an der Gegenelektrode bestimmt. Dies tritt demnach nur bei langanhaltenden Gleichfeldern auf und wird daher als *Gleichstromleitfähigkeit* bezeichnet. Aus der starken Feldstärkeabhängigkeit der Transport- und Generationsmechanismen ergibt sich die starke Feldstärkeabhängigkeit dieser Gleichstromleitfähigkeit. [Küc-17]

Bild 2.11: Zeitabhängiges Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit in flüssigen Dielektrika nach [Küc-17]

2.3.5 Modelle zur Beschreibung des elektrischen Leitfähigkeitsverhaltens der Öl-Papier-Mischdielektrika

Zur Beschreibung des zeitabhängigen Verhaltens der Dielektrika und der stattfindenden Mechanismen sowie deren Nachbildung gibt es verschiedene Ansätze. So wird das Verhalten der Isoliermedien z. B. mithilfe einfacher Ersatzschaltbilder nachgebildet, in welche die elektrischen Eigenschaften implementiert werden und damit das prinzipielle Verhalten beschrieben und nachgebildet werden kann. Diese Modelle sind zur Anwendung bei Wechselspannungsbelastung oder zur Beschreibung linearer Materialien gut geeignet und hinreichend bekannt. Zur Nachbildung von nichtlinearen Dielektrika wie dem mineralischen

Isolieröl bei Gleichspannungsbelastung sind diese jedoch nur bedingt geeignet. Zwar lassen sich damit auch nichtlineare Charakteristika nachbilden, jedoch werden Raumladungseffekte, welche unter Gleichspannungsbelastung eine bedeutende Rolle spielen, vernachlässigt und sind somit separat zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund gibt es verschiedene Ansätze, das zeitabhängige Leitfähigkeitsverhalten der Dielektrika zu beschreiben, die auf der direkten Nachbildung der Ladungsträgerbewegung und deren Rückwirkungen beruhen. Genannt sei hierbei die Beschreibung des Ladungstransports mithilfe der *Boltzmannschen Transportgleichung* [Sch-16]. Ein weiterer Ansatz beruht auf den *Nernst-Planck-Gleichungen* [Son-12, Hjo-13, Bac-16a, Rum-19], der in dieser Arbeit vorrangig verfolgt wird. Im Folgenden soll daher ein kurzer Einblick über die verschiedenen Modellvorstellungen gegeben werden.

Klassischer, resistiv-kapazitiver Ansatz auf Basis der Polarisation des Dielektrikums

Wird an einer ölisierten Anordnung eine Gleichspannung rampenförmig auf U_{DC} gesteigert, stellt sich nach der Spannungssteigerung ein abnehmender, zeitabhängiger Stromverlauf ein, der nach einer endlichen Zeit auf einen quasistationären Wert I_{stat} abgeklungen ist. Nach bisherigem Stand der Technik setzt sich der dabei messbare Gleichstrom aus mehreren Stromanteilen zusammen (Bild 2.12). Mit Beginn der Spannungsrampe zum Zeitpunkt t_0 fließt während des Spannungsanstieges ein kapazitiver Verschiebungsstrom, verursacht durch den Aufbau des elektrischen Feldes und den schnellen Polarisationsvorgängen, die dem Spannungssprung folgen können.

Bild 2.12: Prinzipieller Verlauf des Stromes durch ein Dielektrikum nach Zuschalten der Gleichspannung und Aufschlüsselung dessen Bestandteile nach der klassischen Betrachtung auf Basis der Polarisation des Dielektrikums

Nach dem Ende der Spannungssteigerung bei t_{ssv} und dem Abklingen des Verschiebungsstromes nimmt der messbare Strom aufgrund der langsamen Polarisationsstromanteile ab. Dieser Polarisationsstrom wird durch die Ausrichtung bzw. Polarisation der vorhandenen Ladungen und der damit verbundenen Bindung von zusätzlichen Ladungen auf den Elektroden verursacht. Sobald sich anschließend ein stationärer Zustand zum Zeitpunkt t_{stat} eingestellt hat, sind alle Polarisationsmechanismen abgeschlossen und damit der Polarisationsstrom abgeklungen. Es fließt somit nur noch ein reiner Gleichstrom I_{stat} durch das

Dielektrikum, verursacht durch die stationäre elektrische Leitfähigkeit des Isoliermediums. [Küc-17] Das beschriebene, zeitabhängige Leitfähigkeitsverhalten der Dielektrika kann dabei durch einfache, ohmsch-kapazitive Parallelersatzschaltbilder beschrieben werden (sog. *RC-Modell*). Mithilfe dieser Modellvorstellung kann das kapazitive Verhalten der Materialien, die wirkenden Polarisationsmechanismen sowie die Restleitfähigkeit bei einer stationären Gleichspannungsbelastung nachgebildet werden Bild 2.13. Über Sprungantwortmessungen mithilfe sog. PDC-Messungen (Polarisations- und Depolarisationsstrom-Messungen – engl.: **P**olarisation and **D**epolarisation **C**urrent) kann das Strom-Zeit-Verhalten der Dielektrika bestimmt werden. Dadurch können die Eigenschaften des Dielektrikums unter Gleichspannungsbelastung ermittelt und damit die einzelnen Komponenten des Ersatzschaltbildes quantifiziert werden [CIG-16, Küc-17].

Bild 2.13: Nachbildung eines zweischichtigen Öl-Papier-Mischdielektrikums mithilfe elektrischer Ersatzglieder nach [CIG-16, Küc-17, Lie-09]

Für feste Dielektrika (wie z. B. Pressspan bzw. das Isolierpapier) kann das annähernd lineare Verhalten hinreichend genau durch ein Ersatzschaltbild mit linearen Elementen bestehend aus *RC*-Gliedern nachgebildet werden (Bild 2.13 – Papier) [Küc-17]. Die Kapazität beschreibt dabei die geometrische Kapazität C_0 der Anordnung und beinhaltet demnach alle schnellen Polarisationsvorgänge entsprechend der Permittivität ϵ des Dielektrikums. Der Stromfluss durch diese Kapazität verursacht den kapazitiven Verschiebungsstrom während der Spannungssteigerung (vgl. Bild 2.12). Alle weiteren, langsamen Polarisationsvorgänge werden durch parallel geschaltete *RC*-Gliedern nachgebildet, deren Ladezeitkonstanten

$$\tau_{Ri} = R_{pi} \cdot C_{pi} \quad (2.3)$$

der jeweiligen Relaxationszeit τ_{Ri} entsprechen. Weitere Ansätze bilden in der Kapazität C_0 nur die reine Vakuum-Kapazität entsprechend der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 ab, wobei alle auftretenden Polarisationsmechanismen über die parallelen *RC*-Gliedern abgebildet werden [Küc-17]. Der abklingende Polarisationsstromanteil beschreibt demnach die zeitlich verzögerte Aufladung dieser *RC*-Gliedern, welche nach dem Abklingen des Polarisationsstromes aufgeladen sind. Der Widerstand R_∞ bildet anschließend die stationäre Rest-

Leitfähigkeit des Dielektrikums entsprechend dessen elektrischer Leitfähigkeit κ als Ursache des stationären Gleichstroms I_{stat} ab. Temperaturabhängigkeiten können dabei nachgebildet werden, indem der Gleichstromwiderstand für ölprägniertes Papier oder Pressspan nach dem *Arrhenius-Gesetz* auf andere Temperaturen umgerechnet wird [Küc-17].

In flüssigen Dielektrika wie dem mineralischen Isolieröl ist diese einfache Betrachtung mit linearen Elementen jedoch nicht möglich, da dessen Leitfähigkeit aufgrund von Ladungsträgerprozessen und Raumladungseinflüssen stark von der elektrischen Feldstärke abhängig und damit über mehrere Größenordnungen stark nichtlinear ist [Lie-09, Bac-16a, Bac-16b, CIG-16, Küc-17]. Eine solche Nachbildung ist daher nur über nichtlineare Elemente möglich, die die Feldstärkeabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit κ durch funktionale Beziehungen beschreibt [Küc-03, Küc-17]. Das Modell kann dabei auf die geometrische Kapazität und den Widerstand R_{∞} , welcher durch die feldstärkeabhängige Leitfähigkeit $\kappa(E)$ bestimmt wird, reduziert werden (Bild 2.13 – Isolieröl). Entsprechend eines *physikalischen Ölmodells* wird dabei eine Anfangsleitfähigkeit nachgebildet, die feldstärkeabhängig durch Ionendrift vermindert wird [Küc-03, Küc-17]. Nach der Einstellung eines Ladungsgleichgewichts stellt sich eine Endleitfähigkeit ein, die ebenfalls stark feldstärkeabhängig ist.

Vor allem die nichtlinearen, feldstärkeabhängigen Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten sind somit nur bedingt durch solche Elemente beschreibbar. Zudem können dabei auftretende Raumladungseffekte nicht abgebildet werden und werden damit vernachlässigt. Schließt man auf Grundlage dieser Modellvorstellung auf die elektrische Feldbeanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleichspannungsbelastung, werden bspw. an homogenen Anordnungen im ölsolierten Einstoffsystem homogene Feldstärkeverteilungen erwartet. An den Grenzflächen akkumulierte Oberflächenladungen führen aber nachweisbar zu inhomogenen Feldstärkeverteilungen [Hik-96, Öft-19], die im Mischdielektrikum ebenfalls die Beanspruchung und damit das Isoliervermögen beeinflussen würden. Aus diesem Grund sind in der Vergangenheit verschiedene Modellvorstellungen entwickelt worden, die diese nichtlinearen Vorgänge in flüssigen Dielektrika durch die Betrachtung feldstärkeabhängiger Ladungsträgerprozesse beschreiben.

Ladungsträgerbasierter Ansatz

Das in [Lie-09, Bac-16a, CIG-16, Küc-17] beschriebene, feldstärke- und damit zeitabhängige Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit in flüssigen Dielektrika kann aufgrund deren physikalischer Ursachen durch einen ladungsträgerbasierten Ansatz besser beschrieben werden (Bild 2.14). Dieser berücksichtigt zum einen die feldstärkeabhängige Generation der intrinsischen Ladungsträger im Ölvolumen durch Dissoziation sowie die Injektion an den Elektroden. Diese Ladungsträger werden durch das Dielektrikum transportiert und können im Dielektrikum in Abhängigkeit der Teilchendichte rekombinieren oder zur Gegenelektrode gelangen. An dieser können sie akkumulieren und ebenda oder an weiteren, dielektrischen Grenzflächen Raumladungen bzw. Oberflächenladungen ausbilden. Ebenso ist möglich, dass sie an der Gegenelektrode rekombinieren und neutralisiert werden. Der Transport der Ladungsträger basiert dabei sowohl auf der elektrostatischen Drift, getrieben durch das anliegende, elektrische Feld oder durch Diffusion, getrieben durch Teilchen-

dichteunterschiede im Ölvolumen. Aufgrund der starken, elektrostatischen Drift entsteht ein Konzentrationsgefälle entgegen der Driftrichtung, weshalb die Diffusion der Ladungsträgerdrift entgegengesetzt gerichtet ist. Die Diffusion ist in „dicken“ Isolierstoffen (mit Ölsplattweiten $s > 10 \mu\text{m}$), d. h. in nahezu allen realitätsnahen Anordnungen unter Gleichspannungsbelastung jedoch von untergeordneter Bedeutung, da der Einfluss der elektrostatischen Drift unter den i. d. R. hohen elektrischen Feldstärken bedeutend stärker ausgeprägt ist [Che-19]. Die genannten Leitfähigkeitsmechanismen und vor allem deren mathematische Nachbildung nach [Bac-16a] zum Ermitteln der Auswirkungen auf die elektrische Feldverteilung von Öl-Papier-Mischdielektrika bildet dabei die Grundlage dieser Arbeit.

Bild 2.14: Grundlegende Mechanismen der ladungsträgerbasierten Leitfähigkeit mineralischen Isolieröls nach [Bac-16a]

Nach diesem ladungsträgerbasierten Ansatz setzt sich der in Bild 2.12 gezeigte Stromverlauf demnach aus folgenden Stromanteilen zusammen (Bild 2.15): Im Anschluss an die Spannungssteigerung und dem proportionalen Stromanstieg aufgrund des dadurch verursachten Verschiebungsstromes der schnellen Polarisationsvorgänge nimmt der Strom wie gezeigt ab. Analog zum betrachteten Polarisationsstrom erfolgt eine Ladungstrennung von ölintrinsischen Ladungsträgern (intrinsischer Stromanteil), welche zu den entgegengesetzt geladenen Elektroden driften, sich an den Elektroden anlagern und somit als *Heterocharges* entgegengesetzter Polarität Raumladungsschichten vor Elektroden ausbilden. Mit fortgeschrittener Zeit nimmt dieser Stromanteil ab, d. h. die driftenden, intrinsischen Ladungsträger lagern sich an die Elektrode an und es erfolgt eine lokale Anhebung der elektrischen Feldstärke an Elektroden [Bac-16a, Küc-17, Vah-20]. Zeitgleich werden mit Beginn der Spannungssteigerung und dem damit verbundenen Anstieg der Grundfeldstärke der Anordnung feldstärkeabhängig Ladungsträger injiziert. Diese bewegen sich ebenfalls durch das Dielektrikum zur Gegenelektrode und bewirken einen zunehmenden Stromanteil (injizierter Stromanteil). Da die injizierten als *Homocharges* und somit feldstärkeverringend wirken, ist der Anstieg des injizierten Stromanteils zu Beginn nur schwach ausgeprägt. Mit zunehmender Feldstärke aufgrund der Akkumulation an *Heterocharges* an den Elektroden nimmt der injizierte Stromanteil jedoch weiter zu. Der zuvor beschriebene *Polarisationstrom* wird demnach nicht nur durch die gerichtete Bewegung und Anlagerung von Ladungs-

trägern, sondern ebenfalls durch die Injektion zusätzlicher Ladungsträger beeinflusst. Sind zum Zeitpunkt t_{intr} alle intrinsischen Ladungsträger akkumuliert und deren Stromanteil folglich abgeklungen, stellt sich anschließend ein Gleichgewichtszustand aus Generation, lokaler Feldstärkeverringern an den Elektroden aufgrund der Wirkung der injizierten *Homocharges* sowie dem Transport und der anschließenden Rekombination der injizierten Ladungsträger ein. Somit nimmt der Strom vorerst weiter ab, bis sich zum Zeitpunkt t_{stat} ein stationärer Zustand eingestellt hat. Der stationäre Strom I_{stat} und damit die *Gleichstromleitfähigkeit* des Isolieröls wird somit durch die Injektion von Ladungsträgern, deren Transport durch das Dielektrikum und deren Rekombination an der Gegenelektrode verursacht [Bac-16b, Gab-18a, Gab-19a, Gab-19b]. Die feldstärkeabhängige, stationäre Leitfähigkeit liegt demnach vorrangig in der Feldstärkeabhängigkeit der Ladungsträgerinjektion begründet. Die Aufschlüsselung der Stromanteile ist messtechnisch jedoch nur schwer trennbar und damit nicht direkt einzeln nachweis- und messbar. Es ist jedoch möglich, über die Messung der stationären Ströme auf die Injektionsraten der Ladungsträger zu schließen [Bac-16b, Gab-18a]. Zeitlich hochaufgelöste Strommessungen im Bereich $t_0 < t < t_{\text{SSV}}$ und darüber hinaus könnten demnach wiederum Aufschlüsse auf die Menge an intrinsischen Ladungsträgern bzw. deren Dissoziation geben, da der Anteil der injizierten Ladungsträger am Gesamtstrom noch gering ist.

Bild 2.15: Prinzipieller Verlauf des Stromes durch ein Dielektrikum nach Zuschalten der Gleichspannung und Aufschlüsselung dessen Bestandteile entsprechend des Ladungsträgerbasierten Modells nach [Gab-19b]

Wie im weiteren Verlauf der Arbeit gezeigt wird, hat diese vorrangige Abhängigkeit der stationären Leitfähigkeit von der feldstärkeabhängigen Injektion zur Folge, dass bei folgenden Spannungssteigerungen und dem weiteren Erhöhen der Grundfeldstärke der stationäre Strom ohne weitere Polarisationsstromanteile proportional zur Spannungssteigerung zunimmt. Nur bei geringen Feldstärken ist davon auszugehen, dass noch nicht alle dissoziierbaren Bestandteile in Mizellenform vorliegen und demnach ein Stromanstieg bei weiterer Spannungssteigerung durch die Dissoziation weiterer Ladungsträger und deren Akkumulation an den Elektroden verursacht wird. Bei geringen nominellen Grundfeldstärken überwiegt somit der Einfluss der akkumulierten, intrinsischen *Heterocharges* auf die Leitfähigkeit. Deren Akkumulation an den Elektroden bewirkt aufgrund der Erhöhung der lokalen Feld-

stärke an den Elektroden eine Verstärkung der Injektion, was einen erhöhten stationären Gleichstrom zur Folge hat und damit in diesen Messbereichen als erhöhte Leitfähigkeit gedeutet wird [Lie-09, Küc-15, Bac-19, Rum-19].

Weiterhin stellt sich aufgrund dieser Einflüsse der akkumulierten Raumladungen ein sog. *Memory-Effekt* ein [Lie-09], wobei die Ergebnisse einer Leitfähigkeitsmessung infolge der verbliebenen Raumladungsverteilung einer vorangegangenen Belastung beeinflusst werden kann. Mithilfe einer geeigneten Konditionierung der Flüssigkeit zu Beginn einer Messung kann dem jedoch Rechnung getragen und deren Einflüsse minimiert werden [Bac-16b, Gab-18a].

Die Zusammensetzung der Isolieröle wirkt sich dabei aufgrund der unterschiedlichen Anteile dissozierbarer Bestandteile direkt auf die Menge an intrinsischen Ladungsträgern und damit auf Ausbildung der Ladungsschichten aus. Aufgrund des Einflusses der akkumulierten, intrinsischen *Heterocharges* auf die Injektion infolge des *Malter-Effekts* und damit auf die messbare Leitfähigkeit hat die Zusammensetzung des Isolieröls somit einen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit der Isolierflüssigkeit. Unterschiedliche Konzentrationen an intrinsischen Ladungsträgern führen so zu unterschiedlich hohen Feldstärken im elektrodennahen Bereich [Hik-96]. Daraus resultieren unterschiedlich starke Injektionsraten [Gab-19a] und somit unterschiedlich hohe Leitfähigkeiten [Lie-09]. Ebenso zeigen sich Einflüsse des Elektrodenmaterials auf die Injektion von Ladungsträgern und damit auf die gemessenen Leitfähigkeiten [Vah-14, Rum-19, Vah-20]. Dabei wird die Leitfähigkeit des Isolieröls stark von Metallionen beeinflusst. So steigt im mineralischen Isolieröl die elektrische Leitfähigkeit in Gegenwart von Metallen binnen weniger Tage stark an [Lie-68], da sich Metallionen im Öl lösen können und somit als Ladungsträger zur Verfügung stehen. Als Folge dieser genannten Einflüsse ergeben sich in technischen Anordnungen jedoch stets allgemeine Abhängigkeiten vom verwendeten Elektrodenmaterial und der Isolierflüssigkeit.

2.3.6 Entladungsmechanismen und Durchschlagverhalten

Zur Erklärung des Durchschlagverhaltens und der Entladungsmechanismen im Isolieröl gibt es im Vergleich zur Theorie der Gasentladungen nach [Bey-92] noch keinen vollständigen theoretischen Ansatz. Dabei fehlt insbesondere ein eindeutiger Ansatz zur Herkunft und Vervielfältigung der Ladungsträger, sowohl für die Initialprozesse im physikalischen Sinne als auch für den detaillierten zeitlichen Ablauf des Öldurchschlages. Sowohl die Herkunft der für einen Entladungseinsatz notwendigen Ladungsträger als auch deren Vervielfältigung sind hierbei noch nicht im Detail geklärt. Jedoch können die unmittelbaren Folgen der Entladungsmechanismen beschrieben werden. Vor allem zum Durchschlag unter Stoßspannungen gab es dazu umfangreiche optische Untersuchungen [Hau-69, Heb-89, Maz-90, Les-16]. Der Ablauf des Entladungseinsatzes bis zum Durchschlag verhält sich dabei nachgewiesenermaßen für Wechsel-, Gleich- und Stoßspannungen analog [Hau-69, Les-88, Bad-96, Tor-02]. Der Entladungsvorgang kann demnach in mehrere Stufen unterteilt werden [Küc-17]:

- 1) (Vor-) Zustand unter Feldeinfluss,
- 2) Start der Initialprozesse und Entladungseinsatz,

- 3) Stufenförmige Ausbreitung der Entladung, welche nach [Heb-89, Hau-69, Les-16] zum Teil noch einmal in mehrere Ausbreitungsphasen unterschiedlicher Intensität und Ausbreitungsgeschwindigkeit unterteilt sind,
- 4) Hauptentladung zum Durchschlag

Der Entladungsvorgang in Isolierflüssigkeiten wird dabei über die lokal begrenzte Existenz von Gebieten mit stark reduzierter Dichte erklärt. Demnach spricht man von einem sogenannten verschleierte Gasdurchschlag infolge der Bildung öldampfhaltiger Mikrobälchen, wobei zunächst ein stetes Gleichgewicht zwischen niederlichten und flüssigen Bestandteilen herrscht [Sin-90]. Die Frage der Entwicklung dieser Gasphasen ist bis heute jedoch nicht abschließend geklärt. Unter anderem können impulslose Dauerentladungen die Dissoziation und das Verdampfen von Ölmolekülen bewirken [Hau-69]. In deren Folge entsteht eine Gas-Dampf-Phase, sobald die gebildeten Gase nicht mehr gelöst werden können.

Nach der *Perkolationstheorie* [Kis-99] erfolgt unter der Wirkung des elektrischen Feldes eine Orientierung der Ölmoleküle, wodurch eine Nahordnung an Molekülen verschiedener Energiezustände entsteht. Dadurch wird die Bewegung von Elektronen erleichtert und es bilden sich Bereiche erhöhter Leitfähigkeiten [Bad-96, Kis-99]. Der Ladungstransport ist demnach nicht nur an einen Stofftransport gebunden sondern auch durch quantenmechanische Mechanismen wie Hopping oder Tunneling möglich. Im Öl entstehen so an Stellen lokal fokussierter Feldlinien *erlaubte Bereiche*. In diesen geordneten Bereichen können sich anschließend Entladungskanäle entwickeln. Diese sind abhängig von der angelegten Feldstärke und „durchziehen“ bei hohen Feldstärken das gesamte Medium [Kis-99]. Der dadurch erhöhte Stromfluss führt somit zum lokalen Verdampfen des Isolieröls bzw. zur Reduzierung der Kohäsion der Flüssigkeit auf mikroskopischer Ebene, zur Bildung jener Mikrobälchen (sog. *Mikrokavitäten*) und in Folge zur Ausbildung der Entladung [Kis-99]. Das Ausbilden dieser *Mikrokavitäten* bzw. Gebiete geringer Dichte wird zudem durch die thermische Molekularbewegung oder durch ein raumladungsbedingtes Abstoßen der Moleküle gefördert. Die Stromdichten an der Kathode werden durch eine verstärkte Injektion bei hohen Feldstärken zudem erhöht, was die Bildung dieser Mikrobälchen weiter fördert [Sin-90]. Die Gebiete geringer Dichte werden somit durch einen lokalen Wärmeleistungseintrag verursacht [Bac-16a]. Kann diese Wärme durch das Kühlmedium Öl nicht mehr abgeführt werden, tritt eine lokale Erwärmung auf. Die Bildung niedermolekularer Bestandteile ist die Folge, welche aufgrund ihrer geringeren elektrischen Festigkeiten den Durchschlag einleiten (Bild 2.16).

Bild 2.16: Entladungseinsatz an der Kathode (schwarz) einer homogenen Grundanordnung in flüssigem n-Hexan ca. 1 μ s vor dem Durchschlag der Anordnung [Tho-75]

Ausgehend vom Ort der Höchstfeldstärke (z. B. an Schwachstellen wie den beschriebenen Gebieten geringer Dichte) starten bei ausreichend hohen Feldstärken anschließend die Initialprozesse zur Ladungsträgerentwicklung und Vervielfältigung. Die Entladungsentwicklung erfolgt dabei über Stoßionisationsprozesse durch die ausreichende Beschleunigung von Ladungsträgern in der Gasphase [Hau-69, Sin-90]. Diese gehen in der weiteren, sprunghaften Entladungsentwicklung über mehrere Anregungsstufen in eine *Streamer-Leader-Entladung*¹ über, welche mit zunehmender Feldstärke den Ölspalt überbrückt, bis die Gegenelektrode erreicht wird. Die Ausbreitung der Entladung wird in der Literatur zum Teil in primäre, sekundäre und tertiäre Streamer unterteilt [Bad-96]. Anschließend bildet sich die stromstarke Hauptentladung aus, die als thermoionisierter, lichtemittierender Leader abläuft [Hau-69, Les-91, Tor-95]. Dessen Ausbreitung ist stark vom Homogenitätsgrad der Anordnung bzw. der vorherrschenden Feldstärkeverteilung und damit vom Ort der Höchstfeldstärke und der Geometrie der Anordnung abhängig.

Dabei tritt in der Entladungsentwicklung und -ausbreitung aufgrund der Raumladungsbildung und deren Rückwirkung auf die Feldverteilung ein starker Polaritätseffekt auf [Bad-96, Küc-17]. Bei positiver Polarität der stärker gekrümmten Elektrode, d. h. am Ort der Höchstfeldstärke, wurden geringere Durchschlagfestigkeiten und schnellere Ausbreitungsgeschwindigkeiten ermittelt. Dies stellt somit für technische Anordnungen die kritischere Beanspruchung dar [Küc-17]. Jedoch sei erwähnt, dass die meisten Untersuchungen der Entladungsentwicklung und des Durchschlagmechanismus an stark inhomogenen Grundanordnungen und schnellen Stoßspannungsbelastungen durchgeführt wurden. Im homogenen Grundfeld hingegen wird die Entladungsbildung wie beschrieben stark von lokalen Fehlstellen bzw. Schwachstellen beeinflusst, da diese die Feldstärke lokal beeinflussen und anheben können. Die Entladungsentwicklung und -ausbreitung findet im homogenen Feld somit stets an lokalen Schwachstellen statt und führt wegen des i. d. R. geringen Feldstärkegradienten immer zum sofortigen Durchschlag [Küc-17]. Durchschlagkennlinien an Platte-Platte-Anordnungen aus der Literatur zeigen jedoch auch, dass sich an homogenen Anordnungen unter Gleichspannungsbelastung bereits bei geringen Schlagweiten ein sehr flacher Anstieg der Durchschlagspannungen ergibt [Ohs-83]. Deren Ähnlichkeit zu ermittelten Durchschlagspannungen an inhomogenen Anordnungen in [Bac-16a] zeigt, dass ähnlich zu direkten Feldstärkemessungen in [Hik-96, Öft-19] vor den Elektroden einer homogenen Anordnung Gebiete hoher Feldstärke existieren müssen. Der geringe Anstieg der Durchschlagspannung deutet somit auf das Auftreten von Vorentladungen mit ähnlich geringem Spannungsbedarf aufgrund der lokalen Überbeanspruchung des Ölspalts hin, die dabei sofort zum Durchschlag führen [Bac-16a].

Bei den Isolierflüssigkeiten wirken viele Einflussgrößen auf das Durchschlagverhalten und somit deren elektrischer Festigkeit, welche z. T. jedoch schwer definier- und abschätzbar sind. Neben der chemischen Zusammensetzung der Isolierflüssigkeit beeinflussen auch eine in der Anordnung mögliche Ölströmung, die dadurch ggf. beeinflusste Partikeldrift,

¹Insbesondere in der englischsprachigen Literatur wird pauschal der Begriff *Streamer* verwendet. Untersuchungen in [Hau-69, Tor-95, Les-91] zeigen jedoch, dass sich die Entladung über thermoionisierte, stark leitfähige Kanäle mit kleinem Feldstärkegradienten ausbreitet. Entsprechend der aus der Gasentladungstheorie üblichen Bezeichnung entspricht dies eher einer *Leaderentladung*.

die Spannungsform, der Homogenitätsgrad der Anordnung, der Zustand der Elektrodenoberfläche sowie Abstands- und Flächen- bzw. Volumeneffekte den Durchschlag [Bey-92, Küc-17]. Diese Einflussgrößen müssen zur Abschätzung des Isoliervermögens einer Anordnung bzw. zur Dimensionierung möglichst bekannt sein und müssen daher abgeschätzt werden. Eine besondere Bedeutung kommt aufgrund der wirkenden Prozesse zur Entladungsentwicklung der Beanspruchungsdauer zu (Bild 2.17).

Bild 2.17: Schematische Darstellung der Durchschlaghöchstfeldstärke E_d in Abhängigkeit der Beanspruchungsdauer von ölisierten Anordnungen nach [Küc-17]

Bei kontinuierlich andauernden Beanspruchungen, wie z. B. bei einer Dauerbelastung aus Gleich- oder Wechselspannung, können schwachstellenbezogene Effekte die Durchschlagfestigkeit der Anordnung stark verringern [Küc-17]. Verunreinigungen im Öl wie z. B. Fasern bzw. Partikel, Gasblasen und Wassereinschlüsse können den Entladungseinsatz aufgrund der durch sie verursachten Feldverzerrung begünstigen und haben somit einen festigkeitssenkenden Einfluss [Kah-88, Sin-90]. Dies ist insbesondere bei Mischdielektrika wie der Öl-Papier-Isolierung zu berücksichtigen, da aufgrund der Zellulosestruktur des Pressspans Partikel im Öl sehr wahrscheinlich sind. Ebenso beeinflussen nicht nur Wassereinschlüsse, sondern allgemein der Wassergehalt und damit die Feuchtigkeit, die Ölqualität, der Alterungszustand sowie weitere Umgebungsbedingungen wie z. B. die Öltemperatur das Isoliervermögen des Systems. Für den Durchschlag wird daher im Allgemeinen von einem Schwachstellendurchschlag ausgegangen, welcher aufgrund der Überbeanspruchung des Isolieröls an einer solchen Schwachstelle ausgelöst wird [Han-58, Küc-17]. Die Durchschlagsspannung für sehr kurze Beanspruchungen (z.B. unter Stoßspannung) ist hingegen bedeutend höher als z. B. unter Wechselspannung. Dabei können sogenannte *intrinsische Durchschläge* hervorgerufen werden, d.h. äußere Einflüsse wie Verunreinigungen, Ölzustand etc. spielen eine untergeordnete Rolle [Küc-17]. So wurde u. a. gezeigt, dass im Vergleich zu einer 50-Hz-Wechselspannungsbelastung der Durchschlag unter Blitzstoßspannungsbelastung nahezu unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt des Öls ist [Bad-96]. Eine Ursache ist die stark verringerte, kritische Beanspruchungsdauer der nach IEC 60060-1 standardisierten Blitzstoßspannung gegenüber einer 50-Hz-Wechselspannungsbelastung

mit entsprechender Einsetzhöchstfeldstärke hat [Hau-69]. Das Zeitfenster zur Wirkung und hinreichender Ausbreitung der Initialprozesse ist damit sehr gering. Infolge dessen können die Durchschlagspannungen bei Blitzstoßspannungsbelastung bei identischen Umgebungsbedingungen um das Doppelte höher sein, als es bei Wechselspannungsbelastung der Fall ist [Phi-82]. Dabei ist z. B. die *Kanalaufbauzeit* zur Entladungsentwicklung von entscheidender Bedeutung. Diese beschreibt die Verzögerung des Entladungseinsatzes bzw. der Entladungsausbreitung nach Erreichen der maximalen Feldstärke im Spannungsmaximum. Folglich kann die elektrische Feldstärke nach der Bereitstellung eines Anfangselektrons bei schnell veränderlichen Spannungen wieder so weit abgesunken sein, dass anschließend die zur Entladungsausbreitung notwendigen Energien nicht mehr aufgebracht werden können. Weitere Einflüsse auf den Durchschlag bei sehr kurzen Beanspruchungszeiten entstehen durch das statistische Verhalten der Initialprozesse zum Entladungseinsatz aufgrund der zufällig stattfindenden Prozesse zur Bereitstellung eines Anfangselektrons im Isolieröl [Maz-90, Bey-92, Roz-11, Küc-17]. Dies spiegelt sich in der *statistischen Streuzeit* (bzw. *Zündverzugszeit*) wider [Bey-92, Küc-17].

Im Öl-Papier-Mischdielektrikum entstehen weitere Einflüsse durch die Schichten der Pressspan- bzw. Papierisolierung sowohl auf die Ausbildung der Initialprozesse an den Elektroden als auch auf die Entladungsausbreitung durch ihre Barrierenwirkung [Mos-79b, Küc-17]. Durch die Barrierenwirkung der Fasern wird das Papier in sehr enge Ölspalte unterteilt. Die Entladungsentwicklung im ölprägnierten Papier würde dabei aufgrund der geringeren elektrischen Festigkeit des Isolieröls vorrangig in den Ölkanälen zwischen den Zellulosefasern stattfinden. Unter Gleichspannungsbelastung konnte jedoch gezeigt werden, dass die Bereiche zwischen multiplen Ölspalten entlastet werden [Gäf-00], was sich demnach auch auf die Beanspruchung der Ölkanäle des imprägnierten Papiers auswirken würde. Aufgrund der hygroskopischen Wirkung des Papiers sorgt die Papierisolierung zudem dafür, dass das Öl weniger Feuchtigkeit aufnimmt, was sich somit positiv auf das Isoliervermögen der Anordnung auswirkt [Küc-17]. Bei der Langzeitbeanspruchung des Isoliersystems ist neben dem Schwachstellendurchschlag im Ölspalt zudem die Möglichkeit eines Wärmedurchschlags im Papier zu berücksichtigen. Kann die im Dielektrikum entstandene Wärme nicht mehr vollständig abgeführt werden, können sich das Isolieröl und vor allem die Papierisolierung kontinuierlich erwärmen. Dabei erhöht sich entsprechend des Arrhenius-Gesetzes die Leitfähigkeit im Dielektrikum [Küc-17]. Dies führt anschließend zur Ausbildung von *Hot Spots* und in der Folge zum Wärmedurchschlag.

2.4 Numerische Modellierung des dielektrischen Verhaltens von Isoliersystemen

Wie in Abschnitt 2.3.5 beschrieben, werden zur Nachbildung der dielektrischen Materialeigenschaften eines Isoliermediums in der Praxis häufig klassische Materialersatzschaltbilder genutzt. Das damit nachgebildete Verhalten wird ebenso zur Berechnung des dielektrischen Verhaltens in Berechnungssoftware u. a. mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) genutzt. Dabei werden die bekannten Materialeigenschaften der Permittivität, der elek-

trischen Leitfähigkeit des Dielektrikums sowie die benötigten Parameter zur Nachbildung der Polarisationsmechanismen implementiert. Anhand dieser kann das Verhalten von Isoliersystemen rechnerisch für Gleichspannungs-, Wechselspannungs- und transiente Spannungsbelastungen nachgebildet werden. Für Wechselspannungsanwendungen liefert diese Nachbildung gute Ergebnisse und wird seit mehreren Jahrzehnten eingesetzt.

Wie in Abschnitt 2.3.5 jedoch auch gezeigt wurde, ist diese Nachbildung unter Gleichspannungsbelastung nicht direkt möglich. Zum einen lassen kommerzielle verfügbare Softwarelösungen oftmals keine Implementierung von nichtlinearen Eigenschaften zu. Zum anderen können Raumladungseffekte oder das nichtlineare Verhalten von flüssigen Dielektrika, verursacht durch die beschriebenen Generations- und Transportmechanismen der Ladungsträger, nicht direkt implementiert und damit deren Einfluss und Wechselwirkung nicht nachgebildet werden. Dies ist nur durch die Nachbildung dieser Prozesse über funktionale Beziehungen möglich. Einen Ansatz zur numerischen Modellierung des nichtlinearen Leitfähigkeitsverhaltens des mineralischen Isolieröls liefert die ladungsträgerbasierte Modellierung nach Poisson-Nernst-Planck (PNP). Mithilfe dieses nichtlinearen Gleichungssystems können die Generation, der Transport sowie die Rekombination der unterschiedlichen Ladungsträgerspezies sowie deren Einfluss auf die Feldstärkeverteilung nachgebildet werden. Die Nachbildung des dielektrischen Verhaltens einfacher ölisolierter Anordnungen unter Gleichspannungsbelastung mithilfe des PNP-Modells erfolgte bereits in [Bac-16a]. Es soll daher als Grundlage der Berechnungen des dielektrischen Verhaltens der Öl-Papierisolierten Anordnungen in dieser Arbeit dienen.

2.4.1 Klassische, resistiv-kapazitive Modellierung

Die klassische Modellierung, welche mit den in Abschnitt 2.3.5 vorgestellten erweiterten, kapazitiv-resistiven Ersatzschaltbildern zur Nachbildung des dielektrischen Verhaltens veranschaulicht werden kann, dient zur Beschreibung und Berechnung von stationären und quasistationären Zuständen im Isoliersystem. Durch die Implementierung der Materialeigenschaften der Permittivität ε sowie der elektrischen Leitfähigkeit κ des jeweiligen Isoliermediums wird dieses Modell vorrangig zur Berechnung des dielektrischen Verhaltens eines Isoliersystems genutzt [Fri-15, CIG-16].

Die mathematische Beschreibung des Modells leitet sich dabei aus der Kontinuitätsgleichung ab:

$$0 = \operatorname{div} \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

Unter Annahme eines linearen, isotropen Mediums ergibt sich die elektrische Flussdichte $\mathbf{D}$ über dem Proportionalitätsfaktor der Permittivität ε aus der elektrischen Feldstärke $\mathbf{E}$:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.5)$$

Des Weiteren wird, wie beschrieben, oftmals ein ohmsches Verhalten der Stromdichte $\mathbf{J}$ mit konstanter Leitfähigkeit κ angenommen:

$$\mathbf{J} = \kappa \mathbf{E} \quad (2.6)$$

Gl. 2.4 ergibt sich demnach zu

$$0 = \operatorname{div} \left(\kappa \mathbf{E} + \frac{\partial (\varepsilon \mathbf{E})}{\partial t} \right). \quad (2.7)$$

Da die elektrische Leitfähigkeit κ und die Permittivität ε unter konstanten Umgebungsbedingungen ebenfalls konstant sind, kann es zu

$$0 = \kappa \operatorname{div} \mathbf{E} + \varepsilon \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.8)$$

umgeformt werden. Die elektrische Feldstärke ergibt sich nach Gl. (2.9) aus dem Gradienten des Potentials φ zu

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi. \quad (2.9)$$

Zudem kann Gl. (2.8) unter Zuhilfenahme des Nabla-Operators ∇ zu Gl. (2.10) umgeformt werden:

$$\begin{aligned} 0 &= -\kappa \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi - \varepsilon \operatorname{div} \frac{\partial (\operatorname{grad} \varphi)}{\partial t} \\ 0 &= -\kappa \nabla \cdot \nabla \varphi - \varepsilon \nabla \cdot \frac{\partial (\nabla \varphi)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Nach dem *Schwarzschen Vertauschungssatz* [Bro-08] lassen sich in Gl. (2.10) die räumliche und zeitliche Ableitung unabhängig voneinander lösen, wonach sie sich mithilfe des Laplace-Operators Δ anschließend wie folgt vereinfachen lässt:

$$0 = -\kappa \Delta \varphi - \varepsilon \Delta \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.11)$$

Die Stromdichte im Dielektrikum setzt sich nach Gl. (2.12) dabei entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 2.3.5 aus folgenden Anteilen zusammen:

- Einem zeitunabhängigen, resistiven Anteil $\mathbf{J}_{\text{res}}$ (Strömungsfeld) mit i. d. R. als konstant angenommener Leitfähigkeit,
- Einem zeitabhängigen kapazitiven Anteil $\mathbf{J}_{\text{kap}}$ aufgrund des Verschiebungsfeldes der schnellen Polarisationsmechanismen (berücksichtigt mithilfe der Permittivität des Dielektrikums) und
- aus einem ebenfalls zeitabhängigen Polarisationsstromanteil $\mathbf{J}_{\text{Pol}}$ (je nach Isoliermedium), der sich entsprechend aus der Summe der relevanten Polarisationsmechanismen $\mathbf{P}_i$ ergibt

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{res}} + \mathbf{J}_{\text{kap}}(t) + \mathbf{J}_{\text{Pol}}(t) \quad (2.12)$$

$$\mathbf{J} = \kappa \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \sum \mathbf{P}_i \quad (2.13)$$

$$\mathbf{J} = \kappa \mathbf{E} + \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \sum \mathbf{P}_i \quad (2.14)$$

Wie erwähnt werden die Ausbildung von Raumladungen und damit verbundene lokale Feldüberhöhungen jedoch nicht abgebildet und somit vernachlässigt [Küc-17]. Die nichtli-

nearen Eigenschaften des Isolieröls können zudem nur über Umwege durch u. a. feldstärkeabhängige Leitfähigkeiten implementiert werden.

Eine solche Modellierung führt im Falle einer Wechselspannungsbelastung oder der Spannungssteigerung bei schnellen, transienten Spannungsbelastungen aufgrund der höheren relativen Permittivität des Papiers mit ca. $\epsilon_r = 3,5$ im Vergleich zum Öl mit ca. $\epsilon_r = 2,2$ [Rah-09, Bac-16a, Sch-16, Küc-17] entsprechend einer Berechnung anhand des quasistationären Verschiebungsfeldes dazu, dass die höchste Feldstärke und damit die höchste Beanspruchung im Öl auftreten würde.

Wie im späteren Verlauf der Arbeit gezeigt wird, würde wiederum unter stationärer Gleichspannungsbelastung unabhängig von der Anordnung der Barrieren oder ungeachtet möglicher Raumladungseffekte demnach die höchste Feldstärke und damit die größte Beanspruchung stets in der Papierisolierung bzw. im Pressspan des Öl-Papier-Isoliersystems auftreten [Mos-87, Kra-12, Küc-17]. Grund ist die um mehrere Größenordnungen höhere elektrische Leitfähigkeit des mineralischen Isolieröls verglichen mit der Leitfähigkeit des ölimprägnierten Papiers [Bac-16a, Sch-16, Küc-17, Rum-19]. Dies wäre bei der dielektrischen Dimensionierung des Öl-Papier-Isoliersystems der Stromrichtertransformatoren entsprechend zu berücksichtigen. Die Pressspan- bzw. Papierisolierung müsste entsprechend stark ausgeführt werden. Üblicherweise werden dabei Verhältnisse der elektrischen Leitfähigkeiten zwischen Papier und Isolieröl von $\kappa_{\text{Papier}}/\kappa_{\text{Öl}} = (1/100 \dots 1/1000)$ angenommen [Bär-10, Sch-10b, Bac-16a, Sch-16, Küc-17]. Berechnungen und Vergleiche in [Bac-13, Bac-16a] konnten jedoch unter anderem belegen, dass über eine solche Feldberechnung starke Diskrepanzen zwischen den berechneten Höchstfeldstärken und ermittelten Durchschlagsspannungen bestehen, was auf die Ausbildung von Ladungsträgerschichten und deren Einfluss auf die Feldstärkeverteilung zurückgeführt wurde.

2.4.2 Ladungsträgerbasierter Ansatz nach Poisson-Nernst-Planck

Aufgrund der starken Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen und Erwartungen anhand der resistiv-kapazitiven Modellierung und dem dabei fehlendem Raumladungseinfluss, wurde in [Bac-13, Bac-16a] ein Berechnungsmodell auf Basis des nichtlinearen Poisson-Nernst-Planck-Gleichungssystems vorgestellt. Durch die Implementierung der in Abschnitt 2.3.5 vorgestellten Prozesse der feldstärkeabhängigen Ladungsträgergeneration, deren Bewegung und Rekombination sowie deren Einfluss auf die Feldstärkeverteilung konnten diese in der bisherigen Modellierung vernachlässigten Einflüsse nachgebildet und damit berücksichtigt werden. Für jede Ladungsträgerspezies wird dafür eine Poisson-Gleichung formuliert, um deren Rückwirkung auf das elektrische Feld abzubilden. Zudem wird über je eine Nernst-Planck-Gleichung die lokale Änderung der Teilchendichte einer jeden Spezies durch elektrostatische Drift, Diffusion sowie deren Generation und Rekombination nachgebildet. Das Modell ist zur Nachbildung der Leitfähigkeitsprozesse in Halbleitern seit mehreren Jahrzehnten als Standardwerkzeug etabliert [Sel-84]. Jedoch kommt es auch zur Modellierung der Leitfähigkeitsprozesse in Isolierflüssigkeiten unter Gleichspannungsbelastung im letzten Jahrzehnt immer mehr zur Anwendung [Hjo-13, Bac-16a, CIG-16, Küc-17, Rum-19].

Dabei unterscheiden sich die einzelnen Ansätze vor allem in den Randbedingungen zur Lösung des Gleichungssystems.

Physikalisches Modell zur Nachbildung der Leitfähigkeitsmechanismen

Die in Abschnitt 2.3.5 vorgestellten Annahmen zur Beschreibung des Leitfähigkeitsverhaltens mithilfe der Prozesse der Generation, Bewegung und Rekombination von Ladungsträgern und deren Rückwirkung auf das elektrische Feld der Anordnung können im ladungsträgerbasierten Berechnungsmodell nach PNP implementiert und über die notwendigen Randbedingungen definiert werden (Bild 2.18). Aufgrund der Unkenntnis der im mineralischen Isolieröl im Detail stattfindenden Prozesse bzw. deren mathematischer Beschreibung werden im Berechnungsmodell auf Grundlage der Ausführungen in [Bac-16a] Vereinfachungen getroffen, die zu den am Ende des Abschnittes 2.4.2 beschriebenen Einschränkungen führt.

Bild 2.18: Schematische Darstellung der im ladungsträgerbasierten Modell nach PNP nachgebildeten Prozesse am Beispiel einer ölisierten Anordnung

Im Berechnungsmodell wird aufgrund der unbekannten Prozesse der Dissoziation und Rekombination von intrinsischen Ladungsträgern eine Grundgesamtheit an Ladungsträgern angenommen. Diese können unter der anliegenden Feldstärke zu den Gegenelektroden driften. Dort können sie aber, begründet durch deren Mizellenstruktur, nicht rekombinieren und sich somit an den Elektroden anlagern. Des Weiteren ist in Abhängigkeit der an den Elektroden vorherrschenden lokalen Feldstärke die Injektion der Ladungsträger implementiert, welche ebenfalls durch das Dielektrikum driften. Im Gegensatz zur intrinsischen Ladungsträgerspezies können diese jedoch an der Gegenelektrode rekombinieren. Ebenfalls ist eine Rekombination im Dielektrikum mit injizierten Ladungsträgern entgegengesetzter

Polarität möglich, welche in Abhängigkeit der lokalen Teilchendichten stattfinden kann. Die Bewegung der Ladungsträger erfolgt dabei wie beschrieben zum einen über Diffusion aufgrund der lokalen Teilchendichteunterschiede im Isoliermedium. Zum anderen findet infolge des anliegenden elektrischen Feldes eine elektrostatische Drift der Ladungsträger statt. Unterschiede zwischen der Bewegung der Ladungsträger im Isolieröl und der Papierisolierung werden durch die Definition der abgeschätzten Diffusionskoeffizienten und Ladungsträgermobilitäten im jeweiligen Dielektrikum implementiert. Da nach [Bac-16a] stets eine Injektion und Rekombination der Ladungsträger an den Elektroden in oder aus dem Isolieröl angenommen wird, werden für das Öl und die Papierisolierung dieselben Randbedingungen definiert. Im Folgenden soll die mathematische Modellierung der beschriebenen Prozesse nach [Bac-16a] hergeleitet und entsprechende Randbedingungen im Detail formuliert werden.

Herleitung des Gleichungssystems

Bei dem genutzten ladungsträgerbasierten Modell nach PNP handelt es sich um ein nichtlineares Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung. Ausgangspunkt ist dabei das *Gaußsche Gesetz* des elektrischen Feldes, bei der die Ladung der Dichte ρ die Quelle des elektrischen Feldes darstellt:

$$\nabla \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.15)$$

Nach Einsetzen der Gl. (2.9) und der Beschreibung der Permittivität des Dielektrikums aus dem Produkt der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 und der relativen Permittivität ϵ_r des jeweiligen Dielektrikums erhält man unter Zuhilfenahme des Laplace-Operators Δ anschließend die *Poisson-Gleichung* (2.16):

$$-\Delta \varphi = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.16)$$

Die Ladungsdichte ρ kann dabei für jede Ladungsträgerspezies i aus deren Eigenladung e_0 und deren Wertigkeit z in Abhängigkeit der jeweiligen Ladungsträger- bzw. Teilchendichten n formuliert werden:

$$\rho = \sum_i q_i n_i = \sum_i e_0 z_i n_i \quad (2.17)$$

Somit ergibt sich die *Poisson-Gleichung* zu

$$-\Delta \varphi = \frac{e_0}{\epsilon_r \epsilon_0} \sum_i z_i n_i, \quad (2.18)$$

welche das elektrische Feld unter dem Einfluss der in einem infinitesimal kleinem Volumen befindlichen Ladungsträger in Abhängigkeit deren Teilchendichten beschreibt. Die im Modell implementierten Permittivitäten wurden entsprechend der in Abschnitt 2.3 vorgestellten Annahmen auf $\epsilon_{r\text{Öl}} = 2,2$ für das Isolieröl und $\epsilon_{r\text{Papier}} = 3,7$ für die Papierisolierung festgelegt.

Die Herleitung der Nernst-Planck-Gleichung erfolgt für jede Ladungsträgerspezies i dabei in Analogie zum bisherigen Verständnis der Leitfähigkeitsvorgänge aus der *Kontinuitätsgleichung* nach Gl. (2.4):

$$0 = \operatorname{div} \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \quad (2.19)$$

Aufgrund der Unabhängigkeit der zeitlichen und örtlichen Ableitung kann diese zu

$$\begin{aligned} 0 &= \operatorname{div} \mathbf{J} + \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ 0 &= \operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial \operatorname{div} \mathbf{D}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.20)$$

umgeformt werden. Unter Anwendung des mit Gl. (2.5) vereinfachten *Gaußschen Gesetztes*

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2.21)$$

ergibt sich dabei eine Abhängigkeit zur Ladungsträgerdichte:

$$0 = \operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (2.22)$$

Wie beschrieben, ist die Grundgesamtheit an positiven und negativen Ladungsträgern im System konstant, wodurch die Kontinuitätsgleichung um entsprechende Quellterme erweitert werden kann:

$$\operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho^-}{\partial t} = 0 \quad (2.23)$$

Entgegen der bisherigen Annahme, dass die Stromdichte im Dielektrikum dem *Ohmschen Gesetz* nach Gl. (2.6) genügt, setzt sich die Stromdichte im ladungsträgerbasierten Ansatz aus den Anteilen der elektrostatischen Drift $\mathbf{J}_{\text{Drift}}$ der Ladungsträger und der Diffusion $\mathbf{J}_{\text{Diff}}$ zusammen:

$$\operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} (\mathbf{J}_{\text{Drift}} + \mathbf{J}_{\text{Diff}}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho^-}{\partial t} \quad (2.24)$$

Die Drift- bzw. Konvektionsstromdichte ergibt sich aus der gerichteten Bewegung der Ladungsträger entsprechender Dichte mit der mittleren Driftgeschwindigkeit $\mathbf{v}$:

$$\mathbf{J}_{\text{Drift}} = \rho \mathbf{v} \quad (2.25)$$

Driftgeschwindigkeit ergibt sich wiederum aus dem Produkt aus der Mobilität bzw. (Ionen-) Beweglichkeit μ der jeweiligen Ladungsträgerspezies und der treibenden, elektrischen Feldstärke [Ham-05]:

$$\mathbf{v} = \mu \mathbf{E} \quad (2.26)$$

Die jeweilige Mobilität ist dabei von der Ladungsträgerspezies und den dominierenden Leitungsprozessen abhängig. Aufgrund der schweren Differenzierbarkeit der jeweiligen Anteile der Ladungsträger wird unabhängig von vorhandenen Ladungsträgerspezies oft nur eine Hauptionensorte angenommen, für die in der Literatur im Bereich der Raumtemperatur allgemeine Beweglichkeiten im Bereich von $\mu = (1 \cdot 10^{-11} \dots 1 \cdot 10^{-7}) \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ angegeben werden [Gaf-92, Lew-94, Sha-11, Yan-12b, Rum-19, Vah-20]. Andererseits werden aus ein-

zelenen Ölbestandteilen Ionen- und Elektronenmobilitäten unterschieden und bestimmt, wobei gemessene Elektronenmobilitäten im Vergleich zur Mobilität von Ionen um bis zu vier Größenordnungen höher sein können [Ter-62, Sch-70, Min-71]. Die jeweilige Ladungsträgermobilität im ölimprägnierten Pressspan wird dabei aufgrund dessen inhomogener Struktur um bis zu fünf Größenordnungen geringer angenommen [Son-12], wobei die Mobilität der Elektronen im ölgetränkten Papier die Mobilität der Löcher übersteigen kann [Che-17]. Eine eindeutige Angabe von spezifischen Ladungsträgermobilitäten ist aktuell jedoch nicht möglich.

Die Mobilität ist nach Gl. (2.27) indirekt proportional von der Größe bzw. vom Radius r des Ions bzw. Ladungsträgers der Spezies i und der Viskosität des Fluids abhängig. Entsprechend der *Waldenschen Regel* nach Gl. (2.28) ist dabei das Produkt aus Mobilität und Viskosität stets konstant. Unter Annahme der Ionenleitung eines solvatisierten Ions nach Abschnitt 2.3.1 ist diese für die organischen Ionen des mineralischen Isolieröls erfüllt. [Ham-05]

$$\mu = \frac{ze_0}{6\pi\eta r_i} \quad (2.27)$$

$$\mu\eta = \frac{ze_0}{6\pi r_i} = \text{konst} \quad (2.28)$$

Da die Viskosität des Fluids stark temperaturabhängig ist, ergibt sich demnach auch eine Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgermobilität [Phi-82, Rum-19].

Aus den Gln. (2.25) und (2.26) lässt sich die Beschreibung der Driftstromdichte abhängig von der Mobilität einer jeden Spezies, deren Ladungsdichte und der elektrischen Feldstärke – beschrieben durch den Gradienten des Potentials nach Gl. (2.9) – darstellen.

$$\begin{aligned} J_{\text{Drift}} &= \rho\mu\mathbf{E} \\ J_{\text{Drift}} &= -\rho\mu\text{grad}\varphi \end{aligned} \quad (2.29)$$

Der zweite Stromdichteanteil ergibt sich aus der Orts- und zeitabhängigen Diffusion. Diese wird durch das *1. Fick'sche Gesetz* beschrieben, welches die eindimensional gerichtete Teilchen- bzw. Diffusionsflussdichte Γ_{Diff} in Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten D und dem Gefälle der Teilchendichtekonzentration n , beschrieben durch dessen Gradienten, darstellt [Ham-05, Ada-09]:

$$\Gamma_{\text{Diff}} = -D\text{grad}n \quad (2.30)$$

Der Diffusionskoeffizient ist nach der *Einstein-Smoluchowski-Beziehung* nach Gl. (2.31) dabei grundsätzlich von der Temperatur und der Mobilität der Ladungsträger abhängig und damit nach Gl. (2.27) ebenfalls abhängig von der Größe der Teilchen und der Viskosität des Mediums [Ham-05, Ada-09]:

$$D = \mu k_B T \quad (2.31)$$

Im Modell ist aufgrund des nicht untersuchten Temperatureinflusses auf eine solche Implementierung verzichtet worden. Stattdessen wurden zur Vereinfachung Diffusionskonstanten abgeschätzt und eingesetzt.

Die Diffusionsstromdichte ergibt sich anschließend aus der Ladung q der diffundierenden Teilchen:

$$\mathbf{J}_{\text{Diff}} = q \Gamma_{\text{Diff}} \quad (2.32)$$

Nach Einsetzen von Gl. (2.30) kann die Teilchendichte mithilfe der Ladungsträgerdichte nach Gl. (2.17) substituiert werden und man erhält:

$$\begin{aligned} n &= \frac{\rho}{q} \\ \mathbf{J}_{\text{Diff}} &= q \left(-D \text{grad} \frac{\rho}{q} \right) \\ \mathbf{J}_{\text{Diff}} &= -D \text{grad} \rho \end{aligned} \quad (2.33)$$

Beide Stromdichteanteile können nun in Gl. (2.24) eingesetzt und umgestellt werden. Die Mobilität und der Diffusionskoeffizient wird dabei vereinfacht als skalar und unabhängig von der Feldstärke und der Ladungsträgerdichteverteilung angenommen.

$$\begin{aligned} \text{div}(-\rho \mu \text{grad} \varphi - D \text{grad} \rho) + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{\partial \rho^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho^-}{\partial t} \\ -\rho \mu \text{div grad} \varphi - D \text{div grad} \rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{\partial \rho^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho^-}{\partial t} \\ -\rho \mu \Delta \varphi - D \Delta \rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{\partial \rho^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho^-}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Da die Bewegung einer jeden Ladungsträgerspezies unabhängig voneinander ist, können die Gleichungen für jede Spezies i separat beschrieben und eingesetzt werden.

$$-\rho_i \mu_i \Delta \varphi - D_i \Delta \rho_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \frac{\partial \rho_i^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i^-}{\partial t} \quad (2.35)$$

Durch Einsetzen von Gl. (2.17) können diese in Abhängigkeit der Teilchendichte n_i einer jeden Spezies dargestellt werden:

$$\begin{aligned} -e_0 z_i n_i \mu_i \Delta \varphi - e_0 z_i D_i \Delta n_i + e_0 z_i \frac{\partial n_i}{\partial t} &= e_0 z_i \left(\frac{\partial n_i^+}{\partial t} + \frac{\partial n_i^-}{\partial t} \right) \\ n_i \mu_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i + \frac{\partial n_i}{\partial t} &= \frac{\partial n_i}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Im Quellterm der zeitabhängigen Zu- oder Abnahme der Teilchendichte kann zudem die feldstärkeabhängige Dissoziation und teilchendichteabhängige Rekombination der Ladungsträgerspezies i und j beschrieben werden:

$$\frac{\partial n_i^+}{\partial t} + \frac{\partial n_i^-}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} n_i^{\text{Diss}} + \frac{\partial}{\partial t} n_i^{\text{Rekomb}} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_i^{\text{Diss}} = k_i^{\text{Diss}}(E) \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_i^{\text{Rekomb}} = - \sum_j k_{ij}^{\text{Rekomb}} n_i n_j \quad (2.39)$$

Daraus ergibt sich mit Gl. (2.36) die *Nernst-Planck-Gleichung*:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \underbrace{\mu_i n_i \Delta \varphi}_{\text{Drift}} + \underbrace{D_i \Delta n_i}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\sum (r_{i \text{ Diss}} + r_{ij \text{ Rekomb}})}_{\text{Generation/Rekombination}} \quad (2.40)$$

Sie beschreibt damit die zeitabhängige, örtliche Teilchendichteänderung $\partial n_i / \partial t$ einer jeden Spezies i im Dielektrikum aufgrund der Drift durch das elektrische Feld, deren Diffusion sowie der Rekombination und Generation von Ladungsträgern. Dabei gilt diese unabhängig davon, ob der treibende Potentialgradient durch die Teilchendichteunterschiede der Ladungsträger selbst oder durch eine angelegte Spannung resultiert [Ada-09]. Damit werden alle Einflüsse auf die elektrische Feldverteilung abgedeckt.

Über das in den Gln. (2.18) und (2.40) formulierte *Poisson-Nernst-Planck-Gleichungssystem* kann somit die Ladungsträgerbewegung, daraus resultierende Ladungsdichteunterschiede und -akkumulationen, deren Einfluss auf die Feldstärkeverteilung im Isoliersystem sowie die Rückwirkung der beeinflussten Feldstärkeverteilung auf die Ladungsträgerbewegung und deren Generation abgebildet und numerisch iterativ gelöst werden.

Randbedingungen

Zur Lösung des Gleichungssystems bzw. für Berechnungen zur Nachbildung des Leitfähigkeitsverhaltens oder – wie es in dieser Arbeit vorrangig geschehen soll – zum Ermitteln von elektrischen Feldstärkeverteilungen werden entsprechende Randbedingungen benötigt. Zum einen muss das Potential der Hochspannungs- (HS) als auch der Erdelektrode (ERDE) als Rand des Definitionsbereiches über *Dirichlet-Bedingungen* definiert werden. Es beeinflusst nicht nur die Richtung des treibenden, elektrischen Feldes, sondern auch die Polarität der injizierten Ladungsträger.

$$\varphi_{\text{HS}} = u(t) \quad (2.41)$$

$$\varphi_{\text{ERDE}} = 0 \text{ V} \quad (2.42)$$

Da die stattfindenden Prozesse zeitabhängig sind, ist die angelegte Prüfspannung ebenfalls zeitabhängig zu definieren. Vor dem Hintergrund der numerischen Stabilität sind Unstetigkeiten in der Definition der Randbedingungen zu vermeiden, was u. a. durch eine angenäherte Nachbildung einer Spannungsrampe mithilfe einer Halbsinusschwingung nachgebildet werden kann [Bac-16a].

Zur Lösung des Gleichungssystems müssen die Anfangskonzentrationen n_{i0} einer jeden Spezies i (sowohl der intrinsischen als auch der injizierten Ladungsträger) zum Zeitpunkt $t = 0$ definiert werden, welche anhand von Leitfähigkeitsmessungen in Vorversuchen und nach [Bac-16a] abgeschätzt wurden. Die Dissoziation wird dabei unter Vorgabe einer definierten Anfangskonzentration von intrinsischen Ladungsträgern vereinfacht modelliert. Im Modell wird damit wie beschrieben angenommen, dass alle in Frage kommenden Bestandteile vollständig dissoziiert sind. Die hinreichende Genauigkeit dieser Annahme sowohl für

stationäre Gleichspannungsbelastungen als auch für schnellere, transiente Spannungsänderungen wurde in [Bac-16a] nachgewiesen.

Die Definition der Randbedingungen zur Generation und Rekombination von Ladungsträgern erfolgt über *Neumann-Bedingungen*, da sie aufgrund deren Feldstärkeabhängigkeit Teil der Lösung sind und ebenfalls iterativ bestimmt werden müssen.

Für die intrinsischen Ladungsträger wird deren Generation und Rekombination aufgrund des fehlenden detaillierten Verständnisses über deren Dissoziation sowie aufgrund ihres Mizellencharakters vernachlässigt (vgl. Abschnitt 2.3.1). Deren Grundgesamtheit entspricht deren Ausgangskonzentration n_{i0} nach Gl. (2.43) und bleibt konstant, d. h. der Randfluss an den Elektroden nach Gl. (2.44) ergibt sich zu Null.

$$n_i(t) = n_{i0} \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{intr ERDE}} = \frac{\partial}{\partial t} n_{\text{intr HS}} = \mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = 0 \quad (2.44)$$

Die injizierten Ladungsträger hingegen werden an den Elektroden generiert oder können rekombinieren. Die Randbedingungen für die feldstärkeabhängige Injektion an Elektroden werden dabei über die Definition eines entsprechenden Randflusses implementiert. In [Bac-16a, Bac-16b] wurde gezeigt, dass die Injektion bzw. die Injektionsrate $\Gamma_{\text{inj } i}$ der Spezies i durch einen Ansatz nach Gl. (2.45) genügt, wie er auch für die Ladungsträgeremission aus dem Metall ins Vakuum nach *Fowler-Nordheim* [Fow-28] beschrieben wird [Bac-16a, Bac-16b, Gab-18a, Alj-19].

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{\text{inj } i} = \Gamma_{\text{inj } i} = \mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = a_i |E|^{b_i} \exp \left(-\frac{C_i}{|E|} \right) \quad (2.45)$$

Mit diesem Ansatz kann sowohl die exponentiell verstärkte Injektion bei hohen Feldstärken als auch die verminderte Injektion bei geringen Feldstärken abgebildet werden [Bac-16a]. Dabei stellt sich typischerweise eine Proportionalität zum Quadrat der elektrischen Feldstärke ein ($b_i = 2$) [Fow-28, Bac-16b, Alj-19]. Über den Proportionalitätsfaktor a kann auch die in [Bac-16b, Gab-18a] ermittelte polaritätsabhängige Injektion implementiert werden (vgl. Bild 2.7). Dabei werden die höheren Injektionsraten von Elektronen (e^-) im Vergleich zu Löchern ($Lö$) implementiert, indem $a_{e^-} > a_{Lö}$ gilt.

Wie in [Bac-16b, Gab-18a, Gab-19a] gezeigt, können die benötigten Injektionsraten über die Auswertung der stationären Stromdichte J_{stat} durch eine ölsolierte Anordnung über die Gln. (2.46) und (2.47) abgeschätzt werden. Die stationäre Stromdichte wird entsprechend der Annahmen in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.5 bei hohen elektrischen Feldstärken an den Elektroden durch Injektion verursacht. Die Bestimmung des polaritätsabhängigen Injektionsverhaltens sollte dabei vorrangig an einer inhomogenen Anordnung erfolgen [Bac-16b, Gab-18a].

$$\Gamma_{\text{inj } i} = \frac{J_{\text{stat}}}{e_0} \quad (2.46)$$

$$J_{\text{stat}} = e_0 \cdot E_{\text{inj}} \cdot (\mu_{Lö} n_{Lö} + \mu_{e^-} n_{e^-}) \quad (2.47)$$

In der Literatur wird zur Nachbildung der Injektion ebenfalls der feldstärke- und vor allem stark temperaturabhängige Ansatz nach Schottky implementiert [Zhu-18, Zha-19a, Zou-19a]. Dieser Ansatz entstammt jedoch u. a. aus der Injektion in polymere Feststoff-Dielektrika und verlangt entsprechend hohe Feldstärken sowie die detaillierte Kenntnis über die dabei zu überwindenden Energie-Barrieren (vgl. Bild 2.6) [LeR-04, Bel-07]. Ebenso wird er aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit zur Nachbildung des Entladungs- bzw. Durchschlagprozesses in flüssigen Dielektrika genutzt [Li-16, Zhu-18, Yos-19, Zou-19a]. Eigene Untersuchungen zeigten hingegen, dass für die untersuchten Randbedingungen bei den auftretenden Feldstärken und unter Raumtemperatur der Ansatz nach *Fowler-Nordheim* hinreichend genau ist und die Injektionsprozesse sehr gut abbildet [Bac-16b, Gab-18a].

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, rekombinieren die injizierten Ladungsträger u. a. direkt beim Erreichen der Gegenelektrode. Da sich die Geschwindigkeit der Teilchen einer Spezies i nach Gl. (2.26) aus deren Mobilität und der Feldstärke ergibt, entspricht deren Rekombinationsrate an der Elektrode demnach der Rate, mit der sie diese abhängig von deren Geschwindigkeit erreichen:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} n_{i \text{ Rekomb}} &= \mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = -n_i \mathbf{v} \\ \frac{\partial}{\partial t} n_{i \text{ Rekomb}} &= \mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = -n_i \mu_i \mathbf{E}\end{aligned}\quad (2.48)$$

Die Diffusionsstromdichte kann damit vereinfacht vernachlässigt werden und es gilt:

$$D_i \Delta n_i = 0 \quad (2.49)$$

Die teilchendichteabhängige, gegenseitige Rekombination von injizierten Ladungsträgern im Dielektrikum wird über einen separaten Rekombinationskoeffizienten beschrieben, welcher die Wahrscheinlichkeit der Rekombination zweier Ladungsträger widerspiegelt und ebenfalls in Vorversuchen und nach [Bac-16a] abgeschätzt wurde. Da somit der Rekombinationsprozess einer Permutation aller Teilchen entspricht, kann dieser nach Gl. (2.39) über das Produkt der Teilchendichten mit dem spezifischen Rekombinationskoeffizienten $k_{ij \text{ Rekomb}}$ abgebildet werden. Je höher demnach die lokale Teilchendichte der injizierten Ladungsträger beider Polaritäten ist, desto mehr Ladungsträger können im Volumen rekombinieren:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_{i \text{ Rekomb}} = - \sum_j k_{ij \text{ Rekomb}} n_i n_j$$

Die weiteren, benötigten Parameter der Diffusionskoeffizienten und Mobilitäten einer jeden Ladungsträgerspezies wurden ebenfalls in Vorversuchen und nach [Bac-16a] abgeschätzt. Zur Vereinfachung des Modells wurden dabei für jede Ladungsträgerspezies ähnliche Parameter definiert. Zur Implementierung der verringerten Drift im Papier wurden die Parameter für das Papier im Vergleich zum Öl um etwa drei Größenordnungen verringert.

In Anlehnung an die in der Literatur ermittelten Mobilitäten wurde dabei für jede Spezies eine Mobilität von $\mu = 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ implementiert.

Einschränkungen bei der Anwendung des vorgestellten Berechnungsmodells

Aus den zu Beginn erläuterten, getroffenen Annahmen ergeben sich jedoch auch Einschränkungen des Modells. Im Folgenden wird dabei nur auf die für diese Arbeit relevantesten und damit zwingend zu erwähnenden Einschränkungen eingegangen. Auf weitere, detailliertere Ausführungen der allgemeinen Einschränkungen des Modells sei ausdrücklich auf [Bac-16a] verwiesen.

Wie bereits erwähnt stellt sich für die vorgestellten Leitfähigkeitsprozesse und damit für die Generations- und Transportmechanismen eine Temperaturabhängigkeit ein. Diese resultiert unter anderem aus der temperaturabhängigen Viskosität der Isolierflüssigkeit, welche die Mobilität und die Diffusionskoeffizienten der Ladungsträger beeinflusst. Da die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche stets bei Raumtemperatur erfolgten, wurde daher auf eine Implementierung dieser Temperaturabhängigkeit verzichtet. Zudem finden sich in der Literatur keine eindeutigen und belastbaren Werte sowohl für die Mobilität der Ladungsträger an sich als auch für deren Temperaturabhängigkeiten. Des Weiteren wurde die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Mobilität für die Berechnungen nach PNP als unzulässig eingeschätzt, da andernfalls das zeitabhängige Leitfähigkeitsverhalten nicht nachgebildet werden kann [Bac-16a].

Ein weiterer Temperatureinfluss ergibt sich auf die Austrittsarbeit eines Elektrons nach Schottky. Sowohl aufgrund der Übereinstimmung des Injektionsverhaltens zu Fowler-Nordheim als auch aufgrund des nicht untersuchten Temperatureinflusses wurde auf eine solche Implementierung verzichtet. Des Weiteren wurde die Anwendung dieser Implementierung aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit für einfache Injektionsprozesse zur Nachbildung der Leitfähigkeit im Isolieröl als nicht notwendig erachtet, da diese sich wie beschrieben vor allem bei Entladungserscheinungen einstellt. Zudem sind detaillierte Kenntnisse über die zur Implementierung zwingend notwendigen Energie-Barrieren erforderlich. Eine weitere Einschränkung hinsichtlich der Ladungsträgermobilität ergibt sich daraus, dass diese abhängig von der elektrischen Feldstärke sein könnte [Bac-16a]. Diese würde sich aufgrund der „inneren Reibung“ [Bac-16a] mit steigender Feldstärke asymptotisch an ein Maximum annähern, was aufgrund der getroffenen Vereinfachung der konstanten Mobilität nicht implementiert ist. Demnach könnte dies Ungenauigkeiten in den Berechnungen hervorrufen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen jedoch, dass trotz dieser Vereinfachung eine hinreichende Genauigkeit erreicht werden kann.

Weiterhin bleibt eine Ölbewegung infolge konvektiver Strömungen des Öls unberücksichtigt, da nur die Teilchenbewegung über Diffusion und elektrostatischer Drift implementiert ist. Zwar zeigen Untersuchungen, dass eine solche Ölströmung einen Einfluss auf die Feldstärkeverteilung innerhalb einer ölsolierten Anordnung hat [Sch-11]. Betrachtungen hinsichtlich eines auftretenden Volumeneffektes abhängig vom Ölvolumen im Verlauf der Arbeit zeigen jedoch, dass auch dieses Verhalten in Abhängigkeit der akkumulierten La-

dungsträger trotz der genannten Vereinfachungen prinzipiell abgebildet werden kann. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Betrachtungen im Rahmen der Arbeit nur zur Abschätzung und zum Nachweis des Verhaltens dienen. Detaillierte Betrachtungen können aufgrund der unbekannten Einflussparameter durch größere Ölvolumina (z. B. des gesamten Ölvolumens eines Transformators) jedoch nicht abgebildet werden. Zudem ließe sich die Nachbildung einer durch die Anordnung gerichteten Ölströmung nur mit höherem Rechenaufwand mithilfe einer mehrdimensionalen Anordnung abbilden.

Weiterhin wurden Dissoziationsvorgänge im Öl nicht nachgebildet, sondern vereinfacht eine Grundgesamtheit aller dissoziierbaren Bestandteile angenommen, die vollständig dissoziiert sind. Durch die feldstärkeabhängige Dissoziation nach [Ons-34, Wie-29] ist jedoch davon auszugehen, dass aufgrund der vorhandenen, polaren Bestandteile zeitabhängig Dissoziationsprozesse stattfinden, die vor allem bei kleinen nominellen Feldstärken noch nicht abgeschlossen sind. Zudem ist bei hohen Feldstärken ebenfalls ein Gleichgewicht aus Dissoziation und Rekombination der intrinsischen Ladungsträger anzunehmen [Att-03]. Dabei wäre eine Rekombination der intrinsischen Ladungsträger mit weiteren Mizellen, injizierten Ladungsträgern und an den Elektroden möglich, wodurch das Gleichungssystem entsprechend erweitert werden müsste.

Da in dieser Arbeit das Durchschlagverhalten bzw. die Feldstärkeverteilung unmittelbar vor dem Durchschlag im Vordergrund steht, wird davon ausgegangen, dass dieses Gleichgewicht bei den betrachteten, hohen nominellen Feldstärken im stationären Zustand erreicht ist. Dies lässt sich u. a. mithilfe der in der Arbeit gezeigten Strommessungen nachweisen, da bei hohen angelegten Spannungen und damit Feldstärken bei der weiteren Spannungssteigerung kein klassischer Polarisationsstromanteil feststellbar ist (vgl. Abschnitt 6.1.1). Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen zudem, dass diese Annahme zu qualitativ korrekten Ergebnissen führt. Zur Verbesserung der quantitativen Aussagen der Berechnungen müssen diese Prozesse jedoch implementiert werden, was den Rechenaufwand jedoch enorm erhöht.

Darüber hinaus ist in der Implementierung des Modells die vermehrte Ladungsträgerbildung durch Einfluss des Alterungszustandes des Öls nicht berücksichtigt. Der Alterungszustand des Öls würde die Menge der dissoziierbaren Bestandteile und demnach die Konzentration der intrinsischen Ladungsträger beeinflussen. Dies würde sich aufgrund des Einflusses der akkumulierten Mizellen auf die lokale Feldstärke an den Elektroden wiederum auf die Injektion auswirken. Ein verändertes Leitfähigkeitsverhalten oder Feldverteilungen in Abhängigkeit des Alterungszustandes wären die Folge. Eigene Messungen konnten zeigen, dass dieser Einfluss auf die feldstärkeabhängige Injektion definitiv vorhanden ist [Gab-19a], da sich die Dichte der an den Elektroden akkumulierten Ladungsträgern direkt auf die lokale Feldstärke auswirkt [Hik-96]. Demnach zeigen sich die Unterschiede nicht nur im Alterungszustand, sondern auch in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Öles und damit der verwendeten Ölsorte. Aufgrund der schweren Abschätzbarkeit der dazu notwendigen Menge an dissoziierbaren Bestandteilen ist dies nicht im Modell implementiert. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen jedoch, dass das tendenzielle Verhalten der geänderten Konzentrationen an intrinsischen Ladungsträgern am Beispiel des Volumeneffektes quali-

tativ nachgebildet werden kann. Dies wird für die Betrachtungen der Arbeit als hinreichend genau eingeschätzt, da die Untersuchungen zudem nur an einer Ölsorte mit unverändertem Alterungszustand durchgeführt wurden.

2.5 Grundlagen der überlagerten Spannungsbelastung

Die Betriebsmittel der HGÜ werden im Betrieb mit Spannungsanteilen verschiedenster Art belastet. Neben der in Abschnitt 2.1 vorgestellten Gleichspannungsbelastung des Öl-Papier-Isoliersystems [Sch-10b, CIG-15, Bac-16a], kann diese ebenfalls von transienten Überspannungen überlagert werden. Mögliche Ursachen dieser Überspannungen sind üblicherweise Schalthandlungen, Blitzeinschläge oder Isolationsfehler der Betriebsmittel, aber auch Fehler innerhalb der Konverter sind möglich und können zu transienten Belastungen führen [CIG-15]. Eine solche Überlagerung zweier unterschiedlicher Spannungsformen wird im Allgemeinen auch als *Mischspannung* bezeichnet [Läm-74].

Um die Beanspruchung der Betriebsmittel bei den auftretenden Spannungsbelastungen zu untersuchen oder das Isoliervermögen der Betriebsmittel in dielektrischen Prüfungen nachzuweisen, sind entsprechende Prüfschaltungen notwendig. Das Erzeugen der reinen Spannungsformen einer Wechsel-, Gleich- oder Stoßspannung mit den dazugehörigen Prüfanlagen unter Einhaltung der Vorgaben an die Spannungsverläufe ist Stand der Technik und in der gültigen Prüfnorm IEC 60060-1 festgelegt [Hau-14, Küc-17].

Um das Verhalten des Isoliersystems unter den auftretenden Beanspruchungen zur optimalen Dimensionierung zu verstehen, muss das Isoliersystem ebenfalls bei Mischspannungsbelastung untersucht oder das Betriebsmittel entsprechend geprüft werden. Dazu sind jedoch spezielle Prüfkreise notwendig. Die Untersuchung des Öl-Papier-Isoliersystems bei der mit einem Gleichspannungsanteil beaufschlagten Wechselspannungsbelastung war dabei in vielen Publikationen bereits Gegenstand der Forschung [Sch-67, Zhu-18]. Für den Fall der Überlagerung der Betriebsspannung mit transienten Überspannungen bestehen zum Verhalten der Öl-Papier-Isolierungen jedoch noch keine Erfahrungen. Zu dieser Überlagerung zählen somit der kurzzeitige Polaritätswechsel oder eine rasche Spannungsüberhöhung derselben Polarität.

Bei der Überlagerung zweier Spannungsanteile wird nach IEC 60060-1 abhängig von der geforderten Belastung zwischen einer kombinierten und einer zusammengesetzten Spannungsbelastung unterschieden. Unter einer kombinierten Spannungsbelastung versteht man dabei die Belastung eines 3-poligen Betriebsmittels, bei dem ein Pol geerdet, die beiden weiteren Polen jedoch mit unterschiedlichen Spannungen belastet werden. Diese wird vorrangig zur Prüfung der Längsisolation zwischen den Polen eines Hochspannungsschalters oder der Phasenisolierung eines 3-phasigen Betriebsmittels benötigt. Bei einer zusammengesetzten Spannungsbelastung hingegen wird das Isoliersystem eines Betriebsmittels mit der direkten Überlagerung zweier Spannungsanteile belastet. Dabei ist jeweils nur ein allgemeiner Aufbau der jeweiligen Prüfkreise vorgegeben, welcher aber nicht weiter spezifiziert wird und von den jeweils zu überlagernden Spannungsformen abhängt. Demnach ist abhängig von der Art der Untersuchung oder Prüfung einer Anordnung eine geeigne-

te Kombination der Standardprüfkreise nötig, um zur Mischspannungserzeugung unter Laborbedingungen z. B. eine Gleichspannung mit einer Stoßspannung zu überlagern. Unter anderem bei der Prüfung von Kabeln oder gasisolierten Systemen für den Einsatz in der HGÜ sind dazu bereits Erfahrungen zur Erzeugung einer solchen zusammengesetzten Spannungsbelastung vorhanden [Pie-15, Blu-16, Her-16a, Her-16b, Fel-17] und empfohlen [CIG-12].

In dieser Arbeit wird die zusammengesetzte Spannungsbelastung des Isoliersystems aus einer Gleichspannung mit einer Blitzstoßspannung untersucht. Aufbauend auf diesen Erfahrungen zur Prüfung von Betriebsmitteln der HGÜ wird dazu ebenfalls ein geeigneter Prüfkreis genutzt, um das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems bei Mischspannungsbelastung zu untersuchen.

2.5.1 Erzeugen überlagelter Spannungsbelastungen

Nach der gültigen Norm IEC 60060-1 besteht der Prüfkreis zum Erzeugen einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus den benötigten Spannungsquellen, die parallel über entsprechende Koppel- und Schutzelemente an den Prüfling angeschlossen sind. Die Prüfanlagen sowie der Prüfling sind einseitig geerdet. Die einzelnen Spannungsanteile werden dabei separat über die jeweiligen Spannungsteiler gemessen. Um nicht nur die einzelnen Spannungsanteile, sondern auch die resultierende Mischspannung zu messen, wird zudem ein weiterer Messteiler (i. d. R. ein hochohmiger, gedämpft kapazitiver, universaler Spannungsteiler [Sch-10c]) benötigt. Alle Spannungsanteile werden dabei simultan über ein 3-Kanal-Messsystem gemessen und ausgewertet (Bild 2.19). Steht ein solcher Universalteiler jedoch nicht zur Verfügung, ergeben sich bei der Messung der erzeugten Mischspannung am Prüfling besondere Herausforderungen. Im folgenden Abschnitt wird deshalb auf einen Prüfkreis mit separater Messung der einzelnen Mischspannungsanteile eingegangen, wie er in [Her-16a] rechnerisch und messtechnisch verifiziert und in dieser Arbeit angewendet wurde.

Bild 2.19: Schematischer Aufbau eines Hochspannungsprüfkreises nach IEC 60060-1 zum Erzeugen einer zusammengesetzten Prüfspannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen unter Mischspannungsbelastung aus einer Gleichspannung mit einer überlagerten Blitzstoßspannung werden als Spannungsquellen dementsprechend eine Gleichspannungsquelle mit Gleichspannungsteiler sowie ein Blitzstoßspannungsgenerator mit Blitzstoßspannungsteiler eingesetzt (Bild 2.19). Die jeweils benötigten Koppel- und Schutzelemente (auch als Koppel- bzw. Trennglieder bezeichnet) erfüllen dabei mehrere Funktionen und sind daher im Prüfkreis zur Mischspannungserzeugung von großer Bedeutung. Zum einen sollen mit deren Hilfe die Spannungsanteile in Amplitude und zeitlichem Verlauf möglichst unbeeinflusst übertragen werden (Koppelfunktion). Zum anderen sollen aber auch die entsprechenden Prüfanlagen vor den Einflüssen und Belastungen durch die jeweils andere Spannungsquelle geschützt werden (Schutzfunktion). Zum Erzeugen einer Mischspannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung sind folgende Trennglieder für die Überlagerung geeignet, welche für den Einsatz entsprechend dimensioniert werden müssen [Läm-74]:

- Als gleichspannungsseitiges Trennglied wird ein hochohmiges oder induktives Element benötigt, welches mithilfe der Kapazität des Prüfobjektes einen Tiefpass bildet. Als geeignete Trennglieder haben sich dabei spezielle Sperrimpedanzen mit ohmsch-induktiven Anteilen bewährt [Her-16a, Her-16b]. Ebenfalls geeignet sind zudem einfache Wasserwiderstände, welche aufgrund des somit erreichbaren, hohen elektrischen Widerstands ebenfalls in Prüfungen von DC-Kabeln oder DC-GIS erfolgreich eingesetzt wurden [Pie-15, Blu-16, Fel-17].
- Als stoßspannungsseitiges Trennglied sind sogenannte Längskapazitäten wegen ihres Hochpassverhaltens besonders geeignet [Pie-15, Blu-16, Her-16a, Fel-17]. Dabei wird empfohlen, dass die Kapazität für ein optimiertes Übertragungsverhalten und einen geringen Spannungsfall über dem Trennglied mindestens das Zehnfache der Prüflingskapazität beträgt [Blu-16]. Für die Überlagerung ist als einfache und kostengünstigere ebenfalls ein spannungsgesteuerter Schalter in Form einer Kugelfunkenstrecke geeignet [Pie-15, Blu-16, Her-16a, Fel-17]. Jedoch sei beim Einsatz der Kugelfunkenstrecke erwähnt, dass zum einen für die unipolare Überlagerung Stoßspannungen in Höhe des doppelten Gleichspannungsanteils nötig sind, um die Zündbedingung der Kugelfunkenstrecke zu erfüllen. Abhängig vom Zündverhalten der Funkenstrecke kann es zudem zum Aufschwingen des Reihenschwingkreises aus Stoßkapazität des Stoßspannungsgenerators, Prüflingskapazität und Zuleitungsinduktivität kommen [Her-16a].

2.5.2 Arten der Überlagerung und deren Auswertung

Die mit dem vorgestellten Prüfkreis erzeugbare Mischspannung wird je nach Polarität der Spannungsanteile unterschieden. Eine gleichsinnige Überlagerung der Spannungsanteile derselben Polarität wird als *unipolar*, die Überlagerung der Spannungsanteile entgegengesetzter Polarität wird als *bipolar* bezeichnet. Demnach sind abhängig von der Polarität der erzeugten Gleich- und Stoßspannung vier verschiedene Mischspannungsverläufe möglich (Bild 2.20).

Die Ergebnisse einer solchen Mischspannungsbelastung werden üblicherweise in der sogenannten 4-Quadranten-Darstellung dargestellt und ausgewertet (Bilder 2.20 und 2.21) [Fah-72, Mos-79a, Her-16a]. Zur Darstellung der Mischspannung in den vier Quadranten wird die erzeugte und am Prüfobjekt anliegende Summenspannung mit der Amplitude $\hat{U}_\Sigma$ über dem Gleichspannungsanteil U_{DC} aufgetragen.

Bild 2.20: Bei der Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung erzeugbare uni- und bipolare Mischspannung in der 4-Quadranten-Darstellung

Für die in dieser Arbeit genutzte Prüfschaltung mit einer Längskapazität zur Mischspannungserzeugung ergibt sich die resultierende Summenspannung $\hat{U}_\Sigma$ der zusammengesetzten Spannung direkt aus der vorzeichenrichtigen Addition der Gleichspannung U_{DC} und der Amplitude der Blitzstoßspannung $\hat{U}_L$:

$$\hat{U}_\Sigma = U_{DC} + \hat{U}_L \quad (2.50)$$

Nach Gl. (2.50) leitet sich die Darstellung in den vier Quadranten des Diagramms ab, die zur Auswertung der Durchschlagversuche dieser Arbeit in Abschnitt 6.2 genutzt wird (Bild 2.21).

Auf der Abszisse des Diagramms wird der Gleichspannungsanteil U_{DC} aufgetragen, auf der Ordinate die ermittelte Durchschlagspannung $\hat{U}_{DS}$. Die Ergebnisse bei Mischspannungsbelastung (Misch) werden demnach für die unipolare Überlagerung in den Quadranten I und III, für die bipolare Überlagerung in den Quadranten II und IV dargestellt. Daraus ergibt sich, dass die Ergebnisse der Durchschlagversuche bei reiner Gleichspannungsbelastung auf der Diagonalen $U_{DS DC}$ aufgetragen werden, da in dem Fall der Stoßspannungsanteil mit $\hat{U}_L = 0$ entfällt. Im Umkehrschluss werden demnach die Ergebnisse der Durchschlagversuche bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung entlang der der Ordinate bei $\hat{U}_{DS L}$ dargestellt, da der Gleichspannungsanteil mit $U_{DC} = 0$ entfällt.

(a) Zusammensetzung der Mischspannung
(Bsp.: unipolare Überlagerung)

(b) 4-Quadranten Darstellung

Bild 2.21: Zusammensetzung der Mischspannung sowie Anwendung der 4-Quadranten-Darstellung nach [Gab-18c] zur Darstellung der ermittelten Durchschlagspannung U_{DS} in Abhängigkeit des Gleichspannungsanteils U_{DC}

3 Ziele und Eingliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wurde erläutert, dass klassische und zur Anwendung unter Wechselspannungsbelastung etablierte Berechnungsmodelle auf Grundlage einfacher Netzwerkmodelle nur bedingt unter Gleichspannungsbelastung einsetzbar sind. Nichtlinearitäten oder auftretende Raumladungseffekte können damit nicht oder nur bedingt abgebildet werden. Die mathematische Modellierung mithilfe des Poisson-Nernst-Planck-Gleichungssystems hingegen stellt ein geeignetes Werkzeug dar, um stattfindende, dielektrische Vorgänge in einem Öl-Papier-Isoliersystem unter Gleichspannungsbelastung hinreichend genau nachzubilden. Mit diesem numerischen Werkzeug ist es möglich, die Leitfähigkeitsprozesse im Dielektrikum nachzubilden und Einflüsse auf die Feldstärkeverteilung und somit die dielektrische Beanspruchung des Isoliersystems abzubilden.

Die Drift der Ladungsträger, deren Akkumulation an den Grenzflächen zwischen Öl und Papier bzw. Öl und metallischer Elektrode sowie die Rückwirkung der Eigenladung der Ladungsträger auf die Feldverteilung im Isoliersystem wurde aufbauend auf numerischen Berechnungen anhand des ladungsträgerbasierten PNP-Modells in [Bac-16a] gezeigt. An ausgewählten Beispielen einer rein ölisierten Anordnung und einer einfachen Öl-Papier-isierten Anordnung konnte bereits die Anwendbarkeit des Modells auf die stattfindenden Leitfähigkeitsprozesse im Öl sowie Auswirkung auf die Feldstärkeverteilung einer ölisierten Anordnung gezeigt werden.

Vor allem in Bezug auf das dielektrische Verhalten eines realen Öl-Papier-Isoliersystems sind daher weitere Versuche vor allem an realitätsnahen Isolieranordnungen nötig, um Rückschlüsse auf die Auswirkungen auf ein reales Isoliersystem bei Gleichspannungsbelastung ziehen zu können. Am Beispiel der Isolation eines Stromrichtertransformators der HGÜ treten Isolieranordnungen auf, die zur Förderung des Verständnisses über die Beanspruchung des Isoliersystems detailliert zu betrachten sind. Zu nennen ist dabei beispielhaft die Isolierung von Primär- und Sekundärwicklung des Transformators, in der die galvanische Trennung der Spulen über papierisierte Wicklungen realisiert ist. Oder die Isolation der Wicklungen gegen das metallische, geerdete Joch oder das geerdete Gehäuse des Transformators. Bisher durchgeführte Untersuchungen beschränkten sich jedoch vorwiegend auf nur ein Isoliermedium [Hao-15, Sch-16, Rum-19, Vah-20]. Weitere Untersuchungen fokussierten sich hingegen auf Messungen von Ladungsdichte und Feldstärkeverteilung in Mischdielektrika und deren physikalischer Interpretation [Hao-15, Wu-16, Öft-19], ohne jedoch die Beanspruchung des gesamten Isoliersystems zu betrachten.

Untersuchungen u. a. in [Zou-98, Oku-08, Bac-16b] machten jedoch auch deutlich, dass zusätzliche Effekte durch das umgebende Ölvolumen einer Elektrodenanordnung in einem Prüfgefäß das dielektrische Verhalten und somit die Feldstärkeverteilung in einer Isolieranordnung beeinflussen können. So wurde in [Zou-98] gezeigt, dass Versuche in einem ölgefüllten Prüfgefäß bei Gleichspannungsbelastung bei unterschiedlichen Füllständen des

Prüfgefäßes unterschiedliche Durchschlagsspannungen zur Folge hatten. Da dabei jedoch nur bedingt das beanspruchte Volumen der Elektrodenanordnung verändert wurde, ließen sich diese Ergebnisse nicht auf bekannte Volumeneffekte zurückführen. Messungen in [Bac-16b] belegten zudem, dass sich die Drift von zusätzlichen Ladungsträgern aus dem umgebenden Ölvolumen undefinierbar auf durchgeführte Leitfähigkeitsmessungen auswirken und somit reproduzierbare Messungen unmöglich machen.

Vor diesem Hintergrund soll daher mithilfe des ladungsträgerbasierten Ansatzes und der numerischen PNP-Modellierung in dieser Arbeit grundlegend untersucht werden, wie sich die Ladungsträgerdrift und -akkumulation auf die Feldstärkeverteilung in realitätsnahen, Öl-Papier-isolierten Anordnungen unter Gleichspannungsbelastung auswirken (Kapitel 5). Berechnungen an einfachen Isolieranordnungen sollen aufgrund der getätigten Vereinfachungen zunächst zur qualitativen Abschätzung dienen, welche Einflüsse der Ladungsträger sich wie auf die Feldstärkeverteilung und damit auf das Isoliervermögen einer solchen Anordnung auswirken.

Aufgrund der genannten Einflüsse auf das dielektrische Verhalten ölisolierter Anordnungen soll dazu zunächst der Ladungsträgereinfluss auf das zeit- und feldstärkeabhängige Verhalten mithilfe des PNP-Modells gezeigt und im Detail untersucht werden. Darauf aufbauend wird des Weiteren das Verhalten realitätsnaher Öl-Papier-isolierter Anordnungen rechnerisch untersucht. Im Vordergrund stehen dabei nicht nur die Einflüsse des feldstärkeabhängigen Verhaltens der Ladungsträger auf die Beanspruchung der Anordnungen. Durch den Vergleich mit der klassischen Strömungsfeldberechnung auf Grundlage der etablierten, resistiv-kapazitiven Modellvorstellung sollen zudem die Auswirkungen der in den klassischen Modellen vernachlässigten Raumladungseinflüsse aufgezeigt werden.

Das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems soll dabei nicht nur rechnerisch, sondern auch mithilfe von Durchschlagversuchen experimentell untersucht werden (Kapitel 6). So soll u. a. der in der Literatur beobachtete Einfluss der zusätzlichen Ladungsträger des gesamten Ölvolumens im Prüfgefäß auf das dielektrische Verhalten des Isoliersystems soll daher ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit sein. Mithilfe von Durchschlagexperimenten an offenen und mit geeigneten Mitteln abgeschlossenen Elektrodenanordnungen soll gezeigt werden, dass dieser unbekannte Einfluss des umgebenden Ölvolumens vermieden werden muss, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass mit den Experimenten nur die im speziellen untersuchte Anordnung geprüft wird und somit die Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht mehr gewährleistet ist. Jedoch ließen sich so auch eventuelle Tendenzen feststellen, wie sich das große und zusätzlich durch thermische Konvektion bewegende Ölvolumen des Transformatoren auf die Beanspruchung des Isoliersystems auswirken könnte, um etwaige Effekte genauer untersuchen zu können.

Vor allem soll jedoch anhand der durchgeführten Versuche und dem Vergleich mit den rechnerischen Ergebnissen die Gültigkeit und damit die Anwendbarkeit des ladungsträgerbasierten PNP-Modells verifiziert werden. Versuche an geeigneten, äquivalenten Anordnungen sollen dabei die in den Berechnungen gezeigten Einflüsse der generierten und an den Grenzflächen oder im Isolierpapier akkumulierten Ladungsträger nachweisen. Aufgrund des auch in der Literatur gezeigten, nicht vernachlässigbaren Einflusses der La-

dungsträger im Isoliersystem und deren Akkumulation an Grenzflächen soll weiterhin gezeigt werden, dass die aktuell zur Abschätzung der Beanspruchung und damit zur dielektrischen Dimensionierung des Isoliersystems genutzten, einfachen, resistiv-kapazitiven Modelle unzureichend und damit nur bedingt anwendbar sind.

Im Betrieb eines Stromrichtertransformators in HGÜ-Konverterstationen wird dessen Öl-Papier-Isoliersystem jedoch nicht nur mit der netzfrequenten Betriebsspannung und dem dabei auftretenden Gleichspannungsanteil belastet [CIG-15]. Zusätzliche, transiente Überspannungen können im Betrieb eines Transformators oder im Fehlerfall auftreten und sich der Betriebsspannung überlagern. Aus diesem Grund ist es für die dielektrische Dimensionierung zwingend erforderlich, das Verhalten des Isoliersystems ebenfalls bei überlagerten Spannungsbelastungen zu untersuchen. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich jedoch nur auf die Überlagerung der netzfrequenten Wechselspannung mit einer Gleichspannung [Sch-67, Now-87], die reine Gleich- oder Stoßspannungsbelastung [Hau-69, Puk-08, Lie-09, Bac-16a, Sch-16, Rum-19], oder den raschen, stufenförmigen Polaritätswechsel [Oku-97, Yan-12b, Oku-15].

Aufbauend auf den Untersuchungen bei reiner Gleichspannungsbelastung soll in der Arbeit daher auch das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems bei der Überlagerung des Gleichspannungsanteils der Betriebsspannung mit einer transienten Überspannung untersucht werden. Diese überlagerte Spannungsbelastung wird dabei mithilfe einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus einer stationären Gleichspannung mit einer Blitzstoßspannung untersucht.

Mit Berechnungen anhand des ladungsträgerbasierten PNP-Modells sollen dabei zunächst die Auswirkungen einer solch zusammengesetzten Spannungsbelastung auf die Feldstärkeverteilung gezeigt und die Ergebnisse mit denen bei reiner Gleichspannungsbelastung verglichen werden (Abschnitt 5.3). Ergebnisse aus der Literatur mit herkömmlichen Berechnungsmodellen zeigen, dass vor allem der rasche Polaritätswechsel einen kritischen Belastungsfall darstellt [Oku-97, Yan-12b, Oku-15]. Mit Durchschlagexperimenten soll anschließend die Gültigkeit des Modells auch für diese speziellen Belastungen gezeigt und ein Vergleich mit den Ergebnissen bei reiner Gleichspannungsbelastung hergestellt werden (Abschnitt 6.2).

Ziel ist es somit, aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen die Anwendbarkeit des ladungsträgerbasierten PNP-Modell zur Nachbildung der Beanspruchung Öl-Papier-isolierter Anordnungen zu bestätigen. Durch den Vergleich der ermittelten Berechnungsergebnisse mit Durchschlagversuchen an den untersuchten Modellanordnungen unter reiner Gleichspannungsbelastung und deren Überlagerung mit der transienten Blitzstoßspannungsbelastung sollen die Annahmen überprüft werden. So soll vor allem das Verständnis über das dielektrische Verhalten der Anordnung bei den auftretenden Belastungen der Stromrichtertransformatoren verbessert werden, um diese Erkenntnisse bei der dielektrischen Dimensionierung des Öl-Papier-Isoliersystems zu berücksichtigen und einer Überdimensionierung entgegenzuwirken.

4 Versuchsaufbau

In dieser Arbeit soll das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems des Konvertertransformators untersucht und die Anwendbarkeit des ladungsträgerbasierten Modells zur rechnerischen Nachbildung überprüft werden. Dazu werden die anhand des Berechnungsmodells ermittelten Ergebnisse mit Ergebnissen aus Durchschlagversuchen verglichen. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind die Versuche an möglichst einfachen, aber realitätsnahen Isolieranordnungen durchgeführt worden. Dabei wurde eine homogene Elektrodenanordnung aus planparallelen Plattenelektroden genutzt. Die Versuche wurden dabei sowohl bei einer reinen Gleichspannungsbelastung als auch an ausgewählten Anordnungen bei einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus einer Gleichspannung mit einer überlagerten Blitzimpulsspannung untersucht, um die im Betrieb des Transformators auftretenden Belastungen entsprechend abzubilden.

4.1 Versuchsanordnungen

4.1.1 Untersuchte Anordnungen

In den Versuchen soll an verschiedenen Öl- und Öl-Papier-isolierten Anordnungen im mineralischen Isolieröl das grundsätzliche Verhalten des Isoliersystems bei Gleich- und Mischspannungsbelastung untersucht werden. Um den Einfluss der Ladungsträgerbewegung und deren Akkumulation an Grenzflächen und in Mischdielektrika genauer studieren und mit der Modellvorstellung vergleichen zu können, sind sowohl reine ölisolierte Anordnungen als auch Öl-Papier-isolierte Anordnungen mit isolierten Elektroden untersucht worden (Bild 4.1).

Versuche bei reiner Gleichspannungsbelastung

Unter reiner Gleichspannungsbelastung soll zunächst das grundlegende dielektrische Verhalten der Anordnungen bei einer stationären Belastung untersucht werden. Dazu wurden Durchschlagversuche an verschiedenen Öl- und Öl-Papier-isolierten Anordnungen in Abhängigkeit der Ölspaltweite s mit einem Isolierpapier der Stärke b durchgeführt.

Für ein grundlegendes Verständnis des Verhaltens des Einstoffsystems und weiterer Einflüsse wurden zunächst Versuche an der Anordnung mit blanken Elektroden durchgeführt (Bild 4.1; b-b).

Wie bereits erwähnt, wird ein signifikanter Einfluss der intrinsischen und injizierten Ladungsträger auf das Durchschlagverhalten der Anordnungen erwartet. Diese werden nicht nur innerhalb der Elektrodenanordnung bereitgestellt, sondern können im gesamten Ölvolumen des Prüfgefäßes generiert werden. Zum Nachweis des Einflusses der Ladungs-

träger aus dem gesamten Ölvolumen im Prüfgefäß auf das Verhalten des untersuchten Isoliersystems wurden daher Versuche an der offen im Prüfgefäß befindlichen, blanken Anordnung (b-b) durchgeführt. Weiterführende Versuche wurden anschließend an einer mit einer zusätzlichen Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung durchgeführt (vgl. Bilder 4.2 und 4.3b). Diese Barriere soll das Ölvolumen im Inneren der Anordnung mechanisch vom umgebenden Ölvolumen des Prüfgefäßes abgrenzen. So soll verhindert werden, dass Ladungsträger aus dem gesamten Ölvolumen des Prüfgefäßes ins Innere der Anordnung gelangen, welche so das Verhalten der Anordnung beeinflussen können.

Zum Studium des dielektrischen Verhaltens des Öl-Papier-Isoliersystems wurden des Weiteren Versuche an Modellanordnungen von im Transformator vorhandenen Isolieranordnungen unter stationärer Gleichspannungsbelastung durchgeführt. Das Verhalten einer vollständig isolierten Anordnung, wie sie im Bereich der Windungsisolierungen zu finden ist, wurde an einer Anordnung mit isolierter Hochspannungs- und Erdelektrode (Bild 4.1: i-i) analysiert. Das Verhalten von Anordnungen mit blanken und papierisolierten Metallteilen, wie es im Transformator z. B. zwischen geerdetem Transformator-kern oder -kessel und den isolierten Windungen auftritt, wird an einer Anordnung mit isolierter Hochspannungs- und blanker Erdelektrode (Bild 4.1: i-b) untersucht. Um den möglichen Einfluss des umgebenden Ölvolumens auf die Ergebnisse auszuschließen, wurden die Versuche an den papierisolierten Anordnungen stets an der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung durchgeführt.

Bild 4.1: Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen unter Gleichspannungsbelastung genutzten Öl- und Öl-Papier-isolierten Anordnungen

Wie im Abschnitt 2.3.1 beschrieben, ist die Injektion von Ladungsträgern nicht nur feldstärkeabhängig, sondern in großem Maße auch polaritätsabhängig [Bac-16b]. Es wird daher erwartet, dass sich das polaritätsabhängige Injektionsverhalten von Ladungsträgern und deren Akkumulation an Grenzflächen auch auf die Feldstärkeverteilung einer unsymmetrischen Anordnung wie die Anordnung mit nur einer isolierten Elektrode auswirkt (i-b). Es ist daher zu erwarten, dass sich an einer solch homogenen, aber unsymmetrischen Anordnung ebenfalls ein Polaritätseffekt im Durchschlagverhalten einstellt. Diese These soll untersucht werden, indem an der Anordnung mit isolierter Hochspannungs- und blanker

Erdelektrode (i-b) Versuche sowohl bei positiver als auch negativer Polarität der anliegenden Gleichspannung durchgeführt werden. Somit wird realisiert, dass in der Anordnung zum einen die Kathode blank und die Anode papierisoliert ausgeführt wird, im weiteren Verlauf der Untersuchungen anschließend die Anode blank und die Kathode papierisoliert ist.

Um die Akkumulation von injizierten *Homocharges* an Grenzflächen weiter zu verdeutlichen, wurde im weiteren Verlauf der Untersuchungen das Verhalten der Anordnung mit zwei parallel eingeschobenen Papierbarrieren und blanken Elektroden untersucht (Bild 4.1: eingeschobene Barrieren). Aufgrund der steten Injektion von *Homocharges* aus den blanken Elektroden wird erwartet, dass sich diese an den eingeschobenen Papierbarrieren anlagern die Barrieren aufladen und somit das Verhalten der Anordnung beeinflussen.

Versuche bei Mischspannungsbelastung

Die Untersuchungen bei der zusammengesetzten Spannungsbelastung wurden zum Vergleich mit den Ergebnissen bei reiner Gleichspannungsbelastung sowohl an der blanken Anordnung (b-b) als auch an der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) durchgeführt (vgl. Bild 4.1). Dabei soll an der blanken Anordnung ebenfalls untersucht werden, inwiefern das umgebende Ölvolumen des Prüfgefäßes das Verhalten bei überlagerter Spannungsbelastung aufgrund der Gleichspannungsvorbelastung beeinflusst. Dazu wurde die Anordnung ebenfalls mit einer Ringbarriere abgeschlossen.

Mit diesen Untersuchungen und dem Vergleich mit Berechnungsergebnissen sollen weitere Kenntnisse über den Einfluss der Papierschichten im Isoliersystem auf die Ladungsträgerbewegung, deren Akkumulation und somit deren Einfluss auf das dielektrische Verhalten des gesamten Isoliersystems bei den auftretenden Belastungen gewonnen werden.

4.1.2 Elektrodenanordnung und Prüfgefäß

Bei der in den Versuchen genutzten Elektrodenanordnung handelt es sich um eine homogene, planparallele Plattenanordnung aus Edelstahlelektroden. Diese befand sich auf einer geerdeten Grundplatte aus Aluminium und war in einem mit mineralischem Isolieröl gefüllten Prüfgefäß untergebracht (Bilder 4.2 und 4.6). Die Erdelektrode der Anordnung ist dabei als Schutzringeletrode ausgeführt (vgl. Bild 4.3a), um mithilfe eines entsprechenden Messgerätes den durch die Anordnung fließenden Strom messen zu können. Die Elektrodenkanten sind dabei zur Feldhomogenisierung abgerundet. Die Elektroden sind jeweils an Hartpapierplatten befestigt, wodurch die gesamte Elektrodenanordnung über Gewindestangen aus Polyamid (PA) fixiert werden konnte (vgl. Bilder 4.3 bis 4.6). Über die Gewindestangen wurde die jeweilige Ölpaltweite der offenen Anordnung eingestellt. Das Hochspannungspotential wurde über einen flexiblen, teilentladungsfreien Aluminium-Schlauch an die Anordnung geführt, welcher mit einer feldsteuernden Elektrode versehen war und mit einer starren Zuleitung auf die Elektrodenanordnung aufgesetzt wurde.

Zum Nachweis und zur Untersuchung des Einflusses des umgebenden Ölvolumens wurde die Anordnung mit einer ringförmigen Barriere aus Transformerboard bzw. Blockspan

Bild 4.2: Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen unter Gleichspannungsbelastung genutzten, planparallelen Plattenanordnung im ölgefüllten Prüfgefäß, hier am Beispiel der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i)

vom umgebenden Ölvolumen abgeschlossen (in der Arbeit als *Ringbarriere* bezeichnet). Über die Stärke der eingesetzten Ringbarriere wurde in den Versuchen die Ölsplattweite eingestellt. Die Barriere war mit ihrem Innendurchmesser so dimensioniert, dass der Ölsplatt zwischen Schutzring- und Messelektrode von der Barriere überdeckt wurde (Bild 4.3). Randeinflüsse durch die erhöhten Feldstärken und damit die vermehrte Injektion von Ladungsträgern an den Elektrodenkanten der Schutzringanordnung sollten so vermieden werden. Die äußeren Kantenlängen der Ringbarrieren wurden dabei so dimensioniert, dass äußere Überschlüge über die Anordnung verhindert werden.

(a) Foto der Messelektrode

(b) Foto der Messelektrode mit Ringbarriere

Bild 4.3: Foto der als Schutzringanordnung ausgeführten Erdelektrode mit und ohne Ringbarriere

Für die Untersuchungen der Öl-Papier-isolierten Anordnungen wurde ein einlagiges Isolierpapier aus thermostabilisiertem Kraftpapier mit einer Stärke von $b \approx 0,13 \text{ mm}$ verwendet (Cottrell CK-125-TU), welches in Vorbereitung auf die Versuche entsprechend aufbereitet wurde (vgl. Abschnitt 4.4). Das Isolierpapier wurde auf bzw. zwischen die genutzten

Ringbarrieren eingelegt und über das Eigengewicht der Elektroden sowie eine zusätzliche Verschraubung der Elektrodenanordnung fixiert.

In den Versuchen unter zusammengesetzter Spannungsbelastung musste die Ausführung der Ringbarriere angepasst werden. Durch die eingebrachte Ringbarriere aus Transformatorboard wurde eine Längsgrenzfläche gebildet, welche sich jedoch bei der reinen Gleichspannungsbelastung nicht auf die Beanspruchung der Anordnung auswirkt [Bac-16a] und demnach keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Durchschlagversuche hat. Bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung als auch bei der überlagerten, zusammengesetzten Spannungsbelastung hingegen führt diese Längsgrenzfläche bzw. der zwischen Elektroden und Board-Barriere gebildete Tripelpunkt jedoch zu einer erhöhten Belastung der Anordnung und folglich zu einem Überschlag über die Grenzfläche im Inneren der Anordnung.

Um diese Grenzfläche zu vermeiden, wurde die genutzte Ringbarriere so ausgeführt, dass kein Elektrodenkontakt mehr zwischen Ringbarriere und Elektrode besteht. Für diesen Zweck wurde eine Ringbarriere aus Polymethylmethacrylat (PMMA) bzw. Acrylglas genutzt, deren Innendurchmesser nur minimal größer als der Außendurchmesser der Elektroden gewählt wurde (Bild 4.4). Die Hochspannungselektrode lag in ihrer Halterung somit vollständig auf der Ringbarriere auf. An der blanken Anordnung wurde die Höhe der PMMA-Ringbarriere dabei so gewählt, dass sich zwischen den Elektroden die gewünschte Ölspaltsweite einstellt. So konnte weiterhin gewährleistet werden, dass die Anordnung trotzdem vom umgebenden Ölvolumen getrennt ist, ohne das Durchschlagverhalten der Anordnung zu beeinflussen. Wie die Versuche im Verlauf der Arbeit zeigen, beeinflussen die Elektrodenkanten der Schutzringanordnung die Ergebnisse der Durchschlagversuche nicht.

Bild 4.4: Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen bei zusammengesetzter Spannungsbelastung an der blanken Anordnung genutzten, modifizierten planparallelen Plattenanordnung

Für die Versuche unter zusammengesetzter Spannungsbelastung mit isolierten Elektroden musste die Anordnung weiter modifiziert werden, da mit der durchgehenden Ringbarriere aus PMMA das Einlegen und Fixieren der Papierbarrieren nicht möglich war. Aufgrund dessen wurde wieder die in den Versuchen bei Gleichspannungsbelastung genutzte Ringbarriere aus Transformatorboard eingesetzt, über deren Stärke die entsprechende Ölspaltsweite eingestellt wurde. Dazu musste jedoch der Innendurchmesser der Ringbarrieren vergrößert werden, um auch hier eine direkte Überlappung mit den Elektroden zu vermeiden. Über angepasste PMMA-Ringbarrieren wurden die Papierbarrieren mit der

Transformerboard-Barriere in der Anordnung fixiert und der Ölabschluss der gesamten Anordnung gewährleistet (Bild 4.5).

Bild 4.5: Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen bei zusammengesetzter Spannungsbelastung an der Anordnung mit isolierten Elektroden genutzten, modifizierten planparallelen Plattenanordnung

Das Prüfgefäß ist aus mit Silikon verklebten, doppelwandigen Glasplatten gefertigt und auf einem Holzrahmen befestigt (Bild 4.6) [Bac-16a]. Über separate Anschlüsse im Boden des Prüfgefäßes kann das genutzte mineralische Isolieröl zur Ölaufbereitung eingelassen und abgepumpt werden. Des Weiteren wurde eine elektrische Durchführung im Boden des Prüfgefäßes realisiert, um zur Strommessung erforderliche Messkabel aus dem Prüfgefäß herausführen zu können und die Anordnung zu erden.

(a) Foto der Anordnung

(b) CAD-Modell

Bild 4.6: Darstellung der in den Durchschlagversuchen genutzten Elektrodenanordnung im Prüfgefäß am Beispiel der Anordnung mit isolierten Elektroden (vgl. Bilder 4.2 und 4.5)

4.2 Hochspannungsprüfkreise

4.2.1 Gleichspannungsprüfkreis

Der in den Versuchen bei reiner Gleichspannungsbelastung genutzte Gleichspannungsprüfkreis bestand je nach benötigter maximaler Gleichspannung aus einer Einweg-Gleichrichterschaltung oder einer Greinacher-Verdopplerschaltung, welche direkt mit dem Prüf-

gefäß verbunden war (Bilder 4.7 und 4.8) und Gleichspannungen mit Welligkeiten nach IEC 60060-2 von unter 10 % erzeugen konnten. Mithilfe des Einweg-Gleichrichters konnten hohe Gleichspannungen bis zu $U_{DC} = \pm 130 \text{ kV}$ erzeugt werden, mit der Greinacher Verdoppler-Schaltung waren hohe Gleichspannungen bis zu $U_{DC} = \pm 260 \text{ kV}$ realisierbar.

Bild 4.7: Ersatzschaltbild der Einweg-Gleichrichterschaltung zum Erzeugen einer Gleichspannung bis $U_{DC} = \pm 130 \text{ kV}$

Bild 4.8: Ersatzschaltbild der Greinacher-Verdopplerschaltung zum Erzeugen einer hohen Gleichspannung bis zu $U_{DC} = \pm 260 \text{ kV}$

Der Prüfkreis wurde dazu jeweils über einen Hochspannungstransformator T100 des Herstellers TuR, Typ PEO 8/100 A/K-2 mit einer hohen Wechselspannung von bis zu $U_{AC \text{ eff}} = 100 \text{ kV}$ eingespeist. Die Einstellung der speisenden Wechselspannung erfolgte über einen am *Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik* der *Technischen Universität Dresden* entwickelten Universalregler UR+ mit Stelltransformator (vgl. Bilder 4.7 und 4.8: T-R). Mit diesem Regler war es möglich, über eine PC-Schnittstelle definierte Spannungsrampen zur Spannungssteigerung vorzugeben und stufenförmige Spannungssteigerungszyklen gesteuert abzufahren. Die Scheitelwertmesseinheit TuR MU11 misst die so erzeugte hohe Gleichspannung über einen hochohmigen, ohmschen Spannungsteiler [Sch-81] mit einer Gesamtmessunsicherheit des Systems nach IEC 60060-2 von unter $\pm 3 \%$. Für die Regelung wird die gemessene Spannung des Scheitelwertmessgeräts vom Universalregler direkt abgegriffen und verarbeitet. Über die Durchlassrichtung der Dioden kann die Polarität der Gleichspannung eingestellt werden. Um im Durchschlag der Anordnungen hohe Ströme und damit eine zu starke Beschädigung der Elektroden durch tiefe Fußpunkte der Durchschläge zu vermeiden, wurde in den Prüfkreisen zwischen Glättungskapazität und Spannungsteiler ein separater Dämpfungswiderstand $R_D = 15 \text{ M}\Omega$ einge-

bracht. So konnte die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden, ohne die Elektroden nach jedem Versuch polieren zu müssen.

4.2.2 Stoßspannungsprüfkreis

Um in den Versuchen eine hohe Blitzstoßspannung zu erzeugen, wurde ein achtstufiger Stoßspannungsgenerator in Marx-Kaskadenschaltung verwendet (Bild 4.9).

Bild 4.9: Ersatzschaltbild des Stoßgenerators in Kaskadenschaltung nach Marx zum Erzeugen einer hohen Blitzstoßspannung

Über die Ladewiderstände R_{Lj} werden die vier parallel geschalteten Stoßkapazitäten C_{Si-j} je Stufe i mit der eingespeisten Ladegleichspannung von U_L geladen. Durch das Anpassen der Entladewiderstände R_{Ej} und der zwei parallel geschalteten Dämpfungswiderstände R_{Di-j} je Stufe kann der nach IEC 60060-1 geforderte Blitzstoß der Form 1,2/50 mit einer maximalen Amplitude von ± 800 kV eingestellt werden. Die so erzeugte Stoßspannung wird über einen gesteuerten, niederohmigen ohmschen Spannungsteiler gemessen [Sch-81, Sch-10c].

Über das *Impulse Voltage Test System MIAS* der Firma HIGHVOLT mit integrierter Steuerung *SIMATIC OP17* der Firma SIEMENS und integriertem Transientenrecorder können die Stoß-

spannungsverläufe aufgenommen und ausgewertet werden. Somit ist es möglich, entsprechende Testzyklen sowohl automatisiert mit voreingestellter Pausenzeit als auch manuell durchzuführen und direkt auszuwerten. Die Gesamtmessunsicherheit des Messsystems nach IEC 60060-2 beträgt max. $\pm 3\%$.

4.2.3 Prüfkreis zur Überlagerung von Gleich- und Blitzstoßspannung

Zum Erzeugen einer Mischspannung aus einer Gleichspannung überlagert mit einer Blitzstoßspannung wurde ein Prüfkreis nach IEC 60060-1 zum Erzeugen einer zusammengesetzten Prüfspannung genutzt (vgl. Abschnitt 2.5.1). Dazu wurden die Greinacher-Verdopplerschaltung sowie der Stoßspannungsgenerator über entsprechende Trennglieder parallel zur Elektrodenanordnung verschaltet (Bilder 4.10 und 4.11).

Bild 4.10: Ersatzschaltbild des Prüfkreises zum Erzeugen einer zusammengesetzten Prüfspannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung nach [Gab-18c]

Als gleichspannungsseitiges Koppelglied (Koppelglied DC) dient ein zwischen Greinacher Verdopplerschaltung und Elektrodenanordnung eingebrachter Wasserwiderstand, welcher auf einem Rohr aus Polypropylen (PP) aufgewickelt ist. Der Wasserwiderstand bildet so mit der Kapazität der Elektrodenanordnung C_{EA} einen Tiefpass. Dieser bewirkt, dass der Gleichspannungsanteil an der Elektrodenanordnung nicht verfälscht wird, der übertragene Impuls an der untersuchten Anordnung nicht beeinflusst und der Gleichspannungsprüfkreis nicht mit der Stoßspannung belastet wird [Läm-74]. Als stoßspannungsseitiges Koppelglied (Koppelglied LI) wird eine Längskapazität C_{LC} eingesetzt. Dazu werden die Stoßkapazitäten der oberen vier Stufen S4 bis S8 des Stoßspannungsgenerators aus Bild 4.9 über die übrigen Dämpfungswiderstände R_D in Reihe geschaltet, die im Trennglied den resistiven Anteil R_{LC} bilden (vgl. Bild A.1). Über den Hochpasscharakter der Längskapazität wird gewährleistet, dass die erzeugte Stoßspannung sowohl in Amplitude als auch in deren zeitlichen Verhalten möglichst unbeeinflusst übertragen wird [Läm-74]. Des Weiteren wird dadurch der Stoßspannungsgenerator nicht mit der angelegten Gleichspannung belastet.

Die resultierende zusammengesetzten Spannung sollte nach IEC 60060-1 über einen separaten Spannungsteiler direkt am Prüfling gemessen werden. Ein hochohmiger, gedämpft kapazitiver Universalspannungsteiler ist dafür am besten geeignet, da er durch die Paral-

lerschaltung von Kapazitäten und hochohmigen Widerständen zur Messung von Gleich- und Stoßspannungen gleichermaßen einsetzbar ist [Sch-10c, Küc-17]. Da ein solcher Universalspannungsteiler nicht zur Verfügung stand, konnte die resultierende Spannung am Prüfling nicht direkt gemessen werden. Da sich beim Einsatz der Längskapazität als Koppelglied die resultierende Spannung am Prüfling aus der vorzeichenrichtigen Addition aus Gleichspannungsanteil U_{DC0} und überlagerter Blitzstoßspannung $\hat{U}_L$ zusammensetzt (vgl. Abschnitt 2.5.2, Gl. 2.50), wurde die am Prüfling anliegende Spannung aus den einzeln an den Prüfkreisen gemessenen Spannungsanteilen bestimmt.

Bild 4.11: Fotografische Darstellung des Prüfkreises zum Erzeugen einer zusammengesetzten Prüfspannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung

Die Verifikation dieses Verfahrens erfolgte sowohl über Berechnungen an einem Netzwerkmodell als auch über separate Messungen der einzelnen Spannungsanteile im Prüfkreis. In Analogie zu [Her-16a] wurden dazu die jeweiligen Spannungsanteile am Ausgang des entsprechenden Prüfkreises als auch direkt am Prüfling gemessen. Der Vergleich der berechneten und gemessenen Spannungsverläufe zeigte, dass die so durchgeführte Ermittlung der resultierenden Spannung zulässig ist und am Prüfling die erforderliche Stirnzeit nach IEC 60060-1 eingehalten wird. Zu berücksichtigen ist dabei aufgrund des Widerstands der Längskapazität R_{LC} lediglich der Spannungsfall über dem stoßspannungsseitigen Koppelglied im Zeitpunkt der Überlagerung mit dem Blitzimpuls. Dieser wurde bei der Verifizierung der Spannungsmessung messtechnisch bestimmt und muss in die Ermittlung der resultierenden Spannung einbezogen werden. Des Weiteren wird die Rückenhalbwertszeit der Blitzstoßspannung reduziert, was jedoch für die Untersuchungen eine untergeordnete Rolle spielt.

4.3 Strommesstechnik

Der durch die Anordnung fließende Strom ist die direkte Wirkung der Ladungsträgerbewegung sowie deren Generation und Rekombination (vgl. Abschnitt 2.3.3). Um während der Durchschlagversuche einen stationären Zustand in Ladungsträgerbewegung, deren Verteilung und somit den stationären Zustand der daraus resultierenden Feldstärkeverteilung feststellen zu können, ist eine simultane Strommessung während der Versuche unumgänglich. Nur so können die Ergebnisse der Durchschlagversuche reproduzierbar mit den Berechnungsergebnissen verglichen werden, da auch diese aus dem stationären Zustand der Ladungsträgerverteilung resultieren.

Der durch die Anordnung fließende Strom wurde mit einem am *Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik* der *Technischen Universität Dresden* entwickelten Strommessgerät auf Basis eines Transimpedanzwandlers gemessen (Bild 4.12). Über die Durchführung im Boden des Prüfgefäßes war das Strommessgerät über Koaxialkabel direkt mit der Messelektrode der Elektrodenanordnung verbunden. Zum Schutz des Messgeräts während der Durchschlagversuche wurde eine Schutzeinrichtung vor das Messgerät geschaltet, wobei sich eine Kombination aus Eingangskapazität, antiparallelen Dioden und Überspannungsableitern in der Vergangenheit bewährte [Shi-15, Bac-16a].

Bild 4.12: Prinzipskizze der Strommesseinrichtung nach [Gab-19b]

Über den Messwiderstand R_M des Transimpedanzwandlers können die einzelnen Messbereiche eingestellt und so Ströme im Bereich von wenigen nA bis mehreren μA gemessen werden. Da in den Versuchen stets ein Gleichstrom gemessen werden soll, sind zwischen Transimpedanzverstärker und Auswerteeinheit des Messgeräts Tiefpassfilter geschaltet, deren Ausgangssignal zur Auswertung verstärkt wird. Durch die Grenzfrequenz der Tiefpässe von $f_g = 5 \text{ Hz}$ wird sichergestellt, dass nur niederfrequente Stromanteile verarbeitet und gemessen werden. Die analogen Signale werden nach der Effektivwertbildung digitalisiert, über einen Microcontroller verarbeitet und anschließend gespeichert. Die Abtastrate betrug 1 Hz . Über eine Bluetooth-Schnittstelle konnten die Messdaten an einen Mess-PC übertragen und zusammen mit den über den Universalregler aufgenommenen Spannungsverlauf für jede Spannungsstufe ausgewertet und gespeichert werden.

4.4 Aufbereitung des Isolieröls und Isolierpapiers

Zur reproduzierbaren und somit vergleichbaren Messung des dielektrischen Verhaltens der Anordnungen muss sowohl das genutzte Isolieröl als auch das verwendete Isolierpapier und die Transformerboard-Ringbarrieren vor den Versuchen aufbereitet werden. Nur so kann der starken Abhängigkeit der elektrischen Festigkeit vom Wasser- und Gasgehalt des Isolieröls und möglichen Fehlstellen im Papier durch Gaseinschlüsse entgegengewirkt werden.

Das in den Versuchen verwendete mineralische Isolieröl wurde in einer Ölaufbereitungsanlage vom Typ EOK 100 der Firma Hering AG vor jedem Versuch aufbereitet (Bild 4.13a). Bei einem maximalen absoluten Druck von $p_{\text{abs}} = 100 \text{ Pa}$ wurde das Öl in der Vakuumaufbereitung getrocknet und entgast. Das Prüfgefäß wurde während der Ölaufbereitung stets mit dem aufbereiteten Öl aus der Aufbereitungsanlage gespült und die Ölqualität mit einem Ölfeuchte-Messgerät des Typs MM70 der Firma VAISALA überprüft.

(a) Ölaufbereitungsanlage

(b) Wärmeschrank mit Vakuumgefäß

Bild 4.13: Benötigte Geräte zur Aufbereitung des Isolieröls und der Papierproben

Sowohl das in den Durchschlagversuchen genutzte Isolierpapier als auch die Transformerboard-Ringbarrieren wurden in einem Wärmeschrank (mytron, Typ T 250) aufbereitet (Bild 4.13b). Dazu wurden sie gemäß DIN EN 60641-2 bzw. DIN EN 60763-2 für min. 24 h bei 105 °C in einem Vakuumgefäß bei einem maximalen Druck von $p_{\text{abs}} = 100 \text{ Pa}$ getrocknet und anschließend mit dem aufbereiteten Isolieröl imprägniert. Entsprechend DIN EN 60763-2 kann so ein maximaler Wassergehalt von 0,4 % eingehalten und Gaseinschlüsse im Papier vermieden werden. Nach dem Trocknungs- bzw. Imprägnierprozess und der ersten Probenentnahme wurden die Proben bei $p_{\text{abs}} = 100 \text{ Pa}$ im Vakuumgefäß unter Öl gelagert.

4.5 Versuchsbedingungen

Die Versuche wurden mit dem aufbereiteten mineralischen Isolieröl vom Typ Shell Dia-la S3 ZX-IG mit einem maximalen Feuchtegehalt des Isolieröls von 7 ppm und den getrockneten und imprägnierten Isolierpapieren und Transformerboard-Ringbarrieren bei Raumtemperatur durchgeführt. Um den Einfluss von Rußpartikeln oder Rußspuren auf den Elektroden der vorangegangenen Durchschläge auf die nachfolgenden Untersuchungen zu minimieren, wurde das Prüfgefäß zwischen den Versuchen mit dem aufbereiteten Isolieröl gespült und die Elektroden in regelmäßigen Abständen mit einem fusselfreien Tuch abgewischt. Bei den Versuchen an den abgeschlossenen Anordnungen wurden die Transformerboard-Ringbarrieren bei jeder Beschädigung, spätestens aber nach jeweils drei bis fünf Versuchen ausgetauscht. Zur Durchführung reproduzierbarer Messungen, deren Ergebnisse mit den Berechnungsergebnissen anhand der ladungsträgerbasierten Modellvorstellung verglichen werden sollen, sind diese Maßnahmen unerlässlich, um gleichbleibende Versuchsbedingungen sicherzustellen.

Um die Ergebnisse der Durchschlagversuche mit den Berechnungsergebnissen vergleichen zu können, musste bei der Durchführung darauf geachtet werden, dass sich während der Spannungssteigerung ein stationärer Zustand einstellen konnte und sich somit ein Gleichgewichtszustand in Drift, Akkumulation sowie der Generation und Rekombination der Ladungsträger eingestellt hat. Aus diesem Grund wurden die Versuche im Spannungssteigerungsversuch (SSV) bei einer stufenförmigen Spannungssteigerung mit simultaner Strommessung durchgeführt. Bei den Versuchen unter reiner Gleichspannungsbelastung wurde dazu die Spannungssteigerung bei einer Startspannung $U_{DC\ SSV}$ begonnen, die der 0,75-fachen Durchschlagspannung $U_{DS\ DC}$ der Anordnung entsprach.

$$U_{DC\ SSV} = 0,75 U_{DS\ DC} \quad (4.1)$$

Erst nachdem sich ein stationärer Stromverlauf (I_{stat}) einstellte, d. h. sich ein Gleichgewicht in der Ladungsträgerverteilung und somit eine stationäre Feldstärkeverteilung eingestellt hat, wurde die Spannung stufenförmig um 5 kV mit einer Steigerungsgeschwindigkeit von 1 kV/s gesteigert (Bild 4.14a). Stellte sich auch in der nächsten Spannungsstufe ein stationärer Zustand ein, wurde die Spannung im Anschluss stufenförmig nach derselben Vorgehensweise bis zum Durchschlag gesteigert. War der stationäre Zustand aufgrund der bereits abgeschlossenen Dissoziationsprozesse sofort nach der Spannungssteigerung erreicht (vgl. Abschnitt 2.3.5), wurde die Spannung nach der minimalen Pausenzeit von 10 min erneut gesteigert. Je nach untersuchter Anordnung, eingestelltem Ölpalt und genutzter Startspannung stellten sich dabei Zeiten von (10 ... 60) min ein. Größere Elektrodenabstände und somit höhere Startspannungen erhöhen die Feldstärken und somit die auf die Ladungsträger wirkenden Kräfte und Injektionsraten, was zu einer Beschleunigung der Vorgänge und so zu geringeren Zeiten zwischen den einzelnen Spannungsstufen führt (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Bei den Versuchen unter Mischspannungsbelastung wurde bei der Gleichspannungsvorbelastung ebenfalls darauf geachtet, dass sich vor der Überlagerung mit dem Blitzstoß ein

stationärer Zustand im Isoliersystem eingestellt hat. Dazu wurde nach der Einstellung des Gleichspannungsanteils U_{DC0} gleichermaßen erst mit der Überlagerung begonnen, nachdem sich ein stationärer Strom I_{stat} eingestellt hat. Anschließend wurde mit der Überlagerung begonnen (Bild 4.14b). Der Startwert des überlagerten Blitzstoßes wurde dabei so gewählt, dass sich nach Gl. (2.50) eine resultierende Amplitude $\hat{U}_Z$ der zusammengesetzten Spannung von ca. 75 % der Durchschlagspannung bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung einstellt. Anschließend wurde der Stoßspannungsanteil der zusammengesetzten Spannung unter Berücksichtigung eines stationären Zustands um 5 kV bis zum Durchschlag mit einer Pausenzeit von ca. 2 min und einer Belastung je Spannungsstufe gesteigert.

Für die Versuche bei reiner Stoßspannungsbelastung wurden die Versuche im Spannungssteigerungsversuch mit einer Pausenzeit von 30 s und einer Belastung je Spannungsstufe durchgeführt. Als Startspannung wurde ebenfalls das 0,75-fache der Durchschlagspannung bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung gewählt.

Bild 4.14: Schematische Verläufe der Spannungsteigerung in den Durchschlagversuchen bei reiner Gleichspannungsbelastung und überlagelter Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung

5 Berechnungen auf Basis des ladungsträgerbasierten Ansatzes

Das ladungsträgerbasierte Berechnungsmodell auf Grundlage des PNP-Gleichungssystems soll im Folgenden genutzt werden, um anhand der ermittelten Ladungsträger- und Feldstärkeverteilungen die Beanspruchung von realitätsnahen, Öl-Papier-isolierten Anordnungen unter Gleichspannungsbelastung abzuschätzen. Die Berechnungen erfolgten dabei mithilfe einer FEM-Berechnung, wobei das ladungsträgerbasierte Berechnungsmodell anhand des in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten PNP-Gleichungssystems mit den entsprechend definierten Randbedingungen sowie der Aufbau der ebenfalls in den Versuchen genutzten Isolieranordnung (vgl. Bild 4.1) implementiert wurde.

Das erarbeitete Modell sowie dessen Gültigkeit und hinreichende Genauigkeit für ölisierte Anordnungen konnte bereits in [Bac-16a] gezeigt werden. Die Ergebnisse des PNP-Berechnungsmodells werden im Weiteren mit den Ergebnissen verglichen, welche anhand der herkömmlichen, resistiv-kapazitiven Berechnungsmodelle auf Grundlage des stationären Strömungsfeldes, d. h. unter Berücksichtigung einer konstanten Leitfähigkeit der jeweiligen Isoliermedien ermittelt werden. Aufbauend auf den in Abschnitt 2.4.1 vorgestellten Annahmen wird bei der Modellierung des Öl-Papier-Isoliersystems ein Leitfähigkeitsverhältnis von $\kappa_{\text{Papier}}/\kappa_{\text{Öl}} = 1/100$ angenommen [Bär-10, Sch-10b, Bac-16a].

Da die Betriebsmittel der HGÜ jedoch nicht nur mit der Betriebsspannung, sondern u. a. im Fehlerfall auch mit einer zusätzlichen, überlagerten transienten Spannung belastet werden können, soll auch dieses Verhalten am Beispiel der Überlagerung der Gleichspannung mit einer Blitzstoßspannung untersucht werden. So soll die Anwendbarkeit des Modells auch bei dieser speziellen Belastung überprüft werden.

Auf Grundlage der Berechnungsergebnisse sollen im weiteren Verlauf der Arbeit die vorgestellten experimentellen Ergebnisse interpretiert werden (Kapitel 6). So soll das Verständnis über die im Isoliersystem unter Gleichspannungsbelastung stattfindenden Prozesse verbessert werden. Vor allem in Bezug auf die Bewegung und Akkumulation der Ladungsträger an Grenzflächen und in Papierbarrieren sollen die Ergebnisse weiter Aufschluss über die Auswirkungen auf die Beanspruchung des Isoliersystems geben.

5.1 Aufbau der Berechnungsmodelle

5.1.1 Aufbau der untersuchten Isolieranordnungen

Zum Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen wurden die Berechnungen an einfachen, eindimensionalen Öl-Papier-isolierten Anordnungen durchgeführt (Bild 5.1, vgl. Abschnitt 4.1). Die Berechnungen erfolgen demnach in Abhängigkeit des Weges bzw. der Posi-

tion x auf einer gedachten Linie, die mittig durch die in Abschnitt 4.1 gezeigte Plattenanordnung verläuft. Auf diese Weise kann die Berechnungszeit zur Nachbildung der stattfindenden, komplexen Vorgänge – also der Ladungsträgergeneration durch die feldstärkeabhängige Injektion und deren Rekombination, die feldstärkeabhängige Drift der Ladungsträger durch das Dielektrikum sowie die Wechselwirkung einer jeden Ladungsträgerspezies auf die Feldstärkeverteilung und deren Rückwirkung auf die Injektion – im Vergleich zu mehrdimensionalen Anordnungen signifikant verringert werden. Die Vergleichbarkeit mit den in den Versuchen genutzten planparallelen, homogenen, Öl-Papier-isolierten Anordnungen bleibt dabei trotzdem stets gegeben.

Bild 5.1: In den Berechnungsmodellen hinterlegte, eindimensionale Modelle der genutzten Öl-Papier-isolierten Anordnungen

In Analogie zu den Durchschlagversuchen wurden die Berechnungen an äquivalenten Anordnungen mit blanken Elektroden (b-b), mit isolierter Hochspannungs- und Erdelektrode (i-i) sowie mit nur einer isolierten Elektrode durchgeführt (i-b – Bild 5.1). Um den Einfluss des polaritätsabhängigen Injektionsverhaltens auch rechnerisch zu untersuchen, wurden die Berechnungen der Anordnung mit nur einer isolierten Elektrode (i-b) sowohl an der Anordnung mit isolierter Anode als auch mit isolierter Kathode durchgeführt. Da stets eine positive Gleichspannung $u(t)$ als Randbedingung vorgegeben wurde, wurden aufgrund der Symmetrie der Anordnung für diese Berechnungen jeweils eine isolierte Erd- bzw. die Hochspannungselektrode implementiert (Bild 5.1). Zusätzlich wurde für einen weiteren Vergleich die Anordnung mit eingeschobenen Barrieren rechnerisch nachgebildet, um den Einfluss eines zusätzlichen Ölspaltes zwischen Elektrode und Isolierpapier zu untersuchen. Für die vorgestellten Berechnungen wurden die in Abschnitt 2.4.2 definierten Randbedingungen in das Modell implementiert. Das Potential der Erdelektrode wurde dementsprechend auf 0 V definiert, als Potential der Hochspannungselektrode wurde der jeweils nachgebildete Spannungsverlauf $u(t)$ implementiert (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Im Modell wurde dazu für die bei Gleichspannungsbelastung untersuchten Anordnungen entsprechend der Versuche eine beispielhafte Ölspaltweite von $s = 6 \text{ mm}$ vorgegeben. In den Anordnungen mit Papierbarrieren wurde eine Stärke der Papierschicht von je

$b = 0,2 \text{ mm}$ implementiert. So wird zum Vergleich mit den Experimenten die Dicke der in den Versuchen eingesetzten Papierschichten nachgebildet, aufgrund der leicht erhöhten Dicke sind zudem die Effekte der Ladungsakkumulation im Papier besser sichtbar. Trotz der inhomogenen Zellulosestruktur der Papierisolierung mit einzelnen Ölkälen im Papier wurde die Papierisolierung vereinfacht als ein homogener Bereich implementiert. Diese soll über die verringerten Ladungsträgermobilitäten im Papier abgebildet werden. Weiterhin wurde in der Literatur gezeigt, dass Bereiche zwischen multiplen Ölspalten entlastet werden [Gäf-00]. Da dies auch für die Ölkälen zwischen den Papierfasern angenommen wird, soll daher die Nachbildung mit einer homogenen Struktur für die vorgestellten Berechnungen als hinreichend genau gelten.

Bei der Anordnung mit isolierten Elektroden (Bild 5.1; i-i) ergibt sich somit ein resultierender Elektrodenabstand von

$$d = s + 2b = 6,4 \text{ mm}, \quad (5.1)$$

bei der Anordnung mit nur einer isolierten Elektrode (Bild 5.1; i-b) ergibt sich demnach ein resultierender Elektrodenabstand von

$$d = s + b = 6,2 \text{ mm}. \quad (5.2)$$

Zum Vergleich der Berechnungsergebnisse bei Mischspannungsbelastung mit den experimentellen Untersuchungen wurde die Ölspalbreite bei den Untersuchungen zur Überlagerung auf $s = 3 \text{ mm}$ reduziert (vgl. Abschnitt 5.3).

5.1.2 Implementierte Spannungsverläufe

Um die Ergebnisse untereinander und mit den experimentellen Ergebnissen vergleichbar zu machen, wurden in den Berechnungsmodellen ähnliche Spannungssteigerungen vorgegeben, wie sie auch in den Versuchen realisiert waren (Bild 5.2, vgl. Abschnitt 4.5).

Bei reiner Gleichspannungsbelastung wurde dazu eine Spannungsrampe vorgegeben, die zum Zeitpunkt t_0 stufenförmig auf eine beispielhafte Gleichspannung von $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ gesteigert wurde (Bild 5.2a). Die jeweilige Rechenzeit dabei so gewählt, dass sich bei allen untersuchten Anordnungen in beiden Spannungsstufen ein stationärer Zustand in der Ladungsträger- und somit der Feldstärkeverteilung einstellen kann ($t_{stat \text{ SSV}}$ bzw. t_{stat}).

Im Modell bei Mischspannungsbelastung wurde analog zur Gleichspannungsbelastung eine stufenförmige Spannungssteigerung vorgegeben. Dabei wurde zunächst auf die entsprechende Spannung der Gleichspannungsvorbelastung von U_{DC0} gesteigert, welche 50 % des Gleichspannungspegels der Berechnungen unter Gleichspannung entsprach. Iterativ wurde im Anschluss die Rechenzeit auf dieser Spannungsstufe bestimmt, zu der sich bei der vorgegebenen Gleichspannungsvorbelastung in der Anordnung jeweils ein stationärer Zustand eingestellt hat. War dies der Fall, wurde die Blitzstoßspannung mit der Amplitude $\hat{U}_L$ zum Erzeugen der resultierenden, zusammengesetzten Mischspannung $\hat{U}_Z$ nach

Gl. (2.50) überlagert (Bild 5.2b). Die Stoßspannung wurde entsprechend ihrer typischen Doppelsexponentialfunktion nach

$$u_{LI} \approx U_{LI0} \cdot \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right] \quad (5.3)$$

vorgegeben. Dabei stellt U_{LI0} den gewünschten Scheitelwert dar. Die Zeitkonstante τ_1 bestimmt den Verlauf der Stirn des Blitzstoßes mit der Stirnzeit $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$, τ_2 den Verlauf des Rückens mit der Rückenhalbwertszeit $T_2 = 50 \mu\text{s}$ [Küc-17]:

$$\tau_1 = \frac{T_1}{2,96} = 0,405 \mu\text{s} \quad (5.4)$$

$$\tau_2 = \frac{T_2}{0,73} = 68,493 \mu\text{s} \quad (5.5)$$

Bild 5.2: In den Berechnungsmodellen implementierte Spannungsverläufe bei reiner Gleichspannungsbelastung sowie der überlagerten Spannungsbelastung

Um alle stattfindenden Vorgänge möglichst genau abzubilden und zu berechnen, mussten die Zeitschritte in den Berechnungen je nach Art der Spannungsbelastung angepasst werden. Dabei wurde zur Plausibilitätsprüfung stets kontrolliert, dass zu jedem Zeitpunkt der Berechnungen die Stromkontinuität gegeben ist. So wurden für die reine Gleichspannungsbelastung während und bis kurz nach der Spannungssteigerung kleinere Zeitschritte gewählt. Zur Minimierung der Rechenzeit wurde die Schrittweite des Solvers nach dem Erreichen der jeweiligen Spannungsstufe schrittweise erhöht und die Rechnung beendet, sobald sich ein quasi-stationärer Gleichgewichtszustand in Ladungsträger- und Feldstärkeverteilung eingestellt hat. Bei den Berechnungen zur Mischspannungsbelastung wurde während der Gleichspannungsvorbelastung analog verfahren. Nach dem Erreichen des quasi-stationären Gleichspannungszustandes, d.h. vor der Überlagerung mit dem Blitzstoß, wurden die Zeitschritte wieder angepasst. Diese wurden dabei soweit minimiert, dass die während der Überlagerung stattfindenden, transienten Prozesse möglichst genau nachgebildet und berechnet werden können. Erst nach dem vollständigen Abklingen des überlagerten Blitzstoßes wurde die Schrittweite wieder schrittweise erhöht und der Solver beendet, sobald sich wieder ein quasi-stationärer Zustand nach der Überlagerung eingestellt hat.

5.2 Berechnungsergebnisse bei reiner Gleichspannungsbelastung

5.2.1 Einfluss der Randbedingungen auf das zeitabhängige Verhalten einfacher, ölsolierter Anordnungen

Wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben und in [Bac-16a] gezeigt wurde, beeinflussen die Drift von Ladungsträgern, deren Akkumulation an Grenzflächen sowie die Injektion von Ladungsträgern aus den Elektroden die dielektrische Beanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems in großem Maße. Aufgrund der sich abhängig von der Belastungszeit und der wirkenden Feldstärke ändernden Ladungsträgerdichten innerhalb des Isoliersystems stellt sich bis zum Erreichen des stationären Gleichgewichtszustandes eine zeitabhängige Beanspruchung der Anordnung ein. Zudem sind Generation und Bewegung der Ladungsträger stark feldstärkeabhängig. Somit sind sie nicht nur abhängig von der Grundfeldstärke im System infolge der angelegten Spannung, sondern auch abhängig von der lokal beeinflussten Feldstärkeverteilung aufgrund des Ladungsträgereinflusses.

Daraus ergibt sich ein weiterer Einfluss auf die Feldverteilung und somit auf die Beanspruchung eines Isoliersystems durch die Mobilität einer jeden Ladungsträgerspezies. In der Literatur finden sich jedoch zum Teil stark unterschiedliche Angaben ermittelter Ladungsträgermobilitäten, dabei sei u. a. auf [Ter-62, Sch-70, Min-71, Lew-94, Sha-11, Yan-12b, Rum-19] verwiesen. Im Berechnungsmodell sind daher die implementierten Ladungsträgermobilitäten anhand der Literaturwerte abgeschätzt worden. Durch die infolge unterschiedlicher Mobilitäten variierenden Driftgeschwindigkeiten der Ladungsträger wird ebenfalls ein Einfluss auf die Beanspruchung des Isoliersystems erwartet.

Des Weiteren beeinflussen die akkumulierten intrinsischen Ladungsträger an Grenzflächen – vor allem an den Elektroden – in hohem Maße die lokal vorherrschende Feldstärkeverteilung und somit die sich im Ölpalt ausbildende „*innere Inhomogenität*“ [Bac-16a]. Unterschiedliche Ladungsträgerdichten intrinsischer Ladungsträger stellen sich u. a. beim Vergleich neuwertiger Öle mit gealterten Ölen ein, da in gealterten Ölen der Anteil dissoziierbarer, polarer Bestandteile aufgrund der Alterungsprodukte stark erhöht ist (vgl. Abschnitt 2.3.1). Des Weiteren ist davon auszugehen, dass in größeren Ölvolumina der Anteil intrinsischer Ladungsträger ebenfalls erhöht ist und sich somit ebenfalls ein Einfluss auf die Feldstärkeverteilung einstellen kann. Dies zeigte sich u. a. Ergebnissen von Durchschlagversuchen, welche abhängig vom Ölfüllstand im Prüfgefäß sind [Zou-98].

Nachfolgend sollen daher die genannten Einflüsse mithilfe der Berechnungsergebnisse des ladungsträgerbasierten Modells anhand einer einfachen ölsolierten, eindimensionalen Anordnung (Bild 5.1 - blanke Elektroden) genauer gezeigt werden. Dazu wurden entsprechend der genannten Betrachtungen die jeweiligen Randbedingungen des Modells angepasst. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt dazu beispielhaft für die zwei Stufen der stufenförmigen Spannungssteigerung nach Bild 5.2a auf $U_{DC\,SSV} = 50\text{ kV}$ und weiter auf $U_{DC} = 100\text{ kV}$. Dabei werden für jede Spannungsstufe die Zustände sowohl direkt nach der Spannungssteigerung (t_{SSV} bzw. t_{DC}) als auch im stationären Zustand der jeweiligen Stufe ($t_{stat\,SSV}$ bzw. t_{stat}) ausgewertet. Die Berechnungen wurden dabei an einer Anordnung

mit einer beispielhaften Ölspaltweite von $s = 9$ mm durchgeführt. Im Vergleich zu den Anordnungen bei einer Ölspaltweite von $s = 6$ mm stellen sich an der größeren Anordnung bei den implementierten Spannungen geringere Grundfeldstärken ein, wodurch die auftretenden Effekte besser sichtbar werden. Zwar hätte eine Reduzierung der angelegten Spannung einen ähnlichen Effekt, jedoch werden die auftretenden Phänomene vor allem aufgrund der größeren, zurückgelegten Weglängen der Ladungsträger deutlicher. Mithilfe der Berechnungen soll das Verständnis über das Verhalten der Anordnung verbessert werden, um eventuelle, in den Versuchen auftretende Phänomene besser einordnen und mögliche Ursachen ermitteln zu können.

Zeit- und Feldstärkeabhängigkeit

Zur Darstellung der Verteilung der Ladungsträger und deren Einfluss auf die Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung werden die mit dem ladungsträgerbasierten Berechnungsmodell ermittelten Ladungsträgerverteilungen und die sich daraus ergebenden Feldstärkeverteilungen gegenübergestellt. Über die Auswertung der Zustände sowohl direkt nach der Spannungssteigerung als auch im stationären Zustand der jeweiligen Stufe soll das zeit- und feldstärkeabhängige Verhalten der Anordnung nachvollzogen werden.

Ausgehend von einer gleichmäßigen Verteilung der Anfangskonzentration der Ladungsträger im Ausgangszustand (vgl. Abschnitt 2.4.2) findet bereits während der Spannungssteigerung die eine Injektion von Ladungsträgern aufgrund der Erhöhung der Grundfeldstärke statt. Zudem driften auch die intrinsischen Ladungsträger zur Gegenelektrode, die sich an dieser anlagern und somit die Teilchendichte in den elektrodennahen Gebieten erhöhen (Bild 5.3a). Diese nun vor der Gegenelektrode akkumulierten *Heterocharges* erhöhen lokal die Feldstärke in diesen Gebieten (Bild 5.3b), was sich direkt auf die feldstärkeabhängige Injektion von *Homocharges* auswirkt.

Bild 5.3: Mit dem PNP-Berechnungsmodell zum Zeitpunkt t_{SSV} nach der ersten Spannungssteigerung auf $0,5 U_{\text{DC}} = 50$ kV berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100$ kV

Aufgrund der polaritätsabhängigen Injektion von Ladungsträgern [Bac-16b] werden jedoch mehr Anionen als Kationen injiziert. Die zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossene Drift der Ladungsträger führt zu einer ungleichmäßigen Feldstärkeverteilung im Ölspace. Jedoch bildet sich die prägnante „*innere Inhomogenität*“ [Bac-16a] bereits während der Spannungssteigerung aus und erhöht die Feldstärke an der Öl-Elektroden-Grenzfläche bereits merklich.

Im stationären Zustand der ersten Spannungsstufe bei $t_{\text{stat SSV}}$ sind bereits ein Großteil der intrinsischen Ladungsträger an den Elektroden akkumuliert und heben somit die Feldstärke in den elektrodennahen Gebieten weiter an (Bild 5.4). Aufgrund der somit auch erhöhten Injektion werden nun mehr Ladungsträger injiziert, was infolge der höheren Injektion von *Homocharges* aus der Kathode zu einem verringerten Feldstärkemaximum an der Erdelektrode (Kathode) und auch zu geringeren Feldstärken im Bereich vor der Kathode führt. Aufgrund der höheren Feldstärken im Bereich vor der Anode (d.h. der Hochspannungselektrode) verglichen zur Kathode sind aufgrund der somit wirkenden, größeren Kräfte auf die intrinsischen Ladungsträger bereits deutlich mehr intrinsische Anionen vor der Anode akkumuliert als vor der Kathode. Die deutlich höhere, implementierte Injektionsrate von Elektronen (d.h. der injizierten Anionen) führt den Berechnungen zufolge auch dazu, dass sich die gegenüberliegenden Fronten driftender, injizierter Ladungsträger außermittig in den Bereich um ca. 6 mm verschiebt. In dieser Rekombinationszone von Elektronen und Löchern entsteht somit ein weiteres, lokales Feldstärkemaximum. Aufgrund der Anlagerung von *Heterocharges* und der geringeren Injektionsraten von Löchern aus der Anode tritt das Feldstärkemaximum des Ölspace jedoch vor der Anode auf.

Bild 5.4: Mit dem PNP-Berechnungsmodell im stationären Zustand $t_{\text{stat SSV}}$ der ersten Stufe bei $U_{\text{DC SSV}} = 50 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$

Nach erneuter Spannungssteigerung und Verdopplung der angelegten Spannung auf $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{DC} steigt die mittlere Feldstärke in der Anordnung an, was folglich auch zu einer verstärkten Injektion von Ladungsträgern führt. Aufgrund der nichtlinearen, feldstärkeabhängigen Zunahme der Injektion wird die Rekombinationszone weiter in Richtung der Anode verschoben (Bild 5.5). Ebenso nimmt die Kraft auf die Ladungsträger

zu, weshalb die Ladungsträgerschichten der *Heterocharges* weiter in Richtung der Elektroden verschoben werden. Daraus folgt eine Zunahme der Feldstärke in der Anordnung, welche aber vorrangig aus der Erhöhung der mittleren Feldstärke aus der Spannungssteigerung resultiert. Es findet also vorrangig eine Zunahme der Injektion statt, die die erwartete Zunahme der Randfeldstärke an den Elektroden durch die vergrößerte Dichte an *Heterocharges* vor den Elektroden größtenteils kompensiert. Wie in [Bac-16a] gezeigt wurde, spiegelt sich diese Zunahme der Injektion direkt im spannungsproportionalen Anstieg des Stromes durch die Anordnung wider.

Bild 5.5: Mit dem PNP-Berechnungsmodell zum Zeitpunkt t_{DC} nach weiterer Spannungssteigerung auf $U_{DC} = 100$ kV berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung

Nach dem Erreichen des quasistationären Gleichgewichtszustands dieser Spannungsstufe zum Zeitpunkt t_{stat} wurden die verbliebenen *Heterocharges* weiter in Richtung der Elektroden verschoben, woraus auch eine weitere Erhöhung der lokalen Feldstärke vor den Elektroden und somit eine weitere Verstärkung der Injektion resultiert. Dies führt weiter zu einer Verschiebung und Verstärkung des Rekombinationsgebietes in Richtung Anode. Die hohen Injektionsraten von Elektronen führen des Weiteren zu einer Verringerung der Feldstärke vor der Kathode, jedoch wird die Feldstärke vor der Anode weiter angehoben (Bild 5.6).

Die gezeigten Berechnungsergebnisse veranschaulichen die Ausbildung der sogenannten „inneren Inhomogenität“ [Bac-16a] aufgrund der Anlagerung der intrinsischen Ladungsträger an den Elektroden. Somit führt die Gleichspannungsbelastung einer einfachen, homogenen ölsolierten Anordnung zu einer deutlichen inhomogenen Feldstärkeverteilung, wie sie in der Literatur umfangreich ermittelt wurden [Gaf-92, Hik-96, Öft-19]. Es zeigt sich auch, dass sich aufgrund der unterschiedlichen Injektionsraten der injizierten Anionen und Kationen (d. h. der Elektronen und Löcher) eine unsymmetrische Feldstärkeverteilung im Ölspalt einstellt. Eine ähnliche, unsymmetrische Feldverteilung vor Anode und Kathode wurde ebenfalls gezeigt, indem unsymmetrische Ladungsträgermobilitäten für Anionen und Kationen implementiert wurden [Vah-20]. Jedoch sei auch erwähnt, dass anhand des genutzten, vereinfachten Modells die Generation und Rekombination von intrinsischen Ladungsträgern nicht berücksichtigt wurde und nur eine abgeschätzte Grundgesamtheit an

intrinsischen Ladungsträgern implementiert ist. Demzufolge würden sich im Modell bei weiterer Spannungssteigerung die intrinsischen Ladungsträgerschichten weiter in Richtung der Elektroden verschieben und somit die Feldstärke weiter verstärken. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch intrinsische Ladungsträger durch Dissoziation feldstärkeabhängig generiert werden und anschließend rekombinieren können (vgl. [Bac-16a, Rum-19] sowie Abschnitt 6.1.1) und sich daher ebenso ein feldstärkeabhängiger Gleichgewichtszustand einstellen würde.

Bild 5.6: Mit dem PNP-Berechnungsmodell im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{DC} = 100$ kV zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung

Einfluss der Ladungsträgermobilität

Wie bereits im Vorfeld erwähnt, sind die Bewegungsmechanismen einer Ladungsträgerspezies nach aktuellem Stand der Forschung noch nicht eindeutig geklärt. Ebenso unterscheiden sich die in der Literatur ermittelten Mobilitäten aufgrund der Vielzahl an Parametern zum Teil stark (vgl. Abschnitt 2.4.2). Somit ist es nach aktuellem Stand der Forschung zum Zeitpunkt der Arbeit nicht möglich, die jeweiligen Ladungsträgermobilitäten weder experimentell noch im Berechnungsmodell eindeutig zu quantifizieren.

Aus diesem Grund soll anhand der nachfolgend gezeigten Berechnungsergebnisse der Einfluss von unterschiedlich implementierten Ladungsträgermobilitäten auf das Verhalten der Anordnung veranschaulicht werden. Damit sollen sowohl die beschriebenen Unsicherheiten der in der Literatur angegebenen Mobilitäten abgebildet, als auch ein möglicher Einfluss einer erhöhten Mobilität aufgrund veränderter Viskositäten infolge einer Erwärmung der Flüssigkeit abgeschätzt werden. Dazu wurden die im Berechnungsmodell hinterlegten Mobilitäten entsprechend der Literatur angepasst und erhöht. Für die intrinsischen Ladungsträger wurden die Mobilitäten im Öl dabei um etwa eine Größenordnung auf ca. $\mu_{intr\,Öl} = 7 \cdot 10^{-10} m^2 V^{-1} s^{-1}$ angehoben [Yan-12a]. Weiterhin wurden beispielhaft um ca. zwei Größenordnungen höhere Mobilitäten für injizierte Ladungsträger angenommen, welche die erhöhte Beweglichkeit der injizierten im Vergleich zu den intrinsischen Ladungsträgern widerspiegeln soll [Gaf-92, Lew-94, Sha-11, Yan-12b, Rum-19]. Die Berechnungser-

gebnisse werden ebenfalls bei einer stufenförmigen Spannungssteigerung nach Bild 5.2a analysiert.

Die Berechnungsergebnisse direkt nach der Spannungssteigerung auf die erste Stufe zeigen, dass sich die intrinsischen Ladungsträger im Vergleich zu den im Voraus gezeigten Berechnungen (Bild 5.3 – Mob-0) aufgrund der höheren Mobilität bereits weiter durch den Ölspace zu den Elektroden hin bewegt haben und bereits in großer Zahl an den Elektroden akkumuliert sind (Bild 5.7). Durch ihre Wirkung als *Heterocharges* heben sie somit die lokale Feldstärke vor den Elektroden stark an.

Bild 5.7: Mit erhöhten Ladungsträgermobilitäten zum Zeitpunkt t_{SSV} nach der ersten Spannungssteigerung auf $0,5 U_{\text{DC}} = 50 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen mit den ursprünglichen Mobilitäten (Mob-0)

Aufgrund der um zwei Größenordnung höheren Mobilität der injizierten Ladungsträger bewegen sich die von den Elektroden injizierten Ladungsträger ebenfalls rasch von den Elektroden weg hin zur Gegenelektrode. Ihre Wirkung als *Homocharges* vor der gleichnamigen Elektrode wird somit durch deren geringeren Teilchendichten vor den Elektroden gemindert, was zu einer erhöhten Feldstärke in den Randgebieten führt. Somit fallen auch die Differenzen zwischen den Feldstärkemaxima vor Anode und Kathode aufgrund der polaritätsabhängigen Injektion geringer aus. Zudem werden aufgrund der hohen Mobilitäten der injizierten Ladungsträger nicht die notwendigen Teilchendichten im Öl erreicht, um in ausreichender Zahl miteinander zu rekombinieren. Die Bildung einer Rekombinationszone im Öl mit großen, gegenüberstehenden Ladungsträgerdichten bliebe damit aus, wodurch sich im Vergleich zu Bild 5.3 kein weiteres lokales Maximum ausbilden kann, sondern sich ein lokales Minimum ausbildet.

Nach dem raschen Erreichen des stationären Zustands der ersten Spannungsstufe sind alle intrinsischen Ladungsträger in einem schmalen Gebiet vor den Elektroden akkumuliert. Die hohen Teilchendichten an *Heterocharges* vor den Elektroden führen somit zu einer signifikanten Erhöhung der lokalen Feldstärke vor den Elektroden (Bild 5.8). Im Vergleich zur den Berechnungsergebnissen mit den ursprünglichen, geringeren Mobilitäten aus Bild 5.4 (Mob-0) ist das Gebiet hoher Feldstärken vor den Elektroden aufgrund des schmalen Be-

reichs akkumulierter *Heterocharges* mit hinreichend großen Teilchendichten auf einen sehr schmalen Bereich vor den Elektroden begrenzt. Aufgrund der hohen Driftgeschwindigkeiten der injizierten *Homocharges* erfolgt sehr schnell eine Verarmung von Ladungsträgern vor den Elektroden, wodurch sie die Feldstärke an den Elektroden nur geringfügig reduzieren.

Bild 5.8: Mit erhöhten Ladungsträgermobilitäten im stationären Zustand $t_{\text{stat SSV}}$ der ersten Spannungssteigerung auf $0,5 U_{\text{DC}} = 50 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen mit den ursprünglichen Mobilitäten (Mob-0)

Nach erneuter Spannungssteigerung verdichtet sich das Gebiet der akkumulierten *Heterocharges* vor den Elektroden aufgrund der höheren vorherrschenden Feldstärke weiter (Bild 5.9), was sich jedoch nur geringfügig auf die Erhöhung der Feldstärke im elektroden-nahen Gebiet auswirkt. Die erhöhten Feldstärken in der Anordnung resultieren dabei vorrangig aus der Erhöhung der Grundfeldstärke infolge der Spannungssteigerung. Aufgrund der hohen Driftgeschwindigkeiten der injizierten *Homo Charges* Ladungsträger wirkt sich jedoch die mit der Feldstärke erhöhte Injektion nur geringfügig auf eine Reduzierung der Feldstärke an den Elektroden aus. Auch hier würde mit der weiteren Spannungssteigerung die Feldstärke weiter steigen und sich die Dichte intrinsischer Ladungsträger weiter erhöhen. Die hohen Mobilitäten haben zudem zur Folge, dass sofort nach der erneuten Spannungssteigerung bereits der quasistationäre Gleichgewichtszustand erreicht ist.

Die Ergebnisse veranschaulichen deutlich, dass eine Variation der im Modell implementierten Parameter – vor allem der wichtigen, aber nicht einfach quantifizierbaren Mobilität – sowohl die Feldstärkeverteilung in Betrag der Feldstärkeüberhöhung an den Elektroden, als auch die Ladungsträgerverteilung in der Größe der Raumladungszonen sehr stark beeinflusst. Für eine genaue Berechnung der sich im Isoliersystem einstellenden Feldstärkeverteilung ist es daher essenziell, die im Modell zu implementierenden Parameter möglichst genau zu quantifizieren.

Bild 5.9: Mit erhöhten Ladungsträgermobilitäten nach weiterer Spannungssteigerung auf $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{DC} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen mit den ursprünglichen Mobilitäten (Mob-0)

Einfluss der intrinsischen Ladungsträgerkonzentration

Zusätzlich zum Einfluss der im Modell implementierten Mobilitätsparameter soll abschließend der Einfluss einer veränderten Konzentration an intrinsischen Ladungsträgern in der Anordnung gezeigt werden. Dies wäre z. B. zu berücksichtigen, wenn der Alterungszustand des verwendeten Isolieröls abgebildet werden soll oder wenn unterschiedliche Ölvolumina betrachtet werden. In beiden Fällen variiert dementsprechend die Menge an dissoziierbaren Bestandteilen im Isoliersystem, also folglich die Anzahl an intrinsischen Ladungsträgern. Kleinere Ölvolumina oder neuwertige Öle besitzen demzufolge eine geringere Anzahl an dissoziierbaren Bestandteilen, große Prüfvolumina oder stark gealterte Öle weisen entsprechend höhere Konzentrationen auf.

Im Modell wird wie beschrieben die Dissoziation und Rekombination der intrinsischen Ladungsträger aufgrund der Komplexität und Unbekanntheit der Prozesse zur Vereinfachung nicht abgebildet und nur ein eindimensionaler Ölspace betrachtet. Vor diesem Hintergrund werden die genannten Einflüsse auf die Menge an Ladungsträgern im System nur über die im Modell implementierten Anfangskonzentrationen an intrinsischen Ladungsträgern abgebildet. Die Ergebnisse wurden hierbei nur im stationären Zustand t_{stat} der letzten Spannungsstufe bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ verglichen. Da die im Modell implementierten Anfangskonzentrationen an intrinsischen Ladungsträgern aufbauend auf [Bac-16a] ebenfalls nur abgeschätzt wurden, wurden die Anfangskonzentrationen in den nachfolgenden Berechnungen beispielhaft jeweils um eine Größenordnung verringert bzw. erhöht.

Wird die Ursprungskonzentration an intrinsischen Ladungsträgern verringert, führt dies folglich zu einer weniger markanten Feldstärkeüberhöhung an den Elektroden im Vergleich zu dem bisher betrachteten Fall (vgl. Bild 5.6), da die Dichte an akkumulierten *Heterocharges* deutlich geringer ist (Bild 5.10). Für diesen betrachteten Fall überwiegt somit der Einfluss der polaritätsabhängigen Injektion von *Homocharges*, die aufgrund der erhöhten Injektion von Elektronen aus der Kathode zu einer geringeren Feldstärke im kathodennahen Bereich

vor der Erdelektrode führt. Demnach ist die Feldstärke im anodennahen Bereich vor der Hochspannungselektrode erhöht. Bezogen auf die mittlere Feldstärke der Anordnung wird die Feldstärke an der Anode somit nur noch um ca. 50 % angehoben, wobei sie an der Kathode um ca. 25 % verringert wird. Trotz des stark verminderten Einflusses der einzelnen Ladungsträgerspezies auf die Feldstärkeverteilung stellt sich in der homogenen Anordnung weiterhin eine ausgeprägte, inhomogene Feldstärkeverteilung ein. Im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen aus Bild 5.6 (*Int-0*) werden aufgrund der verringerten Konzentrationen an intrinsischen Ladungsträgern erwartungsgemäß bedeutend geringere Maximalfeldstärken ermittelt. Da entsprechend angenommen wird, dass die Entladungsentwicklung zum Durchschlag in diesen Bereichen der Feldüberhöhung, d. h. im Bereich der auftretenden Maximalfeldstärke starten wird, werden somit für eine Anordnung mit verringertem Ölvolumen oder einem geringerem Alterungsgrad entsprechend niedrigere Durchschlagsspannungen erwartet.

Bild 5.10: Mit verringerten intrinsischen Ladungsträgerkonzentrationen im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölsolierten Anordnung im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen der Ursprungskonzentrationen (*Int-0*)

Erhöht man hingegen die intrinsische Ladungsträgerkonzentration im System, zeigen sich die Auswirkungen der nun größeren Ladungsträgerdichte und größeren Ausdehnung des Gebietes der an den Elektroden akkumulierten *Heterocharges*. Die Feldstärke an den Elektroden wird im Vergleich zu den anfangs gezeigten Berechnungsergebnissen aus Bild 5.6 (*Int-0*) deutlich erhöht. Diese sehr hohen Feldstärken führen somit zu einer verstärkten Injektion an Ladungsträgern aus den Elektroden. Dies hat wiederum zur Folge, dass zum einen der Polaritätseffekt der Injektion die Differenz der unterschiedlichen Feldstärkemaxima vor Anode und Kathode vergrößert und die anodenseitigen Feldstärken vor der Erdelektrode somit wieder sehr stark angehoben werden. Diese stark erhöhte Injektion hat zum anderen zur Folge, dass die Rekombinationszone im Ölspace ebenfalls verstärkt wird und sich auch dort ein weiteres, wenn auch für die Beanspruchung des Ölspace weniger relevantes Feldstärkemaximum einstellt (Bild 5.11).

Bild 5.11: Mit erhöhten intrinsischen Ladungsträgerkonzentrationen im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisierten Anordnung im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen der Ursprungskonzentrationen (Int-0)

Feldstärkemessungen in [Hik-96] zeigen mit einem erhöhten Zusatz an Verunreinigungen ein ähnliches Verhalten aufgrund der durch die künstlichen Verunreinigungen erhöhten Anzahl an intrinsischen Ladungsträgern. So werden nicht nur unterschiedliche lokale Feldstärkemaxima in Elektrodennähe ermittelt. Ebenfalls wird ein weiteres lokales Maximum im Ölspace gemessen, was demnach aus dem Rekombinationsgebiet der injizierten Ladungsträger aufgrund der verstärkten Injektion resultiert. Eine höhere Konzentration an intrinsischen Ladungsträgern bei stark gealterten Ölen oder in größeren Ölvolumina wirkt sich somit signifikant auf die Beanspruchung des Isoliersystems aus. Höhere Feldstärkemaxima im elektrodennahen Gebiet aufgrund der verstärkten Akkumulation intrinsischer Ladungsträger sind die Folge, was zu einem verringerten Isoliervermögen der Anordnung im Vergleich zur Anordnung mit kleinerem Ölvolumen oder einem neuwertigen bzw. weniger stark gealterten Öl führen würde.

Die bisher übliche Modellvorstellung anhand von Materialparametern wie der spezifischen Leitfähigkeit oder Permittivität des Isoliermediums kann diese Einflüsse nicht abbilden, vor allem an homogenen Einstoffisierungen nicht. Nicht quantifizierbare Erklärungen wie die des Volumeneffekts wurden somit herangezogen, um etwaige Phänomene erklärbar zu machen. Der auftretende Volumeneffekt mit verringerten Durchschlagspannungen bei gleichem Elektrodenabstand, aber größerem Ölvolumen kann somit nicht nur durch eine höhere Durchschlagwahrscheinlichkeit des Schwachstellendurchschlages begründet werden [Küc-17], sondern ebenfalls durch die gezeigte, stärkere Beanspruchung des Isoliersystems an sich. Die in [Zou-98] ermittelten, stark verringerten Durchschlagspannungen bei größeren Ölvolumina des Prüfgefäßes ließen sich somit ebenfalls auf eine größere Konzentration an intrinsischen Ladungsträgern und somit auf eine stärkere Beanspruchung des Isoliersystems bei größeren Ölfüllständen im Prüfgefäß zurückführen.

5.2.2 Vergleich der Öl-Papier isolierten Anordnungen

Zur Verifikation des ladungsträgerbasierten PNP-Berechnungsmodells an realitätsnahen Anordnungen sollen die Berechnungsergebnisse an den in Bild 5.1 gezeigten, Öl-Papier-isolierten Anordnungen untereinander und später mit den Ergebnissen der Durchschlagversuche aus Abschnitt 6.1 verglichen werden. Zusätzlich werden die anhand des PNP-Modells ermittelten Ergebnisse den Ergebnissen der klassischen resistiv-kapazitiven Modellierung entsprechend des stationären Strömungsfeldes gegenübergestellt. Am Beispiel einer Anordnung mit papierisolierten Elektroden (i-i) und einer Anordnung mit einer isolierten und einer blanken Elektrode (i-b) sollen die Auswirkungen der im Papier und an den Elektroden akkumulierten Ladungsträger auf die Feldstärkeverteilung gezeigt und mit den Berechnungen anhand der klassischen Strömungsfeldberechnung gegenübergestellt werden.

Zum Vergleich der Beanspruchung der papierisolierten Anordnungen mit der reinen öli-solierten Anordnung dient die Anordnung mit blanken Elektroden bei einem nach Abschnitt 5.1 gegebenen Ölspace von $s = 6$ mm als Grundlage auf Basis der in Abschnitt 5.2.1 gezeigten Einflüsse (Bild 5.12). Analog zu Bild 5.6 stellt sich auch bei einem geringeren Ölspace eine inhomogene Feldstärkeverteilung mit starken Feldüberhöhungen an den Elektroden und einem Feldstärkemaximum im anodennahen Bereich vor der Hochspannungselektrode ein. Aufgrund des geringeren Elektrodenabstandes und der damit bei einer identischen Spannungsbelastung wirkenden, höheren mittleren Feldstärke ist das in Bild 5.6 gezeigte Rekombinationsgebiet der injizierten Ladungsträger stark in den anodennahen Bereich verschoben, weshalb sich kein weiteres, lokales Feldstärkemaximum ausbilden kann.

Bild 5.12: Mit dem PNP-Berechnungsmodell im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{DC} = 100$ kV zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung bei einem Ölspace von $s = 6$ mm

Anordnung mit isolierten Elektroden

An der Anordnung mit papierisolierten Elektroden (i-i; Bild 5.1) soll zunächst noch einmal der Einfluss der Spannungssteigerung am Beispiel einer direkten Spannungssteigerung

von 0V auf $U_{DC} = 100$ kV gezeigt und im Anschluss mit dem quasistationären Gleichgewichtszustand verglichen werden.

Betrachtet man den Zustand des Isoliersystems direkt nach der Spannungssteigerung (vgl. t_{DC} ; Bild 5.2a), ist bereits auffällig, dass der Ölpalt besonders im Bereich der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Elektroden am stärksten beansprucht wird (Bild 5.13). Während der Spannungssteigerung bewegen sich die intrinsischen Ladungsträger durch das Ölvolumen in Richtung der Gegenelektrode, was analog zur blanken Anordnung direkt nach der Spannungssteigerung noch nicht abgeschlossen ist. Aufgrund der deutlich verringerten Mobilität der Ladungsträger im Papier stauen sich die driftenden intrinsischen *Heterocharges* zunächst an der Öl-Papier-Grenzfläche vor den Barrieren. Dies hat zur Folge, dass die Feldstärke im Ölpalt in diesem Gebiet stark angehoben wird. Mit in den Ölpalt hinein abnehmender Dichte an *Heterocharges* nimmt auch die Feldstärke im Ölpalt ab. Die stetig zunehmende Injektion von *Homocharges* aus den Elektroden hingegen führt zu einer Verringerung der Feldstärke im Papier, insbesondere im elektrodennahen Bereich. Die verstärkte Injektion von Elektronen führt dabei zu einer starken Absenkung der Feldstärke im kathodennahen Bereich vor der Erdelektrode. Aufgrund der geringen Driftgeschwindigkeit der injizierten Ladungsträger im Papier nimmt deren Dichte im Papier stark ab. Deren Einfluss an der Feldstärkeverteilung im Ölpalt ist entsprechend gering.

Bild 5.13: Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung einer Anordnung mit papierisolierten Elektroden direkt nach der Spannungssteigerung auf $U_{DC} = 100$ kV zum Zeitpunkt t_{DC}

Im stationären Zustand bei t_{stat} überwiegt bei der Öl-Papier isolierten Anordnung vor allem der Einfluss der injizierten *Homocharges* (Bild 5.14). Aufgrund deren geringer Mobilität im imprägnierten Pressspan ist die Dichte der injizierten Ladungsträger im Papier in Elektrodennähe am größten und nimmt in Richtung des Ölspaltes sehr stark ab. Aufgrund der jedoch stärkeren Injektion von Elektronen ist auch deren durch den Ölspalt driftende Anzahl am größten. Dies führt dazu, dass sich die driftenden Elektronen ebenfalls an der anodenseitigen Öl-Papier-Grenzfläche im Öl stauen. Diese Vielzahl an akkumulierten Ladungsträgern hat zudem zur Folge, dass die injizierten Ladungsträger bereits in der anodenseitigen Papierisolierung rekombinieren, weshalb kaum noch Löcher (d. h. injizierte Kationen) im Ölspalt vorhanden sind.

Bild 5.14: Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit papierisolierten Elektroden im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$

Die somit hohen Dichten an *Homocharges* im Papier (Bild 5.14a) führen zu einer starken Entlastung der Papierisolierung. Im Gegensatz zur blanken Anordnung resultiert die Akkumulation der intrinsischen *Hetero Charges* nur zu einer leicht erhöhten Feldstärke. Dies führt bei der papierisolierten Anordnung zu einer stärkeren Beanspruchung des Ölspaltes mit einer relativ gleichmäßigen Feldstärkeverteilung, wobei der Stau der driftenden Elektronen vor der Papierbarriere der Anode nur zu einer leichten Feldstärkeerhöhung in diesem Gebiet führt. Die Akkumulation der intrinsischen Ladungsträger an den Elektroden und die

hohen Dichten an injizierten *Homocharges* im Papier führen zudem dazu, dass im stationären Zustand bedeutend geringere Maximalfeldstärken im Vergleich zur Beanspruchung direkt nach der Spannungssteigerung ermittelt werden.

Die erste Spannungssteigerung würde demnach eine größere Beanspruchung des Isoliersystems im Vergleich zum stationären Zustand darstellen. Da vor allem die intrinsischen Ladungsträger bei einer weiteren Spannungssteigerung jedoch bereits verteilt sind, würde eine weitere Steigerung der Spannung nur zu einer Erhöhung der Grundfeldstärke und einer verstärkten Injektion führen. Die Hauptbeanspruchung bliebe daher weiter im Ölspace bestehen und es würden sich nur noch marginale Unterschiede zwischen dem Zustand nach der weiteren Spannungssteigerung und dem stationären Zustand ergeben.

Beim Vergleich der ermittelten Feldstärken der Anordnungen fällt bereits auf, dass im Ölspace der papierisolierten Anordnung nicht nur im Vergleich zum Zustand nach der Spannungssteigerung (Bild 5.13), sondern auch im Vergleich zur blanken Anordnung im stationären Zustand (Bild 5.14) derselben Spannungsbelastung bedeutend geringere Maximalfeldstärken ermittelt wurden. Im Vergleich zur blanken Anordnung wird bei der Anordnung mit isolierten Elektroden eine um ca. 50 % reduzierte Maximalfeldstärke ermittelt. Ebenso ist auffällig, dass auch bei der papierisolierten Anordnung der Ölspace am stärksten beansprucht wird. Dies sollte sich ebenfalls in den Ergebnissen der anschließenden Durchschlagversuche widerspiegeln. Demnach sollte bei der Anordnung mit isolierten Elektroden ein höheres Isoliervermögen feststellbar sein und sich zudem bei beiden Anordnungen eine starke Abhängigkeit zur Ölspaltweite s einstellen.

Anordnung mit einer isolierten und einer blanken Elektrode

Wird hingegen nur eine Elektrode isoliert, ist am Beispiel der Anordnung mit papierisolierter Anode wiederum ein unterschiedliches Verhalten der Anordnung feststellbar. Auch hier soll zunächst die Spannungssteigerung auf $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ betrachtet und im Anschluss mit dem quasistationären Gleichgewichtszustand verglichen werden.

Zum Zeitpunkt t_{DC} direkt nach der Spannungssteigerung auf $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ stellt sich in der Papierisolierung und deren Grenzfläche eine ähnliche Feldstärkeverteilung wie bei der Anordnung mit isolierten Elektroden ein (Bild 5.15).

Sowohl die zur Anode driftenden intrinsischen Anionen als auch die von der Kathode injizierten Ladungsträger stauen sich zunächst an der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Anode, was zu einem lokalen Anstieg der Feldstärke in diesem Bereich führt. Die von der isolierten Anode injizierten Ladungsträger hingegen stauen sich aufgrund der geringen Mobilitäten innerhalb der Papierisolierung vorrangig im Papier und bewirken eine Verringerung der Feldstärke an der Papier-Elektroden-Grenzfläche. Die zur blanken Kathode driftenden intrinsischen Ladungsträger hingegen akkumulieren an dieser aufgrund der hohen Mobilitäten im Isolieröl bereits in großer Zahl, was zu einer entsprechenden, lokalen Anhebung der Feldstärke im kathodennahen Bereich der Erdelektrode führt (Bild 5.15). An der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Anode werden jedoch minimal höhere Feldstärken im Vergleich zur blanken Kathode erreicht.

Bild 5.15: Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit blanker Erdelektrode (Kathode) und papierisolierter Hochspannungselektrode (Anode) zum Zeitpunkt t_{DC} direkt nach der Spannungssteigerung auf $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$

Im stationären Zustand hingegen ist die Bewegung der intrinsischen Ladungsträger abgeschlossen und die Generation sowie die Bewegung der injizierten Ladungsträger befindet sich im Gleichgewicht zur Rekombination (Bild 5.16). Aufgrund der Akkumulation von *Heterocharges* an der blanken Erdelektrode (Kathode) und der somit lokal erhöhten Feldstärke werden entsprechend hohe Raten an injizierten Elektronen erreicht. Diese driften zur papierisolierten Anode und stauen sich an der Öl-Papier-Grenzfläche. Ladungsträgerdichtemessungen aus der Literatur an ähnlichen Anordnungen mit einer blanken und einer papierisolierten Elektrode bestätigen dies [Wu-16], in denen ebenfalls hohe Dichten im Öl vor der Papierbarriere ermittelt wurden, was die Plausibilität der Berechnungsergebnisse zeigt. Aufgrund der geringen Mobilitäten der Ladungsträger im Papier bewegen sich die aus der isolierten Anode injizierten Elektronen nur sehr langsam durch das Papier. Dies hat zur Folge, dass die injizierten Ladungsträger bereits im Papier gegenseitig rekombinieren können, was wiederum eine hohe, lokale Feldstärke im Papier bewirkt. Im Staugebiet der an der Öl-Papier-Grenzfläche im Öl akkumulierten injizierten Ladungsträger werden somit sehr hohe Feldstärken erreicht, die die Feldstärken im kathodenseitigen Staugebiet vor der Erdelektrode um ein Vielfaches übersteigen. Die an der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Anode akkumulierten Elektronen wirken somit nun wie *Heterocharges* und erhöhen die Feldstärken in diesem Gebiet.

Aufgrund der hohen Dichte an akkumulierten injizierten Ladungsträgern vor der Papierbarriere und der dadurch verursachten sehr hohen Feldstärken an der Öl-Papier-Grenzfläche spielt auch hier die Akkumulation der intrinsischen Ladungsträger eine untergeordnete Rolle. Sowohl im Vergleich zur blanken Anordnung (b-b) als auch zur Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) werden an der Anordnung mit nur einer isolierten Elektrode (i-b) bedeutend höhere Feldstärken erreicht. Im Vergleich zur blanken Anordnung wird die im Öl ermittelte Maximalfeldstärke an der Anordnung mit isolierter Anode und blanker Kathode mehr als verdoppelt. Aufgrund der hohen Maximalfeldstärken im Isolieröl und der im Vergleich zum Papier geringeren elektrischen Festigkeit des Isolieröls wird erwartet, dass

eine Entladung zum Durchschlag am Ort der Höchstfeldstärke Öl starten würde. In den Experimenten sollte sich dies somit in einem stark verminderten Isoliervermögen der Anordnung niederschlagen. Jedoch sollte auch hier eine starke Abhängigkeit zur Ölspalbreite feststellbar sein.

Bild 5.16: Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit blanker Erdelektrode (Kathode) und papierisolierter Hochspannungselektrode (Anode) im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$

Vergleich der Anordnungen auf Basis der klassischen Strömungsfeldberechnung

Vergleicht man die vorgestellten Ergebnisse der ladungsträgerbasierten Berechnungen mit denen der klassischen, resistiv-kapazitiven Modellierung anhand des stationären Strömungsfeldes, zeigen sich in den Ergebnissen deutliche Unterschiede (Bild 5.17). Das Verhältnis der ermittelten Feldstärken im Öl und im Papier ist dabei stark abhängig von den angenommenen elektrischen Leitfähigkeiten. Der Alterungsgrad des Isolieröls wirkt sich dabei auch auf die elektrische Leitfähigkeit des ölprägnierten Papiers [Fu-15] und demnach auch auf die Feldstärkeverhältnisse aus. Entsprechend des üblicherweise als konstant angenommenen Verhältnisses der elektrischen Leitfähigkeiten von Papier zu Öl von 1:100 werden bei der Berechnung auf Grundlage des stationären Strömungsfeldes im Papier um das 100-fach höhere Feldstärken im Vergleich zum Ölspalt ermittelt. Infolge der homogenen Anordnung stellt sich in den Dielektrika ebenfalls eine homogene Verteilung ein.

Bild 5.17: Gegenüberstellung der berechneten Feldstärkeverteilungen der Öl-Papier-isolierten Anordnungen anhand des stationären Strömungsfeldes auf Basis konstanter elektrischer Leitfähigkeiten der Isoliermedien

Sowohl die homogene Feldstärkeverteilung in den einzelnen Isoliermedien als auch die um ein Vielfaches höhere Beanspruchung der Papierschicht im Vergleich zum Ölspalt steht im direkten Widerspruch zu den PNP-Berechnungsergebnissen. Aufgrund der Annahme von konstanten Materialparametern und der fehlenden Berücksichtigung vorhandener Raumladungen können entsprechend auftretende Einflüsse nicht modelliert werden. Die Ergebnisse würden somit ein im Vergleich zur blanken Anordnung um ein Vielfaches verringertes Isoliervermögen vermuten lassen. Aufgrund der 100-fach höheren Beanspruchung der dünnen Papierschichten würde erwartet, dass trotz der höheren elektrischen Festigkeit des Isolierpapiers im Vergleich zum Isolieröl die Entladung zum Durchschlag in der Papierisolierung startet. Bedeutend geringere Durchschlagsspannungen wären die Folge, die zudem nur gering von der Ölspaltweite beeinflusst würden.

5.2.3 Einfluss eines Ölspaltes zwischen Elektrode und Papierisolierung auf die Feldstärkeverteilung

Die Berechnungsergebnisse der Anordnung mit isolierten Elektroden aus Bild 5.14 zeigen, dass aufgrund der stark verringerten Ladungsträgermobilität im Papier die Papierschichten entsprechend mit akkumulierten *Homocharges* geflutet sind und somit entlastet werden. Um später auch in den Versuchen weitere Einflüsse der akkumulierten injizierten Ladungsträger zu zeigen, soll im Anschluss der Einfluss von zusätzlichen Ölspalten zwischen Elektrode und Papierbarriere gezeigt werden.

Aus diesem Grund wurde für die nachfolgenden Betrachtungen eine Anordnung gewählt, bei der zwei Papierbarrieren so in die Anordnung mit blanken Elektroden eingeschoben wurden, dass sich nach Bild 5.1 drei Ölspalte mit identischer Ölspaltweite von

$$s_{\text{ERD-B1}} = s_{\text{B1-B2}} = s_{\text{B2-H5}} = 3 \text{ mm}$$

entstehen und sich somit eine resultierende Gesamtlöspaltweite von

$$s_{\text{ges}} = s_{\text{ERD-B1}} + s_{\text{B1-B2}} + s_{\text{B2-HS}} = 9 \text{ mm}$$

bei einem resultierenden Elektrodenabstand von $d = 9,4 \text{ mm}$ ergibt (Bild 5.1, eingeschobene Barrieren).

Die Ergebnisse der Berechnungen bei einer Spannungsbelastung von $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zeigen im stationären Zustand zum Zeitpunkt t_{stat} ein prinzipiell vergleichbares Verhalten wie die Anordnung mit isolierten Elektroden (Bild 5.14). Die aus den Elektroden injizierten *Homo-charges* bewegen sich rasch durch den elektrodenseitigen Ölpalt, akkumulieren jedoch aufgrund der deutlich verringerten Mobilität im Papier an und in den eingeschobenen Papierbarrieren (Bild 5.18a). Die langsame Drift der Ladungsträger durch das Papier führt dazu, dass nur eine vergleichsweise geringe Anzahl an Ladungsträgern durch den mittleren Ölpalt driftet und die verbliebenen injizierten Ladungsträger an der gegenüberliegenden Papierbarriere mit den entgegengesetzt geladenen, injizierten Ladungsträgern rekombinieren.

Bild 5.18: Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren und blanken Elektroden im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ gegenübergestellt mit den Berechnungsergebnissen anhand einer Strömungsfeldberechnung auf Basis konstanter elektrischer Leitfähigkeiten der Isoliermedien

Trotz der Akkumulation der intrinsischen *Heterocharges* an der Gegenelektrode und deren relativ hohen Dichten in den elektrodenseitigen Ölspalten vor den Elektroden wirken sich diese nur geringfügig auf die Feldstärkeverteilung aus. Die hohen Dichten an injizierten *Homocharges* in den Papierbarrieren und dem elektrodenseitigen Ölspalt führen dazu, dass die äußeren Ölspalte stark entlastet werden und somit die höchsten Feldstärken im mittleren Ölspalt auftreten (Bild 5.18b). Aufgrund der „Aufladung“ der Papierbarrieren mit *Homocharges* ergibt sich in den Berechnungen eine vergleichsweise homogene Feldstärkeverteilung im mittleren Ölspalt. Analog zur Anordnung mit isolierten Elektroden erfährt somit der Ölspalt zwischen den Papierbarrieren die stärkste Beanspruchung. An Anordnungen mit mehreren Ölspalten wurden ähnliche Feldverteilungen ermittelt [Gäf-00], wobei stets die mittleren Ölspalte die größte Beanspruchung erfuhren. Im Umkehrschluss wiederum würde dies bedeuten, dass der Durchschlag aufgrund der höchsten auftretenden Feldstärken im mittleren Ölspalt initiiert werden würde, wenn elektrodennahe Effekte ausgeschlossen werden können. Das Isoliervermögen würde somit vorrangig von der Größe des mittleren Ölspalts bestimmt werden.

Im Gegensatz dazu ergibt sich an der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren nach einer klassischen Strömungsfeldberechnung qualitativ eine ähnliche Feldstärkeverteilung wie bei der Anordnung mit isolierten Elektroden (vgl. Bilder 5.17a und 5.18c). Die Höchstfeldstärken werden aufgrund der geringeren Leitfähigkeit erwartungsgemäß im Papier ermittelt. Demnach würden sich für die Anordnungen mit isolierten Elektroden und mit eingeschobenen Barrieren bei identischer Ölspaltweite s_{ges} ähnliche Durchschlagspannungen ergeben. Zusätzliche Erscheinungen wie die erwartete Aufladung der Papierbarrieren und dessen Auswirkungen auf die Feldstärkeverteilungen sind somit ohne zusätzlich implementierte, angenommene Ladungsträger nicht darstellbar.

5.2.4 Auswirkungen des polaritätsabhängigen Injektionsverhaltens an unsymmetrischen Anordnungen

In Abschnitt 5.2.2 bzw. Bild 5.16 wird deutlich, dass die an der Öl-Papier-Grenzfläche vorherrschende Feldstärkeüberhöhung maßgeblich von den an der Papierbarriere akkumulierten, injizierten Ladungsträgern bestimmt wird. Entscheidend für die Beanspruchung der Anordnung ist demnach die Injektion von Ladungsträgern aus der blanken Elektrode. Aufgrund der eingangs und in Abschnitt 2.3.1 erwähnten, stark polaritätsabhängigen Injektion von Löchern und Elektronen [Bac-16b, Gab-18a] wäre demnach zu erwarten, dass sich dieser Polaritätseffekt auch auf die Beanspruchung der Anordnung mit nur einer papierisolierten und einer blanken Elektrode auswirkt. Um den Einfluss dieses Polaritätseffekts auf die Beanspruchung dieser homogenen, aber unsymmetrischen Anordnung zu zeigen, wurden zusätzlich zur in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Anordnung mit isolierter Anode ebenfalls Berechnungen an der Anordnung mit isolierter Kathode durchgeführt (vgl. Bild 5.1) und die ermittelten Berechnungsergebnisse gegenübergestellt.

Wie auch bei den vorgestellten Ergebnissen der Anordnung mit isolierter Anode zeigt sich ebenfalls bei der Anordnung mit isolierter Kathode, dass sich an der Öl-Papier-Grenzfläche ein Staugebiet an akkumulierten, injizierten Ladungsträgern ausbildet (Bild 5.19a). Auf-

grund der höheren Injektionsraten an Elektronen aus der blanken Kathode im Vergleich zu Löchern aus der blanken Anode ist an dieser Anordnung das Staugebiet an injizierten Elektronen vor der isolierten Kathode weniger stark ausgeprägt. Dies resultiert analog zur Anordnung mit isolierter Anode jedoch ebenfalls darin, dass im Ölspalt an der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Kathode lokal sehr hohe Feldstärken erreicht werden (Bild 5.19b). Aufgrund der hohen Raten an injizierten Elektronen ist zudem die lokale Feldstärke vor der blanken Kathode geringer.

Bild 5.19: Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung einer Anordnung mit einer blanken und einer papierisolierten Elektrode im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ am Beispiel der Anordnung mit isolierter Kathode

Vergleicht man die Anordnungen mit isolierter Anode und isolierter Kathode im stark beanspruchten Gebiet vor der isolierten Elektrode miteinander, werden die Auswirkungen des polaritätsabhängigen Injektionsverhaltens auf die Beanspruchung der Anordnung besonders deutlich (Bild 5.20). So werden aufgrund der höheren Injektionsraten aus der blanken Kathode und des somit stärker ausgeprägten Staugebietes an injizierten *Heterocharges* an der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Anode bedeutend höhere Feldstärken vor der isolierten Anode ermittelt [Gab-18a]. Aufgrund der höheren Injektionsraten ist ebenfalls die Rekombinationszone in der Papierbarriere der isolierten Anode stärker ausgeprägt, was ebenfalls zu einer stärkeren Beanspruchung der Papierisolierung führt. Aufgrund der jedoch nur geringfügig höheren Feldstärken im Papier und dessen höheren elektrischen Festigkeit verglichen mit dem ermittelten Maximum im Ölspalt sollte sich dieses Maximum in der Rekombinationszone nicht auf das Isoliervermögen der Anordnung auswirken. Es wird daher angenommen, dass die starke Beanspruchung des Öls im Staugebiet vor der Elektrode aufgrund der geringeren elektrischen Festigkeit des Öls zum Entladungseinsatz im Öl und infolge der dünnen Papierbarriere somit zum Durchschlag der Anordnung führt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich in der homogenen, aber unsymmetrischen Anordnung aufgrund der polaritätsabhängigen Injektion von Ladungsträgern aus der blanken Elektrode ebenfalls ein Polaritätseffekt in der Beanspruchung der Anordnung mit nur einer papierisolierten Elektrode einstellt. Die Anordnung mit isolierter Anode erfährt demnach die größte Beanspruchung, was sich im Isoliervermögen der Anordnung und damit

an geringeren Durchschlagspannungen im Vergleich zur Anordnung mit isolierter Kathode zeigen sollte. Wie bereits in Bild 5.17b dargestellt, kann die klassische Feldberechnung auf Grundlage der elektrischen Leitfähigkeiten der Isoliermedien nach dem stationären Strömungsfeld dieses Verhalten nicht abbilden. Beim Einbringen einer Papierbarriere vor der Anode oder Kathode würde stets eine identische Beanspruchung der homogenen, aber unsymmetrischen Anordnung berechnet.

Bild 5.20: Detaillierte Betrachtung der Auswirkung des Polaritätseffekts der Injektion auf die Feldstärkeverteilung einer unsymmetrischen Anordnung am Beispiel der Anordnung isolierter Anode oder isolierter Kathode nach [Gab-18a]

5.3 Berechnungsergebnisse bei Mischspannungsbelastung

Aufbauend auf den Berechnungen bei reiner Gleichspannungsbelastung werden die Berechnungsergebnisse bei zusammengesetzter Mischspannungsbelastung vorgestellt. Um die Ergebnisse mit den Durchschlagversuchen zu vergleichen, wurden an den Anordnungen folgende drei Belastungsfälle untersucht (Bild 5.21):

- Stationäre Gleichspannungsbelastung bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ ①
- Unipolare Überlagerung einer Gleichspannung U_{DC0} mit einem Blitzimpuls $\hat{U}_{Li uni}$ derselben Polarität ②
- Reine Blitzstoßspannungsbelastung $\hat{U}_{Li} = U_{DC}$ ③
- Bipolare Überlagerung einer Gleichspannung U_{DC0} mit einem Blitzimpuls $\hat{U}_{Li bi}$ entgegengesetzter Polarität ④

Die Belastungen sind dabei so gewählt, dass sowohl die Scheitelwerte der reinen Blitzstoßspannung $\hat{U}_{Li}$ ③ als auch der Summenspannung der resultierenden Mischspannung $\hat{U}_{\Sigma}$ der uni- ② und bipolaren Überlagerung ④ zum Zeitpunkt t_0 im Betrag der stationären Gleichspannungsbelastung U_{DC} ① entsprechen. In Analogie zu den Durchschlagversuchen bei überlagerter Spannungsbelastung wurde der Gleichspannungsanteil zur Überlagerung ebenfalls mit $U_{DC0} = 0,5 \cdot U_{DC} = 50 \text{ kV}$ gewählt. Zur besseren Veranschaulichung der Auswirkungen des Polaritätswechsels an der Hochspannungselektrode bei der bipolaren Überlagerung wurde die angelegte positive Gleichspannung mit einem negativen Impuls

überlagert. Aufgrund der Symmetrie der jeweiligen Anordnungen sind die ermittelten Ergebnisse dennoch direkt mit den Ergebnissen bei einer positiven resultierenden Mischspannung vergleichbar.

Bild 5.21: In den Berechnungen nachgebildete Spannungsbelastungen

Die Berechnungen wurden für einen späteren Vergleich mit den Ergebnissen der Durchschlagversuche an der Anordnung mit blanken und isolierten Elektroden analog mit einer Ölspalbreite von $s = 3 \text{ mm}$ durchgeführt. Aufgrund der eingesetzten Papierbarrieren ergibt sich demnach bei der Anordnung mit isolierten Elektroden ein resultierender Elektrodenabstand von

$$d = s + 2b = 3,4 \text{ mm.}$$

5.3.1 Blanke Elektrodenanordnung

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse der stationären Gleichspannungsbelastung (Bild 5.21, ①) und der reinen Blitzstoßspannungsbelastung (Bild 5.21, ③), werden vor allem bei der reinen Stoßspannungsbelastung die Unterschiede deutlich (Bild 5.22).

Bild 5.22: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei reiner Gleichspannungs- und Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum zum Zeitpunkt t_0 nach Bild 5.21

Wie bei den Betrachtungen zur reinen Gleichspannungsbelastung bereits vorgestellt (vgl. Abschnitt 5.2.1), stellt sich auch bei der Anordnung mit einer Ölspalbreite von $s = 3 \text{ mm}$ durch die Akkumulation von *Heterocharges* eine ähnliche, inhomogene Feldstärkeverteilung

mit ausgeprägten lokalen Feldstärkemaxima an den Elektroden ein (Bild 5.22a). Aufgrund der geringeren Ölpaltweite, der damit wirkenden, höheren mittleren Feldstärke und der somit erhöhten Injektion wird die Feldstärkeüberhöhung an den Elektroden verringert und die Feldstärkeverteilung vergleichmäßigt. Weiterhin stellt sich aufgrund der geringeren Ölpaltweite und der somit geringeren Grundgesamtheit an intrinsischen Ladungsträgern im System eine ähnliche Feldstärkeverteilung im Ölpalt im Vergleich zur Betrachtung der blanken Anordnung mit einer geringeren, vorgegebenen Anfangskonzentration an intrinsischen Ladungsträgern aus Bild 5.10 ein.

Bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung hingegen ist aufgrund des sehr schnellen Impulses kein Ladungsträgereinfluss auf die homogene Feldstärkeverteilung feststellbar (Bild 5.22b). Die vergleichsweise trägen Ladungsträger können dem schnellen Impuls nicht folgen und es findet keine merkliche Ladungsträgerbewegung statt. Es erfolgt lediglich eine leichte Injektion von *Homocharges*, die sich aber aufgrund der geringen Teilchendichten nicht auf die Feldverteilung und damit die Beanspruchung der Anordnung auswirkt (vgl. Bild A.2). Qualitativ werden dabei aufgrund des nicht wirksamen Ladungsträgereinflusses geringere Feldstärken im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ermittelt. Zusätzlich zum Einfluss der sehr kurzen Wirkdauer und der Zündverzugszeit beim Durchschlag unter Stoßspannungsbelastung sollten sich demnach erwartungsgemäß höhere Durchschlagsspannungen einstellen.

Betrachtet man die Berechnungsergebnisse bei Mischspannungsbelastung, werden weitere Unterschiede sichtbar. Als Ausgangszustand der Betrachtungen zur Mischspannungsbelastung der blanken Anordnung soll zum Vergleich der stationäre Zustand der Gleichspannungsvorbelastung vor der uni- oder bipolaren Überlagerung mit der Blitzstoßspannung dienen, welcher sich aufgrund der verminderten Grundfeldstärke ähnlich zur vollen Gleichspannungsbelastung ergibt (Bild 5.23).

Bild 5.23: Berechnete Ladungsträgerverteilung und entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der blanken Elektrodenanordnung im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung U_{DC0} bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$

An den Berechnungsergebnissen bei Mischspannungsbelastung werden nicht nur Unterschiede zwischen der unipolaren ② und der bipolaren Überlagerung ④ sichtbar, es zeigen sich auch Unterschiede zur reinen Gleichspannungsbelastung ① (Bild 5.24).

Bei der unipolaren Überlagerung (Bild 5.24a) stellt sich qualitativ eine ähnliche Feldstärkeverteilung ein, wie sie auch im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung berechnet wurde. Im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ① werden jedoch um ca. 5 % verringerte Maximalfeldstärken ermittelt. Aufgrund der Überlagerung der stationären Gleichspannungsvorbelastung mit dem schnellen Blitzstoß werden analog zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung nur eine geringe Anzahl an zusätzlichen Ladungsträgern injiziert (vgl. Bild A.3a). Es erfolgt somit vorrangig eine Erhöhung der Feldstärke aufgrund der Potentialanhebung der Hochspannungselektrode zum Zeitpunkt der Überlagerung. Bei der reinen Gleichspannungsbelastung hingegen erfolgt bei derselben Spannungsbelastung eine zusätzliche Ladungsträgerbewegung und damit eine Verstärkung des Staugebietes der *Heterocharges*. Dies führt bei derselben resultierenden Spannung zu einer zusätzlichen Erhöhung der Feldstärke an den Elektroden und damit zu den höheren Feldstärken im Vergleich zur unipolaren Überlagerung.

Bild 5.24: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung nach Bild 5.21

Bei der bipolaren Überlagerung (Bild 5.24b) stellt sich aufgrund des Polaritätswechsels eine im Vergleich zur Gleichspannungsbelastung inverse Feldstärkeverteilung ein. Die Polaritätsumkehr der Elektroden führt nun dazu, dass sich die während der Gleichspannungsvorbelastung akkumulierten, intrinsischen Anionen nun vor der Kathode befinden und die intrinsischen Kationen nun vor der Anode angelagert sind. Die zur Vorbelastung akkumulierten intrinsischen Ladungsträger, welche unter Gleichspannung als *Heterocharges* wirken, sind aufgrund des Polaritätswechsels nun *Homocharges* derselben Polarität wie die angrenzende Elektrode. Dies hat im Maximum der bipolaren Überlagerung nun zur Folge, dass die lokale Feldstärke an der Öl-Elektroden-Grenzfläche deutlich herabgesenkt wird. Das Feldstärkemaximum verschiebt sich somit in den Ölspace vor der blanken Anode bzw. der Erdelektrode. Aufgrund der vor der Überlagerung größeren Menge an injizierten Anionen (Elektronen), welche demzufolge im Maximum der bipolaren Überlagerung nun injizierte *Heterocharges* vor der Anode darstellen, wird das Feldstärkemaximum nun im anodennahen Bereich im Ölspace erreicht. Dabei werden aufgrund dieser Verringerung der Feldstärke im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ① um ca. 20 % verringerte Maximalfeldstärken ermittelt. Die kurzzeitige Injektion von zusätzlichen Kationen (Löchern) aus der An-

ode während der bipolaren Überlagerung (vgl. Bild A.3b) wirkt sich jedoch aufgrund deren geringen Dichten nicht auf die Feldstärkeverteilung aus.

Aufgrund der sowohl bei der unipolaren (Bild 5.24a, ②) als auch bei der bipolaren Überlagerung (Bild 5.24b, ④) ermittelten, geringeren Maximalfeldstärken im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung (Bild 5.22a, ①) werden ähnlich zum reinen Blitzstoß höhere Durchschlagspannungen erwartet. Die reine Gleichspannungsbelastung sollte demnach sowohl im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung als auch zur Mischspannungsbelastung bei einer ähnlichen resultierenden, nominellen Spannung die größte Beanspruchung des Isoliersystems hervorrufen.

5.3.2 Isolierte Elektrodenanordnung

Papierisolierte Elektroden

An der Anordnung mit papierisolierten Elektroden werden wie auch bei der blanken Anordnung beim Vergleich der Berechnungsergebnisse der reinen Spannungsbelastungen Unterschiede deutlich. Im stationären Zustand der reinen Gleichspannungsbelastung ① bildet sich eine stark von den im Papier akkumulierten *Homocharges* beeinflusste Beanspruchung aus, welche in einer geringen Feldstärke im Papier und einer höheren Beanspruchung des Ölvolumens resultiert (vgl. Abschnitt 5.2.2). Des Weiteren zeigt sich analog zu Bild 5.14, dass sich aufgrund der höheren Injektionsraten der aus der Kathode injizierten Elektronen ein leichtes Staugebiet vor der isolierten Hochspannungselektrode (Anode) ausbildet, was zu einem lokalen Maximum der Feldstärke im Ölspace vor der anodenseitigen Papierbarriere führt (Bild 5.25a).

Die Feldstärkeverteilung bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung ③ hingegen wird maßgeblich durch das Verschiebungsfeld und somit vom Permittivitätsverhältnis der Isoliermedien dominiert. Es stellt sich sowohl im Papier als auch im Ölspace eine homogene Feldstärkeverteilung ein, die im Öl aufgrund dessen geringerer Permittivität eine höhere Feldstärke verursacht (Bild 5.25b). Ähnlich zur blanken Anordnung ist bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung kein Raumladungseinfluss zu beobachten. Trotz der kurzzeitigen Injektion von *Homocharges* in das Papier der isolierten Elektrode sind die Ladungsträgerdichten zu gering, um sich auf die Feldverteilung und damit das Verhalten der Anordnung auszuwirken. Eine merkliche Drift der Ladungsträger findet während des sehr raschen Impulses aufgrund der verhältnismäßig geringen Mobilitäten nicht statt (vgl. Bild A.4). Bei beiden Spannungsbelastungen stellen sich demnach die höchsten Feldstärken im Ölspace ein. Bei der reinen Gleichspannungsbelastung werden im Ölspace aufgrund der im Papier stark verringerten Feldstärke minimal höhere Maximalfeldstärken im Vergleich zur Stoßspannungsbelastung erreicht. Aufgrund der kurzen Wirkdauer der Stoßspannungsbelastung sollten sich demnach ähnlich zur Beanspruchung der blanken Anordnung höhere Durchschlagspannungen im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung und somit ein vermindertes Isoliervermögen unter reiner Gleichspannungsbelastung einstellen.

Bild 5.25: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden bei reiner Gleichspannungs- und Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum zum Zeitpunkt t_0 nach Bild 5.21

Vergleicht man nun die Berechnungsergebnisse der Anordnung mit isolierten Elektroden bei unipolarer ② und bipolarer Mischspannungsbelastung ④ miteinander, zeigen sich ebenfalls die Einflüsse der einzelnen Spannungsanteile der Überlagerung. Auch hier soll zunächst der Ausgangszustand der Überlagerung bei der Gleichspannungsvorbelastung mit $U_{DC0} = U_{DC}$ betrachtet werden. Dabei stellt sich analog zur Betrachtung bei reiner Gleichspannungsbelastung die höchste Beanspruchung im Ölspace ein (Bild 5.26). Die mit injizierten *Homocharges* aufgeladenen Papierbarrieren werden demnach entlastet.

Bild 5.26: Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit isolierten Elektroden im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung U_{DC0} bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$

Bei der unipolaren Überlagerung (Bild 5.27a) findet analog zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung nur eine geringfügige Injektion von zusätzlichen *Homocharges* statt (vgl. Bild A.5a). Der rasche Spannungsanstieg während der Überlagerung und damit die rasche Anhebung des Potentials der Hochspannungselektrode führt analog zur blanken Anordnung somit vorrangig zu einer Überlagerung der elektrischen Feldverteilung unter Raumladungseinfluss der Gleichspannungsvorbelastung aus Bild 5.26b und der durch das Verschiebungsfeld dominierten Feldverteilung bei reiner Stoßspannungsbelastung nach Bild 5.25b. Die

Feldstärke im Öl wird dabei stärker angehoben als in der Papierisolierung. Im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung werden somit höhere Feldstärken im Ölspace erreicht, was demnach zu geringeren Durchschlagsspannungen führen sollte. Im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ① werden jedoch leicht verringerte Maximalfeldstärken ermittelt. Aufgrund der stärkeren Injektion bei der reinen Gleichspannungsbelastung bei derselben resultierenden Spannungsbelastung erfolgt eine stärkere Aufladung der Papierbarrieren mit *Homocharges*, was demnach zu einer stärkeren Beanspruchung des Ölspace führt.

Bild 5.27: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit isolierten Elektroden bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung nach Bild 5.21

Bei der bipolaren Überlagerung findet somit ebenfalls eine Überlagerung der raumladungsbeeinflussten, elektrischen Feldverteilung und der Feldverteilung des Verschiebungsfeldes statt. Infolge des Polaritätswechsels der Elektroden findet nun analog zur blanken Anordnung ebenfalls nur eine geringfügige, zusätzliche Injektion von *Homocharges* statt (vgl. Bild A.5b). Die hohen Dichten an injizierten Ladungsträgern im Papier führen beim Polaritätswechsel nun jedoch zu einer signifikanten Erhöhung der Feldstärke im Papier an der Papier-Metall-Grenzfläche der Elektrode, da diese nun *Heterocharges* entgegengesetzter Polarität darstellen (Bild 5.27b). Aufgrund der bedeutend höheren Dichten an injizierten Ladungsträgern im Papier im Vergleich zu akkumulierten intrinsischen Ladungsträgern – welche beim Polaritätswechsel nun *Homocharges* darstellen – beeinflussen die intrinsischen Ladungsträger die Feldstärke an der Grenzfläche somit nur geringfügig. Die an der Papierbarriere akkumulierten injizierten Ladungsträger der Öl-Papier-Grenzfläche der Hochspannungselektrode bewirken nun eine leichte lokale Reduzierung der Feldstärke in diesem Gebiet. Aufgrund der Aufladung der Papierbarrieren erfährt auch beim Polaritätswechsel der bipolaren Überlagerung immer noch der Ölspace die größte Beanspruchung. Jedoch würden nun sowohl im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ① als auch zur unipolaren Überlagerung ② um ca. 10 % verringerte Maximalfeldstärken berechnet, was sich demnach in leicht erhöhten Durchschlagsspannungen zeigen sollte.

Führt man die Berechnungen zur überlagerten Spannungsbelastung auf Grundlage der klassischen Modellierung durch, welche nur die konstanten Leitfähigkeiten κ sowie die Permittivitäten ε der Isoliermedien berücksichtigt, findet demnach auch eine Überlagerung

des klassischen, stationären Strömungsfeldes unter Gleichspannungsbelastung mit dem elektrostatischen Verschiebungsfeld unter Blitzstoßspannungsbelastung statt. Dabei würde sich analog zur Betrachtung in Abschnitt 5.2.2 unter reiner Gleichspannungsbelastung ① eine Feldverteilung einstellen, die stark von den elektrischen Leitfähigkeiten der Dielektrika abhängig ist (Bild 5.28a). Es würde sich demnach im Öl eine um das Leitfähigkeitsverhältnis von 1:100 geringere Feldstärke einstellen als in der Papierisolierung. Bei der Gleichspannungsvorbelastung würde sich aufgrund der um 50 % verringerten Spannungsbelastung demnach ebenfalls eine um 50 % verringerte Feldstärkeverteilung einstellen (Bild 5.28b).

Bild 5.28: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden unter Gleich- und Mischspannungsbelastung nach Bild 5.21 auf Grundlage der klassischen, resistiv-kapazitiven Modellierung

Bei der unipolaren Überlagerung ②, d. h. der raschen Potentialanhebung der Hochspannungselektrode, erfolgt demnach eine Überlagerung der Feldverteilung der Vorbelastung mit dem Verschiebungsfeld der Stoßspannungsbelastung nach Bild 5.25b (Bild 5.28c). Dies hätte im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung eine erhöhte Beanspruchung des Ölspaltes zur Folge. Die analoge bipolare Überlagerung ④ der Gleichspannungsvorbelastung mit dem Blitzstoß, d. h. dem raschen Polaritätswechsel der Hochspannungselektrode, würde wiederum in einer noch stärkeren Beanspruchung des Ölspaltes resultieren (Bild 5.28d). Sowohl im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung als auch zur unipolaren Überlagerung würden im Ölspalt höhere Feldstärken ermittelt. Trotz der geringeren Feldstärken im Ölspalt im Vergleich zur Papierisolierung würde aufgrund der ge-

ringeren elektrischen Festigkeit des Isolieröls im Vergleich zum Isolierpapier der Ölspace nun am stärksten beansprucht. Beim Vergleich der drei Beanspruchungen würde demnach die Anordnung unter Mischspannungsbelastung am stärksten beansprucht werden und sich demnach die geringsten Durchschlagsspannungen unter Mischspannungsbelastung einstellen. Auch diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Berechnungen auf Grundlage des ladungsträgerbasierten Modells nach PNP.

Einfluss eines Ölspaltes zwischen Elektrode und Papierbarriere

Die Berechnungsergebnisse bei Gleichspannungsbelastung zeigen aufgrund der geringen Mobilitäten der Ladungsträger im Papier eine starke Aufladung der Papierbarrieren mit injizierten Ladungsträgern, welche somit dieselbe Polarität der angrenzenden, injizierenden Elektrode aufweisen. Wie spätere Beobachtungen während der Durchführung der Versuche zeigen, bewirkt diese Aufladung der Papierbarrieren auch eine nachweisbare Kraftwirkung auf die nur dünnen Papierbarrieren (vgl. Kapitel 6). Es ist daher nicht auszuschließen, dass die mit *Homocharges* gefluteten Papierbarrieren leicht von den angrenzenden Elektroden abgestoßen werden, was zur Ausbildung eines zusätzlichen, kleinen Ölspaltes zwischen Elektrode und Papierbarriere führen könnte.

Um die Auswirkungen dieses Effekts auf das Verhalten unter Mischspannungsbelastung abzuschätzen, wurden ebenfalls Berechnungen an der Anordnung mit isolierten Elektroden durchgeführt, in denen dieses Abstoßen der Papierbarrieren von den Elektroden nachgebildet wurde (Bild 5.29).

Bild 5.29: Im Berechnungsmodell zur Nachbildung des Abstoßens der Papierbarrieren von den Elektroden der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) hinterlegtes, eindimensionales Modell

Dazu wurde bei gleichbleibendem Elektrodenabstand ein Ölspalt mit einer beispielhaften Ölspaltweite von $s_{ab} = 0,1 \text{ mm}$ zwischen Elektrode und Papierbarriere eingefügt. Bei einer implementierten Papierdicke von je $b = 0,2 \text{ mm}$ entspricht dies einer resultierenden Ölspaltweite zwischen den Barrieren von $s_{B1-B2} = 2,8 \text{ mm}$. Die Gesamtölspaltweite von $s_{ges} = 3 \text{ mm}$ bzw. der resultierende Elektrodenabstand von $d = 3,4 \text{ mm}$ bleibt dabei identisch zur Anordnung mit isolierten Elektroden ohne zusätzlichem Ölspalt.

Ähnlich zur Anordnung mit eingeschobenen Papierbarrieren nach Abschnitt 5.2.3 zeigt sich, dass unter reiner Gleichspannungsbelastung die äußeren Ölspalte aufgrund der Flutung der Papierbarrieren mit *Homocharges* entlastet werden (Bild 5.30, vgl. Bild A.6). Unter Gleichspannungsvorbelastung bei U_{DC0} stellen sich im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ① entsprechend geringere Feldstärken ein.

Bild 5.30: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden und abgestoßenen Papierbarrieren im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung, bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ sowie der reinen Gleichspannungsbelastung $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$

Demnach erfährt auch die Anordnung mit isolierten Elektroden, aber leicht abgestoßenen Papierbarrieren unter Gleichspannungsbelastung eine ähnliche Beanspruchung wie die Anordnung mit isolierten Elektroden und anliegenden Barrieren. Aufgrund des zusätzlichen Ölspaltes zwischen Elektroden und Barriere und der somit verminderten Ölspaltweite $s_{\text{B1-B2}}$ zwischen den Papierbarrieren werden bei der Anordnung mit abgestoßenen Barrieren geringfügig höhere Feldstärken im mittleren Ölspalt berechnet. Das leichte Ablösen bzw. Abstoßen der Papierbarrieren von den Elektroden sollte sich unter Gleichspannungsbelastung jedoch nur geringfügig auf die Ergebnisse der Durchschlagversuche auswirken.

Da unter reiner Blitzstoßspannungsbelastung keine nennenswerte Raumladungsausbildung erwartet wird, sollten sich die Papierbarrieren demnach nicht von den Elektroden abstoßen. Da somit eine ähnliche Feldverteilung wie an der isolierten Anordnung in Bild 5.25b erwartet wird, wird dieser Effekt unter reiner Stoßspannungsbelastung nicht betrachtet. Ein infolge der Spannungssteigerung unter Stoßspannungsbelastung mögliches Abstoßen der Barrieren würde zwar zur Verringerung des eigentlichen Ölspaltes führen, hätte aber aufgrund des stark statistischen Charakters des Stoßspannungsdurchschlages nur geringe Auswirkungen auf die Durchschlagspannungen.

Betrachtet man die Berechnungsergebnisse bei Mischspannungsbelastung, zeigen sich bei der unipolaren Überlagerung nur minimale Unterschiede. Dabei würde ähnlich zur Belastung der Anordnung mit isolierten Elektroden eine Überlagerung des durch die Ladungsträger verursachten elektrischen Feldes der Gleichspannungsvorbelastung mit dem elektrischen Verschiebungsfeld der Stoßspannungsbelastung erfolgen. Dies resultiert ähnlich der vorangegangenen Betrachtungen zu einer Erhöhung der Feldstärke der Anordnung (Bild 5.31, vgl. Bild A.7a). Im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung werden dabei ähnlich zur Anordnung mit isolierten Elektroden (Bild 5.27a) bei der unipolaren Überlagerung geringere Maximalfeldstärken ermittelt.

Bild 5.31: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen bei unipolarer Mischspannungsbelastung ② nach Bild 5.21 der Anordnung mit abgestoßenen Papierbarrieren im Vergleich zur Anordnung mit isolierten Elektroden und anliegenden Barrieren nach Bild 5.27a

Jedoch zeigen sich insbesondere beim Polaritätswechsel der bipolaren Überlagerung deutliche Unterschiede zwischen der Anordnung mit isolierten Elektroden (Bild 5.27b) und der Anordnung mit abgestoßenen Barrieren (Bild 5.32). Die hohen Dichten an injizierten Ladungsträgern im Papier bzw. im Ölspace zwischen Elektrode und Papierbarriere verursachen bei der bipolaren Mischspannungsbelastung eine sehr starke Beanspruchung des Ölspace zwischen Elektrode und Barriere (vgl. Bild A.7b). Diese wirken während des raschen Polaritätswechsels nun als *Heteocharges*, welche in hoher Konzentration nun den Elektroden mit entgegengesetzter Polarität gegenüberstehen. Dies hat zur Folge, dass die äußeren Ölspace nun um das 1,5-fache stärker beansprucht werden als der mittlere Ölspace zwischen den Papierbarrieren. Der Entladungseinsatz würde demnach in dem schmalen Ölspace zwischen Elektrode und Papier stattfinden und aufgrund der dünnen Papierbarrieren sofort zum Durchschlag der Anordnung führen.

Bild 5.32: Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen bei bipolarer Mischspannungsbelastung ④ nach Bild 5.21 der Anordnung mit abgestoßenen Papierbarrieren im Vergleich zur Anordnung mit isolierten Elektroden und anliegenden Papierbarrieren nach Bild 5.27b

Bei der bipolaren Überlagerung werden somit aufgrund der starken Feldüberhöhung im äußeren Ölspace sowohl im Vergleich zur unipolaren Mischspannungsbelastung als auch zur reinen Gleichspannungsbelastung bedeutend höhere Maximalfeldstärken ermittelt. Damit würde sich aufgrund des Polaritätswechsels eine bedeutend stärkere Beanspruchung der Anordnung einstellen als bei der reinen Gleichspannungsbelastung oder der unipolaren Überlagerung. Vor allem im Vergleich zur Anordnung mit isolierten Elektroden und anliegenden Papierbarrieren wird die Anordnung demnach bedeutend stärker beansprucht. Sollten die Papierbarrieren aufgrund deren starker Aufladung von den Elektroden abgestoßen werden, würde dies vor allem beim Polaritätswechsel der bipolaren Mischspannungsbelastung zu einem bedeutend geringeren Isoliervermögen der Anordnung führen. Verminderte Durchschlagspannungen sowohl im Vergleich zur unipolaren Überlagerung als auch zur reinen Gleichspannungsbelastung wären die Folge.

6 Experimentelle Untersuchungen

Das dielektrische Verhalten der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Öl- und Öl-Papier-isolierten Anordnungen soll mithilfe von Durchschlagexperimenten sowohl unter reiner Gleichspannungsbelastung als auch unter Mischspannungsbelastung genauer untersucht werden. Dabei galt es u. a., den aus der Literatur bekannten Einfluss des umgebenden Ölvolumens zu untersuchen und zu verstehen. Des Weiteren soll der Einfluss der Ladungsträgerakkumulation und deren Auswirkungen an den in Abschnitt 4.1 vorgestellten Öl-Papier-isolierten Anordnungen untersucht werden. Wie bereits an den Berechnungen in Kapitel 5 gezeigt, wirkt sich die Akkumulation von Ladungsträgern in Papierbarrieren sehr stark auf die Feldstärkeverteilung innerhalb des Isoliersystems aus. Weiterhin sollte sich an unsymmetrischen Anordnungen ein Polaritätseffekt infolge des polaritätsabhängigen Injektionsverhalten der Ladungsträger einstellen.

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen sollen daher mit den Ergebnissen der Durchschlagversuche an den in Abschnitt 4.1 vorgestellten, identischen Anordnungen verglichen deren Anwendbarkeit überprüft werden. Die in den Berechnungen hinterlegten Parameter konnten aufgrund deren Komplexität nicht direkt bestimmt oder aufgrund deren Unsicherheiten in der Literatur nur bedingt implementiert werden. Da sie nach [Bac-16a] aus dem Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur oder aus Messungen abgeschätzt wurden, soll vorrangig ein qualitativer Vergleich der Ergebnisse erfolgen. Eventuell auftretende Einflüsse oder die Unsicherheiten in den implementierten Parametern wurden dabei in Abschnitt 5.2.1 untersucht und sollen beim weiteren Vergleich zur Verbesserung des Verständnisses der auftretenden Phänomene dienen.

Um die im Betrieb der Stromrichtertransformatoren auftretenden Belastungen des Isoliersystems nachzubilden, sind entsprechend der Berechnungen anhand des ladungsträgerbasierten Modells die Versuche sowohl bei der reinen, stationären Gleichspannungsbelastung als auch bei einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus einer Gleichspannung im stationären Zustand mit einer überlagerten Blitzstoßspannung durchgeführt worden.

So sollen weitere Kenntnisse über das Verhalten der einzelnen Ladungsträgerspezies und deren Einfluss auf das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems des Stromrichtertransformators bei den im Betrieb auftretenden Belastungen erlangt werden.

6.1 Ergebnisse bei reiner Gleichspannungsbelastung

6.1.1 Einfluss des umgebenden Ölvolumens und der Spannungssteigerung

Wie bereits in den Abschnitten 2.3 und 5.2 gezeigt, wirkt sich die Akkumulation der Ladungsträger an Grenzflächen unmittelbar auf die Feldstärkeverteilung innerhalb eines Iso-

liersystems aus. Dies ist vor allem von den lokalen Teilchendichten und damit von der Menge an akkumulierten Ladungsträgern abhängig. Somit liegt nach Abschnitt 5.2.1 die Vermutung nahe, dass zusätzlich in eine Anordnung eingebrachte Ladungsträger – z. B. aus dem umgebenden Ölvolumen der Anordnung im Prüfgefäß – die Feldstärkeverteilung innerhalb einer Isolieranordnung und damit das Durchschlagverhalten beeinflussen.

Aus diesem Grund sind Durchschlagversuche an der planparallelen Elektrodenanordnung mit blanken Elektroden durchgeführt worden, welche zum einen offen im Prüfgefäß aufgestellt war. Zum anderen wurde die Anordnung mit einer Ringbarriere aus Transformerboard abgeschlossen (vgl. Abschnitt 4.1.2). Diese soll als mechanische Barriere dienen und verhindern, dass zusätzliche Ladungsträger aus dem äußeren Ölvolumen aufgrund der Ölbewegung während der Versuche bei Gleichspannungsbelastung aufgrund der elektrostatischen Drift der Ladungsträger in das Innere der Elektrodenanordnung gelangen können. Die Ölspaltweiten der Elektrodenanordnung wurden dabei zwischen $s = (3; 6; 10)$ mm variiert.

Der Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten Durchschlagversuche zeigt einen deutlichen Einfluss des umgebenden Ölvolumens auf das Isoliervermögen (Bild 6.1). So wurden für die untersuchten Elektrodenabstände an der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Plattenanordnung um bis zu 60 % höhere Durchschlagspannungen ermittelt als an der offenen Anordnung [Gab-16].

Bild 6.1: Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der offenen und der geschlossenen, blanken Anordnung mit Ergebnissen der blanken, gekreuzten Zylinder aus [Bac-16a] in Abhängigkeit der Ölspaltweite s nach [Gab-16], bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ RB}$ der blanken, mit Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölspaltweite von $s = 6$ mm

Ursache für dieses Verhalten ist der Einfluss der zusätzlich in die Anordnung eingebrachten Ladungsträger aus dem umgebenden Ölvolumen. Dies sind zum einen zusätzliche intrinsische Ladungsträger, die im gesamten Ölvolumen des Prüfgefäßes gebildet werden. Des Weiteren werden aber durch blanke Metallteile im Prüfgefäß wie die metallische Hochspannungszuleitung, die geerdete Grundplatte (vgl. Abschnitt 4.1) sowie die Seitenflächen und Rückseiten der Elektroden weitere Ladungsträger injiziert. Die aufgrund der Gleichspannungsbelastung auf die Ladungsträger wirkenden Feldkräfte bewirken die Drift der so zusätzlich vorhandenen Ladungsträger in die Anordnung (Bild 6.2). Ähnliche Einflüsse wurden ebenfalls bei einer nachgebildeten Ölströmung beobachtet, wie sie infolge der erzwungenen Konvektion zur Kühlung der Transformatoren auftritt [Sch-11].

Bild 6.2: Bewegung der Ladungsträger des umgebenden Ölvolumens ins Innere der offenen Elektrodenanordnung

Wie in den Abschnitten 2.3 und 5.2 gezeigt, ist der Einfluss der an der Öl-Elektroden-Grenzfläche akkumulierten intrinsischen *Heterocharges* hauptsächlich für die lokale Anhebung der Feldstärke in Elektrodennähe verantwortlich. Im Falle der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung tragen im Wesentlichen nur die im Ölvolumen innerhalb der Barriere dissoziierten intrinsischen und von den Elektroden injizierten Ladungsträger zu einer Beeinflussung der Feldstärkeverteilung bei. Bei der offenen Anordnung stehen jedoch die Ladungsträger aus dem gesamten Ölvolumen zur Verfügung. Wie in Abschnitt 5.2.1 gezeigt, bewirken die somit an den Elektroden akkumulierten, und aus dem äußeren Ölvolumen zusätzlichen *Heterocharges* jedoch eine weitere Erhöhung der Feldstärke an den Elektroden. Diese demnach höhere Beanspruchung des Öls der offenen Anordnung bewirkt eine signifikante Reduzierung der Durchschlagsspannung im Vergleich zur abgeschlossenen Anordnung. Aufgrund der nur leicht vergrößerten Elektrodenfläche der Anordnung aufgrund der fehlenden Ringbarriere ist ein Volumeneffekt nach [Küc-17] im klassischen Sinne auszuschließen. Ebenfalls kann auch ein Einfluss möglicher Feldüberhöhungen der inneren Elektrodenkanten zwischen Mess- und Schutzringelektrode nahezu ausgeschlossen werden. Entsprechend der Annahmen des ladungsträgerbasierten Modells wird angenommen, dass Feldüberhöhungen an diesen Kanten infolge der dadurch verstärkten Injektion von *Homocharges* wieder reduziert und vergleichmäßigt werden und somit das Durchschlagverhalten der Anordnung nicht beeinflussen. Auch die Beobachtungen im Laufe der Versuche bestätigen dies, da nach den Durchschlägen der offenen Anordnung erkennbare, leichte Fußpunkte nicht an diesen Kanten auftraten. Vielmehr spielt folglich das gesamte Ölvolumen innerhalb des Prüfgefäßes eine Rolle, wie bereits in [Zou-98] gezeigt wurde. Ein Volumeneffekt an dieser Anordnung lässt sich somit auf eine erhöhte Menge an

intrinsischen Ladungsträgern zurückführen (vgl. Bild 5.11), die die Feldstärke in den elektrodennahen Gebieten maßgeblich erhöht.

Dieser stark ausgeprägte Effekt des äußeren Ölvolumens der Anordnung ist mit der bisherigen, klassischen Modellierung, auch unter Berücksichtigung der feldstärkeabhängigen Leitfähigkeiten nicht erklärbar. Einflüsse aufgrund akkumulierter Ladungsträger, deren Konzentration wie gezeigt maßgeblich das Verhalten beeinflusst, können damit nicht abgebildet werden.

Bei den Ergebnissen der Durchschlagversuche tritt jedoch eine große Streuung der Messergebnisse auf. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen liefert [Bac-16a]. Dabei wurde gezeigt, dass die Maximalfeldstärke der Anordnung an der Öl-Elektroden-Grenzfläche bei sehr hohen Spannungen mit zunehmender Spannungsbelastung nur minimal zunimmt (Bild 6.3) [Hik-96, Bac-16a]. Die stetige, überproportionale Zunahme der Injektion von *Homo-charges* unter hohen Feldstärken wirkt dem Anstieg der Grundfeldstärke als Folge der Spannungssteigerung entgegen. Die Maximalfeldstärke im elektrodennahen Bereich nimmt bei weiteren Spannungssteigerung somit nur geringfügig zu. Die in Abschnitt 5.2 ermittelten Berechnungsergebnisse zeigen ein ähnliches Verhalten, können dieses aufgrund der vergleichsweise geringen, gewählten Spannungsbelastung jedoch nur bedingt abbilden. Aufgrund des Schwachstellendurchschlages des Isoliersystems ist es daher möglich, dass der Durchschlag bei unterschiedlichen Spannungsstufen einsetzt oder erst im späten Verlauf einer Spannungsstufe. Eine große Streuung der Durchschlagergebnisse ist die Folge.

Bild 6.3: Rechnerisch auf Basis des PNP-Modells sowie anhand der Geometrie ermittelte Randfeldstärke E_{Rand} an der Innenelektrode einer ölsolierten, koaxialen Zylinderanordnung abhängig von der Höhe der Gleichspannungsbelastung U_{DC} nach [Bac-16a]

Für die Beanspruchung eines Isoliersystems spielt jedoch nicht nur die reine Quantität an Ladungsträgern im System eine Rolle. Ebenso entscheidend ist, ob sich ein stationärer Zustand in der Ladungsträgerverteilung innerhalb einer Isolieranordnung einstellen konnte. Dabei ist nicht nur der Einfluss der verschiedenen Ladungsträgerspezies von Bedeutung. Weiterhin ist sowohl die Ladungsträgerinjektion, als auch eine mögliche Dissoziation von Ladungsträgern stark von der lokalen Feldstärke abhängig und mit unbekannten Zeitkonstanten verbunden. Ein Gleichgewicht zwischen feldstärkeanhebender Wirkung der *Hetero-charges*, der Injektion von *Homo-charges* und deren feldstärkesenkender Wirkung stellt sich

somit erst im stationären Zustand des Systems ein. Ist dies nicht erreicht, treten an den Elektroden einer blanken Anordnung aufgrund des somit stärkeren Einflusses der *Heterocharges* tendenziell höhere Feldstärken auf. Vor diesem Hintergrund war es demnach essentiell, dass die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche stets bei einer stufenförmig gesteigerten Spannung nach Erreichen eines stationären Zustandes durchgeführt wurden. Wird dies nicht beachtet, würden aufgrund einer möglichen höheren Beanspruchung des Systems im nicht-stationären Zustand vermeintlich geringere Durchschlagsspannungen ermittelt und das Isolationsvermögen der Anordnung anschließend falsch interpretiert.

Veranschaulichend zeigen dies die Ergebnisse einer blanken, gekreuzten Zylinderanordnung aus [Bac-16a] deren Durchschlagsspannungen im einfachen Spannungssteigerungsversuch mit konstanter Spannungssteigerungsgeschwindigkeit und rampenförmiger Spannungssteigerung bis zum Durchschlag ermittelt wurden (Bild 6.1 – Zylinder). Die Anordnung ist aufgrund der gewählten Geometrie mit einem hohen Homogenitätsgrad von $\eta \approx 0,9$ dabei trotzdem mit der homogenen Plattenanordnung vergleichbar. Bei einem geringen Elektrodenabstand von ca. 2 mm sind noch ähnliche Durchschlagsspannungen im Vergleich zur hier genutzten Plattenanordnung bei einer Ölspaltsweite von $s = 3$ mm ermittelt worden. Bei einem Elektrodenabstand von 10 mm sind bei der gekreuzten Zylinderanordnung jedoch deutlich geringere Durchschlagsspannungen ermittelt worden. Die um ca. 25 % verringerte Durchschlagsspannung ist demnach nicht gänzlich auf den geringeren Homogenitätsgrad zurückzuführen. Des Weiteren liegt die Ursache dieser Ergebnisse auch nicht allein am umgebenden Ölvolumen der Anordnung begründet. Im Vergleich zur gekreuzten Zylinderanordnung wäre der Einfluss akkumulierter Ladungsträger bei der Plattenanordnung aufgrund der größeren Oberfläche der Plattenelektroden bedeutend stärker ausgeprägt und geringere Durchschlagsspannungen wären die Folge. Jedoch sind an der Plattenanordnung höhere Durchschlagsspannungen ermittelt worden.

Der womöglich ausschlaggebende Faktor ist, dass sich bei der konstanten Spannungssteigerung an der Zylinderanordnung noch kein stationärer Zustand in Ladungsträgertransport, -akkumulation, -injektion und deren Rückwirkung auf die Feldstärkeverteilung einstellen konnte. Aufgrund der konstanten, rampenförmigen Spannungssteigerung können *Heterocharges* an den Elektroden akkumulieren. Jedoch werden zu diesem Zeitpunkt noch geringere Injektionsraten an *Homocharges* erreicht, was zu einer höheren Beanspruchung der elektrodennahen Gebiete im Ölspalt führt. Bei der genutzten Plattenanordnung konnte sich vor einer erneuten Spannungssteigerung stets ein stationärer Zustand einstellen. Durch das Gleichgewicht in der Injektion tritt somit eine geringere Beanspruchung des Ölspaltes auf, was zu den ermittelten höheren Durchschlagsspannungen führt. Dieser Effekt ist bei einem kleinen Elektrodenabstand schwächer ausgeprägt, was sich in den ähnlichen Durchschlagsspannungen widerspiegelt. Da angenommen wird, dass aufgrund der geringeren Feldstärken im Ölspalt weniger intrinsische Ladungsträger aus dem umgebenden Ölvolumen in die Anordnung gelangen können oder nur wenige Ölbestandteile dissoziiert sind. Aufgrund deren somit geringeren Einflusses auf die Feldstärkeverteilung innerhalb der Anordnung kann sich ein stationärer Zustand bedeutend eher einstellen und die Un-

terschiede zwischen stufenförmiger und konstanter Spannungssteigerung sind noch gering.

Die Darstellung der an der blanken, homogenen Anordnung während einer stufenförmigen Spannungssteigerung auftretenden Höchstfeldstärke, welche anhand des ladungsträgerbasierten Modells berechnet wurde, soll dieses Verhalten verdeutlichen (Bild 6.4). Die höchste, lokale Feldstärkebeanspruchung tritt dabei im elektrodennahen Bereich aufgrund der in Abschnitt 5.2.1 gezeigten Feldüberhöhung auf. Dabei wird zum einen deutlich, dass der Anstieg der Feldstärke im System der stufenförmigen Spannungssteigerung nur verzögert folgen kann. Ursache ist die Generation und Drift der Ladungsträger, welche erst nach einer gewissen Zeit einen Gleichgewichtszustand ausbilden kann. Somit stellt sich der stationäre Zustand in der Ladungsträger- und damit in der Feldstärkeverteilung erst im späten Verlauf einer Stufe der Spannungssteigerung ein. Besonders hervorzuheben ist jedoch, dass der stationäre Zustand der ersten Spannungsstufe erst auf ein temporäres Feldstärkemaximum folgt. Wiederum tritt bei der weiteren, stufenförmigen Spannungssteigerung nach dem Erreichen des stationären Zustandes der ersten Stufe kein weiteres Maximum mehr auf. Stattdessen stellt sich zeitlich verzögert direkt der stationäre Zustand ein. Zudem wird der in Bild 6.3 gezeigte Effekt deutlich, dass der Betrag der Höchstfeldstärke im System nicht mit der jeweiligen Spannung einer Stufe korreliert.

Bild 6.4: Darstellung des mithilfe des PNP-Modells berechneten, zeitabhängigen Betrags der maximalen Feldstärke $E_{\max}$ einer ölisierten Anordnung bezogen auf den Betrag der maximalen Feldstärke $E_{\max\text{stat}}$ im stationären Zustand der ersten Stufe für eine stufenförmige Spannungssteigerung

Im Umkehrschluss bedeutet dies in Bezug auf die in Bild 6.1 dargestellten Ergebnisse, dass sich in Abhängigkeit der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit im Spannungssteigerungsversuch höhere Feldstärken im System einstellen können, als sie bei einer stufenförmigen Spannungssteigerung auftreten. Die verzögerte Zunahme der Feldstärke während der fortwährenden, rampenförmigen Spannungssteigerung hat demnach eine höhere Beanspruchung des Isoliersystems zur Folge, als sie bei einer stufenförmigen Spannungssteigerung auftritt. Geringere, ermittelte Durchschlagspannungen während der rampenförmigen Spannungssteigerung sind die Folge, wie sie bei der Zylinderanordnung gemessen wurden.

Wie bereits in [Bac-16b] gezeigt wurde, wirkt sich der Einfluss der Ladungsträger aus dem umgebenden Ölvolumen auch auf den gemessenen Strom der Anordnung aus. Diese Erkenntnisse konnten auch in den eigenen Untersuchungen bestätigt werden [Gab-19b]. Ein Vergleich der ermittelten Stromverläufe an den offenen und abgeschlossenen Anordnungen zeigt nicht nur einen Unterschied des Stromes im stationären Zustand, auch die Verläufe des messbaren Stromes bis zum Erreichen des stationären Zustandes bei der angewandten, stufenförmigen Spannungssteigerung unterscheiden sich signifikant (Bild 6.5).

Bild 6.5: Exemplarischer Vergleich des an der offenen und der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung gemessenen Stromes I bezogen auf den stationären Strom $I_{0,75 \text{ stat offen}}$ der offenen Anordnung bei der 0,75-fachen Durchschlagsspannung nach [Gab-19b]

Bei der abgeschlossenen Anordnung zeigt sich, dass sich in der ersten Stufe der Spannungssteigerung nach dem anfänglichen Verschiebungsstrom bereits nach wenigen Minuten ein annähernd stationärer Strom einstellt (Bild 6.5 – mit Ringbarriere, nach ca. (5 ... 15) min). Somit wird bereits nach relativ kurzer Zeit ein stationärer Zustand von Ladungsträgerakkumulation und -injektion und damit in der Feldstärkeverteilung erreicht. Bei der weiteren, stufenförmigen Spannungssteigerung sind kaum noch abklingende Stromanteile messbar, da sich nur die nominelle Feldstärke an den Elektroden erhöht, was zu einer erhöhten Injektion und somit zu einer direkten Zunahme des Stromes führt (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Bei der offenen Anordnung jedoch wird nicht nur eine bedeutend größere Zeit bis zum Erreichen eines stationären Zustandes benötigt (Bild 6.5 – offen). Es zeigt sich nach dem abklingenden Stromanteil nach der ersten Spannungssteigerung zudem ein weiteres Maximum, wie es auch bei Polaritätswechseln zu beobachten ist [Bac-16a, Yan-12b]. Da dieses Verhalten bei der abgeschlossenen Anordnung nicht zu beobachten ist, muss die Ursache im Einfluss des umgebenden Ölvolumens begründet sein.

Wie bereits erläutert, können bei der offenen Anordnung die von Hilfselektroden injizierten Ladungsträger aus dem offenen Ölvolumen ins Innere der Elektrodenanordnung gelangen, welche aufgrund ihrer Quantität einen weiteren, überlagerten injizierten Stromanteil im gemessenen Stromverlauf verursachen. Des Weiteren bewirken die zusätzlichen intrinsischen Ladungsträger aufgrund ihres Einflusses auf die lokale Feldstärke an den Elektroden eine Erhöhung der Injektion. Diese kurzzeitig erhöhte Injektion nach der Anlagerung der zusätzlichen, „externen“ intrinsischen *Heterocharges* sorgt für den weiteren Anstieg des gemessenen Stromes nach dem ersten abklingenden Stromanteil (Bild 6.6 – offen, (2 ... 5) min).

Bild 6.6: Vergrößerung des Bereiches innerhalb der ersten 15 min des an der offen und der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung gemessenen Stromes I bezogen auf den stationären Strom $I_{0,75 \text{ stat offen}}$ der offenen Anordnung bei der 0,75-fachen Durchschlagsspannung aus Bild 6.5

Erst nachdem sich ein weiteres Mal nach dem Einfluss der Ladungsträger aus dem umgebenden Öl ein weiterer Gleichgewichtszustand eingestellt hat, nimmt der Strom wieder ab und verbleibt auf seinem stationären Wert der Spannungsstufe. Bei weiterer Spannungssteigerung können aufgrund der nun größeren, wirkenden elektrostatischen Feldkräfte auf die Ladungsträger des umgebenden Öls weitere Ladungsträger ins Innere der Anordnung gelangen. Dies führt dazu, dass nach der Spannungssteigerung in den weiteren Stufen ein erneutes, leichtes Abklingen des Stromes zu beobachten ist, bis sich erneut ein Gleichgewichtszustand und somit ein stationärer Strom aufgrund des reinen injizierten Stromanteils einstellt (Bild 6.5 – offen, > 60 min). Dieser abklingende Stromanteil ist jedoch bedeutend schwächer ausgeprägt. Sind alle dissoziierbaren Bestandteile des Öls in Form von intrinsischen Ladungsträgern im System gebildet, führt auch bei der offenen Anordnung eine weitere stufenförmige Spannungssteigerung bei höheren Spannungen zu einem stufenförmigen Anstieg des gemessenen Stromes. Auch hier stellen sich aufgrund der stufenförmig

gestiegenen, nominellen Feldstärke an den Elektroden höhere Injektionsraten ein, welche zu einem weiteren stufenförmigen Ansteigen des Stromes führen.

Neben den bisher beschriebenen Effekten des verringerten Isoliervermögens einer offenen Elektrodenanordnung in einem Prüfgefäß sowie dem Einfluss der Ladungsträger des umgebenden Ölvolumens auf den messbaren Strom einer Anordnung war ein weiterer Effekt sichtbar. Wie bereits in [Bac-16a] beschrieben, ist aufgrund der Ladungsträgerbewegung eine Bewegung des Öls im Prüfgefäß und ein Aufsteigen des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche der Hochspannungszuleitung um wenige Zentimeter direkt nach Anlegen der Prüfspannung beobachtbar (Bilder 6.7 und 6.8). Jedoch treten starke Unterschiede in dessen Intensität zwischen der offenen und der abgeschlossenen Anordnung auf. So ist das Aufsteigen bei der offenen Anordnung bedeutend stärker ausgeprägt als bei der abgeschlossenen Anordnung [Gab-16].

(a) Ausgangszustand

(b) Aufsteigen an offener Anordnung

(c) Absinken an offener Anordnung

(d) Aufsteigen an geschlossener Anordnung

(e) Absinken an geschlossener Anordnung

Bild 6.7: Aufsteigen und Absinken des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche der Hochspannungsdurchführung der offenen und der abgeschlossenen Anordnung unter Gleichspannungsbelastung

Elektrostatistische Kräfte führen zu einer Bewegung der Ladungsträger im Ölvolumen, was aufgrund deren Bindung mit Ölmolekülen ebenfalls zu einer Bewegung des Öls in der An-

ordnung führt [Bac-16a]. Die Akkumulation von intrinsischen Ladungsträgern an blanken Metallteilen infolge der elektrostatischen Adhäsion führt somit auch zu einer Bewegung des Öls dahin. Bereits benetzte Metallteile werden von den *Heterocharges* abgeschirmt, was dazu führt, dass intrinsische Ladungsträger gleicher Ladung zu noch nicht benetzten Metallteile hin driften. Diese Kräfte sind stark genug, um das Öl direkt nach der Spannungssteigerung mehrere Zentimeter an der Hochspannungszuführung aufsteigen zu lassen (Bilder 6.7b und 6.7d; ① in Bild 6.9). Die aufgrund der Akkumulation weiterer *Heterocharges* auch an diesen Stelle erhöhten Feldstärke führt zu einer weiteren Injektion von Ladungsträgern. Die dadurch injizierten Ladungsträger sorgen für eine Gegenbewegung des Öls von den Metallteilen weg und gelangen aufgrund ihrer Drift ebenfalls in die Anordnung zur entgegengesetzt geladenen Erdelektrode, was zur Erhöhung des gemessenen Stroms in den Bildern 6.5 und 6.6 (offen) beiträgt. Die Drift von injizierten Ladungsträgern zur Durchführung hin führt zu einer steten Bewegung des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche.

Bild 6.8: Schematisch dargestellter zeitlicher Verlauf des Aufstiegs und Absinkens des Öls aus Bild 6.7 in Bezug zum zeitlichen Verlauf der Spannungsstufe

Nach dem Aufsteigen des Öls beginnt der Ölstand an der Luft-Öl-Durchführung binnen mehrerer Minuten wieder abzusinken (Bilder 6.7c und 6.7e; ② in Bild 6.9). Da das Absinken des Ölstandes in etwa zeitlich mit dem Abklingen des zweiten Strommaximums und dem Erreichen des anschließenden stationären Zustands der offenen Anordnung korreliert, wird vermutet, dass deren Ursache in einer möglichen Rekombination von akkumulierten *Hetero Charges* mit injizierten *Homocharges* begründet liegt. Dies ist in den Berechnungen aufgrund deren Komplexität und den unbekannten Rekombinationsraten bisher zur Vereinfachung vernachlässigt worden. Bei einer Rekombination der intrinsischen Ladungsträger zu unpolaren Radikalen wirkt auf diese keine Kraft mehr, weshalb das Öl an der Luft-Öl-Grenzfläche der Zuleitung wieder abnimmt. Sind die dafür benötigten Teilchendichten an *Hetero-* und *Homocharges* im stationären Zustand zu gering, bleibt der Stand des aufgestiegenen Öls an der Grenzfläche konstant (Bilder 6.7c und 6.7e stellen ebenfalls den quasistationären Zustand dar).

Diese mögliche Rekombination von intrinsischen *Heterocharges* mit injizierten *Homocharges* würde demnach ebenfalls an den Elektroden der Anordnung stattfinden. Dies würde dazu führen, dass sich deren feldstärkeanhebende Wirkung reduziert, was ebenfalls zu einer Verringerung der Injektionsraten innerhalb der Anordnung und somit zu der gemessenen

Verringerung des Stromes der offenen Anordnung führt. In der abgeschlossenen Anordnung findet dieser Effekt bereits während des abklingenden Stromes statt und wäre nicht direkt messbar. Zudem werden die Rekombinationsraten aufgrund der geringeren Teilchendichten bedeutend kleiner sein, bedingt durch die verminderte Injektion in der abgeschlossenen Anordnung.

Bild 6.9: Bewegung des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche der Hochspannungsdurchführung mit negativer Polarität nach [Bac-16a]: ① Aufsteigen des Öls ② Absinken des Öls

6.1.2 Vergleich der Öl-Papier-isolierten Anordnungen

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Durchschlagversuche Öl-Papier-isolierter Anordnungen entsprechend der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Anordnungen verglichen werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse untereinander und mit den Berechnungsergebnissen sollen deren Ergebnisse überprüft und die ladungsträgerbasierte Modellierung verifiziert werden. Als Grundlage des Vergleichs sollen dabei die in Abschnitt 5.2.2 berechneten Maximalfeldstärken im Ölspace bzw. der Papierisolierung dienen (Bild 6.10). Dabei wird angenommen, dass das Überschreiten der elektrischen Festigkeit des Isoliermediums an den Orten der berechneten Maximalfeldstärken zum Durchschlag der Anordnung infolge des Schwachstellendurchschlages führt. Eine Entladungsentwicklung an den Orten der lokalen Feldstärkemaxima im Öl würde somit sofort zum Durchschlag des Ölspace und damit an den papierisolierten Anordnungen auch zum Durchschlag des dünnen Isolierpapiers führen.

Um eine Vergleichbarkeit der Versuche an den Öl-Papier-isolierten Anordnungen aufgrund des nicht zu vernachlässigenden Einflusses des umgebenden Ölvolumens auf die Feldstärkeverteilung im System gewährleisten zu können, sind die Versuche ausschließlich an der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung durchgeführt worden (vgl. Abschnitt 4.1). Andernfalls würde der gezeigte Einfluss der zusätzlich im System befindlichen Ladungsträger die Feldstärkeverteilung in einem unbekannten Maße verändern. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse wäre nicht mehr gegeben. Ein Vergleich mit weiteren Ergeb-

nissen an gekreuzten Zylindern aus [Bac-16a] soll dies im weiteren Verlauf belegen. Zum Vergleich der Ergebnisse mit der blanken Elektrodenanordnung (b-b) (Bild 6.1) wurden die Ölpaltweiten ebenfalls zwischen $s = (3 \dots 10)$ mm variiert. Vergleichende Ergebnisse wurden zudem an der reinen papierisolierten Anordnung mit nur einer (i-b) oder zwei Papierlagen (i-i) durchgeführt, was einer Ölpaltweite $s = 0$ mm entspricht.

Bild 6.10: Gegenüberstellung der in Abschnitt 5.2 berechneten Maximalfeldstärken $E_{\max}$ im Ölpalt bzw. im Isolierpapier bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der Öl-Papierisolierten Anordnungen mit einer Ölpaltweite von $s = 6$ mm

Der Vergleich der Ergebnisse der Durchschlagversuche (Bild 6.11) zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den Ergebnissen der Anordnung mit blanken Elektroden (b-b), der Anordnung mit papierisolierten Elektroden (i-i) sowie der Anordnung mit nur einer papierisolierten Elektrode und einer blanken Elektrode (i-b – hier: Anode isoliert). Die Ergebnisse der Durchschlagversuche zeigen, dass die Anordnung mit papierisolierten Elektroden (i-i) das größte Isoliervermögen aufweist. Wird hingegen nur eine der Elektroden mit einer Papierisolierung bedeckt (i-b), werden die geringsten Durchschlagspannungen gemessen, welche auch bedeutend geringer als die der blanken Anordnung (b-b) sind. [Gab-17]

Die Ergebnisse der Durchschlagversuche können die Ergebnisse der Berechnungen aus Abschnitt 5.2 somit qualitativ belegen (vgl. Bild 6.10). Dies zeigt sich nicht nur im Vergleich der papierisolierten Anordnungen mit der blanken Anordnung. Vor allem wird dies aber beim Vergleich der papierisolierten Anordnungen untereinander deutlich.

Anordnung mit isolierten Elektroden

An der Anordnung mit isolierter Hochspannungs- und Erdelektrode (i-i) wird anhand der um bis zu 30 % höheren Durchschlagspannungen deutlich, dass der Ölpalt zwischen den papierisolierten Elektroden im Vergleich zur blanken Anordnung entlastet wird, was in den bereits vorgestellten Berechnungen deutlich gemacht wurde (vgl. Abschnitt 5.2.2). Die unter der anliegenden Gleichspannungsbelastung injizierten *Homocharges* lagern sich im Papier vor den Elektroden an. Dadurch wird die Feldstärke im Papier reduziert und die Pa-

pierisolierung entlastet (vgl. Bild 5.14). Dies führt wiederum dazu, dass somit der Ölspace zwischen den Papierbarrieren die stärkste Belastung erfährt. Dies zeigt sich vor allem an der starken, Abhängigkeit der Durchschlagspannung der papierisolierten Anordnung von der Ölspaceweite. Die Durchschlagspannung nimmt in Annäherung nahezu linear mit einem abgeschätzten Anstieg von ca. 25 kV/mm zu, beginnend bei der Durchschlagspannung der reinen Papierisolierung bei $s = 0$ mm. Der Anstieg der Durchschlagspannung liegt demnach im Bereich der elektrischen Festigkeit technisch reinen Öls [Küc-17], was diese These weiter stützt.

Bild 6.11: Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der blanken Anordnung (b-b), der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) und der Anordnung mit einer isolierten und einer blanken Elektrode (i-b) nach [Gab-17] mit den abgeschätzten Ergebnissen einer klassischen Strömungsfeldberechnung der der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) auf Grundlage der Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit der Ölspaceweite s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\text{ mm RB}}$ der blanken, mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölspaceweite von $s = 6$ mm

Bei der Anordnung mit blanken Elektroden hingegen stellt sich aufgrund des Staus an *Heterocharges* an den Elektroden die gezeigte, starke Feldstärkeanhebung ein (vgl. Bild 5.6). Diese führt demnach zu einer stärkeren Belastung des Ölspace in der blanken Anordnung, was sich in den geringeren Durchschlagspannungen im Vergleich zur Anordnung mit isolierten Elektroden widerspiegelt. Zudem treten diese starken Feldstärkeüberhöhungen im Ölspace der papierisolierten Anordnung nicht auf. Bei geringen Ölspaceweiten von $s = 3$ mm stellen sich bei beiden Anordnungen ähnliche Durchschlagspannungen ein. Dies zeigt, dass bei den kleinen Ölspaceweiten weniger intrinsische Ladungsträger vorhanden sind, welche bei der blanken Anordnung als *Heterocharges* die Feldstärke an den Elektroden erhöhen.

Betrachtet man die gut sichtbaren Durchschlagspuren in der Papierisolierung der Anordnung mit isolierten Elektroden, wird dieses Verhalten ebenfalls deutlich. Die Aufwerfungen im Papier infolge des Durchschlages waren stets in Richtung der Elektroden gerichtet, weshalb der Entladungseinsatz im Öl stattgefunden haben muss (Bild 6.12).

Bild 6.12: Richtung der Durchschlagspuren im Papier der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i)

Die starke Aufladung der Papierbarrieren mit injizierten Ladungsträgern zeigt sich weiterhin auch nach den durchgeführten Durchschlagversuchen. Nach dem Entfernen der Papierbarrieren aus der Anordnung waren diese noch sehr stark elektrostatisch aufgeladen. Ein Einfluss auf die Durchschlagversuche aufgrund der elektrostatischen Anziehung der Barrieren wird jedoch nicht vermutet. Durch die kleine Elektrodenfläche und das Einspannen des Papiers zwischen der Elektrode und der Ringbarriere wird nur eine geringfügige Bewegung des Papiers und somit keine nennenswerte Änderung der Ölsaltweite zwischen den Papierschichten erwartet.

Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Berechnungen anhand der klassischen Modellierung auf Basis des Strömungsfeldes und der dabei wirkenden Leitfähigkeiten κ unzureichende Ergebnisse liefern würden (Bild 6.11). Zum Vergleich wurden die erwarteten Durchschlagspannungen für die untersuchten Ölsaltweiten aus den bei einem Ölsalt von $s = 0$ mm, d. h. aus den an der reinen Papierisolierung ermittelten Durchschlagspannungen aufbauend auf den Berechnungsergebnissen der Strömungsfeldberechnung (vgl. Bild 5.17a) abgeschätzt. Bei der papierisolierten Anordnung (i-i) würde die größte Beanspruchung in den Papierschichten berechnet (vgl. Bild 5.17). Im Vergleich zur Durchschlagspannung der reinen papierisolierten Anordnung bei einer Ölsaltweite von $s = 0$ mm würden die Durchschlagspannungen beim Vergrößern des Ölsaltes jedoch nur minimal ansteigen. Aufgrund der nur sehr dünnen Papierschichten würden zudem vor allem bei größeren Ölsaltweiten bedeutend geringere Durchschlagspannung im Vergleich zur blanken Anordnung erwartet. Die dielektrische Modellierungen des Öl-Papier-Isoliersystems zur Dimensionierung von technischen Anordnungen allein anhand der klassischen Strömungsfeldberechnung würde somit eine zu konservative Auslegung des Isoliersystems zur Folge haben.

Anordnung mit einer papierisolierten und einer blanken Elektrode

Vergleicht man die Ergebnisse der Durchschlagversuche der papierisolierten Anordnung (i-i) sowie der blanken (b-b) mit denen der Anordnung mit nur einer isolierten und einer blanken Elektrode (i-b), wird der Einfluss akkumulierten Ladungsträger auf die Feldstärkeverteilung im System noch deutlicher (vgl. Bild 6.11). Wie in Bild 5.16 gezeigt, stauen sich die aus der blanken Elektrode injizierten Ladungsträger vor der eingebrachten Papierbarriere. Diese wirken vor der isolierten Elektrode nun als *Heterocharges* und erhöhen die Feldstärke an der Öl-Papier-Grenzfläche. Die Feldstärkeanhebung aufgrund der angestauten, injizierten Ladungsträger vor der Papierbarriere ist jedoch um ein vielfaches höher als die von den intrinsischen *Heterocharges* verursachte Feldstärkeanhebung an den Elektroden der blanken Anordnung. Somit erfährt die Anordnung mit nur einer isolierten und einer blanken Elektrode sowohl im Vergleich zur beidseitig papierisolierten Anordnung (i-i), als auch zur blanken Anordnung die höchste Beanspruchung (vgl. Bild 6.10), was zu einer um bis zu 50 % verringerten Durchschlagfestigkeit der Anordnung führt [Gab-17]. Aufgrund der hohen Feldstärken im Staugebiet vor der Papierbarriere erfolgt hier eine starke Überbeanspruchung des Isolieröls. Daher wird angenommen, dass trotz der z. T. höheren Feldstärken in der Papierisolierung die Entladung zum Durchschlag in diesem hoch beanspruchten Gebiet im Ölspace aufgrund der um ein Vielfaches geringeren elektrischen Festigkeit des Isolieröls einsetzt.

Die erzielten Ergebnisse der Durchschlagversuche bestätigen damit qualitativ die Annahmen anhand der vorstellten Berechnungen auf Basis des PNP-Modells und somit die Gültigkeit der ladungsträgerbasierten Modellvorstellung an diesen Anordnungen. Vor allem die großen Differenzen zwischen den Durchschlagspannungen der papierisolierten Anordnung (i-i), der einseitig isolierten Anordnung (i-b) und der blanken Anordnung (b-b) machen deutlich, dass die klassische Abschätzung der Belastung der Anordnungen anhand des stationären Strömungsfeldes zu unzureichenden Ergebnissen führt. Demnach würden sich für beide Anordnungen ähnliche Anstiege der ermittelten Durchschlagkennlinien mit Differenzen der Durchschlagspannung des reinen Papiers ($s = 0$ mm) einstellen, da aufgrund der um ein Vielfaches stärkeren Beanspruchung des Papiers die Entladung zum Durchschlag stets in der Papierisolierung einsetzen würde. Ein weiteres Indiz für die im Vergleich zur klassischen Modellierung gültigen Annahmen des ladungsträgerbasierten Modells sollen im Weiteren an modifizierten Varianten der eben vorgestellten Anordnungen veranschaulicht werden (vgl. Abschnitte 6.1.3 und 6.1.4).

Vergleich der Ergebnisse der Plattenanordnung mit einer offenen Anordnung mit gekreuzten Zylindern

Vergleicht man zusätzlich die eben vorgestellten Ergebnisse der abgeschlossenen Plattenanordnungen mit denen der in [Bac-16a] vorgestellten Versuche an gekreuzten Zylinderelektroden mit ähnlichen Anordnungen der Papierisolierungen, werden weitere Unterschiede deutlich (Bild 6.13). Die an der gekreuzten Zylinderanordnung ermittelten Durchschlagspannungen sind nicht nur geringer als die gezeigten Ergebnisse der jeweiligen, abgeschlossenen Plattenanordnung. Es stellt sich zudem ein gänzlich anderes Verhalten der

Anordnung mit zwei isolierten Elektroden (i-i) im Vergleich zur Anordnung mit nur einer isolierten Elektrode (i-b) ein. So werden im Gegensatz zur abgeschlossenen Plattenanordnung bei der Zylinderanordnung mit zwei isolierten Elektroden (i-i) noch geringere Durchschlagspannungen gemessen, als sie bei der Anordnung mit nur einer isolierten Zylinderelektrode (i-b) ermittelt wurden [Gab-16].

Bild 6.13: Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der blanken Anordnung (b-b), der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) und der Anordnung mit einer isolierten und einer blanken Elektrode (i-b) nach [Gab-16] in Abhängigkeit der Ölschichtdicke s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ RB}$ der blanken, mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölschichtdicke von $s = 6\ mm$; Vergleich zwischen der abgeschlossenen Plattenanordnung und der gekreuzten Zylinderanordnung aus [Bac-16a]

Ursache für dieses sowohl im Vergleich zu den Ergebnissen der Plattenanordnung als auch zu den Berechnungsergebnissen aus Abschnitt 5.2.2 widersprüchliche Verhalten der Zylinderanordnung kann in zwei Sachverhalten begründet sein:

- 1) Dem gezeigten Einfluss der Ladungsträger des gesamten Ölvolumens auf die elektrische Feldstärkeverteilung im Ölschicht zwischen den Zylinderelektroden sowie
- 2) Dem noch nicht erreichten, stationären Zustand in der Feldverteilung der Anordnung aufgrund der rampenförmigen Spannungssteigerung

Wie bereits erwähnt, können die Ladungsträger des gesamten Ölvolumens im Prüfgefäß die Feldstärkeverteilung beeinflussen. Dies ist nicht nur bei der offenen Plattenanordnung möglich, sondern ebenfalls bei der gekreuzten Zylinderanordnung, deren Untersuchungen ebenfalls im verwendeten Prüfgefäß mit gleichen Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden. Der Vergleich der blanken Anordnungen erfolgte dabei bereits in Abschnitt 6.1.1. Bei den papierisolierten Zylinderanordnungen zeigt sich der erwähnte Einfluss besonders bei der Anordnung mit papierisolierter Hochspannungs- und Erdelektrode (i-i), bei der die

geringsten Durchschlagsspannungen gemessen wurden. Aufgrund des offenen Ölvolumens um die zylindrische Elektrodenanordnung können wie in Abschnitt 6.1.1 gezeigt sowohl zusätzliche intrinsische als auch an weiteren blanken Metallteilen im Prüfgefäß injizierte Ladungsträger in die Elektrodenanordnung gelangen. Aufgrund der stetig in hohen Konzentrationen eingebrachten, zusätzlich injizierten Ladungsträger können sich diese nun auch vor den Papierbarrieren an beiden Elektroden stauen. In Analogie zur Anordnung mit nur einer papierisolierten Elektrode führt diese Akkumulation von injizierten *Heterocharges* nun zu einer signifikanten Erhöhung der Feldstärke an der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Elektroden. Das in Abschnitt 5.2.2 gezeigte Vergleichmäßigen der Feldstärke, wie bei der papierisolierten Plattenanordnung (i-i) auftritt, bleibt somit aus. Folglich werden an der papierisolierten Zylinderanordnung (i-i) niedrige Durchschlagsspannungen im Vergleich zur blanken Zylinderanordnung (b-b) gemessen. An der zylindrischen Elektrodenanordnung führt dies sogar zu einer weiteren Verringerung der Durchschlagsspannung im Vergleich zur Anordnung mit nur einer isolierten Elektrode (i-b).

Eine weitere Ursache kann weiterhin im nicht erreichten stationären Zustand in der Feldstärkeverteilung der zylindrischen Anordnung begründet sein. Aufgrund der im SSV mit konstanter Spannungssteigerungsgeschwindigkeit durchgeführten Untersuchungen aus [Bac-16a] kann die Drift der Ladungsträger und der noch nicht erreichte stationäre Zustand der Anordnungen analog zu Bild 6.4 zu einer erhöhten Beanspruchung im Vergleich zum stationären Zustand führen. Des Weiteren konnte sich an der isolierten Anordnung (i-i) in der Papierisolierung der Elektroden noch keine ausreichend hohe Dichte an akkumulierten injizierten Ladungsträgern ausbilden. Diese ist, wie in den Bildern 5.13 und 5.14 gezeigt, jedoch notwendig, um die Feldstärke im Ölspace ausreichend zu vergleichmäßigen und so die Beanspruchung der Anordnung im Vergleich zur Anordnung mit nur einer isolierten Anordnung zu reduzieren.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Öl-Papier-isolierten Plattenanordnung im Vergleich zur gekreuzten Zylinderanordnung aus [Bac-16a] liegen somit nur untergeordnet im geringeren Homogenitätsgrad der Zylinderanordnung begründet. Einen wesentlichen Einfluss hat hingegen der nicht erreichte stationäre Zustand in der Feldstärkeverteilung der Zylinderanordnung. Zudem wirkt sich der Einfluss der Ladungsträger des gesamten Ölvolumens der zylindrischen Anordnung auf die Beanspruchung aus, welche die Feldstärkeverteilungen der Anordnungen in großem Maße beeinflussen können. Dies führt sowohl zu den z. T. weit geringeren Durchschlagsspannungen im Vergleich zur Plattenanordnung als auch zu den scheinbar widersprüchlichen Ergebnissen im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen des ladungsträgerbasierten Modells.

6.1.3 Einfluss eines Ölspaltes zwischen Elektrode und Papierisolierung

Um die Ergebnisse des PNP-Berechnungsmodells weiter zu überprüfen, sind ergänzende Versuche mit eingeschobenen Papierbarrieren und blanken Elektroden und somit drei Ölspalten durchgeführt worden (vgl. Bilder 6.14 und 4.1) [Gab-17]. Wie in den Berechnungen in Abschnitt 5.2 gezeigt wurde, wird der mittlere Ölspalt zwischen den Barrieren am stärksten beansprucht, wogegen die äußeren Ölspalte zwischen den blanken Elektroden und

den eingeschobenen Barrieren mit *Homocharges* geflutet und folglich dielektrisch entlastet werden. Somit sind in Abhängigkeit des Elektrodenabstandes Durchschlagspannungen zu erwarten, welche maßgeblich von der Größe des inneren Ölspaltes bestimmt werden und von der Größe der äußeren Ölspalte nahezu unbeeinflusst sind.

Bild 6.14: Vereinfachte, schematische Darstellung der Anordnung mit parallel eingeschobenen Barrieren und blanken Elektroden mit eingestellten Ölspalteiten

Um diese Einflüsse zu zeigen, wurden an der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren Versuche durchgeführt, bei denen die einzelnen Ölspalteiten zum einen derart verändert wurden, dass sich in allen Ölspalten identische Ölspalteiten ergeben (Anordnung 1; 2). Zum anderen wurde nur die Größe der äußeren Ölspalte variiert, die Ölspalteite zwischen den eingeschobenen Barrieren jedoch nicht verändert (Anordnungen 2; 3 – vgl. Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Genutzte Ölspalteiten in den Durchschlagversuchen der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren nach Bild 6.14 und 4.1

Anordnung	s_{ges}	$s_{\text{ERD-B1}}$	$s_{\text{B1-B2}}$	$s_{\text{B2-HS}}$
eingeschobene Barrieren 1	3 mm	1 mm	1 mm	1 mm
eingeschobene Barrieren 2	9 mm	3 mm	3 mm	3 mm
eingeschobene Barrieren 3	5 mm	1 mm	3 mm	1 mm

Die Ergebnisse der Anordnungen 1 und 2 mit eingeschobenen Barrieren zeigen analog zu den Anordnungen mit papierisolierten Elektroden (i-i), dass die Durchschlagspannungen ebenfalls mit zunehmendem Elektrodenabstand und somit zunehmendem Ölspalt s_{gesamt} stark zunehmen (Bild 6.15). Dies deutet erneut darauf hin, dass die Durchschlagspannungen stark von der im Ölspalt vorherrschenden Feldstärke bestimmt werden, wie es anhand der ladungsträgerbasierten Modellierung aus Abschnitt 5.2 erwartet wurde. Jedoch zeigt sich an den Anordnungen entsprechend der Erwartungen aus Abschnitt 5.2.3 auch, dass die Durchschlagspannungen stark vom mittleren Ölspalt $s_{\text{B1-B2}}$ bestimmt werden. So unterscheiden sich die Durchschlagspannungen der Anordnungen 2 und 3 mit einem mittleren Ölspalt von jeweils $s_{\text{B1-B2}} = 3 \text{ mm}$ kaum voneinander, obwohl die äußeren Ölspalte der Anordnung 3 stark verringert wurden. [Gab-17]

Bild 6.15: Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der Anordnung mit blanken Elektroden und zwei parallel eingeschobenen Papierbarrieren mit denen der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) in Abhängigkeit der Ölspaltsweite s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ offen}$ der blanken, offenen Anordnung bei einer Ölspaltsweite von $s = 6\ mm$

Auch hier zeigte sich im Anschluss an die Versuche, dass die mit Ladungsträgern gefluteten und somit statisch aufgeladenen Barrieren durch die wirkenden elektrostatischen Kräfte leicht aneinander angezogen werden (vgl. Abschnitt 5.3.2). Dies kann zu einer leichten Reduzierung des mittleren Ölspaltes geführt haben, was eine Ursache für die trotzdem starke Streuung der Ergebnisse sein kann. Aufgrund der starken Abhängigkeit zur Größe des mittleren Ölspalts könnte eine solche Variation des mittleren Spalts somit die ermittelte Streuung der Durchschlagspannungen der untersuchten Anordnungen um ca. 10 % verursachen.

Des Weiteren bestätigen diese Ergebnisse die Annahmen des ladungsträgerbasierten Modells, da die eingeschobenen Barrieren ähnlich der vollständig isolierten Anordnung (i-i) mit Ladungsträgern geflutet sind, die äußeren Ölspalte folglich entlastet werden und somit das Isoliervermögen der Anordnung kaum beeinflussen. Die größte Beanspruchung stellt sich demnach im mittleren Ölspalt ein, der nun maßgeblich das Isoliervermögen der Anordnung bestimmt (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Auch die Ausprägung der Durchschlagspuren im Papier bestätigt diese Annahmen. So zeigte sich bei allen Versuchen der Anordnungen mit eingeschobenen Barrieren, dass die Durchschlagspuren stets vom mittleren Ölspalt weg und zu den blanken Elektroden – und somit zu den äußeren Ölspalten – hin gerichtet waren (Bild 6.16). Dies lässt ebenfalls darauf schließen, dass der Entladungseinsatz zum Durchschlag im mittleren Ölspalt aufgrund der dort bedeutend höheren Feldstärken erfolgte. Dieser führt in der Folge sofort zum Durchschlag der Papierbarrieren und anschließend zum Durchschlag der äußeren Ölspal-

te. Es wird daher angenommen, dass unter Verwendung von stärkeren Papierbarrieren im mittleren Ölspace Teilentladungen infolge des Durchschlages des mittleren Ölspace auftreten werden, die aufgrund des starken, dielektrisch festen Papiers jedoch nicht zum Durchschlag der Anordnung führen würden.

Bild 6.16: Richtung der Durchschlagspuren im Papier der Anordnung mit eingeschobenen Elektroden

Jedoch zeigen die Ergebnisse im Vergleich zu denen der vollständig isolierten Anordnung bei einem 3-mm-Ölspace auch, dass die äußeren Ölspace nicht vollständig entlastet werden, wie es die Berechnungen zunächst vermuten lassen. Würden die äußeren Ölspace entsprechend der Berechnungen vollständig entlastet werden, sollten sich für die Anordnungen 2 und 3 mit einem mittleren Ölspace von $s_{B1-B2} = 3 \text{ mm}$ ähnliche Durchschlagsspannungen ergeben wie für die vollständig isolierte Anordnung (i-i) mit 3-mm-Ölspace. Allerdings sind bei den Anordnungen 2 und 3 mit eingeschobenen Barrieren höhere Durchschlagsspannungen gemessen worden. Dies lässt darauf schließen, dass im mittleren Ölspace der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren geringere Maximalfeldstärken als bei der vollständig isolierten Anordnung mit vergleichbarem Ölspace auftreten. Somit müssen sich auch in den äußeren Ölspace vor den blanken Barrieren höhere Feldstärken einstellen, als zunächst berechnet wurden.

6.1.4 Auswirkungen des polaritätsabhängigen Injektionsverhaltens an unsymmetrischen Anordnungen

Wie bereits in den Berechnungen in Abschnitt 5.2.4 gezeigt wurde, wird auch an der unsymmetrischen, einseitig isolierten Anordnung (i-b) infolge der unterschiedlichen Injektionsraten aus Kathode und Anode [Bac-16a, Bac-16b] ein Polaritätseffekt der Durchschlagsspannungen erwartet. Ergänzend zu den bereits vorgestellten Ergebnissen (vgl. Bild 6.11) mit papierisolierter Anode und blanker Kathode sind daher weitere Versuche mit papierisolierter Kathode und blanker Anode durchgeführt worden (Bild 6.17).

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass sich der aus den Berechnungen gezeigte Polaritätseffekt im Injektionsverhalten ebenfalls auf die Beanspruchung dieser homogenen, aber unsymmetrischen Plattenanordnung auswirkt. Entsprechend der Erwartungen sind bei den Anordnungen mit isolierter Kathode höhere Durchschlagsspannungen gemessen worden [Gab-17]. Die Durchschlagsspannungen der Anordnungen mit isolierter Kathode

mit 3- und 10-mm-Ölspalt sind im Vergleich zu den Anordnungen mit isolierter Anode um ca. (10... 20) % erhöht, bei der Anordnung mit 6-mm-Ölspalt wurden sogar um ca. 45 % erhöhte Durchschlagspannungen gemessen. Die höheren Raten der aus der blanken Kathode injizierten Elektronen im Vergleich zu den aus der blanken Anode injizierten Löchern bewirken höhere Maximalfeldstärken im Staugebiet vor der isolierten Anode im Vergleich zur isolierten Kathode und demnach eine höhere Beanspruchung des Ölspalts der Anordnung mit isolierter Anode (vgl. Bild 6.10). Das gemessene, verminderte Isoliervermögen der Anordnung mit isolierter Anode ist die Folge.

Bild 6.17: Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der Anordnung mit isolierter Anode, isolierter Kathode und je einer blanken Elektrode (i-b) nach [Gab-17] in Abhängigkeit der Ölspaltweite s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ RB}$ der blanken, mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölspaltweite von $s = 6\ mm$

Auch an dieser unsymmetrischen Anordnung konnten die Ergebnisse des Berechnungsmodells mithilfe der Durchschlagversuche verifiziert werden. Die Auswirkungen der hinterlegten, aus der Literatur bekannten Parameter zum Injektionsverhalten konnten demnach die Auswirkungen des auftretenden Polaritätseffekts qualitativ korrekt abbilden. Die Berechnungen in Abschnitt 5.2.4 zeigen an der Anordnung mit isolierter Anode eine um ca. 30 % erhöhte, maximale Feldstärkebeanspruchung des Ölspaltes der Anordnung, was qualitativ eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen liefert.

6.2 Ergebnisse bei Mischspannungsbelastung

Die gezeigten Ergebnisse der Versuche unter reiner Gleichspannungsbelastung konnten bereits die Ergebnisse der numerischen Berechnungen anhand der ladungsträgerbasierten Modellvorstellung qualitativ bestätigen. Um das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems

nun auch bei der überlagerten Spannungsbelastung zu untersuchen, sind an den zwei Grundanordnungen mit blanken Elektroden (b-b) und mit isolierten Elektroden (i-i) nach Abschnitt 4.1 Durchschlagversuche bei einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus einer Gleichspannung im stationären Zustand mit einer überlagerten Blitzstoßspannung durchgeführt worden. Vor dem Hintergrund einer der Betriebsspannung überlagerten, transienten Spannungsbelastung des Isoliersystems der Stromrichtertransformatoren soll zum einen grundlegend untersucht werden, wie sich ein unipolar oder bipolar überlagerter Blitzstoß auf das Isoliervermögen der mit einer stationären Gleichspannung vorbelasteten Anordnungen auswirkt.

Dazu werden die Ergebnisse bei der zusammengesetzten Spannungsbelastung mit den Ergebnissen sowohl bei reiner Gleichspannungsbelastung aus Abschnitt 6.1 als auch bei reiner Blitzstoßspannung verglichen. Die Versuche sind dabei stets bei einer festgelegten Ölspaltweite von $s = 3 \text{ mm}$ durchgeführt worden. Um zudem die Anwendbarkeit und damit die Gültigkeit des ladungsträgerbasierten PNP-Berechnungsmodells auch für die zusammengesetzte Spannungsbelastung zu überprüfen, werden die gezeigten Ergebnisse der numerischen Berechnungen (vgl. Abschnitt 5.3) ebenfalls mit den Ergebnissen der Durchschlagversuche verglichen.

6.2.1 Verhalten des Einstoffsystems mit blanken Elektroden

Wie bereits in Abschnitt 6.1.1 gezeigt, wirken sich die im gesamtem Ölvolumen des Prüfgefäßes vorhandenen Ladungsträger auf das dielektrische Verhalten und somit auch auf das Isoliervermögen der darin untersuchten Elektrodenanordnung aus. Es ist daher davon auszugehen, dass sich bei den Versuchen unter einer Mischspannungsbelastung ebenfalls ein derartiger Einfluss einstellen könnte. Demnach beeinflussen die während der Vorbelastung unter Gleichspannung akkumulierten, intrinsischen *Heterocharges* und injizierten *Homocharges* die Feldstärkeverteilung während der Gleichspannungsvorbelastung (vgl. Abschnitt 5.3). Es galt daher ebenfalls zu untersuchen, ob sich ein derartiger Einfluss auch bei der anschließenden Überlagerung mit einem Blitzstoß einstellt. Aus diesem Grund sind die Versuche bei allen untersuchten Spannungsbelastungen analog zu Abschnitt 6.1.1 sowohl an der mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung (Bild 4.4) als auch auszugsweise an der offenen Anordnung durchgeführt worden. Aufgrund der sehr kleinen Zeitkonstanten ist bei einer reinen Blitzstoßspannungsbelastung kein Einfluss zu erwarten.

Als Grundlage des Vergleichs der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen dienen die in Abschnitt 5.3.1 ermittelten Feldstärkeverteilungen. Das Bewertungskriterium stellt dabei die jeweils ermittelte Maximalfeldstärke einer jeden Spannungsbelastung dar (Bild 6.18). Angenommen wird, dass das Erreichen der zum Durchschlag notwendigen Feldstärke entsprechend der elektrischen Festigkeit des Isolieröls innerhalb des Systems sofort zum Durchschlag der homogenen Anordnung führt. Es ist jedoch zu erwähnen, dass aufgrund des Durchschlagverhaltens des Isolieröls unter Gleichspannungsbelastung infolge des Schwachstellendurchschlages sowie des Einflusses der statistischen Streuzeit unter Blitzstoßspannungsbelastungen nur bedingt vergleichbar sind. Die reine Gleichspannungsbelastung stellt somit tendenziell die höhere Beanspru-

chung des Isoliersystems dar. Diese Einflüsse können in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden, beeinflussen jedoch stark das Durchschlagverhalten der Anordnungen.

Bild 6.18: Vergleich der in Abschnitt 5.3.1 berechneten Maximalfeldstärken $E_{\max}$ im Ölspace bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der homogenen Anordnung mit einer Ölspaceweite von $s = 3 \text{ mm}$

Die Ergebnisse der Versuche an der blanken Anordnung zeigen deutliche Unterschiede in den ermittelten Durchschlagspannungen unter zusammengesetzter Spannungsbelastung im Vergleich zur reinen Gleich- oder Blitzstoßspannungsbelastung (Bild 6.19) [Gab-18c]. Weiterhin weisen die Ergebnisse abhängig von der genutzten Anordnung (offen oder mit Ringbarriere abgeschlossen) und von der Art der Überlagerung (bipolar oder unipolar) ebenfalls ein unterschiedliches Verhalten auf. Es kann somit gezeigt werden, dass die Ladungsträgerakkumulation und -injektion infolge der Gleichspannungsvorbelastung der zusammengesetzten Spannungsbelastung im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung das Isoliervermögen der Anordnung bei transienten Belastungen signifikant beeinflusst.

Geschlossene Anordnung

An der geschlossenen Anordnung werden erwartungsgemäß unter reiner Blitzstoßspannungsbelastung höhere Durchschlagspannungen erzielt als bei der reinen Gleichspannungsbelastung. Wie in den Abschnitten 6.1 und 5.2 gezeigt, führt die Ladungsträgerakkumulation an den Elektroden bei Gleichspannungsbelastung zu einer erhöhten Feldstärke an der Öl-Elektroden-Grenzfläche und somit zu einer stärkeren Beanspruchung des Ölspace im Vergleich zum unbeeinflussten, homogenen Grundfeld. Aufgrund des sehr steilen und schnellen Blitzstoßes tritt kaum eine Ladungsträgerbewegung auf und so kann sich keine ausreichende Dichte an akkumulierten Ladungsträgern vor den Elektroden ausbilden. Aufgrund der durchgeführten Spannungssteigerung im SSV ist zwar eine Akkumulation von Ladungsträgern an der Öl-Elektroden-Grenzfläche möglich, die jedoch bedeutend schwächer ausgeprägt sein wird als unter der fortwährenden Gleichspannungsbelastung.

Bild 6.19: Resultierende Durchschlagspannungen $U_{DS\Sigma}$ unter zusammengesetzter Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung und der reinen Spannungsbelastungen an der Anordnung mit blanken Elektroden für eine feste Ölschichtweite von $s = 3\text{ mm}$ nach [Gab-18c] in Abhängigkeit des Gleichspannungsanteils U_{DC} bezogen auf die mittlere Durchschlagspannung $U_{DS\ DC\ 3mm\ offen}$ der offenen Anordnung unter Gleichspannungsbelastung

Die im Ölschicht auftretende Feldstärke wird daher hauptsächlich durch das vorherrschende Verschiebungsfeld bestimmt, was per se aufgrund des homogenen Grundfeldes bereits zu einer geringeren Beanspruchung des Ölschichts bei einer ähnlichen, nominellen Spannungsbelastung führt. Des Weiteren wird das Durchschlagverhalten der ölschichtierten Anordnung bei der raschen Blitzstoßspannungsbelastung in großem Maße durch die auftretende Zündverzugszeit in der Ausbildung des Entladungskanals bestimmt (vgl. Abschnitt 2.3.6) [Bey-92, Küc-17]. Somit stellen sich bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung höhere Durchschlagspannungen ein.

Beim Vergleich der Ergebnisse der uni- und bipolaren Mischspannungsbelastung werden zum Teil große Unterschiede deutlich. So wurden bei der unipolaren Überlagerung im Mittel um bis zu 10 % höhere Durchschlagspannungen als bei der bipolaren Überlagerung gemessen. Dies zeigt, dass der rasche Polaritätswechsel eine stärkere Beanspruchung der Anordnung darstellt, als der schnelle Potentialanstieg aufgrund der Überlagerung mit einem Blitzstoß derselben Polarität. Im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung wurden unter unipolar überlagerter Spannungsbelastung im Mittel ähnliche Durchschlag-

spannungen gemessen, welche somit ebenfalls größer sind als die Ergebnisse bei reiner Gleichspannungsbelastung. Unter bipolar überlagerter Spannungsbelastung hingegen werden im Mittel geringere Durchschlagsspannungen im Vergleich zur reinen Stoßspannungsbelastung ermittelt. Im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung hingegen wurden im Mittel ähnliche, z. T. jedoch auch geringere Durchschlagsspannung gemessen. Jedoch tritt eine sehr große Streuung der Ergebnisse auf, wobei sowohl bei der uni- als auch bei der bipolaren Überlagerung z. T. auch Durchschlagsspannungen gemessen wurden, welche bedeutend höher als die unter reiner Blitzstoßspannungsbelastung sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die überlagerte Spannungsbelastung im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung eine geringere Beanspruchung im unipolaren Fall, aber eine ähnliche Beanspruchung im bipolaren Fall zur Folge hat. Infolge des Ladungsträgereinflusses der Gleichspannungsvorbelastung stellt sich jedoch eine z. T. höhere Beanspruchung im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung ein.

Wie in Abschnitt 5.3.1 gezeigt, stellt sich aufgrund der bei Gleichspannungsvorbelastung akkumulierten intrinsischen *Heterocharges* eine inhomogene Feldstärkeverteilung innerhalb der Anordnung ein. Wird diese nun bipolar mit einem Blitzstoß entgegengesetzter Polarität überlagert, wirken die an den Elektroden akkumulierten intrinsischen Ladungsträgern aufgrund des Polaritätswechsels nun als *Homocharges*, da sie dieselbe Polarität wie die angrenzende Elektrode besitzen. Die Menge an akkumulierten intrinsischen Ladungsträgern führt also zu einer Verringerung der Feldstärke in Elektrodennähe. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die unter der Gleichspannungsvorbelastung injizierten *Homocharges* während des Polaritätswechsels an den Elektroden mit nun umgekehrter Polarität rekombinieren. Trotz der in Abschnitt 5.3.1 gezeigten resultierenden Anhebung der Feldstärke im Ölspace wurden geringere Maximalfeldstärken im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung berechnet (vgl. Bild 6.18), was ein Grund für die die gemessenen, ähnlichen Durchschlagsspannungen bei der bipolar überlagerten Spannungsbelastung sein kann.

Bei der unipolaren Mischspannungsbelastung hingegen findet aufgrund der Überlagerung mit einem Blitzstoß derselben Polarität eine rasche Anhebung des Potentials der Hochspannungselektrode statt. Da sich somit auch die Feldstärke an den Elektroden erhöht, werden verstärkt *Homocharges* injiziert (vgl. Abschnitt 5.3.1). Diese verringern die Feldstärke in Elektrodennähe und entlasten somit den Ölspace im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung. Somit stellen sich auch bei der unipolaren Überlagerung geringere Maximalfeldstärken und damit höhere Durchschlagsspannungen im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ein. Diese zusätzliche Injektion von *Homocharges* und damit Verringerung der Feldstärke in Elektrodennähe führt somit auch dazu, dass sich im Ölspace sogar geringere Maximalfeldstärken im Vergleich zur bipolaren Überlagerung einstellen können (vgl. Bild 6.18), womit die zum Teil erhöhten Durchschlagsspannungen bei der unipolaren Überlagerung erklärt werden können. Da die injizierten Ladungsträger stets an Ölmoleküle gebunden sind wird davon ausgegangen, dass sie trotz ihrer nun höheren Dichten in Elektrodennähe nicht als freie Ladungsträger zur Verfügung stehen und somit nicht direkt am Entladungseinsatz beteiligt sind oder diesen gar begünstigen. Wäre das der Fall, würden die erhöhten Dichten an injizierten Ladungsträgern bei der unipolaren Überlagerung

im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung zu einer deutlichen Verringerung der Durchschlagspannung führen. Es ist jedoch zudem davon auszugehen, dass auch bei der zusammengesetzten Spannungsbelastung die Zündverzugszeit im Entladungseinsatz und -aufbau das Durchschlagverhalten der Anordnung beeinflusst.

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse der Mischspannungsbelastung mit der reinen Blitzstoßspannungsbelastung, werden unter Mischspannungsbelastung aufgrund des Ladungsträgereinflusses infolge der Gleichspannungsvorbelastung höhere Maximalfeldstärken ermittelt (vgl. Bild 6.18). Dies spiegelt auch die Ergebnisse der Durchschlagversuche wieder, in denen unter reiner Blitzstoßspannungsbelastung im Mittel die höchsten Durchschlagspannungen erzielt wurden. Jedoch beeinflusst die statistische Streuzeit sowohl unter Misch- als auch bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung das Durchschlagverhalten der Anordnungen stark. Werden unter diesen transienten Spannungsbelastungen die kritischen Feldstärken zum Entladungseinsatz erreicht, kann sich je nach Höhe der resultierenden (Stoß-) Spannung die zum Durchschlag notwendige Entladung nicht sofort ausbilden. Erst wenn die zum Entladungseinsatz notwendigen Feldstärken über einen hinreichend langen Zeitraum (*Zündverzugszeit*) überschritten werden, kann sich der Entladungskanal ausbilden und so zum Durchschlag der Anordnung führen (vgl. Abschnitt 2.3.6). Ein Indiz für diesen Effekt bildet auch die Tatsache, dass die Durchschläge sowohl bei der überlagerten Spannungsbelastung als auch bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung stets im Rücken der Stoßspannung stattgefunden haben.

Offene Anordnung

Wie auch bei der geschlossenen Anordnung stellen sich sowohl bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung als auch unter Mischspannungsbelastung höhere Durchschlagspannungen als bei der reinen Gleichspannungsbelastung ein. Des Weiteren wurden bei der unipolaren Überlagerung im Mittel ebenfalls höhere Durchschlagspannungen als bei der bipolaren Überlagerung ermittelt. Bei der bipolaren Mischspannungsbelastung wurden ebenfalls geringere Durchschlagspannungen im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannung ermittelt [Gab-18c].

An den Ergebnissen wird jedoch auch deutlich, dass das umgebende Ölvolumen auch bei zusammengesetzter Spannungsbelastung einen Einfluss auf die Beanspruchung der Anordnung hat, da bei der unipolaren Überlagerung bei der offenen Anordnung geringere Durchschlagspannungen ermittelt wurden als bei der geschlossenen Anordnung (Bild 6.19). Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten kann der verringerte Gleichspannungsanteil der Vorbelastung an der offenen Anordnung aufgrund der geringeren Durchschlagspannung der offenen Anordnung unter Gleichspannungsbelastung sein. Das Einstellen eines zur geschlossenen Anordnung vergleichbaren Gleichspannungsanteils war jedoch nicht möglich, da dieser aufgrund der Nähe zu den Durchschlagspannungen der Gleichspannungsbelastung u. U. bereits zum Durchschlag während der Gleichspannungsvorbelastung führen würde. Zum einen werden aufgrund der geringeren vorherrschenden Feldstärken infolge der verminderten Gleichspannungsvorbelastung weniger *Homocharges* injiziert. Des Weiteren werden aufgrund der somit geringeren, auf die Ladungsträger wirken-

den elektrostatischen Kräfte weniger intrinsische Ladungsträger in die Anordnung gezogen. Somit sind die Ladungsträgerdichten an intrinsischen *Homocharges* bei der bipolaren Überlagerung geringer und die Verringerung der Feldstärke in der Anordnung fällt weniger stark aus als bei höheren, vorherrschenden Feldstärken bei einer höheren Gleichspannungsvorbelastung. Geringere Durchschlagspannungen sind die Folge. Bei der unipolaren Überlagerung werden dadurch ebenfalls weniger *Homocharges* injiziert und somit die Feldstärke während der Überlagerung weniger stark herabgesenkt.

Jedoch ist auch davon auszugehen, dass bei der offenen Anordnung höhere Dichten an akkumulierten *Heterocharges* vorhanden sind als bei der abgeschlossenen Anordnung. Höhere Maximalfeldstärken im Ölspace wären die Folge, was eine Verringerung der Durchschlagspannungen mit sich bringt.

6.2.2 Verhalten des Mehrstoffsystems mit isolierten Elektroden

An der Anordnung mit isolierten Elektroden soll das Verhalten des Mehrstoffsystems einer Öl-Papier-Isolierung untersucht werden, wie es auch in realen Isoliersystemen vorhanden ist. Dazu sind analog zu den Versuchen an der blanken Anordnung (b-b) ebenfalls Versuche bei uni- und bipolar überlagerter Spannungsbelastung an der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) durchgeführt worden. Analog zu den Versuchen bei reiner Gleichspannungsbelastung wurden die Versuche ausschließlich an der abgeschlossenen Anordnung durchgeführt (vgl. Bild 4.5). Der Vergleich mit den Ergebnissen bei reiner Gleich- und Blitzstoßspannungsbelastung soll ebenfalls Aufschluss geben, inwiefern die Gleichspannungsvorbelastung das Durchschlagverhalten der Anordnung beeinflusst.

Auch bei der Auswertung der Ergebnisse der papierisolierten Anordnung stellen die Berechnungsergebnisse anhand des ladungsträgerbasierten Modells unter Beachtung der ermittelten Maximalfeldstärken im Papier die Grundlage der Betrachtungen dar (Bild 6.20).

Bild 6.20: Vergleich der in Abschnitt 5.3.2 berechneten Maximalfeldstärken $E_{\max}$ im Ölspace sowie im Papier bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der Anordnung mit isolierten Elektroden bei einer Ölspaceweite von $s = 3 \text{ mm}$

Die Ergebnisse der Durchschlagversuche zeigen, dass sich die Gleichspannungsvorbelastung und die Art der Überlagerung auch bei der Anordnung mit isolierten Elektroden auf deren Isoliervermögen auswirkt (Bild 6.21). Ähnlich zur blanken Anordnung unterscheiden sich die Durchschlagspannungen sowohl beim Vergleich der uni- und bipolaren Mischspannungsbelastung als auch im Vergleich zur reinen Gleich- und Blitzstoßspannungsbelastung signifikant [Gab-18b].

Entsprechend der Erwartungen werden bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung höhere Durchschlagspannungen ermittelt als bei der reinen Gleichspannungsbelastung. Auch hier führt die weitaus längere Beanspruchungsdauer der Gleichspannungsbelastung aufgrund des Schwachstellendurchschlages des Isolieröls zu einem geringeren Isoliervermögen der Anordnung.

Bild 6.21: Resultierende Durchschlagspannungen $U_{DS\Sigma}$ unter zusammengesetzter Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung und der reinen Spannungsbelastungen an der Anordnung mit isolierten Elektroden für eine feste Ölsaltweite von $s = 3\ mm$ nach [Gab-18b] in Abhängigkeit des Gleichspannungsanteils U_{DC} bezogen auf die mittlere Durchschlagspannung $U_{DS\ DC\ 3\ mm}$ der Anordnung unter Gleichspannungsbelastung

Ähnlich der Ergebnisse an der blanken Anordnung wurden an der Anordnung mit isolierten Elektroden bei der unipolaren Überlagerung im Mittel um ca. 30% höhere Durchschlagspannungen als bei der bipolaren Überlagerung festgestellt. Wurden bei der unipolaren Überlagerung im Mittel noch um ca. 40 % höhere Durchschlagspannungen im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung gemessen, so ergaben sich bei der bipolaren Überlage-

rung nur noch geringfügig höhere Durchschlagspannungen als unter Gleichspannungsbelastung. Im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung wurden bei der unipolaren Überlagerung im Mittel ähnliche Durchschlagspannungen gemessen, wobei eine starke Streuung der Ergebnisse auftritt, die zu z.T. höheren, z.T. aber auch geringeren Durchschlagspannungen führt. Bei der bipolaren Überlagerung hingegen wurden im Mittel um ca. 30 % geringere Durchschlagspannungen als unter Blitzstoßspannungsbelastung ermittelt. Aufgrund der großen Streuung der Messergebnisse sind jedoch auch Durchschlagspannungen ermittelt worden, welche im Bereich der reinen Blitzstoßspannungsbelastung liegen.

Es zeigt sich also, dass der schnelle Polaritätswechsel nach der Gleichspannungsvorbelastung aufgrund der bipolaren Überlagerung mit einem Blitzstoß auch bei der papierisolierten Anordnung eine größere Belastung darstellt als die unipolare Überlagerung mit einer Stoßspannung derselben Polarität. Jedoch zeigt sich auch, dass die schnelle transiente Belastung mit einem überlagerten Blitzstoß eine geringere Beanspruchung des Isoliersystems im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung zur Folge hat.

Ähnliche Erkenntnisse ergaben sich bereits anhand der numerischen Berechnungen aus Abschnitt 5.3.2 (vgl. Bild 6.20). So wurden in den Berechnungen bei der zusammengesetzten Spannungsbelastung geringere Maximalfeldstärken ermittelt als bei der reinen Gleichspannungsbelastung. Sowohl der rasche Potentialanstieg der Hochspannungselektrode bei der unipolaren Überlagerung als auch der schnelle Polaritätswechsel führen aufgrund der mit injizierten *Homocharges* gefluteten Papierbarrieren zu einer geringeren Beanspruchung des Ölspalts im Vergleich zu einer äquivalenten Gleichspannungsbelastung. Selbst der Feldstärkeanstieg in den Papierbarrieren beim Polaritätswechsel stellt aufgrund der höheren Feldstärken im Ölspalt eine geringere Beanspruchung des Isoliersystems dar. Jedoch gilt auch zu beachten, dass in den Berechnungen die Effekte der im einzelnen wirkenden Durchschlagmechanismen nicht berücksichtigt werden, weshalb der Einfluss der statistischen Streuzeit im Durchschlag bei der Überlagerung mit Blitzstoßspannung ebenfalls das Durchschlagverhalten der Anordnung im Vergleich zur Gleichspannungs-Dauerbelastung ebenfalls beeinflusst.

Deutliche Unterschiede zeigen sich beim Vergleich der Ergebnisse aus Messungen und numerischen Berechnungen der unipolar und der bipolar zusammengesetzten Spannungsbelastung (Bild 6.20). Auch wenn sich in den berechneten Maximalfeldstärken keine deutlichen Unterschiede einstellen, werden bei der bipolaren Überlagerung geringere Maximalfeldstärken berechnet als bei der unipolaren Überlagerung. Dies steht im Gegensatz zu den Messergebnissen, da bei der bipolaren Überlagerung geringere Durchschlagspannungen ermittelt wurden und somit höhere Maximalfeldstärken im Vergleich zur unipolaren Überlagerung auftreten müssten. Zwar gilt auch hier zu beachten, dass der Einfluss der statistischen Streuzeit im Durchschlag der Anordnung nicht unerheblich sein wird. Da dieser Effekt jedoch sowohl bei der unipolaren als auch bei der bipolaren Überlagerung auftreten wird, kann das nicht der einzige Grund für die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung sein.

Eine weitere Ursache für dieses konträre Verhalten kann der in den Modellen aus Abschnitt 5.3.2 beachtete Einfluss eines möglichen, kleinen Ölspaltes zwischen Papierisolierung und isolierter Elektrode sein (vgl. Bild 6.22). Wie bereits bei den Ergebnissen der reinen Gleichspannungsbelastung in Abschnitt 6.1.2 gezeigt, führt das Fluten der Papierbarrieren mit *Homocharges* unter Gleichspannungsbelastung zu einer starken elektrostatischen Aufladung der Papierbarrieren. So ist es möglich, dass die unter der anliegenden Gleichspannungsvorbelastung wirkenden elektrostatischen Kräfte für ein leichtes Abstoßen der Papierbarrieren von den Elektroden sorgen bzw. die Barrieren unter Gleichspannungsbelastung leicht zueinander angezogen werden. Aufgrund des schlichten Einlegens der Papierbarrieren in die Anordnung in Vorbereitung der Versuche war es so möglich, dass sich zwischen den Elektroden und der eingelegten Papierbarriere ein minimaler Ölspace bildete. Trotz des Einspannens der Papierbarrieren in die Anordnung ist es daher nicht auszuschließen, dass dieser aufgrund der wirkenden Kräfte leicht vergrößert wird.

Bild 6.22: Vergleich der in Abschnitt 5.3.2 berechneten Maximalfeldstärken $E_{\max}$ im Ölspace sowie im Papier bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der Anordnung mit isolierten Elektroden, aber abgestoßenen Barrieren bei einer Ölspaceweite von $s = 3 \text{ mm}$

Bei reiner Gleichspannungsbelastung wirkt sich dieser Ölspace nicht auf das Isoliervermögen der Anordnung aus, da dieser wie in Abschnitt 6.1.3 gezeigt, aufgrund der mit *Homocharges* gefluteten Papierbarrieren entlastet wird. Wird die Anordnung jedoch bipolar mit einer Blitzstoßspannung überlagert, erfolgt eine rasche Polaritätsumkehr der Elektroden. Somit wirken die im Papier angelagerten injizierten Ladungsträger – welche bei der Gleichspannungsvorbelastung als *Homocharges* den minimalen Ölspace zwischen Papier und Elektrode entlasteten – nun als *Heterocharges* im Papier. Aufgrund des raschen Polaritätswechsels bei der Überlagerung mit einer Blitzstoßspannung ist aufgrund der geringen Mobilität der Ladungsträger im Papier nicht davon auszugehen, dass die injizierten Ladungsträger im Papier mit zusätzlich injizierten Ladungsträgern rekombinieren oder sich aus dem Papier lösen und an den Elektroden rekombinieren können. Der rasche Polaritätswechsel hat somit zur Folge, dass den Elektroden im Moment der Überlagerung eine mit *Heterocharges*

geflutete Papierbarriere gegenübersteht. Somit wird der Ölspalt zwischen Elektrode und Papierbarriere bei der bipolaren Überlagerung plötzlich sehr stark beansprucht, was sehr hohe Feldstärken im Vergleich zu den übrigen Spannungsbelastungen und damit die größte Beanspruchung der Anordnung zur Folge hat (vgl. Bild 6.22). Eine Entladung in diesem Ölspalt hätte anschließend den Durchschlag der gesamten Anordnung zur Folge. Die plötzliche, sehr starke Beanspruchung des Ölspaltes zwischen Elektroden und Papierbarrieren könnte also ausschlaggebend für die geringen Durchschlagsspannungen beim Polaritätswechsel sein.

Bei der unipolaren Überlagerung hingegen erfolgt ein schneller Potentialanstieg der Hochspannungselektrode. Trotz der weiteren Entlastung des Ölspaltes vor den Elektroden durch zusätzlich injizierte Ladungsträger aufgrund des schnellen Feldstärkeanstieges würde die Anordnung nur durch den raschen Anstieg der mittleren Feldstärke stärker beansprucht. Der Einfluss des zusätzlichen Ölspaltes auf die Beanspruchung der isolierten Anordnung unter reiner Gleich- und Blitzstoßspannung sowie der unipolaren Mischspannungsbelastung im Vergleich zur Anordnung ohne abgestoßene Barrieren ist jedoch nur gering.

7 Schlussfolgerungen für die technische Anwendung der Ergebnisse

Aus den gewonnen Erkenntnissen der Untersuchungen zum dielektrischen Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleich- und Mischspannungsbelastung sowie der qualitativen Verifikation der ladungsträgerbasierten Modellierung nach PNP lassen sich verschiedene Schlussfolgerungen ziehen. Die Erkenntnisse können dabei einen Beitrag zur Optimierung des dielektrischen Designs der Stromrichtertransformatoren oder für weitere Untersuchungen an Öl-Papier-Isolieranordnung leisten.

Die Ergebnisse der offenen Elektrodenanordnungen im Vergleich zu den abgeschlossenen Anordnungen zeigten analog zu [Zou-98], dass das gesamte Ölvolumen im Prüfgefäß das Verhalten des Isoliersystems beeinflusst. Dies demonstrierte nicht nur der Vergleich der offen Anordnung mit der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen, blanken Anordnung aus Abschnitt 6.1.1. Ebenso ließ sich das Durchschlagverhalten einer gekreuzten Zylinderanordnung aus [Bac-16a] im Vergleich zu den Ergebnissen der abgeschlossenen, Öl-Papier-isolierten Anordnung in Abschnitt 6.1.2 auf diese Einflüsse zurückführen. Zusätzliche, intrinsische Ladungsträger des umgebenden Ölvolumens sowie von den Hilfselektroden innerhalb des Prüfgefäßes injizierte Ladungsträger wirken sich auf die Beanspruchung einer Anordnung aus. Die Ergebnisse machen damit nicht nur deutlich, dass bei weiteren Untersuchungen zum dielektrischen Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems diese Einflüsse berücksichtigt und ggf. durch geeignete Maßnahmen vermieden werden müssen.

Vielmehr zeigen die Ergebnisse auch, dass das gesamte Ölvolumen der Stromrichtertransformatoren einen Einfluss auf das dielektrische Verhalten des Isoliersystems haben kann. So sind z. B. blanke, unlackierte Metallteile im Transformator zu vermeiden, die infolge der zusätzlichen Injektion von Ladungsträgern und deren Akkumulation an Papierbarrieren der Gegenelektrode eine erhöhte Beanspruchung des Isoliersystems zur Folge hätten. Ähnliche Einflüsse zeigten sich bereits in [Sch-11]. Eine Ölströmung, wie sie im Transformator durch die erzwungene Konvektion zur Kühlung genutzt wird, kann sich dabei auf das dielektrische Verhalten des Isoliersystems auswirken. Diese Einflüsse sind bei der Anwendung der Ergebnisse zur dielektrischen Dimensionierung des Isoliersystems unbedingt zu berücksichtigen und in weiteren Untersuchungen zu erforschen.

Weiterhin zeigen auch die Berechnungsergebnisse aus Abschnitt 5.2.1 an der blanken Anordnung mit variierten Konzentrationen intrinsischer Ladungsträger, dass sich erhöhte Konzentrationen, wie sie z. B. infolge der Alterung des Isolieröls erwartet werden, auf die Beanspruchung des Isoliersystems auswirken können. So wurde auch in der Literatur gezeigt, dass die elektrische Alterung des Isolieröls und dadurch im Öl gelöste Metallionen

einen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit des Öls [Lie-68] und infolge deren Akkumulation an Grenzflächen auch einen Einfluss auf die Beanspruchung des Isoliersystems haben können [Hik-96].

Die Ergebnisse der Öl-Papier-isolierten Anordnungen aus Abschnitt 6.1.2 zeigen sowohl in den Berechnungen auf Grundlage des PNP-Modells als auch in den Durchschlagversuchen, dass der Ölspalt die höchste Beanspruchung erfährt. So wird das Papier infolge der Akkumulation injizierter *Homocharges* entlastet und der Ölspalt stärker beansprucht. Berechnungen auf Grundlage der etablierten, resistiv-kapazitiven Berechnungsmodelle würden jedoch die höchste Beanspruchung in den Papierbarrieren vermuten lassen. Infolge der geringeren elektrischen Leitfähigkeit des Isolierpapiers im Vergleich zum mineralischen Isolieröl würden in den Papierbarrieren sehr hohe Feldstärken berechnet.

Die vorliegende Arbeit kann somit verdeutlichen, dass die etablierten, Berechnungsmodelle auf Basis eines resistiv-kapazitiven Verhaltens unter Gleichspannungsbelastung unzureichende Ergebnisse liefern. Die demnach ermittelte, höhere Beanspruchung der Papierbarrieren im Vergleich zum Isolieröl hätte bei der Dimensionierung des Isoliersystems zur Folge, dass die Papierbarrieren zu stark ausgeführt würden. Eine Überdimensionierung des Isoliersystems ist die Folge. Die mit dieser Modellierung vernachlässigten Einflüsse der Ladungsträger auf eine Raumladungsausbildung im Papier des Isoliersystems führt jedoch zu einer Entlastung der Barrieren. In Bezug auf die Dimensionierung bedeutet dies demnach, dass die Papierisolierung im Transformator weniger stark ausgeführt werden kann. Die größte Beanspruchung erfährt somit das Isolieröl, was zusätzlich zur Kühlung des Transformators dient und bereits einen Großteils des Volumens und damit der notwendigen Isolierstrecken ausfüllt. So ist es möglich, die bisher erfolgte Überdimensionierung der Stromrichtertransformatoren infolge der als zu stark abgeschätzten Beanspruchung zu nutzen, um die Leistungsdichte der Transformatoren um 50 % zu erhöhen [Fri-16b].

Weiterhin veranschaulichen die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1.3 auch, dass multiplen Ölspalten im Isoliersystem unter Gleichspannungsbelastung eine besondere Beachtung geschenkt werden muss. Die Ergebnisse der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren zeigen ähnlich zu [Gäf-00], dass an Isolieranordnungen mit mehreren Ölspalten die mittleren Ölspalte am stärksten beansprucht werden. Die äußeren, den Elektroden zugewandten Ölspalte werden hingegen entlastet. Übertragen auf reale Isolieranordnungen wie der Hauptisolierung des Transformators zwischen Primär- und Sekundärwicklung bedeutet dies, dass weiterhin die Hauptisolierstrecke, d. h. das Ölvolumen zwischen den Wicklungen am stärksten beansprucht wird. Die zur Kühlung notwendigen Ölkäle zwischen geschichteten Papierlagen oder den Windungen ähnlichen Potentials würden entlastet und müssten demnach hauptsächlich entsprechend der nötigen Kühlleistung dimensioniert werden. An Isolieranordnungen wie z. B. an Durchführungen, die eine spezielle geometrische Ausführung der Isolierung und Barrierensysteme notwendig macht [Küc-17], müssten diese Einflüsse jedoch beachtet werden. Daher wäre besonders an Anordnungen mit speziellen Geometrien darauf zu achten, dass multiple Ölspalte entsprechend stark ausgeführt oder geeignete Maßnahmen zur Feldsteuerung getroffen werden.

Der in den Abschnitten 5.2.4 und 6.1.4 gezeigte Polaritätseffekt in der Beanspruchung der Isolieranordnung ist nicht nur bei der Dimensionierung zu beachten. Je nach Ausführung des Isoliersystems und den erwarteten Spannungsbelastungen kann sich ebenfalls eine polaritätsabhängige Beanspruchung einstellen. Um diese Effekte auszuschließen und das Isoliervermögen des Isoliersystems für alle auftretenden Spannungsbelastungen nachzuweisen, sind u. a. bei Typprüfungen zwingend alle Polaritäten der Spannungsbelastungen zu überprüfen.

Die Ergebnisse unter Mischspannungsbelastung aus Abschnitt 6.2 zeigen, dass die Überlagerung der Gleichspannung mit einer transienten Blitzstoßspannungsbelastung keine signifikant höhere Beanspruchung des Isoliersystems darstellt. Im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung wird bei ähnlichem Momentanwert der Spannung sowohl rechnerisch als auch experimentell keine höhere Beanspruchung ermittelt. Insbesondere der rasche Polaritätswechsel, der anhand der Ergebnisse der etablierten, resistiv-kapazitiven Modelle eine besonders hohe Beanspruchung des Isoliersystems zur Folge hätte, stellt keine höhere Beanspruchung im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung dar. Weiterhin zeigten die Berechnungen an der Anordnung mit isolierten Elektroden auf Grundlage des Ladungsträgerbasierten Modells, dass auch bei der überlagerten Spannungsbelastung die höchste Beanspruchung ebenfalls im Ölspalt auftritt. Im Vergleich zur Dimensionierung unter reiner Gleichspannungsbelastung sind demnach keine abweichenden Beanspruchungen ermittelt worden, die zur dielektrischen Dimensionierung gesondert beachtet werden müssen. Aufgrund der hohen Streuung der Messergebnisse treten jedoch starke Unsicherheiten auf, die zur Anwendung der Ergebnisse beachtet und daher statistisch abgesichert werden müssen.

Jedoch lassen die Berechnungen auf Grundlage des ladungsträgerbasierten Modells vermuten, dass mögliche Ölspalte zwischen Papierbarrieren und Elektroden während des Polaritätswechsels stärker beansprucht werden. Unter Gleichspannungsbelastung werden diese Ölspalte, entlastet. Beim Polaritätswechsel der Elektroden tritt in diesen Ölspalten hingegen eine hohe Beanspruchung auf. Dies ist somit weiter zu untersuchen und zur Dimensionierung des Isoliersystems zu beachten.

Das ladungsträgerbasierte Modell und dessen numerische Modellierung auf Basis des PNP-Gleichungssystems konnten im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen verifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen sowohl bei der reinen Gleichspannungs- als auch bei der untersuchten zusammengesetzten Mischspannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung, dass die Berechnungen qualitativ vertrauenswürdige Ergebnisse liefern.

Jedoch eignet sich das Modell zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht für eine quantitative Abschätzung der Beanspruchung des Isoliersystems. Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen und der Vielzahl an unbekannten Parametern wurden die Randbedingungen nur geschätzt (vgl. Abschnitt 2.4). Um die Ergebnisse des ladungsträgerbasierten Berechnungsmodells quantitativ zu verbessern, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um unbekannte Parameter zu ermitteln.

8 Zusammenfassung

Die Stromrichtertransformatoren der Hochspannungsgleichstromübertragung bilden das Bindeglied zwischen Gleichspannungs- und Drehstromsystem. Zur Sicherstellung des zuverlässigen Betriebs über die gesamte Lebensdauer muss deren Öl-Papier-Isoliersystem entsprechend dimensioniert sein. Eine optimale Dimensionierung setzt ein detailliertes Verständnis über die Beanspruchung des Isoliersystems sowie einer vertrauenswürdigen Modellierung bei allen auftretenden Spannungsbelastungen voraus – d. h. unter Betriebsspannung und den überlagerten, transienten Überspannungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher in Anlehnung an dielektrische Prüfungen das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems sowohl bei reiner Gleichspannungsbelastung als auch bei einer Mischspannungsbelastung, d. h. der zusammengesetzten Spannungsbelastung aus Gleichspannung und Blitzstoßspannung untersucht.

Etablierte, resistiv-kapazitive Berechnungsmodelle können das unter Gleichspannungsbelastung durch Raumladungen beeinflusste dielektrische Verhalten nicht abbilden. In der Literatur wurden daher ladungsträgerbasierte Berechnungsmodelle entwickelt, die diese Einflüsse berücksichtigen. Die ladungsträgerbasierten Leitfähigkeitsmechanismen können u. a. auf Basis des nichtlinearen, *Poisson-Nernst-Planck*-Gleichungssystems numerisch modelliert werden [Bac-16a].

In der Literatur wurde dabei jedoch vorrangig das öl- oder papierisierte Einstoffsystem betrachtet. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleich- und Mischspannungsbelastung auf Grundlage des ladungsträgerbasierten Ansatzes nach PNP grundlegend untersucht. Dabei standen insbesondere Isolieranordnungen zur Nachbildung realitätsnaher Belastungen im Vordergrund. Über den Vergleich der Berechnungsergebnisse des PNP-Modells mit Durchschlagexperimenten sollte dabei die Anwendbarkeit des Modells auf Öl-Papier-isolierte Anordnungen überprüft werden.

Die Berechnungen unter Gleichspannungsbelastung verdeutlichen die zeit- und feldstärkeabhängigen Einflüsse der Ladungsträger, welche grundlegend an der ölisolierten Anordnung mit blanken Elektroden untersucht wurden. Die Akkumulation intrinsischer Ladungsträger an den Gegenelektroden bewirkt dabei aufgrund deren Wirkung als *Heterocharges* eine signifikante, lokale Anhebung der Feldstärke. Deren Einfluss vergrößert sich aufgrund der zunehmenden, lokalen Ladungsträgerdichten mit fortschreitender Zeit und zunehmender elektrischer Feldstärke bis zum Erreichen eines stationären Zustandes und führt so zur Ausbildung der aus der Literatur bekannten „inneren Inhomogenität“ [Bac-16a] einer homogenen Elektrodenanordnung. Die feldstärkeabhängige Injektion von Ladungsträgern aus den Elektroden wirkt diesen Einflüssen aufgrund deren Wirkung als *Homocharges* entgegen. Eine höhere Beweglichkeit der Ladungsträger oder veränderte Anfangskonzentrationen wirken sich dabei stark auf die Feldstärkeverteilung aus.

Dies zeigt nicht nur, dass die Teilchendichten und damit die Konzentration an Ladungsträgern im Ölvolumen die Feldstärkeverteilung einer ölsolierten Anordnung signifikant beeinflussen. Ebenso ist es für eine quantitative Abschätzung der Beanspruchung einer Anordnung von großer Bedeutung, dass die im Modell implementierten Parameter möglichst genau bekannt sind.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an der ölsolierten, blanken Anordnung können diese Berechnungsergebnisse qualitativ bestätigen und weitere Einflüsse aufzeigen. An einer offen im Prüfgefäß befindlichen Elektrodenanordnung werden infolge der zusätzlichen Ladungsträger des gesamten Ölvolumens geringere Durchschlagspannungen gemessen als an einer mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung, die diesen Einfluss des umgebenden Ölvolumens vermindert. Der Einfluss der Ladungsträger des gesamten Ölvolumens auf die Feldstärkeverteilung bewirkt an der offenen Anordnung ebenfalls um ein Vielfaches höhere, stationäre Ströme als an der mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung. Die geladenen Ölmoleküle führen zudem zu einer elektrostatischen Adhäsion an blanken Metallteilen und damit zu einem deutlich sichtbaren Aufsteigen des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche von Hilfelektroden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass für reproduzier- und vergleichbare Untersuchungen ein solcher Einfluss des umgebenden Ölvolumens für weitere Untersuchungen des dielektrischen Verhaltens des Öl-Papier-Isoliersystems zwingend vermieden werden muss, da dieser das Verhalten der Anordnung in unbekanntem Maße beeinflussen kann. Ebenso zeigen diese Ergebnisse auch, dass das neben einer vorhandenen Ölströmung [Sch-11] ebenfalls das große Ölvolumen der Transformatoren das Verhalten des Isoliersystems beeinflussen kann.

Im Rahmen der in der Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurde ebenfalls das dielektrische Verhalten realitätsnaher, Öl-Papier-isolierter Anordnungen analysiert. Dabei sollten nicht nur die Berechnungen des PNP-Modells mit Durchschlagexperimenten verglichen werden. Ebenfalls sollten diese der etablierten, resistiv-kapazitiven Modellierung gegenübergestellt werden, in der ein solcher Raumladungseinfluss nicht abgebildet werden kann. Die Ergebnisse des ladungsträgerbasierten PNP-Modells zeigen an einer Anordnung mit papierisolierten Elektroden, dass die Akkumulation von injizierten *Homocharges* in der Papierisolierung zu einer Entlastung der Papierbarrieren führt. Dabei wird deutlich, dass der Ölspace im Isoliersystem die höchste Beanspruchung erfährt. Dennoch werden geringere Maximalfeldstärken im Vergleich zum ölsolierten Einstoffsystem ermittelt. Unabhängig von weiteren Ölspace wird stets der Ölspace zwischen den Papierbarrieren am stärksten beansprucht. Weitere, elektrodennahe Ölspace werden infolge der im Papier akkumulierten *Homocharges* hingegen stark entlastet.

An einer unsymmetrischen Anordnung mit nur einer papierisolierten Elektrode akkumulieren die aus der blanken Elektrode injizierten Ladungsträger aufgrund der geringeren Mobilität der Ladungsträger im Papier an der Öl-Papier-Grenzfläche der isolierten Elektrode. Deren Wirkung als injizierte *Heterocharges* führt somit zu einer starken, lokalen Beanspruchung des Isolieröls vor der isolierten Elektrode. Infolge der polaritätsabhängigen Injektion der Ladungsträger aus der blanken Elektrode tritt zudem ein Polaritätseffekt auf.

Die höheren Injektionsraten von Elektronen (injizierten Anionen) aus der blanken Kathode resultieren in einem stärker ausgeprägten Staugebiet vor der isolierten Anode im Vergleich zur isolierten Kathode und damit in den höchsten Maximalfeldstärken im Ölspalt.

Die Berechnungsergebnisse auf Basis klassischer Strömungsfeldberechnungen zeigen, dass infolge der geringeren elektrischen Leitfähigkeit des ölimprägnierten Papiers im Vergleich zum Isolieröl die Papierbarrieren am stärksten beansprucht werden. Aufgrund der dünnen aber stark beanspruchten Papierisolierung würden die untersuchten, papierisolierten Anordnungen die größere Beanspruchung erfahren.

Die Ergebnisse der Durchschlagversuche können die Ergebnisse des PNP-Modells für die Öl-Papier-isolierten Anordnungen bestätigen. An der untersuchten Anordnung mit isolierten Elektroden werden die höchsten Durchschlagspannungen ermittelt. Dabei zeigt u. a. die starke Abhängigkeit der Durchschlagspannungen zur Ölspaltweite der Anordnung, dass der Ölspalt entsprechend der Annahmen am stärksten beansprucht wird. Zudem zeigt sich an der untersuchten Anordnung mit mehreren, durch Papierbarrieren abgegrenzte Ölspalte, dass die Durchschlagspannungen stark von der Größe des Ölspaltes zwischen den Papierbarrieren abhängig sind und dieser demnach am stärksten beansprucht wird. Die Größe der elektrodennahen Ölspalte beeinflusst die Durchschlagspannung hingegen nicht. Klassische Strömungsfeldberechnungen können diese Einflüsse infolge der vernachlässigten Raumladungen nicht abbilden.

An der unsymmetrischen Anordnung mit nur einer papierisolierten und einer blanken Elektrode werden die geringsten Durchschlagspannungen und demnach analog zur ladungsträgerbasierten Modellvorstellung die höchste Beanspruchung ermittelt. Ebenfalls tritt in den Durchschlagversuchen ein signifikanter Polaritätseffekt auf. Auch diese Einflüsse können mit einer klassischen Strömungsfeldberechnung nicht abgebildet werden.

Die Ergebnisse der Durchschlagversuche und der Vergleich mit den Berechnungsergebnissen können somit die Gültigkeit der ladungsträgerbasierten Modellvorstellung und damit die Anwendbarkeit des PNP-Modells unter Gleichspannungsbelastung qualitativ verifizieren. Klassische Strömungsfeldberechnungen auf Basis resistiv-kapazitiver Modelle zeigen die beobachteten Einflüsse nicht. Zudem werden anhand einer Strömungsfeldberechnung die höchsten Beanspruchungen im Papier vermutet und infolge der dünnen Papierbarrieren ein geringeres Isoliervermögen der Anordnungen erwartet, was die Ergebnisse der Durchschlagversuche widerlegen.

Weiterhin wurde das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems unter Mischspannungsbelastung untersucht. An den Anordnungen mit blanken bzw. isolierten Elektroden wurden ebenfalls Berechnungen anhand des PNP-Modells durchgeführt und mit Durchschlagversuchen verglichen, um die Anwendbarkeit des ladungsträgerbasierten PNP-Modells zu überprüfen.

Die Berechnungen auf Basis des PNP-Modells zeigen, dass die reine Gleichspannungsbelastung im Vergleich zur Mischspannungsbelastung bei identischer resultierender Spannungsbelastung die höchste Beanspruchung des Isoliersystems zur Folge hat. Die während der Gleichspannungsvorbelastung an der blanken Elektrode akkumulierten intrinsischen Ladungsträger wirken infolge des Polaritätswechsels wie *Homocharges*, was die Entlastung der elektrodennahen Gebiete im Vergleich zur unipolaren Überlagerung bewirkt. Die ra-

sche Potentialanhebung der unipolaren Überlagerung würde demnach zu einer höheren Beanspruchung des Isoliersystems führen.

Werden beide Elektroden papierisoliert, zeigt sich in den Berechnungen auf Grundlage des PNP-Modells ein tendenziell ähnliches Verhalten. Aufgrund der Gleichspannungsvorbelastung werden die Papierbarrieren entlastet und der Ölpalt am stärksten beansprucht. Auch an der Öl-Papier-isolierten Anordnung resultiert der Polaritätswechsel in einer geringeren Beanspruchung im Vergleich zur unipolaren Überlagerung.

Klassische Feldberechnungen anhand resistiv-kapazitiver Modelle hingegen würden die höchste Beanspruchung bei der Mischspannungsbelastung berechnen. Der Polaritätswechsel der bipolaren Überlagerung würde eine Vervielfachung der Feldstärke im Ölpalt und demnach die größte Beanspruchung der Anordnung bewirken.

Die Durchschlagversuche an den untersuchten Öl-Papier-isolierten Anordnungen können diese Annahmen bestätigen. Die geringsten Durchschlagspannungen werden unter Gleichspannungsbelastung infolge des Schwachstellendurchschlages ermittelt. Bei der unipolaren Überlagerung und bei der reinen Blitzstoßspannungsbelastung werden die höchsten Durchschlagspannungen gemessen. Der Polaritätswechsel der bipolaren Überlagerung hat jedoch geringere Durchschlagspannungen zur Folge.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass die Gleichspannungsvorbelastung das Verhalten der Anordnung bei der Überlagerung mit einer Blitzstoßspannung beeinflusst. Der Einfluss des statistischen Charakters des Durchschlages unter Stoßspannungsbelastung bewirkt in den Durchschlagversuchen eine große Streuung der Ergebnisse, kann in den Berechnungen jedoch nicht berücksichtigt werden.

Es stellte sich jedoch heraus, dass ein mögliches Abstoßen der mit *Homocharges* gefluteten Barrieren von den Elektroden und damit ein zusätzlicher Ölpalt zwischen Barriere und Elektrode das Verhalten der papierisolierten Anordnung beim Polaritätswechsel signifikant beeinflussen kann. Dabei wird der Ölpalt zwischen Papier und Elektrode am stärksten beansprucht, was in geringeren Durchschlagspannungen resultiert.

Die vorliegende Arbeit zeigt demnach, dass das ladungsträgerbasierte Berechnungsmodell auf Basis des PNP-Gleichungssystems trotz der getroffenen Vereinfachungen das Verhalten der untersuchten, Öl-Papier-isolierter Anordnungen qualitativ sehr gut abbilden kann. Dies gilt sowohl für die reine Gleichspannungsbelastung als auch für die zusammengesetzte Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung. Zudem konnte gezeigt werden, dass Berechnungen auf Grundlage etablierter, resistiv-kapazitiver Modelle das gezeigte Verhalten unter Gleich- und Mischspannungsbelastung nicht vollständig abbilden können. Deren Anwendung auf die dielektrische Dimensionierung des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleichspannungsbelastung entspricht demnach nicht mehr dem aktuellen Stand der Forschung und hätte eine Überdimensionierung zur Folge.

9 Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag, das dielektrische Verhalten des Isoliersystems der Stromrichtertransformatoren besser zu verstehen. So konnten die unter der Gleich- und Mischspannungsbelastung an realitätsnahen, Öl-Papier-isolierten Anordnungen erzielten Ergebnisse nicht nur den Einfluss der an Grenzflächen oder im Papier akkumulierten Ladungsträger auf die Beanspruchung des Isoliersystems zeigen. Ebenso konnten die Berechnungsergebnisse des ladungsträgerbasierten Modells qualitativ verifiziert und dessen Annahmen bestätigt werden. Somit wurde aufgezeigt, dass die stark vereinfachten Annahmen der etablierten Berechnungsmodelle die Beanspruchungen von Öl-Papier-isolierten Anordnungen unter Gleichspannungsbelastung nicht abbilden können.

Jedoch wurden die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuche zum vereinfachten Vergleich mit den komplexen Berechnungen nur an homogenen Plattenanordnungen durchgeführt. Reale Isolieranordnungen der Leistungstransformatoren sind aufgrund der möglichst kompakten Bauweise der Transformatoren und der hohen, zu übertragenden Leistungen stets möglichst schwach inhomogene Anordnungen. Um die Übertragbarkeit auf reale Isolieranordnungen zu verbessern, sollten daher weitere Untersuchungen an inhomogenen Geometrien erfolgen. Somit können auch mögliche Randeinflüsse, welche infolge der inhomogenen Geometrie und der dadurch verursachten, hohen Feldstärken auftreten, festgestellt und untersucht werden.

Auch in Bezug auf das große Ölvolumen der Transformatoren sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das reale Isoliersystem zu analysieren. So wurde in der Arbeit gezeigt, dass sich der Einfluss der Ladungsträger aus dem gesamten Ölvolumen eines Prüfgefäßes negativ auf die Beanspruchung einer Isolieranordnung auswirken kann. Ebenfalls wurde in der Literatur bereits der Einfluss einer konvektiven Ölströmung, wie sie zur Kühlung des Transformators zwangsläufig auftritt, auf das Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems gezeigt [Sch-11].

Auch die Alterung des Isolieröls beeinflusst die Konzentration an dissoziierbaren Bestandteilen. In Hinblick auf die hohe Lebensdauer der Transformatoren sollten weitere Untersuchungen folgen, um das Alterungsverhalten in Bezug auf die Beanspruchung unter Gleichspannungsbelastung zu untersuchen. Ebenso wird erwartet, dass sich infolge der unterschiedlichen Zusammensetzung der Isolieröle ebenfalls Einflüsse in Abhängigkeit der eingesetzten Isolierflüssigkeiten einstellen [Gab-19a, Rum-19].

Des Weiteren wurden die Untersuchungen stets an Anordnungen mit unlackierten Elektroden durchgeführt. Reale Anordnungen im Isoliersystem der Transformatoren wie der geerdete Kessel der Transformatoren sind jedoch stets lackiert oder die Windungsdrähte der Wicklungen mit einer Lackschicht versehen. Die Untersuchungen zeigten, dass das Verhalten des Isoliersystems in großem Maße von den aus den Elektroden injizierten La-

dungsträgern beeinflusst wird – sowohl bei den Anordnungen ohne Papierisolierung als auch und insbesondere bei den Anordnungen mit papierisierten Elektroden. Aufgrund der üblicherweise geringen elektrischen Leitfähigkeit der eingesetzten Lacke wird daher erwartet, dass sich eine Lackschicht auf das Injektionsverhalten der Elektroden auswirken wird. Dies würde sich nicht nur infolge der beeinflussten Injektion von Ladungsträgern auf die Beanspruchung der Anordnungen auswirken. Ebenso wird angenommen, dass injizierte Ladungsträger aufgrund der geringen Leitfähigkeit des Lackes und der dadurch verminderten Rekombination an den Elektroden akkumulieren können. Weiterführende Untersuchungen mit lackierten Elektrodenoberflächen sind demnach notwendig, um diese Einflüsse zu überprüfen.

Weiterhin konnte im Rahmen der Arbeit ein erwarteter Temperatureinfluss nicht betrachtet werden. Die Untersuchungen wurden dabei stets bei Raumtemperatur durchgeführt. Betriebstemperaturen der Leistungstransformatoren und damit die Temperaturen des Isoliersystems sind jedoch um ein Vielfaches höher. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, sind die an den Elektroden wirkenden Mechanismen zur Ladungsträgerinjektion temperaturabhängig, da sich die erhöhte thermische Energie auf die Austrittsarbeit der Ladungsträger auswirkt. Des Weiteren beeinflusst die Temperatur in hohem Maße die Viskosität des Isoliermediums und damit die Mobilität der Ladungsträger. Infolge dessen wirkt sich dies nicht nur auf die elektrische Leitfähigkeit des Isolieröls aus. Wie in Abschnitt 5.2.1 gezeigt, hat eine erhöhte Mobilität der Ladungsträger auch eine erhöhte Beanspruchung des Isoliersystems zur Folge. Eine erhöhte Temperatur würde sich somit auch auf die Beanspruchung des Isoliersystems auswirken. Demnach ist das Verhalten des Isoliersystems insbesondere bei den erhöhten Betriebstemperaturen weiterführend zu untersuchen.

Ebenso sind in Bezug auf die überlagerte Spannungsbelastung des Isoliersystems weitere Untersuchungen notwendig. So wurde in der Arbeit gezeigt, dass sich die Gleichspannungsvorbelastung auf das Verhalten des Isoliersystems unter Mischspannungsbelastung auswirkt. Infolge der dabei akkumulierten Ladungsträger stellt sich somit ein Einfluss auf die Beanspruchung der Anordnungen ein. Die Auswirkungen sind jedoch stark von der elektrischen Feldstärke und damit der Höhe der anliegenden Gleichspannung abhängig. Demnach wird ebenfalls ein Einfluss der Höhe der Gleichspannungsvorbelastung auf die Beanspruchung des Isoliersystems erwartet.

Jedoch ist das Durchschlagverhalten nicht nur von der Gleichspannungsvorbelastung, sondern auch von der überlagerten, transienten Spannungsbelastung abhängig. Demzufolge sollte ebenfalls der Einfluss des transienten Anteils der Mischspannung untersucht werden. Infolge des statistischen Charakters der Durchschlagentwicklung unter Stoßspannungsbelastung könnten sich veränderte Zeitparameter der transienten Überspannung ebenfalls auf das Verhalten des Isoliersystems auswirken. Insbesondere langanhaltende Überspannungen, wie sie im Fehlerfall auftreten [CIG-15], könnten dabei das Verhalten des Isoliersystems beeinflussen.

Die vorgestellten Ergebnisse konnten das ladungsträgerbasierte Berechnungsmodell qualitativ verifizieren. Jedoch wurden im Rahmen der Arbeit zahlreiche Vereinfachungen getroffen, die sich aufgrund der Komplexität der stattfindenden Prozesse und deren unbekann-

ter Mechanismen ergeben. Eine Optimierung des Berechnungsmodells erfordert daher ein detailliertes Wissen über die stattfindenden Prozesse und die implementierten Parameter. So wurde im Berechnungsmodell vereinfacht angenommen, dass intrinsische Ladungsträger bereits in dissoziierter Form vorliegen und infolge deren Mizellencharakters nicht rekombinieren. Jedoch ist aus der Literatur bekannt, dass die Dissoziation der Ölbestandteile feldstärkeabhängig ist [Ons-34, Bac-16a, Küc-17]. Ebenso wird u. a. aus den in der Arbeit vorgestellten Beobachtungen während der Versuche eine mögliche Rekombination der intrinsischen Ladungsträger geschlussfolgert. Zur Optimierung des Berechnungsmodells sollten somit die Generation und Rekombination der intrinsischen Ladungsträger untersucht und in den Randbedingungen des Modells implementiert werden.

Um die Berechnungsergebnisse quantitativ zu verbessern, müssen weiterhin die implementierten Parameter bekannt sein. So wurde u. a. die Mobilität der Ladungsträger nur abgeschätzt. In der Literatur gestaltet sich die eindeutige Bestimmung der Parameter infolge der zahlreichen Einflüsse sehr schwierig und ist daher aktueller Gegenstand der Forschung. Weiterhin müssen die Konzentration an dissoziierbaren Bestandteilen und damit die Konzentration der intrinsischen Ladungsträger bekannt sein. Wie in Abschnitt 2.3.5 beschrieben, könnten zeitlich hochaufgelöste Messungen des Stromes während eines Spannungssprunges Aufschluss über die Menge an intrinsischen Ladungsträgern und deren Dissoziation geben.

Neben einer Verbesserung der quantitativen Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse sollte das bisher genutzte, eindimensionale Berechnungsmodell auch auf mehrdimensionale Anordnungen erweitert werden. Dies setzt jedoch aufgrund der um ein Vielfaches höheren Freiheitsgrade der Berechnungen eine entsprechende Rechenleistung voraus. Darauf aufbauend muss weiterhin die Anwendbarkeit des mehrdimensionalen Modells auf komplexe Geometrien verifiziert werden.

Erst wenn auch an mehrdimensionalen Anordnungen quantitativ zuverlässige Ergebnisse ermittelt werden, ließe sich das ladungsträgerbasierte Berechnungsmodell auch zur detaillierten Abschätzung der Beanspruchung realer Isoliersysteme und damit zur dielektrischen Dimensionierung der Betriebsmittel anwenden und damit die als obsolet erachteten, etablierten Berechnungsmodelle ablösen.

Literaturverzeichnis

- [50H-19] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH. Netzentwicklungsplan Strom, 2019. [Online] www.netzentwicklungsplan.de/de (29.12.2019)
- [Ada-09] G. Adam, P. Luger und G. Stark. *Physikalische Chemie und Biophysik: Mit 51 Tabellen*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, fünfte, überarb. Auflage, 2009.
- [Alj-85] A. Alj, A. Denat, J. P. Gosse, B. Gosse und I. Nakamura. Creation of Charge Carriers in Nonpolar Liquids. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Band 20 (Ausgabe 2): S. 221–231, 1985.
- [Alj-19] M. Aljure, M. Becerra und M. E. Karlsson. On the injection and generation of charge carriers in mineral oil under high electric fields. *Journal of Physics Communications*, Band 3 (Ausgabe 3): S. 035019, 2019.
- [Arr-98] J. Arrillaga. *High voltage direct current transmission*, Band 29 aus *IEE power & energy series*. Inst. of Electrical Engineers, London, 2. Auflage, 1998.
- [Atk-13] P. W. Atkins, J. de Paula und M. Br. *Physikalische Chemie*. Wiley VCH Lehrbuchkollektion 1. Wiley-VCH Verl., Weinheim, 5. Auflage, 2013.
- [Att-03] P. Atten und J. Seyed-Yagoobi. Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 10 (Ausgabe 1): S. 27–36, 2003.
- [Br-10] R. Brsch und A. Küchler. Beanspruchungen und elektrisches Verhalten von Isoliersystemen bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchungen. In *Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung*, ETG-Fachbericht, Berlin, 2010. VDE-Verl.
- [Bac-13] K. Backhaus, J. Speck, S. Großmann und R. Fritsche. Ion Concentration triggered Break-down of Oil-Paper Insulation at high DC Voltage and Evaluation by FEM. In *18th International Symposium on High Voltage Engineering*, Seoul, 2013. ISH.
- [Bac-16a] K. Backhaus. *Das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2016.
- [Bac-16b] K. Backhaus, J. Speck, T. Gabler, S. Großmann und R. Fritsche. Die nichtlinearen Leitfähigkeitseigenschaften mineralischen Isolieröls und deren Rückwirkung auf Leitfähigkeitsmessungen. In *VDE-Hochspannungstechnik 2016*, ETG-Fachbericht, S. 596–601, Berlin und Offenbach, 2016.
- [Bac-19] K. Backhaus, T. Gabler und T. Götz. Fundamental aspects of the electric conductivity in insulation materials and the conclusions on diagnosis. In *HIGHVOLT Kolloquium '19: Prüfen und Messen an elektrischen Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik*, Dresden, 2019. HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH.
- [Bad-96] R. Badent. *Modell der elektronendominanten Streamerentladung im Isolieröl*. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1996.

- [Bah-07] M. Bahrman und B. Johnson. The ABCs of HVDC transmission technologies. *IEEE Power and Energy Magazine*, Band 5 (Ausgabe 2): S. 32–44, 2007.
- [Bel-07] E. Belgaroui, I. Boukhris, A. Kallel, G. Teyssedre und C. Laurent. A new numerical model applied to bipolar charge transport, trapping and recombination under low and high dc voltages. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Band 40 (Ausgabe 21): S. 6760–6767, 2007.
- [Bey-92] M. Beyer. *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen [für die Anwendung]*. Springer, Berlin, berichtigter Nachdr., 1992.
- [Blu-16] F. Blumenroth, U. Riechert, U. Straumann, T. Diggelmann und P.-M. Hedergott. Prüfverfahren für gasisolierte HGÜ-Komponenten und Schaltgeräte. In *VDE-Hochspannungstechnik 2016*, ETG-Fachbericht, Berlin und Offenbach, 2016.
- [Bro-08] I. N. Bronstejn, K. A. Semendjaev, G. Musiol und H. Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*. Deutsch, Frankfurt am Main, 7., vollst. überarb. und erg. Auflage, 2008.
- [Bun-17] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV), 2017.
- [Cas-95] A. Castellanos und F. Pontiga. Generalised Thomson-Onsager model for charge injection into dielectric liquids. In *IEEE 1995 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, S. 616–620, Virginia Beach, VA, USA, Oct. 1995. IEEE.
- [Che-17] C. Cheng, K. Wu, R. Su, Y. Wu und Y. Fan. Measurements of charge carrier mobility in oil immersed paper insulation by the means of pulsed electro-acoustic method. In *2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, S. 262–265, 2017.
- [Che-19] C. Cheng, K. Wu, R. Su, Y. Wu und J. Dai. A new method for carrier mobility measurement in oil immersed cellulose paper insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 26 (Ausgabe 1): S. 308–313, 2019.
- [CIG-01] CIGRE WG 14.20. Economic Assessment of HVDC Links. Technische Broschüre Nr. 186, Paris, Frankreich, 2001.
- [CIG-10a] CIGRE JWG A2/B4.28. HVDC Converter Transformers - Guidelines for Conducting Design Reviews for HVDC Converter Transformers. Technische Broschüre Nr. 407, Paris, Frankreich, 2010.
- [CIG-10b] CIGRE JWG A2/B4.28. HVDC Converter Transformers: Design Review, Test Procedures, Ageing Evaluation and Reliability in Service. Technische Broschüre Nr. 406, Paris, Frankreich, 2010.
- [CIG-12] CIGRE WG B1.32. Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV. Technische Broschüre Nr. 496, Paris, Frankreich, 2012.
- [CIG-15] CIGRE WG B4.51. Study of Converter Transients Imposed on the HVDC Converter Transformers. Technische Broschüre Nr. 609, Paris, Frankreich, 2015.
- [CIG-16] CIGRE JWG A2/D1.41. HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity. Technische Broschüre Nr. 646, Paris, Frankreich, 2016.
- [CIG-17] CIGRE JWG B4/C1.65. Recommended Voltages for HVDC Grids. Technische Broschüre Nr. 684, Paris, Frankreich, 2017.

- [Cra-18] V. Crastan und D. Westermann. *Elektrische Energieversorgung 3: Dynamik, Regelung und Stabilität, Versorgungsqualität, Netzplanung, Betriebsplanung und -Führung, Leit- und Informationstechnik, FACTS, HGÜ*. Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 2018.
- [Cze-19] M. V. Czernorucki, M. B. C. Salles, A. S. Melo, E. C. M. da Costa und L. Piegari. Effects of the HVDC System on Converter Transformers. In *2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, S. 623–630, 2019.
- [Den-11] A. Denat. Conduction and breakdown initiation in dielectric liquids. In *IEEE 17th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, S. 1–11, Trondheim, Norwegen, 2011.
- [Dor-14] J. Dorn. VSC-basierte HGÜ-Technik - Erfahrungen und Trends [Online], 2014. <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/informationen/mi2-14-vsc> (27.09.2019)
- [Ekl-10] M. Eklund, P. Jarman und M. Edwall. *Transformer oil handbook*. Nynas AB, Stockholm, 3. Auflage, 2010.
- [Fah-72] I. Fahd. *Zum Durchschlagverhalten langer Luftfunkenstrecken bei Beanspruchung mit Gleichspannung und überlagerter Schaltimpulsspannung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 1972.
- [Fas-05] G. Fasching. *Werkstoffe für die Elektrotechnik: Mikrophysik, Struktur, Eigenschaften*. Springer, Wien, 4., unveränd. Auflage, 2005.
- [Fel-85] N. Felici. High-Field Conduction in Dielectric Liquids Revisited. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Band 20 (Ausgabe 2): S. 233–238, 1985.
- [Fel-17] M. Felk, R. Pietsch, M. Kubat und T. Steiner. Protection and measuring elements in the test setup of the superimposed test voltage. In *20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Buenos Aires, 2017.
- [Fow-28] R. H. Fowler und L. Nordheim. Electron Emission in Intense Electric Fields. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Band 119 (Ausgabe 781): S. 173–181, 1928.
- [Fri-15] R. Fritsche, M. Geissler, M. Küstermann und K. Zafeiris. Isolierstoffe für HGÜ-Transformatoren. In *6. RCC Fachtagung*, S. 255–262, 2015.
- [Fri-16a] Friends of the Supergrid. Roadmap to the Supergrid Technologies, 2016.
- [Fri-16b] R. Fritsche, K. Loppach, F. Trautmann und T. Hammer. Transformatoren für die Hochspannungs-Gleichstromübertragung - Herausforderung, Technologie und Entwicklungen. In *VDE-Hochspannungstechnik 2016*, ETG-Fachbericht, S. 726–731, Berlin und Offenbach, 2016.
- [Fu-15] M. Fu, B. Luo, S. Hou, Y. Liao, M. Hao und G. Chen. Space charge dynamics in pressboard-oilpressboard multilayer system under DC voltages. In *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, S. 112–115, Sydney, Australien, 2015. IEEE.
- [Fur-05] G. Fursey, I. Brodie und P. Schwoebel. *Field Emission in Vacuum Microelectronics*. Micro-devices, Physics and Fabrication Technologies. Kluwer Academic / Plenum Publishers New York, Boston, MA, 2005.
- [Gäf-86] U. Gäfvert, H. Kols und J. Marinko. Influence of oil quality on field distortion in transformer oil under DC stress. In *Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena — Annual Report 1986*, S. 278–286. IEEE, 1986.

- [Gäf-00] U. Gäfvert, A. Jaksts und G. Jorendal. Effect of DC steady state and transient stress on electrical insulation systems of converter transformers: Paper P2-02. In *Cigré Session 2000*, Paris, Frankreich, 2000.
- [Gab-16] T. Gabler, K. Backhaus, J. Speck, S. Großmann und R. Fritsche. Untersuchungen zum ladungsträgerbasierten Durchschlagverhalten von Öl-Papier-Isolierungen bei Belastung mit hoher Gleichspannung. In *VDE-Hochspannungstechnik 2016*, ETG-Fachbericht, S. 732–737, Berlin und Offenbach, 2016.
- [Gab-17] T. Gabler, K. Backhaus, J. Speck, S. Großmann und R. Fritsche. Experimental Validation of the Charge Carrier-based Modelling of Oil-Paper Insulations at high DC Voltage Stress. In *20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Buenos Aires, 2017.
- [Gab-18a] T. Gabler, K. Backhaus, T. Gotz, S. Großmann und R. Fritsche. Effect of the Non-Linear Electric Conductivity of Mineral Insulating Oil on the Dielectric Strength at High DC Voltage Stress. In *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, S. 54–57, Cancun, Mexiko, 10/21/2018 - 10/24/2018. IEEE.
- [Gab-18b] T. Gabler, K. Backhaus, T. Götz, R. Fritsche, T. Linde und S. Großmann. Untersuchung des Durchschlagverhaltens von Öl-Papier-isolierten Anordnungen bei Überlagerung von Gleich- und Blitzimpulsspannung. In *VDE-Hochspannungstechnik 2018*, ETG-Fachbericht, S. 457–462, Berlin, 2018.
- [Gab-18c] T. Gabler, K. Backhaus, J. Speck, S. Großmann und R. Fritsche. Experimental Investigations of Oil-Insulated Arrangements at High DC Voltage and Composite Voltage Stress considering a Charge Carrier-based Approach: Paper D1-106. In *Cigré Session 2018*, Paris, Frankreich, 2018.
- [Gab-19a] T. Gabler, K. Backhaus, R. Fritsche und S. Großmann. Investigations on the Polarity Dependent Charge Carrier Injection in Dielectric Liquids at High DC Voltage Stress. In B. Németh (Hrsg.), *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering*, Band 598 aus *Lecture Notes in Electrical Engineering*, S. 1121–1131. Springer Nature, Cham, 2019.
- [Gab-19b] T. Gabler, K. Backhaus, S. Grosmann und R. Fritsche. Dielectric modeling of oil-paper insulation systems at high DC voltage stress using a charge-carrier-based approach. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 26 (Ausgabe 5): S. 1549–1557, 2019.
- [Gaf-92] U. Gafvert, A. Jaksts, C. Tornkvist und L. Walfridsson. Electrical field distribution in transformer oil. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Band 27 (Ausgabe 3): S. 647–660, 1992.
- [Ger-74] C. Gerthsen, H. O. Kneser und H. Vogel. *Physik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 12. Auflage, 1974.
- [Gla-75] L. Glasser. Proton conduction and injection in solids. *Chemical Reviews*, Band 75 (Ausgabe 1): S. 21–65, 1975.
- [Ham-05] C. H. Hamann und W. Vielstich. *Elektrochemie*. Wiley-VCH-Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 4., vollst. überarb. und aktual. Auflage, 2005.
- [Han-58] R. Hancox und H. Tropper. The breakdown of transformer oil under impulse voltages. *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*, Band 105 (Ausgabe 21): S. 250, 1958.

- [Hao-15] M. Hao. *Space charge behaviour in thick oil pressboard insulation systems for converter transformers*. Doctoral thesis, University of Southampton, Southampton, 2015.
- [Hau-69] W. Hauschild. *Zum Öldurchschlag im inhomogenen Feld bei Schaltspannungen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 1969.
- [Hau-14] W. Hauschild und E. Lemke. *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Heb-89] R. E. Hebner. Measurement of Electrical Breakdown in Liquids. In E. E. Kunhardt, L. G. Christophorou und L. H. Luessen (Hrsg.), *The Liquid State and Its Electrical Properties*, Band 193 aus *NATO ASI Series, Series B*, S. 519–537. Springer, Boston, MA, 1989.
- [Hel-79] H. Helmholtz. Studien über electrische Grenzsichten. *Annalen der Physik*, Band 243 (Ausgabe 7): S. 337–382, 1879.
- [Her-16a] M. Hering. *Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2016.
- [Her-16b] M. Hering, T. Gabler, J. Speck, S. Großmann und U. Riechert. Einfluss der Gleichspannungsbelastung auf das Überschlagsverhalten stöstellenbehafteter Isolatoren für gasisierte Systeme bei Überlagerung mit Blitzstoßspannung. In *VDE-Hochspannungstechnik 2016*, ETG-Fachbericht, S. 60–65, Berlin und Offenbach, 2016.
- [Hik-96] M. Hikita, M. Matsuoka, R. Shimizu, K. Kato, N. Hayakawa und H. Okubo. Kerr Electro-optic Field Mapping and Charge Dynamics in Impurity-doped Transformer Oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 3 (Ausgabe 1): S. 80–86, 1996.
- [Hjo-13] O. Hjortstam, C. Sonehag und J. Schiessling. Comparison of simulated and measured field dependent charge injection in mineral oil under dc bias. In *23rd Nordic Insulation Symposium*, S. 11–14. Trondheim, Norwegen, 2013.
- [Jin-14] Y. Jing, I. Timoshkin, M. Wilson, M. Given, S. Macgregor, T. Wang und J. Lehr. Dielectric properties of natural ester, synthetic ester midel 7131 and mineral oil diala D. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 21 (Ausgabe 2): S. 644–652, 2014.
- [Jud-12] T. Judendorfer. *Oil-cellulose insulation systems for HVDC applications*. Dissertation, Technische Universität Graz, Graz, 2012.
- [Küc-03] A. Küchler, F. Hüllmandel, J. Hoppe, D. Jahnel, C. Krause, U. Piovan und N. Koch. Impact of Dielectric Material Responses on the Performance of HVDC Power Transformer Insulations. In *International Symposium on High Voltage Engineering*, 2003.
- [Küc-15] A. Küchler. Ausbildung und Steuerung elektrischer Felder bei Gleichspannungsbeanspruchung. In *6. RCC Fachtagung*, S. 12–50, 2015.
- [Küc-17] A. Küchler. *Hochspannungstechnik: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 4. Auflage, 2017.
- [Kah-88] M. Kahle. *Elektrische Isoliertechnik*. Verlag Technik, Berlin, 1. Auflage, 1988.
- [Kis-99] K. Kist. *Streamerausbreitung im Mischdielektrikum Isolieröl-Transformerboard*. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, 1999.
- [Kok-00] W. Kok. *Capillary Electrophoresis: Instrumentation and Operation*, Band 4 aus *CHROMATOGRAPHIA CE-Series*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2000.

- [Kra-12] C. Krause. Isolierstoffe aus Zellulose für die elektrische Isolierung von Leistungstransformatoren. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Band 129 (Ausgabe 5): S. 332–341, 2012.
- [Kur-12] P. Kurzweil und P. Scheipers. *Chemie: Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. Naturwissenschaftliche Grundlagen. Vieweg+Teubner Verlag /Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 9., erw. Auflage, 2012.
- [Kwo-19] I.-S. Kwon, S.-J. Kim, M. Asif und B.-W. Lee. Evaluation of Electric Field and Space Charge Dynamics in Dielectric under DC Voltage with Superimposed Switching Impulse. *Energies*, Band 12 (Ausgabe 10): S. 1836, 2019.
- [Läm-74] J. Lämmel. *Zur Bemessung von Hochspannungsprüfanlagen für die Überlagerung von Gleichspannung mit Impulsspannung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 1974.
- [LeR-04] S. Le Roy, P. Segur, G. Teyssedre und C. Laurent. Description of bipolar charge transport in polyethylene using a fluid model with a constant mobility: model prediction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Band 37 (Ausgabe 2): S. 298–305, 2004.
- [Les-88] O. Lesaint und R. Tobazeon. Streamer generation and propagation in transformer oil under AC divergent field conditions. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Band 23 (Ausgabe 6): S. 941–954, 1988.
- [Les-91] O. Lesaint, P. Gournay und R. Tobazeon. Investigations on transient currents associated with streamer propagation in dielectric liquids. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Band 26 (Ausgabe 4): S. 699–707, 1991.
- [Les-16] O. Lesaint. Prebreakdown phenomena in liquids: propagation ‘modes’ and basic physical properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Band 49 (Ausgabe 14), 2016.
- [Lew-94] T. J. Lewis. Basic electrical processes in dielectric liquids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 1 (Ausgabe 4): S. 630–643, 1994.
- [Li-16] S. Li, Y. Zhu, D. Min und G. Chen. Space Charge Modulated Electrical Breakdown. *Scientific reports*, Band 6, 2016.
- [Lie-68] F. Liebscher und W. Held. *Kondensatoren: Dielektrikum Bemessung Anwendung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1968.
- [Lie-09] M. Liebschner. *Interaktion von Ölspalten und fester Isolation in HVDC-Barrierensystemen*. Dissertation, Technischen Universität Ilmenau, Düsseldorf, 2009.
- [Mal-36] L. Malter. Thin Film Field Emission. *Physical Review*, Band 50: S. 48–58, 1936.
- [Maz-90] C. Mazzetti, M. Pompili und E. O. Forster. Study of the time to breakdown in transformer oil under impulse conditions. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Band 25 (Ausgabe 6): S. 1111–1116, 1990.
- [Min-71] R. M. Minday, L. D. Schmidt und H. T. Davis. Excess Electrons in Liquid Hydrocarbons. *The Journal of Chemical Physics*, Band 54 (Ausgabe 7): S. 3112–3125, 1971.
- [Mos-79a] W. Mosch und W. Hauschild. *Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid*. Hüthig, Heidelberg und Basel, 1979.
- [Mos-79b] H. P. Moser. *Transformerboard: Die Verwendung von Transformerboard in Grossleistungstransformatoren*. Birkhäuser AG / Scientia Electrica, Basel, 1979.

- [Mos-87] H. P. Moser und V. Dahinden. *Transformerboard II: Eigenschaften und Anwendung von Transformerboard aus verschiedenen Fasern*. Styria, Graz, 1987.
- [Mur-63] E. J. Murphy. CONDUCTION AND ELECTROLYSIS IN CELLULOSE. *Canadian Journal of Physics*, Band 41 (Ausgabe 7): S. 1022–1035, 1963.
- [Now-87] H. Nowaczyk, S. Grzybowski und E. Kuffel. Electrical Breakdown Strength of Paper-Oil Insulation under Pulsating Voltages. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Band EI-22 (Ausgabe 3): S. 249–253, 1987.
- [Öft-19] H.-P. Öftering, P. Rumpelt, A. Kuchler, F. Jenau und R. Fritsche. Time-dependent dielectric behavior of mineral oil under the influence of different DC voltage conditions. In *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, S. 1–4, Rom, Italien, 6/23/2019 - 6/27/2019. IEEE.
- [Ohs-83] I. Ohshima, S. Motegi, M. Honda, T. Yanari und Y. Ebisawa. HVDC Breakdown of Transformer Oil and the Effect of Space Charge on it. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Band PAS-102 (Ausgabe 7): S. 2208–2215, 1983.
- [Oku-97] H. Okubo, R. Shimizu, A. Sawada, K. Kato, N. Hayakawa und M. Hikita. Kerr electro-optic field measurement and charge dynamics in transformer-oil/solid composite insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 4 (Ausgabe 1): S. 64–70, 1997.
- [Oku-08] H. Okubo und K. Kato. Charge behavior and field measurement techniques in different kinds of insulating oil for power transformers. In *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, S. 1–6, 2008.
- [Oku-15] H. Okubo, H. Kojima, N. Hayakawa, S. Jaufer und C. Krause. Kerr Electro-Optic Field Measurement and Electrical Insulation Techniques in HVDC Oil-Pressboard Composite Insulation Systems. In *19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, 2015.
- [Ons-34] L. Onsager. Deviations from Ohm's Law in Weak Electrolytes. *The Journal of Chemical Physics*, Band 2 (Ausgabe 9): S. 599, 1934.
- [Phi-82] E. Philippow (Hrsg.). *Systeme der Elektroenergietechnik*, Band 6 aus *Taschenbuch Elektrotechnik*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1. Auflage, 1982.
- [Pie-15] R. Pietsch, M. Felk, M. Hinow und M. Kubat. Tests with Superimposed Voltages. In *HIGHVOLT Kolloquium*, S. 62–65, Dresden, 2015.
- [PRO-20] PROMOTioN - "Progress on Meshed HVDC Offshore Transmission Networks". D12.4 - Final Deployment Plan [Online], 2020. <https://www.promotion-offshore.net> (22.10.2020)
- [Puk-08] J. Pukel. *Elektrische Festigkeit von Isolieröl*. Dissertation, Technische Universität Graz, Graz, 2008.
- [Rah-09] S. Rahmoon. *Elektrisches Verhalten der Windungsisolierung von Öltransformatoren*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2009.
- [Raz-03] M. Razavy. *Quantum theory of tunneling*. World Scientific, River Edge, NJ, 2003.
- [Roz-11] P. Rozga. Influence of paper insulation on the prebreakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 18 (Ausgabe 3): S. 720–727, 2011.

- [Rum-19] P. Rumpelt. *Isolieröle auf Esterbasis für den Einsatz in HGÜ-Betriebsmitteln*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Dortmund, 2019.
- [Sch-23] W. Schottky. Über kalte und warme Elektronenentladungen. *Zeitschrift für Physik*, Band 14 (Ausgabe 1): S. 63–106, 1923.
- [Sch-67] H. Scherer. *Das Durchschlagverhalten von Isolieröl bei gleichzeitiger Einwirkung von Gleich- und Wechselspannung*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1967.
- [Sch-70] W. F. Schmidt und A. O. Allen. Mobility of Electrons in Dielectric Liquids. *The Journal of Chemical Physics*, Band 52 (Ausgabe 9): S. 4788–4794, 1970.
- [Sch-74] P. Schulz. *Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern*. Wissenschaftliche Bücherei. Braun, Karlsruhe, 2., neubearb. Auflage, 1974.
- [Sch-81] A. J. Schwab. *Hochspannungsmeßtechnik: Meßgeräte und Meßverfahren*. Springer, Berlin, 2., neubearb. und erw. Auflage, 1981.
- [Sch-07] W. Schufft (Hrsg.). *Taschenbuch der elektrischen Energietechnik: Mit 388 Bildern und 102 Tabellen*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, München, 2007.
- [Sch-10a] H. V. Scheller und P. Ulvskov. Hemicelluloses. *Annual review of plant biology*, Band 61: S. 263–289, 2010.
- [Sch-10b] M. Schenk und R. Fritsche. Isoliersysteme für HVDC Transformatoren (800 kV) – Stand der Technik und Entwicklungstrends. In *Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung*, ETG-Fachbericht, Berlin, 2010. VDE-Verl.
- [Sch-10c] K. Schon. *Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik: Grundlagen - Messgeräte - Messverfahren*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Sch-11] J. Schiessling, C. Forssen, L. Walfridsson, C. Tornkvist und U. Gafvert. Evolution of the electric field due to forced flow in oil pressboard ducts. In *2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, S. 1–4, Trondheim, Norwegen, 2011. IEEE.
- [Sch-12] A. J. Schwab. *Elektroenergiesysteme*. Springer, Dordrecht, 2012.
- [Sch-16] F. Schober. *Elektrische Leitfähigkeit und dielektrisches Verhalten von Pressspan in HGÜ-Isoliersystemen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2016.
- [Sel-84] S. Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Springer Vienna, Vienna, 1984.
- [Sha-11] M. Shafiee Zadeh. *Measurement of ion Mobility in dielectric liquids*. Master thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2011.
- [Shi-15] A. Shirvani Boroujeni. *Ein Beitrag zum Entladungsverhalten langer Luftfunkenstrecken bei Blitzspannung*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2015.
- [Sin-90] P. J. Sinz. *Der Einfluß von Feuchte und Partikeln auf die elektrische Festigkeit von Isolierölen*. Dissertation, Technische Universität Graz, Graz, 1990.
- [Son-12] C. Sonehag. *Modelling of Ion Injection in Oil-Pressboard Insulation Systems*. Examensarbeit, Uppsala Universitet, 2012.
- [Tei-14] R. Teixeira Pinto. *Multi-Terminal DC Networks: System Integration, Dynamics and Control*. Doctoral thesis, TU Delft, Delft, Niederlande, 2014.
- [Ter-62] J. Terlecki. Measurement of the Mobility of Negative Ions in Saturated Hydrocarbon Liquids with High Electric Fields. *Nature*, Band 194 (Ausgabe 4824): S. 172–173, 1962.

- [Tho-75] W. R. L. Thomas, E. O. Forster und J. M. Goldschwarz. Electrical conductance and breakdown in liquid hydrocarbons. In *Proceedings of 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, S. 49–54, Delft, Niederlande, 1975. Delft University Press.
- [Tor-95] Y. Torshin. On the existence of leader discharges in mineral oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 2 (Ausgabe 1): S. 167–179, 1995.
- [Tor-02] Y. Torshin. The universal discharge mechanism in mineral oil and possible estimation of its breakdown voltage. In *Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids, ICDL 2002*, S. 107–110, Graz, 2002. IEEE.
- [Vah-14] F. Vahidi, S. Tenbohlen, M. Rosner, C. Perrier und H. Fink. Influence of electrode material on conductivity measurements under DC stresses. In *2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2014)*, S. 1–5, Bled, Slowenien, 2014. IEEE.
- [Vah-16] F. Vahidi, K. Rapp, J. Luksich und S. Tenbohlen. Vergleichsstudie zum Einfluss von Cellulose Partikeln auf die elektrische Leitfähigkeit von Mineralöl- und natürliche Ester. In *VDE-Hochspannungstechnik 2016*, ETG-Fachbericht, Berlin und Offenbach, 2016.
- [Vah-17] F. Vahidi, S. Haegele, S. Tenbohlen, K. Rapp und A. Sbravati. Study on moisture influence on electrical conductivity of natural ester fluid and mineral oil. In *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, S. 290–293, Baltimore, MD, USA, 2017. IEEE.
- [Vah-20] F. Vahidi. *Electrical Conductivity of Oil-Impregnated Pressboard Barrier Systems for HVDC Transformer Insulation*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2020.
- [van-19] D. van Hertem, W. Leterme, G. Chaffey, M. Abedrabbo, M. Wang, F. Zerihun und M. Barnes. Substations for Future HVdc Grids: Equipment and Configurations for Connection of HVdc Network Elements. *IEEE Power and Energy Magazine*, Band 17 (Ausgabe 4): S. 56–66, 2019.
- [Wie-29] M. Wien. Über den Spannungseffekt der elektrolytischen Leitfähigkeit in sehr starken Feldern. *Annalen der Physik*, Band 393 (Ausgabe 3): S. 400–416, 1929.
- [Wim-18] R. Wimmer, R. Fritsche, T. Hammer, W. Kutzleb, K. Loppach, L. Zheong und Z. Jin. Introduction of a new level of HVDC to UHVAC linked systems with respect to main component transformer technology and design: Paper B4-126. In *Cigré Session 2018*, Paris, Frankreich, 2018.
- [Wu-16] K. Wu und C. Cheng. Interface charge behaviors in the composite insulation of oil immersed paper. In *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, S. 1–5, Chengdu, China, 2016. IEEE.
- [Yan-12a] L. Yang, S. M. Gubanski, Y. V. Serdyuk und J. Schiessling. Dielectric properties of transformer oils for HVDC applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 19 (Ausgabe 6): S. 1926–1933, 2012.
- [Yan-12b] L. Yang, M. S. Zadeh, J. Schiessling, O. Hjortstam, Y. V. Serdyuk und S. M. Gubanski. Measurement of Ion Mobility in Transformer Oils for HVDC Applications. In *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, S. 3–6, Shanghai, China, 2012.
- [Yos-19] S. Yoshida, T. Yamada, Nakano Y., M. Kozako und M. Hikita. Numerical simulation for creepage discharge in oil/pressboard composite insulation system with multiple pressboards. *Cigre Science & Engineering*, Band 16: S. 64–69, 2019.

- [Zha-19a] J. Zhang, Q. Chen, M. Chi, P. Tan, W. Sun und J. Cao. Effect of temperature on space charge characteristics of oil-paper insulation and its numerical simulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Band 26 (Ausgabe 4): S. 1334–1342, 2019.
- [Zha-19b] Y. Zhang, S. Xie, Q. Chen, P. Sun, C. Zhang, L. Ye, Z. Mu und W. Sima. The effect of interface of electrode and liquid on space charge injection in transformer oil under impulse voltage. In *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, S. 1–4, Rom, Italien, 6/23/2019 - 6/27/2019. IEEE.
- [Zhu-18] Y. Zhu, S. Li, D. Min, S. Li, H. Cui und G. Chen. Space Charge Modulated Electrical Breakdown of Oil Impregnated Paper Insulation Subjected to AC-DC Combined Voltages. *Energies*, Band 11 (Ausgabe 6): S. 1547, 2018.
- [Zou-98] A. Zouaghi und A. Beroual. Barrier Effect on the Dielectric Strength of Oil Gaps under DC Voltage. In *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, S. 640–643, Arlington, VA, USA, 1998.
- [Zou-19a] R. Zou, J. Hao und R. Liao. Space/Interface Charge Analysis of the Multi-Layer Oil Gap and Oil Impregnated Pressboard Under the Electrical-Thermal Combined Stress. *Energies*, Band 12 (Ausgabe 6): S. 1099, 2019.
- [Zou-19b] R. Zou, J. Hao und R. Liao. DC Breakdown and Space Charge Characteristics of Mineral Oil Impregnated Thermally Upgraded Paper with Different Ageing Conditions. In *2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, S. 1–4, Rom, Italien, 6/23/2019 - 6/27/2019. IEEE.

Normen

IEC 60060-1	DIN EN 60060-1 (VDE 0432-1):2011-10: Hochspannungs-Prüftechnik Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen (IEC 60060-1:2010) Deutsche Fassung EN 60060-1:2010
IEC 60060-2	DIN EN 60060-2 (VDE 0432-2):2011-10: Hochspannungs-Prüftechnik Teil 2: Messsysteme (IEC 60060-2:2010) Deutsche Fassung EN 60060-2:2011
IEC 60641-2	DIN EN 60641-2 (VDE 0315-2):2005-05: Tafel- und Rollenpressspan für elektrotechnische Anwendungen Teil 2: Prüfverfahren (IEC 60641-2:2004) Deutsche Fassung EN 60641-2:2004
IEC 60763-2	DIN EN 60763-2 (VDE 0314-2):2007-12: Bestimmung für Blockspan Teil 2: Prüfverfahren (IEC 60763-2:2007) Deutsche Fassung EN 60763-2:2007
IEC 61378-2	DIN EN 61378-2 (VDE 0532-42):2001-08: Stromrichtertransformatoren Teil 2: Transformatoren für HGÜ-Anwendungen (IEC 61378-2:2001) Deutsche Fassung EN 61378-2:2001

Bilderverzeichnis

Bild 2.1:	Beispiele von Brückenschaltungen der VSC- und LCC-Technik	4
Bild 2.2:	Strukturformeln der Hauptbestandteile des mineralischen Isolieröls nach [Ekl-10] .	7
Bild 2.3:	Ausschnitt der Strukturformel eines Zellulosepolymers als Grundstoff des Pressspans nach [Mos-79b]	8
Bild 2.4:	Akkumulierte, anionische Mizellen an der metallischen Anode nach [Bac-16a] – δ : Dipolmoment	11
Bild 2.5:	Schematische Visualisierung des Trichters nach [Sch-23] mit einer Verringerung der Energiebarriere von a nach $c - s$: Größe der Absenkung	12
Bild 2.6:	Beziehung zwischen Elektronenenergie und Distanz für eine metallische Oberfläche im Fluid unter elektrischer Feldstärkebeanspruchung nach [Fel-85] – W : Austrittsarbeit; s : Verringerung der Barriere nach Schottky	13
Bild 2.7:	An einer schwach inhomogenen Anordnung gemessene, polaritätsabhängige Injektionsraten I bezogen auf die Oberfläche A_{inj} der injizierenden Elektrode in Abhängigkeit zur lokalen, geometriebedingten Feldstärke an der Elektrode E_{inj} nach [Bac-16b]	14
Bild 2.8:	Schematische Visualisierung der schnellen Arten der Deformationspolarisation . .	16
Bild 2.9:	Schematische Darstellung der Raumladungspolarisation unter Gleichspannungsbelastung	16
Bild 2.10:	Schematische Darstellung der Orientierungspolarisation	17
Bild 2.11:	Zeitabhängiges Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit in flüssigen Dielektrika nach [Küc-17]	20
Bild 2.12:	Prinzipieller Verlauf des Stromes durch ein Dielektrikum nach Zuschalten der Gleichspannung und Aufschlüsselung dessen Bestandteile nach der klassischen Betrachtung auf Basis der Polarisation des Dielektrikums	21
Bild 2.13:	Nachbildung eines zweischichtigen Öl-Papier-Mischdielektrikums mithilfe elektrischer Ersatzglieder nach [CIG-16, Küc-17, Lie-09]	22
Bild 2.14:	Grundlegende Mechanismen der ladungsträgerbasierten Leitfähigkeit mineralischen Isolieröls nach [Bac-16a]	24
Bild 2.15:	Prinzipieller Verlauf des Stromes durch ein Dielektrikum nach Zuschalten der Gleichspannung und Aufschlüsselung dessen Bestandteile entsprechend des Ladungsträgerbasierten Modells nach [Gab-19b]	25
Bild 2.16:	Entladungseinsatz an der Kathode (schwarz) einer homogenen Grundanordnung in flüssigem n-Hexan ca. $1 \mu s$ vor dem Durchschlag der Anordnung [Tho-75]	27
Bild 2.17:	Schematische Darstellung der Durchschlaghöchstfeldstärke E_d in Abhängigkeit der Beanspruchungsdauer von ölsolierten Anordnungen nach [Küc-17]	29
Bild 2.18:	Schematische Darstellung der im ladungsträgerbasierten Modell nach PNP nachgebildeten Prozesse am Beispiel einer ölsolierten Anordnung	34

Bild 2.19:	Schematischer Aufbau eines Hochspannungsprüfkreises nach IEC 60060-1 zum Erzeugen einer zusammengesetzten Prüfspannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung	45
Bild 2.20:	Bei der Überlagerung von Gleich- und Stoßspannung erzeugbare uni- und bipolare Mischspannung in der 4-Quadranten-Darstellung	47
Bild 2.21:	Zusammensetzung der Mischspannung sowie Anwendung der 4-Quadranten-Darstellung nach [Gab-18c] zur Darstellung der ermittelten Durchschlagspannung U_{DS} in Abhängigkeit des Gleichspannungsanteils U_{DC}	48
Bild 4.1:	Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen unter Gleichspannungsbelastung genutzten Öl- und Öl-Papier-isolierten Anordnungen	53
Bild 4.2:	Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen unter Gleichspannungsbelastung genutzten, planparallelen Plattenanordnung im ölgefüllten Prüfgefäß, hier am Beispiel der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i)	55
Bild 4.3:	Foto der als Schutzringanordnung ausgeführten Erdelektrode mit und ohne Ringbarriere	55
Bild 4.4:	Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen bei zusammengesetzter Spannungsbelastung an der blanken Anordnung genutzten, modifizierten planparallelen Plattenanordnung	56
Bild 4.5:	Schematische Darstellung der in den Durchschlagversuchen bei zusammengesetzter Spannungsbelastung an der Anordnung mit isolierten Elektroden genutzten, modifizierten planparallelen Plattenanordnung	57
Bild 4.6:	Darstellung der in den Durchschlagversuchen genutzten Elektrodenanordnung im Prüfgefäß am Beispiel der Anordnung mit isolierten Elektroden (vgl. Bilder 4.2 und 4.5)	57
Bild 4.7:	Ersatzschaltbild der Einweg-Gleichrichterschaltung zum Erzeugen einer Gleichspannung bis $U_{DC} = \pm 130 \text{ kV}$	58
Bild 4.8:	Ersatzschaltbild der Greinacher-Verdopplerschaltung zum Erzeugen einer hohen Gleichspannung bis zu $U_{DC} = \pm 260 \text{ kV}$	58
Bild 4.9:	Ersatzschaltbild des Stoßgenerators in Kaskadenschaltung nach Marx zum Erzeugen einer hohen Blitzstoßspannung	59
Bild 4.10:	Ersatzschaltbild des Prüfkreises zum Erzeugen einer zusammengesetzten Prüfspannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung nach [Gab-18c]	60
Bild 4.11:	Fotografische Darstellung des Prüfkreises zum Erzeugen einer zusammengesetzten Prüfspannung aus Gleich- und Blitzstoßspannung	61
Bild 4.12:	Prinzipskizze der Strommesseinrichtung nach [Gab-19b]	62
Bild 4.13:	Benötigte Geräte zur Aufbereitung des Isolieröls und der Papierproben	63
Bild 4.14:	Schematische Verläufe der Spannungsteigerung in den Durchschlagversuchen bei reiner Gleichspannungsbelastung und überlagerter Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung	65
Bild 5.1:	In den Berechnungsmodellen hinterlegte, eindimensionale Modelle der genutzten Öl-Papier-isolierten Anordnungen	67
Bild 5.2:	In den Berechnungsmodellen implementierte Spannungsverläufe bei reiner Gleichspannungsbelastung sowie der überlagerten Spannungsbelastung	69
Bild 5.3:	Mit dem PNP-Berechnungsmodell zum Zeitpunkt t_{SSV} nach der ersten Spannungssteigerung auf $0,5 U_{DC} = 50 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$	71

Bild 5.4:	Mit dem PNP-Berechnungsmodell im stationären Zustand $t_{\text{stat SSV}}$ der ersten Stufe bei $U_{\text{DC SSV}} = 50 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$	72
Bild 5.5:	Mit dem PNP-Berechnungsmodell zum Zeitpunkt t_{DC} nach weiterer Spannungssteigerung auf $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung	73
Bild 5.6:	Mit dem PNP-Berechnungsmodell im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung	74
Bild 5.7:	Mit erhöhten Ladungsträgermobilitäten zum Zeitpunkt t_{SSV} nach der ersten Spannungssteigerung auf $0,5 U_{\text{DC}} = 50 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen mit den ursprünglichen Mobilitäten (Mob-0)	75
Bild 5.8:	Mit erhöhten Ladungsträgermobilitäten im stationären Zustand $t_{\text{stat SSV}}$ der ersten Spannungssteigerung auf $0,5 U_{\text{DC}} = 50 \text{ kV}$ berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen mit den ursprünglichen Mobilitäten (Mob-0)	76
Bild 5.9:	Mit erhöhten Ladungsträgermobilitäten nach weiterer Spannungssteigerung auf $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{DC} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen mit den ursprünglichen Mobilitäten (Mob-0)	77
Bild 5.10:	Mit verringerten intrinsischen Ladungsträgerkonzentrationen im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen der Ursprungskonzentrationen (Int-0)	78
Bild 5.11:	Mit erhöhten intrinsischen Ladungsträgerkonzentrationen im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen der Ursprungskonzentrationen (Int-0)	79
Bild 5.12:	Mit dem PNP-Berechnungsmodell im stationären Zustand der zweiten Stufe bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{stat} berechnete Ladungsträgerverteilung sowie die entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der ölisolierten Anordnung bei einem Ölspace von $s = 6 \text{ mm}$	80
Bild 5.13:	Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung einer Anordnung mit papierisolierten Elektroden direkt nach der Spannungssteigerung auf $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$ zum Zeitpunkt t_{DC}	81
Bild 5.14:	Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit papierisolierten Elektroden im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{\text{DC}} = 100 \text{ kV}$	82

Bild 5.15:	Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit blanker Erdelektrode (Kathode) und papierisolierter Hochspannungselektrode (Anode) zum Zeitpunkt t_{DC} direkt nach der Spannungssteigerung auf $U_{DC} = 100 \text{ kV}$	84
Bild 5.16:	Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit blanker Erdelektrode (Kathode) und papierisolierter Hochspannungselektrode (Anode) im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$	85
Bild 5.17:	Gegenüberstellung der berechneten Feldstärkeverteilungen der Öl-Papier-isolierten Anordnungen anhand des stationären Strömungsfeldes auf Basis konstanter elektrischer Leitfähigkeiten der Isoliermedien	86
Bild 5.18:	Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren und blanken Elektroden im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ gegenübergestellt mit den Berechnungsergebnissen anhand einer Strömungsfeldberechnung auf Basis konstanter elektrischer Leitfähigkeiten der Isoliermedien	87
Bild 5.19:	Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung einer Anordnung mit einer blanken und einer papierisolierten Elektrode im stationären Zustand t_{stat} bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ am Beispiel der Anordnung mit isolierter Kathode	89
Bild 5.20:	Detaillierte Betrachtung der Auswirkung des Polaritätseffekts der Injektion auf die Feldstärkeverteilung einer unsymmetrischen Anordnung am Beispiel der Anordnung isolierter Anode oder isolierter Kathode nach [Gab-18a]	90
Bild 5.21:	In den Berechnungen nachgebildete Spannungsbelastungen	91
Bild 5.22:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei reiner Gleichspannungs- und Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum zum Zeitpunkt t_0 nach Bild 5.21	91
Bild 5.23:	Berechnete Ladungsträgerverteilung und entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der blanken Elektrodenanordnung im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung U_{DC0} bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$	92
Bild 5.24:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung nach Bild 5.21	93
Bild 5.25:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden bei reiner Gleichspannungs- und Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum zum Zeitpunkt t_0 nach Bild 5.21	95
Bild 5.26:	Berechnete Ladungsträgerverteilung sowie entsprechende Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit isolierten Elektroden im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung U_{DC0} bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$	95
Bild 5.27:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilung der Anordnung mit isolierten Elektroden bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung nach Bild 5.21	96
Bild 5.28:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden unter Gleich- und Mischspannungsbelastung nach Bild 5.21 auf Grundlage der klassischen, resistiv-kapazitiven Modellierung	97
Bild 5.29:	Im Berechnungsmodell zur Nachbildung des Abstoßens der Papierbarrieren von den Elektroden der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) hinterlegtes, eindimensionales Modell	98

Bild 5.30:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden und abgestoßenen Papierbarrieren im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung, bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ sowie der reinen Gleichspannungsbelastung $U_{DC} = 100 \text{ kV}$	99
Bild 5.31:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen bei unipolarer Mischspannungsbelastung ② nach Bild 5.21 der Anordnung mit abgestoßenen Papierbarrierender Anordnung mit abgestoßenen Papierbarrieren im Vergleich zur Anordnung mit isolierten Elektroden und anliegenden Barrieren nach Bild 5.27a	100
Bild 5.32:	Berechnete Potential- und Feldstärkeverteilungen bei bipolarer Mischspannungsbelastung ④ nach Bild 5.21 der Anordnung mit abgestoßenen Papierbarrieren im Vergleich zur Anordnung mit isolierten Elektroden und anliegenden Papierbarrieren nach Bild 5.27b	100
Bild 6.1:	Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der offenen und der geschlossenen, blanken Anordnung mit Ergebnissen der blanken, gekreuzten Zylinder aus [Bac-16a] in Abhängigkeit der Ölpaltweite s nach [Gab-16], bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS 6 \text{ mm RB}}$ der blanken, mit Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölpaltweite von $s = 6 \text{ mm}$	103
Bild 6.2:	Bewegung der Ladungsträger des umgebenden Ölvolumens ins Innere der offenen Elektrodenanordnung	104
Bild 6.3:	Rechnerisch auf Basis des PNP-Modells sowie anhand der Geometrie ermittelte Randfeldstärke E_{Rand} an der Innenelektrode einer ölisolierten, coaxialen Zylinderanordnung abhängig von der Höhe der Gleichspannungsbelastung U_{DC} nach [Bac-16a]	105
Bild 6.4:	Darstellung des mithilfe des PNP-Modells berechneten, zeitabhängigen Betrags der maximalen Feldstärke E_{max} einer ölisolierten Anordnung bezogen auf den Betrag der maximalen Feldstärke $E_{\text{max stat}}$ im stationären Zustand der ersten Stufe für eine stufenförmige Spannungssteigerung	107
Bild 6.5:	Exemplarischer Vergleich des an der offen und der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung gemessenen Stromes I bezogen auf den stationären Strom $I_{0,75 \text{ stat offen}}$ der offenen Anordnung bei der 0,75-fachen Durchschlagspannung nach [Gab-19b]	108
Bild 6.6:	Vergrößerung des Bereiches innerhalb der ersten 15 min des an der offen und der mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung gemessenen Stromes I bezogen auf den stationären Strom $I_{0,75 \text{ stat offen}}$ der offenen Anordnung bei der 0,75-fachen Durchschlagspannung aus Bild 6.5	109
Bild 6.7:	Aufsteigen und Absinken des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche der Hochspannungsdurchführung der offenen und der abgeschlossenen Anordnung unter Gleichspannungsbelastung	110
Bild 6.8:	Schematisch dargestellter zeitlicher Verlauf des Aufsteigens und Absinken des Öls aus Bild 6.7 in Bezug zum zeitlichen Verlauf der Spannungsstufe	111
Bild 6.9:	Bewegung des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche der Hochspannungsdurchführung mit negativer Polarität nach [Bac-16a]: ① Aufsteigen des Öls ② Absinken des Öls	112
Bild 6.10:	Gegenüberstellung der in Abschnitt 5.2 berechneten Maximalfeldstärken E_{max} im Ölpalt bzw. im Isolierpapier bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der Öl-Papier-isolierten Anordnungen mit einer Ölpaltweite von $s = 6 \text{ mm}$	113

Bild 6.11:	Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der blanken Anordnung (b-b), der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) und der Anordnung mit einer isolierten und einer blanken Elektrode (i-b) nach [Gab-17] mit den abgeschätzten Ergebnissen einer klassischen Strömungsfeldberechnung der der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) auf Grundlage der Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit der Ölsplattweite s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ RB}$ der blanken, mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölsplattweite von $s = 6\ mm$	114
Bild 6.12:	Richtung der Durchschlagspuren im Papier der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i)	115
Bild 6.13:	Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der blanken Anordnung (b-b), der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) und der Anordnung mit einer isolierten und einer blanken Elektrode (i-b) nach [Gab-16] in Abhängigkeit der Ölsplattweite s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ RB}$ der blanken, mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölsplattweite von $s = 6\ mm$; Vergleich zwischen der abgeschlossenen Plattenanordnung und der gekreuzten Zylinderanordnung aus [Bac-16a]	117
Bild 6.14:	Vereinfachte, schematische Darstellung der Anordnung mit parallel eingeschobenen Barrieren und blanken Elektroden mit eingestellten Ölsplattweiten	119
Bild 6.15:	Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der Anordnung mit blanken Elektroden und zwei parallel eingeschobenen Papierbarrieren mit denen der Anordnung mit isolierten Elektroden (i-i) in Abhängigkeit der Ölsplattweite s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ offen}$ der blanken, offenen Anordnung bei einer Ölsplattweite von $s = 6\ mm$	120
Bild 6.16:	Richtung der Durchschlagspuren im Papier der Anordnung mit eingeschobenen Elektroden	121
Bild 6.17:	Vergleich der Mittelwerte der Durchschlagspannungen U_{DS} der Anordnung mit isolierter Anode, isolierter Kathode und je einer blanken Elektrode (i-b) nach [Gab-17] in Abhängigkeit der Ölsplattweite s , bezogen auf den Mittelwert der Durchschlagspannung $U_{DS\ 6\ mm\ RB}$ der blanken, mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung bei einer Ölsplattweite von $s = 6\ mm$	122
Bild 6.18:	Vergleich der in Abschnitt 5.3.1 berechneten Maximalfeldstärken E_{max} im Ölsplatt bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der homogenen Anordnung mit einer Ölsplattweite von $s = 3\ mm$	124
Bild 6.19:	Resultierende Durchschlagspannungen $U_{DS\Sigma}$ unter zusammengesetzter Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung und der reinen Spannungsbelastungen an der Anordnung mit blanken Elektroden für eine feste Ölsplattweite von $s = 3\ mm$ nach [Gab-18c] in Abhängigkeit des Gleichspannungsanteils U_{DC} bezogen auf die mittlere Durchschlagspannung $U_{DS\ DC\ 3\ mm\ offen}$ der offenen Anordnung unter Gleichspannungsbelastung	125
Bild 6.20:	Vergleich der in Abschnitt 5.3.2 berechneten Maximalfeldstärken E_{max} im Ölsplatt sowie im Papier bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der Anordnung mit isolierten Elektroden bei einer Ölsplattweite von $s = 3\ mm$	128

Bild 6.21:	Resultierende Durchschlagsspannungen $U_{DS\Sigma}$ unter zusammengesetzter Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung und der reinen Spannungsbelastungen an der Anordnung mit isolierten Elektroden für eine feste Ölspalweite von $s = 3 \text{ mm}$ nach [Gab-18b] in Abhängigkeit des Gleichspannungsanteils U_{DC} bezogen auf die mittlere Durchschlagsspannung $U_{DSDC3mm}$ der Anordnung unter Gleichspannungsbelastung	129
Bild 6.22:	Vergleich der in Abschnitt 5.3.2 berechneten Maximalfeldstärken $E_{\max}$ im Ölspalt sowie im Papier bezogen auf die mittlere Feldstärke E_{mittel} der Anordnung mit isolierten Elektroden, aber abgestoßenen Barrieren bei einer Ölspalweite von $s = 3 \text{ mm}$	131
Bild A.1:	Fotografische Darstellung des LI-Prüfkreises zur Mischspannungserzeugung	160
Bild A.2:	Berechnete Ladungsträgerverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum	161
Bild A.3:	Berechnete Ladungsträgerverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung	161
Bild A.4:	Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum	161
Bild A.5:	Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung	162
Bild A.6:	Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden und abgestoßenen Papierbarrieren im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung U_{DC0} , bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100 \text{ kV}$ sowie der reinen Gleichspannungsbelastung $U_{DC} = 100 \text{ kV}$	162
Bild A.7:	Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden und abgestoßenen Papierbarrieren bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung an der Anordnung mit isolierten Elektroden	162

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Im Isolieröl und imprägnierten Pressspan relevante Leitfähigkeitsmechanismen . . .	18
Tab. 6.1:	Genutzte Ölspalweiten in den Durchschlagversuchen der Anordnung mit eingeschobenen Barrieren nach Bild 6.14 und 4.1	119

A Anhang

A.1 Ergänzungen zu Kapitel 4

Bild A.1: Fotografische Darstellung des LI-Prüfkreises zur Mischspannungserzeugung

A.2 Ergänzende Berechnungsergebnisse zu Kapitel 5

A.2.1 Berechnungsergebnisse bei überlagerter Spannungsbelastung der blanken Elektrodenanordnung

Bild A.2: Berechnete Ladungsträgerverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum

Bild A.3: Berechnete Ladungsträgerverteilungen der blanken Elektrodenanordnung bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung

A.2.2 Berechnungsergebnisse bei überlagerter Spannungsbelastung der Anordnung mit isolierten Elektroden

Bild A.4: Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden bei reiner Blitzstoßspannungsbelastung im Spannungsmaximum

Bild A.5: Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung

Bild A.6: Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden und abgestoßenen Papierbarrieren im stationären Zustand der Gleichspannungsvorbelastung U_{DC0} , bezogen auf die mittlere Feldstärke bei $U_{DC} = 100$ kV sowie der reinen Gleichspannungsbelastung $U_{DC} = 100$ kV

Bild A.7: Berechnete Ladungsträgerverteilungen der Anordnung mit isolierten Elektroden und abgestoßenen Papierbarrieren bei unipolarer und bipolarer Mischspannungsbelastung an der Anordnung mit isolierten Elektroden

Thesen zur Dissertation

Stromrichtertransformatoren der Hochspannungsgleichstromübertragung bilden das Bindeglied zwischen Gleichspannungs- und Drehstromnetz. Zur Gewährleistung des ausfallsicheren Betriebes über die gesamte Lebensdauer muss deren Öl-Papier-Isoliersystem entsprechend dimensioniert werden. Eine optimale Dimensionierung setzt ein detailliertes Verständnis über die Beanspruchung des Isoliersystems sowie eine zuverlässige Modellierung sowohl unter Betriebsspannung als auch bei den überlagerten, transienten Überspannungen voraus.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems in Anlehnung an dielektrische Prüfungen sowohl unter Gleichspannungsbelastung als auch einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus einer Gleich- und einer Blitzstoßspannung (einer sog. Mischspannungsbelastung) untersucht.

- 1) Das dielektrische Verhalten ölisolierter Anordnungen unter Gleichspannungsbelastung wird maßgeblich durch Raumladungen infolge der Akkumulation von Ladungsträgern an Grenzflächen beeinflusst. Diese wirken sich auf die elektrische Feldstärkeverteilung und damit auf das nichtlineare, elektrische Leitfähigkeitsverhalten aus.
- 2) Das dielektrische Verhalten des mineralischen Isolieröls kann mit einem ladungsträgerbasierten Ansatz beschrieben werden. Die elektrische Leitfähigkeit wird dabei als Resultat der feldstärke- und zeitabhängigen Generation ölintrinsischer und von den Elektroden injizierter Ladungsträger, deren Bewegung durch das Dielektrikum sowie deren anschließender Rekombination verstanden.
- 3) Die numerische Modellierung des Verhaltens mithilfe des Poisson-Nernst-Planck-Gleichungssystems (PNP) hat sich dabei als geeignet erwiesen.
- 4) Etablierte, resistiv-kapazitive Modelle berücksichtigen diese Raumladungseinflüsse aufgrund der Annahme konstanter, ohmscher Leitfähigkeiten nicht.
- 5) Bisherige Untersuchungen beschränkten sich vorrangig auf das öl- oder papierisierte Einstoffsystem. Im Mischdielektrikum treten jedoch weitere Einflüsse auf. Für eine mögliche Anwendbarkeit der Erkenntnisse des ladungsträgerbasierten PNP-Modells zur dielektrischen Dimensionierung muss das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems an realitätsnahen Anordnungen untersucht werden.
- 6) Berechnungen des PNP-Modells zeigen, dass sich sowohl die Konzentration der Ladungsträger als auch deren Mobilität signifikant auf die Feldstärkeverteilung eines Isoliersystems auswirkt. Eine höhere Konzentration an der Gegenelektrode akkumulierter intrinsischer Ladungsträger (sog. *Heterocharges*) führt demnach zu höheren berechneten Feldstärken und damit zur stärkeren Beanspruchung des Isoliersystems. Experimentelle Untersuchungen bestätigen dies.

- 7) An einer mit einer Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung werden um bis zu 40 % höhere Durchschlagsspannungen als an einer offen im Prüfgefäß befindlichen Anordnung ermittelt. In die offene Anordnung gelangende, zusätzliche Ladungsträger des umgebenden Ölvolumens erhöhen die Beanspruchung Öl-Papier-isolierter Anordnungen infolge deren Einfluss auf die Feldstärkeverteilung. Die Ringbarriere verhindert diesen Einfluss.
- 8) Der durch eine offene Anordnung fließende, stationäre Strom ist im Vergleich zur abgeschlossenen Anordnung um ein Vielfaches höher. Zudem stellen sich an der offenen Anordnung längere Zeiten bis zum Erreichen eines quasistationären Zustandes sowie ein weiteres, temporäres Strommaximum ein.
- 9) Die elektrostatische Adhäsion der geladenen Ölmoleküle an blanken Metallteilen führt zu einem deutlich sichtbaren Aufsteigen des Öls an der Luft-Öl-Grenzfläche von Hilfselektroden. Dies ist an der offenen Anordnung stärker ausgeprägt als an der mit der Ringbarriere abgeschlossenen Anordnung.
- 10) Die Art der Spannungssteigerung spielt zur Beurteilung der Durchschlagsergebnisse eine signifikante Rolle. Während einer kontinuierlichen Spannungssteigerung ist eine höhere Beanspruchung im Vergleich zu einer stufenförmigen Spannungssteigerung aus dem quasistationären Zustand möglich.
- 11) Für reproduzier- und vergleichbare, experimentelle Untersuchungen sind Versuche an geeignet abgeschlossenen Anordnungen unter stufenförmiger Spannungssteigerung unter Beachtung eines stationären Zustandes notwendig.
- 12) Unter Gleichspannungsbelastung beobachtete Volumeneffekte bzw. der Einfluss des gesamten Ölvolumens im Prüfgefäß lassen sich auf geänderte Konzentrationen an Ladungsträgern zurückführen. Dies ist nicht nur bei experimentellen Untersuchungen zu beachten. Demnach sind ebenfalls Einflüsse des Alterungszustandes des Isolieröls oder des Ölvolumens der Transformatoren möglich.
- 13) Durchschlagversuche an Öl-Papier-isolierten Anordnungen zeigen ähnlich der PNP-Modellierung den starken Einfluss der Akkumulation von Ladungsträgern in der Papierisolierung bzw. an deren Grenzfläche. Der Ölspace wird dabei am stärksten beansprucht.
- 14) An Öl-Papier-isolierten Anordnungen werden die Papierbarrieren mit gleichnamigen Ladungsträgern (sog. *Homocharges*) aufgeladen. PNP-Berechnungen zeigen, dass dies die Papierisolierung entlastet und die höchste Beanspruchung im Ölspace auftritt. Dennoch werden im Vergleich zu einer äquivalenten Anordnung ohne Papierisolierung um ca. 50 % geringere Maximalfeldstärken berechnet.
- 15) An der untersuchten Anordnung mit isolierten Elektroden werden um bis zu 30 % höhere Durchschlagsspannungen im Vergleich zu einer Anordnung mit blanken Elektroden gemessen. Dabei stellt sich eine starke Abhängigkeit zur Ölspaceweite ein. Der Anstieg der Kennlinien entspricht der elektrischen Festigkeit technisch reinen Öls.
- 16) Multiple, mit einer Papierbarriere abgegrenzte Ölspace führen infolge der mit *Homocharges* aufgeladenen Barrieren zur größten Beanspruchung in den mittleren Ölspace. Die äußeren Ölspace werden entlastet und nur gering beansprucht.

- 17) An untersuchten Anordnungen mit mehreren, durch Papierbarrieren abgegrenzte Ölspalte wird deren Isoliervermögen von der Ölspaltweite zwischen den Papierbarrieren bestimmt. Der Ölspalt zwischen Papierbarrieren wird somit am stärksten beansprucht.
- 18) An unsymmetrischen Anordnungen mit nur einer papierisolierten Elektrode stauen sich die aus der blanken Elektrode injizierten Ladungsträger an der Papierisolierung der Gegenelektrode. Berechnungen nach PNP zeigen, dass sich die lokal im Staugebiet erreichte Maximalfeldstärke im Vergleich zu einer äquivalenten Anordnung ohne Papierisolierung verdoppelt. Der Ölspalt erfährt aufgrund der geringeren elektrischen Festigkeit des Isolieröls die höchste Beanspruchung. Dieses Verhalten wird qualitativ mit Durchschlagversuchen bestätigt.
- 19) Das polaritätsabhängige Injektionsverhalten resultiert in einem Polaritätseffekt. Wird nur die Anode isoliert, werden im Vergleich zur Anordnung mit isolierter Kathode um bis zu 50 % höhere Feldstärken ermittelt. Durchschlagversuche weisen dieses Verhalten nach.
- 20) Die hohen, lokalen Feldstärken vor der isolierten Anode haben im Vergleich zur Anordnung mit isolierter Kathode um bis zu 45 % höhere Durchschlagspannungen zur Folge.
- 21) Klassische Strömungsfeldberechnungen unter Gleichspannungsbelastung auf Grundlage der resistiv-kapazitiven Modelle berechnen für Öl-Papier-isolierte Anordnungen eine um ein Vielfaches höhere Beanspruchung der Papierbarrieren. Diese Ergebnisse stehen im direkten Widerspruch zu den Ergebnissen der PNP-Berechnungen und den Durchschlagversuchen.
- 22) Unter Mischspannungsbelastung existiert im Vergleich zur reinen Gleich- und Blitzstoßspannungsbelastung ein deutlicher Einfluss der Gleichspannungsvorbelastung bzw. der Überlagerung mit einem Blitzstoß auf die Beanspruchung des Isoliersystems.
- 23) Die reine Gleichspannungsbelastung hat nach PNP aufgrund der hohen Dichten akkumulierter Ladungsträger im Vergleich zur Mischspannungsbelastung die höchsten Feldstärken innerhalb des Öl-Papier-Isoliersystems zur Folge.
- 24) Infolge des Schwachstellendurchschlages stellt die reine Gleichspannungsbelastung die größte Beanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems dar.
- 25) Bei allen untersuchten Spannungsbelastungen wird der Ölspalt des Öl-Papier-Isoliersystems am stärksten beansprucht.
- 26) Der statistische Charakter des Durchschlages unter Stoßspannungsbelastung beeinflusst stark das Durchschlagverhalten unter Mischspannungsbelastung und führt zu Abweichungen im Vergleich zu den rechnerischen Ergebnissen nach PNP.
- 27) An den untersuchten Öl- und Öl-Papier-isolierten Anordnungen stellen sich unter Mischspannungsbelastung höhere Durchschlagspannungen im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung ein.
- 28) Die Mischspannungsbelastung hat infolge der Gleichspannungsvorbelastung geringere Durchschlagspannungen im Vergleich zur reinen Blitzstoßspannungsbelastung zur Folge.

- 29) Der Polaritätswechsel der bipolaren Überlagerung hat im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung keine kritischere Beanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems zur Folge. Im Vergleich zur unipolaren Überlagerung stellen sich an der untersuchten Anordnung mit blanken Elektroden um bis zu 10 % verringerte, an der Anordnung mit isolierten Elektroden um bis zu 30 % verringerte Durchschlagsspannungen ein.
- 30) Während der Gleichspannungsvorbelastung an den Elektroden akkumulierte *Heterocharges* wirken an blanken, ölisolierten Anordnungen infolge des Polaritätswechsels der bipolaren Überlagerung als *Homocharges* und entlasten die elektrodennahen Gebiete.
- 31) An der untersuchten, Öl-Papier-isolierten Elektrodenanordnung werden während der bipolaren Überlagerung um bis zu 10 % geringere Feldstärken im Vergleich zur reinen Gleichspannungsbelastung und der unipolaren Überlagerung berechnet.
- 32) Infolge der Aufladung der Papierbarrieren mit *Homocharges* ist ein Abstoßen der Papierbarrieren von den Elektroden möglich. Ein dadurch gebildeter Ölspace zwischen Papierbarriere und Elektrode beeinflusst das Verhalten während der bipolaren Überlagerung signifikant. Die während des Polaritätswechsels als *Heterocharges* wirkenden Ladungsträger im Papier resultieren in einer hohen Beanspruchung des gebildeten Ölspace.
- 33) Berechnungsergebnisse anhand klassischer, resistiv-kapazitiver Modelle würden an papierisolierten Anordnungen die höchste Beanspruchung unter Mischspannungsbelastung berechnen. Insbesondere der Polaritätswechsel würde die kritischste Beanspruchung des Isoliersystems darstellen. Dies steht damit im direkten Widerspruch zu den Ergebnissen der Durchschlagversuche.
- 34) Das ladungsträgerbasierte PNP-Berechnungsmodell wird für alle untersuchten Spannungsbelastungen qualitativ verifiziert. Durchschlagversuche an äquivalenten, Öl-Papier-isolierten Anordnungen einer planparallelen Plattenanordnung bestätigen die Annahmen des ladungsträgerbasierten Ansatzes und das in den Berechnungen ermittelte Verhalten.
- 35) Die Ergebnisse der etablierten, resistiv-kapazitiven Modelle stehen bei allen untersuchten Spannungsbelastungen infolge des vernachlässigten Raumladungseinflusses im direkten Widerspruch zu den Durchschlagversuchen und den Berechnungsergebnissen des PNP-Modells. Das Isoliervermögen der Anordnungen würde dabei unterschätzt. Ihre Anwendung zur dielektrischen Dimensionierung der Stromrichtertransformatoren hat demnach eine deutliche Überdimensionierung des Öl-Papier-Isoliersystems zur Folge und entspricht nicht mehr dem gegenwärtigen Stand der Forschung.
- 36) Eine quantitative Verbesserung setzt die Implementierung vertrauenswürdiger und eindeutig bestimmter Parameter voraus und erfordert ein detailliertes Wissen über die stattfindenden Prozesse. Das zeit- und feldstärkeabhängige Verhalten der Ladungsträger sollte daher u.a. Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Lebenslauf

Name: Tobias Gabler
Geburtsdatum/-ort: 01.08.1989 in Freiberg

Familienstand: verheiratet, 2 Kinder

- 09/2015 – 07/2021 **Promotion | Technische Universität Dresden**
Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik
- 07/2015 – 12/2020 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter | Technische Universität Dresden**
Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik
- 10/2009 – 05/2015 **Diplomstudium | Technische Universität Dresden**
Studiengang: Elektrotechnik
Vertiefung: Elektroenergietechnik, Hochspannungstechnik
- 01/2014 – 06/2014 **Ingenieurpraktikum | ABB Schweiz AG, Zürich**
High Voltage Products - GIS
- 11/2011 – 03/2012 **Studentische Hilfskraft | Technische Universität Dresden**
Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik
- 08/2000 – 07/2008 **Allgemeine Hochschulreife | Geschwister-Scholl-Gymnasium in Freiberg**

Auszeichnungen

- 2020 „ETG-Literaturpreis“ der *Energietechnischen Gesellschaft (ETG) des VDE e. V.*
- 2019 2. Preis beim Symposium “Energie-Campus” 2019 der *Stiftung Energie & Umwelt* in Karlsruhe
- 2017 “Best Student Paper Award” des 20th *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)* in Buenos Aires, Argentinien. 2017

Stromrichtertransformatoren der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) bilden das Bindeglied zwischen Gleichspannungs- und Drehstromsystem. Um den ausfallsicheren Betrieb über die gesamte Lebensdauer zu gewährleisten, muss deren Öl-Papier-Isoliersystem entsprechend dimensioniert werden. Eine optimale Dimensionierung setzt ein detailliertes Verständnis über die Beanspruchung des Isoliersystems sowie deren zuverlässige Modellierung sowohl unter Betriebsspannung als auch bei den überlagerten, transienten Überspannungen voraus. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das dielektrische Verhalten des Öl-Papier-Isoliersystems in Anlehnung an dielektrische Prüfungen sowohl unter Gleichspannungsbelastung als auch unter einer zusammengesetzten Spannungsbelastung aus Gleich- und Blitzstoßspannung (d. h. unter Mischspannungsbelastung) untersucht. Der Vergleich von numerischen Berechnungen auf Grundlage eines ladungsträgerbasierten Ansatzes nach Poisson-Nernst-Planck (PNP) mit Durchschlagexperimenten gibt dabei Aufschluss über die Beanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems. Weiterhin wird gezeigt, dass der in den etablierten, resistiv-kapazitiven Berechnungsmodellen vernachlässigte Ladungsträgereinfluss in Bezug auf die Beanspruchung des Isoliersystems unzureichende Ergebnisse zur Folge hat und zwingend zu berücksichtigen ist.

Die an realitätsnahen, Öl-Papier-isolierten Anordnungen erzielten Ergebnisse zeigen nicht nur den Einfluss der an Grenzflächen oder im Papier akkumulierten Ladungsträger auf die Beanspruchung des Isoliersystems. Ebenso werden die Annahmen des ladungsträgerbasierten Ansatzes und die Berechnungsergebnisse des PNP-Modells qualitativ bestätigt. Die Annahmen der etablierten Berechnungsmodelle stehen dazu im Widerspruch. Öl-Papier-isolierte Anordnungen werden somit geringer beansprucht, als dies eine Strömungsfeldberechnung vermuten lässt. Somit wird nicht nur die Anwendbarkeit der ladungsträgerbasierten PNP-Modellierung an Öl-Papier-Isolieranordnungen qualitativ verifiziert. Ebenso wird demonstriert, dass die etablierten Berechnungsmodelle aufgrund der stark vereinfachten Annahmen nicht in der Lage sind, die Beanspruchungen unter Gleich- und der untersuchten Mischspannungsbelastung abzubilden. Der Einsatz klassischer Strömungsfeldberechnungen zur Nachbildung der Beanspruchung des Öl-Papier-Isoliersystems unter Gleichspannungsbelastung entspricht damit nicht mehr dem Stand der Forschung.