





Karsten Backhaus

**Das dielektrische Verhalten der  
Öl-Papier-Isolierung bei Belastung  
mit hoher Gleichspannung**

Die vorliegende Arbeit wurde am 4. Januar 2016 an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden als Dissertation eingereicht und am 1. April 2016 verteidigt.

**Vorsitzender der Prüfungskommission:**

Prof. Dr.-Ing. Henry Güldner

**Gutachter:**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; die bibliografischen Daten sind im Internet unter <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

**ISBN:**

978-3-00-053451-5

**Selbstverlag:**

TU Dresden · IEEH · Karsten Backhaus · Mommsenstraße 10 · 01062 Dresden

Sämtliche Rechte vorbehalten

**Druck:**

addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

**Veröffentlicht:**

Dresden · 2016

Technische Universität Dresden

**Das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung  
bei Belastung mit hoher Gleichspannung**

Karsten Backhaus

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Henry Güldner  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann  
Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler

Tag der Einreichung: 4. Januar 2016  
Tag der Verteidigung: 1. April 2016



*Nur wer selbst brennt, kann Feuer in anderen entfachen.*

Augustinus Aurelius





# Vorwort

Nach Abschluss meines Maschinenbau-Studiums schien mein Lebensweg eigentlich vorgezeichnet. Doch die Entstehung dieser Arbeit ist ein wahres Zufallsereignis, wie es nur das Leben für einen bereithalten kann.

Meine Auslandsaufenthalte weiteten meinen Horizont, doch ließen sie mich auch die Heimat mehr schätzen. Nach einem Jahr pendeln, war es mein Wunsch in Dresden zu leben und damit galt es eine Anstellung zu finden. Diese fand ich am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

Mein Dank gilt daher Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann für sein Vertrauen in mich, den gewährten Freiraum und den Rückhalt, den ich immer uneingeschränkt durch ihn erfuhr, sowie die Betreuung und Begutachtung meiner Arbeit.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Andreas Küchler, dessen bekanntes Lehrbuch mir neben den Lehrbriefen des IEEH half, die Hochspannungstechnik zu verstehen. Ich freue mich sehr über die Diskussion und die Begutachtung meiner Arbeit.

Dr.-Ing. Joachim Speck prägte das IEEH mit seiner langen Zugehörigkeit wie kaum ein Zweiter. Und so bin ich sehr froh in punkto gewissenhafter, kritisch hinterfragender Arbeitsweise von ihm gelernt zu haben. Danke!

Ich danke der SIEMENS AG für die langfristige Forschungskooperation mit dem IEEH und damit für die Finanzierung meiner Arbeit. Manchmal dauert es ein wenig länger als die heute üblichen drei Jahre. Doch bin ich mir sicher, dass die steile Lernkurve alle Beteiligten freut und das Engagement rechtfertigt. Ronny Fritsche, Du hast den Rahmen meiner Arbeit geschaffen, warst der Garant für Richtung und das Korrektiv für Veröffentlichungen. Danke.

Liebe Kollegen des IEEH - vielen Dank für die Zusammenarbeit der letzten und zukünftigen Jahre. Gegenseitige Hilfe ist keine Selbstverständlichkeit, doch ich habe diese immer von allen Seiten erfahren. Liebe Ulrike, Danke für Deine Umsicht, alle Dienststreiaufträge und anderen organisatorischen Arbeiten. Ohne versierte Labormitarbeiter ist das praktische, hoch-spannende Experimentieren ebenso nicht möglich. Vielen Dank an

Ralf Dittrich, Falk 'µC-Gott' Eusewig, Axel Göres, Michael Gläser, Gerd Jaroszczyński, Helge Knüpfel, Erik Reichelt und Peter Wermuth. Lieber Robert Adam, liebe Maria Hering, lieber Hans-Peter-Pampel - Ihr habt mir stets Gehör geschenkt und durch Diskussion Klarheit in manch' wirren Gedanken gebracht. Es tut immer sehr gut, sich mit Euch auszutauschen. Danke.

Matthias Baumann, Christian Jäschke, Martin Schopf - ihr seid die Meister der Differentialgleichungen und wart gewissenhafte Diskussionspartner für meine Anliegen. Danke. Ich hoffe auf Euer Verständnis, wenn ich mich beim Herleitungsweg für meinen eigenen entschieden habe.

Jörg Meyer und Tobias Barth - vielen Dank für Eure Nachhilfe in Sachen Elektrotechnik abseits der Hochspannung.

Ich danke allen Diplomanden und Studienarbeitern, welche sich für die Thematik begeistern ließen: André Kunze, Thomas Fritze, Franzika Stumpf, Yang Yang, Daniel Schuster, Nico Lambers, Michael Beyler, Jan Thomas Linde, Toni Derlig, Caroline Wever.

Liebe Eltern Ihr habt mir all das mitgegeben, was es tatsächlich braucht. Danke!

Mein ganz persönlicher Dank ergeht meiner kleinen Familie.

# Kurzfassung

Basierend auf den physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen ölintrinsischen und injizierten Ladungsträger wird ein neues Leitfähigkeitsmodell für Isolieröl und -papier für die Belastung mit hoher Gleichspannung aufgestellt. Das Modell wird mit der Wahl geeigneter Randbedingungen für das elektrische Feld und der Teilchenströme auf die Poisson-Nernst-Planck-Gleichung übertragen. Es steht damit ein Werkzeug zur Verfügung, das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung zu modellieren, dessen Parameter auf den physikalischen Ladungsträgereigenschaften wie Mobilität und Diffusion basieren. Mit dessen Hilfe werden sowohl die nichtlineare Leitfähigkeit als auch das Durchschlagverhalten als deren Extrapolation feldstärkeabhängig erklärt.

**Schlüsselwörter:** Öl-Papier-Isolierung, HGÜ, Poisson-Nernst-Planck-Gleichung, Ionendrift, FEM, dielektrisches Verhalten, Leitfähigkeit, Durchschlag

## Abstract

A conductivity model for insulating oil and paper under the stress of high DC voltage is presented. It is based upon the different physical properties of the intrinsic and injected oil charge carriers. The model assumptions are translated into the Poisson-Nernst-Planck-equation by utilizing adequate boundary conditions for the electric field and the particle currents. Hence a tool is available, whose parameter base on the physical properties of the charge carriers such as mobility and diffusion coefficient. The dielectric properties such as nonlinear conductivity and the breakdown as its fieldstrength extrapolation are being explained.

**Keywords:** oil paper insulation, HVDC, Poisson-Nernst-Planck-equation, ion drift, FEM, dielectric behavior, conductivity, electrical breakdown



# Inhalt

Bilder	XV
Tabellen	XVIII
Symbole und Abkürzungen	XIX
1 Einleitung	1
2 Stand der Erkenntnisse	2
2.1 Grundlagen der Hochspannungsgleichstromübertragung . . . . .	2
2.2 Polarisationsarten in mineralischem Isolieröl . . . . .	4
2.3 Ölbestandteile und Ladungsträgerarten . . . . .	5
2.3.1 Ölintrinsische Ladungsträger . . . . .	5
2.3.2 Injizierte Ladungsträger . . . . .	9
2.4 Durchschlagverhalten des mineralischen Isolieröls . . . . .	12
2.5 Resistive-kapazitive Modellierung der dielektrischen Eigenschaften des Isolieröls und Isolierpapiers . . . . .	16
2.5.1 Grundlagen der RC-Modellierung . . . . .	16
2.5.2 RC-basierte Feldberechnung eines Öl-Papier-Barrieren-Systems .	20
3 Ziele der Arbeit	25
4 Versuchsaufbau	27
5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung	31
5.1 Physikalisches Leitfähigkeitsmodell der Öl-Papier-Isolierung . . . . .	31
5.2 Mathematische Beschreibung des dielektrischen Verhaltens mit der Poisson- Nernst-Planck-Gleichung . . . . .	34
5.2.1 Formulierung des Gleichungssystems . . . . .	34
5.2.2 Formulierung der Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	40
5.2.3 Berechnung der dielektrischen Größen Feldstärke und Strom . .	43

## *Inhalt*

5.2.4	Einschränkung der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung und der gewählten Ansätze . . . . .	44
5.2.5	FEM-Modellierung . . . . .	48
5.3	Leitfähigkeitsverhalten in Abhängigkeit der Feldstärke . . . . .	50
5.4	Strom-Zeit-Verhalten bei Polaritätswechsel der Gleichspannung . . . . .	57
5.5	Zusammenhang zwischen dem Strom-Zeit-Verhalten und der Feldstärkeverteilung im Ölspalt . . . . .	63
6	Durchschlagverhalten des Einstoffsystems . . . . .	66
6.1	Durchschlagverhalten einer Nadel-Platte-Anordnung . . . . .	66
6.2	Durchschlagverhalten koaxialer Zylinder . . . . .	71
7	Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems . . . . .	77
7.1	Durchschlagverhalten gekreuzter Zylinder . . . . .	77
7.2	Durchschlagverhalten koaxialer Zylinder mit einseitiger Papierisolierung . . . . .	81
8	Zusammenfassung . . . . .	87
9	Ausblick . . . . .	90
	Literaturverzeichnis . . . . .	93
A	Anhang . . . . .	102
A.1	Gültigkeit der Annahmen einer verdünnten Lösung für mineralisches Isolieröl . . . . .	102
A.2	Organigramm der Abhängigkeiten der Eingabegrößen auf die Lösung der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung . . . . .	103

# Bilder

2.1	Schema einer Zwölfpulsleichrichter-Schaltung nach [Beyer1986] . . . .	2
2.2	Qualitativer Spannung-Zeit-Verlauf an einer unbelasteten Zwölfpulsbrücke nach Bild 2.1; 1 - Primärspannung, 2 - Sekundärspannung an Stern-Schaltung, 3 - phasenverschobene Sekundärspannung an Dreieck-Schaltung, 4 - Gleichspannung . . . . .	3
2.3	Kationische Mizelle an metallischer Kathode nach [Backhaus2013a] . . .	6
2.4	Doppelschicht nach Lewis [Lewis1994], a) metallische Elektrode mit positivem Grundgerüst, b) äußere Elektronenwolke, c) innere Helmholtz-Schicht, d) äußere Helmholtz-Schicht, e) diffuse Gouy-Chapman-Schicht	7
2.5	Feldstärkeverteilung in mit 30 ppm Cu-Oleat verunreinigtem Isolieröl nach Hikita et al. [Hikita1996] . . . . .	8
2.6	Elektronenenergie-Distanz-Beziehung für eine metallische, fluidbenetzte Oberfläche nach [Felici1985]; W - Austrittsarbeit, s - Absenkung nach Schottky . . . . .	9
2.7	Organigramm der Durchschlag-Theorien nach [Hauschild1969], [Sinz1990], [Badent1996], [Kist1999] . . . . .	12
2.8	Entladungseinsatz an der Kathode a) 1,5 $\mu$ s und b) 1 $\mu$ s vor dem Durchschlag nach [Thomas1975] . . . . .	13
2.9	$U_a$ -s-Kennlinien für Mineralöl bei Belastung mit hoher Gleichspannung nach [Gänger1968], [Kurita1986] und [Ohshima1983] . . . . .	15
2.10	RC-Netzwerk zur Beschreibung des dielektrischen Verhaltens eines Isolierwerkstoffs . . . . .	16
2.11	Modellversuche nach Ebisawa et al. [Ebisawa2009] . . . . .	20
2.12	Feldberechnung für Typ A, a) Äquipotentialliniendarstellung, b) Feldstärkeverteilung . . . . .	22
2.13	Feldberechnung für Typ B, a) Äquipotentialliniendarstellung, b) Feldstärkeverteilung . . . . .	22
2.14	Berechnete Feldstärkeverteilung innerhalb der Isolierung entlang der Pfade im Isolieröl . . . . .	23

## Bilder

4.1	Prüflingskonditionierung mit a) Vakuum-Ölaufbereitungsanlage, b) Vakuum-Ofen . . . . .	27
4.2	Prüfschaltung für hohe Gleichspannung . . . . .	28
4.3	CAD-Prinzipdarstellung des Prüfgefäßes . . . . .	29
5.1	Leitfähigkeitsmodell der Öl-Papier-Isolierung . . . . .	31
5.2	a) Teilchendichte- und b) Stromdichteverteilung im homogenen Feld . .	46
5.3	1D-FEM-Modell eines Ölspaltes . . . . .	49
5.4	Feldstärkeabhängige Leitfähigkeit nach [Liebschner2009] . . . . .	51
5.5	Feldstärkeabhängige Injektionsrate für Anode und Kathode . . . . .	53
5.6	Vergleich der Messwerte und der PNP-Berechnung mit potentiell und empirisch exponentiellem Injektionsansatz . . . . .	54
5.7	Qualitative Feldstärkeverteilung im homogenen Feld; a) geometrisch bedingt, homogen; b) bei alleinigem Einfluss der intrinsischen Ladungsträger; c) bei Einfluss beider Ladungsträgerarten . . . . .	55
5.8	Schematisches Strom-Zeit-Verhalten bei bipolarer Gleichspannungsbelastung; a) Erstbelastung, Polarisation b) erster Polaritätswechsel; c) weiterer Polaritätswechsel . . . . .	57
5.9	Strom-Zeit-Verhalten nach der Umpolung mit unterschiedlichen Zeiten $t_p$ des spannungslosen Zustands [Yang2012] . . . . .	58
5.10	Phasenbilder der Konzentration intrinsischer An- und Kationen im Ölspalt beim Polaritätswechsel und entsprechendes Strom-Zeit-Verhalten [Backhaus2014] . . . . .	61
5.11	Messwerte für a) Strom-Zeit-Verlauf und b) Feldstärkeverteilung nach Hikita und die nach der PNP-Methode berechneten Größen . . . . .	64
6.1	Versuchsanordnung Spitze-Platte mit Schutzringelektrode . . . . .	66
6.2	Feldstärke-Ableitstromverhalten in Abhängigkeit der Schlagweite und Polarität mit Ausgleichskurven nach Gleichung 6.1 . . . . .	67
6.3	Qualitative Feldstärkeverteilung für Spitze-Platte . . . . .	69
6.4	Modell der ladungsträgerbedingten aufsteigenden Ölbewegung an einer Luft-Öl-Durchführung . . . . .	70
6.5	Elektrodenanordnung koaxiale Zylinder . . . . .	71
6.6	Strom-Zeit-Verlauf beim Stufenspannungssteigerungsversuch der blanken koaxialen Zylinder gemittelt aus fünf Einzelversuchen . . . . .	72



*Bilder*

6.7	Qualitative Näherung der Messwerte durch einen Exponentialansatz und einen Ansatz gemäß der Fowler-Nordheim-Beziehung . . . . .	73
6.8	Vergleich des gemessenen und berechneten Strom-Zeit-Verlaufs beim Stufenspannungssteigerungsversuch . . . . .	74
6.9	Randfeldstärke an der Innenelektrode für unterschiedliche Prüfspannungen	75
7.1	Elektrodenanordnung gekreuzter Zylinder für blanke und papierisolierte Elektroden . . . . .	77
7.2	$U_d$ -s-Kennlinie gekreuzter Zylinder für blanke, hochspannungsseitig isolierte und vollständig papierisolierte Elektroden . . . . .	78
7.3	Vergleich des gemessenen und berechneten Strom-Zeit-Verhaltens bei papierisolierter Innenelektrode . . . . .	81
7.4	Berechnete radiale Feldstärkeverteilung im Ringspalt der coaxialen Zylinderanordnung mit papierisolierter Innenelektrode für die jeweils stationären Zustände . . . . .	83
7.5	Berechnete radiale Feldstärkeverteilung im Ringspalt der coaxialen Zylinderanordnung in der Nähe der papierisolierten Innenelektrode . . . . .	84
7.6	Berechnete Teilchendichteverteilung im Ringspalt der coaxialen Zylinderanordnung mit Rekombinationszone im Isolierpapier . . . . .	85
8.1	Übersicht der Leitfähigkeitsmechanismen . . . . .	89

# Tabellen

2.1	Ermittelte Durchschlagspannungen nach Ebisawa et al. [Ebisawa2009]	21
-----	--	----

# Symbole und Abkürzungen

## Allgemeine Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
$a_i, b_i, c_i$	skalare Parameter	
$e$	Eulersche Zahl	2,71828
$e$	Elementarladung	1 C
$k_{ij}$	Injektionsverhältnis	1
$k_b$	Boltzmann-Konstante	$1,38065 \frac{\text{J}}{\text{K}}$
$n_i$	Teilchendichte der i-ten Ladungsträgerspezies	$\frac{1}{\text{m}^3}$
$q$	Ladung eine Ladungsträgers	1 C
$r$	Radius	1 mm
$r_i$ Dissoziation	Dissoziationskoeffizient der i-ten Spezies	$1 \frac{\text{V}}{\text{m}^3 \text{s}}$
$r_{ij}$ Rekombination	Rekombinationskoeffizient der i-ten und j-ten Spezies	$1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
$s$	Elektrodenabstand	1 mm
$t$	Zeit	1 s
$\vec{v}$	Geschwindigkeit	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
$x$	Wegkoordinate	1 mm
$z_i$	Wertigkeit eines Ladungsträgers	$\pm 1$
$A_M$	Messfläche	$1 \text{ mm}^2$
$\vec{D}$	dielektrische Flussdichte	$\frac{\text{C}}{\text{m}^2}$
$D_i$	Diffusionskoeffizient der i-ten Ladungsträgerspezies	1
$E$	elektrische Feldstärke	$1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
$I$	elektrischer Strom	1 A
$J$	elektrische Stomdichte	$1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$
$U$	Spannung	1 V
$\epsilon_0$	Dielektrizitätszahl, elektrische Feldkonstante	$8,85419 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$

## Symbolverzeichnis

$\epsilon_r$	relative Permittivität eines Isolierstoffs	
$\kappa$	spezifische Leitfähigkeit	$1 \frac{S}{m}$
$\mu_i$	Mobilität der i-ten Ladungsträgerspezies	1
$\theta$	Temperatur	1 K
$\rho$	Ladungsträgerdichte	$1 \frac{C}{m^3}$
$\varphi$	elektrisches Potential	1 V
$\Gamma$	Teilchenflussdichte	$1 \frac{1}{m^2 \cdot s}$
$\ominus$	absolute Temperatur	1 K
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung	
FEM	Finite Elemente Methode	
MENA	Middle East, North Africa	
NBR	Nitrile Butadiene Rubber, Nitrilkautschuk	
PMMA	Polymethylmethacrylat	
PNP	Poison-Nernst-Planck-Gleichung	
PTFE	Polytetrafluorethylen	
TOF	Flugzeit (engl. <i>time of flight</i> )	
VPE	Vernetztes Polyethylen	

# 1 Einleitung

Das Rennen um die Wahl der dominierenden Spannungsart zur Energieübertragung über große Entfernungen gewann Ende des 19. Jahrhunderts die Wechselspannung. In kontaktlosen und damit verschleißfreien Maschinen generiert, lässt sie sich mit Transformatoren auf eine gewünschte Amplitude transformieren. Das gutmütige Schaltverhalten aufgrund des Löschens eines AC-Lichtbogens im Nulldurchgang ermöglichte den Aufbau eines robusten Hochspannungsnetzes mit entsprechenden Schaltern [Fischinger1932].

Mit dem Ersetzen der Quecksilberdampfgleichrichter durch halbleitende Thyristoren als leistungselektronische Gleichrichter und deren rasante Weiterentwicklung etablierte sich die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) mit Übertragungsstrecken wie Cahora-Bassa (Südafrika, 1979) und Québec-Neuengland (Nordamerika,1986).

Den Haupteinsatz erfährt die HGÜ in der Übertragung elektrischer Energie über große Distanzen, wenn die Blindleistungsverluste im Falle hoher Wechselspannung zu groß werden. So stellt die 800-kV-Ebene mit dem chinesischen Projekt Yunnan-Guangdong, 2010 den Stand der Technik dar [Lettner2010]. Zukünftige Projekte, wie übergeordnete Trassen im innereuropäischen Energietransport oder der Import regenerativer Solarenergie gemäß des Dessertec-Projekts aus der MENA-Region, sind nur durch die HGÜ realisierbar.

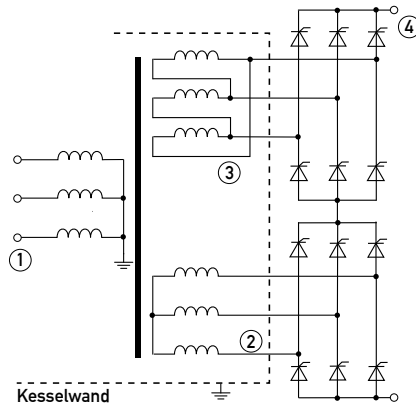
Diese Arbeit beschäftigt sich punktuell mit dem dielektrischen Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung. Die Öl-Papier-Isolierung ist das Isolierungssystem der Wahl in Leistungstransformatoren für die HGÜ. Soll das Isolierungssystem durch ein höheres Spannungsniveau oder kompaktere Bauweise des Transformatornkessels höher belastet werden, bedarf es einer genauen Kenntnis der dielektrischen Vorgänge und der Identifizierung hoher Beanspruchungen.

Ausgehend von einem physikalischen Leitfähigkeitsmodell wird gezeigt, dass bisherige Berechnungsverfahren unkorrekte Ergebnisse liefern. Besser können die Leitfähigkeitsprozesse mit der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung dargestellt werden. Anhand der identifizierten Leitfähigkeitsprozesse wird das zu beobachtende, nichtlineare Durchschlagverhalten der Öl-Papier-Isolierung bei hoher Gleichspannung erörtert.

# 2 Stand der Erkenntnisse

## 2.1 Grundlagen der Hochspannungsgleichstromübertragung

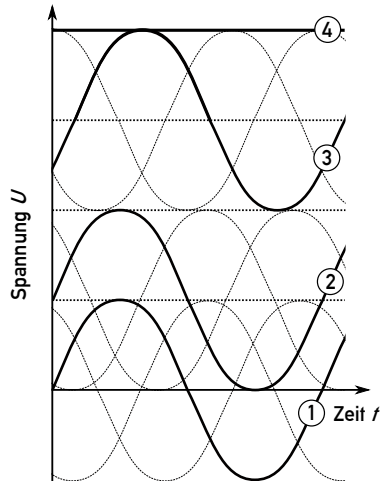
Bild 2.1 [Beyer1986] zeigt das Schema einer Zwölfpulsgleichrichter-Schaltung, welche in der klassischen HGÜ-Technologie ihren Einsatz findet. Ein primäres dreiphasiges AC-System wird zunächst in zwei sekundäre AC-Systeme transformiert. Mit der Stern- und der Dreieck-Schaltung der sekundären Systeme wird eine Drehung des Phasenwinkels von dreißig Grad zwischen den beiden Systemen erzielt. Durch diesen Versatz wird mit Hilfe der Thyristoren bereits eine Gleichspannung mit geringer Welligkeit ohne eine Glättungskapazität erreicht.



**Bild 2.1:** Schema einer Zwölfpulsgleichrichter-Schaltung nach [Beyer1986]

Die Pulsbrücken-Schaltung selbst ist aufgrund der nicht geerdeten Sekundärssysteme kaskadierbar. Allerdings werden dabei deren Isolierungen mit einer Gleichspannung mit Wechselanteil gegen das Erdpotential belastet.

## 2 Stand der Erkenntnisse



**Bild 2.2:** Qualitativer Spannung-Zeit-Verlauf an einer unbelasteten Zwölfpulsbrücke nach Bild 2.1; 1 - Primärspannung, 2 - Sekundärspannung an Stern-Schaltung, 3 - phasenverschobene Sekundärspannung an Dreieck-Schaltung, 4 - Gleichspannung

Da Werkprüffelder in der Regel über keine Anlage zur Erzeugung von Prüfspannungen verfügen, welche der Betriebsspannung entsprechen, werden Leistungstransformatoren für die HGÜ einer getrennten AC- und DC-Prüfung unterzogen. Der Scheitelwert der Prüfwechselfspannung und die Höhe der Prüfgleichspannung entsprechen dabei dem Betrag des Gleichspannungsniveaus der obersten Stufe einer HGÜ-Anlage multipliziert mit einem Prüffaktor. Die Isolierung muss damit so dimensioniert sein, dass sie beiden Belastungen genügt. Erfahrungsgemäß stellen die Einzelprüfungen dabei eine größere Beanspruchung als bei Belastung mit einer Mischspannung dar [Ebisawa2003].

Im Falle der Gleichspannungsprüfung werden die Sekundärwicklungen gegen den geerdeten Kern und den Kessel geprüft.

## 2.2 Polarisationsarten in mineralischem Isolieröl

Isolierstoffe können aufgrund der in ihnen enthaltenen positiven und negativen Ladungen polarisiert werden. Dabei werden die folgenden Polarisationsarten hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit unterschieden [Gerthsen1974], [Schulz1974]:

Im Falle der *Deformationspolarisation* wird in Atom- bzw. Elektronenpolarisation unterschieden. Der Polarisationsmechanismus beruht auf der Verschiebung der Elektronen eines Atoms gegenüber dessen Kern bzw. der Verschiebung einzelner Atome innerhalb eines Moleküls im Falle nicht deckungsgleicher Ladungsschwerpunkte. Sind in einem Isolierstoff elektronenaffine Elemente wie Sauerstoff, Chlor oder Fluor molekular gebunden, so bewirkt dies stets partielle Ladungsschwerpunkte. Analog gilt dies für reaktiv gebundene Metallionen in organischen Komplexen, da diese bemüht sind, ihre Valenzelektronen abzugeben und positive Ladungsschwerpunkte zu bilden.

Die *Orientierungspolarisation* basiert auf einer Ausrichtung der polaren Moleküle oder Dipole. Diese können sich in Fluiden im Unterschied zur Deformationspolarisation vollständig im elektrischen Feld ausrichten. Da die Verschiebungswege der Ladungsträgerschwerpunkte für obige Polarisationsarten sehr gering sind, so kann davon ausgegangen werden, dass diese Polarisationsmechanismen nach vergleichsweise kurzer Zeit abgeschlossen sind. Zeitlich können diese daher einer 50-Hz-Wechselspannungsbelastung folgen und erhöhen damit die relative Dielektrizitätszahl bei Netzfrequenz. Der hohe Anteil symmetrischer und unpolarer Moleküle in mineralischem Isolieröl führt daher zu einer vergleichsweise niedrigen Dielektrizitätszahl von  $\epsilon_r = 2,2$ .

Die *Gitterpolarisation* setzt eine Verschiebung unterschiedlich geladener Gitterbausteine voraus - zum Beispiel die eines Kristallgitters. In Isolierölen hat dieser Polarisationsmechanismus für den technisch typischen, flüssigen Aggregatzustand eine untergeordnete Bedeutung.

Technische Isolierungen mit mineralischem Isolieröl werden wie im Fall der Leistungstransformatoren immer in Kombination mit Isolierpapier oder seiner geschichteten Form, dem Pressboard, ausgeführt. Driften einzelne Ladungsträger durch das Isolieröl, angetrieben durch das elektrische Feld, so stauen sich diese vor dem weniger durchlässigen Feststoff. Aufgrund der ansteigenden Teilchendichte an der Öl-Papier-Grenzfläche



## 2 Stand der Erkenntnisse

tritt die sogenannte *Grenzflächenpolarisation* bzw. *Raumladungspolarisation* auf. Dieser Polarisationstyp beeinflusst hauptsächlich das dielektrische Verhalten mineralischen Isolieröls bei Belastung mit hoher Gleichspannung, da ein stabiler Zustand in Abhängigkeit der Prüfspannung mitunter erst nach vielen Stunden erreicht wird. Neben der Grenzflächenpolarisation an der Öl-Papier-Grenzfläche sind auch Polarisationsvorgänge an der Öl-Metall-Grenzschicht von entscheidender Bedeutung.

## 2.3 Ölbestandteile und Ladungsträgerarten

### 2.3.1 Ölintrinsische Ladungsträger

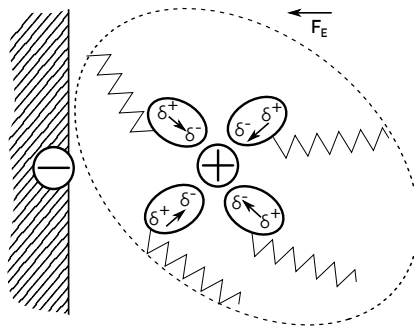
Bisher herrscht eine große Ungewissheit, welche Bestandteile des Isolieröls zu seiner Leitfähigkeit beitragen. Der Grund hierfür ist die unbekanntete Zusammensetzung einzelner Bestandteile. Hauptsächlich ist mineralisches Isolieröl ein Gemisch aus kettenförmigen Alkanen, ringförmigen Naphthenen und Aromaten sowie ihren Alterungsprodukten. Alkane und Naphthene sind aufgrund der einfachen C-C- und C-H-Bindung elektrisch fest, sehr gering leitfähig und aufgrund der sich aufhebenden symmetrischen Ladungsschwerpunkte unpolar. Die Eigenschaften dieser Bindungstypen werden in Form des VPE für Hochspannungskabel am besten ausgenutzt. Da die Leitfähigkeit mineralischen Isolieröls um mehrere Potenzen größer als die des VPE ist, müssen andere Bestandteile bzw. physikalische Vorgänge die Ursache sein.

Eine Quelle können aromatische Verbindungen sein, die dem Isolieröl beigemischt werden, um die Löslichkeit von Wasser und ggf. auch Wasserstoff als Produkt von Teilentladungen zu verbessern. Bereits ein geringer Anteil von 20 ppm an ungebundenem Wasser hat bei Raumtemperatur einen senkenden Einfluss auf die elektrische Festigkeit [Kahle1988]. Die aromatische Ringbindung ist nach außen hin unpolar. Allerdings besitzt die aromatische Ringstruktur eine bestimmte Anzahl delocalisierter Elektronen. Es ist vorstellbar, dass einzelne Elektronen für den Leitungsprozess zur Verfügung gestellt werden bzw. sich zusätzliche Elektronen anlagern können.

Als Alterungsprodukte organischer Verbindungen sind vorzugsweise die Reaktionsprodukte mit Sauerstoff zu sehen. Neben Alkoholen und Aldehyden sind vor allem

## 2 Stand der Erkenntnisse

die organischen Säuren ein wichtiger Indikator für den Alterungszustand einer Öl-Papier-Isolierung. Die Carboxyl-Gruppe der Säure ist nach außen hin elektrisch neutral. Aufgrund der Elektronenaffinität des Sauerstoffs treten aber partielle Ladungsschwerpunkte auf. Das am Sauerstoff gebundene Wasserstoffproton könnte damit prinzipiell leichter abgegeben werden und zum Leitfähigkeitsmechanismus beitragen. Die Leitfähigkeit des Isolieröls wird zudem auf Ladungsträger aus Wasser und organischen Salzen zurückgeführt. Diese können zwar im Isolieröl in geringem Maß gelöst werden, allerdings dissoziieren diese wie auch die Säuren aufgrund der geringen Permittivität des Isolieröls im Unterschied zu Wasser nicht. Erst unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes findet gemäß des Wien-Effekts [Wien1929] eine Bildung sogenannter intrinsischer Ladungsträger statt. Ist ein solches Ion bzw. solcher Ladungsträger entstanden, wird dieser sofort mit anderen Ölbestandteilen, welche aufgrund von funktionellen Gruppen als Tenside wirken, eine sogenannte Mizelle bilden. Dieser Vorgang ist in der Chemie auch als Solvatisierung bekannt.



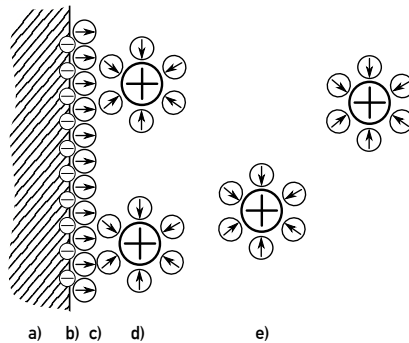
**Bild 2.3:** Kationische Mizelle an metallischer Kathode nach [Backhaus2013a]

Es ist davon auszugehen, dass die äußere Hüllschicht der Mizelle aus  $\text{CH}_2$ -Ketten besteht, welche selbst elektrisch neutral, isolierend und elektrisch fest sind. Eine solche Mizelle driftet im Isolieröl gemäß den elektrostatischen Feldkräften, wie in Bild 2.3 dargestellt, zur entgegengesetzt geladenen Elektrode. Signifikant dabei ist, von statistischen Prozessen geringer Wahrscheinlichkeit abgesehen, das Ausbleiben einer Rekombination. Als Ursache hierfür wird die isolierende Hüllschicht der Mizellen und die relativ geringe Konzentration gesehen.

## 2 Stand der Erkenntnisse

Diese Nahordnung der Moleküle und Ladungsträger ist Grundlage für die Bildung einer Doppelschicht in der Öl-Metall-Grenzfläche. Das Modell der Doppelschicht wurde durch Helmholtz [Helmholtz1879] über Gouy [Gouy1909], Stern [Stern1924] und Grahame [Grahame1947] weiterentwickelt.

Nach [Lewis1994] stellt sich die Grenzschicht zwischen Metallelektrode und Isolierflüssigkeit wie in Bild 2.4 dar.



**Bild 2.4:** Doppelschicht nach Lewis [Lewis1994], a) metallische Elektrode mit positivem Grundgerüst, b) äußere Elektronenwolke, c) innere Helmholtz-Schicht, d) äußere Helmholtz-Schicht, e) diffuse Gouy-Chapman-Schicht

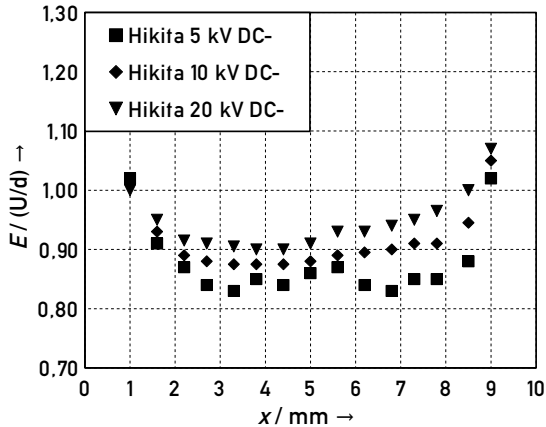
Aufgrund der geringen Abstände von wenigen Atomlängen zwischen Molekülen, Ladungsträgern und dem Metall treten sehr große Feldstärken auf. Daher bildet sich eine solche Schicht an allen metallischen Elektroden bereits ohne äußere Prüfspannung bzw. äußeres elektrisches Feld.

Hikita et al. [Hikita1996] beobachteten mittels Kerr-Effekt-Messung die Ausbildung sowohl kationischer als auch anionischer Ionenschichten vor metallischen Elektroden bei einer künstlichen Verunreinigung eines Isolieröls mit 30 ppm Kupferoleat. Die Schichten bestehen stabil über die gesamte Prüfdauer von mehreren Stunden [Backhaus2013a]. Es bildet sich eine Grenzschicht mit besonderen Eigenschaften. Insbesondere besteht

## 2 Stand der Erkenntnisse

aufgrund der Nähe der *hetero charges*<sup>1</sup> [Felici1985] vor deren Gegenelektrode eine hohe elektrische Feldstärke.

Die Feldstärkeverteilung wird für Isolieröl mit einem 30 ppm Kupferoleatanteil durch Hikita wie folgt angegeben.



**Bild 2.5:** Feldstärkeverteilung in mit 30 ppm Cu-Oleat verunreinigtem Isolieröl nach Hikita et al. [Hikita1996]

Gemäß Bild 2.5 besteht aufgrund der intrinsischen Ladungsträger eine *innere Inhomogenität*, welche mit zunehmender Feldstärke abnimmt. Der Umstand, dass das Verhalten so nur für stark verunreinigtes Isolieröl festgestellt werden konnte, schließt dennoch nicht aus, dass ein ähnliches Verhalten auch für eine normale Konzentration intrinsischer Ladungsträger anzunehmen ist. Für letzteren Fall sind die sich bildenden Ionenschichten nur von deutlich geringerer Dicke und damit schwieriger zu messen. Ferner ist im Bild 2.5 zu erkennen, dass sich die sogenannte *innere Inhomogenität* mit zunehmender Gleichspannungsbelastung verringert. So nähern sich die Messwerte für 20 kV im Mittelteil der Ölstrecke dem mittleren, bezogenen Feldstärkebetrag. Das Verhältnis aus Randfeldstärke zur Feldstärke im Mittelbereich verringert sich daher. Dieses Phänomen

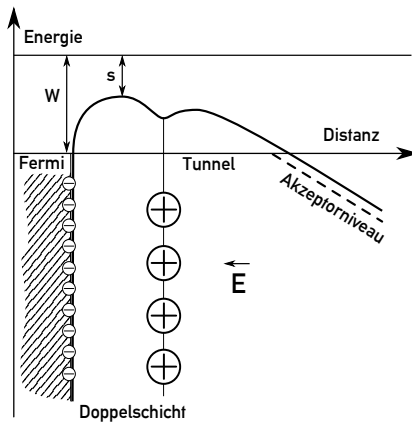
1 Der Begriff *hetero charges* bezeichnet in der Literatur die Ladungsträger, welche sich der Elektrode aufgrund ihrer entgegengesetzten Ladung nähern und ggf. vor ihr verharren.

per se sowie der Einfluss auf die nichtlineare elektrische Leitfähigkeit des Isolieröls wird in 5.5 näher erläutert.

### 2.3.2 Injizierte Ladungsträger

Für Felici ist der Grund für eine Leitfähigkeit bei hoher Feldstärke die Ladungsträgerinjektion an den Elektroden. [Felici1985]<sup>2</sup>.

Es wird davon ausgegangen, dass die Dissoziationsvorgänge nach Wien [Wien1929] oder Onsager [Onsager1934] bei hohen Feldstärken nur noch eine geringe Rolle spielen. Alle Ölbestandteile, die dissoziieren können und die intrinsischen Ladungsträger bilden, liegen dissoziiert vor und werden aufgrund der elektrostatischen Kräfte getrennt. Daher sind die Elektronenübergänge aus der Elektrode durch die Doppelschicht in der Flüssigkeit an der Metallgrenzfläche dominant.



**Bild 2.6:** Elektronenenergie-Distanz-Beziehung für eine metallische, fluidbenetzte Oberfläche nach [Felici1985];  $W$  - Austrittsarbeit,  $s$  - Absenkung nach Schottky

<sup>2</sup> „The main cause of high-field conductivity is charge carrier injection at the electrodes.“ [Felici1985], S. 5

## 2 Stand der Erkenntnisse

Eine direkte Übertragung der Elektronenemissionsprozesse aus Metall in Vakuum nach Fowler-Nordheim [Fowler1928] auf den Fall einer ölbenetzten Elektrode ist nur schwer möglich. Dennoch lassen sich physikalische Analogien aufzeigen, wie später auch messtechnische und rechnerische Ergebnisse zeigen werden.

Die Ladungsträgeremission aus dem Fermi-Niveau des elektrischen Leiters wird durch den Betrag der Austrittsarbeit begrenzt. Sowohl eine äußere Feldstärke als auch das Vorhandensein eines Stoffes und die damit verbundene Bereitstellung geringerer Akzeptorniveaus erleichtern den Austritt aus der Elektrode.

Die Existenz freier Elektronen ist dabei sehr unwahrscheinlich, da die Anlagerung eines Elektrons an ein Molekül unter Bildung eines Anions einen enormen Anstieg an Entropie nach sich zieht [Felici1985]. Nach dem Austritt wird sich ein injizierter Ladungsträger an ein Ölmolekül anlagern und sich, angetrieben durch die elektrostatischen Kräfte, von der Elektrode wegbewegen. Im Unterschied zu den intrinsischen Ladungsträgern, für die aufgrund der Erfüllung der Oktettregel<sup>3</sup> bei hoher elektrischer Feldstärke im Isolieröl ein stabiler Zustand angenommen wird, sind zusätzliche Ladungsträger an einem organischen Molekül als instabil zu sehen. Ein Ladungsträger in Form eines zusätzlichen Elektrons oder Lochs, kann zu benachbarten Molekülen wechseln. Deren Leitungsmechanismus setzt sich aus einer Bewegung mit den Ölmolekülen und dem Springen von einem zum nächsten zusammen. Daher ist von einer größeren Mobilität dieser Ladungsträgerspezies gegenüber der der intrinsischen auszugehen.

Von grundlegender Bedeutung ist dabei die starke Abhängigkeit der resultierenden Stromdichte an Ladungsträgern von der lokal wirkenden Feldstärke.

Entscheidend dafür ist die Ausbildung des Staugebiets mit einer hohen Dichte der intrinsischen Ladungsträger. Da die intrinsischen Ladungsträger dichtebedingt und wegen ihrer Mizellenstruktur nahezu nicht rekombinieren, erhöhen sie durch ihre Eigenladung die lokale Feldstärke vor der Elektrode und fördern damit alle Ladungsträgeremissionsprozesse.

---

3 Edelgaskonfiguration aller Außenelektronen eines Atoms

## 2 Stand der Erkenntnisse

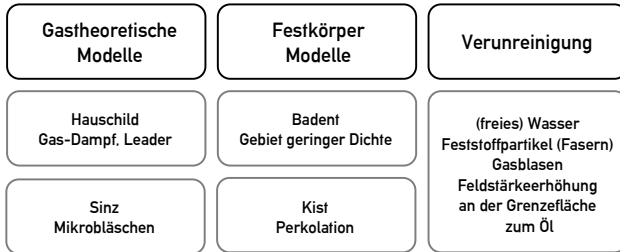
Einen analogen Prozess beschreibt Malter [Malter1936]. Er beobachtet bei konstanter Spannung einen Stromanstieg für dünn isolierte Elektroden, wenn in dieser Isolierschicht eine hohe Feldstärke erzeugt wird. Er erreichte dies, indem er Oberflächenladungen durch Bestrahlung erzeugt.

Weiterführende Modelle zur Ladungsträgergeneration in dielektrischen Flüssigkeiten und der Injektion an metallischen Grenzflächen liefern eine Reihe von weiteren Autoren [Nikuradse1934], [Thoma1970], [Minday1971], [Forster1985], [Hibma1985], [Bartnikas1994], [Castellanos1995] und [Denat2011].

Für das später abgeleitete Leitfähigkeitsmodell werden die Injektionsprozesse durch die Randbedingung (5.34) zur Poisson-Nernst-Planck-Gleichung in Abhängigkeit der Feldstärke implementiert.

## 2.4 Durchschlagverhalten des mineralischen Isolieröls

Zum Durchschlagverhalten mineralischen Isolieröls existieren mehrere Theorien.



**Bild 2.7:** Organigramm der Durchschlag-Theorien nach [Hauschild1969], [Sinz1990], [Badent1996], [Kist1999]

Hauschild [Hauschild1969] geht von einem stufenförmigen Durchschlagsprozess aus. Über mehrere Anregungsstufen wird der Durchschlag aus einer ionendominierten Grundleitfähigkeit über eine Elektronenstoßionisation bei steigender Prüfspannung eingeleitet. Dauerentladungen, welche vor dem Durchschlag beobachtet werden können, bewirken die Dissoziation und Verdampfung der Ölmoleküle. Können Dampf- oder Gasmoleküle nicht mehr ausreichend gelöst werden, entsteht im Öl eine Gas-Dampf-Phase mit geringer Festigkeit. Die in ihr auf Thermoionisation beruhenden Entladungen bezeichnet Hauschild als Leader, welche einen dem Luft-Leader von 1 kV/cm ähnlich Spannungsbedarf besitzen. Erreicht der Leader die Gegenelektrode, stellt dieser die Leitfähigkeit für die zum Durchschlag führenden Folgeprozesse her.

Ein ähnliches Durchschlagmodell beschreibt Sinz [Sinz1990]. Ausgehend von einem steten Gleichgewicht niederdichter und flüssiger Bestandteile des Isolieröls, sind gasförmige Gebiete zwischen den vermutlich teilkristallinen Strukturen des Isolieröls erlaubt. Wird das Isolieröl durch ein äußeres elektrisches Feld belastet, führt dies zu einer Orientierung der flüssigen Ölmoleküle. Da so die Rekombination zwischen Gas- und Flüssigkeitsbestandteilen behindert wird, ist die Bildung von Mikrobläschen wiederum wahrscheinlicher.

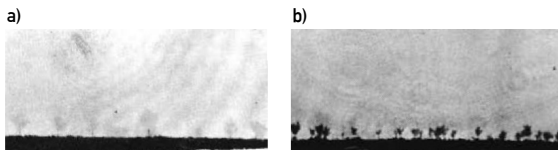


## 2 Stand der Erkenntnisse

Aus der Kathode injizierte Elektronen verursachen aufgrund lokaler hoher Stromdichten eine Erhitzung, welche die Bildung bzw. Vergrößerung von Gasbläschen fördert. Erst die Existenz von Gasbläschen ermöglicht eine Argumentation mit mittleren freien Weglängen zur Beschleunigung von Ladungsträgern und der Ionisation durch Stoßprozesse. „Badent [Badent1996] ist erstmalig vom gastheoretischen Ansatz abgewichen.“ [Kist1999] und unterteilt die Durchschlag einleitenden Prozesse in primäre, sekundäre und tertiäre Streamer. Diese lassen sich hinsichtlich Form und Ausbreitungsgeschwindigkeit voneinander unterscheiden. „Im Gegensatz zu obigen Modellen wird hier das Gebiet geringer Dichte, also der Streamer, als Folge eines bereits existenten Ladungsflusses verstanden und nicht umgekehrt“ [Kist1999].

Ausgehend vom Widerspruch zwischen der Ausbreitungsstruktur der Entladungen im Isolierstoff und dem elektrischen Feld entwickelt Kist [Kist1999] die Perkolationstheorie: „Das Perkolations-Modell beschreibt die Ausbreitung (Ladungstransport) somit als ein „Durchsickern“ (Perkolieren) eines „Fluids“ (Elektronen) durch ein „poröses Medium“ (Flüssigkeit)“ [Kist1999].

Dabei ist der Ladungstransport nicht nur an einen Stofftransport in Form von Ionen gebunden, sondern wird mittels stochastischer, quantenmechanischer Mechanismen wie Hopping oder Resonanztunneln begründet. Es existieren dabei erlaubte und verbotene Bereiche. In Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke ergeben sich entweder vereinzelte lokalisierte Bereiche oder „multiple verbundene Kanäle“. Ab einem „bestimmten Energiewert tritt ein lokal begrenzter Transportpfad auf. [...] Bei noch höheren Energien ist letztendlich das gesamte Medium von dem durchgängigen Perkolationskanal durchzogen“ [Kist1999]. Im Unterschiede zu älteren Modellen sind die Entstehung von Gas-Dampf-Phasen, Gebieten geringer Dichte oder Mikrobiaschen nicht Ursache sondern Wirkung eines „bereits existenten Ladungsflusses“.



**Bild 2.8:** Entladungseinsatz an der Kathode a)  $1,5 \mu\text{s}$  und b)  $1 \mu\text{s}$  vor dem Durchschlag nach [Thomas1975]

## 2 Stand der Erkenntnisse

Bild 2.8 zeigt den Entladungseinsatz in n-Hexane an der Kathode einer Platte-Platte-Anordnung kurz vor dem Durchschlag nach Thomas und Forster [Thomas1975].

Es zeigt sich dabei anschaulich die Perkulationsstruktur der Ladungsträgerinjektion. Der lokale Wärmeleistungseintrag führt dabei zu Gebieten geringer Dichte, welche aufgrund Ihrer geringeren elektrischen Festigkeit den Durchschlag einleiten.

Für die folgenden Betrachtungen wird zusammenfassend davon ausgegangen, dass der Öldurchschlag durch einen lokal erhöhten Energieeintrag eingeleitet wird. Kann dieser Energieeintrag nicht durch das Kühlmedium Isolieröl abtransportiert werden, tritt eine lokale Erwärmung mit den charakteristischen physikalischen Effekten auf. Ein Cracken der Ölbestandteile in niedermolekulare Stoffe ist eine chemische Folge. Können diese im Isolieröl nicht mehr gelöst werden, bilden sich Gebiete geringer elektrischer Festigkeit. Der hohe Energieeintrag einer Entladung in einem solchen Gebiet führt zur Thermoionisation und aufgrund des geringen Spannungsbedarfs der Vorentladungen zu einen Durchschlag der Isolierstrecke.

Die eingeleitete Wärmestromdichte kann aus dem Produkt von Stromdichte und Feldstärke berechnet werden.

$$\dot{q} = \dot{P} = | \vec{j} \cdot \vec{E} | \quad (2.1)$$

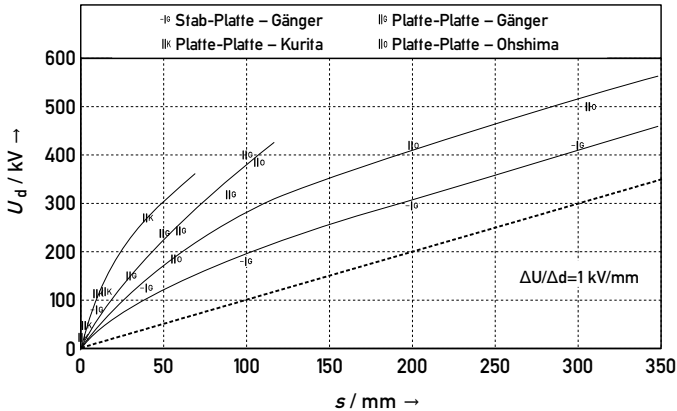
Um eine kritische Grenze bestimmen zu können, bedarf es genauer Kenntnisse der dielektrischen Leitfähigkeitsvorgänge im Isolieröl und der Feldstärkeverteilung. Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass für alle Entladungsprozesse ein kritischer Feldstärkebetrag existieren muss. Dieser wird als unabhängig von der eigentlichen Spannungsart erachtet.

Verunreinigungen des Isolieröls wie Partikel/Fasern, Gas und Wasser haben einen festigkeitssenkenden Einfluss [Sinz1990]. Sie dominieren vorwiegend das Langzeitverhalten Öl-Papier-isolierter Hochspannungsgeräte. Der Einfluss der Verunreinigungen bzw. der Schwachstellendurchschlag wird in dieser Arbeit nicht untersucht.

Vergleicht man die  $U_d$ -s-Kennlinien bei Gleichspannung der verschiedenen Literaturquellen nach Bild 2.9, so ist allgemein zu erkennen, dass sich trotz eines hohen geometrischen Homogenitätsgrades der Platte-Platte-Anordnungen bereits für geringe Schlag-

## 2 Stand der Erkenntnisse

weiten ein geringer Spannungsbedarf von ca. 1 kV/mm abzeichnet. Widersprüchlich dabei scheint, dass einerseits der für die Leader-Entladungen [Hauschild1969] bekannte Spannungsbedarf näherungsweise zum Tragen kommt, andererseits der geometrische Homogenitätsgrad weit von dem durch Hauschild bestimmten Grenzhomogenitätsgrad von  $\eta = 0,02$  entfernt liegt.



**Bild 2.9:**  $U_d$ - $s$ -Kennlinien für Mineralöl bei Belastung mit hoher Gleichspannung nach [Gänger1968], [Kurita1986] und [Ohshima1983]

Ohshima et al. [Ohshima1983] zeigen in zusätzlichen Vergleichen mit Zylinder-Platte-Anordnungen, dass die Durchschlagsspannung selbst nur in geringem Maße vom geometrischen Homogenitätsgrad der Anordnung abhängt.

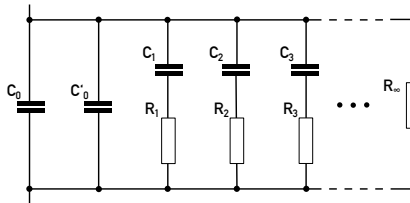
Obige Ergebnisse und die Erkenntnisse aus 2.3.1 lassen nur die Schlussfolgerung zu, dass lokal begrenzte Gebiete erhöhter Feldstärke in der Nähe der Elektroden existieren. Im Falle einer Überbeanspruchung erfolgt eine Entladung innerhalb dieses Gebiets. Das Vorwachsen der Entladung beruht nicht mehr auf der eigentlichen inneren Ölfestigkeit und der Grundfeldstärke, sondern auf den Vorentladungsmechanismen mit besonders geringem Spannungsbedarf.

## 2.5 Resistive-kapazitive Modellierung der dielektrischen Eigenschaften des Isolieröls und Isolierpapiers

### 2.5.1 Grundlagen der RC-Modellierung

Der Stand der Technik zur Beschreibung des dielektrischen Verhaltens von Isolierwerkstoffen ist die RC-Netzwerkmethode. Ausgehend vom phänomenologischen, empirischen Ansatz für das Verlustfaktor- $\tan\delta$ -Modell für den phasenverschobenen Verschiebungsstrom bei Wechselspannungsbelastung und dem Auftreten eines Polarisationsstromes in Analogie zur Ladekurve einer Kapazität bei der Erstbelastung durch eine hohe Gleichspannung wurde diese Methode auch bisher auf mineralisches Isolieröl und das mit ihm getränkte Isolierpapier übertragen.

Ein entsprechendes Netzwerk aus Kapazitäten und Widerständen zeigt Bild 2.10.



**Bild 2.10:** RC-Netzwerk zur Beschreibung des dielektrischen Verhaltens eines Isolierwerkstoffs

Dabei beschreibt die Kapazität  $C_0$  die geometrische Kapazität des untersuchten Isolierstoffvolumens. Die Kapazität  $C'_0$  beinhaltet alle Polarisationsvorgänge welche dem Einfluss der äußeren Spannungsbelastung mit 50 Hz folgen können, ohne dass diese separat gemessen werden können. Im Allgemeinen werden beide Teilkapazitäten zu einer zusammengefasst. Die betreffenden Polarisationsvorgänge werden durch deren relative Permittivität  $\epsilon_r$  beschrieben. Die Größe lässt sich direkt aus einer Kapazitätsmessung gemäß IEC 60811 bestimmen. Es gilt zu beachten, dass für Prüfspannung sehr hoher Frequenz, bei welcher die inneren Polarisationsvorgänge der äußeren Spannung

## 2 Stand der Erkenntnisse

nicht zeitlich folgen können, sich ein  $\epsilon_r = 1$  für alle Isolierstoffe einstellt. Die Polarisationsprozesse, welche der Prüfspannung zeitlich verzögert folgen, werden durch die Mischglieder beschrieben. Im Falle der Gleichspannungsbelastung können diese nur durch eine Kurvenapproximation an gemessenen Strom-Zeit-Verläufen bestimmt werden. Dabei gelingt es allerdings nicht, die Größen der  $R_1C_1$ -Glieder weder auf Bestandteile des Öls noch auf definierte Prozesse im Öl physikalisch zurückzuführen [Kahle1988].

Der Widerstand  $R_\infty$  entspricht der Leitfähigkeit, welche sich nach einer langen Belastung mit hoher Gleichspannung nach Abklingen aller Polarisierungseffekte einstellt. Die Messung dieser sogenannten Restleitfähigkeit ist zeitlich sehr aufwendig, kann aber durch eine PDC-Messung [Liebschner2009] verkürzt werden. Die Verwendung des RC-Netzwerks ermöglicht eine direkte Ableitung des Verlustfaktors  $\tan\delta$  der Isolierstoffe.

Die Anwendbarkeit der Methode setzt aber ein lineares Isolierstoffverhalten und ein homogenes elektrisches Feld voraus. Allerdings zeichnet sich mineralisches Isolieröl durch die folgenden Nichtlinearitäten aus:

- Feldstärkeabhängige Leitfähigkeit
- signifikanter Unterschied zwischen Polarisations- und Depolarisationsstrom
- polaritätsabhängige Leitfähigkeit für inhomogene Felder  $I_{\text{neg}} > I_{\text{pos}}$
- zeitlich Strom-Zeit-Maxima und -Minima nach Änderung der Spannung
- umgekehrt proportionale Abhängigkeit der Zeit bis zum Erreichen eines stationären Zustands bei Gleichspannungsbelastung von der Feldstärke

Für die praktische Anwendung der Modellierungsmethode wird auf die Polarisationsglieder gänzlich verzichtet. Ausgehend vom erweiterten Durchflutungsgesetz nach Maxwell in differentieller Form

$$\text{rot } \vec{H} = (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \quad (2.2)$$

## 2 Stand der Erkenntnisse

kann man dieses erweitern zu

$$\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{H} = \operatorname{div} \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (2.3)$$

Da die Divergenz der Rotation eines Vektors Null ist, erhält man die sogenannte Kontinuitätsgleichung ohne Quellen.

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

Um mit ihrer Hilfe eine Feldberechnung durchführen zu können, wird unter der Annahme eines linearen, isotropen Dielektrikums

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (2.5)$$

und der Annahme eines Ohm'schen Leitfähigkeitsverhaltens

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

folgende Beziehung hergeleitet:

$$0 = \operatorname{div} \left( \kappa \vec{E} + \frac{\partial(\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \vec{E})}{\partial t} \right) \quad (2.7)$$

Physikalisch stellt sich dabei die Frage, ob Isolierstoffe dem Ohm'schen Gesetz genügen, welches für Metalle anwendbar, aber nicht für Halbleiter gültig ist.

Unter der Voraussetzung, dass  $\kappa$  und  $\varepsilon_0 \varepsilon_r$  skalar sind, kann weiter umgeformt werden zu

$$0 = \operatorname{div} \kappa \vec{E} + \operatorname{div} \frac{\partial(\varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \vec{E})}{\partial t} \quad (2.8)$$

## 2 Stand der Erkenntnisse

$$0 = \kappa \operatorname{div} \vec{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{div} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (2.9)$$

Mit

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (2.10)$$

ergibt sich

$$0 = -\kappa \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi - \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{div} \frac{\partial (\operatorname{grad} \varphi)}{\partial t}. \quad (2.11)$$

Weil sich gemäß des Satzes von Schwarz die räumliche und zeitliche Ableitung des elektrischen Potentials tauschen lassen, können die Divergenz und Gradient zum Laplace-Operator zusammengefasst werden.

$$0 = -\kappa \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi - \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{div} \operatorname{grad} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$0 = \kappa \Delta \varphi + \varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.13)$$

In dieser Form lässt sich die Gleichung mit Hilfe der FEM für beliebige Geometrien bzw. Felder numerisch lösen.

Die Gesamtstromdichte im untersuchten Volumen ergibt sich zu

$$\vec{J}_{\text{Gesamt}} = \vec{J}_{\text{Strom}} + \vec{J}_{\text{Verschiebung}} \quad (2.14)$$

$$\vec{J}_{\text{Gesamt}} = \kappa \operatorname{grad} \varphi + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi}{\partial t} \quad (2.15)$$

Will man eine Feldberechnung mit Hilfe kommerzieller Software durchführen, müssen die Materialeigenschaften relative Permittivität und spezifische Leitfähigkeit bekannt

## 2 Stand der Erkenntnisse

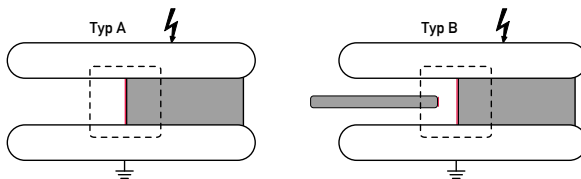
sein und zur Eingabe gebracht werden. Die berechnete Feldstärkeverteilung nach dem Abklingen aller zeitveränderlichen Vorgänge bei Belastung mit hoher Gleichspannung hängt somit nur von dem Verhältnis der integralen Leitfähigkeiten der Isolierstoffe ab. Aus diesem Grund wurde schwerpunktmäßig die sogenannte Restleitfähigkeit des Isolierstoffs experimentell bestimmt [Liebschner2009], [Judendorfer2012].

Im Widerspruch zu 2.9 und der darin getroffenen skalaren Eigenschaft der spezifischen Leitfähigkeit, wurde zudem versucht diese wiederum feldstärkeabhängig zu definieren.

Wie im Folgenden gezeigt werden kann, bestehen bei obiger Berechnungsart qualitative Widersprüche sowohl bezüglich des nichtlinearen Leitfähigkeitsverhaltens des Isolieröls als auch des Durchschlagverhaltens im Hinblick auf die berechneten Höchstfeldstärken.

### 2.5.2 RC-basierte Feldberechnung eines Öl-Papier-Barrierensystems

Die RC-basierte bzw. die Leitfähigkeit-Permittivität-Modellierung kann für komplexe Geometrien mit der FEM erfolgen. Exemplarisch wird im Folgenden dies für die Versuche nach Ebisawa et al. [Ebisawa2009] unternommen. Bild 2.11 zeigt die zwei verwendeten Modellanordnungen Typ A und Typ B. In beiden wird die Prüfstrecke durch zwei, einem Borda-Profil ähnlichen, Plattenelektroden bestimmt. Die Prüfstrecke wird halbseitig durch einen Blockspan gefüllt, sodass eine längs beanspruchte Grenzfläche erreicht wird. Im Typ-B wird zusätzlich in den ölgefüllten Prüfbereich eine Querbarriere mit einem Abstand von 5 mm zum Blockspan eingebracht.



**Bild 2.11:** Modellversuche nach Ebisawa et al. [Ebisawa2009]



## 2 Stand der Erkenntnisse

Tabelle 2.1 zeigt die gemittelten Durchschlagsspannungen aus jeweils drei Realisierungen. Beide Modellversuche haben einen Elektrodenabstand von 30 mm.

**Tabelle 2.1:** Ermittelte Durchschlagsspannungen nach Ebisawa et al. [Ebisawa2009]

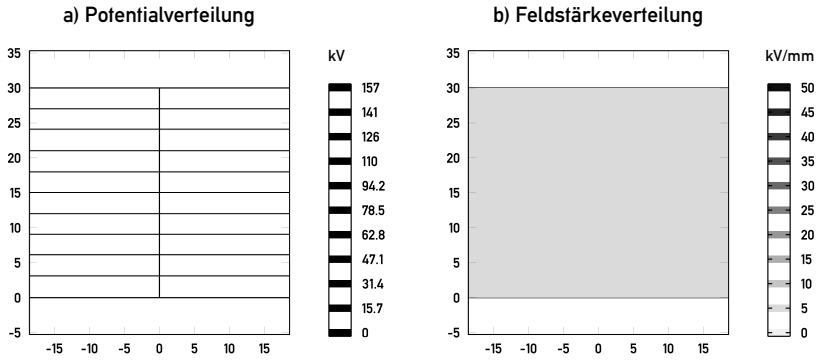
	Typ A	Typ B
Beschreibung	30 mm Ölspalt	30 mm Ölspalt mit 5 mm Barriere
mittlere Durchschlagsspannung	157 kV	307 kV

Es zeigt sich, dass die eingeschobene Barriere die Durchschlagsspannung nahezu verdoppelt. In zusätzlichen Versuchen variierten Ebisawa et al. [Ebisawa2009] die Dicke der Barriere. Die Messergebnisse lassen keinen linearen Zusammenhang zwischen Barriendicke und Durchschlagsspannung erkennen.

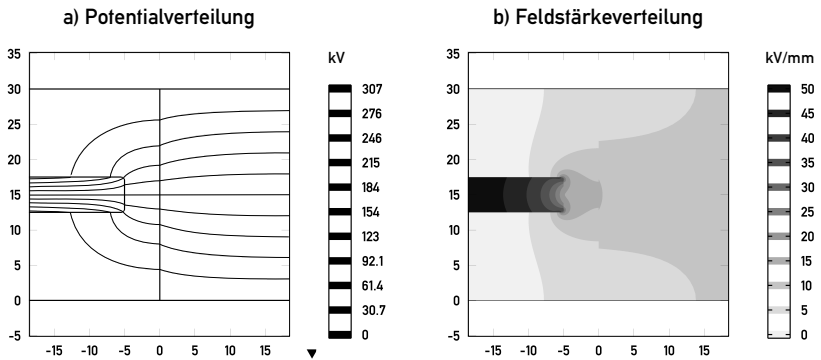
Für beide Typen lassen sich für ein Leitfähigkeitsverhältnis von 100:1 zwischen Öl und Papier folgende Feldberechnungen durchführen. Sie werden in der Regel für den vorliegenden Fall zweidimensional und stationär durchgeführt. Das Potential der Hochspannungselektrode entspricht dabei der experimentell ermittelten Durchschlagsspannung. Für einen besseren Detailgrad beschränken sich die Darstellungen in den folgenden Bildern 2.12 und 2.13 auf die in Bild 2.11 zentral markierten Bereiche. Sie zeigen sowohl die berechnete Feldstärke als auch die Potentialverteilung innerhalb der beiden Typen.

Die Randbereiche des Elektrodensystems haben einen vernachlässigbaren kleinen Einfluss auf diesen Bereich der Durchschlagereignisse.

## 2 Stand der Erkenntnisse



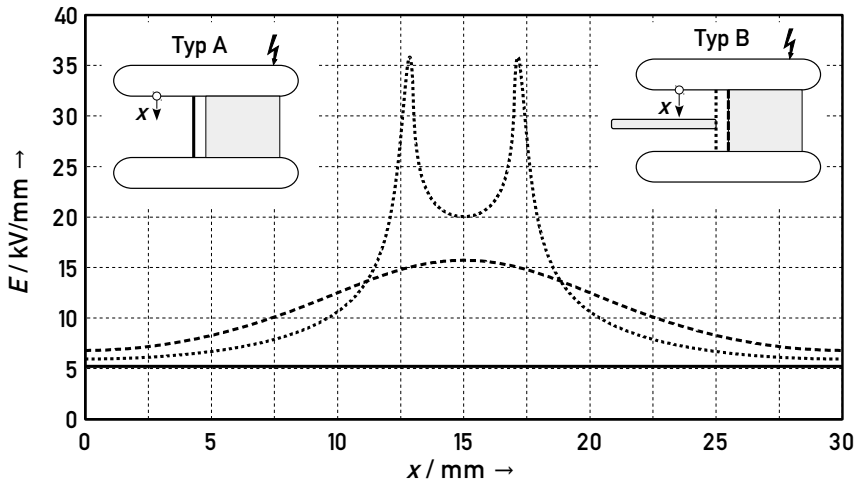
**Bild 2.12:** Feldberechnung für Typ A, a) Äquipotentialliniendarstellung, b) Feldstärkeverteilung



**Bild 2.13:** Feldberechnung für Typ B, a) Äquipotentialliniendarstellung, b) Feldstärkeverteilung

Um die Interpretation der Berechnungsergebnisse zu erleichtern, werden die Feldstärken entlang der markierten Linien in einem Diagramm mit Bild 2.14 dargestellt.

## 2 Stand der Erkenntnisse



**Bild 2.14:** Berechnete Feldstärkeverteilung innerhalb der Isolierung entlang der Pfade im Isolieröl

Für den Typ A ergibt sich nach der ermittelten Durchschlagspannung und dem Elektrodenabstand  $d = 30 \text{ mm}$  eine wirksame mittlere Durchschlagfeldstärke von  $5,2 \text{ kV/mm}$ . Diese berechnete Feldstärke kann auch unter Berücksichtigung des Volumeneffekts keine Entladung verursachen, da technisch reines mineralisches Isolieröl eine Festigkeit von 25 bis  $35 \text{ kV/mm}$  besitzt. Es stellt sich die Frage, wie bei einer solchen vergleichsweise geringen Feldstärke ein Durchschlag auftreten kann. Bisher wurde daher mit der verringerten Festigkeit längsbelasteter Öl-Papier-Grenzflächen argumentiert [Jia-Xiang1997], [Okubo1987], [Nakao1997].

Für den Typ B ergeben sich für die gleichen Isolierstoffe mit gleicher Aufbereitung unterschiedliche Durchschlagspannungen und auch unterschiedliche Festigkeitswerte. Die Grenzfläche des Blockspans erträgt im Durchschlagsfall gemäß Berechnung mit  $15,7 \text{ kV/mm}$  nahezu die dreifache Feldstärkebelastung. Der Bereich nahe der dielektrischen Ecken der Barrierenkanten erfährt hingegen eine sechsfach erhöhte Feldstärkebelastung. Obwohl sich die berechneten Feldstärkemaxima derart unterscheiden, sind nach den Durchschlagversuchen sowohl an der Kante als auch an der Blockspangrenzfläche

## 2 *Stand der Erkenntnisse*

Entladungsspuren erkennbar.

Es kann zusammengefasst werden, dass die RC-Modelle keine korrekte Aussage hinsichtlich eines Zusammenhangs zwischen berechneter Höchstfeldstärke und Durchschlagspannung der Gesamtanordnung zulassen. Innerhalb von [Backhaus2013b] wird der Sachverhalt detailliert dargestellt und ein Lösungsansatz auf Basis der PNP-Methode und der sich bildenden Ladungsträgerstaugebiete erörtert. Es kann gezeigt werden, dass unter der Annahme gleicher Mobilitäts- und Diffusionsparameter für die unterschiedlichen Durchschlagspannungen dennoch gleiche Feldstärken nahe der Festigkeit berechnet werden können.

# 3 Ziele der Arbeit

Es wurde ein unvollständiger Kenntnisstand zum Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung festgestellt. Weder können Phänomene der Leitfähigkeit und des Durchschlagverhaltens bei hoher Gleichspannung eindeutig erklärt werden, noch existieren robuste Berechnungsmodelle, die eine Modellierung oder Dimensionierung anhand von physikalischen Messgrößen ermöglichen.

Wie gezeigt wird, existieren insbesondere starke Widersprüche zwischen den Leitfähigkeits- und Durchschlagexperimenten und den Berechnungsergebnissen auf Basis einer resistiv-kapazitiven Modellierung der Isolierstoffe Öl und Papier. Durch das Einbeziehen bisheriger veröffentlichter Daten und eigenen Strom-Zeit- und Durchschlagexperimenten soll das dielektrische Verhalten der Öl-Papier-Isolierung besser verstanden werden. Da der Fokus der letzten Arbeiten zu diesem Thema auf der Bestimmung der Leitfähigkeiten einzelner Isolierwerkstoffe [Liebschner2009] und [Judendorfer2012] lag, wird in der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt auf das Durchschlagexperiment gelegt. Es liefert zusätzliche Informationen, insbesondere hinsichtlich der Feldstärkeverteilung zwischen Öl und Papier und den örtlich wirksamen Feldstärken im Isoliersystem.

Ausgehend von den bekannten Polarisationsvorgängen und der Ladungsträgerdrift im Isolieröl und Papier bei Belastung mit hoher Gleichspannung soll der Leitfähigkeitsbegriff als solcher vertieft werden. Gemäß des physikalischen Gedankenmodells der Öl-Leitfähigkeit wird diese mit Hilfe der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung und ihren Randbedingungen mathematisch modelliert - Kapitel 5.

Eine signifikante Eigenschaft mineralischen Isolieröls bei Belastung durch hohe Gleichspannung ist die Bildung stabiler Ionenschichten vor sowohl isolierten als auch metallisch blanken Elektroden. Die Eigenladung der Ionen führt in der Nähe der entgegengesetzt geladenen Elektrode zu einer Feldstärkeerhöhung. Es stellt sich eine *innere Inhomogenität* der Feldstärkeverteilung ein, welche in Elektrodennähe nur in geringem Maße von deren Geometrie als vielmehr durch die dort befindlichen Ladungsträger bestimmt wird. Die Modellierung der Feldstärkeverteilung innerhalb einer reinen Öl-Strecke ist notwendig, um deren Durchschlagverhalten zu erklären - Kapitel 6.

### *3 Ziele der Arbeit*

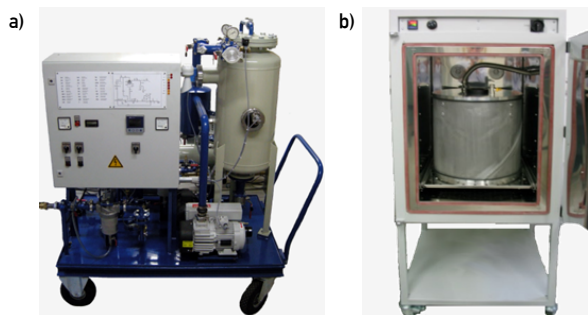
Von technischem Interesse ist das Verhalten des Isoliersystems aus Öl und Papier. Immer steht dabei die Grenzschicht zwischen beiden Stoffen im Interesse - Kapitel 7.

Der elektrische Durchschlag in seiner Physik selbst wird nicht untersucht. Vielmehr ist es das erklärte Ziel, dass dielektrische Verhalten der Isolierstoffe Öl und Papier modellierbar bzw. berechenbar zu machen. Der elektrische Durchschlag soll damit als Folge der vorangegangenen Leitfähigkeitsprozesse und des Energieeintrags verstanden werden.

# 4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für Durchschlagsversuche einer Öl-Papier-Isolierung gestaltet sich insbesondere hinsichtlich der Isolierstoffkonditionierung sehr aufwendig. Aufgrund der starken Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften der Isolierstoffe von ihrem Wassergehalt ist eine Vakuumtrocknung und stete Kontrolle des Wassergehalts erforderlich. Zur Öltrocknung wurde für die Versuche eine Vakuumaufbereitungsanlage verwendet. Durch einen Unterdruck  $p_{\text{abs}} \sim 10 \mu\text{bar}$  im Vakuumgefäß wird sowohl der Siedepunkt der Ölbestandteile als auch die Löslichkeit von Gasen herabgesetzt. Durch Vakuumtrocknung und Filterung erreicht man eine Ölqualität, die für alle Versuche den Anforderungen hinsichtlich eines Wassergehalt kleiner 7 ppm und einer elektrischen Festigkeit gemäß VDE 0370 Teil 5/96 von größer 65  $\text{kV}_{\text{eff}}$  genügt.

Zur Papiertrocknung wurde ein Vakuumofen in Kombination mit der Ölaufbereitungsanlage gemäß Bild 4.1 verwendet.



**Bild 4.1:** Prüflingskonditionierung mit a) Vakuum-Ölaufbereitungsanlage, b) Vakuum-Ofen

Der Prozess der Papiertrocknung und Ölinfiltration wurde gemäß DIN EN 60763-2 (VDE 0314-2, Bestimmung für Blockspan, Teil 2: Prüfverfahren) durchgeführt. Durch Einhalten der Trocknungszeiten kann ein Wassergehalt von weniger als 0,4 % im Papier nach IEC 60814 sicher eingehalten werden. Nach dem Trocknungsprozess und

#### 4 Versuchsaufbau

der Entnahme der ersten Probe dient die Vakuumkammer als hermetisches Lagergefäß.

Zur Bereitstellung der hohen Gleichspannung wurde eine Greinacher-Schaltung nach Bild 4.2 genutzt, welche durch einen Hochspannungstransformator und Mikrokontrollergeregelten Stelltransformator gespeist wurde. Der Schrittmotorantrieb des Stelltransformators erlaubt eine rampen- und stufenförmige Spannungssteigerung im Bereich von 0,2 kV/s bis 20 kV/s. Die Messung der hohen Gleichspannung erfolgte über einen resistiven Teiler. Um die Intensität der Durchschläge zu reduzieren wurde ein Dämpfungswiderstand  $R_D$  im M $\Omega$ -Bereich vorgesehen.

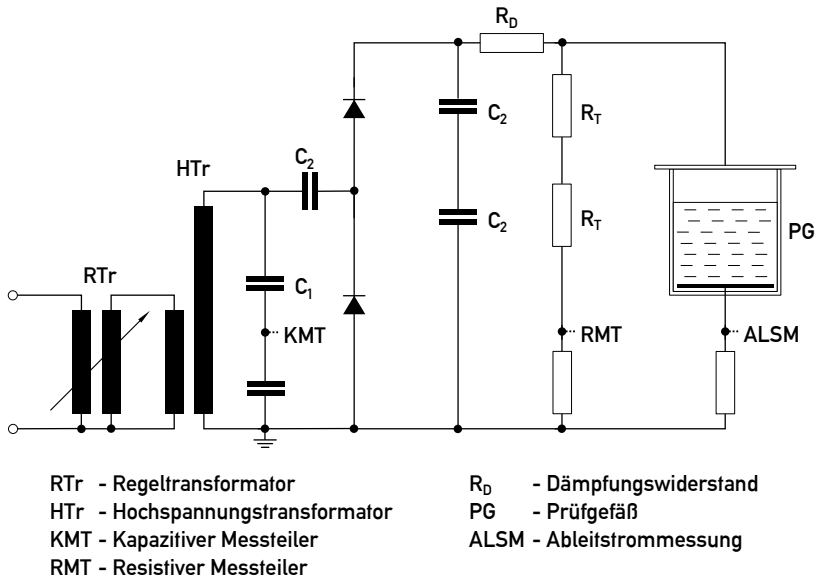


Bild 4.2: Prüfschaltung für hohe Gleichspannung

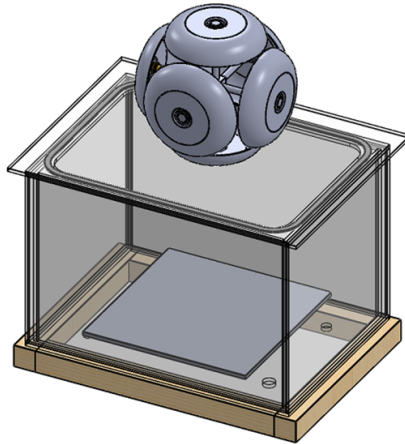
Für ausgewählte Ableitstrommessungen kann ein Shunt in die Erdleitung des isoliert aufgestellten Prüfgefäßes geschaltet werden. Der Eingang des Messgeräts ist für den



#### 4 Versuchsaufbau

Fall einer Ableitstrommessung bis zum Durchschlag gesondert zu schützen. Eine Kombination aus Eingangskapazität, antiparallelen Dioden und Überspannungsgasableiter arbeitet dabei erfolgreich [Shirvani2013].

Das verwendete Prüfgefäß wurde aus silikonverklebten Glasplatten gefertigt. Die doppelwandige Ausführung dient dabei der thermischen Isolierung für Durchschlagversuche bis 90 °C. Den oberen Abschluss des Glasgefäßes bildet ein wasserstrahlgeschnittener Glasring. Dieser ermöglicht ein Schließen des Gefäßes mit einer öl- und temperaturbeständigen NBR-Flachdichtung und einem Deckel.



**Bild 4.3:** CAD-Prinzipdarstellung des Prüfgefäßes

Als Deckel bzw. Halterung der Hochspannungselektrode hat sich eine überstehende PMMA-Platte bewährt. Es hat sich gezeigt, dass trotz Steuerung durch die Kopfelektrode der Durchführung lokal begrenzt Teilentladungen auftreten. Die geringe Oberflächenleitfähigkeit behindert das Abfließen der Ladungen und ermöglicht so ein Einschirmen. Im Falle eines Glasdeckels gleiten die Entladungen bis zum Rand und können leichter zu einem Überschlag führen. An den Silikonfugen können ebenfalls Teilentladungen auftreten, da ein erheblicher Leitfähigkeitsunterschied zwischen Silikon und Glas besteht. Dieser führt zu einem hohen Spannungsfall und damit hoher Belastung der Luft nahe

#### 4 Versuchsaufbau

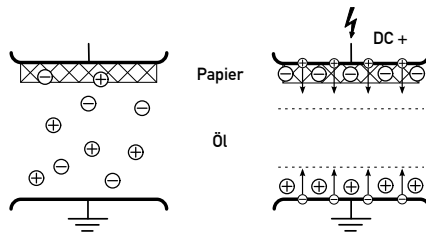
der Klebefuge. Durch die Applikation eines ein bis zwei Zentimeter breiten Leitsilberstreifens kann das Teilentladungsverhalten verbessert werden. Bohrungen für den Ölein- und -auslass sowie elektrische Durchführungen für die Erdung und die elektrische Heizung konnten im Boden realisiert werden. Die Manipulation der Prüflinge erfolgte sowohl mit innen als auch außen angebrachten Neodymmagneten. Somit kann das Öffnen des Prüfgefäßes vermieden werden, was sowohl das Einbringen von Fremdkörpern und Verunreinigungen als auch den Verlust an Isolieröl minimiert. Zum Zwecke einer mechanisch stabilen Aufstellung und der notwendigen Transportierbarkeit wurde das Prüfgefäß auf einen Holzrahmen gesetzt.

Im Rahmen der Arbeit kommen verschiedene Elektrodenanordnungen zum Einsatz. Von *Spitze-Platte* über *gekreuzte Zylinder* bis hin zu *koaxiale Zylinder* wurde ein großer geometrischer Homogenitätsgradbereich abgedeckt. Eine detaillierte Beschreibung der Anordnungen erfolgt in den entsprechenden Folgekapiteln.

# 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

## 5.1 Physikalisches Leitfähigkeitsmodell der Öl-Papier-Isolierung

Anhand der Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 wird folgendes physikalisches Leitfähigkeitsmodell der Öl-Papier-Isolierung aufgestellt.



**Bild 5.1:** Leitfähigkeitsmodell der Öl-Papier-Isolierung

Gemäß Bild 5.1 befinden sich im Isolieröl eine bestimmte Grundmenge öleigener bzw. intrinsischer Ladungsträger. Diese erfahren bei einer Belastung mit Gleichspannung eine elektrostatische Kraft und bewegen sich zusammen mit der sie umgebenden Mizelle in der Isolierflüssigkeit zu ihrer Gegenelektrode und lagern sich dort an. Gleichzeitig werden feldstärkeabhängig zusätzliche Ladungsträger an den Elektroden in die Isolierung injiziert. Eine zusätzlich Ionisation bzw. Dissoziation der Ölbestandteile wird vernachlässigt.

Ohne die Ladungsträger explizit chemisch-physikalisch benennen zu können, wird von je zwei positiven und je zwei negativen Ladungsträgerspezies ausgegangen – den intrinsischen Ölladungsträgern und den injizierten Ladungsträgern.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Im Falle der ersten Gruppe handelt es sich mit möglichen Metallionen, Ionen dissoziierter organischer Säuren und anderen Verbindungen um solche, die mit anderen Ölbestandteilen Mizellen bilden. Die Ionen sind physikalisch stabil, da alle Außenelektronen der Oktettregel genügen. Ihnen ist eigen, dass sie wegen der Mizellenbildung an den entsprechenden Gegenelektroden nicht rekombinieren und dort aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Ladungsträgerdichte eine Feldstärkeanhebung verursachen (hetero charge).

Im Falle der zweiten Gruppe handelt es sich um Elektronen und „Löcher“ bzw. fehlende Elektronen. Sie werden durch die Metallelektroden feldstärkeabhängig injiziert (homo charge). Da diese nicht frei existieren können, bedarf es immer einer Anlagerung an Isolierölbestandteile. Anders als bei den ölintrinsischen Ladungsträgern, sind diese im Allgemeinen nicht stabil, da die Oktettregel für den ladungstragenden Ölbestandteil nicht erfüllt ist. Es ist damit möglich, dass ein injizierter Ladungsträger von einem zum nächsten Ölmolekül wechselt. Ihre Bewegung findet im Isolieröl teils teilchengebunden, also angelagert an Moleküle und deren funktionelle Gruppen, und teils durch quantenmechanische Vorgänge wie Hopping und Tunneling [Kist1999] statt. Damit können diese Ladungsträger nach dem Durchlaufen der Prüfstrecke an der entsprechenden Gegenelektrode rekombinieren.

Allen Ladungsträgerspezies ist eigen, dass sie sich an der Grenzschicht zweier Medien mit unterschiedlichen Mobilitätswerten für die Ladungsträger beim Übergang von einem Gebiet hoher Mobilität zu einem Gebiet geringer Mobilität „stauen“. Damit nimmt der Betrag ihrer Konzentration Gebiet hoher Mobilität zu und die lokale Grundfeldstärke wird in der Regel angehoben.

Der Einfluss des Wassers auf die Leitfähigkeit kann für technisch relevante Konzentrationen mit  $n_{\text{H}_2\text{O}} < 30$  ppm vernachlässigt werden [Vahidi2013].

Die sogenannte Restleitfähigkeit des Isolieröls bestimmt sich aus der Menge bzw. Rate der feldstärkeabhängig an den Elektroden injizierter Ladungsträger, deren wiederum feldstärkeabhängigen Driftgeschwindigkeiten im Isolieröl und deren Rekombinationsverhalten mit entgegengesetzt geladenen injizierten Ladungsträgern und den entsprechenden Gegenelektroden.

Generell, und das wurde bisher durch die Angabe der integralen spezifischen elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  bzw.  $\kappa$  vernachlässigt, muss in drei Leitfähigkeitsmechanismen

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

unterschieden werden:

### Ladungsträgerbereitstellung

- Intrinsische Ladungsträger (Anionen, Kationen) werden durch die feldstärkeabhängige Dissoziation einiger Isolierölbestandteile generiert.
- Die Elektroden stellen durch eine feldstärkeabhängige Injektion zusätzliche Ladungsträger (Elektronen, Löcher) bereit.

### Ladungstransport

- Die Ladungsträger bewegen sich, bestimmt durch ihre Mobilität, mit einer bestimmten Geschwindigkeit im elektrischen Feld. Die Geschwindigkeit ist dabei aufgrund der inhomogenen Feldstärkeverteilung im Ölsplatt keinesfalls konstant.
- Eine zusätzliche Ladungsträgerbewegung erfolgt aufgrund unterschiedlicher Ladungsträgerkonzentration als Antrieb für eine Diffusion. Da die elektrische Drift zu Staugebieten hoher Konzentrationsdichte führt, ist die Diffusionsbewegung in der Regel dieser entgegengesetzt.

### Ladungsträgerrekombination

- Es wird davon ausgegangen, dass die Rekombinationsrate der intrinsischen Ladungsträger innerhalb des Isolieröls im Maßstab von Laborversuchen vernachlässigbar klein ist. Aufgrund der vergleichsweise hohen Ladungsträgermobilität im Isolieröl ist auch deren Gesamtkonzentration vergleichsweise gering.
- Hingegen ist das Rekombinationsverhalten der injizierten Ladungsträger die Ursache für die hohe Feldstärke im Isolierpapier. Aufgrund der dort geringen Mobilität der Ladungsträger reichern sich diese darin an und die Ladungsträgerdichte steigt. Es bildet sich ein Rekombinationsgebiet, in welchem die zwei injizierten Ladungsträgerspezies rekombinieren. Außerhalb dieses Gebietes stehen sich damit zwei Ladungsträgerfronten mit entgegengesetzter Polarität gegenüber.

Für den Fall des isolierölgetränkten Papiers werden die Leitfähigkeitsvorgänge als analog angesehen. Im Unterschied zum Isolieröl muss aufgrund der festen, mit engen Ölkämen durchzogenen Struktur von einer deutlich geringeren Drift- und Diffusionsbewegung ausgegangen werden. Liegt das Isolierpapier makroskopisch an den Elektroden

an, ist dennoch von einer endlich dünnen Ölschicht auszugehen. Die eigentlichen Injektionsmechanismen sind damit gleich.

## 5.2 Mathematische Beschreibung des dielektrischen Verhaltens mit der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung

### 5.2.1 Formulierung des Gleichungssystems

Die Poisson-Nernst-Planck-Gleichung (PNP) ist ein Standardwerkzeug zur Modellierung der Leitfähigkeitsprozesse in Halbleitern [Selberherr1984]. Außerdem werden Fragestellungen zu Elektrolyt-Prozessen in Membranen [Cardenas2000], [Coco2007], in Böden [Reddy2009] oder gar Mobilitätsprobleme im Straßenverkehr [Schlake2011] damit beschrieben. Bereits durch Karasev et al. [Karasev1992] wurde sie prinzipiell für dielektrische Flüssigkeiten angewendet. Dabei zeichnet sich aktuell ein allgemeiner Trend zum vermehrten Einsatz dieser zur Modellierung der Leitfähigkeitsprozesse in Gasen [Kumara2009], [Singh2015] und Isolierflüssigkeiten [Hjortstam2012] und [Küchler2016] ab.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird sie auf die dielektrischen Vorgänge innerhalb mineralischen Isolieröls bei Belastung mit hoher Gleichspannung angewendet. Dabei unterscheiden sich auf Grundlage des Leitfähigkeitsmodells die Randbedingungen zur Lösung der Gleichung zu den bisherigen Ansätzen.

Die PNP ist ein nichtlineares Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung. Das System besteht primär aus der Poisson-Gleichung (5.1), welche das elektrische Feld als ein elektrostatisches Feld anhand des Gradienten des elektrischen Potentials  $\nabla\varphi$ ; der Permittivität des Dielektrikums  $\epsilon_0\epsilon_r$  unter Berücksichtigung der Eigenladung der im Feld befindlichen Ladungsträgerdichten  $e z_i n_i$  innerhalb eines begrenzten infinitesimalen Volumens beschreibt.

$$-\nabla\varphi = \frac{e}{\epsilon_0\epsilon_r} \sum_i z_i n_i \quad (5.1)$$

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Die Ladungsträger können sich dabei angetrieben durch elektrostatische Feldkräfte oder aufgrund eines Diffusionsgradienten frei im elektrischen Feld bewegen. Diese Bewegung einer Ladungsträgerspezies beschreibt sekundär je eine Nernst-Planck-Gleichung. In Analogie zum bisherigen Verständnis der Leitfähigkeitsvorgänge soll die Gleichung ausgehend von der Kontinuitätsgleichung (2.4) in Kapitel 2.5.1

$$0 = \operatorname{div} \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (5.2)$$

hergeleitet werden. Aufgrund der Unabhängigkeit der zeitlichen und örtlichen Ableitung kann

$$0 = \operatorname{div} \vec{J} + \operatorname{div} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5.3)$$

zu

$$0 = \operatorname{div} \vec{J} + \frac{\partial \operatorname{div} \vec{D}}{\partial t} \quad (5.4)$$

umgeformt werden. Auf Grundlage des Gauß'schen Gesetzes

$$\rho = \operatorname{div} \vec{D} \quad (5.5)$$

wird die Verschiebungsflussdichte  $\vec{D}$  durch die Ladungsträgerdichte substituiert.

$$0 = \operatorname{div} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5.6)$$

Die Kontinuitätsgleichung (5.6) genügt nun in ihrer Form einer Ratengleichung. Um Dissoziations- bzw. Rekombinationsprozesse im Dielektrikum zuzulassen, wird un-

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

ter der Bedingung, dass sich die Grundgesamtheit der Ladungsträgerdichte nicht ändert,

$$\frac{d\rho_Q^+}{dt} + \frac{d\rho_Q^-}{dt} = 0 \quad (5.7)$$

die Gleichung um die entsprechenden Quelltherme für positive und negative Ladungsträgerdichten ergänzt.

$$\operatorname{div} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho_Q^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho_Q^-}{\partial t} \quad (5.8)$$

Im Unterschied zu der bisherigen Annahme, dass die Stromdichte im Dielektrikum dem Ohm'schen Gesetz genügt, wird angenommen, dass sich die Stromdichte aus der durch die elektrische Feldstärke angetriebene Drift und der Diffusion zusammensetzt.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\vec{J}_{\text{Drift}} + \vec{J}_{\text{Diffusion}}) = \frac{\partial \rho_Q^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho_Q^-}{\partial t} \quad (5.9)$$

Die elektrische Driftstromdichte oder Konvektionsstromdichte ergibt sich dabei allgemein aus der gerichteten Bewegung der vorhandenen Ladungsträgerdichte.

$$\vec{J}_{\text{Drift}} = \rho \vec{v} \quad (5.10)$$

Mit der Mobilität, dem Verhältnis aus mittlerer Driftgeschwindigkeit und dem Antrieb durch die elektrische Feldstärke in gleicher Richtung,

$$\mu = \frac{\vec{v}}{\vec{E}} \quad (5.11)$$

kann die elektrische Driftstromdichte der Ladungsträger polaritätsabhängig mit

$$\vec{J}_{\text{Drift}} = \mu \rho \vec{E} \quad (5.12)$$



## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

$$\vec{J}_{\text{Drift}} = -\mu \rho \text{ grad } \varphi \quad (5.13)$$

beschrieben werden. In der durch Gleichung (5.11) gewählten Form, welche sich auch aus einer experimentellen Bestimmung ergeben würde, ist die Beweglichkeit  $\mu$  abhängig von der Wertigkeit  $z$  vorzeichenbehaftet.

Die Diffusionsteilchenstromdichte  $\vec{I}_{\text{Diffusion}}$  beschreibt unter der Einschränkung, dass sich verschiedene Teilchendichten nicht gegenseitig beeinflussen, das erste Fick'sche Gesetz anhand des Diffusionskoeffizienten  $D$  und des Gradienten der Teilchendichtekonzentration  $n$ .

$$\vec{I}_{\text{Diffusion}} = -D \text{ grad } n \quad (5.14)$$

Es wird um die Ladung  $q$  der Ladungsträgerteilchen zur Diffusionsstromdichte  $\vec{J}_{\text{Diffusion}}$  erweitert.

$$\rho = q \cdot n \quad (5.15)$$

$$\vec{J}_{\text{Diffusion}} = q \cdot \vec{I}_{\text{Diffusion}} \quad (5.16)$$

$$\vec{J}_{\text{Diffusion}} = q \cdot \left( -D \text{ grad } \frac{\rho}{q} \right) \quad (5.17)$$

Die Drift- und Diffusionsstromdichte können nun entsprechend in Gleichung (5.8) eingefügt und weiter umgeformt werden.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (-\mu \rho \text{ grad } \varphi - D \text{ grad } \rho) = \frac{\partial \rho_{\text{Q}}^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{Q}}^-}{\partial t} \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \text{div} (\mu \rho \text{ grad } \varphi - D \text{ grad } \rho) = \frac{\partial \rho_{\text{Q}}^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{Q}}^-}{\partial t} \quad (5.19)$$

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \operatorname{div}(\mu \rho \operatorname{grad} \varphi) - \operatorname{div}(D \operatorname{grad} \rho) = \frac{\partial \rho_Q^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho_Q^-}{\partial t} \quad (5.20)$$

Analog zu Gleichung (2.8) in Kapitel 2.5.1 muss für die weitere Vereinfachung gelten, dass die Mobilität  $\mu$  und der Diffusionskoeffizient  $D$  skalar und damit unabhängig vom Potential beziehungsweise der Ladungsträgerdichteverteilung sind.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \mu \rho \Delta \varphi - D \Delta \rho = \frac{\partial \rho_Q^+}{\partial t} + \frac{\partial \rho_Q^-}{\partial t} \quad (5.21)$$

Da, wie bereits vorausgesetzt, die Bewegung jeder Spezies unabhängig voneinander verlaufen soll, kann die Summengleichung in vier Teilgleichungen für die jeweiligen Ladungsträgerdichten zerlegt werden. Es wird je eine Gleichung zur Modellierung der Bewegung für die in Kapitel 5.1 angenommenen Ladungsträgerarten aufgestellt. Beispielhaft lautet diese für die  $i$ -te Spezies nun

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} - \mu_i \rho_i \Delta \varphi - D_i \Delta \rho_i = \frac{\partial \rho_{iQ}}{\partial t} \quad (5.22)$$

Diese Form kann nun durch

$$\rho = \sum_i q_i \cdot n_i = \sum_i e \cdot z_i \cdot n_i \quad (5.23)$$

weiter zur allgemein bekannten teilchendichtenbasierten Form umgewandelt werden.

$$\cancel{e \cdot z_i} \frac{\partial n_i}{\partial t} - \cancel{e \cdot z_i} \mu_i n_i \Delta \varphi - \cancel{e \cdot z_i} D_i \Delta n_i = \cancel{e \cdot z_i} \frac{\partial n_{iQ}}{\partial t} \quad (5.24)$$

Der Quellterm der zeitlichen Teilchendichtenänderung kann für die paarweise feldstärkeabhängige Dissoziation bzw. teilchendichteabhängige Rekombination zweier Ladungsträgerspezies weiter zerlegt werden.

$$\frac{dn_{iQ}}{dt} = \frac{d}{dt}(n_{i\text{Dissoziation}})dt + \frac{d}{dt}(n_{i\text{Rekombination}}) \quad (5.25)$$

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

$$\frac{d}{dt}(n_i \text{Dissoziation}) dt = r_i \text{Dissoziation}(E) \quad (5.26)$$

$$\frac{d}{dt}(n_i \text{Rekombination}) = - \sum_j r_{ij} \text{Rekombination} \cdot n_i \cdot n_j \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} - \mu_i n_i \Delta \varphi - D_i \Delta n_i = r_i \text{Dissoziation}(E) - \sum_j r_{ij} \text{Rekombination} \cdot n_i \cdot n_j \quad (5.28)$$

In dieser Form beschreibt die Nernst-Planck-Gleichung infinitesimal die zeitliche Veränderung der Teilchendichte, nicht Ladungsträgerdichte, als Summe aller Quellen und Senken. Auf das untersuchte Volumen bezogen sind dies die Transport- und Quellprozesse einer Spezies.

Die Dissoziationsprozesse werden für das vorliegende Modell zunächst nicht explizit modelliert. Für eine Modellierung bedarf es sowohl eines detaillierten Verständnisses der Vorgänge als auch der Parameter, welche in die Berechnung einfließen können. Beides liegt bisher nicht vor. Daher wird vereinfacht angenommen, dass insbesondere die intrinsischen Ladungsträger bereits vorhanden sind und ihre Drift mit der Gleichspannungsbelastung einsetzt. Die Annahme einer solchen Grundgesamtheit und deren Definition über die Anfangsbedingungen wird im folgenden Abschnitt erklärt.

Demgegenüber zeigen die später vorgestellten Rechenergebnisse, dass das Rekombinationsverhalten der Ladungsträger von großer Bedeutung ist. Der Rekombinationsprozess stellt eine Permutation aller Teilchen dar und wird daher als ein Produkt der injizierten Teilchendichten formuliert.

Prinzipiell muss angenommen werden, dass alle entgegengesetzt geladenen Ladungsträger miteinander rekombinieren können - Elektronen mit Löchern, intrinsische Anionen mit Kationen und gegenseitig. Rekombinationsprozesse werden in der Galvanotechnik derart praktisch genutzt, dass sich gelöste Metallionen an einer Gegenelektrode, dem zu beschichtenden Werkstück, abscheiden. Da im Isolieröl stabile Ionenschichten vor metallisch blanken Elektroden beobachtet werden können, werden die Rekombinationsprozesse für die ölintrinsischen Ladungsträger zur Vereinfachung vernachlässigt.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Physikalisch wird dies mit der Mizellenstruktur der Ladungsträger begründet, welche Rekombinationsprozesse entsprechend erschwert.

Allerdings ist die gegenseitige Rekombination der injizierten Ladungsträger von großer Bedeutung. Während die Rekombination im Isolieröl aufgrund der vergleichsweise hohen Mobilität der Ladungsträger und damit geringen lokalen Teilchendichte eine untergeordnete Rolle gegenüber den Prozessen an den Elektroden spielt, ist die Rekombination im Papier bei der vorherrschenden geringen Mobilität und damit hohen Ladungsträgerkonzentration von großer Bedeutung. Wie später in Kapitel 7.2 gezeigt wird, ist im Papier von einer Rekombinationszone auszugehen, welche einen Großteil der Prüfspannung trägt.

### 5.2.2 Formulierung der Anfangs- und Randbedingungen

Zur Lösung des obigen Systems bedarf es der folgenden Randbedingungen. Sie beeinflussen fundamental das Verhalten der einzelnen Ladungsträgerspezies. Die Randbedingungen selbst werden anhand des physikalischen Modells gewählt.

Die *Ränder* des elektrischen Feldes sind die Erd- und die Hochspannungselektroden. Sie werden durch die zwei Dirichlet-Bedingungen (5.29) und (5.30) definiert.

$$\varphi_{\text{Erde}} = 0 \text{ V} \quad (5.29)$$

$$\varphi_{\text{Hochspannung}} = u(t) \quad (5.30)$$

Da die Driftprozesse der Ladungsträger zeitabhängig sind, ist auch die Prüfspannung als Funktion der Zeit zu definieren. Hinsichtlich der numerischen Stabilität sind Unstetigkeiten auch in der Definition der Randbedingungen zu vermeiden. So kann beispielsweise die sprunghafte Steigerung der Prüfspannung vermieden werden, wenn diese mit einer Halbsinusschwingung von Minimum zu Maximum genähert wird. Eine solche Definition ist kontinuierlich und der Anstieg ändert sich stetig.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Das Ziel der Berechnung ist es, die Dichteverteilung der einzelnen Ladungsträgerspezies innerhalb der Isolierung zu kennen. Besonders sind dabei die Beträge der Ladungsträgerdichten nahe und auf den Rändern von Interesse, da sie die Inhomogenität der Feldstärke in der Isolierung bestimmen. Da sie selbst Teil der Lösung sind, kann nur die Definition eines Randflusses mit Hilfe von Neumann-Bedingungen genutzt werden, um das in Kapitel 5.1 beschriebene Verhalten der Ladungsträger zu modellieren. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei dem Randfluss um einen Teilchenfluss und nicht um einen elektrischen Strom handelt. Alle folgenden Neumann-Bedingungen sind in Normalrichtung zum Rand zu verstehen.

Für die positive und negative intrinsische Ladungsträgerspezies, welche an den Elektroden nicht rekombinieren, soll sowohl an der Erd- als auch an der Hochspannungselektrode die Gleichung (5.31) gelten.

$$\mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = 0 \quad (5.31)$$

Eine feldstärkeabhängige Injektion an Ladungsträgern kann mit Hilfe eines entsprechenden Randflusses definiert werden. Gemäß Occhini [Occhini1967] folgt die spezifische Leitfähigkeit  $\kappa$  des Isolieröls dem von Feldstärke  $E$  abhängigen Ansatz nach Gleichung (5.32).

$$\kappa = \kappa_0 \cdot e^{a\Theta + b|E|} \quad (5.32)$$

Tatsächlich werden damit zwei disjunkte Prozesse zusammengefasst: zum einen die feldstärkeabhängige Ladungsträgerinjektion und zum anderen die von der Temperatur  $\Theta$  abhängige Viskosität des Isolieröls, welche einen direkten Einfluss auf die Mobilität der Ladungsträgerspezies hat.

Gemäß Occhini würde sich ein exponentieller Ansatz für die Injektion einer Ladungsträgerspezies gemäß Gleichung (5.33) ergeben.

$$\mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = a_i e^{b_i |E|} \quad (5.33)$$

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Ein Nachteil des Ansatzes ist ein großer erwarteter Fehler für kleine Feldstärken. Es scheint unlogisch, dass für Feldstärken nahe Null dennoch eine Injektion der Größe  $a_i$  stattfinden soll.

Die eigenen Berechnungen haben gezeigt, dass ein einfach exponentieller Ansatz dem Injektionsverhalten nicht ausreichend genügt, sondern dass der Prozess besser durch einen der Fowler-Nordheim-Gleichung ähnlichen Ansatz für die Ladungsträgeremission aus Metall in Vakuum beschrieben werden kann [Fowler1928].

$$\mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = a_i |E|^{b_i} e^{-c_i/|E|} \quad (5.34)$$

Die Gleichungsform beschreibt im Allgemeinen eine überproportionale Injektion für hohe Feldstärken. Da die Feldstärke für den exponentiellen Teil im Nenner des Exponenten enthalten ist, hat dieser Teil der Gleichung nur für geringe Feldstärken  $E$  Bedeutung. Er mindert die Injektion für entsprechend kleine Feldstärken.

Die injizierten Ladungsträger rekombinieren im Gegensatz zu den intrinsischen Ladungsträgern an den entsprechenden Gegenelektroden. Dies geschieht mit der Rate, mit welcher sie die Gegenelektrode erreichen. Die Rate bestimmt sich aus dem Produkt der Dichte und der Geschwindigkeit der Teilchen.

$$\mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = -n_i \vec{v} \quad (5.35)$$

Wenn sich die Geschwindigkeit der Ladungsträger nach Gleichung (5.11) aus dem Produkt der Mobilität und der Feldstärke ergibt, dann entspricht der Randfluss zur Rekombination der injizierten Ladungsträger der Teilchenstromdichte.

$$\mu_i n_i \Delta \varphi + D_i \Delta n_i = -\mu_i n_i \vec{E} \quad (5.36)$$

Vereinfacht gilt damit, dass die Diffusionsstromdichte Null sei.

$$D_i \Delta n_i = 0 \quad (5.37)$$

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Zur vollständigen Bestimmung bedarf es der Definition der Anfangsbedingungen der Ladungsträgerspezies in Form der Konzentrationen zu Beginn der Berechnung.

$$n_i(t = 0) = n_{i0} \quad (5.38)$$

Mit Hilfe der Definition einer ausreichend hohen Anfangskonzentration werden die Dissoziationsprozesse vereinfacht modelliert. Wie im Verlauf der Arbeit gezeigt werden kann, ist diese Annahme für sehr schnelle Spannungsänderungen oder den stationären Zustand hinreichend genau.

### 5.2.3 Berechnung der dielektrischen Größen Feldstärke und Strom

Die elektrische Feldstärke als Antrieb für die Ladungsträgerdrift, die Injektion und letztlich als Ursache für den Durchschlag berechnet sich als Gradient des elektrischen Potentials

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (5.39)$$

Die Gesamtstromdichte im Dielektrikum berechnet sich hingegen aus der Summe der Stromdichtenanteile aus Drift, Diffusion und Verschiebungsfluss.

$$\vec{J}_{\text{Gesamt}} = \vec{J}_{\text{Drift}} + \vec{J}_{\text{Diffusion}} + \vec{J}_{\text{Verschiebung}} \quad (5.40)$$

Wobei

$$\vec{J}_{\text{Drift}} = e \sum_i z_i \mu_i n_i \Delta \varphi \quad (5.41)$$

$$\vec{J}_{\text{Diffusion}} = e \sum_i z_i D_i \nabla n_i \quad (5.42)$$

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

$$\vec{J}_{\text{Verschiebung}} = \frac{d\vec{D}}{dt} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (5.43)$$

ist. Innerhalb einer Prüfstecke können daher abhängig von der Ladungsträgerdichte unterschiedliche Anteile der Stromdichten dominieren.

### 5.2.4 Einschränkung der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung und der gewählten Ansätze

Folgende Einschränkungen müssen bei Berechnungen mit der PNP berücksichtigt werden:

- Die PNP ist nur für „stark verdünnte Fluide“ gültig, da keine dichteabhängige Rückwirkung der unterschiedlichen Spezies untereinander berücksichtigt wird. Bei maximal berechneten Teilchen- bzw. Ladungsträgerdichten von  $1 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{m}^3}$  bzw.  $2 \cdot 10^4 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$  kann der Dichteinfluss und eine gegenseitige Dichtebeeinflussung entsprechend vernachlässigt werden. Eine entsprechende Abschätzung wird im Anhang A.1 vorgenommen.
- Der Diffusionskoeffizient  $D$  wird beispielsweise von Gäfvert et al. [Gäfvert2006] mit der Einstein-Smoluchowski-Beziehung ausgedrückt.

$$D_i = \mu_i k_b T \quad (5.44)$$

Die Gültigkeit ist prinzipiell für Fluide gegeben. Für Isolieröl wird diese Annahme aus eigenen Berechnungserfahrungen als nicht zulässig eingeschätzt. Es hat sich gezeigt, dass die Diffusionskoeffizienten unabhängig von der Mobilität gewählt werden müssen, um berechnete mit gemessenen Strom-Zeit-Verhalten in Übereinstimmung zu bringen. Grundsätzlich ist der Koeffizient wie auch die Mobilität von der Temperatur abhängig, da beispielsweise die Viskosität des Isolieröls stark von dieser abhängig ist [Philippow1982].



## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

- Die mittlere Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger wird aufgrund des fluiden Charakters der Isolieröle aller Voraussicht nach nicht unabhängig von der Feldstärke sein. Ähnlich wie in Halbleitern [Göbel2014], Seite 29 ist davon auszugehen, dass mit steigender Feldstärke die mittlere Geschwindigkeit der Ladungsträger weniger stark ansteigt und gar einen Maximalwert erreicht, da entweder die *innere Reibung* der Flüssigkeit oder die Kollisionen der Ladungsträger mit anderen Atomen zu sehr steigen. Wenn die Mobilität  $\mu$  von der Feldstärke abhängt, könnte sich gemäß der Vereinfachung für die Herleitung der Nernst-Planck-Gleichung und ihrer späteren Lösung eventuell ein Problem ergeben. Messtechnisch bestimmte Parameter haben demnach nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich.
- In obiger Form bleibt die Eigenbewegung bzw. Strömung des Isolieröls als Kühlmedium unberücksichtigt. Allerdings bewegt sich das Isolieröl innerhalb der Isolierung aufgrund natürlicher oder erzwungener Konvektion. Dass eine aufgeprägte Ölgeschwindigkeit einen Einfluss auf das dielektrische Verhalten des Isolieröls hat, zeigen Schießling et al. in [Schießling2011].
- Alle numerischen Berechnungsergebnisse wie die der FEM sollten unbedingt durch eine Netzfeinheitsanalyse verifiziert werden. Unstetigkeiten in der Lösung fordern eine höhere Netzfeinheit bzw. Zeitschrittadaption des verwendeten Solvers.

Als Plausibilitätstest der Lösung können die Gleichungen (5.41), (5.42) und (5.43) heran gezogen werden. Innerhalb des homogen Strömungsfeldes einer planparallelen Platte-Platte-Anordnung (eindimensionales Problem) muss die Stromdichtensumme in jedem Ort gleich sein.

$$\vec{J}_{\text{Drift}} + \vec{J}_{\text{Diffusion}} + \vec{J}_{\text{Verschiebung}} = \text{const} \quad (5.45)$$

Für ein beliebiges mehrdimensionales Modell muss Gleichung (5.46) gelten.

$$\Delta(\vec{J}_{\text{Drift}} + \vec{J}_{\text{Diffusion}} + \vec{J}_{\text{Verschiebung}}) = 0 \quad (5.46)$$

Das Bild 5.2 zeigt beispielhaft einen zu Beginn des Polarisationsvorgangs berechneten Zeitschritt einer ölgefüllten Platte-Platte-Anordnung getrennt für Teilchendichte-

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

und Stromdichteverteilung. Aufgrund der Ladungsträgertrennung dominieren lokal jeweils verschiedene Stromdichteanteile. In den Staugebieten nahe der Elektroden sind es die Drift- und Diffusionsstromanteile wegen der hohen Teilchendichten und deren Gradienten. In der Mitte des Ölspalts ist es hingegen die Verschiebungsstromdichte aufgrund der Feldstärkeänderung durch die Ladungsträgertrennung. Die Summe aller Stromanteile ist korrekterweise konstant.

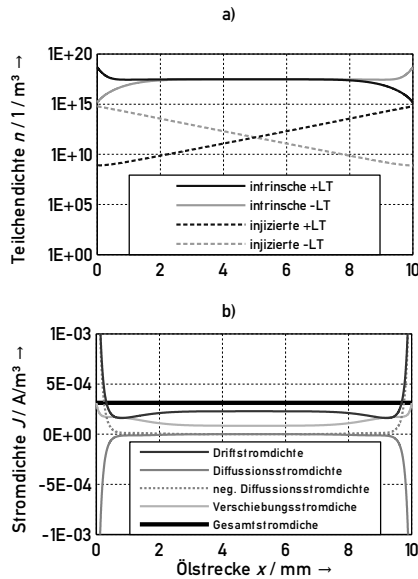


Bild 5.2: a) Teilchendichte- und b) Stromdichteverteilung im homogenen Feld

Die Trennung in die verschiedenen Stromanteile hilft insbesondere bei der Interpretation der messbaren, zeitverzögerten Strom-Zeit-Maxima bei Polaritätswechsel oder unsteter Gleichspannungsbelastung.

- Im Rahmen der Arbeit werden die Dissoziationsvorgänge der Ölbestandteile aufgrund der Einfachheit der Leitfähigkeitsmodelle nur indirekt über die Definition der Anfangsbedingungen berücksichtigt bzw. modelliert. Die Dissoziation von Ladungsträgern findet in der Regel nur bei Flüssigkeit mit hohem  $\epsilon_r$  wie Wasser

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

statt. Dissoziationsvorgänge in organischen Flüssigkeiten sind ohne elektrischen Feldstärkeinfluss vernachlässigbar.

Bei Einfluss der elektrischen Feldstärke wird aber davon ausgegangen, dass auch in schwach polaren organischen Flüssigkeiten wie mineralischem Isolieröl mit einer geringen relativen Permittivität von  $\epsilon_{r\text{ Öl}} = 2,2$  und dem von ihm getränkten Papier  $\epsilon_{r\text{ Papier}} = 3,7$  [Rahmoon2008] Dissoziationsprozesse stattfinden.

- Feldstärkebedingte Dissoziationsvorgänge beschreiben Wien [Wien1929] und Onsager [Onsager1934].

Basierend auf Onsager schlagen Atten et al. [Atten2003] eine gleichgewichtsbasierte Modellierung der Dissoziation vor. Dazu wird sich einer zusätzlichen, elektrisch neutralen Spezies bedient. Diese unterliegt zunächst nicht den elektrischen Driftvorgängen, sie kann aber feldstärkeabhängig dissoziieren und dichteabhängig rekombinieren.

Ist diese Spezies lokal verbraucht bzw. vollständig dissoziiert, findet auch keine Ladungsträgerneubildung statt. Die Onsager-Theorie lässt sich mit Hilfe von unipolaren Polarisationsstrommessungen verifizieren. Der Polarisationsstromanteil verhält sich nach sprungähnlicher Steigerung der Gleichspannung nicht proportional zur Spannungsänderung, wie RC-basierte Leitfähigkeitsmodelle vermuten lassen. So ist gemäß eigener Messungen für besonders geringe (10 V/mm) oder besonders hohe Feldstärken (10 kV/mm) nahezu kein Polarisationsstrom feststellbar.

- Eine Ladungsträgerbildung aufgrund der chemischen Alterung der Isolierungsbestandteile, z.B. durch Bildung von organischen Säuren aus Oxidationsprozessen oder Salzen in Verbindung mit den Kupfer- und Eisenbestandteilen des Transformators, wird in der PNP-Modellierung innerhalb der Beanspruchungszeit eines Laborversuchs zum Strom-Zeit- oder Durchschlagverhalten vernachlässigt.

Wie bereits beschrieben, wird die Ladungsträgergeneration innerhalb des Isolieröls aufgrund der Unkenntnis der Parameter und zur Vereinfachung der Berechnungsmodelle nicht explizit sondern durch die Definition der Anfangskonzentration  $n_{i0}$  *verschmiert* modelliert.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

- Weiterhin bleibt bisher die eigentliche Fluidbewegung im Öl unberücksichtigt. Da die Ladungsträger immer an Ölbestandteile gebunden sind, führen die elektrostatischen Kräfte als Ergebnis der Gleichspannungsbelastung zu makroskopischen Fluidbewegungen. Zudem wird die Ladungsträgerdrift durch eine erzwungene Konvektion beeinflusst, wie es zur Kühlung ölsolierter Leistungstransformatoren der Fall ist [Schießling2011]. Zur Modellierung entsprechender Phänomene bedarf es der nichttrivialen Kopplung der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung mit der Navier-Stokes-Gleichung.
- Die Definition einer einheitlichen, globalen Permittivität kann auch nur eine Vereinfachung sein. Besonders in den Ionenstaugebieten mit hoher Ladungsträgerdichte wird vermutet, dass ähnlich einem Elektrolytkondensator ein höheres  $\epsilon_r$  angenommen werden müsste.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r \cdot f\left(\sum_i \rho_i\right) \quad (5.47)$$

Werden mit Hilfe einer Platte-Platte-Anordnung ein Vielzahl von Ladungsträgern an die Elektroden angelagert, dann müsste sich bei ladungsträgerdichteabhängigem  $\epsilon_r$  die Impedanz der Anordnung beispielsweise durch eine überlagerte hochfrequente Wechselspannung messbar ändern.

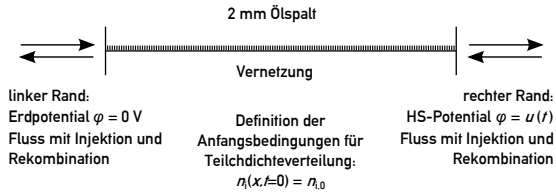
Alternativ könnte verallgemeinert gelten, dass wie in Vakuum und Metallen ein  $\epsilon_r$  gleich Eins gilt, und die Veränderung auf die lokal veränderte Leitfähigkeit aufgrund der erhöhten Ladungsträgerdichte zurück geführt wird.

### 5.2.5 FEM-Modellierung

Da die Poisson-Nernst-Planck-Gleichung insbesondere im Hinblick auf die Zeit nicht analytisch gelöst werden kann, bedarf es einer numerischen Berechnung. Mit der Finite-Elemente-Methode können verschiedene physikalische Vorgänge anhand gekoppelter Differentialgleichungen berechnet werden. Abhängig von den Randbedingungen ist damit prinzipiell eine vollständige dreidimensionale Berechnung der Leitfähigkeit möglich. Allerdings wurde ihre Anwendung wegen der Komplexität, Größe und Rechenzeit der

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Modelle auf ein- und zweidimensionale Fälle beschränkt. Die prinzipielle Darstellung eines eindimensionalen Modells zeigt Bild 5.3.



**Bild 5.3:** 1D-FEM-Modell eines Ölspaltes

Zur Lösung der PNP-Gleichung bedarf es, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, der Definition der Dirichlet-Bedingung für das elektrostatische Feld sowie der Neumann- und Anfangsbedingungen für die Teilchendichten.

Die Berechnung erfolgt dabei stets transient - von den definierten Startbedingungen ausgehend. Eine direkte Berechnung des stationären Zustands, wie es bei der RC-Methode häufig durchgeführt wird, ist nicht möglich. Da insbesondere die Bildung der Ladungsträgerschichten zu einer von der Zeit und auch den Vorbelastungen abhängigen Lösung der Ladungsträgerdichte mit starkem Gradienten führt, konvergiert erfahrungsgemäß der stationäre Solver nur schwer.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass unbedingt eine Netzabhängigkeitsuntersuchung der Lösung durchzuführen ist. Anders als bei einer konventionellen Feldberechnung, bei der nur bei geringen Krümmungsradien fein vernetzt wird, sind für die PNP-Gleichung im gesamten Modellbereich große Gradienten der verschiedenen Lösungen für Teilchendichte- oder Feldstärkeverteilung unabhängig von der äußeren Geometrie zu erwarten.

Insbesondere an den Rändern ist einerseits wegen der hohen Gradienten der Ladungsträgerdichten und andererseits wegen der Komplexität der Randbedingungen durch die Rückkopplung der Poisson- (5.1) und Nernst-Planck-Gleichungen (5.28) eine hohe Netzfeinheit zu definieren.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Das Setzen asymmetrischer Mobilitätsparameter für die Ladungsträgerspezies fördert das Erreichen einer stabilen Lösung beim Verwenden eines numerischen Solvers. Für den Fall gleicher Parameter für alle Spezies wird das Ergebnis der PNP-Berechnung innerhalb eines eindimensionalen Problems (homogenes Feld) eine symmetrische Lösung sowohl für die Ladungsträger- als auch Feldstärkeverteilung sein. Für den Fall eines Polaritätswechsels wird sich im zeitlichen Verlauf der Berechnung zwangsweise ein gemeinsamer Ort mit großen lokalen Gradienten der Lösung ergeben, welche zur Instabilität, bspw. negativ berechneten Ladungsträgerdichten, führt. Durch die Wahl ungleicher Parameter ergibt sich an Stelle eines Punktes ein Bereich, welcher sich stabiler lösen lässt, da die Gradienten der Lösung geringer sind und bspw. negativ berechnete Teilchendichten in der Lösung durch den Solver korrigiert werden können.

Die Modellierung eines eindimensionalen Problems kann dabei leicht die Grenze des Arbeitsspeichers einer konventionellen 16-GB-Workstation ausreizen. Für zwei- oder gar dreidimensionale Probleme besteht ein deutlich größerer Arbeitsspeicherbedarf. Die Zeitdauer zur Berechnung einer zweidimensional modellierten Modellanordnung wie in [Backhaus2013b] überschreitet die Dauer einer Woche. Eine Anwendung innerhalb des Konstruktionsprozesses für hochspannungstechnische Anlagen kann daher nur durch eine weitere Verbesserung der numerischen Lösungsalgorithmen und der Rechentechnik erreicht werden.

### 5.3 Leitfähigkeitsverhalten in Abhängigkeit der Feldstärke

Mineralische Isolieröle zeigen ein nichtlineares Restleitfähigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Feldstärke bei Belastung mit hoher Gleichspannung. Im Allgemeinen wird im schwach inhomogenen Feld konventioneller Ölmesszellen mit 2 mm Elektrodenabstand eine zunächst mit der Feldstärke fallende und nach einem Minimum bei ca. 1 bis 3 kV/mm eine steigende Restleitfähigkeit bestimmt.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

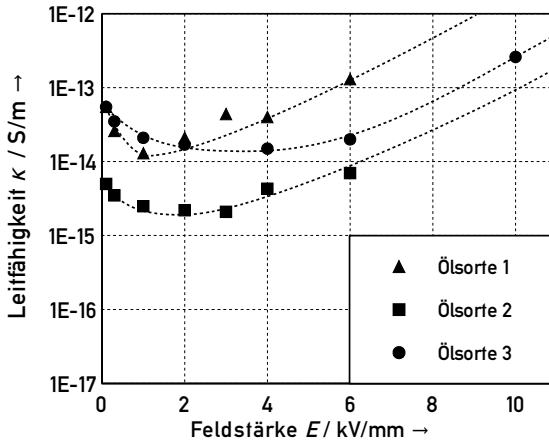


Bild 5.4: Feldstärkeabhängige Leitfähigkeit nach [Liebschner2009]

Bild 5.4 zeigt die durch Liebschner [Liebschner2009], S. 59 bestimmte Kennlinienschar. Im Folgenden wird das zuvor in Kapitel 5.1 vorgeschlagene Leitfähigkeitsmodell auf das obige Phänomen der nichtlinear feldstärkeabhängigen Restleitfähigkeit übertragen und am Beispiel der Ölsorte 3 mit Hilfe der PNP modelliert.

Die spezifische Restleitfähigkeit  $\kappa$  bestimmt sich im homogenen Feld einer Platte-Platte-Anordnung anhand der gemessenen, stabilen Stromstärke  $I$  nach dem Abklingen aller zeitveränderlichen Polarisationsvorgänge, dem Elektrodenabstand  $d$ , der Prüfspannung  $U$  und der wirksamen Messfläche  $A_M$ .

$$\kappa = \frac{I \cdot d}{U \cdot A_M} \quad (5.48)$$

Im Falle des ladungsträgerbasierten Ansatzes und der PNP-Modellierung kann die Restleitfähigkeit prinzipiell durch Injektionsprozesse an den Elektroden bzw. Rändern und Dissoziation der Isolierölbestandteile bestimmt sein. Da der Einfluss der Dissoziation auf die Restleitfähigkeit als vernachlässigbar angesehen wird, sind hauptsächlich nur die feldstärkeabhängigen Effekte an den Elektroden entscheidend.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Um die feldstärkeabhängige Injektion aus dem gemessenen Strom berechnen zu können, muss aus diesem zunächst die Stromdichte auf die Messfläche  $A_M$  berechnet werden.

$$J = \frac{I}{A_M} = \frac{\kappa U}{d} \quad (5.49)$$

Aus der Stromdichte kann nun die Injektion als Randfluss bzw. Teilchenstromdichte formuliert werden.

$$\Gamma_{\text{Injektion}} = \frac{J}{e} = \frac{\kappa U}{d e} \quad (5.50)$$

Da sich der Gesamtstrom aus positiven und negativen Ladungsträgern zusammensetzt, muss dabei in die jeweiligen Anteile der Ladungsträger unterschieden werden.  $k_{ij}$  beschreibt dabei das Verhältnis der injizierten Ladungsträger durch Anode und Kathode am Gesamtstrom.

$$\Gamma_{\text{Injektion } i} = k_{ij} \frac{\kappa U}{d e} \quad (5.51)$$

Obwohl später nach 6.1 von einem größeren Eintrag an negativen Ladungsträgern durch die Kathode ausgegangen werden kann, wird für die vorliegende qualitative Berechnung vereinfacht von einem gleichen Eintrag durch Kathode und Anode ausgegangen.

$$k_{ij} = \frac{n_i}{n_e + n_i} = \frac{1}{2} \quad (5.52)$$

Um nun die feldstärkeabhängige Randflussbedingung zu erhalten, werden die so ermittelten Injektionsteilchenstromdichten den aus der Berechnung ermittelten Randfeldstärken an der Elektrodenoberfläche zugeordnet - Bild 5.5. Aufgrund der intrinsischen Ladungsträger des Isolieröls <sup>1</sup> ist diese Feldstärke an der Elektrodenoberfläche dabei größer als die geometrische. Sie muss daher erst aus einer transienten PNP-Berechnung

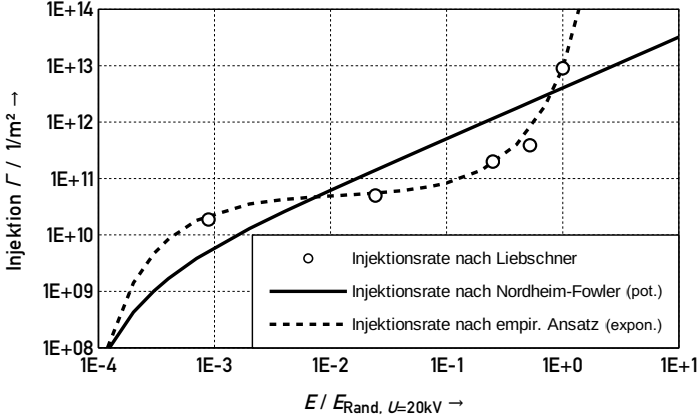
---

<sup>1</sup> Die Menge der intrinsischer Ladungsträger kann aus dem Polarisationsstromanteil ebenso rechnerisch mit der PNP ermittelt werden.



## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

heraus mit der bestimmten Menge an intrinsischen Ladungsträgern und der wie zuvor beschriebenen Injektionsteilchenstromdichte ermittelt werden. Die Abszisse wurde auf die berechnete, elektrodennahe Randfeldstärke bei einer Prüfspannung  $U = 20 \text{ kV}$  normiert.



**Bild 5.5:** Feldstärkeabhängige Injektionsrate für Anode und Kathode

So angetragen kann nun eine Näherungsfunktion für die feldstärkeabhängige Injektion durch Kathode und Anode bestimmt werden, welche dem Randfluss entspricht.

$$z_i \mu_i n_i \nabla \varphi - z_i D_i \nabla n_i = \Gamma_{\text{Injektion } i} \quad (5.53)$$

Dazu werden im Folgenden zwei alternative Ansätze verfolgt. Im Sinne einer möglichen Allgemeingültigkeit des Ladungsträgerübergangs aus der Elektrode ins Dielektrikum kann zum einen eine Form nach Nordheim-Fowler [Fowler1928] gewählt werden, welche für hohe Feldstärken ein potentielles Verhalten für die Injektionsvorgänge annimmt.

$$z_i \mu_i n_i \nabla \varphi - z_i D_i \nabla n_i = a_i \cdot E^{b_i} \cdot e^{-c_i/E} \quad (5.54)$$

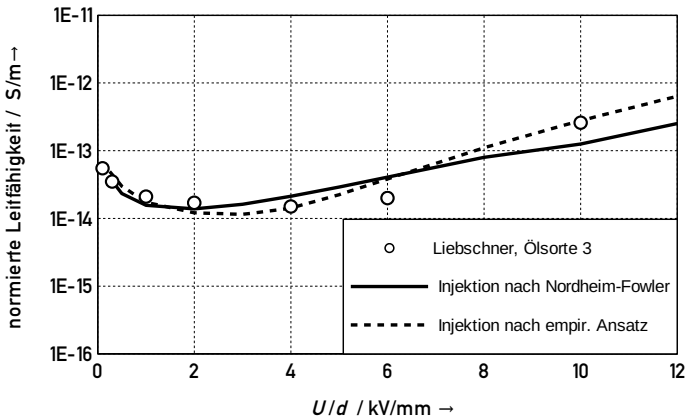
## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Zum anderen wird eine exponentielle, empirische Formulierung vorgeschlagen.

$$z_i \mu_i n_i \nabla \varphi - z_i D_i \nabla n_i = a_i \cdot b_i^E \cdot e^{-\frac{c_i}{E}} \quad (5.55)$$

Beide monoton steigenden Ansätze sind in Bild 5.5 angetragen.

Mit der so ermittelten Randbedingung kann nun eine Rückrechnung der anfänglichen Leitfähigkeitsmessung mit Hilfe der PNP-Methode vorgenommen werden. Dazu werden die Anfangskonzentration der öleigenen Ladungsträger und die feldstärkeabhängige Injektionsrandbedingung definiert. Die pro Spannungsstufe berechneten Ströme werden mit Hilfe der Gleichung 5.48 wieder in eine normierte Leitfähigkeit überführt - Bild 5.6.



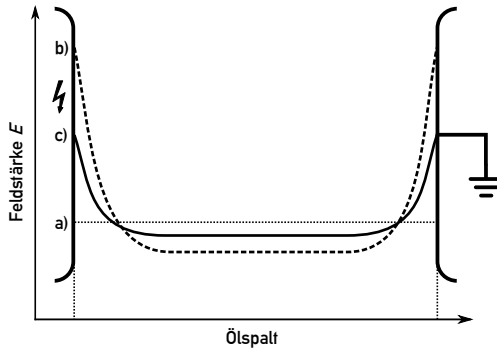
**Bild 5.6:** Vergleich der Messwerte und der PNP-Berechnung mit potentiellem und empirisch exponentiellem Injektionsansatz

Obwohl für beide Ansätze eine mit der Randfeldstärke stetig steigende Injektionsrate gewählt wurde, ergibt sich als Ergebnis das auf die Feldstärke bezogene, nichtlineare Verhalten der Messergebnisse. Dieses Resultat wird daher als erste Bestätigung für das aufgestellte Leitfähigkeitsmodell gewertet.

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Das vorliegende Literaturbeispiel zeigt mit dem exponentiellen Ansatz für die Injektion zwar eine bessere Übereinstimmung gegenüber der Fowler-Nordheim-Analogie. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass es sich bei der Berechnung um ein eindimensionales Rechenmodell handelt und somit mögliche unbekannte Randeffekte der verwendeten Platte-Platte-Anordnung nicht vollständig berücksichtigt werden konnten.

Um das Feldstärkeverhalten und die Wirkung der Ladungsträger zu veranschaulichen, zeigt Bild 5.7 die qualitative Feldstärkeverteilung innerhalb des Isolieröls zwischen den beiden Plattenelektroden.



**Bild 5.7:** Qualitative Feldstärkeverteilung im homogenen Feld; a) geometrisch bedingt, homogen; b) bei alleinigem Einfluss der intrinsischen Ladungsträger; c) bei Einfluss beider Ladungsträgerarten

Die Kennlinie a) gibt dabei die mittlere Feldstärke als Quotient aus Prüfspannung  $U$  durch Elektrodenabstand  $d$  an. Die Kennlinie b) würde sich durch die bloße Anlagerung intrinsischer Ladungsträger an die Elektroden ergeben. Deren entgegengesetzte Ladung führt nahe der Elektroden zu einer Feldstärkeanhebung und damit in der Spaltmitte zu einer Absenkung. Abhängig von der Feldstärke werden zusätzliche Ladungsträger durch die Elektrode in das Isolieröl injiziert. Da diese das Vorzeichen der injizierenden Elektrode besitzen, senken deren Ladung wiederum die Feldstärke. Je mehr Ladungsträger injiziert werden, desto stärker ist ihr feldstärkesenkender, homo-

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

genisierender Charakter. Dieses Ergebnis korreliert mit den unter 2.3.1 vorgestellten Messwerten von Hikita et al. Die exponentiell größere Menge an injizierten Ladungsträgern führt zu einer Homogenisierung der Ladungsträgerverteilung in der Ölstrecke.

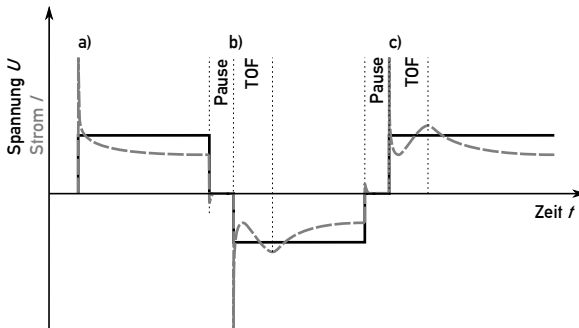
In Bezug auf die nichtlineare, feldstärkeabhängige Restleitfähigkeit hat das Ergebnis folgende Bedeutung. Physikalische Kennlinien mit einem Extremwert haben immer das Wirken mindestens zweier Prozesse als Ursache. Im vorliegenden Fall handelt es sich dabei auf der einen Seite um die feldstärkeabhängige Ladungsträgerinjektion. Diese verhält sich monoton steigend und überproportional zur wirkenden Feldstärke. Sie verursacht primär den steigenden Teil der Kennlinie nach dem Minimum. Auf der anderen Seite wirkt die Eigenladung der injizierten Ladungsträger auf die Feldstärke direkt vor bzw. an der Elektrode, welche den ersteren Prozess bedingt. Gerade für geringe Feldstärken dominieren die feldstärkehebende Wirkung und die Ausbildung der *inneren* Inhomogenität. Mit steigender Prüfspannung und damit Injektion wird der Einfluss entsprechend reduziert. Dies entspricht den Messungen von Hikita et al. [Hikita1996], siehe Bild 2.5.

Das Beispiel zeigt die Wichtigkeit und Schwierigkeit in der Bestimmung der wahren Feldstärke nahe der Elektrode auf. Weder mit der Feldmühlen-Methode [Roesner2011] noch mit der Kerr-Effekt-Methode [Hikita1996] kann aufgrund der unzureichenden Auflösung die Feldstärkeverteilung im elektrodennahen Randbereich messtechnisch bestimmt werden. Für die rechnerische Bestimmung fehlen bisher sowohl die Kenntnis der genauen physikalischen Modelle für den allgemeinen Metall-Isolieröl-Übergang als auch deren mathematische Beschreibung. Die mikroskopische Oberflächenbeschaffenheit oder auch der Elektrodenwerkstoff haben hier einen entscheidenden Einfluss. Die gegenseitige Beeinflussung der Größen Feldstärke, Ladungsträgerdichte und Ladungsträgerinjektion erschwert dabei die Rückrechnung zusätzlich.

## 5.4 Strom-Zeit-Verhalten bei Polaritätswechsel der Gleichspannung

Neben der nichtlinearen Restleitfähigkeit des Isolieröls in Abhängigkeit der Feldstärke gibt es verschiedene nichtlineare Effekte hinsichtlich des Strom-Zeit-Verhaltens bei Belastung mit hoher Gleichspannung. Tatsächlich tritt der bekannte, stetig abklingende Polarisationsstrom-Zeit-Verlauf nur bei einer Erstbelastung eines kleinen Isolierölvolumens auf. Je nach Vorbelastung und Prüfgefäßgröße können nach einer Umpolung der Gleichspannung zeitverzögerte Maxima bzw. Minima im Strom-Zeit-Verlauf auftreten.

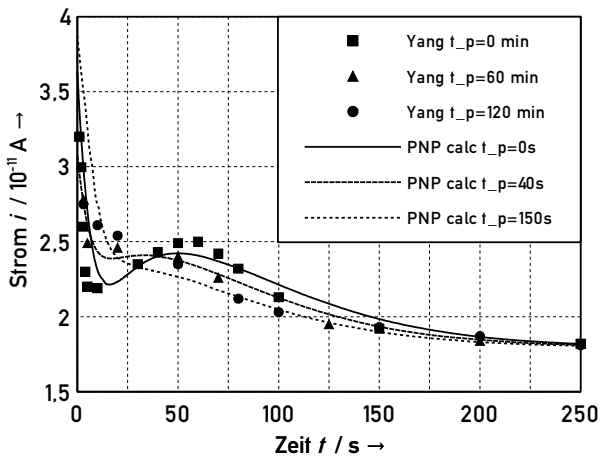
Am Beispiel des Strom-Zeit-Verhaltens für den Polaritätswechsel mit hoher Gleichspannung soll der Einfluss der unterschiedlichen Ladungsträgerspezies besser verdeutlicht werden. Für diesen Versuch wird ein zeitlich verzögertes Strom-Zeit-Maximum beobachtet, welches bisher zur Bestimmung der Mobilität der Ölladungsträger herangezogen wird. Als *TOF* oder *time of flight* wird dabei die Zeit erachtet, welche die ölintrinsischen Ladungsträger benötigen, um nach der Umpolung die neue Gegenelektrode zu erreichen. Diese Zeit wird dem Strom-Zeit-Maximum gleichgesetzt. Typischerweise erhält man einen Strom-Zeit-Verlauf gemäß Bild 5.8.



**Bild 5.8:** Schematisches Strom-Zeit-Verhalten bei bipolarer Gleichspannungsbelastung; a) Erstbelastung, Polarisation b) erster Polaritätswechsel; c) weiterer Polaritätswechsel

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Yang et al. [Yang2012] untersuchten verschiedene Isolieröle mit der Messzelle *HAE-FELY 2903a*. Der Elektrodenabstand der coaxialen Zylinder beträgt 2 mm bei einer geometrischen Kapazität von circa 60 pF. Um mögliche Injektionseffekte zu minimieren, werden die Polaritätswechsel bei einer sehr geringen Gleichspannung von  $\pm 10$  V durchgeführt. Innerhalb der einzelnen Messreihen wurde zusätzlich die Dauer des spannungslosen Zustands vor der jeweiligen gegenpolaren Folgebelastung von Null Sekunden bis einige Stunden variiert. Die Messpunkte in Bild 5.9 zeigen das gemessene Strom-Zeit-Verhalten nach dem Polaritätswechsel. Dessen angegebener Zeitbereich entspricht Bild 5.8b). Das Vorzeichen des Stroms wurde für die Darstellung negiert und die Werte wurden daher an der positiven Ordinate angetragen.



**Bild 5.9:** Strom-Zeit-Verhalten nach der Umpolung mit unterschiedlichen Zeiten  $t_p$  des spannungslosen Zustands [Yang2012]

Dabei fällt bei den Messergebnissen auf, dass sich bei direkter Umpolung ohne Pause ein signifikantes Strom-Zeit-Maximum ausprägt. Das Verhalten ist auch nach einem erneuten, direkten Polaritätswechsel reproduzierbar.

Der Zeitpunkt des Strommaximums wurde durch Yang et al. als Erreichen der Ladungsträger an der Gegenelektrode interpretiert. Folglich wird die *time of flight* (TOF) als Dauer

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

des Ortwechsels von Elektrode zu Gegenelektrode der nichtrekombinierenden, intrinsischen Ladungsträger, gemäß Gleichung (5.56) angenommen.

$$t_{\text{TOF}} = \frac{d^2}{\mu_i \cdot U} \quad (5.56)$$

Umgekehrt wird aus den Messgrößen die Mobilität der Ladungsträger abgeleitet.

$$\mu_i = \frac{d^2}{t_{\text{TOF}} \cdot U} \quad (5.57)$$

Die Ausprägung des Maximums ist dabei hinsichtlich seiner Amplitude und des zeitlichen Auftretens stark von der Pausenzeit zwischen den Gleichspannungsbelastungen abhängig. Wird die Pausenzeit zwischen den Polaritätswechseln vergrößert, führt dies zu einer verminderten Ausbildung des Strom-Zeit-Maximums bzw. eines Strom-Zeit-Plateaus. Bei einer Pausenzeitverlängerung in den Stundenbereich lässt sich das nichtlineare Strom-Zeit-Verhalten kaum noch feststellen.

Es sei auf Kapitel 2.5 verwiesen. In diesem wird gezeigt, dass die lineare RC-Modellierung nicht in der Lage ist, ein solches Verhalten zu erfassen.

Im Folgenden wird das vorliegende Experiment mit dem vorgestellten Leitfähigkeitsmodell und der PNP-Methode modelliert. Dabei wird von einer Grundgesamtheit intrinsischer Ladungsträger ausgegangen, welche nicht rekombinieren. Abhängig von der Feldstärke an den Elektroden werden zusätzlich Ladungsträger in das System injiziert, welche mit der korrespondierenden Spezies oder Gegenelektrode rekombinieren können.

Bild 5.10 zeigt als Phasenbildarstellung die Dichteverteilung der intrinsischen Ladungsträger im Ölspace. Dabei kann in folgende prinzipielle Vorgänge unterschieden werden:

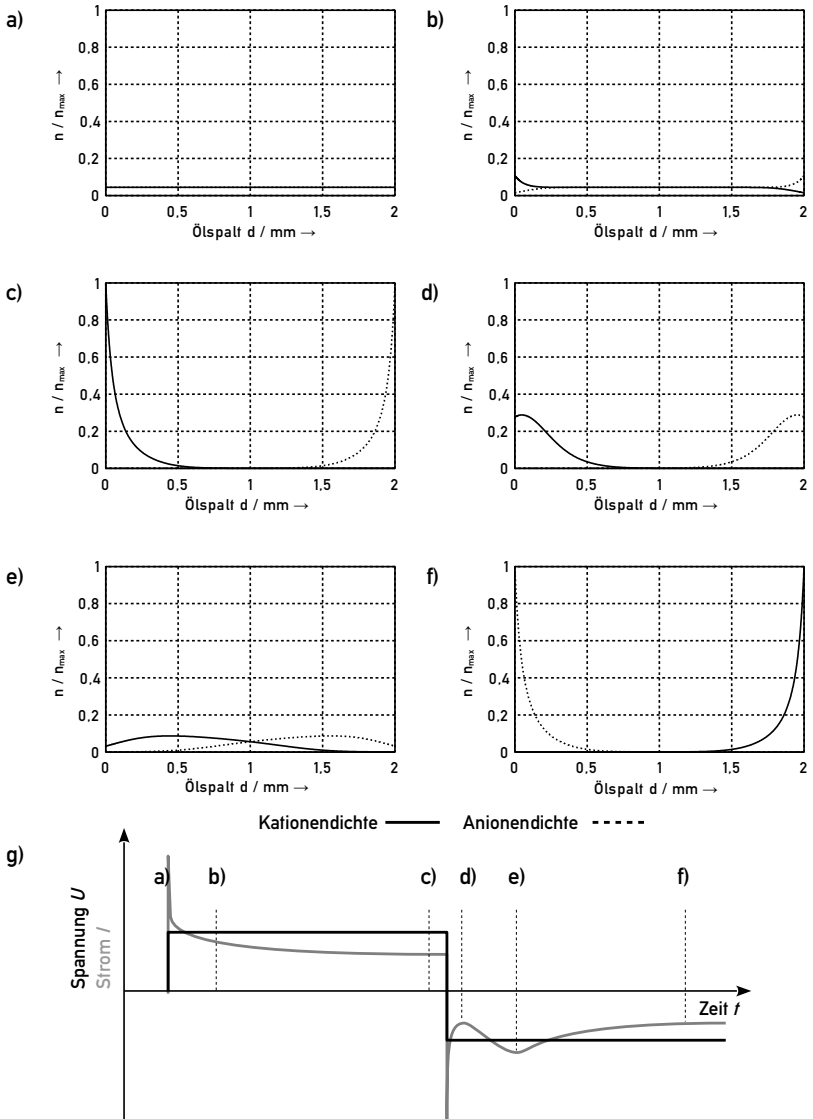
Die Phase a) zeigt die Gleichverteilung der Ladungsträger vor der Gleichspannungsbelastung. Die Phase b) entspricht der Polarisierung und wird hauptsächlich durch die Drift und Anlagerung der intrinsischen Ladungsträger an die Elektroden verursacht. Die Phase c) entspricht dem stationären Zustand. Die (Rest-)Leitfähigkeit wird dabei durch die Injektionsprozesse an den Elektroden dominiert. Es folgt die Phase d) kurz nach der

## *5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung*

Umpolung. Die zwei Ladungsträgerschichten lösen sich dabei von den Elektroden und bewegen sich auf einander zu. Die Diffusionsprozesse und die elektrostatischen Kräfte führen zu einer Abnahme der maximalen Ladungsträgerkonzentration. Es bewegen sich zwei Gebiete erhöhter Ladungsträgerdichte auf einander zu - Phase e). Das Strom-Zeit-Maximum muss nun als der Zeitpunkt begriffen werden, zu welchem die maximale Anzahl an Ladungsträger im Ölpalt driftet und gleichzeitig der maximale Verschiebungsstromanteil aufgrund der zeitlich veränderlichen Feldstärke zwischen den beiden sich nähernden Ladungsträgerfronten zum Tragen kommt. In der Phase f) erfolgt eine erneute Polarisierung der entsprechenden Gegenelektroden.



## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung



**Bild 5.10:** Phasenbilder der Konzentration intrinsischer An- und Kationen im Ölspalt beim Polaritätswechsel und entsprechendes Strom-Zeit-Verhalten [Backhaus2014]

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Auf Basis der Berechnung ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Das Strom-Zeit-Maximum nach dem Polaritätswechsel entspricht dem Zeitpunkt, zu welchem die maximale Anzahl an intrinsischen Ladungsträgern im Ölspalt driften und gleichzeitig der maximale Verschiebungsstromanteil aufgrund der zeitlich veränderlichen Feldstärke zwischen den beiden sich nähernden Ladungsträgerfronten zum Tragen kommt. Es entspricht damit nicht dem Erreichen der Genelektrode, wie es bisher interpretiert wurde.
- Die Gleichungen (5.56) und (5.57) zur Berechnung der Mobilität sind nur mit Einschränkung anwendbar, da weder eine homogene Feldstärkeverteilung im Ölspalt vorhanden ist, noch der Weg  $d$  bzw. Elektrodenabstand mit der Driftzeit der Ladungsträger und dem Zeitpunkt des Strom-Maximums korreliert.
- Die entsprechenden  $\mu$ - und  $D$ -Parameter können bisher nur mit Hilfe einer systematischen Parameterstudie ermittelt werden.
- Die Abhängigkeit des zeitlich zum Polaritätswechsel verzögerten Strom-Zeit-Maximums von der Pausenzeit erklärt sich aus dem Verweilen und Lösen der Ladungsträger aus dem Nahbereich der Elektroden während der Pausenzeit.

Lösen sich die Ladungsträger von der Elektrode während der Pausenzeit, vermindert dies die Ausformung der dargestellten Ladungsträgerfronten ohne Pausenzeit. Ist die Pausenzeit lang genug, kann von einer homogenen Verteilung der Ladungsträger im Ölspalt ausgegangen werden und es zeigt sich kein verzögertes Strom-Zeit-Maximum bei der Gegenbelastung.

- Das vorliegende Berechnungsmodell erfasst den Einfluss der Pausenzeit nur qualitativ richtig. So entsprechen die berechneten Strom-Zeit-Verläufe nur den gemessenen, wenn eine verkürzte Pausenzeit definiert wurde. Die Ursache für dieses Ergebnis begründet sich in den sich bildenden Helmholtz-Schichten [Helmholtz1879]. Diese werden durch das vorhandene Berechnungsmodell nicht berücksichtigt. Das Ausbilden von Gegenladungen zwischen Metall und den intrinsischen Ölladungsträgern hält letztere an den Elektroden und verhindert ein Wegdriften. Eine Rekombination findet aufgrund der Mizellenstruktur nicht statt. Während die Bewegung der Ladungsträger im freien Ölvolumen sehr gut mit Hilfe der Mobilitäts-

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

und Diffusionsparameter beschrieben werden kann, so gilt dies nicht für den elektrodennahen Bereich. Da die zusätzlichen Kräfte innerhalb der Helmholtz-Schicht unberücksichtigt bleiben, wird das Lösen der Ladungsträger von den Elektroden zeitlich überschätzt. Einen Lösungsansatz hierfür bieten möglicherweise Bazant et al. [Bazant2005] und Chu et al. [Chu2005].

- Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Helmholtz-Schicht respektive nur wenige Volt beträgt. Der Einfluss im Bereich hoher Prüfspannungen größer 1 kV wird daher als vernachlässigbar eingeschätzt.
- Die Anlagerung der Ionen an der Metallelektrode und die Ausbildung der Doppelschichten und deren Einfluss auf die Strommessung muss bei der Bestimmung einzelner Leitfähigkeitsparameter unbedingt berücksichtigt werden.

Am Beispiel des Strom-Zeit-Verhaltens des Isolieröls bei Polaritätswechsel konnte der eindeutige Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften der einzelnen Ladungsträgerspezies und ihrem Einfluss auf das Strom-Zeit-Verhalten aufgezeigt werden. Das Beispiel zeigt ferner auf, dass sich eine direkte messtechnische Bestimmung der Ladungsträgereigenschaften äußerst schwierig gestaltet, da die Einzelprozesse nur schwer voneinander getrennt werden können bzw. sich in herkömmlichen Experimenten gegenseitig beeinflussen.

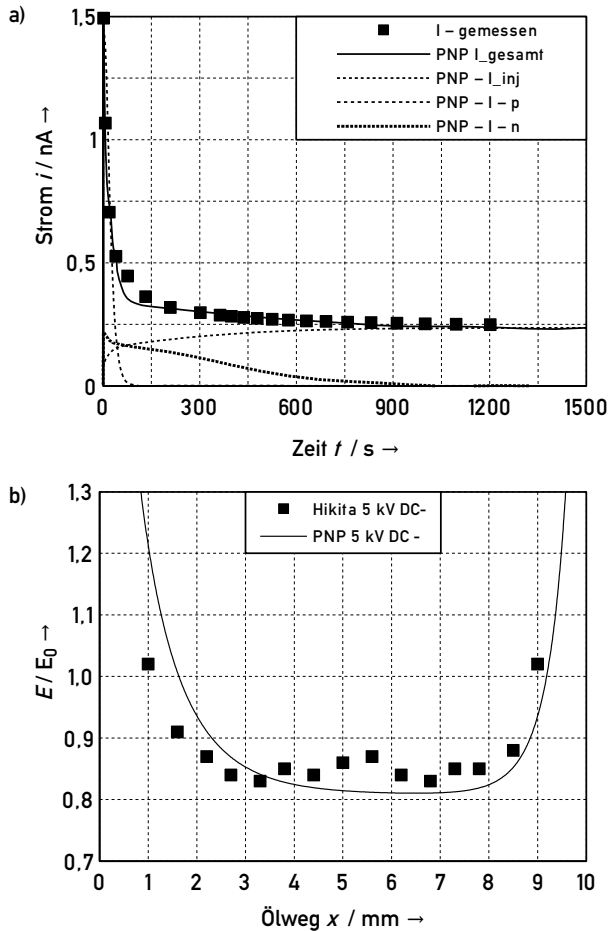
### 5.5 Zusammenhang zwischen dem Strom-Zeit-Verhalten und der Feldstärkeverteilung im Ölspalt

Das elektrische Feld ist sowohl der Antrieb für die Ladungsträgerbewegung als auch die Kopplung für die gegenseitige Beeinflussung der Ladungsträger im Dielektrikum. Im Folgenden soll nun der Zusammenhang aus Strom-Zeit-Verhalten und Feldstärkeverteilung am Beispiel der unter 2.3.1 beschriebenen Messung durch Hikita et al. [Hikita1996] herausgearbeitet werden.

Wie in 2.3.1 beschrieben, nutzten Hikita et al. eine planparallele Elektrodenanordnung innerhalb einer mit Isolieröl gefüllten Kerr-Messzelle. Mit Hilfe der elektrooptischen Kerr-Effekt-Methode wurde die inhomogene Feldstärkeverteilung inner-

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

halb eines 10-mm-Öl-spalts bei einer Verunreinigung mit 30 ppm Kupferoleat vermessen.



**Bild 5.11:** Messwerte für a) Strom-Zeit-Verlauf und b) Feldstärkeverteilung nach Hikita und die nach der PNP-Methode berechneten Größen

## 5 Leitfähigkeit des Isolieröls und dessen Modellierung

Da der originale Versuch keine Ableitstrommessung beinhaltete, wurde der Versuch ohne Kerr-Effekt-Messung nachgestellt. Dabei wurde ein mit Durchführungen modifizierter Exsikkator als Prüfgefäß und einer 10-mm-Plattenelektroden-Anordnung mit Schutzring gemäß [Liebschner2009], S. 44 benutzt. Im getrockneten und entgasten Isolieröl wurde eine 30 ppm äquivalente Menge Kupferoleat gelöst. Der so vorbereitete Prüfling wurde mit einer Gleichspannung belastet.

Die Punkte in Bild 5.11 a) zeigen den gemessenen Strom-Zeit-Verlauf für eine Prüfspannung von  $U_{DC} = -5$  kV bis zum Erreichen des stationären Zustands. Zusätzlich sind sowohl der nach der PNP-Methode berechnete Gesamtstrom als auch die Stromanteile der positiven und negativen intrinsischen Ladungsträger sowie der Stromanteil der injizierten Ladungsträger dargestellt. Der Polarisationsanteil des Gesamtstroms begründet sich aus der Drift der intrinsischen Ladungsträger bis zur Anlagerung vor den Elektroden. Der Polarisationsstromanteil setzt sich dabei aus der Überlagerung der Stromanteile zweier intrinsischer Ladungsträgerspezies zusammen, welche sich in Drift- und Diffusionsverhalten unterscheiden. Die Restleitfähigkeit bzw. der stationäre Zustand wird durch die Injektions- und Rekombinationsprozesse dominiert.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der intrinsischen Ladungsträger sind damit sowohl Ursache für den gemessenen Strom als auch für gemessene Feldstärkeverteilung im Bild 5.11 b).

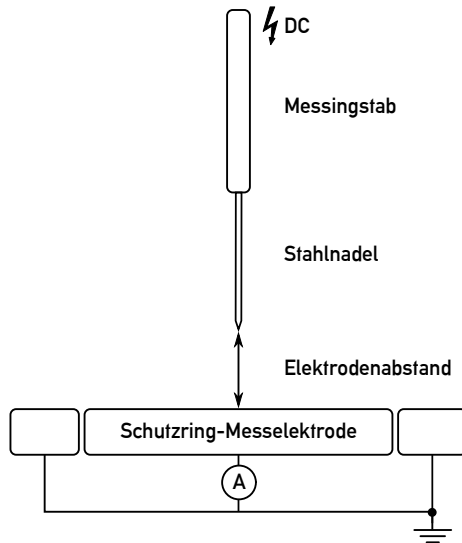
Die Erkenntnisse über den Zusammenhang des Leitfähigkeitsverhaltens und der Feldstärkeverteilung im Isolieröl bei Belastung mit hoher Gleichspannung aus Messung und PNP-Berechnung werden nun im Anschluss auf das Durchschlagverhalten ausgewählter Beispielanordnungen übertragen.

Die obigen Ergebnisse durch Hikita et al. sind für verunreinigtes Öl ermittelt worden. Im Falle eines technisch reinen Öls konnte mit der Kerr-Effekt-Messung keine Feldstärkeüberhöhung festgestellt werden. Da aber von analogen Vorgängen bei geringerer Ladungsträgerzahl ausgegangen werden kann, werden Schichtdicken der Ladungsträgerstaugebiete von kleiner 1 mm vor den Elektroden vermutet.

# 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

## 6.1 Durchschlagverhalten einer Nadel-Platte-Anordnung

Am Beispiel einer Nadel-Platte-Anordnung wurde das Durchschlagverhalten einer Ölstrecke bei Raumtemperatur in Abhängigkeit des vor dem Durchschlag auftretenden Stromes untersucht. Bild 6.1 zeigt den schematischen Versuchsaufbau.



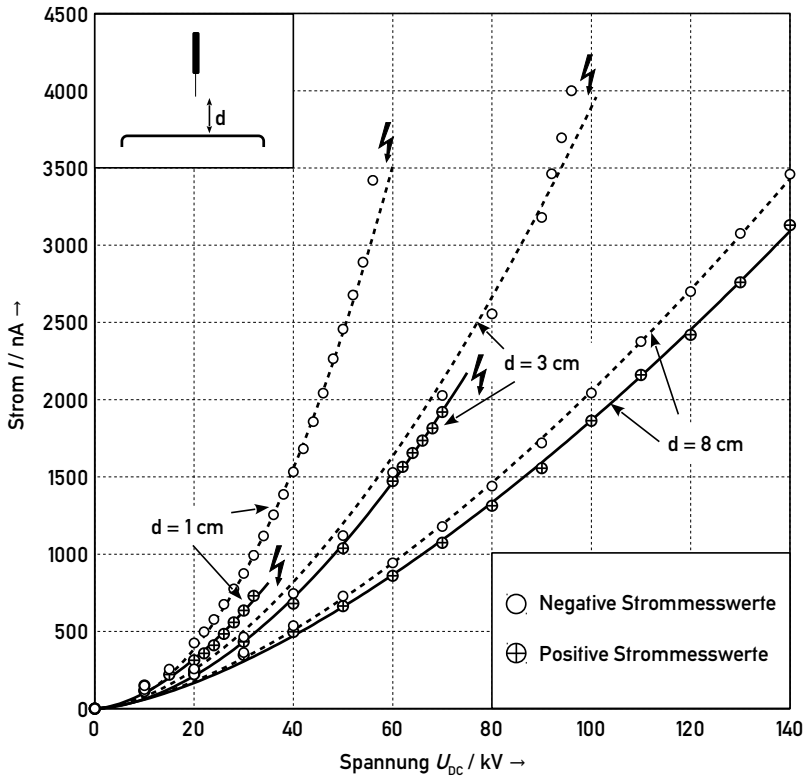
**Bild 6.1:** Versuchsanordnung Spitze-Platte mit Schutzringelektrode

Ein Messingstab mit  $\varnothing = 10$  mm hält eine Stahlnadel mit einem Spitzenradius von ca.  $20 \mu\text{m}$ . Diese kann in einen definierten Abstand  $d$  zur Erdelektrode gebracht wer-

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

den, welche als Schutzringmesselektrode ausgeführt ist. Im Versuch werden abhängig von der Polarität die Durchschlagspannung und die davor auftretenden Ströme bestimmt.

Bild 6.2 zeigt die gemittelten Messwerte aus jeweils drei Einzelmessungen. Ein Messwert entspricht dem Strom, der sich einstellt, nachdem alle Polarisationsprozesse abgeklungen sind.



**Bild 6.2:** Feldstärke-Ableitstromverhalten in Abhängigkeit der Schlagweite und Polarität mit Ausgleichskurven nach Gleichung 6.1

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

Um den zeitlichen Aufwand zu minimieren, wurden bei geringer Beanspruchung größere Spannungsschritte und bei hoher Beanspruchung nahe der Durchschlagspannung geringe Spannungsschritte gewählt. Auf die Angabe von Streubereichen wird verzichtet, da die Messungen sehr reproduzierbar waren.

Folgende Erkenntnisse ergeben sich daraus:

Die unterschiedlichen Stromstärken bei den beiden Spannungsarten begründen sich aus den unterschiedlichen Injektionsmechanismen für positive und negative Ladungsträger. Wenn aufgrund der Annahmen zum Leitfähigkeitsmodell die Mobilität beider Spezies als vergleichbar angesehen wird, muss offensichtlich die angenommene Anzahl der injizierten Elektronen größer sein als die Anzahl injizierter Löcher.

Alle Strom-Kurven genügen in sehr guter Näherung einem potentiellen Verhalten der Form.

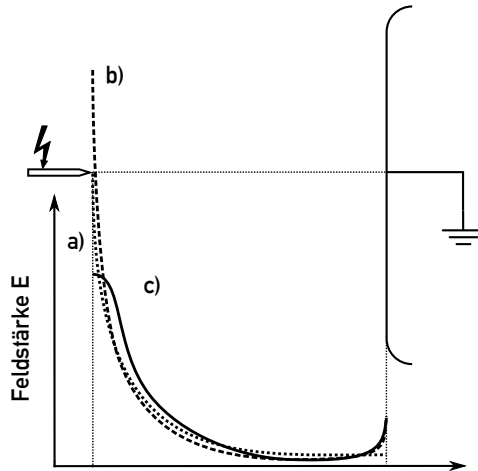
$$I = a \cdot U^b \quad (6.1)$$

Dies ähnelt dem Verhalten der Nordheim-Fowler-Beziehung bei großer Feldstärke, wie sie an der Spitze der Nadel zum Tragen kommt.

Es ist nach Bild 6.2 festzustellen, dass im Falle eines höheren Stromes für negative Gleichspannung auch eine höhere Durchschlagspannung bei negativer Polarität verzeichnet werden kann. Obwohl im Allgemeinen die dielektrische Leitfähigkeit und die Durchschlagfestigkeit zwei unabhängige Eigenschaften der Isolierstoffe sind, lässt sich für den Fall der Ölisolierstrecken mit Gleichspannungsbelastung ein Zusammenhang aufgrund der feldstärkeverändernden Wirkung der injizierten Ladungsträger herstellen. Mit Bild 6.3 soll hierzu die qualitative Feldstärkeverteilung erklärt werden.



## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems



**Bild 6.3:** Qualitative Feldstärkeverteilung für Spitze-Platte

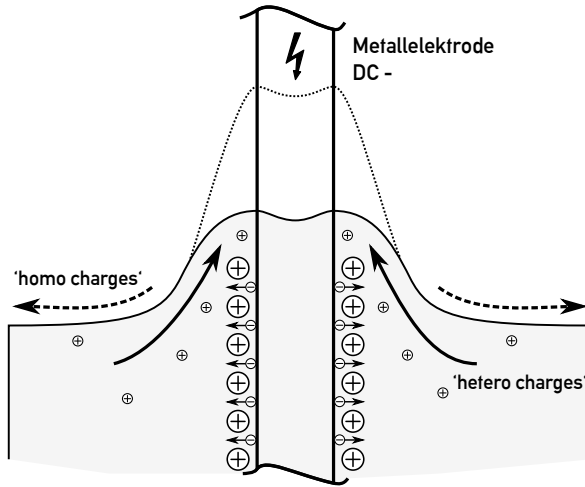
Die gepunktete Linie a) zeigt die Feldstärkeverteilung gemäß der Geometrie des elektrischen Feldes zwischen Nadel und geerdeter Platte. Die gestrichelte Linie b) zeigt eine Feldstärkeverteilung unter der Annahme der sich stauenden ölintrinsischen Ladungsträger. Ihre entgegengesetzte Ladung führt zu einer Anhebung der Feldstärke in den elektrodennahen Bereichen und eine Absenkung in der Mitte des Feldes.

Berücksichtigt man zusätzlich die Eigenladung der injizierten Ladungsträger erhält man die Linie c). Da eine große Menge an Ladungsträgern direkt an der Spitze der Nadel injiziert wird, senken diese gleichgeladenen Ladungsträger die Feldstärke in der Nähe der Nadelelektrode. Die injizierten Ladungsträger homogenisieren damit das elektrische Feld. Der Prozess erfolgt dabei ähnlich einer Glimmentladung an einem dünnen Draht in Luft. Je größer der Strom desto niedriger ist die effektiv wirksame Feldstärke an der Elektrode und damit die Beanspruchung.

Für sehr hohe Prüfspannungen beobachtet man eine starke Ölbewegung an der Hochspannungselektrode am Luft-Öl-Übergang für beide Polaritäten. Wie Bild 6.4 darstellt, kann einerseits eine zur Elektrode gerichtete Bewegung des Isolieröls festgestellt werden.

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

Das Öl kriecht scheinbar die Elektrode hinauf. Andererseits wird eine Bewegung von der Elektrode weg wahrgenommen.

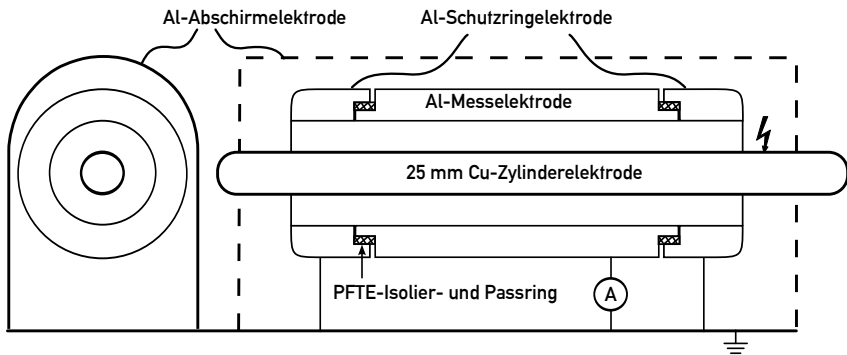


**Bild 6.4:** Modell der ladungsträgerbedingten aufsteigenden Ölbewegung an einer Luft-Öl-Durchführung

Da diese Phänomene bei Wechselspannungsbelastung nicht auftreten und damit Kräfte auf die Grenzflächen zweier Dielektrika ausgeschlossen werden können, wird das Verhalten anhand des vorgestellten Leitfähigkeitsmodells erklärt. Die elektrostatischen Kräfte der Schicht angelagerter intrinsischer Ladungsträger hindern die durch die Erdelektrode injizierten Ladungsträger die Gegenelektrode zu erreichen. Da sowohl Löcher als auch Elektronen stets in Wechselwirkung mit den Ölmolekülen stehen, führt dies zu einer makroskopischen Ölbewegung. Die Kräfte sind dabei ausreichend stark, um das Isolieröl wenige Zentimeter um die Hochspannungselektrode anzuheben.

## 6.2 Durchschlagverhalten koaxialer Zylinder

Ziel der weiteren Versuche ist es, den Strom bis zum Durchschlag zu messen, um eine qualitative rechnerische Übereinstimmung aus Experiment und Messung im Gegensatz zu den vorherigen resistiv-kapazitiven Ansätzen zu erreichen. Leitfähigkeit, Feldstärkeverteilung und Durchschlag sollen in einen Zusammenhang gesetzt werden. Dazu wurde die koaxiale Zylinderanordnung in Schutzringausführung gemäß Bild 6.5 gewählt.



**Bild 6.5:** Elektrodenanordnung koaxiale Zylinder

Für eine bessere Vergleichbarkeit hinsichtlich des Einflusses des Krümmungsradius der Elektroden wurde für die Innenelektrode der gleiche Radius wie bei der später untersuchten Anordnung 'gekreuzte Zylinder' verwendet.

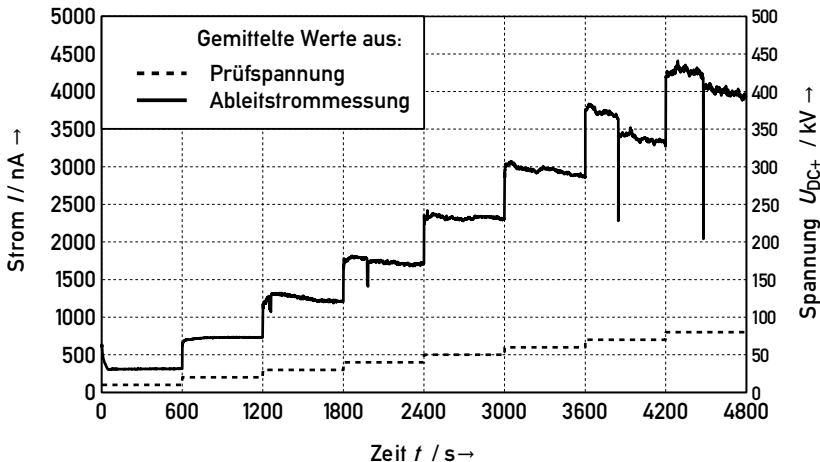
Als Außenelektrode wurde ein geteiltes Aluminium-Rohr gewählt, dessen aufgesteckten Enden als Schutzelektroden kontaktiert wurden. Zentrierung, galvanische Trennung und Reduktion der Spaltmaße der äußeren Messelektrode wurden mit Hilfe klein tolerierter PTFE-Passringe realisiert. Zur Minimierung der Stromanteile auf die Außenseite der mittigen Strommesselektrode wurde diese lackiert und durch eine zusätzliche äußere Abschirmelektrode in einen Feldschatten gebracht.

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

Die Innenelektrode wird auf PTFE-Stützer zentriert gehalten und an Hochspannungspotential gelegt. Die gesamte Messanordnung wurde auf einer geerdeten Platte platziert. Die silikonisierte Messleitung wurde durch ein Loch in der Erdplatte geschirmt zum Amperemeter geführt.

Der Ringspalt der Anordnung ermöglicht eine vergleichsweise einfache, eindimensionale PNP-Berechnung.

Die Spannung wurde stufenförmig mit dem Ziel gesteigert, vor dem Durchschlag einen stationären und damit von den Leitfähigkeitsmechanismen dominierten Feldstärkezustand zu erreichen.



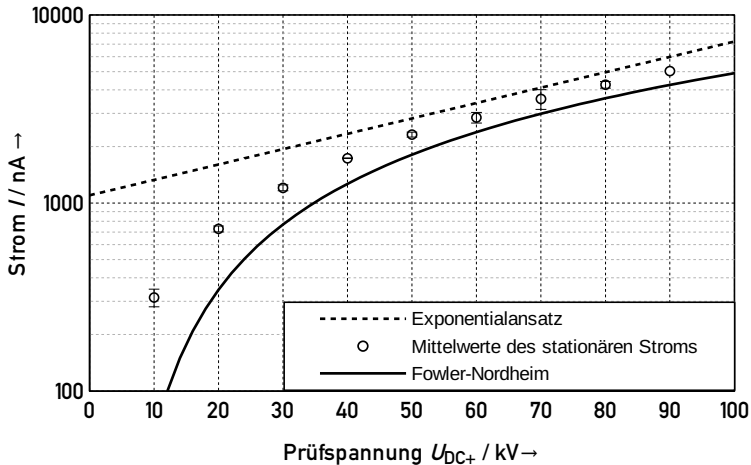
**Bild 6.6:** Strom-Zeit-Verlauf beim Stufenspannungssteigerungsversuch der blanken koaxialen Zylinder gemittelt aus fünf Einzelversuchen

Bild 6.6 zeigt den gemittelten Strom-Zeit-Verlauf für verschiedene durchgeführte Spannungssteigerungsversuche. Die einzelnen Stromspitzen in negative Richtung resultieren aus den Durchschlagereignissen der Einzelversuche. Mögliche Stufen im Strom-Zeit-Verlauf resultieren aus dem Wegfall der Messwerte nach einem Durchschlag.

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

Ähnlich dem Vorgehen in Kapitel 5.3 zur feldstärkeabhängigen Leitfähigkeit werden für eine rechnerische PNP-Modellierung die Randflüsse bzw. das feldstärkeabhängige Injektionsverhalten der Elektroden aus den stationären Stromwerten geschätzt. Wenn Ionisationsvorgänge im Isolieröl ausgeschlossen werden, dann müssen die positiven Quellterme in der PNP gleich Null gesetzt werden. Dies hat zur Folge, dass der stationär berechnete Strom allein von den definierten Randflüssen abhängt.

In Bild 6.7 sind hierzu nun die stationären Stromwerte gegenüber der Prüfspannung und damit in Näherung der wirksamen Feldstärke angetragen. Während die Durchschlagspannung in der Regel einer großen Streuung unterliegt, zeigen Strommessergebnisse eine vergleichsweise gute Reproduzierbarkeit, wie es die ermittelten Streubereiche bestätigen.



**Bild 6.7:** Qualitative Näherung der Messwerte durch einen Exponentialansatz und einen Ansatz gemäß der Fowler-Nordheim-Beziehung

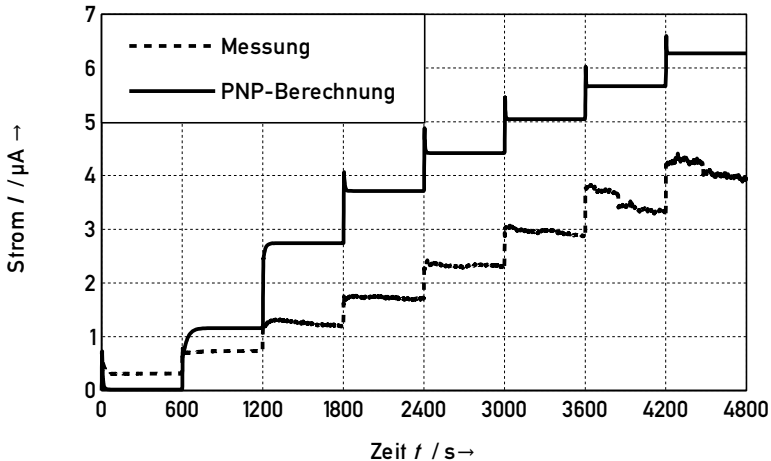
Es ist festzustellen, dass die Messwerte durch eine Näherungsfunktion in Analogie zur Fowler-Nordheim-Beziehung nach Gleichung (5.34) beschrieben werden können.

Anhand des PNP-Modells kann nun anhand der Fowler-Nordheim-Näherung sowohl

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

das Strom-Zeit-Verhalten (Bild 6.8) als auch die Feldstärkeverteilung in der Elektrodenanordnung berechnet werden.

Für die Erstbelastung mit 10 kV zeigt sich ein charakteristischer Polarisationsstrom. Dessen Polarisationsanteil begründet sich aus der Menge ölintrinsischer Ladungsträger. Diese bewegen sich aufgrund der Gleichspannungsbelastung in Richtung der entsprechenden Gegenelektrode und verharren dort aufgrund ihrer Mizellenstruktur. Weil für geringe Spannungen und damit Feldstärkewerte keine hinreichend genauen Stromwerte zu Verfügung stehen, fällt der Fehler der Berechnung entsprechend groß aus.



**Bild 6.8:** Vergleich des gemessenen und berechneten Strom-Zeit-Verlaufs beim Stufenspannungssteigerungsversuch

Unter der Annahme der rückgerechneten Ladungsträgermobilitäten ergibt sich eine rechnerisch abgeschätzte Ladungsträgerdichte von ca.  $10^{18}$  Teilchen pro Kubikmeter für die beiden intrinsischen Ladungsträgerspezies, welche den berechneten Polarisationsstrom verursachen.

Diese Menge an Ladungsträgern staut sich getreu dem Leitfähigkeitsmodell vor der

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

jeweiligen Gegenelektrode und verursacht eine entsprechende Feldstärkeanhebung. Im Fall der Durchschlagspannung wird nun eine durchschlagrelevante Feldstärke von 30 kV/mm berechnet.

Es sei kurz auf den Nachweis des Zusammenhangs zwischen Strom-Zeit-Verhalten und Feldstärkeverteilung in Kapitel 5.5 verwiesen, auf dem die vorliegende Berechnung basiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Berechnung der Feldstärkeverteilung in einem Ölspalt mit Hilfe des vorgestellten Ölmodells und der PNP auf Basis der Polarisationsstrommessung möglich ist.

Bild 6.9 zeigt die berechnete Randfeldstärke an der Innenelektrode für die unterschiedlichen Stehspannungen während des Versuchs.

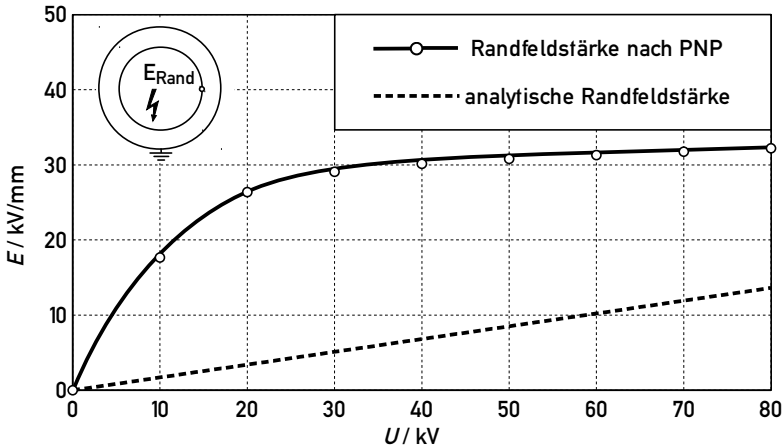


Bild 6.9: Randfeldstärke an der Innenelektrode für unterschiedliche Prüfspannungen

Die geometrische Feldstärke am Innenradius berechnet sich analytisch ohne Raumladungseinfluss gemäß Gleichung (6.2) und (6.3) zu

$$E(x) = \frac{U}{x \ln \frac{r_{\text{außen}}}{r_{\text{innen}}}} \quad (6.2)$$

## 6 Durchschlagverhalten des Einstoffsystems

$$E_h = \frac{U}{r_{\text{innen}} \ln \frac{r_{\text{außen}}}{r_{\text{innen}}}} \quad (6.3)$$

Es zeigt sich, dass die nach PNP berechneten Feldstärken am hochbelasteten Innenradius wesentlich größer sind und nicht linear mit der Prüfspannung zunehmen.

Wie im anfänglichen Beispiel nach [Ebisawa2009] in Kapitel 2.5 besteht ein signifikanter Unterschied in den Berechnungsmodellen für den Fall, dass die Ladungsträger berücksichtigt werden oder nicht. Eine Vernachlässigung der Ladungsträger führt zu einer unterschätzten Feldstärkebelastung.

Vielmehr stellt sich aufgrund der entgegengesetzt geladenen Ladungsträger vor den Elektroden bereits bei vergleichsweise geringen Prüfspannungen eine hohe lokale Beanspruchung des Isolieröls ein. Der Feldstärkebetrag ist dabei abhängig vom Gleichgewicht der feldstärkeerhöhenden *hetero charges* und der feldstärkeenkenden, injizierten *homo charges*. Da die Injektion überproportional mit der Feldstärke zunimmt, ändert sich die Randfeldstärke mit zunehmender Spannungsbelastung nur noch geringfügig. Die *innere Inhomogenität* nimmt gemäß [Hikita1996] mit zunehmender Prüfspannung ab.

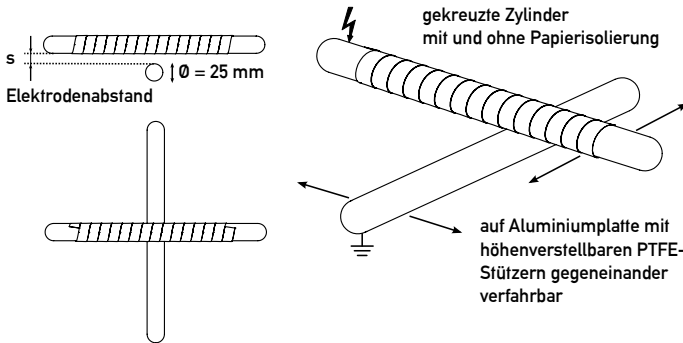
Dieses Ergebnis deckt sich mit den in den Versuchen beobachteten großen Streubereichen der Durchschlagspannung für Ölstrecken. Da bereits bei geringen Spannungen eine hohe lokale Beanspruchung des Isolieröls auftreten kann, entscheiden variable Prozesse am Versuch wie Prüfspannungsschwankungen, nicht zu vermeidende Schwebepartikel im Öl o.ä. einen Entladungseinsatz.



# 7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems

## 7.1 Durchschlagverhalten gekreuzter Zylinder

Zur grundlegenden Untersuchung des Durchschlagverhaltens des Zweistoffsystems Öl-Papier wurde die gekreuzte Zylinderanordnung nach Bild 7.1 gewählt. Diese wurde auf einer geerdeten Aluminiumplatte mit höhenverstellbaren PTFE-Stützern verfahrbar im Prüfgefäß nach Bild 4.3 platziert. Im Gegensatz zur homogenen Platte-Platte-Anordnung [Moser1987], Seite 62, können mit einem konditionierten Prüflingselektrodenpaar mehrere Durchschlagversuche durchgeführt werden. Die Elektroden sind dabei gegeneinander zu verschieben oder zu verdrehen. Eine große Durchschlaganzahl lässt eine statistische Auswertung zu.



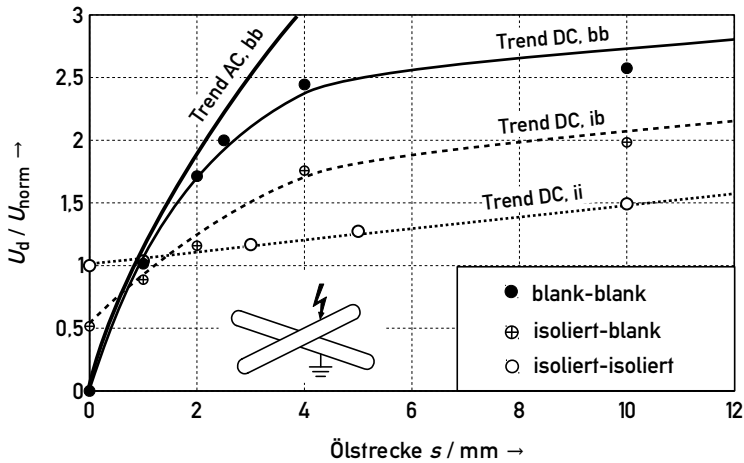
**Bild 7.1:** Elektrodenanordnung gekreuzter Zylinder für blanke und papierisolierte Elektroden

Die Schlagweite zwischen den Elektroden wurde durch eine Fühllehre vor den Versuchen eingestellt. Das Gewicht der Kupferelektroden und der stabile Stand der PTFE-

## 7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems

Stützer auf der Aluminiumplatte ermöglichen dabei eine präzise Zustellbarkeit.

Die Ermittlung der Durchschlagspannung erfolgte im Spannungssteigerungsversuch mit einer steten, langsamen Erhöhung der positiven Gleichspannung um 200 V/s. Da konventionelle Stelltransformatorsteuerungen diese Anforderung hinsichtlich Linearität nur unzureichend erfüllen, wurde ein spezieller Schrittmotorantrieb für das Stellen entwickelt. Bild 7.2 zeigt die Durchschlagkennlinien für den beschriebenen Versuch. Es wurde eine Normierung der Messwerte auf die Durchschlagspannung der vollständig papierisolierten Elektroden ohne Ölpalt vorgenommen.



**Bild 7.2:**  $U_d$ - $s$ -Kennlinie gekreuzter Zylinder für blanke, hochspannungsseitig isolierte und vollständig papierisolierte Elektroden

Erstaunlicherweise zeigt die reine Ölstroke für große Schlagweiten die höchste Durchschlagspannung. Das Einbringen der deutlich festeren Papierkomponente in die Isolierung bewirkt nur für geringe Ölspalten eine entsprechende Steigerung der Durchschlagspannung - für den Fall des vollständigen Papieranteils der Isolierstrecke, die Ölstroke  $s$  ist gleich Null, ist die Zunahme der Durchschlagspannung proportional zur Papierdicke. Für Ölspalte größer 1 mm reduziert der Einfluss des Papiers die Festigkeit der Gesamtstrecke.

## 7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems

Innerhalb von [Backhaus2011] konnte detailliert gezeigt werden, dass eine Erklärung des Durchschlagverhaltens mit Hilfe eines resistiv-kapazitiven Netzwerkmodells nicht möglich ist. Sowohl im Zeitverhalten als auch in den berechneten Spannungsfällen in den Isolierstoffen ergeben sich Widersprüche.

Ohne eine Ableitstrommessung durchgeführt zu haben, spricht das lineare Verhalten der vollständig isolierten Elektroden für das Erreichen einer stationären, durch Leitfähigkeitsmechanismen bedingten Potential- und damit Feldstärkeverteilung in der Isolierung.

Der besonders flache Anstieg der Kennlinien ähnelt stark dem Spannungsbedarf des Leaders von 1 kV/mm nach Hauschild [Hauschild1969] und auch den Literaturwerten gemäß Bild 2.9. Dieser Sachverhalt, die Messungen Hikitas et al. [Hikita1996] und die Ungültigkeit der Schwaiger-Beziehung für die blanken Elektroden [Ohshima1983] führen zu der Schlussfolgerung, dass Staugebiete an Ladungsträgern zu lokalen Feldstärkeerhöhungen an den Elektroden und in der Öl-Papier-Grenzschicht führen, welche durch diese *innere Inhomogenität* das elektrische Feld und damit das Durchschlagverhalten beeinflussen.

Die DC-Kennlinie der blanken Elektroden verläuft flacher als die AC-Kennlinie und genügt nicht mehr der Schwaiger-Beziehung, da die intrinsischen Ladungsträger die Feldstärke vor den Elektroden überhöhen. Zündet eine Entladung in der Grenzschicht, kann diese große Schlagweiten aufgrund des geringen Spannungsbedarfs des Leaders in Öl überbrücken.

Die Kennlinie der papierisolierten Elektroden wird durch das Staugebiet der stetig, feldstärkeabhängig injizierten Ladungsträger vor der Papierisolierung bestimmt. Die lokal erzeugte dielektrische Verlustleistung kann zudem gegenüber dem Fall der blanken Elektroden vergleichsweise schlecht abtransportiert werden, was die geringere Durchschlagspannung zusätzlich erklären kann. Da Stehspannungsversuche mit hohem Papieranteil starke Ölentladungen aber keine Papierdurchschläge zeigen, was im Falle eines resistiv-kapazitiven Verhaltens zu erwarten wäre, wird das Versagen des Ladungsträgerstaugebiets in der Öl-Papier-Grenzschicht entscheidend für das Versagen der Gesamtisolierung erachtet.

Für den Durchschlag einer Öl-Papier-Isolierung sind daher die Drift- und Stauprozesse der unterschiedlichen Ladungsträger von großer Bedeutung.

## *7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems*

Die in [Backhaus2011] und [Backhaus2012] vorgeschlagenen RC-Schichtmodelle sehen aufgrund des Ladungsträgerstaus vor Elektroden und Barrieren einen um Größenordnungen überschätzten Widerstand der in Reihe geschalteten Ladungsträgerstaugebiete vor. Obwohl die Spannungsfälle und damit Feldstärken in den einzelnen Schichten qualitativ modelliert werden konnten, offenbart sich ein Widerspruch zwischen einem messbaren und einem errechneten Strom im Falle der resistiv-kapazitiven Modelle.

Eine solche Vereinbarkeit von gemessenem Strom, signifikanter Feldstärke und Berechnung soll mit Hilfe des nächsten Versuchs aufgezeigt werden.

## 7.2 Durchschlagverhalten koaxialer Zylinder mit einseitiger Papierisolierung

In Analogie zum Versuch der koaxialen Zylinderanordnung mit blanken Elektroden (Bild 6.5) wurde dieser mit einer papierisolierten Innenelektrode durchgeführt. Dabei wurde das Ziel verfolgt, möglichst beide Versuche mit reiner Ölstrecke und mit papierisolierter Innenelektrode durch gleiche PNP-Parametersätze zu beschreiben.

Folgendes Strom-Zeit-Verhalten nach Bild 7.3 wurde ermittelt.

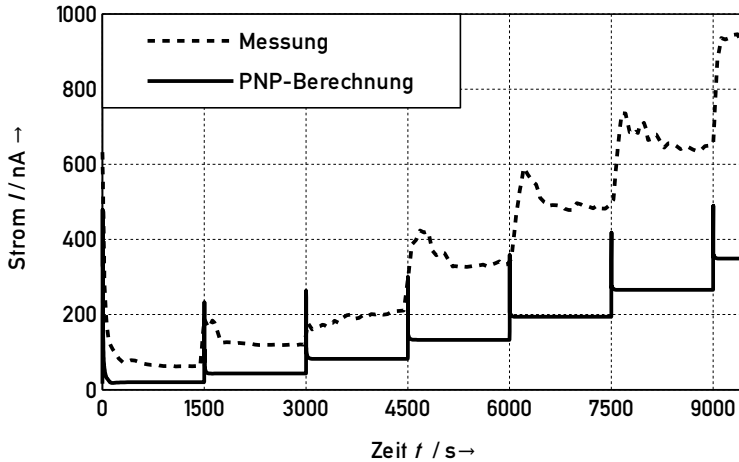


Bild 7.3: Vergleich des gemessenen und berechneten Strom-Zeit-Verhaltens bei papierisolierter Innenelektrode

Im Unterschied zum Versuch mit blanken Elektroden zeigt sich mit jeder Spannungssteigerung ein signifikanter Polarisationsstromanteil, der eine erwartungsgemäß längere Zeit bis zum Erreichen eines stationären Zustands benötigt. In Übereinstimmung zum Versuch mit gekreuzten Zylindern wird bei Papierisolierung der positiven Innenelektrode eine deutlich geringere Durchschlagspannung als bei blanken Elektroden festgestellt. Wie bereits zuvor vermutet, kann mit Hilfe der Strom-Zeit-Messung das

## 7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems

etwaige Erreichen eines stationären, leitfähigkeitsbedingten Zustands nachgewiesen werden.

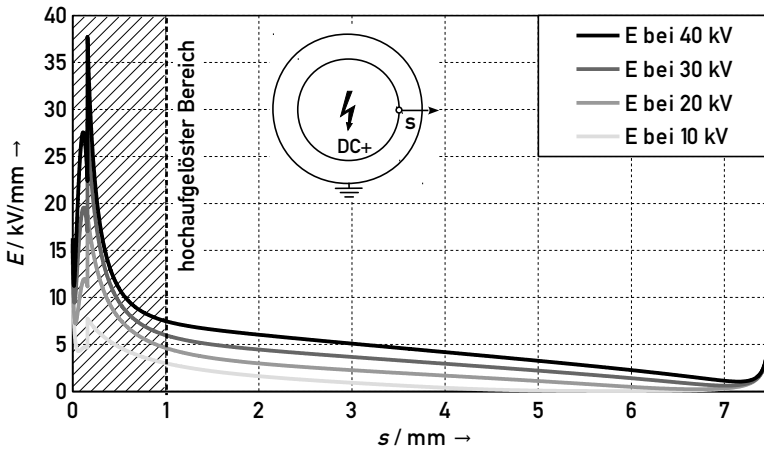
Im Gegensatz zum großen Streubereich der Durchschlagspannung bei reiner Ölstrecke, welcher durch die sich ergebende Randfeldstärke gemäß Bild 6.9 erklärt wird, erzielt man in der papierisolierten Anordnung Durchschlagspannungswerte  $U_d$  zwischen 35 und 40 kV mit einem vergleichsweise geringen Streubereich.

Für die PNP-Modellierung werden die in 5.2.1 und 5.2.2 formulierten Bedingungen für den Papieranteil hinsichtlich Mobilität und Diffusionskoeffizient geändert. Aufgrund der verdichteten Faserstruktur des Isolierpapiers sind nur kleinste Ölkanäle für den hauptsächlich ölgebundenen Ladungsträgertransport vorhanden. Dieser Papierleitfähigkeitsmechanismus wird mit um Größenordnungen geringeren Mobilitäts- und Diffusionseigenschaften modelliert.

Die Injektionsmechanismen der Elektroden und damit die feldstärkeabhängige Formulierung der Neumann-Randbedingung für die injizierten Ladungsträger bleiben hingegen in beiden Fällen gleich. Sowohl bei einer blanken als auch der papierisolierten Elektrode ist das Metall durch Isolieröl benetzt.

Entscheidend für das Zünden einer Entladung wird das lokale Überschreiten der Festigkeit der Isolierwerkstoffe angesehen. Die folgenden Bilder 7.4 und 7.5 zeigen die berechneten stationären Feldstärkeverteilungen für Spannungsniveaus zwischen 10 kV und 40 kV.

## 7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems



**Bild 7.4:** Berechnete radiale Feldstärkeverteilung im Ringspalt der koaxialen Zylinderanordnung mit papierisolierter Innenelektrode für die jeweils stationären Zustände

Im Isolierspalt zeigt sich eine nichtlineare Feldstärkeverteilung. Es werden bis zu vier Feldstärkemaxima berechnet.

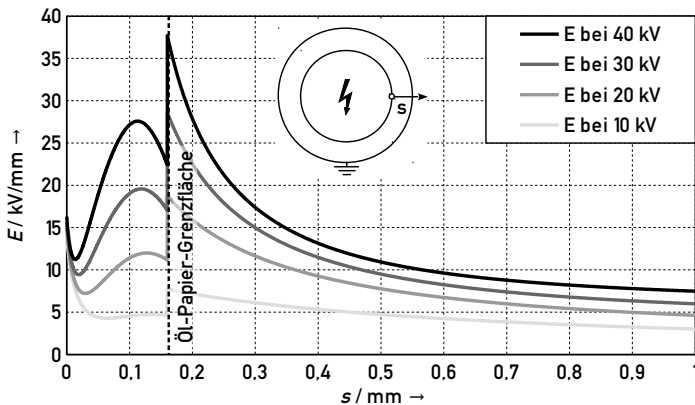
Zwei werden jeweils durch die sich an den Elektroden stauenden intrinsischen Ladungsträger verursacht. Während diese Staugebiete entscheidend für ein Entladungsereignis bei metallisch blanken Elektroden sind, haben diese im Falle einer papierisolierten Elektrode nur eine untergeordnete Bedeutung. Signifikant ist die Feldstärkeüberhöhung an der Öl-Papier-Grenzfläche, welche durch den Stau der durch die blanke Elektrode injizierten Ladungsträger verursacht wird. Aufgrund der gleichen Polarität mit der injizierenden Elektrode entlasten diese Ladungsträger den Ölspalt feldstärkemäßig durch ihre Eigenladung und polarisieren das Papier. Ihre Drift, das Eindringen ins Papier und die spätere Rekombination beeinflussen maßgeblich den gemessenen Polarisationsstrom sowohl bei der Erstbelastung als auch bei folgenden Spannungsstufen. Das vierte lokale Feldstärkemaximum bildet sich im Papier aus. Es resultiert aus dem sich bildenden, teilchendichteabhängigen Rekombinationsgebiet der injizierten Ladungsträger. Es stehen sich dabei je eine positive und negative Ladungsträgerspezies auf kleinem Raum

## 7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems

ähnlich der Sperrschicht einer Diode gegenüber. Die Größe des Rekombinationsgebiets hängt von der gewählten Rekombinationsrate und den Transportparametern ab. Diese und die globale Feldstärkeverteilung bestimmen wiederum das Feldstärkemaximum in der Rekombinationszone. Da der Betrag des stationären Stroms von der Injektion durch die Elektroden bestimmt wird und dieser Vorgang wiederum von der lokalen Feldstärke an der Elektrode abhängt, wirkt sich die Änderung eines Parameters signifikant auf das gesamte modellierte Verhalten aus.

Das Organigramm A.2 soll diese Zusammenhänge darstellen und den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Lösung der PNP verdeutlichen.

Bild 7.5 zeigt im hoch aufgelösten Randbereich der Innenelektrode, wie für die Spannungsniveaus zwischen 30 und 40 kV eine Feldstärke im Bereich der für Wechselspannungsbelastung bekannten Festigkeit berechnet wird.



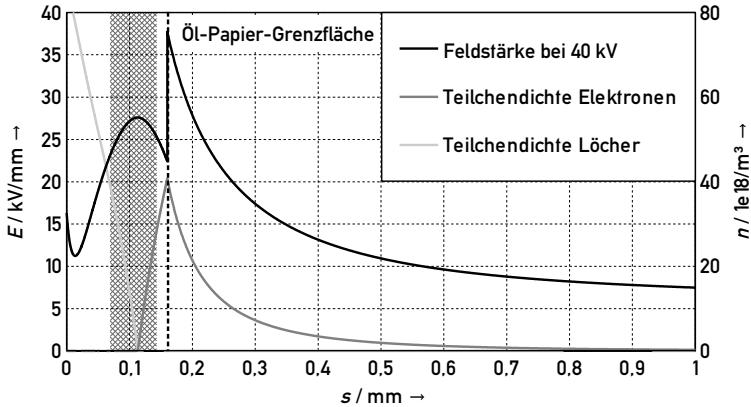
**Bild 7.5:** Berechnete radiale Feldstärkeverteilung im Ringspalt der coaxialen Zylinderanordnung in der Nähe der papierisolierten Innenelektrode

Der Feldstärkesprung an der Öl-Papier-Grenzfläche verdeutlicht einerseits die Wirkung der sich stauenden injizierten Ladungsträger. Andererseits zeigt sich, dass nach wie vor die Grundfeldstärkeverteilung des elektrostatischen Feldes gesteuert durch das Verhältnis der Permittivitäten der einzelnen Isolierwerkstoffe vorhanden ist.



## 7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems

Bild 7.6 zeigt für 40 kV die entsprechende Teilchendichteverteilung der injizierten Elektronen und Löcher, welche innerhalb des Isolierpapiers rekombinieren.



**Bild 7.6:** Berechnete Teilchendichteverteilung im Ringspalt der coaxialen Zylinderanordnung mit Rekombinationszone im Isolierpapier

Gerade die Feldstärkeabhängigkeit der Vorgänge erklärt das nichtlineare Strom-Zeit- und Durchschlagverhalten der Öl-Papier-Isolierung.

Der sich zeitlich ändernde Strom ist nicht mehr nur auf einen oder mehrere Polarisationsmechanismen zurückzuführen. Wie gezeigt werden konnte, ergeben sich aufgrund des Ladungsträgerstaus und der Rekombination Rückwirkungen auf die Feldstärke an den Elektroden.

Prinzipiell konnte ein qualitativer Zusammenhang von Messung und Rechnung sowohl beim Strom-Zeit-Verhalten als auch der Feldstärkeverteilung und damit dem Durchschlagverhalten hergestellt werden. Für zwei Versuche mit coaxialen Zylindern konnte ein Parametersatz mit gleichen feldstärkeabhängigen Injektionsparametern geschätzt werden. Die Driftparameter der Ladungsträger mussten hingegen innerhalb einer Größenordnung variiert werden.

## *7 Durchschlagverhalten des Zweistoffsystems*

Um dem Ziel einer vollständigen dielektrischen Beschreibung des Öl-Papier-Isoliersystems mit der PNP-Methode näher zu kommen, müssen unbedingt die Parameter einzeln, unabhängig voneinander bestimmt werden. Dabei ist auf den Ausschluss der vielfältigen Randeffekte bei der Leitfähigkeitsmessung unbedingt zu achten.

# 8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit werden die dielektrischen Vorgänge der Leitfähigkeit und des Entladungseinsatzes im Öl-Papier-Isoliersystem bei Belastung mit hoher Gleichspannung anhand der gerichteten Bewegung der Ladungsträger erklärt. Die Unterscheidung in intrinsische und injizierte Ladungsträger mit ihren jeweils unterschiedlichen Eigenschaften ermöglicht eine mathematische Beschreibung ihrer Driftvorgänge mit Hilfe der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung.

Während die intrinsischen Ladungsträger das Verhalten bei geringer Feldstärkebelastung dominieren, so sind es die injizierten Ladungsträger, welche bei hoher Feldstärkebelastung insbesondere im Hinblick auf die Einleitung einer Entladung bzw. eines Durchschlags ausschlaggebend sind.

Je nach Fall wird das Gesamtverhalten der Isolierung durch die Metall-Öl- oder die Öl-Papier-Grenzfläche hauptsächlich bestimmt. An diesen Grenzflächen bilden sich aufgrund der Gleichspannungsbelastung Gebiete erhöhter Ladungsträgerdichte, welche wiederum zu einer lokalen Anhebung der Feldstärke führen.

Mit Hilfe des entwickelten Öl-Papier-Modells wurden die folgenden typischen Spannungseffekte erklärt:

- Bei der Belastung mit hoher Gleichspannung bilden sich in den Öl-Metall-Grenzflächen langzeitstabile Gebiete nichtrekombinierender intrinsischer Ladungsträger. Diesen Gebieten ist eine lokale Feldstärkeüberhöhung gegenüber dem geometrischen Grundfeld eigen.
- Aufgrund der Eigenladung der Ladungsträger und deren Rückwirkung auf das elektrische Feld wird das zunächst durch die Elektrodengeometrie bestimmte Grundfeld verändert. Selbst das Feld zwischen zwei planparallelen Plattenelektroden kann nicht mehr als homogen angenommen werden - *innere Inhomogenität*.
- Die Unabhängigkeit der Durchschlagsspannung vom Krümmungsradius der Elektrode und damit vom geometrischen Homogenitätsgrad einer Elektrodenanordnung [Ohshima1983] begründet sich in der Bildung der Ladungsträgerstaugebiete

## 8 Zusammenfassung

und der dort wirksamen Feldstärkeüberhöhung. Eine Feldberechnung auf alleiniger Basis der Geometrie ist damit nicht möglich.

- Die Modellierung des dielektrischen Verhaltens ist nur eingeschränkt mit Standard-RC-Methoden möglich. Es können weder die verzögerte Strom-Zeit-Maxima noch die Durchschlagspannung auf Basis eines Maximalfeldstärkekriteriums berechnet werden.
- Die nichtlineare, feldstärkeabhängige Leitfähigkeit des Isolieröls begründet sich in der Überlagerung der Einflüsse aus feldstärkeabhängiger Ladungsträgerinjektion an den Elektroden und Rückwirkung der Summe aller Eigenladungen auf die Feldstärke an der Elektrode.
- Das nichtlineare Strom-Zeit-Verhalten bei Polaritätswechsel bzw. das Auftreten zeitlich verzögerter Strom-Zeit-Maxima begründet sich auf dem Ortswechsel driftender Gebiete mit vergleichsweise hoher Ladungsträgerdichte.
- Das scheinbare Ausbleiben eines Depolarisationsstromes nach der Polarisation eines Ölspalts begründet sich in der Ausbildung der stabilen Doppelschicht an der Öl-Metall-Grenzfläche. Die Bereitstellung von Gegenladungen durch das Metall halten die Ladungsträger in der Nähe der Grenzfläche. Der Antrieb der Diffusion, welche die Depolarisation stützen würde, ist offensichtlich zu gering. Das Verweilen der Ladungsträger an den Elektroden ist für Stunden nachweisbar.
- Eine feste Papierisolierung kann die Durchschlagspannung eines Öl-Papier-Spalts reduzieren, wenn die Feldstärkeüberhöhung an der Öl-Papier-Grenzschicht durch die sich stauenden, injizierten Ladungsträger die Festigkeit des Isolieröls übersteigt.
- Eine vermeintliche „dielektrische Ecke“ in Form einer Barrierenkante erhöht die Durchschlagspannung [Ebisawa2009]. In [Backhaus2013a] wurde qualitativ gezeigt, wie Feldstärkeerhöhung in den Ladungsträgerstaugebieten an der Barriere bzw. deren Kante andere hoch beanspruchte Gebiete entlasten. Das Einbringen von Barrieren erhöht die Durchschlagspannung der Gesamtisolierung durch die Verlängerung des Ölweges.
- Weder die Kanten noch die Längsgrenzflächen werden als Ort geringer Festigkeit oder Startpunkt für Entladungen erachtet. Der Einsatz einer Entladung begründet

## 8 Zusammenfassung

sich in der lokalen Überschreitung der inneren Festigkeit des Isolieröls. Das Vorwachsen von Entladungen beruht auf den vom Wechselspannungsdurchschlag bekannten Leader-Phänomenen.

Die Leitfähigkeit ist nicht mehr als integrale Größe zu verstehen sondern als Überlagerung von den drei unabhängigen Prozessen: der Bereitstellung, dem Transport und der Rekombination von Ladungsträgern.



**Bild 8.1:** Übersicht der Leitfähigkeitsmechanismen

Dabei sind die Eigenschaften Injektion, Mobilität, Diffusion, Rekombination leider nur schwer in ihrer Wirkung auf einen zu messenden Strom voneinander zu trennen. Diese Einflüsse dennoch voneinander zu trennen, stellt einen signifikanten Unterschied zu den bisherigen resistiv-kapazitiven Modellen dar.

Der auf der Ladungsträgerdichte basierende Modellansatz und die PNP gehen zu jedem Zeitpunkt von einem elektrostatischen Grundfeld auch innerhalb einer Mischisolierung aus. Die grundsätzliche Feldstärkeverteilung bestimmt sich dabei durch das Verhältnis der unterschiedlichen Permittivitäten der einzelnen Dielektrika. Werden Ladungsträger durch Dissoziations- oder Injektionsprozesse bereitgestellt, so erzeugt deren Eigenladung einen zusätzlichen dielektrischen Fluss, der das Grundfeld beeinflusst. Ein stationäres Strömungsfeld im Sinne der spezifischen Leitfähigkeiten wird damit nicht erreicht. Es ergeben sich demnach gänzlich andere als bisher angenommene Feldstärkeverteilungen, wie bereits mit den vorliegenden Ergebnissen gezeigt werden konnte.

# 9 Ausblick

Die vorliegende Arbeit kann nur als ein Beitrag verstanden werden, die Leitfähigkeitsmechanismen und den feldstärkeabhängigen Entladungseinsatz in Isolierflüssigkeiten zu verstehen und berechnen zu wollen. Da die Abstraktion der RC-Modellierung nicht genügt, die Leitfähigkeit und Entladungsphänomene bei hoher Gleichspannung zu erklären, wird die Weiterentwicklung der PNP-Methode empfohlen, deren Ergebnisse qualitativ denen der Leitfähigkeits- und Durchschlagexperimente entsprechen.

Hierfür bedarf es der messtechnischen quantitativen Bestimmung der Ladungsträgereigenschaften wie Mobilität und feldstärkeabhängiger Injektion als Eingabeparameter für die PNP.

Wenn diese Eigenschaften bestimmt werden, sollte darauf geachtet werden, trotz der gegenseitigen Abhängigkeit aller Prozesse mögliche Einflussgrößen zu reduzieren.

Tatsächlich besteht eine Unsicherheit gegenüber der berechneten Randfeldstärke, da diese von den sich gegenseitig beeinflussenden Mengen an intrinsischen und injizierten Ladungsträgern abhängt. Für eine messtechnische Bestimmung der feldstärkeabhängigen Injektion wird daher eine koaxiale Zylinderanordnung mit sehr kleinem Homogenitätsgrad empfohlen. Zum einen kann somit der Einfluss der intrinsischen Ladungsträger aufgrund der hohen Feldstärke an der Innenelektrode reduziert, zum anderen kann gezielt das Verhältnis zwischen den injizieren positiven und negativen Ladungsträgern  $k_{ij}$  abhängig von der Polarität der Spannung bestimmt werden.

Eine Bestimmung der Ladungsträgermobilität und insbesondere deren Feldstärkeabhängigkeit könnte mit Hilfe einer kurzzeitigen, äußeren Anregung zur Ladungsträgerinjektion erfolgen. Diese Anregung könnte durch eine Überspannung, eine Strahlungsquelle oder Wärme erzeugt werden. Um den Einfluss der elektrodennahen Staugebiete der intrinsischen Ladungsträger vernachlässigen zu können, bedarf es dazu deutlich größerer Ölstrecken als die in der Regel verwendeten.

Weitere detaillierte Untersuchung und Modellierung verlangt die Öl-Metall-Grenzfläche. Wie in Bild 2.3 angedeutet, lagern sich die Ladungsträger an das Metall an. Die Eigenladung des Ölladungsträgers induziert damit eine Gegenladung im Metall. Da es nicht zu einer Rekombination kommt, verweilen beide Ladungsträger aufgrund der hohen

elektrostatischen Kräfte an der Grenzfläche. Das Lösen der intrinsischen Ölladungsträger von der Metalloberfläche unterliegt dabei prinzipiell einem anderen Mechanismus als der alleinigen Diffusion im freien Fluid. Daher sollten für die Modellierung der Randschicht bessere Ansätze gefunden werden. Möglicherweise bedarf es dazu der Einbeziehung eines Teils der Metallelektrode selbst, welche bisher vernachlässigt wurde.

Neben der Isolierwirkung ist die Kühlung des Aktivteils des Transformators die zweite Aufgabe des Isolieröls in Leistungstransformatoren. Daher ist die freie und erzwungene Ölkonvektion zu berücksichtigen [Podesser2011], [Schießling2011]. Dies gilt insbesondere für öldurchströmte Barrieren. Ein Lösungsansatz ist hier die in Kapitel 5.2.4 beschriebene Kopplung mit der Navier-Stokes-Gleichung.

Aufgrund des hohen experimentellen Aufwandes konnte bisher nur ein geringer Umfang an Experimenten mit erhöhter Temperatur durchgeführt werden. Allerdings zeigen die bisherigen Ergebnisse einen deutlichen Einfluss der Temperatur auf Leitfähigkeit und Durchschlag. Während sich mit der Temperatur die Driftprozesse des Öls aufgrund der abnehmenden Viskosität ändern, können zudem weitere Prozesse an den Elektroden oder im Papier zum Tragen kommen. Zudem wurde bisher mit einem vergleichsweise geringen Papieranteil gearbeitet. Für das Durchschlagverhalten des Papiers ist die beschriebene Rekombinationszone in Kapitel 7.2 von hohem Interesse. Der Rekombinationsprozess verursacht die Feldstärkeanhebung im Papier und die Entlastung des Isolieröls. Zur Vervollständigung des Gesamtverständnisses der dielektrischen Vorgänge sollten daher die vergleichsweise langsamen Prozesse im Papier weiter untersucht werden.

Die Ergebnisse, welche für die Belastung mit hoher Gleichspannung gefunden wurden, sollten auch auf Wechselspannung und insbesondere auf die Überlagerung von Wechsel- und Gleichspannung übertragen werden.

Auch bei Wechselspannungsbelastung ist eine Drift der Ladungsträger und der Bestandteile mit größerer relativen Permittivität als die des Öls in Gebiete hoher Feldstärke zu beobachten. Für den Fall der Spannungsüberlagerung ist auch mit einer prinzipiellen Drift der Ladungsträger zu rechnen. Allerdings wirkt zusätzlich der Verschiebungsstromanteil der Wechselspannung. So konnte bisher nicht untersucht werden, inwieweit eine hohe Ladungsträgerkonzentration Einfluss auf die lokal wirksame Permittivität

## 9 Ausblick

nimmt. Es sollte daher untersucht werden, ob diese tatsächlich, wie in [Backhaus2011] vermutet, zunimmt.

Neben den hohen Temperaturen sollten auch tiefe Temperaturen im Interesse zukünftiger Untersuchungen sein. Es wird angenommen, dass sich dann Isolieröle in ihrem Verhalten polymeren Feststoffen ähneln.

In allen Experimenten ist darauf zu achten, Randeffekte durch geeignete Vorkehrungen auszuschließen. Das Durchschlagexperiment wird dabei als das signifikanteste erachtet. Begleitet durch eine Ableitstrommessung zur Verifikation eines stationären Zustands der Leitfähigkeitsvorgänge kann diese indirekt zur Messung der Feldstärke im Durchschlagfall herangezogen werden. Je nach Versuchsaufbau kann man die Isolierstrecke oder die Randeffekte charakterisieren [Zouaghi1998].

Will man die dielektrischen Mechanismen in Isolierwerkstoffen bei Gleichspannungsbelastung besser verstehen lernen, so muss man, wie bereits erwähnt, Leitfähigkeit als Generation, Transport und Rekombination vorhandener Raumladung betrachten. Die Akkumulation möglicher Raumladungen in Feststoffen [Riechert2001] oder an Grenzflächen [Winter2015] beeinflussen durch ihren Feldstärkeinfluss das Durchschlagverhalten in Gasen [Ovsyanko2013], [Hering2016].



# Literaturverzeichnis

- [Atten2003] P. Atten & J. Sayed-Yagoobi. *Electrohydrodynamically Induced Dielectric Liquid Flow Through Pure Conduction in Point/Plane Geometry*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band Vol. 10,, Nr. No. 1, Seiten 27–36, 2003.
- [Backhaus2011] Karsten Backhaus, Joachim Speck, Steffen Großmann, Thomas Fritze, Ronny Fritsche & Mario Schenk. *Dielectric Strength and Conductivity Behaviour of Oil-Paper-Insulation*. In 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Seiten D–032, Hanover, 2011.
- [Backhaus2012] Karsten Backhaus, Steffen Großmann, Joachim Speck & Ronny Fritsche. *Durchschlagverhalten von Öl-Papier-Isolierungen bei hoher Gleichspannung unter Berücksichtigung von Raumladungen*. In RCC Fachtagung, Seiten 101–106, Berlin, 2012.
- [Backhaus2013a] Karsten Backhaus, Joachim Speck, Steffen Großmann & Ronny Fritsche. *Grenzflächenchenpolarisation in der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung*. In ETG - Grenzflächentagung, Dresden, 2013.
- [Backhaus2013b] Karsten Backhaus, Joachim Speck, Steffen Großmann & Ronny Fritsche. *Ion Concentration triggered Breakdown of Oil-Paper Insulation at high DC Voltage and Evaluation by FEM*. In 18th International Symposium on High Voltage Engineering. ISH, 2013.
- [Backhaus2014] Karsten Backhaus, Joachim Speck, Maria Hering, Steffen Großmann & Ronny Fritsche. *Nonlinear dielectric Behaviour of Insulating Oil under HVDC Stress as a Result of Ion Drift*. In ICHVE, Poznan, 2014.
- [Badent1996] Rainer Badent. *Modell der elektronendominanten Streamerentladung in Isolieröl*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1996.
- [Bartnikas1994] R. Bartnikas. Engineering dielectrics volume iii - electrical insulating liquids. ASTM, 1994.

## Literaturverzeichnis

- [Bazant2005] Martin Z. Bazant, Kevin T. Chu & B. J. Bayly. *Current-Voltage Relations for Electrochemical Thin Films*. SIAM Journal on Applied Mathematics, Band 65, Nr. 5, Seiten 1463–1484, Januar 2005.
- [Beyer1986] Manfred Beyer, Wolfram Boeck, Klaus Möller & Walter Zaengle. *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*. Springer Verlag, 1986.
- [Cardenas2000] Alfredo E. Cardenas, Rob D. Coalson & Maria G. Kurnikova. *Three-Dimensional Poisson-Nernst-Planck Theory Studies: Influence of Membrane Electrostatics on Gramicidin A Channel Conductance*. Biophysical Journal, Band 79, Seiten 80–93, July 2000.
- [Castellanos1995] A Castellanos & Avda Reina. *Generalized Thomson-Onsager Model for charge Injection into dielectric Liquids*. CEIDP, Band Annual Rep, Seiten 616–620, 1995.
- [Chu2005] Kevin T. Chu & Martin Z. Bazant. *Electrochemical Thin Films at and above the Classical Limiting Current*. SIAM Journal on Applied Mathematics, Band 65, Nr. 5, Seiten 1485–1505, Januar 2005.
- [Coco2007] Salvatore Coco, Daniela Gazzo, Antonino Laudani & Guiseppa Pollicino. *A 3-D Finite Element Poisson-Nernst-Planck Model for the Analysis of Ion Transport Across Ionic Channels*. IEEE Tansaction on Magnatics, Band 43, Nr. 4, Seiten 1461–1464, April 2007.
- [Denat2011] André Denat. *Conduction and breakdown initiation in dielectric liquids*. In IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Seiten 1–11, June 2011.
- [Ebisawa2003] Yoshihito Ebisawa, Shin Yamada, Shigekazu Mori & Masami Ikeda. *Dielectric Breakdown Characteristics of Oil-pressboard Insulation System against AC/DC Superposed Voltage*. IEEJ Transactions on Power and Energy, Band 123, Nr. 10, Seiten 1215–1221, 2003.
- [Ebisawa2009] Yoshihito Ebisawa, Shin Yamada, Shigekazu Mori & Tsuneharu Teranishi. *DC Creepage Breakdown Characteristics of Oil-immersed Insulation*.

## Literaturverzeichnis

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 16, Nr. VI, Seiten 1686–1692, 2009.
- [Felici1985] N. Felici. *High-Field Conduction in Dielectric Liquids Revisited*. IEEE Transaction on Electrical Insulation, Band EI-20, Nr. 2, Seiten 233–238, 1985.
- [Fischinger1932] Emil Gottfried Fischinger. *Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik*, Band 3. Springer Verlag, 1932.
- [Forster1985] E. Forster. *Critical assessment of the electrical breakdown process in dielectric fluids*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Band EI-20, Nr. 5, Seiten 891–896, 1985.
- [Fowler1928] R. H. Fowler & L. Nordheim. *Electron Emission in Intense Electric Fields*. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Band 119, Nr. 781, Seiten 173–181, Mai 1928.
- [Gafvert2006] Uno Gafvert, Olof Hjortstam, Yuriy Serdyuk, Christer Törnkvist & Lars Walfridsson. *Modeling and Measurements of Electric Fields in Composite Oil/Cellulose Insulation*. In Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Seiten 154–157, 2006.
- [Gänger1968] Berthold E. Gänger. *The Breakdown Voltage of Oil Gaps with High DC Voltage*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band 87, Nr. 10, Seiten 1840–1843, Oktober 1968.
- [Gerthsen1974] C. Gerthsen, H.O. Kneser & H. Vogel. *Physik*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1974.
- [Göbel2014] Holger Göbel. *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer, 2014.
- [Gouy1909] Louis Georges Gouy. *Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte*. Comptes Rendus de l'Académie des sciences, Band 149, Seiten 654–657, 1909.

## Literaturverzeichnis

- [Grahame1947] David C. Grahame. *The Electrical Double Layer and the Theory of Electrocapillarity*. Chemical Reviews, Band 41, Nr. 3, Seiten 441–501, 1947.
- [Hauschild1969] Wolfgang Hauschild. *Zum Öldurchschlag im inhomogenen Feld bei Schaltspannungen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1969.
- [Helmholtz1879] Hermann von Helmholtz. *Studien über electrische Grenzschichten*. Annalen der Physik, Band 243, Nr. 7, 1879.
- [Hering2016] Maria Hering. *Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2016.
- [Hibma1985] T. Hibma & H. R. Zeller. *Direct measurement of spacecharge injection from a needle electrode into dielectrics*. Journal of Applied Physics, Band 59, Nr. 5, Seiten 1614–1620, November 1985.
- [Hikita1996] M. Hikita, M. Matsuoka, R. Shimizu, K. Kato, N. Hayakawa & H. Okubo. *Kerr Electro-optic Field Mapping and Charge Dynamics in Impurity-doped Transformer Oil*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 3, Nr. 1, Seiten 80–86, 1996.
- [Hjortstam2012] Olof Hjortstam, Joachim Schiessling, Yuriy V. Serdyuk & Stanislaw M. Gubanski. *Measurements of ion mobility in transformer oil: Evaluation in terms of ion drift*. In CEIDP, Seite 496 ff, Oktober 2012.
- [Jia-Xiang1997] Yang Jia-Xiang, Chi Xiao-Chun, Ding Li-Jian & Ji Liu. *Creeping discharge performance of oil-paper insulation with streaming electrification*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation and Electrical Insulation, Band 4, Nr. 6, Seiten 780–784, 1997.
- [Judendorfer2012] Thomas Judendorfer. *Öl-Zellulose-Isolationssysteme für HGÜ-Anwendungen*. Dissertation, TU Graz, 2012.
- [Kahle1988] Manfred Kahle. *Elektrische Isoliertechnik*. Verlag Technik, Berlin, 1988.

## Literaturverzeichnis

- [Karasev1992] G. G. Karasev & B. N. Dikarev. *Modelling of conduction processes in dielectric liquids*. In Sixth International Conference on Dielectric Materials, Seiten 463–466, Manchester, 1992.
- [Kist1999] Klaus Kist. *Streamerausbreitung im Mischdielektrikum Isolieröl- Transformierboard*. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1999.
- [Küchler2016] A. Küchler. Technical Brochure 646 HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity. CIGRE, 2016.
- [Kumara2009] S. Kumara, Y. Serdyuk & S. M. Gubanski. *Calculation of Corona Voltage-Current Characteristics in Air*. In ICIS, Sri Lanka, 28 - 31 December 2009.
- [Kurita1986] A. Kurita, E. Takahashi, J. Ozawa, M. Watanabe & K. Okuyama. *DC Flashover Voltage Characteristics and their Calculation Methode for Oil-immersed Insulation Systems in HVDC Transformers*. IEEE Transactions on Power Delivery, Band PWRD-1, Nr. 3, Juli 1986.
- [Lettner2010] Christian Lettner. *Erste 800-kV-HGÜ-Leitung in China im Vollbetrieb*. <https://www.cee.siemens.com/web/at/de/corporate/portal/Presse/Presseinformationen/Presse2010/Pages/HGUE-Leitung.aspx>, Juni 2010.
- [Lewis1994] T. J. Lewis. *Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids*. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 1, Nr. 4, Seiten 630–643, August 1994.
- [Liebschner2009] Marcus Liebschner. *Interaktion von Ölspalten und fester Isolation in HVDC-Barrierensystemen*. Dissertation, Technischen Universität Ilmenau, 2009.
- [Malter1936] Louis Malter. *Thin Film Field Emission*. Physical Review, Band 50, Nr. 1, Seiten 48–58, Juli 1936.
- [Minday1971] R. M. Minday, L. D. Schmidt & H. T. Davis. *Excess Electrons in Liquid Hydrocarbons*. The Journal of Chemical Physics, Band 54, Nr. 7, Seiten 3112–3125, April 1971.

## Literaturverzeichnis

- [Moser1987] Hans Peter Moser. Transformerboard II. Weidmann AG, 1987.
- [Nakao1997] Y. Nakao, M. Naruse, Y. Suzuki, H. Itoh, Y. Sakai & H. Tagashira. *Influence of insulating barrier on the creepage discharge in transformer oil*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Band 4, Nr. 6, Seiten 775–779, 1997.
- [Nikuradse1934] Alexander Nikuradse. Das flüssige Dielektrikum (Isolierende Flüssigkeiten). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1934.
- [Occhini1967] E Occhini & G Maschio. *Electrical characteristics of oil-impregnated paper as insulation for hv dc cables*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band PAS-8, Nr. 3, Seiten 312–326, 1967.
- [Ohshima1983] I. Ohshima, S. Motegi, M. Honda, T. Yanari & Yoshihito Ebisawa. *HVDC Breakdown of Transformer Oil and the Effect of Space Charge on it*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band PAS-102, Nr. 7, Seiten 2208–2215, 1983.
- [Okubo1987] H. Okubo, K. Okamura, M. Ikeda & S. Yanabu. *Creepage flashover characteristics of oil/pressboard interfaces and their scale effects*. IEEE Transaction on Power Delivery, Band PWRD-2, Nr. 1, Seiten 126–132, 1987.
- [Onsager1934] Lars Onsager. *Deviations from Ohm's Law in Weak Electrolytes*. The Journal of Chemical Physics, Band 2, Nr. 9, Seite 599, 1934.
- [Ovsyanko2013] Irina Ovsyanko. *Entladungsverhalten von Luftfunkenstrecken bei hohen Gleichspannungen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2013.
- [Philippow1982] Eugen Philippow. Taschenbuch Elektrotechnik - Hochspannungstechnik, Band 6. VEB Verlag Technik, 1982.
- [Podesser2011] J. A. Podesser, R. Schwarz, G. Pukel, B. Wieser, M. Muhr & T. Weiz. *Investigation of the Static Electrification Phenomenon in Power Transformers with the Streaming Model Test Setup*. In 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Seiten D–032, 2011.

## Literaturverzeichnis

- [Rahmoon2008] Solaiman Rahmoon. *Elektrisches Verhalten der Windungsisolierungen von Öltransformatoren*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2008.
- [Reddy2009] Krishna R. Reddy & Claudio Cameselle. *Electrochemical Remediation Technologies for polluted Soils, Sediments and Groundwater*. Wiley, 2009.
- [Riechert2001] Uwe Riechert. *Eignung von Polyethylen für Gleichspannungs-Energiekabel*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2001.
- [Roesner2011] Michael Roesner, Hans Fiddes, Michael Küstermann, Mario Schenk, Andreas Küchler, Steffen Großmann & Joachim Speck. *About the Measurement of DC Electric Field under stationary and transient Operation in Oil impregnated DC Insulation Systems*. In 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Seiten D-059, Hannover, Germany, 2011.
- [Schießling2011] Joachim Schießling, Cecilia Forssén, Lars Walfridsson, Christer Törnkvist & Uno Gäfvert. *Evolution of the electric Field due to forced Flow in Oil Pressboard Ducts*. In IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, 2011.
- [Schlake2011] Bärbel Schlake. *Mathematical Models for Particle Transport: Crowded Motion*. Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2011.
- [Schulz1974] Paul Schulz. *Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern*. Braun G. Buchverlag, Karlsruhe, 2. edition, 1974.
- [Selberherr1984] Siegfried Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Springer Verlag, 1984.
- [Shirvani2013] Ali Shirvani, Wolfgang Schufft, Hans-Peter Pampel & U. Schmidt. *Spatial-temporal Investigation of Breakdown Mechanism of Lightning Over-voltages: The Measurement System*. In 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seiten OE4-02. ISH, 2013.

## Literaturverzeichnis

- [Singh2015] S. Singh, Y. V. Serdyuk & R. Summer. *Streamer Propagation in Air in non-axially symmetric electric Field*. In 19th International Symposium on High Voltage Engineering, 2015.
- [Sinz1990] Peter Johann Sinz. *Der Einfluss von Feuchte und Partikeln auf die elektrische Festigkeit von Isolierölen*. Dissertation, Technische Universität Graz, 1990.
- [Stern1924] Otto Stern. *The theory of the electrolytic double-layer*. Zeitung Elektrochemie, Band 30, Seiten 508–516, 1924.
- [Thoma1970] P. Thoma & M. G. Kratzenstein. *Leistungs- und Durchschlagprozesse in Isolierölen*. Zeitschrift für angewandte Physik, Band 29, Nr. 5, Seiten 301–305, 1970.
- [Thomas1975] W. R. L. Thomas & E. O. Forster. *Electrical Conductance and Breakdown in Liquid Hydrocarbons*. In Proceedings of 5th Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Seiten 49–54, Delft, 1975. Delft University Press.
- [Vahidi2013] Farzaneh Vahidi & Stefan Tenbohlen. *The Investigation of the Temperature and Electric Field Dependency of Mineral Oil electrical Conductivity*. In ETG - Grenzflächentagung, Dresden, 2013.
- [Wien1929] Max Wien. *Über den Spannungseffekt der elektrolytischen Leitfähigkeit in sehr starken Feldern*. Annalen der Physik, Band 393, Nr. 3, Seiten 400–416, 1929.
- [Winter2015] Axel Winter. *Elektrische Felder in Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung*. Dissertation, Technische Universität München, 2015.
- [Yang2012] Lijun Yang, Mohsen Shafiee Zadeh, Joachim Schiessling, Olof Hjortstam, Yuriy V Serdyuk & Stanislaw M. Gubanski. *Measurement of Ion Mobility in Transformer Oils for HVDC Applications*. In International Conference on High Voltage Engineering and Application, Seiten 3–6, Shanghai, September 2012.



## Literaturverzeichnis

- [Zouaghi1998] A. Zouaghi & A. Beroual. *Barrier Effect on the Dielectric Strength of Oil Gaps under DC Voltage*. In IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, Seiten 640–643. IEEH, June 1998.

# A Anhang

## A.1 Gültigkeit der Annahmen einer verdünnten Lösung für mineralisches Isolieröl

Mineralöl hat eine durchschnittliche Dichte von  $\rho = 0,79 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Würde es nur aus Paraffinen bestehen, entsprächen Dichte und Viskosität näherungsweise denen von Eicosan  $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ . Entsprechend ergibt sich eine molare Masse  $M_{\text{C}_{20}\text{H}_{42}}$  von

$$M_{\text{C}_{20}\text{H}_{42}} = 20 \cdot M_{\text{C}} + 42 \cdot M_{\text{H}} \quad (\text{A.1})$$

$$M_{\text{C}_{20}\text{H}_{42}} = 20 \cdot 12,011 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 42 \cdot 1,008 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 282,56 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad (\text{A.2})$$

Die resultierende molare Teilchendichte ist dann

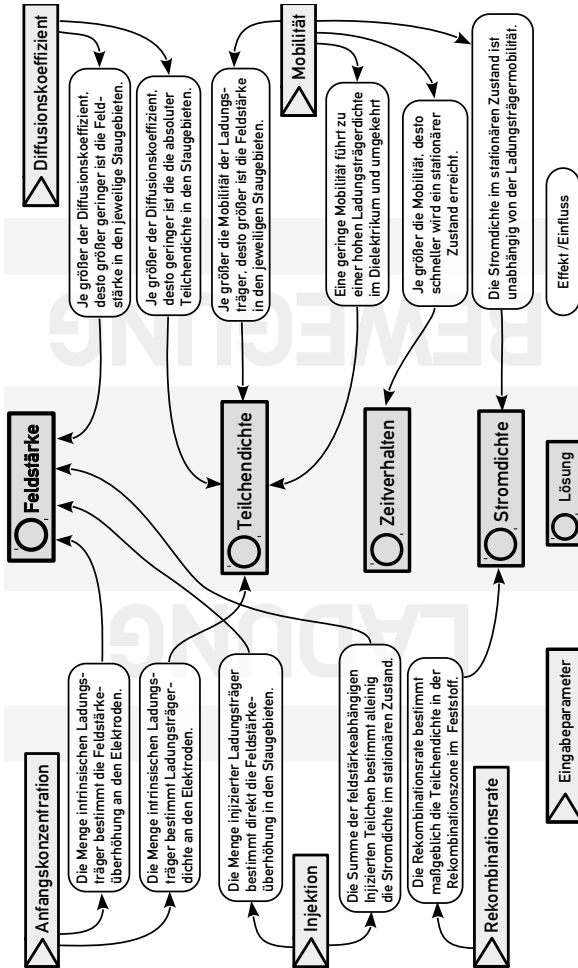
$$n_{\text{C}_{20}\text{H}_{42}} = \frac{\rho}{M_{\text{C}_{20}\text{H}_{42}}} = \frac{7,9 \cdot 10^5 \text{g}/\text{m}^3}{282,56 \text{g}/\text{mol}} = 2,8 \cdot 10^3 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \quad (\text{A.3})$$

Für  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$  ergibt das eine absolute Teilchendichte von ca.

$$n_{\text{C}_{20}\text{H}_{42}} = 2,8 \cdot 10^3 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^3} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\mu\text{mol}} = 1,7 \cdot 10^{27} \frac{1}{\text{m}^3} \quad (\text{A.4})$$

Gemäß der PNP-Modellierung wurden in Staubegebieten nur maximale Teilchendichten in der Größenordnung  $n_{\text{max}} = 10^{20} \frac{1}{\text{m}^3}$  festgestellt. Es kann somit geschlussfolgert werden, dass das Verhältnis von maximal berechneter Teilchendichte zur Grundgesamtheit der Teilchen der Flüssigkeit groß genug ist, um den Anforderungen einer *verdünnten Flüssigkeit* zu genügen.

## A.2 Organigramm der Abhängigkeiten der Eingabegrößen auf die Lösung der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung



# Lebenslauf

Karsten Backhaus  
geb. Krätzschar  
\* 2. März 1981  
verheiratet  
ein Kind

- seit 2008 Technische Universität Dresden, IEEH,  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Öl-Papier-Isolierung bei hoher Gleichspannungsbelastung  
Synthesegasproduktion mittels HV-Entladungen  
Elektro-Impuls-Verfahren zur Bearbeitung fester Gesteine  
Isoliersysteme für rotierende Maschinen
- 2007 - 2008 Leichtbau Zentrum Sachsen  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Projektkoordination mit Forschungspartnern  
Entwicklung von Triebwerkskomponenten aus  
hochtemperaturbeständigen Faserverbundwerkstoffen
- 2001 - 2007 Technische Universität Dresden, Studium Maschinenbau, Diplom,  
Vertiefung Leichtbau und Kunststofftechnik
- 2000 - 2001 Stadtjugendreferat Riesa, Offenes Jugendhaus, Zivildienst
- 1997 - 1998 Teays-Valley-Highschool, Ashville, Ohio, USA, Diploma
- 1992 - 2000 Werner-Heisenberg-Gymnasium Riesa, Abitur
- 2015 John Neal Award by European Electric Manufactures (EEIM)
- 2005 ThyssenKrupp Technologies Engineering Competition 2. Platz

## Thesen zur Doktorarbeit

# Das dielektrischen Verhalten der Öl-Papier-Isolierung bei Belastung mit hoher Gleichspannung

1. Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) ist wegen der ausbleibenden Blindleistungsanteile die Technologie der Wahl zum Transport elektrischer Energie über große Distanzen.
2. Teilkomponenten einer jeden HGÜ-Anlage sind die Leistungstransformatoren, welche in der Regel eine Öl-Papier-Isolierung besitzen.
3. Die höchste Beanspruchung erfährt die Transformatoren-Isolierung innerhalb der Werksprüfung. Sie muss sowohl den Anforderung aus Wechsel-, Impuls- und Gleichspannungsbelastung genügen.
4. Da für Wechsel- und Impulsspannungsbelastung jahrzehntelange, weltweite Erfahrung bestehen, existieren sichere, optimierte Dimensionierungsvorschriften.
5. Für die Gleichspannungsbelastung der Öl-Papierisolierung besteht diese Erfahrung nicht in diesem Umfang. Entsprechend besitzen die aktuellen Dimensionierungsvorschriften aufgrund der begrenzten Erfahrung durch Grundlagenuntersuchungen und Betrieb entsprechendes Optimierungspotential.
6. Während sich in den letzten Jahren viele Forschungsarbeiten mit dielektrischen Leitfähigkeitsmessungen beschäftigen, soll das Durchschlagexperiment der eigentliche Hauptgegenstand der vorliegenden Arbeit sein.
7. Sowohl die eigenen Experimente an gekreuzten Zylindern als auch die Literaturbeispiele zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Messergebnissen und den Berechnungsergebnissen auf Basis der bestehenden resistiv-kapazitiven Materialmodelle bezüglich der berechneten Maximalfeldstärken bei Durchschlagspannung.
8. Als Ursache für die Unterschiede zwischen der konventionellen Berechnungsmethoden werden die physikalischen Leitfähigkeitsprozesse und die damit verbundene Bildung von Staugebieten hoher Ladungsträgerdichte gesehen, welche bisher nicht ausreichend berücksichtigt werden.

9. Isolieröl und isolierölgetränktes Papier genügen aufgrund der geringen Ladungsträgerdichte und der unterschiedlichen Polarität der Ladungsträger im Dielektrikum nicht dem Modell der Ohm'schen Leitfähigkeit.
10. Hinsichtlich der Leitfähigkeitsmechanismen ist in zwei Ladungsträgerarten zu unterscheiden. Zum einen kann das Isolieröl durch Dissoziationsvorgänge öleigene, sogenannte intrinsische Ladungsträger bereitstellen. Zum anderen werden Elektronen und Löcher durch die metallischen Elektroden feldstärkeabhängig injiziert.
11. Die intrinsischen Ladungsträger sind aufgrund der Oktett-Regel stabil und bilden mit andern Ölbestandteilen sogenannte Mizellen. Die kugelförmigen Gebilde haben einen Ladungsschwerpunkt im Inneren, den eine äußere isolierende Hülle umgibt. Sie können so stabil vor nichtisolierten, metallisch blanken Elektroden verweilen.
12. Die Ladungsträgerinjektion an den Elektroden erfolgt in Analogie zu Fowler-Nordheim. Die Ölmoleküle liefern dabei die notwendigen Akzeptanzniveaus und verstärken den Emissions- bzw. Injektionsprozess um ein Vielfaches gegenüber Vakuum.
13. Die Leitfähigkeit der Öl-Papier-Isolierung wird durch die Öl-Leitfähigkeit dominiert.
14. Die dielektrische Leitfähigkeit ist kein integraler Prozess, der sich mit einer Variable wie beispielsweise der spezifischen Leitfähigkeit beschreiben lässt. Es muss in die Einzelprozesse Generation, Transport und Rekombination für unterschiedliche Ladungsträgerspezies unterschieden werden.
15. Mit Hilfe der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung und dem eigenen Leitfähigkeitsmodell entsprechenden Randbedingungen lassen sich die drei unabhängigen, über die Feldstärke gekoppelten Leitfähigkeitsprozesse modellieren.
16. Einer Ladungsträgerspezies werden explizite Eigenschaften in Form von Mobilität, Diffusionskoeffizient und Rekombinationsverhalten zugewiesen.
17. Der Polarisationsstromanteil einer Ölisolierstrecke ergibt sich aus der Drift der intrinsischen Ladungsträger und der Anlagerung an der Öl-Metall-Grenzfläche.

18. Der stationäre Strom nach Abklingen aller Polarisationsprozesse bestimmt sich aus dem Injektionsverhalten der Elektroden, dem möglichen Dissoziationsverhalten der Ölmoleküle und dem Rekombinationsverhalten der Ladungsträger miteinander und mit der entsprechenden Gegenelektrode.
19. Das nichtlineare, spezifische Leitfähigkeitsverhalten des Isolieröls gegenüber der elektrischen Feldstärke mit einem Minimum bei circa  $3 \text{ kV/mm}$  begründet sich in der Überlagerung zweier physikalischer Prozesse: Die Ladungsträgerinjektion nimmt stetig exponentiell zu und dominiert damit bei hohen Feldstärken. Bei geringer mittlerer Feldstärke heben die intrinsischen Ladungsträger lokal die Feldstärke an den Elektroden an und verstärken den Injektionsprozess.
20. Die Ursache für nichtlineare Strom-Zeit-Maxima nach dem Polaritätswechsel ist die verzögerte Drift der intrinsischen Ladungsträger von Elektrode zu Gegenelektrode und das Treffen zweier Ladungsträgerfronten
21. Auf Basis der Ergebnisse von kombinierter Feldstärke- und Strom-Zeit-Messung lassen sich Leitfähigkeitseigenschaften der Ladungsträger und die sich einstellende Feldstärkeverteilung in Einklang bringen.
22. Die Feldstärkeverteilung innerhalb einer Isolierung wird nur bedingt durch die Geometrie der Elektroden bestimmt. Die gegenüber den Elektroden entgegengesetzt geladenen intrinsischen Ladungsträger (hetero charges) heben die lokale Feldstärke an und erzeugen eine sogenannte ‚Innere Inhomogenität‘.
23. Die injizierten Ladungsträger (homo charges) senken durch die gleiche Polarität die Feldstärke an der injizierenden Elektrode.
24. Eine Entladung im Isolieröl setzt in einem Gebiet höchster Beanspruchung und damit meist höchster Feldstärke ein. Die Gebiete höchster Feldstärke entsprechen den Stauegebieten der Ladungsträger.
25. Das Stauegebiet der injizierten Ladungsträger ist die Öl-Papier-Grenzfläche wegen des Mobilitätsunterschiedes der beiden Isolierstoffe.
26. Eine geringe Ladungsträgermobilität innerhalb eines Isolierstoffs hat eine hohe Ladungsträgerdichte zur Folge und umgekehrt.

27. Im Isolierpapier bildet sich aufgrund der hohen Ladungsträgerdichte eine Rekombinationszone, innerhalb derer sich die zwei Fronten aus Elektronen und Löchern gegenüberstehen. Sie trägt einen Großteil der Prüfspannung.
28. Mit Hilfe der Poisson-Nernst-Planck-Gleichung können bisher qualitativ sowohl das nichtlineare Leitfähigkeitsverhalten als auch das Durchschlagverhalten auf Basis der Berechnung einer lokalen Höchstfeldstärke richtig berechnet werden.
29. Obwohl Leitfähigkeit und Durchschlagfestigkeit zwei unterschiedlichen Eigenschaften eines Isolierstoffs sind, zeigt die vorliegende Arbeit, wie die Leitfähigkeitsprozesse die Feldstärkeverteilung innerhalb der Öl-Papier-Isolierung beeinflussen und damit das Durchschlagverhalten beeinflussen.

Dresden, 04.01.2016

Karsten Backhaus