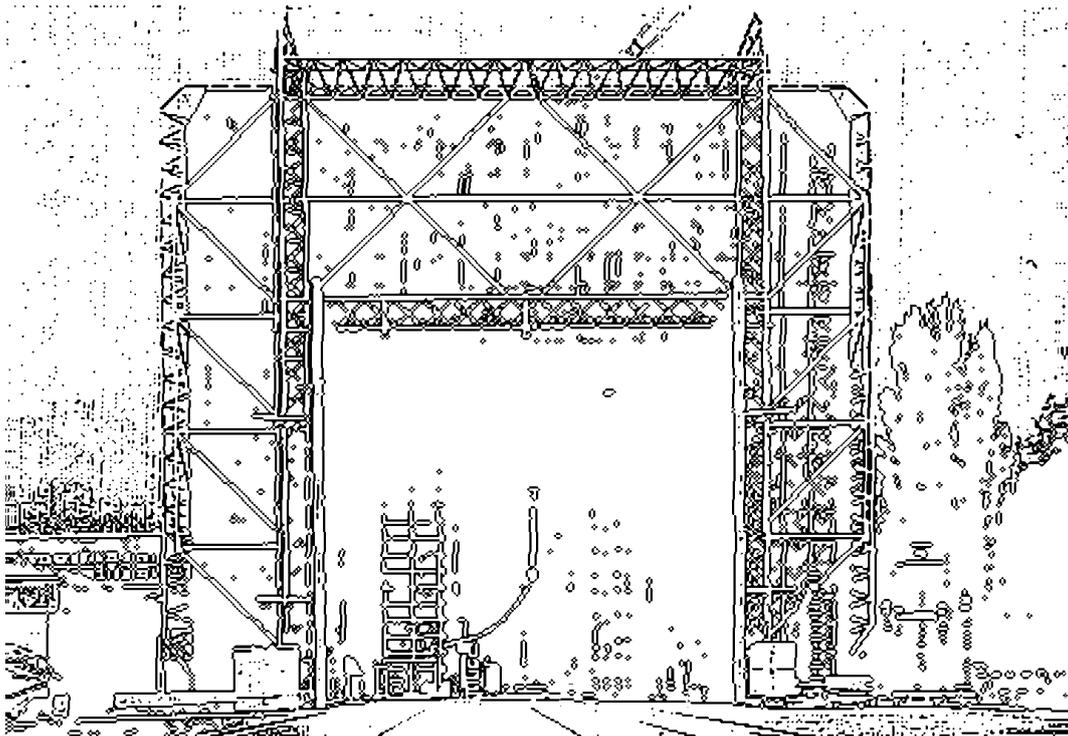


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

MASTERARBEIT



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK
UND SYSTEMMANAGEMENT

**Numerische Feldsimulation
des dielektrischen Verhaltens von
Öl-Board-Isolieranordnungen unter hohen
Gleich- und Wechselspannungen**

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Bernhard Jocham, BSc

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian

Begutachter:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz

Graz, im April 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 17.4.2013



Bernhard Jocham

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

April 17th, 2013



Bernhard Jocham

Kurzfassung

Transformatoren spielen in der Energieübertragung eine große und wichtige Rolle. Als Isolation wird hier meist das Öl-Papier Isolationssystem eingesetzt. Um Ausfälle zu vermeiden ist es wichtig das Verhalten der einzelnen Isolationen zu untersuchen. Vor allem die Messung der elektrischen Eigenschaften wie Dielektrizitätszahl und Leitfähigkeit und dessen Veränderung durch z.B. Alterung sind wichtige Parameter.

Das Öl-Papier Isolationssystem besteht aus Ölstrecken, welche durch Boardbarrieren unterbrochen werden. Es handelt sich somit um ein Mischdielektrikum. Diese Isolation wird in Transformatoren nur mit Wechselspannung beansprucht. Anders ist der Fall bei HGÜ-Stromrichtertransformatoren, bei denen sowohl Wechsel- als auch Gleichfelder auftreten.

Bei reiner Wechselbelastung teilen sich die Felder nach den Dielektrizitätszahlen auf. Diese unterliegen weitgehend keinem Alterungseinfluss und bleiben daher über die gesamte Lebensdauer praktisch konstant.

Wird ein Öl-Papier Isolationssystem mit Gleichspannung belastet, stellt sich eine vollkommen andere Feldverteilung ein. Es kommt zur Bildung von Raumladungen und zur Aufteilung des Feldes nach den Leitfähigkeiten.

Weiters kommt hinzu, dass sich mit deren Einflussparametern die Leitfähigkeiten stark verändern können, was zu einer Veränderung der Feldverteilungen führt. Beim Einschalten der Gleichspannung tritt ein transientes Verhalten ein. Die Leitfähigkeit ist zu Beginn hoch und sinkt erst langsam ab. Dies kann bis zum stationären Verhalten je nach Leitfähigkeit der Materialien Wochen oder sogar Monate dauern.

Es wurden dazu Feldsimulationen mit verschiedene Anordnungen bei Gleich- und Wechselspannung durchgeführt, sowie das transiente und stationäre Verhalten eines Öl-Board Isolationssystems betrachtet.

Abstract

Transformers are important elements in energy transmission. Oil-paper insulation systems are mostly used. To prevent insulation failures it is important to study the properties of the individual insulations. Particularly the measurement of the electric properties like permittivity and conductivity and its change because of aging are important.

The oil-paper insulation system consists of oil-gaps, which are interrupted by boardbarriers, so its a mixed dielectrica. In transformers this insulation system is stressed with AC. In case of HVDC-transformers the insulation is stressed with overlapped AC and DC.

If there is only AC stress, the field distribution depends on the permittivities. The aging has no major influence on the permittivities, so it will be practical constant over its lifetime.

In case of DC stress, the fiel distribution is different. Space-charge zones were generated and the field distribution depends on the conductivities. Because of its factors of influence, the conductivity changes, so the field distribution is also modified. If the voltage is switched on, there is also a transient component. In the first moment, the conductivity is quite high and decreases. This could take weeks or month to reach steady-state.

Field distributions with various configuration were simulated and also the transient and stationary behavior were considered.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Dielektrische Messungen	1
1.1.1	Verlustfaktor- und Kapazitätsmessung	2
1.1.2	Isolationswiderstands- und Leitfähigkeitsmessung	5
1.1.3	Dielektrische Systemantwort	6
1.2	Teilentladungsmessung	8
1.2.1	Äußere Teilentladungen	8
1.2.2	Innere Teilentladungen	9
1.3	Durchschlagsmessungen	10
1.4	Beanspruchung von Dielektrika	11
1.4.1	Beanspruchung mit Gleichspannung	11
1.4.2	Beanspruchung mit Wechselspannung	11
1.4.3	Beanspruchung durch Mischfelder	13
1.4.4	Beanspruchung von Mischdielektrika	13
2	Feldberechnungen	15
2.1	Grafische Feldberechnung	15
2.2	Analytische Feldberechnung	16
2.2.1	Kontinuitäts-/Potentialgleichung	17
2.2.2	Methode der Konformen Abbildung	18
2.2.3	Ersatzladungsverfahren	19
2.3	Ähnlichkeitsbeziehung	20
2.4	Numerische Feldberechnung	21
2.4.1	Ersatzladungsverfahren	21
2.4.2	Finite-Differenzen-Methode	23
2.4.3	Finite-Elemente-Methode	23
3	Geschichtete Dielektrika	27
3.1	Quer geschichtetes Dielektrikum	28
3.2	Längs geschichtetes Dielektrikum	29
3.3	Schräg geschichtetes Dielektrikum	30
4	Öl-Board-Isolieranordnung	32
4.1	Öl/Papier Isolationssystem	32
4.1.1	Aufbau einer Öl-Board-Isolieranordnung	32

4.2	Isolierflüssigkeiten	33
4.3	Mineralöl	35
4.3.1	Herstellung	36
4.3.2	Aufbereitung	36
4.3.3	Alterung	36
4.3.4	Ölanalyse	38
4.4	Transformerboard	38
4.4.1	Herstellung	39
4.4.2	Trocknung	39
4.4.3	Imprägnierung	41
4.4.4	Alterung	41
4.4.5	Zustandsbewertung	41
5	Finite-Elemente-Simulationen	43
5.1	Programm-Beschreibung	43
5.2	Parameter/Einstellungen	43
5.3	Wirkung von Schirmeinrichtungen	44
5.3.1	Schirmtori	45
5.3.2	Schirmelektrode im rotationssymmetrischen C-förmigen Profil	47
5.4	Öl-Board-Isoliersystem	48
5.4.1	Stationäres Verhalten	49
5.4.2	Transientes Verhalten	51
5.5	Spitze-Platte Anordnung	53
5.6	Öl-Board-Gleitanordnung	54
5.6.1	Öl-Board-Gleitanordnung, Detailansicht	57
5.7	Kessel zur Leitfähigkeitsuntersuchung	59
6	Resümee	63
6.1	Wirkung von Schirmeinrichtungen	63
6.2	Öl-Board-Isoliersystem	63
6.3	Spitze-Platte Anordnung	64
6.4	Öl-Board-Gleitanordnung	64
6.5	Kessel zur Leitfähigkeitsuntersuchung	64
7	Zusammenfassung	65
8	Abkürzungs-/Symbolverzeichnis	67
	Literaturverzeichnis	70

1 Einleitung

Transformatoren sind wichtige Elemente in der Energieübertragung. Ein Ausfall ist meist mit großen wirtschaftlichen Schaden verbunden. Es ist daher wichtig die Belastungsgrenzen und den Zustand der Transformatoren zu kennen um rechtzeitig einen bevorstehenden Ausfall zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu treffen. Um den Zustand der Isolation in Transformatoren zu ermitteln stehen dielektrische Messungen wie Verlustfaktormessung und Kapazitätsmessung zur Verfügung. Weiters wird die Isolationsfestigkeit mittels Prüfung von Modellen und Öl-Papier Anordnungen bestimmt. Auf die einzelnen Methoden und die Unterschiede zwischen Gleich- und Wechselspannung wird in weiterer Folge genauer eingegangen.

Für Messungen stehen verschiedene Prüfkessel zur Verfügung. Dafür ist das Bekanntsein der Feldverteilung im Messbereich wichtig. Es wurde für Leitfähigkeitsmessungen ein neuer Prüfkessel konstruiert (siehe [15],[16]), dessen Verhalten untersucht werden soll. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung verschiedener Prüfkessel und der Einfluss von Schirmeinrichtungen auf die Feldverteilung. Weiters sollen die Unterschiede bei Wechsel- und Gleichfeldbelastung bei geschichteten Dielektrika analysiert werden.

1.1 Dielektrische Messungen

Dielektrische Messungen sind zerstörungsfreie Messungen zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften von Isolieranordnungen. Hierbei sind vor allem Dielektrizitätszahl ε_r , Verlustfaktor $\tan\delta$, Verlustwinkel δ und Verlustzahl ε_r'' von Interesse [7].

Das Verhalten von idealen Dielektrika im elektrischen Feld wird ausschließlich durch dessen Dielektrizitätszahl ε bestimmt, welche sich aus der Dielektrizitätskonstante ε_0 und der Materialspezifischen relativen Dielektrizitätszahl ε_r wie folgt ergibt:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r. \tag{1.1}$$

In realen Dielektrika treten allerdings immer Verluste auf. Die Ursache dafür sind:

- Leitungsverluste
- Polarisationsverluste

- Ionisationsverluste.

Diese führen zu elektrischen Wirkungen, die mittels zerstörungsfreier Hochspannungsprüfung ausgewertet werden können, wie z.B. der Leitungsstrom bei Gleichspannung oder der Verlustfaktor bei Wechselspannung. Bei der Messung zeigen sich Abhängigkeiten der Messgrößen von äußeren Bedingungen wie Temperatur, Messzeit sowie auch der Messspannung. Weiters haben die Eigenschaften des Dielektrikums wie Stoffzusammensetzung, Struktur, Reinheit und Vorgeschichte Einfluss auf die Messgröße [8].

1.1.1 Verlustfaktor- und Kapazitätsmessung

Zur Bestimmung von Verlustfaktor und Kapazitäten wird die Messbrücke nach Schering eingesetzt. Der Vorteil dieser Messmethode liegt in der Beanspruchung des Prüflings (C_x, R_x) mit Hochspannung wohin gehend die Abgleichelemente (R_3, R_4, C_4) an Niederspannung liegen. Dadurch ist eine realitätsnahe Beanspruchung des Prüflings und gefahrloses abgleichen der Brücke gegeben.

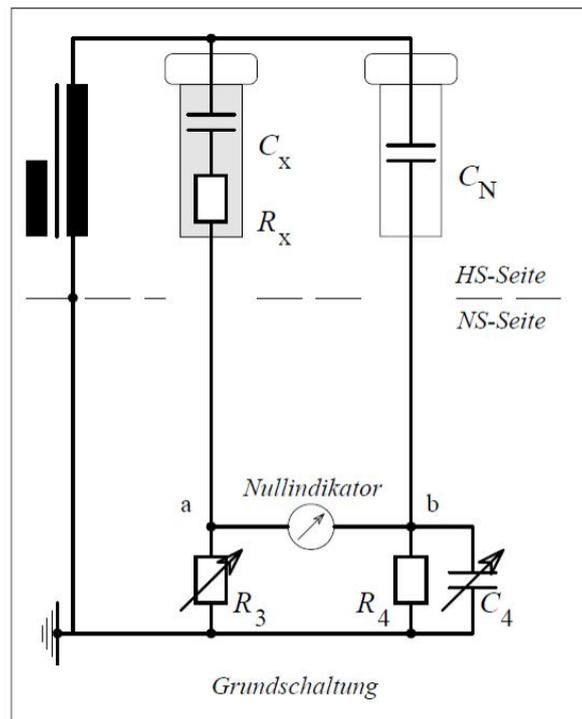


Abbildung 1.1: Grundschialtung der Schering Messbrücke [6]

Die Kapazität des Kondensators C_N muss möglichst genau bekannt und verlustarm sein. Es werden daher hauptsächlich gasisolierte Hochspannungskondensatoren eingesetzt. Zur

Bestimmung des Verlustfaktors bzw. der Kapazität muss die Brücke abgeglichen werden. Dazu muss die Abgleichbedingung erfüllt werden.

$$\underline{Z}_X/\underline{Z}_3 = \underline{Z}_N/\underline{Z}_4 \quad (1.2)$$

$$\underline{Z}_X/\underline{Z}_3 = \underline{Z}_N\underline{Y}_4 \quad (1.3)$$

$$\frac{R_X + 1/j\omega C_X}{R_3} = \frac{1}{j\omega C_N} \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) \quad (1.4)$$

Aus Real- und Imaginärteil ergeben sich die Werte für den Widerstand, Kapazität und $\tan\delta$ des Prüflings zu [6]

$$R_X = R_3 C_4 / C_N \quad (1.5)$$

$$C_X = C_N R_4 / R_3 \quad (1.6)$$

$$\tan\delta_X = \omega C_X R_X = \omega C_4 R_4. \quad (1.7)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Eigenschaften des Prüflings bieten computerbasierende Messsysteme. Dabei wird die Grundschiwingung des Messzweiges mit der eines Vergleichszweiges verglichen. Aus der Phasenverschiebung δ_X kann der Verlustfaktor $\tan\delta_X$ bestimmt werden (Abbildung 1.2). Mit dieser Messmethode können hohe Genauigkeiten und vor allem kurze Messzeiten realisiert werden, wodurch die Überwachung der dielektrischen Eigenschaften in Echtzeit ermöglicht wird. Mit dieser Methode können auch weitere Größen errechnet werden: z.B. Kapazitäten, Reihen- oder Parallelersatzwiderstände, Verlustfaktor, Leistungsfaktor, Verlustleistung, Spannung und Frequenz [6].

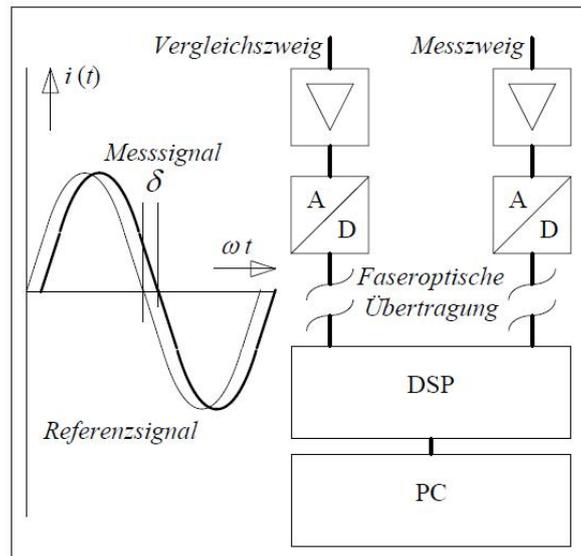


Abbildung 1.2: Computerbasierte Messung des Verlustfaktors aus der Phasenverschiebung der Ströme in Mess- und Vergleichszweig [6]

Durch die Bestimmung von Resonanzfrequenz und Dämpfung eines Schwingkreises können ebenfalls die Kapazität und der Verlustfaktor bestimmt werden. Bei dieser Methode wird eine Kapazität schwingend entladen und daraus Resonanzfrequenz und Dämpfung ermittelt. Diese Methode kann auch bei großen Kapazitäten wie Kabeln angewendet werden. Allerdings sind durch weitere in die Messung eingehende verlustbehaftete Elemente die Ergebnisse nicht so genau wie bei der Brückenschaltung.

Zur Messung der Dielektrizitätszahl ϵ_r werden Anordnungen der Form wie in Abbildung 1.3 eingesetzt. Die Dielektrizitätszahl ϵ_r kann direkt aus dem Verhältnis C_X/C_0 ermittelt werden (Gleichung 1.8).

$$\epsilon_r = C_X/C_0 \tag{1.8}$$

Dabei ist C_X die Kapazität der Anordnung mit dem zu prüfenden Isolierstoff und C_0 die Kapazität der Anordnung mit Luft oder besser Vakuum als Dielektrikum. Bei der Messung ist darauf zu achten, dass die Feldstärke klein gehalten wird. Weiters ist darauf zu achten den Einfluss des Randfeldes auszuschließen was durch die Anordnung in Abbildung 1.3 durch das Anbringen von Ringelektroden geschieht. Dadurch entsteht ein nahezu idealer Kondensator.

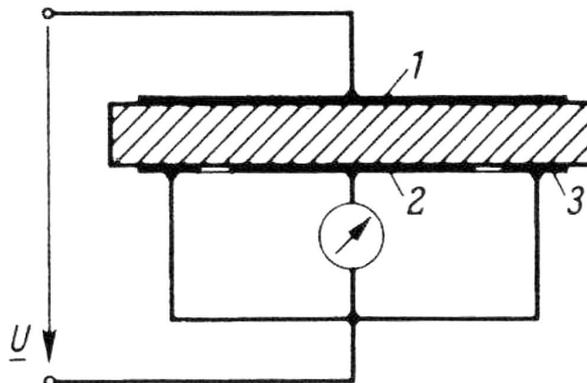


Abbildung 1.3: Prüfanordnung mit Plattenelektroden 1 und 2 und Ringelektrode 3 [7]

1.1.2 Isolationswiderstands- und Leitfähigkeitsmessung

Bei der Messung des Isolationswiderstandes R_{IS} zwischen zwei Elektroden kommt es unweigerlich zur Überlagerung von Durchgangs- (R_D) und Oberflächenwiderstand (R_O).

$$R_{IS} = R_D + R_O \quad (1.9)$$

Der Durchgangswiderstand ist von mehreren Parametern abhängig wie Beanspruchungsdauer, Temperatur, Verschmutzung, Feldstärke und der Feuchtigkeit. Beim Oberflächenwiderstand spielt hauptsächlich die Oberflächenbeschaffenheit wie Fremdschichten und Feuchtigkeit eine Rolle. Durch die Messung des Isolationswiderstandes eines Gerätes können Aussagen über die Isolierung getroffen werden. Trendanalysen geben Aufschluss über Veränderungen in der Isolierung die z.B. durch Alterung, Feuchtigkeit oder Verschmutzung des Isolieröls hervorgerufen werden bzw. an der Oberfläche wie z.B. die Hydrophobie unterschiedlich verschmutzter, gealterter oder behandelter Oberflächen [6].

Die Messung des Isolationswiderstandes erfolgt mittels Schutzringanordnung (Abbildung 1.4). Einerseits um Durchgangs- und Oberflächenwiderstand unabhängig voneinander zu bestimmen. Andererseits erfordert die Messungen wie bei der Messung der Dielektrizitätszahl eine definierte Feldgeometrie. Bei der Messung des Durchgangswiderstandes werden die Oberflächenströme über die Ringelektroden abgeleitet und vom Messgerät vorbeigeleitet, sodass dieser Strom nicht in die Messung eingeht. Ähnliches gilt für die Messung des Oberflächenwiderstandes. Hierbei geht nur der Stromfluss zwischen Messelektrode und Ringelektrode in die Messung ein. Aus dem Durchgangswiderstand R_D kann die Leitfähigkeit κ bzw. der spezifische Widerstand ρ berechnet werden.

$$R_D = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{d}{A} \quad (1.10)$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R_D} \cdot \frac{d}{A} \quad (1.11)$$

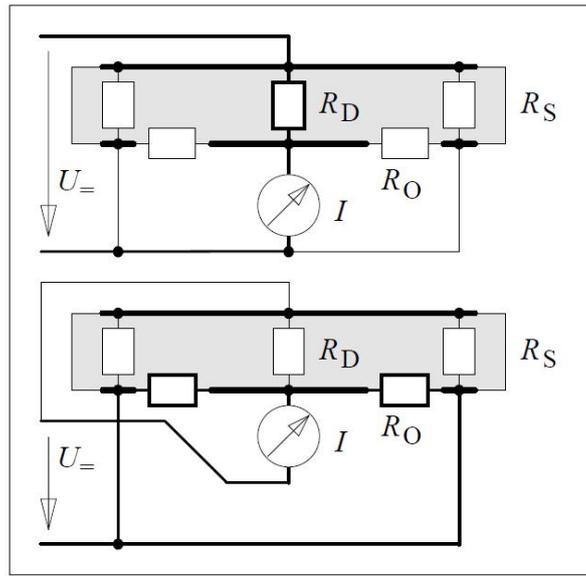


Abbildung 1.4: Messung von Durchgangswiderstand (oben) und Oberflächenwiderstand (unten) in einer Schutzringanordnung [6]

Durch die Beeinflussung der Messung durch Polarisationserscheinungen bei festen Isolierstoffen hängt die gemessene Leitfähigkeit nicht nur von der Gleichstromleitfähigkeit ab. Polarisationserscheinungen klingen nur relativ langsam ab, sodass lange Messzeiten erforderlich sind um den stationären Wert zu messen. Auch bei flüssigen Isolierstoffen kommt es zu Beeinflussungen. Hier allerdings hauptsächlich durch den Ionendrift, der zu einer Abnahme der Leitfähigkeit führt. Daher sind spezielle Vorschriften zur Bestimmung der Leitfähigkeit einzuhalten [6].

1.1.3 Dielektrische Systemantwort

Zur Messung der dielektrischen Systemantwort wird wiederum eine Schutzringanordnung verwendet. Diese stellt sicher, dass nur der Strom in die Messung eingeht, welcher auch durch das Material fließt. Die Messung kann sowohl im Frequenz als auch im Zeitbereich durchgeführt werden. Unter der Voraussetzung linearer Eigenschaften des Isolierstoffes können beide Messungen ineinander umgerechnet werden. Sie sind also zueinander äquivalent. Mittels dielektrischer Systemantwort kann ein vollständiges Ersatzschaltbild

aufgestellt werden und somit eine bessere Beschreibung der elektrischen Eigenschaften als nur durch Kapazität, Verlustfaktor und Leitfähigkeit erreicht werden.

Messung im Zeitbereich (PDC-Analyse)

Zur Durchführung der Messungen im Zeitbereich wird eine Gleichspannung sprunghaft an den zu messenden Isolierstoff angelegt. Es folgt ein Stromfluss der im ersten Moment aus einem kapazitiven Ladestromimpuls besteht. In weiterer Folge wird dieser Polarisationsstrom $i_P(t)$ durch die Materialeigenschaften bestimmt. Er klingt gemäß den verschiedenen Polarisationsmechanismen ab und strebt einem Endwert zu. Die Polarisationsmechanismen können als Parallelschaltung von RC-Gliedern dargestellt werden (Abbildung 1.5). Dabei verursacht die erste Kapazität im Ersatzschaltbild den ersten Stromimpuls und die weiteren RC-Glieder stellen die verschiedenen Polarisationsmechanismen dar.

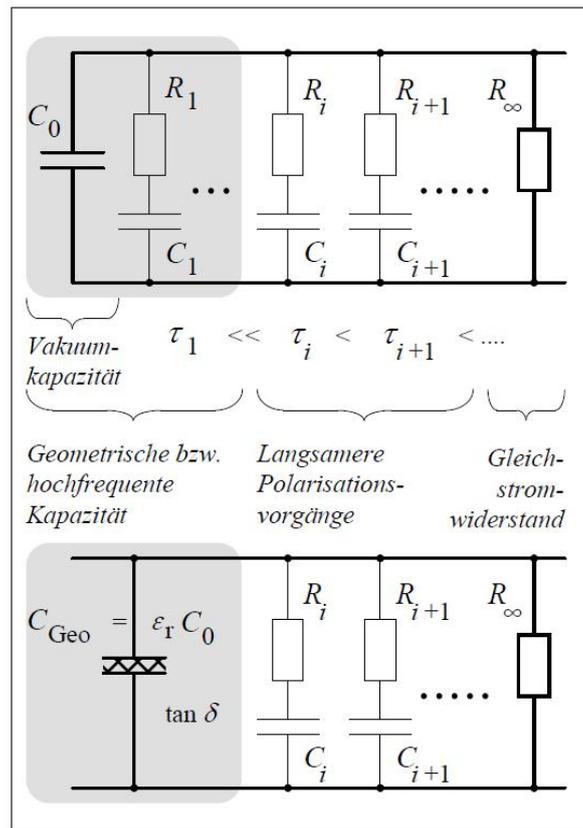


Abbildung 1.5: Polarisationsersatzschaltbild in allgemeiner (oben) und vereinfachter Form (unten) [6]

Nach dem Abschalten der Spannung wird der Prüfling kurzgeschlossen. Es beginnt wiederum ein Strom, der Depolarisationsstrom $i_d(t)$ zu fließen. Dieser Strom entsteht durch die im Polarisationsvorgang gespeicherte Energie. Diese entspricht im Ersatzschaltbild

der Ladung der Kapazitäten. Durch das Kurzschließen wird der Isolationswiderstand überbrückt, sodass diese Information nicht aus dem Depolarisationsstrom erhalten werden kann, wobei alle anderen Informationen hingegen vorhanden sind.

Messung im Frequenzbereich (FDS-Analyse)

Bei der FDS-Analyse wird eine Wechselspannung an den Prüfling gelegt und dabei die Impedanz gemessen. Für die Messung muss der eingeschwungene Zustand erreicht sein. Es wird bei verschiedenen Frequenzen gemessen und daraus die Frequenzabhängigkeit der komplexen Dielektrizitätszahl $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$, der Kapazität C sowie des $\tan\delta$ berechnet.

1.2 Teilentladungsmessung

Teilentladungen entstehen durch unvollständige Durchschläge einer Isolieranordnung. Dazu steigt die Feldstärke in einem Teilbereich der Isolierung über die Durchschlagspannung an, sodass dieser durchschlägt. Sind die Bedingungen für eine stationäre Entladung nicht erfüllt, erlischt der Lichtbogen und es kommt zu einem kurzem Entladungsimpuls. Dadurch wird die durchschlagene Teilkapazität entladen. In weiterer Folge baut sich das elektrische Feld wieder auf und es kommt zum nächsten Durchschlag. Es entstehen impulsförmige Teilentladungen, wobei zwischen äußeren und inneren Teilentladungen unterschieden wird.

1.2.1 Äußere Teilentladungen

Äußere Teilentladungen entstehen in stark inhomogenen Feldern, z.B. einer Spitze-Platte Anordnung (Abbildung 1.6). Aufgrund der hohen Feldstärke an der Spitze wird die Durchschlagfeldstärke in einem räumlich begrenzten Bereich um die Spitze überschritten. Es kommt zur Stoßionisation. Es entstehen durch Elektronenlawinen und Fotoionisation unvollkommene Durchschlagkanäle. Die Zündung der Entladung erfolgt bei Wechselspannung im Nulldurchgang (Abbildung 1.7). Äußere Teilentladungen haben vor allem bei Freileitungen große Bedeutung. Sie erzeugen Verluste, die so genannten Koronaverluste sowie Funkstörungen. Gleitentladungen treten nicht nur in Gasen sondern auch bei Grenzschichten zwischen flüssigen bzw. flüssigen und festen Stoffen auf und können zur Schwächung des Isolationsvermögens bis hin zum vollkommenen Durchschlag führen.

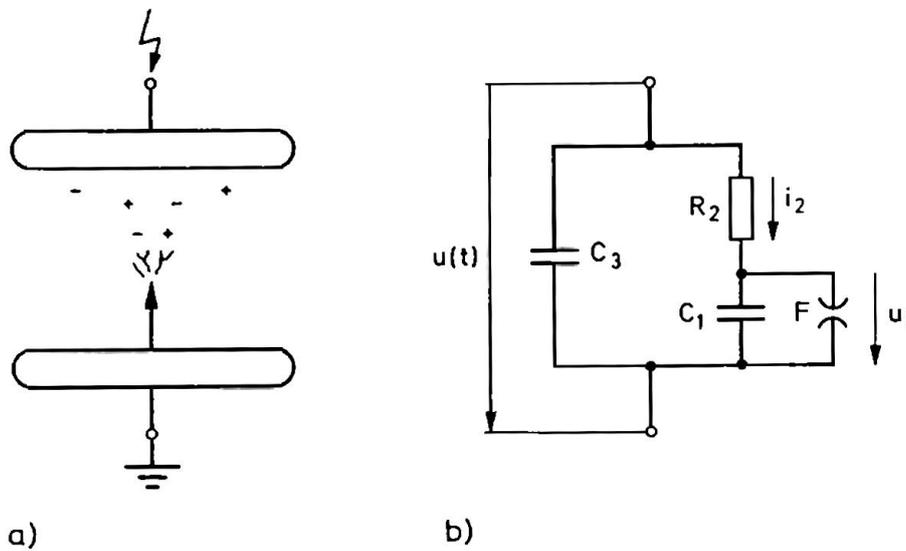


Abbildung 1.6: Anordnung mit äußeren Teilentladungen und Ersatzschaltbild a)Anordnung Spitze-Platte, b) Ersatzschaltbild [8]

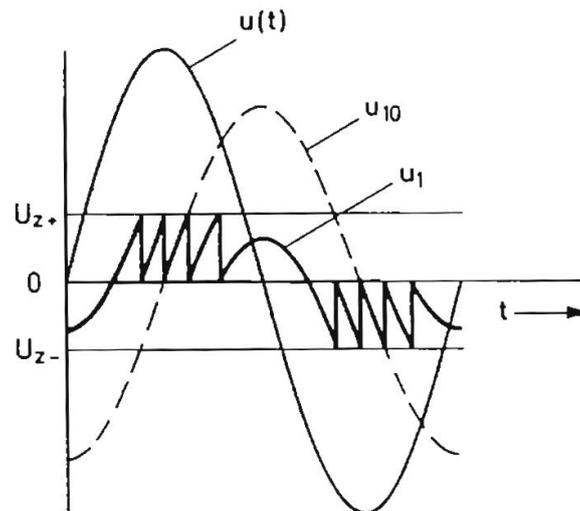


Abbildung 1.7: Spannungsverläufe im Ersatzschaltbild für impulsförmige äußere Teilentladungen [8]

1.2.2 Innere Teilentladungen

Innere Teilentladungen entstehen durch Fehlstellen in einer Isolierung die zu lokalen Feldüberhöhungen führen wie z.B. Hohlräume oder leitende Partikel. Erreicht die an der Fehlstelle anliegende Spannung die Zündspannung, so wird die Fehlstelle durchschlagen. Durch die wiederkehrenden Entladungen wie sie bei Wechselspannung auftreten, wird

das Dielektrikum geschwächt. Dies kann bis zum endgültigen Durchschlag und somit zur Zerstörung der Isolierung führen.

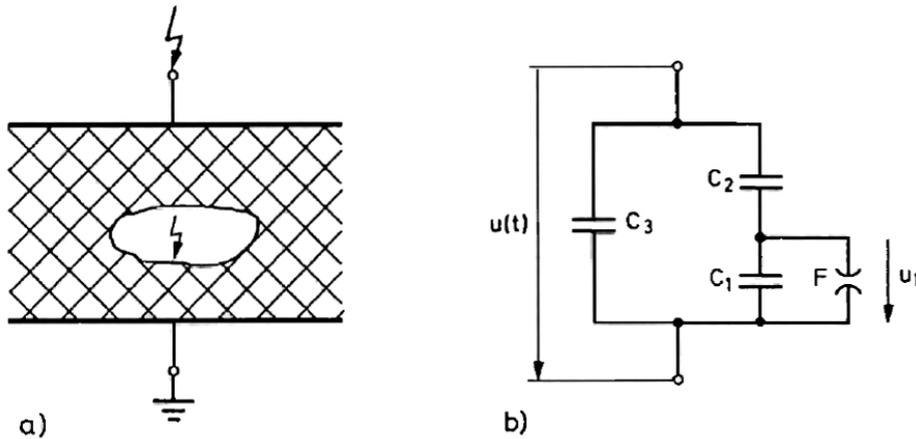


Abbildung 1.8: Anordnung mit inneren Teilentladungen und Ersatzschaltbild a) Prüfling mit Hohlraum, b) Ersatzschaltbild [8]

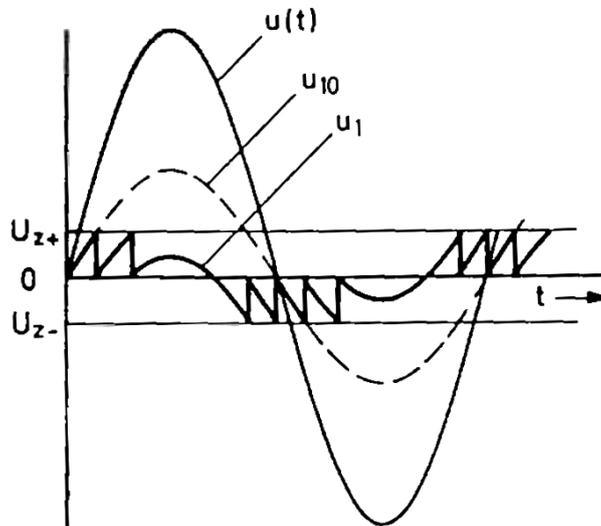


Abbildung 1.9: Zugehörige Spannungsverläufe im Ersatzschaltbild für impulsförmige innere Teilentladungen [8]

1.3 Durchschlagsmessungen

Durch äußere Bedingungen kann die Durchschlagsspannung stark beeinflusst werden (z.B. Elektrodengeometrie, Luftfeuchtigkeit, Spannungsform, usw.). Daher sind zur Ermitt-

lung der Durchschlagspannung die Messbedingungen in Normen festgelegt (z.B. VDE 0303). Die Durchschlagspannung eines Isolators ist deshalb bei verschiedenen Prüfbedingungen nicht vergleichbar und dient nur bei exakt gleichen Prüfbedingungen als Vergleichswert. Dadurch, dass die Durchschlagspannung so stark von äußeren Parametern abhängig ist, zählt sie nicht zu den Materialeigenschaften [7].

1.4 Beanspruchung von Dielektrika

1.4.1 Beanspruchung mit Gleichspannung

Hohe elektrische Gleichfelder treten beispielsweise in den Gleichspannungsversorgungen von Kopiergeräten und Röntgengeräten auf. Dabei vor allem in den Steuer- und Glättungskondensatoren sowie in den Sperrschichten der Gleichrichterelemente. Es handelt sich dabei meist nicht um eine reine Gleichspannung, sondern um eine Mischspannung. Die Gleichbeanspruchung der Steuerkondensatoren und Gleichrichter wird zusätzlich durch eine Wechselbeanspruchung überlagert. Glättungskondensatoren werden oft auch als Stoßkondensatoren eingesetzt und werden stoßartig entladen. Weiters wird der stationären Zustand meist nicht erreicht, da die Spannung nicht so lange anliegt um ein stationäres Strömungsfeld ausbilden zu können. Es ist auch eine gewisse Welligkeit der Spannung am Glättungskondensator vorhanden [6].

Ein weiterer Bereich bei dem es zu hohen Gleichspannung kommt, sind Hochspannungsgleichstromübertragungen (HGÜ). Die Isolationen werden hierbei mit Gleich- und Wechselspannung beansprucht. Bei HGÜ-Anlagen werden gleichspannungsseitig die Wechselrichterschaltung, die von Transformatoren gespeist werden, in Reihe geschaltet. Es treten auch transiente Beanspruchungen durch das Einschalten, Abschalten und Umpolen der Gleichspannung auf.

Durch die hohen Gleichspannungen treten besonders Probleme durch Verschmutzung und Benetzung der Isolieroberflächen auf.

1.4.2 Beanspruchung mit Wechselspannung

Um Energie im Drehstromnetz möglichst verlustarm zu Übertragen ist der Einsatz von hohen Wechselspannungen notwendig. Damit werden auch die Isolationen mit diesen hohen Spannungen belastet. In den Isolationen ergibt sich ein quasistationäres elektrisches Feld. Dieses liegt in Form eines dielektrischen Verschiebungsfeldes vor. Eine Feldverteilung ergibt sich nach den Dielektrizitätszahlen.

Für den Durchschlag einer Isolieranordnung ist die maximal auftretende Wechselspannung maßgebend. Bei Drehstrom ergibt sich damit eine Belastung zwischen den Leitern von $\hat{U}_{LL} = \sqrt{2} \cdot U_m$, zwischen Erde und Leiter $\hat{U}_{LE} = \sqrt{2} \cdot U_m / \sqrt{3}$. Dabei ist \hat{U}_{LL} die Scheitelspannung zwischen den Leitern bzw. \hat{U}_{LE} zwischen Erde und Leiter und U_m die höchste Spannung für das Betriebsmittel. Zusätzlich können auch betriebsfrequente Überspannungen durch z.B. plötzlichen Lastabwurf oder bei Erdschlüssen in Netzen mit nicht starr geerdetem Sternpunkt auftreten [6].

Gleichspannung		Wechselspannung			Stoßspannung			Schnell ansteigende Impulse
Dauerbeanspruchung	Schaltvorgänge Umpolungen	VLF 0,1 Hz	AC 50/ 60 Hz	AC 100/ 120 Hz 10 .. 500 Hz	Schaltstoßspannung	Blitzstoßspannung	Stoßentladungen	
Tage ... Monate	Stunden Änderungen in Minuten	T = 10 s	T = 20 ms	T = 10 ms	250/ 2500 µs	1,2/ 50 µs		Anstiegszeiten im ns-Bereich
stationär Strömungsfeld $J = \kappa E$ Widerstandsnetzwerk 		quasistationär (quasistationäres) dielektrisches Verschiebungsfeld $D = \epsilon E$ Netzwerk aus Kapazitäten 			elektromagnetische Welle System mit verteilten Parametern $\vec{E}, \vec{H} = Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ 			
Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) Röntgen Monitore Laser Ladeeinrichtungen Elektrofilter Beschichtung Beflockung	Drehstromübertragung 50(60) Hz Oberschwingungen Kabelprüfungen in 50/ 60 Hz Transformatorprüfungen Resonanzprüfungen (vor Ort)	"Innere" (Schalt-) Überspannungen Schaltstoßspannungsprüfungen	"Äußere" (Blitz-) Überspannungen Blitzstoßspannungsprüfungen	Abgeschnittene Blitzstoßspannung Entladung von Stoßkondensatoren: Medizintechnik Biotechnologie Fertigung Impuls laser Recycling	Fast Transients Pulsed Power Nuklearer elektromagnet. Impuls (NEMP) Teilentladungsimpulse (TE)			

Abbildung 1.10: Übersicht über wichtige technische Beanspruchungen in der Hochspannungstechnik [6]

1.4.3 Beanspruchung durch Mischfelder

Die Kombination von verschiedenen Beanspruchungen kommt in vielen Fällen vor. Wie die Überlagerung von Wechsel- und Gleichspannungen in HGÜ-Transformatoren.

Bei Spannungsänderung oder Umpolung der Gleichspannung kommt es zu einer Überlagerung mit einem quasistationären Feld. Der Übergangsvorgang kann dabei je nach Leitfähigkeit und Entladungszeit sehr lange dauern. Im Fall von geschichteten Dielektrika kann es zu hohen Belastungen kommen, die im stationären Zustand nicht auftreten (siehe Kapitel 1.4.4).

Im Falle von Gleichrichterschaltungen werden die Bauteile mit Gleich- und Wechselspannung belastet, z.B. der Glättungskondensator durch die Welligkeit der Ausgangsspannung. Durch Aufladevorgänge von Kondensatoren wird zunächst das Dielektrikum mit einer ansteigenden Spannung belastet, die je nach Speicherdauer von einem quasistationären Feld in ein stationäres Strömungsfeld übergeht. Wird der Kondensator entladen kommt es zu einer impulsförmigen Belastung, die meist in Form einer gedämpften Schwingung vorliegt.

Bei schnell veränderlichen Wanderwellen überlagern sich diese mit dem netzfrequenten quasistationären Zustand. Erhebliche Überspannungen können dadurch auftreten [6].

1.4.4 Beanspruchung von Mischdielektrika

Mischdielektrika werden z.B. für die Isolation in Transformatoren eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein Öl/Papier Isolationssystem (siehe Kapitel 4.1). Bei Betrieb in einem Drehstromnetz werden die Isolationen von Transformatoren durch Wechselspannung beansprucht. Dabei haben die Leitfähigkeiten der verschiedenen Isolationen praktisch keinen Einfluss auf die Feldverteilung. Das Feld teilt sich nach den Dielektrizitätszahlen auf. Das Verhältnis der Dielektrizitätszahlen zwischen Papier und Öl beträgt dabei ca. 2:1. Das hat zur Folge, dass das Öl doppelt so stark beansprucht wird als das Papier.

Wird die Isolieranordnung hingegen mit Gleichspannung beansprucht, so haben die Dielektrizitätszahlen praktisch keinen Einfluss auf die Feldverteilung. Das Feld stellt sich aufgrund der Leitfähigkeiten ein. Der Unterschied zwischen den Leitfähigkeiten von Papier und Öl kann aber sehr viel größer als der der Dielektrizitätszahlen sein. Je nach Alter und Feuchtigkeit kann das Verhältnis zwischen den Leitfähigkeiten von Öl und Papier zwischen 1:10 bis 1:10000 betragen. Dadurch wird im Fall von Gleichspannung das Papier im Verhältnis zu Wechselspannung sehr stark beansprucht [6],[10].

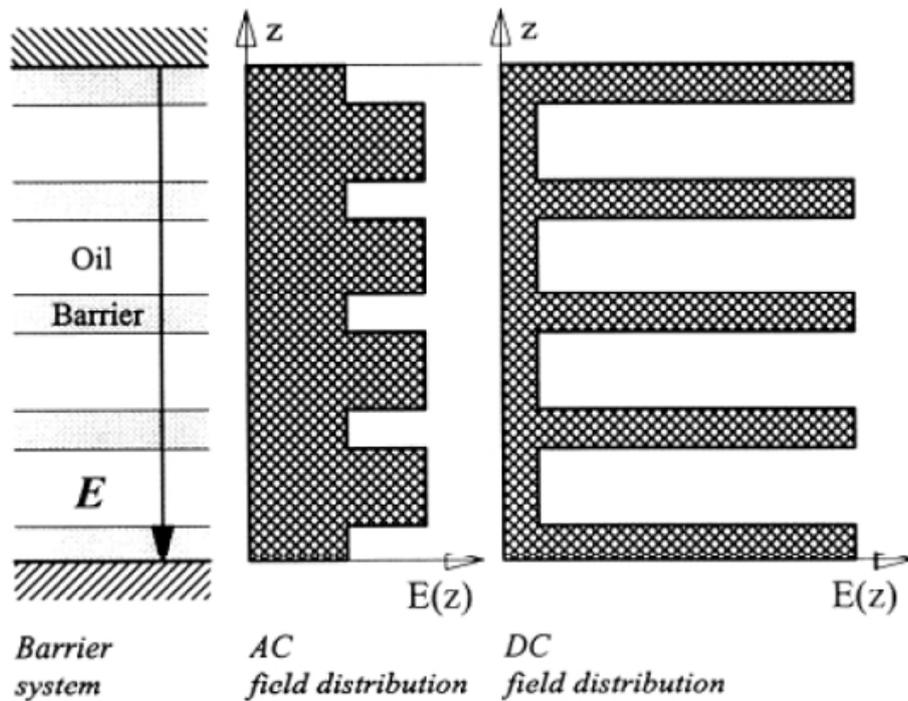


Abbildung 1.11: Beanspruchung eines Öl/Papier Isolationssystems mit Wechsel- (links) und Gleichspannung (rechts) Verhältnis: Dielektrizitätszahlen 2:1, Leitfähigkeiten 1:10, stationärer Zustand [11]

Bei Gleichspannung bilden sich, aufgrund der unterschiedlichen Leitfähigkeiten, im stationären Zustand Raumladungen in der Mischdielektrika. Kommt es nun zu einer Änderung der Spannung oder der Polarität können diese Raumladungen dazu führen, dass es zu einer hohen Belastung des Dielektrikums kommt. Im Falle einer Umpolung wird die Isolation kurzzeitig (abhängig von der Geschwindigkeit des Raumladungsabbaus) mit bis zu der doppelten Spannung belastet. Die Zeit für den Raumladungsab- bzw. aufbau hängt von der Zeitkonstante τ ab.

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (1.12)$$

Ist die Zeitkonstante klein und die Leitfähigkeit hoch, wird der stationäre Zustand schnell erreicht. Ist das Gegenteil der Fall, dauert es lange bis zum stationären Zustand [6].

2 Feldberechnungen

Feldberechnungen dienen zur Analyse von elektrischen-, magnetischen- und Strömungsfelder. Analytische Lösungen existieren nur für einfache Anordnungen. Bei komplexeren Anordnungen ist die Anwendung von numerischen Feldberechnungen notwendig [12]. Es ist auch möglich ein Problem grafisch zu lösen. Dabei erhält man aber nur eine quantitative Aussage über die Feldverteilung.

Analytische Lösungen sind exakte Lösungen, existieren aber nur für einfache Anordnungen. Numerische Lösungen können hingegen für beliebige Probleme berechnet werden, sie sind allerdings immer mit einem Fehler behaftet. Der Fehler kann durch die Anzahl der Berechnungsschritte verkleinert werden. Die Größe ist daher durch die Rechenleistung bzw. die Zeit für die Berechnung begrenzt.

2.1 Grafische Feldberechnung

In der Hochspannungstechnik kommen meist keine idealisierten Elektroden wie Kugeln, unendliche Zylinder oder Platten vor. Die grafische Feldberechnung bietet die Möglichkeit ohne großen Rechenaufwand den Verlauf von Feld- und Äquipotentiallinien quantitative zu ermitteln. Dafür ist die Einhaltung einiger Zeichenregeln notwendig. Auch grobe Angaben über die Feldgrößen können meistens, bei sorgfältiger Arbeit, gemacht werden. Es können z.B. Angaben über Potentialverteilung, örtlich auftretenden Feldstärken oder die Kapazitäten gemacht werden [7]. Ein weiterer Vorteil besteht darin, das grafisch erstellte Feldbilder eine Vorstellung für den Verlauf von Feld- und Äquipotentiallinien vermitteln. Bei numerisch berechneten Feldbilder ist eine grobe Prüfung auf die Richtigkeit der Lösung möglich. Damit können schwere Fehler in der Berechnung erkannt werden.

Aus den Eigenschaften von Feld- und Äquipotentiallinien ergeben sich die Zeichenregeln. Für ein Ebenes zweidimensionales Feld lauten diese: [6]

- Feld- und Äquipotentiallinien stehen senkrecht aufeinander
- Elektrodenflächen sind Äquipotentialflächen

- Feldlinien stehen senkrecht auf den Elektrodenflächen.
- Die Spannungsdifferenz ΔU zwischen zwei Äquipotentiallinien ist für alle Linien gleich und entspricht dem Abstand a . Die Ladungsdifferenz ΔQ wird durch den Abstand b dargestellt. Er entspricht immer der gleiche Ladung an den Elektroden. Die Teilkapazitäten ΔC die sich aus $\Delta Q/\Delta U$ ergeben, sind somit für alle Kästchen mit der Länge z gleich [6],[7].

$$\Delta C = \Delta Q/\Delta U = \epsilon z b/a \quad (2.1)$$

Das Seitenverhältnis b/a ist somit für alle Kästchen gleich.

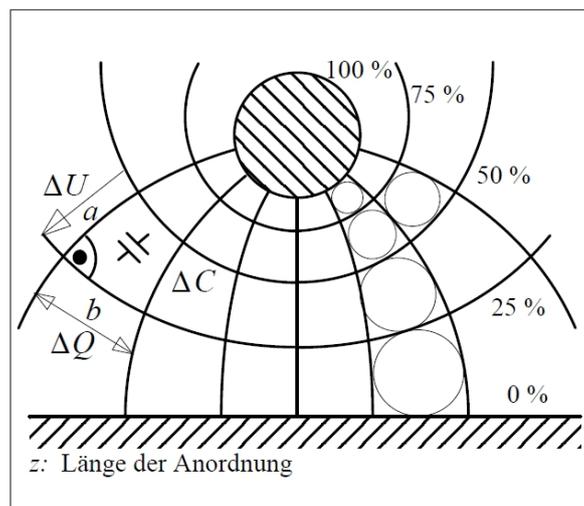


Abbildung 2.1: Grafische Ermittlung von Feld- und Potentiallinien für ebene Felder[6]

Bei der Erstellung eines Feldbildes wird am einfachsten in einem Bereich begonnen, in der die Potentialaufteilung bekannt ist. Das ist in der Nähe der Elektroden der Fall. Die Elektroden dienen als Orientierung für den weiteren Verlauf der Potentiallinien. In weiterer Folge werden die Feldlinien senkrecht zu den Potentiallinien bzw. zur Elektrodenoberfläche gezeichnet. Dabei muss auf die Seitenverhältnisse geachtet werden. Dieses muss, wie zuvor bereits erwähnt, für alle Kästchen gleich sein. Nachdem bereits eine erste Näherung erstellt wurde, muss dieses noch gemäß den Zeichenregeln verbessert werden. Nach mehreren Iterationsschritten wird schließlich ein zufriedenstellendes Ergebnis erhalten.

2.2 Analytische Feldberechnung

Mit der analytischen Feldberechnung ist es möglich nur einfache Elektrodenanordnungen zu berechnen. Die Ergebnisse die man erhält sind exakte Ergebnisse.

2.2.1 Kontinuitäts-/Potentialgleichung

Zur Berechnung wird von der Kontinuitätsgleichung ausgegangen.

$$\oint J + \partial D / \partial t \, dA = 0 \quad (2.2)$$

Durch Integration über die Zeit folgt

$$\oint D \, dA = Q. \quad (2.3)$$

Die Berechnung von Anordnungen mit symmetrischen Feldern erfolgt im ersten Schritt durch die Auflösung von Gleichung 2.3 nach dem Betrag von D . Daraus folgt der Zusammenhang zwischen der Ladung Q und dem Betrag der elektrischen Feldstärke $E = D/\epsilon$. Die Feldstärke E wird in der Hochspannungstechnik als Funktion der Spannung angegeben. Um die Spannung zu erhalten wird in Gleichung 2.3 gemäß

$$U_{12} = \Delta\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = \int_2^1 E \, dx \quad (2.4)$$

integriert. Man erhält den Zusammenhang zwischen Q und U .

Aus dem Ergebnis lässt sich das Verhältnis Q/U bilden, was ein Maß für die Kapazität ist [13].

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2.5)$$

Aus den Beziehungen $E = f(Q)$ und $Q = f(U)$ ergibt sich schließlich der Zusammenhang

$$E = f(U) \quad (2.6)$$

Im letzten Schritt können die Feldstärken an kritischen Stellen bestimmt werden. Ausgehend davon kann die Anordnung optimiert werden, wie die Minimierung der Maximalfeldstärke.

Eine weitere Möglichkeit ist die Auswertung der Potentialgleichung. Diese folgt aus der Kontinuitätsgleichung in differenzieller Form

$$\operatorname{div} D = \rho \quad (2.7)$$

und

$$E = -\operatorname{grad} \varphi \quad (2.8)$$

zu

$$-\epsilon \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \rho. \quad (2.9)$$

Dabei kann geschrieben werden

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \nabla^2 \varphi = \Delta \varphi \quad (2.10)$$

Es ergibt sich die Poisson-Gleichung zu [13]:

$$\Delta \varphi = -\rho/\varepsilon. \quad (2.11)$$

2.2.2 Methode der Konformen Abbildung

Mit der Methode der Konformen Abbildung ist es möglich weitere wichtige hochspannungstechnische ebene Feldanordnungen analytisch zu berechnen. Es wird eine Anordnung, die analytisch in der x-y-Ebene nicht lösbar ist, in eine andere (u-v-Ebene) transformiert, in der sich eine analytische Lösung angeben lässt. Die Abbildende Funktion wird konform genannt [12]. Ist die Lösung bestimmt, wird diese wieder in die Ausgangsebene rücktransformiert. Die x-y-Ebene wird dafür als komplexe \underline{z} -Ebene ($x+jy$) und die u-v-Ebene als komplexe \underline{w} -Ebene ($u+jv$) angesehen. Es ergibt sich die konforme Abbildung:

$$\underline{w} = f(z) \text{ bzw. } u + jv = f(x + jy) \quad (2.12)$$

Die Eigenschaften der konformen Abbildung sind dabei Winkeltreueheit und im kleinen Verhältnistreuheit d.h. infinitesimal kleine Figuren werden in ähnliche übergeführt [12]. Daraus folgt, das Potentialfelder nach der Transformation alle Eigenschaften wie vor der Transformation besitzen.

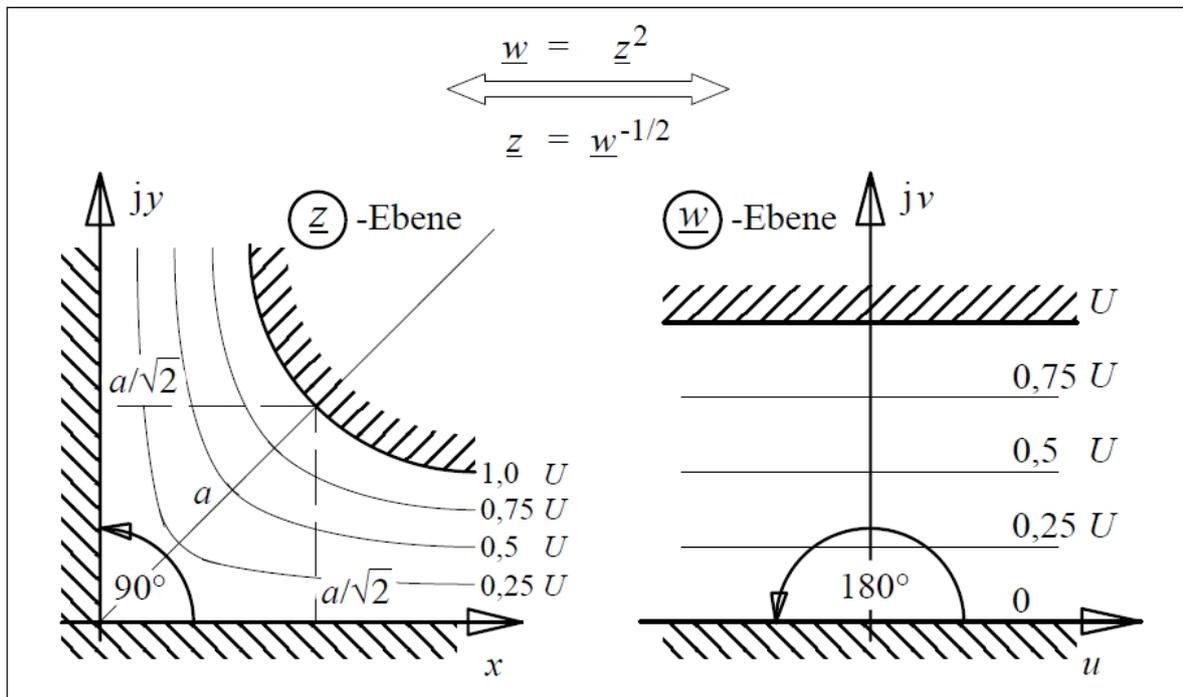


Abbildung 2.2: Konforme Abbildung von Feld- und Potentiallinien einer rechtwinkligen Elektrode [6]

Da es schwierig ist eine passende Transformation zu finden die eine Anordnung in eine berechenbare transformiert, wird vom umgekehrten Fall ausgegangen. Man benützt gegebene Funktionen $w=f(z)$ und untersucht welche Feldanordnung sich in der x - y -Ebene ergeben. Damit ist es möglich viele Anordnungen zu beschreiben, die auch praktische Bedeutung haben. Durch die Entwicklung der numerischen Feldberechnungen (Kapitel 2.4) wird aber meist darauf verzichtet Feldberechnungen mit mehr oder weniger gut geeigneten Transformationen zu untersuchen [6].

2.2.3 Ersatzladungsverfahren

Elektrodenoberflächen werden durch Ersatzladungen modelliert. Diese Ersatzladungen können grundsätzlich jede beliebige Form annehmen, vorausgesetzt es existiert eine analytische Lösung der Anordnung. Als Ersatzladungen kommen z.B. Punktladungen oder Linienladungen zum Einsatz [12]. Mit einer Punktladung kann eine Kugeloberfläche nachgebildet werden. Dabei befindet sich die Punktladung im Mittelpunkt der Kugel und befinden sich nicht, wie es der physikalischen Vorstellung entspricht, auf der Oberfläche. Die Ladung muss dabei so groß sein, das die Äquipotentiallinie, die die Kugeloberfläche nachbildet das gleiche Potential wie die zu untersuchende Kugelelektrode aufweist. Die Feldverteilung ergibt sich schließlich durch die Überlagerung der Einzelladungen.

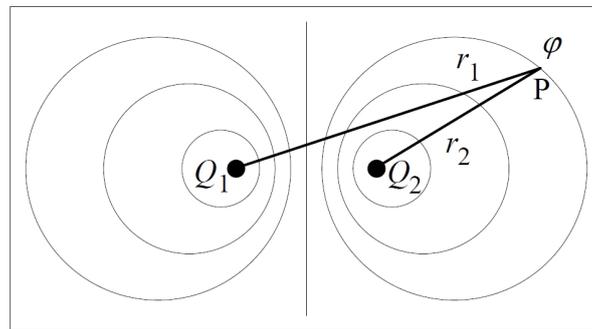


Abbildung 2.3: Beispiel der Überlagerung von Quellenfelder zweier Punktladungen [6]

2.3 Ähnlichkeitsbeziehung

Man nützt die bereits vorhandenen Berechnungsergebnisse für Elektrodenanordnungen. In der Hochspannungstechnik ist zudem oft nur die maximale Feldstärke einer Anordnung von Bedeutung. Die Ergebnisse sind in Tabellen für die verschiedenen Elektrodenanordnungen angegeben. Diese sind unabhängig von der angelegten Spannung. Es wird z.B. die maximale Feldstärke E_{max} als vielfaches der homogenen Feldstärke eines Plattenkondensators E_0 mit dem gleichen Abstand s angegeben.

$$E_{max} = \frac{1}{\eta} E_0 \quad (2.13)$$

mit

$$E_{mittel} = \frac{1}{s} \int_{P1}^{P2} E \, dx = \frac{U}{s} = E_0 \quad (2.14)$$

Die maximale Feldstärke ergibt sich somit indem man für $E_0 = U/s$ in Gleichung 2.13 einsetzt. Der Homogenitätsgrad entspricht $\eta = E_0/E_{max}$. Im Falle eines sehr inhomogenen Feldes ist $\eta \ll 1$ [7]. Zur Bestimmung des Faktors η wird zuerst aus der Tabelle die passende Elektrodenanordnung herausgesucht. Für den entsprechenden Elektrodentyp wird ein spezieller Geometriefaktor p als Funktion der Geometriedaten angegeben. Für jede Elektrodenanordnung existiert eine Kurve die den Ausnutzungsfaktor η als Funktion des Geometriefaktors angibt (siehe Abbildung 2.4) [6].

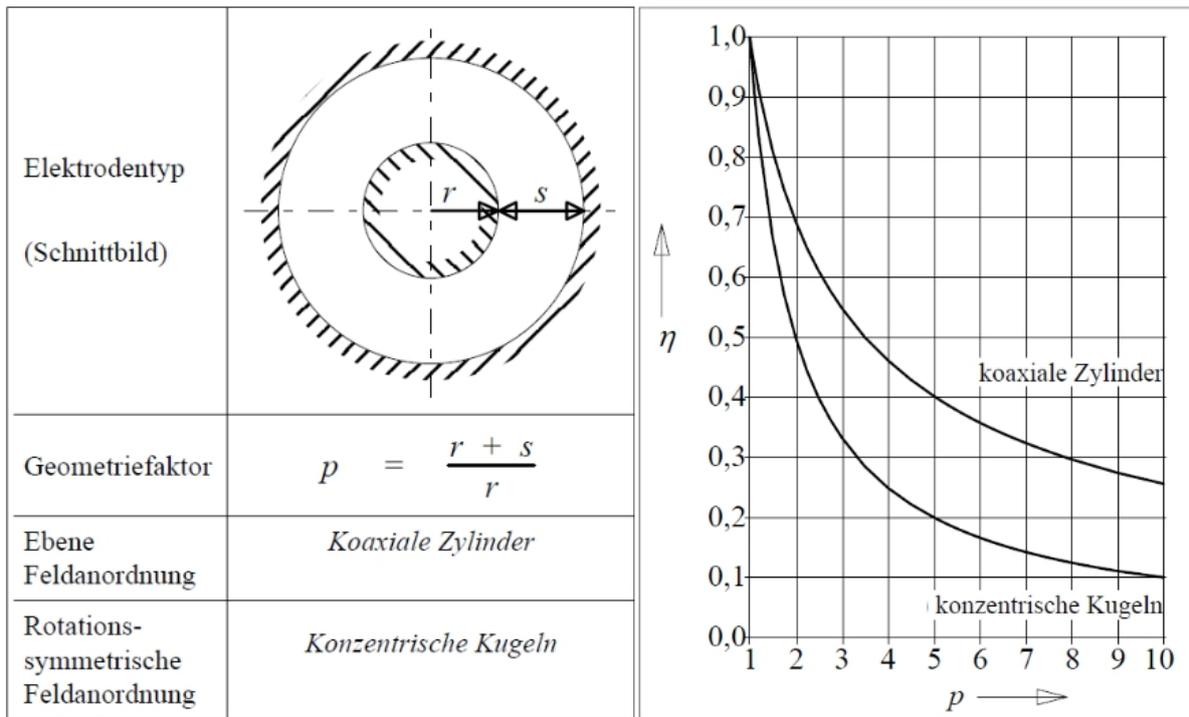


Abbildung 2.4: Beispiel von Elektrodenanordnung und Geometriefaktor (links), Homogenitätsgrad als Funktion des Geometriefaktors (rechts) [6]

Ist nun η bestimmt, kann die Maximalfeldstärke ermittelt werden.

2.4 Numerische Feldberechnung

Mittels numerischer Feldberechnung ist es auch möglich eine genaue Aussage über die Feldverteilung komplexer Geometrien zu erhalten.

2.4.1 Ersatzladungsverfahren

Beim Ersatzladungsverfahren werden im Aufpunkt die Beiträge zum Potential der einzelnen Ladungen aufsummiert. Als Ersatzladungen können dabei Punkt-, Linien-, oder Ringladungen dienen. Über einen Potentialkoeffizienten wird der Einfluss der einzelnen Ladungen im Aufpunkt berücksichtigt. Um Elektrodenoberflächen anzunähern werden Äquipotentialflächen verwendet. Dabei werden die Ersatzladungen hinter die Oberfläche gesetzt. Ansonsten würden sich unendliche Potentialwerte für die Oberfläche ergeben. Um ein Problem zu lösen, gibt es mehrere Methoden, wie z.B. die Kollokationsmethode

oder die Methode der kleinsten Quadrate. Das Setzen und Wählen der Ersatzladungen (Art und Ort) erfordert vom Anwender viel Erfahrung. Ist dies geschehen, so kann die Lösung über die entsprechenden Methoden einfach gelöst werden [12]. Abbildung 2.5 zeigt ein Beispiel für das Setzen der Ersatzladungen. In weiterer Folge wird die prinzipielle Vorgehensweise zur Lösung des Problems beschrieben.

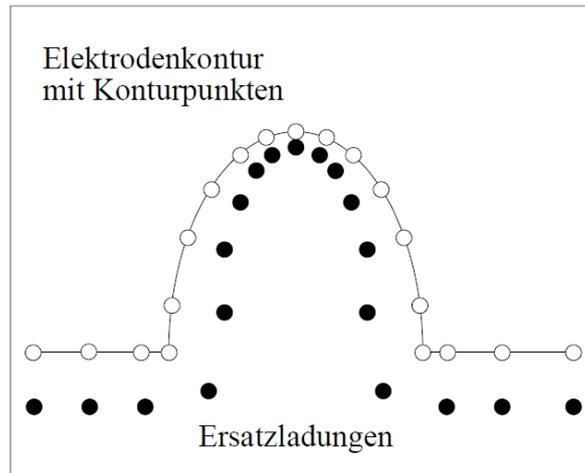


Abbildung 2.5: Setzen von Ersatz- und Konturladungen [6]

Für ein konkretes Problem werden zuerst eine Anzahl von Ersatzladungen gemäß der Elektrodenoberfläche gesetzt. Weiters erfolgt das Setzen von der gleichen Anzahl an Konturpunkten auf den Elektroden. In den Konturpunkten ist das Potential vorgegeben. Nun kann ein Gleichungssystem mit den Potentialkoeffizienten aufgestellt werden. Das Gleichungssystem drückt dabei das Konturpunktpotential als Funktion der Ersatzladungen aus. Durch die Lösung des Gleichungssystems erhält man die Größe der Ersatzladungen [12]. Damit kann das Potential in jedem Punkt des Feldraumes bestimmt werden.

Zum Schluss können die Positionen der Ersatzladungen weiter optimiert werden um die Elektrodenform besser darzustellen [6],[12]. Diese wird allerdings nie exakt mit der Äquipotentialfläche übereinstimmen. Elektrodenoberfläche und Äquipotentialfläche berühren sich nur in den Konturpunkten. Dazwischen kommt es zu einer Abweichung. Je mehr Ersatzladungen zur Modellierung gesetzt werden, desto besser wird die Qualität der Nachbildung. Eine zu große Anzahl kann zu Problemen bei der Lösung des Gleichungssystems führen. Es kann auch die Wirkung von dielektrischen Grenzflächen und Elektroden auf freiem Potential, durch entsprechendes setzen der Ersatzladungen, berechnet werden [6].

2.4.2 Finite-Differenzen-Methode

Als erster Schritt wird der Feldraum mit einem regelmäßigen Gitter überzogen. Aus den Funktionen der Potentiale der angrenzenden Gitterpunkten kann das Potential im Gitterpunkt angegeben werden. Dafür muss der Verlauf des Potentials in die jeweilige Richtung x , y oder z durch eine Taylor-Reihe angenähert werden. Die Nachbarpotentiale ergeben sich wenn die Taylor-Reihe nach dem zweiten Glied abgebrochen wird. Das Potential wird somit durch ein Polynom zweiter Ordnung angenähert, was zur Folge hat, dass die Gitterweite klein genug gewählt werden muss, damit der Potentialverlauf noch ausreichend genau berechnet werden kann. Die Summe der Nachbarpotentiale geteilt durch die Anzahl ergibt das Potential im Gitterpunkt [12].

Mit der Methode der Finiten-Differenzen lassen sich auch geschichtete Dielektrika berechnen. Durch die Anwendung der Gleichungen auf alle Gitterpunkte ergibt sich ein Gleichungssystem. Um dieses Gleichungssystem lösen zu können ist die Kenntnis der Randpotentiale notwendig [6].

2.4.3 Finite-Elemente-Methode

Bei dieser Methode ist es notwendig den Feldraum in kleine Teilbereiche zu zerlegen. Die Teilbereiche, man nennt diese finite Elemente, können dabei beliebig geformt sein. Die finite Elemente müssen dabei so vorgegeben werden, dass die Knoten der Elemente mit Knoten der Nachbarelemente zusammenfallen [12]. Das Grundprinzip liegt darin die Potentiale in den Knotenpunkten so zu bestimmen, sodass die gesamte Feldenergie minimiert wird [7].

Mit dem Prinzip der Minimierung der Energie lassen sich auch Probleme aus anderen Bereichen wie mechanische oder thermische Probleme lösen.

Soll ein Problem gelöst werden, wird der Feldraum diskretisiert. Dies geschieht ohne Rücksicht auf den Verlauf von Äquipotentialflächen. Für zweidimensionale Probleme werden meist dreieckige, für dreidimensionale tetraederförmige Elemente verwendet. Dabei entsprechen die Eckpunkte den Knoten des Netzes. Zur Berechnung der Feldenergie werden die Feld- bzw. Potentialverläufe innerhalb eines Elementes benötigt. Diese werden durch Interpolation aus den Potentialen der Knotenpunkte ermittelt [6].

Durch die Diskretisierung mit dreieckigen bzw. tetraederförmigen Elementen können Elektrodenkonturen und Grenzflächen besser angenähert werden, als bei der Differenzenmethode. Weiters kann die Elementgröße variiert werden, sodass weniger interessierende Bereiche durch ein grobes Netz und zu untersuchende Bereiche durch ein feineres Netz überzogen werden können. Damit ist es möglich die Anzahl der Knoten zu reduzieren,

aber trotzdem eine hohe Auflösung in den zu untersuchenden Bereichen zu erhalten. Im Gegensatz zur Methode der finiten Differenzen ist die gesuchte Funktion nicht nur in den Knotenpunkten sondern in allen Punkten definiert [12]. Sind Potentiale an Elektroden bekannt, können sie durch die Vorgabe der Potentiale in den Knoten berücksichtigt werden. Elektroden mit freiem Potential können dargestellt werden, indem ihnen eine hohe Dielektrizitätszahl zugeordnet wird. Dadurch wird das Feld aus den Elektroden gedrängt, so wie es auch bei metallischen Elektroden der Fall ist [6].

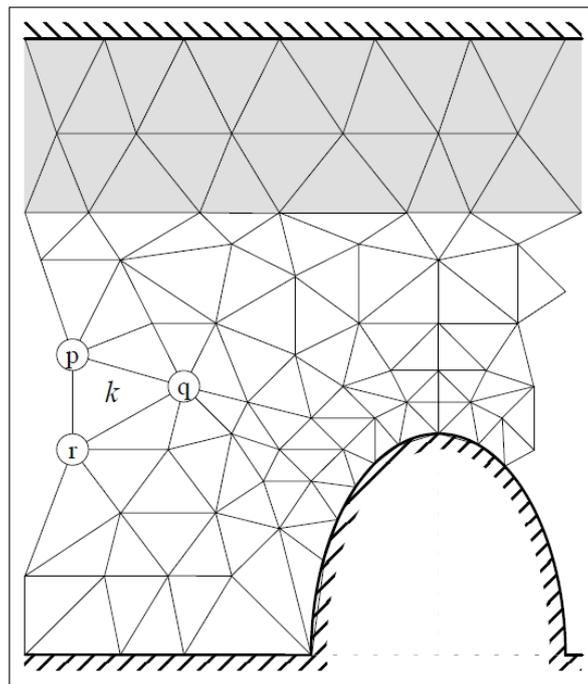


Abbildung 2.6: Diskretisierung des Feldraumes mit finiten Elementen [6]

Das Netz wird meist durch einen automatischen Netzgenerator erzeugt. Für Optimierungen können zusätzliche Punkte gesetzt, gelöscht oder verschoben werden. Um das Potential ohne zu große Fehler linear interpolieren zu können, ist darauf zu achten, dass die Elementgrößen so klein sind, dass von einer homogenen Feldstärke ausgegangen werden darf.

Um die Feldenergie der einzelnen Elemente zu erhalten, wird zuerst über die Feldenergiedichte integriert. Die Feldenergie ist dabei eine Funktion der zugehörigen Knotenpotentiale und Knotenkoordinaten. Um die Gesamtenergie zu erhalten muss die Summe über alle Energien der Elemente gebildet werden. Durch partielles Ableiten nach allen Knotenpotentialen und Nullsetzen erhält man ein Gleichungssystem, aus dem sich nach dem Auflösen die Knotenpotentiale ergeben [6].

Zur Lösung ist das Bekanntsein der Randpotentiale notwendig. Das ist vor allem dann ein Problem, wenn Probleme in unendlichen Gebieten gelöst werden sollen, oder die

Randpotentiale unbekannt sind. Ist dies der Fall, müssen Randbedingungen angenommen werden. Diese werden als Feldlinien angesehen, auf denen die Potentialflächen senkrecht stehen. Bei der Abgrenzung des zu berechnenden Feldraumes ist daher darauf zu achten, dass dieser groß genug gewählt wird um das Feld durch den Rand nicht zu verzerren [12].

Um Fehler bei der Interpolation der Potentiale in zu großen Elementen zu verringern werden dafür Polynome höherer Ordnung verwendet. Mit Polynomen höherer Ordnung ist es möglich stetige Übergänge von Steigung und Krümmung der Äquipotentiallinien zu erzeugen. Mit dem Grad des Polynoms steigt aber auch der Rechenaufwand und die Gefahr von numerischen Instabilitäten erheblich [6].

Eine numerische Feldberechnung wird meist in mehreren Schritten ausgeführt [6].

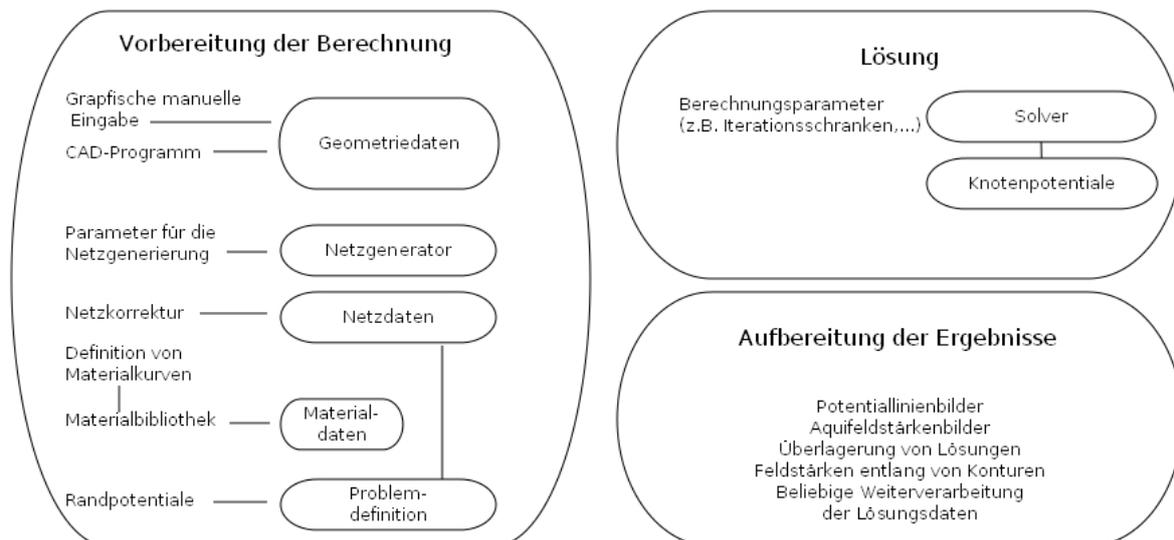


Abbildung 2.7: Struktur eines Finite-Elemente-Programmsystems für die numerische Feldberechnung [6]

Als erster Schritt müssen die geometrischen Daten eingegeben werden. Dies erfolgt entweder direkt im Berechnungsprogramm oder über CAD-Datensätzen. Die Qualität der Berechnung hängt auch von den passenden Vereinfachungen der Geometrie ab. Ist die Geometrie zu detailliert (vor allem in uninteressanten Bereichen), hat dies eine höheren Rechenaufwand zur Folge. Wurde sie aber zu sehr vereinfacht, so beeinflusst diese Vereinfachung das Berechnungsergebnis. Es ist daher das richtige Maß von Vereinfachung und Genauigkeit zu finden.

Weiters erfolgt die Diskretisierung des Feldbereichs. Dies erfolgt durch automatische Netzgeneratoren. Um eine ausreichende Qualität zu erhalten können vom Benutzer Parameter wie die Feinheit des Netzes vorgegeben werden. Z.B. ist es sinnvoll in Berei-

chen von geringen Krümmungsradien die maximale Elementgröße zu verringern um die Krümmung genauer durch das Netz darstellen zu können. Das erstellte Netz kann danach meist noch manuell bearbeitet werden indem z.B. zusätzliche Knotenpunkte angegeben werden.

Die Materialeigenschaften müssen angegeben, sowie den Elektroden Potentialwerte zugeordnet werden. Die Materialeigenschaften können oft aus bereits integrierten Materialbibliotheken ausgewählt werden.

Ist nun das Problem vollständig bestimmt, erfolgt die Lösung des Gleichungssystems. Für die Lösung können wiederum Schranken und Einstellungen wie Grad des Interpolationspolynoms, Schrittweite und Iterationsschranken vorgegeben werden. Die Parameter haben Einfluss auf Genauigkeit, Rechenzeit und numerische Stabilität. Aus der Lösung ergeben sich die Knotenpotentiale aus denen sich die Potentiale im Feldraum durch Interpolations- bzw. Approximationspolynomen ergibt [12].

Liegt nun die Lösung vor, kann noch eine Aufbereitung der Daten erfolgen. Die Darstellung des Ergebnisses erfolgt grafisch in Form von Potentiallinienbilder oder Linien gleicher Feldstärke. Diesen Linienbildern wird meist noch der Betrag der Feldstärke hinterlegt. Dabei stellt die Farbe die Höhe der Feldstärke dar. Es können auch noch Vektoren wie z.B. Feldstärkevektoren die Richtung und Größe darstellen angezeigt werden.

Als letzter Schritt erfolgt eine Plausibilitätsprüfung um mögliche Eingabefehler zu erkennen.

3 Geschichtete Dielektrika

Aus den Maxwell'schen Gleichungen lassen sich die Beziehungen der Normal- und Tangentialkomponenten der Feldgrößen bestimmen. Dabei wird von langsam veränderlichen Feldern ausgegangen. Es kann hierbei eine Einteilung in längs-, quer- und schräggeschichtete Dielektrika getroffen werden. Für das elektrische Strömungsfeld (Gleichspannungsbeanspruchung) gelten dabei analoge Beziehungen wie für das dielektrische Verschiebungsfeld (Wechselspannungsbeanspruchung).

Als Grenzfläche wird der Übergang zwischen zwei verschiedenen Dielektrika angesehen. Wird nun beiderseits der Grenzfläche das Integral über den Weg s (Abbildung 3.1 $P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_1$) gebildet ergibt sich aus dem Induktionsgesetz die Beziehung für die Tangentialkomponenten [6].

$$\oint E ds = E_{1t} \cdot s + (-E_{2t}) \cdot s = 0 \quad (3.1)$$

Daraus folgt:

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (3.2)$$

Somit sind die Tangentialkomponenten der elektrischen Feldstärke beidseits der Grenzfläche gleich groß. Gleiches gilt für die Normalkomponente der Stromdichte. Dies folgt aus der Kontinuitätsgleichung durch Integration über die Hüllfläche.

$$J_{1n} + \partial D_{1n} / \partial t = J_{2n} + \partial D_{2n} / \partial t \quad (3.3)$$

Hier ist oft eine Vereinfachung möglich. Für das stationäre Strömungsfeld kann der Verschiebungsstrom bzw. für das dielektrische Verschiebungsfeld der Leitungsstrom vernachlässigt werden [6].

Mit diesen Vereinfachungen wird nun

$$J_{1n} = J_{2n} \quad (3.4)$$

und

$$D_{1n} = D_{2n}. \quad (3.5)$$

Durch Vertauschen der Verhältnisse der Dielektrizitätszahlen $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ mit den Leitfähigkeiten κ_1/κ_2 können die Ergebnisse auch für das stationäre Strömungsfeld übertragen werden. Dies ist wegen der Analogie der Gleichungen möglich.

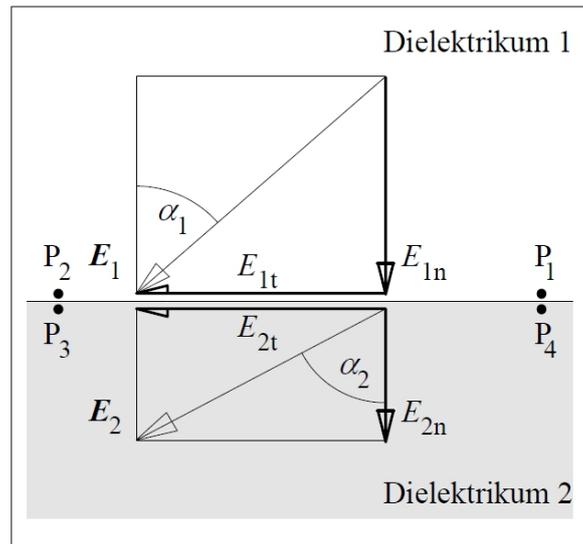


Abbildung 3.1: Vektoren der elektrischen Feldstärke an einer Grenzfläche zwischen zwei Isolierstoffen [6]

3.1 Quer geschichtetes Dielektrikum

Steht das elektrische Feld normal auf die Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika gilt für die elektrische Verschiebung $D_1 = D_2$. Sie geht damit an der Grenzfläche kontinuierlich über. Für die elektrische Verschiebung D gilt

$$D = \varepsilon E \quad (3.6)$$

mit $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$. Eingesetzt in Gleichung 3.5 ergibt sich die Aufteilung der elektrischen Feldstärke nach den Dielektrizitätszahlen.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3.7)$$

Es ist ersichtlich, dass die Feldstärkenbeträge im umgekehrten Verhältnis zu den Dielektrizitätszahlen stehen. Daraus folgt, dass jenes Dielektrikum mit der niedrigeren Dielektrizitätszahl stärker belastet wird.

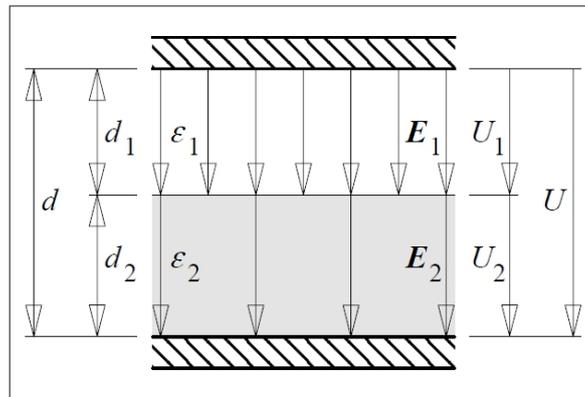


Abbildung 3.2: Quer geschichtetes Dielektrikum in einem Plattenkondensator (Feldverdrängung) bei Wechselspannung [6]

Dieser Effekt, der Feldverdrängung genannt wird, kann genutzt werden um Bereiche mit erhöhter Feldstärke zu entlasten. Kommt es allerdings aufgrund von Fehlern ungewollt zu Bereichen mit niedriger Dielektrizitätszahl wie z.B. Luftblasen oder Risse, kann dies zu Isolationsfehlern führen.

3.2 Längs geschichtetes Dielektrikum

Im Fall von längs geschichteten Dielektrika verläuft das elektrische Feld E parallel zur Grenzfläche zwischen den beiden Dielektrika. Das elektrische Feld geht stetig über.

$$E_1 = E_2 = U/D \quad (3.8)$$

Wird für die elektrische Feldstärke E , D/ε eingesetzt folgt für die elektrische Verschiebung

$$\frac{D_1}{\varepsilon_1} = \frac{D_2}{\varepsilon_2}. \quad (3.9)$$

Daraus ist ersichtlich, dass die elektrische Verschiebung in den Dielektrika unterschiedlich ist. Im Dielektrikum mit der größeren Dielektrizitätszahl ist sie größer, d.h. das Isoliermedium wird stärker polarisiert, wodurch an den Platten des Kondensators mehr Ladungen je Flächeneinheit gebunden werden können.

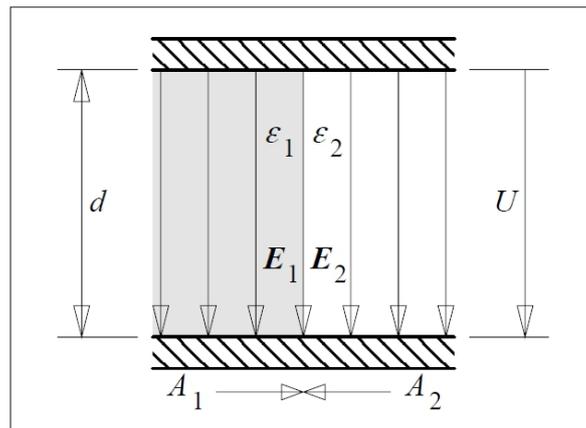


Abbildung 3.3: Längs geschichtetes Dielektrikum im Plattenkondensator bei Wechselspannung [6]

Die elektrische Feldstärke bleibt aber in beiden Dielektrika gleich. Es kommt im Gegensatz zu quer geschichteten Dielektrika zu keiner Feldverdrängung. Das scheint im ersten Moment vorteilhaft, tatsächlich ist die Festigkeit in der Praxis meist schlechter. Dies kann auf Effekte die durch die Trennflächen entstehen begründet werden.

An der Oberfläche von Isolatoren sind in Störstellen die Elektronen nur schwach gebunden. Damit stehen zusätzliche Ladungsträger für die Ausbildung von Gleitentladungen zur Verfügung.

Ablagerungen von leitfähigen Material an der Oberfläche führen zu einer Potentialverschiebung und damit zu Feldstärkeüberhöhungen, wodurch Überschlüge ausgelöst werden können.

Oberflächen weisen immer eine gewisse Rauigkeit auf, sodass die unterschiedlichen Dielektrika niemals völlig parallel verlaufen. Weiters entstehen durch die Rauigkeit Fehlstellen in Form von Hohlräumen, die ebenfalls zu Feldstärkeüberhöhungen führen [6].

3.3 Schräg geschichtetes Dielektrikum

Ein schräg geschichtetes Dielektrikum tritt dann auf, wenn der Vektor der elektrischen Feldstärke nicht normal auf die Grenzfläche steht. Abhängig von den Dielektrizitätszahlen erfolgt eine Brechung der Feld- und Potentiallinien, sodass sich unterschiedliche Winkel α_1 und α_2 ergeben (Abbildung 3.4). Dieser Effekt wird auch Brechungsgesetz genannt.

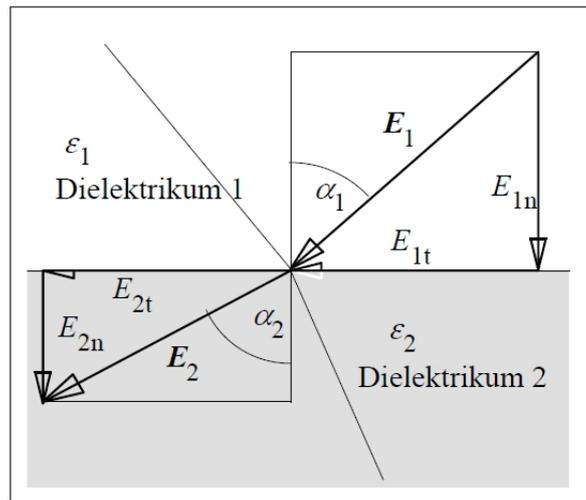


Abbildung 3.4: Vektoren der elektrischen Feldstärke an der Grenzfläche eines schräg geschichteten Dielektrikums bei Wechselspannung [6]

Da nach Gleichung 3.5 die Normalkomponente der elektrischen Verschiebung stetig übergeht gilt:

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (3.10)$$

bzw.

$$E_{1n}\varepsilon_1 = E_{2n}\varepsilon_2 \quad (3.11)$$

Die Normalkomponente des elektrischen Feldes springt somit an der Grenzfläche, wobei die Tangentialkomponente stetig übergeht.

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (3.12)$$

Durch Division der Stetigkeitsbedingungen ergibt sich:

$$\frac{E_{1t}}{E_{1n} \cdot \varepsilon_1} = \frac{E_{2t}}{E_{2n} \cdot \varepsilon_2} \quad (3.13)$$

Nach Umformung erhält man

$$\frac{E_{1t}/E_{1n}}{E_{2t}/E_{2n}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (3.14)$$

Das Verhältnis aus E_{1t}/E_{2n} entspricht dabei dem Tangens des eingeschlossenen Winkels α_1 . Somit erhält man das Brechungsgesetz zu:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (3.15)$$

Das Brechungsgesetz besagt, dass es bei schräg geschichteten Dielektrika beim Übergang zu einer Änderung des Winkels α zwischen dem Vektor E und der Flächennormalen kommt. Aus Gleichung 3.15 folgt, dass es beim Übergang vom dielektrisch dichteren zum dünneren Medium die Feldlinien zum Lot hin gebrochen werden.

4 Öl-Board-Isolieranordnung

4.1 Öl/Papier Isolationssystem

Elektrische Isolierungen haben die Aufgabe spannungsführende Teile gegeneinander und gegen Erde zu isolieren. Weiters müssen Isolierungen auch mechanische, thermische und chemische Beanspruchungen standhalten. Bei der Konstruktion sind diese Beanspruchungen zu beachten. Bei Isolationssystemen, dem Kombinieren unterschiedlicher Materialien in einer Isolationen, ist auch die Verträglichkeit untereinander zu berücksichtigen. Je nach Isolationsaufgabe kommen unterschiedliche Isolationen zum Einsatz. Das Öl/Papier Isolationssystem hat sich dabei für Transformatoren von geringer Leistung bis hin zu Leistungstransformatoren für höchste Spannungen bewährt.

Die Qualität und Zuverlässigkeit der Isolation sind maßgebend für die Lebensdauer von Transformatoren. Mechanische Überbelastung ist der Grund für einen Großteil der elektrischen Fehlern. Diese können durch Kurzschlüsse hervorgerufen werden [2].

4.1.1 Aufbau einer Öl-Board-Isolieranordnung

Durch die Kombination von Öl und Board kann die Isolation höher beansprucht werden. Mit der Erzeugung von Ölspalten wird die Festigkeit erheblich gesteigert. Die Isolation ist dabei so auszulegen, dass die Feldlinien normal zu den Barrieren verlaufen. Damit werden die Ölspalten in Normalrichtung beansprucht und nicht tangential.

In Transformatoren dient das Isoliermedium nicht nur zur Isolation sondern wird auch zur Kühlung verwendet. Damit dies möglich ist und das Öl zirkulieren kann, müssen in den Barrieren entsprechende Ausnehmungen gebaut werden. Damit es dadurch zu keinen Festigkeitsabnahme kommt, müssen diese Unterbrechungen gegeneinander versetzt angebracht werden [6].

4.2 Isolierflüssigkeiten

Die Hauptaufgabe von Isolierflüssigkeiten besteht in der Imprägnierung von Hohlräumen. Die erhöhte elektrische Festigkeit sowie die höhere Dielektrizitätszahl gegenüber gasförmigen Isolierstoffen stellen dabei einen Vorteil dar. Isolieröle haben dabei nicht nur die Aufgabe der Gewährleistung der Isolation sondern werden z.B. in Transformatoren auch dazu verwendet um die Verlustwärme abzuführen [7].

Wichtige Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten sind Dielektrizitätszahl, Leitfähigkeit, Verlustfaktor, thermische und chemische Beständigkeit, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung, Flammpunkt und Brennbarkeit. Tabelle 4.1 zeigt eine Auswahl verschiedener Isolierflüssigkeiten und dessen Eigenschaften.

Tabelle 4.1: Eigenschaften verschiedener Isolierflüssigkeiten [9]

	Einheit	Midel 7131	Silikonflüssigkeit	Mineralöl	Natürlicher Ester
Allgemeine Eigenschaften					
Dichte bei 20°C	kg/dm^3	0.97	0.96	0.88	0.92
Spezifische Wärme bei 20°C	J/kgK	1880	1510	1860	1848
Wärmewiderstand bei 20°C	W/mK	0.144	0.151 (bei 50°C)	0.126	0.177
Viskosität bei 20°C	mm^2/s	70	50 (bei 25°C)	22	85
Viskosität bei 100°C	mm^2/s	5.25	15	2.6	8.4
Stockpunkt	°C	-60	< -50	-50	-21
Expansionskoeffizient	/°C	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$10.4 \cdot 10^{-4}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$
Flammpunkt gemäß ISO 2719	°C	260	260	150	316
Brennpunkt gemäß ISO 2592	°C	316	> 350	170	360
Dielektrische Eigenschaften					
Duschklagspannung	kV	> 75	50	> 70	> 75
$\tan\delta$ bei 90°C	-	< 0.008	< 0.001	< 0.002	< 0.003
ε_r bei 20°C	-	3.2	2.7 (bei 25°C)	2.2	3.1

4.3 Mineralöl

Mineralöl ist das am häufigsten eingesetzte Isolieröl und wird vor allem in Transformatoren eingesetzt. Mineralöl dient dabei hauptsächlich zur Imprägnierung von Kondensatoren, Ölkabel sowie auch zur Einbettung von Hochspannungsapparate. Die Gewinnung des Mineralöls erfolgt aus Erdöl und anschließender Raffinierung und Aufbereitung. Die Grundbestandteile sind:

- Paraffine und Iso-Paraffine
- Naphtene
- Aromate
- Olefine.

Bei tiefen Temperaturen verhindern langkettige Paraffine das fließen des Öls. Daher müssen Öle, die bei tiefen Temperaturen eingesetzt werden, einen hohen Anteil von Naphtenen aufweisen. Ungesättigte Doppelbindungen der Olefine machen diese chemisch angreifbar und führen zu einer schnelleren Alterung des Öls. Sie sollten daher nur in geringsten Mengen enthalten sein. Eine Eigenschaft der Aromate besteht in der Gasfestigkeit. Dabei wird unter der Einwirkung von Teilentladungen Wasserstoff angelagert. Aufgrund von Sauerstoff und Licht erfolgt allerdings eine beschleunigte Alterung, wodurch Aromate und ihre positiven Eigenschaften nur bei abgeschlossenen Isolierungen wie z.B. Durchführungen eingesetzt werden. Bei Transformatoren sind hingegen möglichst alterungsstabile Öle einzusetzen, da es in Transformatoren zu Luftzutritt, hohen Temperaturen sowie zu katalytischen Wirkung aufgrund des Leitermaterials kommt [6].

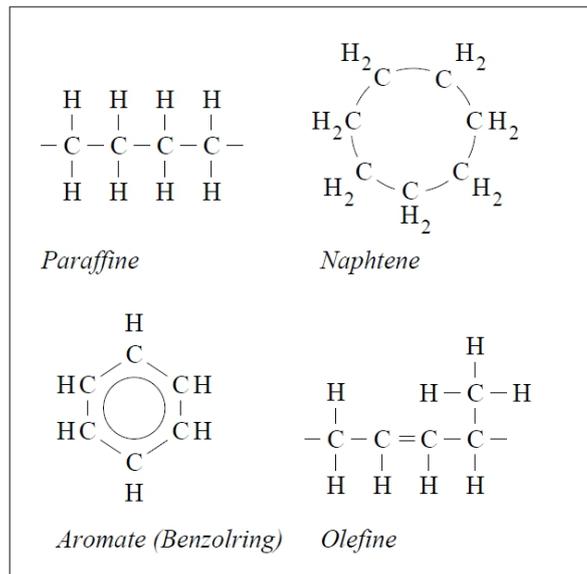


Abbildung 4.1: Grundbestandteile von mineralischen Isolieröl [6]

4.3.1 Herstellung

Mineralöl wird mittels Raffination aus Erdöl hergestellt [6]. Ein Schritt dabei umfasst die fraktionierte Destillation. Dabei wird das Erdöl in seine Einzelbestandteile, unter Ausnutzung der unterschiedlichen Siedepunkte, zerlegt.

4.3.2 Aufbereitung

Das noch im Mineralöl enthaltene Wasser sowie Gase verschlechtern die Isolationseigenschaften des Öls. Daher muss nach der Destillation das Mineralöl um für isolationstechnische Aufgaben genutzt werden zu können gereinigt werden. Dazu wird das Mineralöl entgast, entwässert und entsalzt. Bei der Aufbereitung wird meist die Oberflächenentgasung verwendet. Dabei wird eine möglichst große Oberfläche erzeugt. Das Öl wird auf eine Temperatur von 50°C bis 60°C erwärmt und danach einem Vakuum ausgesetzt und damit Wasser und Gas aus dem Öl entfernt [6].

4.3.3 Alterung

Unter der Einwirkung von Sauerstoff oxidiert Mineralöl. Die Zufuhr von Energie in Form von Wärme hat einen wesentlichen Einfluss auf die Oxidation. In Transformatoren kön-

nen Metalle sowie metallorganische Verbindungen als Katalysator dienen und den Vorgang beschleunigen [14]. Es sollte daher das Kupfer nie als blanker Leiter geführt werden. Bei der Oxidation entstehen Säuren, die wiederum mit Wasser dissoziieren und somit Ladungsträger bilden, die die Leitfähigkeit des Öls erhöht. Es kommt auch zur Verharzung aufgrund der Vernetzung des Öls über Sauerstoffbrücken [6]. Durch die Alterung sinkt die Durchschlagspannung, weiters sammeln sich mit der Zeit Verunreinigungen wie feste Partikel oder Wasser im Öl an.

Durch X-Wachs-Bildung kommt es zu einer Absenkung der elektrischen Festigkeit. X-Wachs entsteht dabei durch den Einfluss von Teilentladungen und hohen Feldstärken. Dabei werden Ölmoleküle durch das Vorhandensein von Sauerstoff oxidiert. Andauernde Beanspruchung führt zur Vernetzung der oxidierten Ölmoleküle. Durch die Vernetzung bildet sich das X-Wachs sowie Wasserstoffgas. Wasserstoffgas wird gasförmig ausgetrieben und bildet dabei Gasbläschen, die die elektrische Festigkeit herabsetzen [6].

Mechanismus	Folgen	Maßnahmen *)
a) Aufbrechen von Doppelbindungen und Anlagerung polarer Gruppen (Oxidation): $ \begin{array}{c} \\ -C=C- \\ \\ \end{array} + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow \begin{array}{c} \quad OH \\ -C-C- \\ \quad \\ \end{array} $	Der Verlustfaktor steigt durch Polarisationsverluste irreversibel an. Vernetzung und Verharzung.	Einsatz von Ölen mit geringem Anteil ungesättigter Kohlenwasserstoffe (Olefine). *) siehe unten
b) Oxidation von Ölmolekülen (TE-, UV- oder Lichteinwirkung): $ \begin{array}{c} \\ -C-H \\ \\ \end{array} + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow \begin{array}{c} \\ -C-OH \\ \\ \end{array} $	Der Verlustfaktor steigt durch Polarisationsverluste an. Zersetzungsprodukte, Säuren, Schlamm.	Regenerierung durch Bleicherde-Behandlung ist nur bedingt möglich. *) siehe unten
c) Oxidation und Polykondensation (TE-, UV- oder Lichteinwirkung): $ \begin{array}{c} \\ -C-H \\ \\ \end{array} + O_2 + \begin{array}{c} \\ H-C- \\ \\ \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c} \quad \\ -C-O-C- \\ \quad \\ \end{array} + H_2O $	Durch Wasserabspaltung sinkt die Durchschlagfeldstärke, Leitfähigkeit und Verlustfaktor steigen an. Die Vernetzung führt zur Bildung von Schlamm und zur Verharzung.	Durch Trocknung des Öls können Durchschlagfestigkeit, Leitfähigkeit und Verlustfaktor (teilweise) regeneriert werden. *) siehe unten
d) X-Wachsbildung (hohe Wechselfeldstärken, TE-Einwirkung): 1.) Bindung von Sauerstoff durch Oxidation, vgl. b). 2.) Anschließende Vernetzung: $ \begin{array}{c} \\ -C-OH \\ \\ \end{array} + \begin{array}{c} \\ H-C- \\ \\ \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c} \quad \\ -C-O-C- \\ \quad \\ \end{array} + H_2 $	Irreversibler Anstieg der Polarisationsverluste durch Oxidation. Verharzung, X-Wachs-Bildung, Volumenverringerung und Gasbildung (Wasserstoff) durch Vernetzung.	Teilentladungsfreie Konstruktionen. Hohlraumfreie Imprägnierung. Einsatz gasfester Öle. *) siehe unten
*) Allgemeine Maßnahmen:	Abschluß gegen Luft- bzw. Sauerstoff- und Feuchtigkeitszutritt, sowie TE-, UV- bzw. Lichteinwirkung und Katalysatoren (Kupfer). Verwendung von Inhibitoren, die die Oxidationskette unterbrechen.	

Abbildung 4.2: Alterung von Mineralöl durch Oxidationsvorgänge [6]

4.3.4 Ölanalyse

Zur Bestimmung des Ölzustandes stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung [6]:

Durchschlagsmessung: Mittels Durchschlagspannungsmessung lässt sich der Feuchtegehalt bestimmen. Feuchtigkeit setzt die Durchschlagspannung herab. Dabei kann nur eine starke Befeuchtung festgestellt werden.

Karl-Fischer-Titration: Genauer kann der Feuchtigkeitsgehalt durch die Karl-Fischer-Titration bestimmt werden. Durch die hygroskopische Wirkung des Papiers treten hohe Feuchtigkeitswerte nur selten auf. Wegen der Abhängigkeit der Feuchtigkeit in Papier und Öl von der Temperatur hat auch die Temperatur zur Zeit der Probenentnahme einen großen Einfluss auf den gemessenen Feuchtigkeitsgehalt.

Verlustfaktormessung: Alterung von Öl führt zur Erhöhung des Verlustfaktors.

Neutralisations-, Verseifungszahl: Es werden die freien Säuren oder freie und gebundene Säuren durch Kalilauge neutralisiert. Die Neutralisationszahl gibt dabei die Menge an Kalilauge die zur Neutralisation benötigt wird an. Die Werte sollte einen Wert von 0,5mg KOH für 1g Öl nicht überschreiten.

Gas-in-Öl-Analyse: Die Gas-in-Öl-Analyse bestimmt die im Öl gelösten Gase. Sie sind kein Maß für die Alterung geben aber auch Aufschluss über Fehler wie z.B. Lichtbögen, Teilentladungen oder Überhitzungen.

4.4 Transformerboard

Der Grundstoff zur Herstellung von Isolierpapier ist ungebleichte Sulfatzellulose. Transformerboard ist dabei ein dickes Papier mit höchster Qualität. Für mechanisch beanspruchtes Transformerboard eignen sich vor allem Nadelhölzer mit besonders dicht und langsam gewachsenen Zellen. Für die Herstellung von Papier sind zwei wichtige Komponenten notwendig. Die Alpha-Zellulose, ein aus Glucoseeinheiten bestehendes, kettenförmiges hochpolymeres Kohlehydrat mit einem Polymerisationsgrad von rund 2000, und die Hemi-Zellulose. Dabei handelt es sich um Kohlehydrate mit einem Polymerisationsgrad kleiner als 200. Sie erleichtert die Bildung der Wasserstoffbrücken, die für die Festigkeit maßgebend sind. Ist ihr Anteil allerdings höher als 10%, wird die Festigkeit vermindert [1].

Das Holz enthält noch andere Substanzen, wie z.B. Lignin oder Verunreinigungen. Diese müssen von den Fasern getrennt und ausgewaschen werden. Damit die Zellulose selbst nicht angegriffen wird, muss dieser Vorgang und die weitere Verarbeitung schonend vor

sich gehen.

4.4.1 Herstellung

Der Sulfatzellstoff wird mit Wasser aufgelöst und in Büetten zwischengelagert. Danach wird das Zellstoffgemisch im Entstipper in die Einzelfasern zerlegt. Die Fasern werden in weiterer Folge an mehreren Teilen geknickt, gequetscht oder der Länge nach aufgespalten. Dadurch werden die Berührungspunkte zwischen den Fasern erhöht. Es erhöht sich damit auch die Festigkeit des Papiers. Diese ist hauptsächlich von den Bindungskräften zwischen den Fasern abhängig. Die Fasern werden anschließend mit Wasser verdünnt und nochmals gereinigt. In einem breiten rotierenden Siebzylinder kann das Wasser aus dem Cellulose-Wassergemisch abfließen, sodass die Zellulose-Fasern an der Sieboberfläche ausfiltriert werden und eine Lage Papier bilden. Die Papierbahn wird nun vom Sieb abgenommen und zur Formwalze transportiert [1].

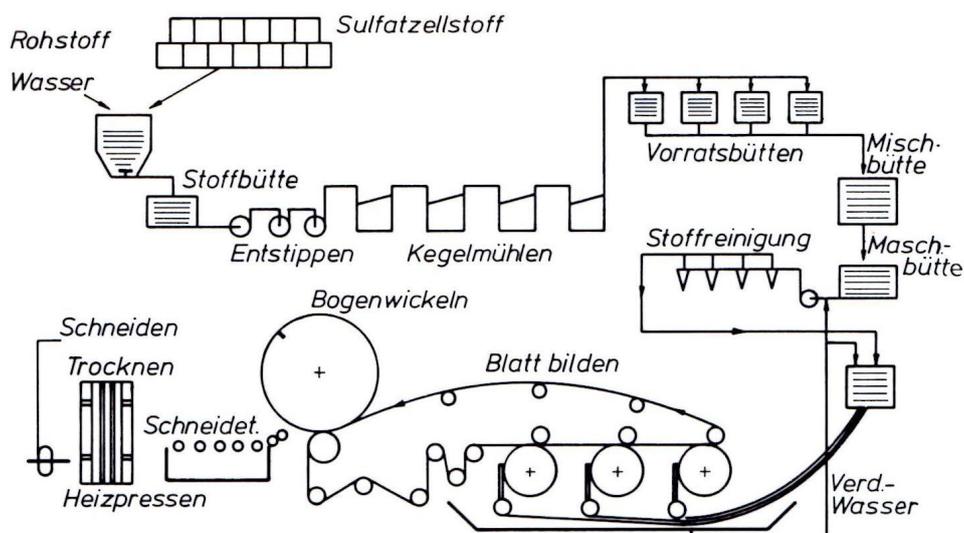


Abbildung 4.3: Fabrikationsschema Transformerboard precompressed [1]

4.4.2 Trocknung

Die Trocknung von Papier lässt sich in drei Bereiche, gemäß der verschiedenen Mechanismen des Feuchtigkeitstransportes unterteilen. Der erste Abschnitt beschreibt Papier, dessen Poren mit Wasser gefüllt sind. Die Oberfläche ist vollständig mit Wasser benetzt. Diesen Zustand hat Papier nach der Blattbildung in der Papiermaschine. An der Oberfläche kann das Wasser mit gleichbleibender Geschwindigkeit verdampfen. Das Papier hat dabei keinen Einfluss auf die Verdampfungsgeschwindigkeit. Ist die Oberfläche

trocken, verschiebt sich der Wasserspiegel. Er befindet sich von nun an im Papier. Da die einzelnen Schichten nicht gleichmäßig trocknen, trocknet Schicht für Schicht aus.

Im zweiten Abschnitt nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit ab, da der entstehende Dampf durch die engen Poren der bereits trockenen Schichten an die Oberfläche dringen muss. Weiters nimmt der Diffusionsweg mit abnehmenden mittleren Feuchtigkeitsgehalt immer weiter zu. Für nicht hygroskopische Stoffe wird die Trocknungsgeschwindigkeit nur durch den Strömungswiderstand vom inneren nach außen begrenzt. Dies ist durch die gestrichelte Kurve in Abbildung 4.4 dargestellt. Nimmt die Feuchtigkeit ab, werden die Anziehungskräfte zwischen den Wassermolekülen und dem Papier so groß, dass zur weiteren Trocknung eine große Menge zusätzlicher Energie nötig ist. Dieser Effekt tritt bei allen Stoffen auf. Ist ein Stoff hygroskopisch, tritt diese Erscheinung aber bereits bei höheren Feuchtigkeitsgehalt auf. Aufgrund der vielen kleinen Poren hat Papier eine große innere Oberfläche, wodurch der Feuchtigkeitsgehalt, bezogen auf sein Trockengewicht, selbst dann noch hoch ist wenn diese innere Oberfläche nur noch molekular mit Feuchtigkeit benetzt ist. Der dritte Abschnitt entspricht dem hygroskopischen Trock-

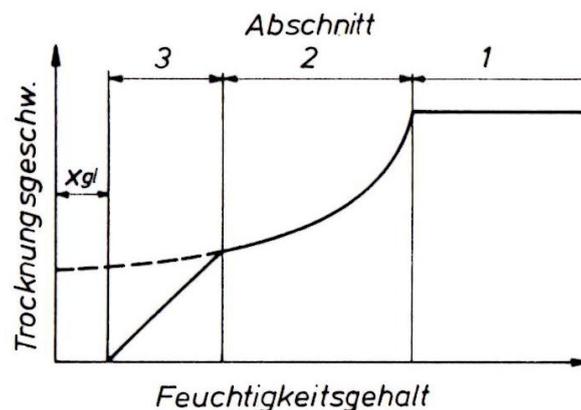


Abbildung 4.4: Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit bei der Trocknung von Papier: Gestrichelte Kurve = Trocknungsgeschwindigkeit eines nicht hygroskopischen Stoffes [1]

nungsbereich. In diesem Abschnitt sinkt die Trocknungsgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur und sinkendem Feuchtigkeitsgehalt schnell ab. Der Grund liegt in der wie zuvor beschriebenen Zunahme der molekularen Bindungskräfte und der damit zunehmenden benötigten Energie. X_{gl} ist die Gleichgewichtsfeuchtigkeit. An diesem Punkt ist die Feuchtigkeit im Papier gleich der Umgebungsfeuchte, wodurch keine Trocknung mehr stattfinden kann. Daher werden die Umgebungsbedingungen bei der Trocknung so gewählt, dass die Gleichgewichtsfeuchtigkeit unter der gewünschten Feuchtigkeit des Papiers liegt. Zur Beschleunigung des Vorgangs wird weiters der Druck abgesenkt. Um den entstehenden Dampf im Papier an die Oberfläche zu befördern muss der Strömungswiderstand des Papiers überwunden werden. Dazu ist ein Dampfdruckunterschied notwendig.

Zur Verdampfung und zur Überwindung der Sekundärbindungen ist weiters Energie

notwendig. Diese wird in Form von Wärme zugeführt [1].

4.4.3 Imprägnierung

Das Papier wird mit Öl imprägniert das zuvor ebenfalls entsprechend aufbereitet und getrocknet wurde. Die Imprägnierung erfolgt unter Vakuum. Das verhindert das Luftblasen zurückbleiben. Um große Isolierteile zu imprägnieren ist eine relativ lange Zeit notwendig, da die Imprägnierung von zusammengeklebten Teilen wie die Trocknung parallel zur Schichtung erfolgt. Um diesen Vorgang zu beschleunigen kann die Imprägnierung mit heißem Öl erfolgen. Das verkürzt die Imprägnierzeit erheblich [1].

4.4.4 Alterung

Die Alterung entsteht durch Oxidation, Hydrolyse sowie Pyrolyse. Dabei entstehen Wasser, Furane, Säuren sowie CO und CO_2 . Durch Wärme werden diese Vorgänge beschleunigt. Der wichtigste Zersetzungsprozess ist dabei die Hydrolyse. Die Alterungsprozesse führen zu einer verringerten mechanischen Festigkeit. Dies wird durch den Polymerisationsgrad der Zellulose ausgedrückt. Die verringerte mechanische Festigkeit kann schließlich dazu führen, das im Falle von Überströmen der mechanischen Belastung nicht mehr standgehalten werden kann. Die Lebensdauer wird ebenfalls durch elektrische Alterung herabgesetzt. Teilentladungen schwächen die Isolation und führen zu Beschädigungen, die zu einem Durchschlag führen können [14].

4.4.5 Zustandsbewertung

Durchschnitts-Polymerisationsgrad: Ein Maß für den Alterungszustand stellt der Durchschnitts-Polymerisationsgrad (DP-Wert) dar. Ein Wert von 1300 bis 1400 Glucosemoleküle ist für neuwertige Zellulosemoleküle typisch. Diese Moleküle verkürzen sich in Folge von Alterung. Bei einem DP-Wert von 150 bis 200 ist das Ende der Betriebssicherheit erreicht. Durch die Verminderung des DP-Wertes wird die Zellulose spröde und brüchig und kann bei mechanischer Überbelastung (Überströmen) beschädigt werden. Zur Bestimmung des DP-Wertes wird Zellulose in Kupferthyldiamin gelöst. Die Kettenlänge hat dabei Einfluss auf die Viskosität die gemessen wird. Für die Bestimmung des DP-Wertes ist eine Materialprobe notwendig. Diese muss aus dem Betriebsmittel entnommen werden. Der DP-Wert gibt nur eine Aussage über den Zustand der Zellulose an der Entnahmestelle [6].

Gas-in-Öl-Analyse: Wird CO oder CO_2 festgestellt, ist das ein Zeichen für die Zer-

setzung der Zellulose. Die Zersetzung kann durch thermische Überhitzung oder durch elektrische Entladungen hervorgerufen werden. In Kombination mit anderen Gasen, die durch die Zersetzung des Mineralöls auftreten kann auf die Art des Fehlers geschlossen werden.

Wassergehalt: Die Bestimmung des Wassergehalts im Papier kann nur indirekt erfolgen. Es wird aus dem Wassergehalt des Öls mittels Gleichgewichtskurven auf den Wassergehalt des Papiers geschlossen. Diese Methode lässt keine genaue Aussage über die Feuchtigkeit im Papier zu. Durch die hygroskopischen Eigenschaften des Papiers entzieht dieses dem Öl das Wasser, sodass selbst bei bereits sehr feuchten Papier im Öl nur ein geringer Wassergehalt feststellbar ist. Es besteht hier ein Zusammenhang zwischen dem Feuchtigkeitsverhältnis im Papier und Öl und der Temperatur. Je höher die Temperatur, desto mehr Wasser diffundiert aus dem Papier in das Öl. Daher sind für den Nachweis geringer Papierfeuchten hohe Temperaturen notwendig. Dabei muss sich der Gleichgewichtszustand eingestellt haben [6].

Dielektrische Diagnostik: Eine weitere Möglichkeit besteht in der Messung der Antwort des dielektrischen Systems (Kapitel 1.1.3). Dabei werden die gemessenen Kurven mit Kurven, dessen Feuchtigkeit bekannt sind verglichen und damit eine Aussage über den Feuchtigkeitsgehalt getroffen.

5 Finite-Elemente-Simulationen

5.1 Programm-Beschreibung

Nachfolgende Simulationen wurden mittels dem Programm Elecnet v7 von Ivolytica durchgeführt. Elecnet ist eine Programm zur Analyse von statischen und transienten elektrischen Feldern sowie Strömungsfelder. Die Simulationen sind dabei sowohl in 2D als auch in 3D möglich.

5.2 Parameter/Einstellungen

Für die Simulationen wurde von folgenden Parametern für Board und Öl ausgegangen:

Leitfähigkeit:

- $\rho_{\text{Öl}} = 10^{-13} S/m$
- $\rho_{\text{Board}} = 10^{-15} S/m$

Relative Dielektrizitätszahl:

- $\varepsilon_{\text{Öl}} = 2,2$
- $\varepsilon_{\text{Board}} = 4,4$

Diese entsprechen den in der Literatur ([2], [6], [7]) angegebenen Werten.

Bei der Untersuchung der Wirkung von Schirmeinrichtungen (Kapitel 5.3) wurde bei der Simulation eine Wechselspannung von 10kV angenommen. Der Kessel ist für Teilentladungsmessungen bis zu Spannungen von 70kV Wechselspannung bzw. 100kV Gleichspannung geeignet. Für die Simulationen wurden 10kV gewählt, um die Feldverteilung allgemein darzustellen. Für andere Spannungswerte gilt eine entsprechende Proportionalität. Als Grundgeometrie wurde bei der Analyse der Spitze-Platte Anordnung (Kapitel

5.5) und der Öl-Board-Gleitanordnung (Kapitel 5.6) ebenfalls dieser Kessel verwendet. Daher wurde auch hier die Spannung mit 10kV Wechsel- bzw. Gleichspannung festgelegt.

Zur Untersuchung des Isolationsmodells (Kapitel 5.4) wurde die Leitfähigkeit ausgehend von den oben angegebenen Einstellungen variiert. Es wurden Simulationen mit Gleichspannung durchgeführt und das transiente sowie stationäre Verhalten bei verschiedenen Parametern untersucht. Als Simulationsspannung wurde hier 100kV Gleichspannung festgelegt.

Im Falle der Simulationen für den Kessel zur Leitfähigkeitsmessung (Kapitel 5.7) ergab sich die Spannung nach der maximalen Spannung die bei den Messungen zur Anwendung gekommen sind (siehe [16]). Diese betrug 20kV.

In den nachfolgenden Simulationsbildern ist das elektrische Feld als Farbflächen dargestellt. Die Linien stellen Linien gleichen Potentials dar.

5.3 Wirkung von Schirmeinrichtungen

Ausgehend von einem vorhandenen Prüfkessel (Abbildung 5.1) wurde der Einfluss von Schirmtori auf die Feldverteilung untersucht. In weiterer Folge wurde eine Schirmelektrode im rotationssymmetrischen C-förmigen Profil hinzugefügt. Die Aufgabe der Schirmeinrichtung soll dabei das Abschwächen der Gleitanordnung an der Grenzfläche Öl-Luft sein. Durch eine zu starke Gleitanordnung können in diesem Bereich Entladungen hervorgerufen werden, die besonders bei Teilentladungsmessungen zu falschen Ergebnissen führen können. Die Simulationen wurden jeweils mit einer Wechselspannung von 10kV durchgeführt.

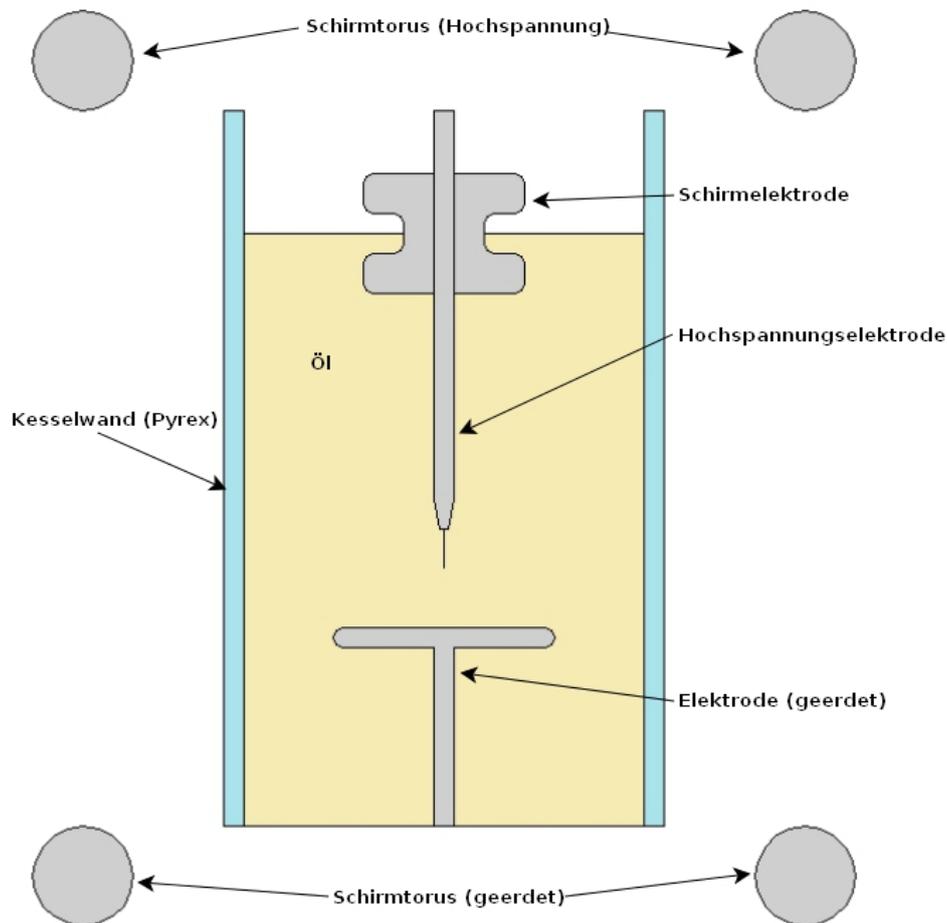


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des simulierten Prüfkessels mit Schirmeinrichtungen (Schirmtori und Schirmelektrode in erster Ausführung)

Die Anordnung besteht aus der Hochspannungselektrode mit Nadelhalter und Nadel, sowie der geerdeten Elektrode. Weiters sind die Schirmtori und eine Version der Schirmeinrichtung dargestellt. Der Kessel ist dabei mit Öl (Eigenschaften siehe Kapitel 5.2) gefüllt. Für die weiteren Simulationen ist wegen der Symmetrie des Feldes nur die rechte Hälfte des Kessels dargestellt.

5.3.1 Schirmtori

Für die Simulationen wurde von einer Wechselspannung von 10kV ausgegangen. Dabei wurde zuerst die Simulation ohne Schirmtori (Abbildung 5.2 links) durchgeführt, und in weiterer Folge mit Schirmtori (Abbildung 5.2 rechts).

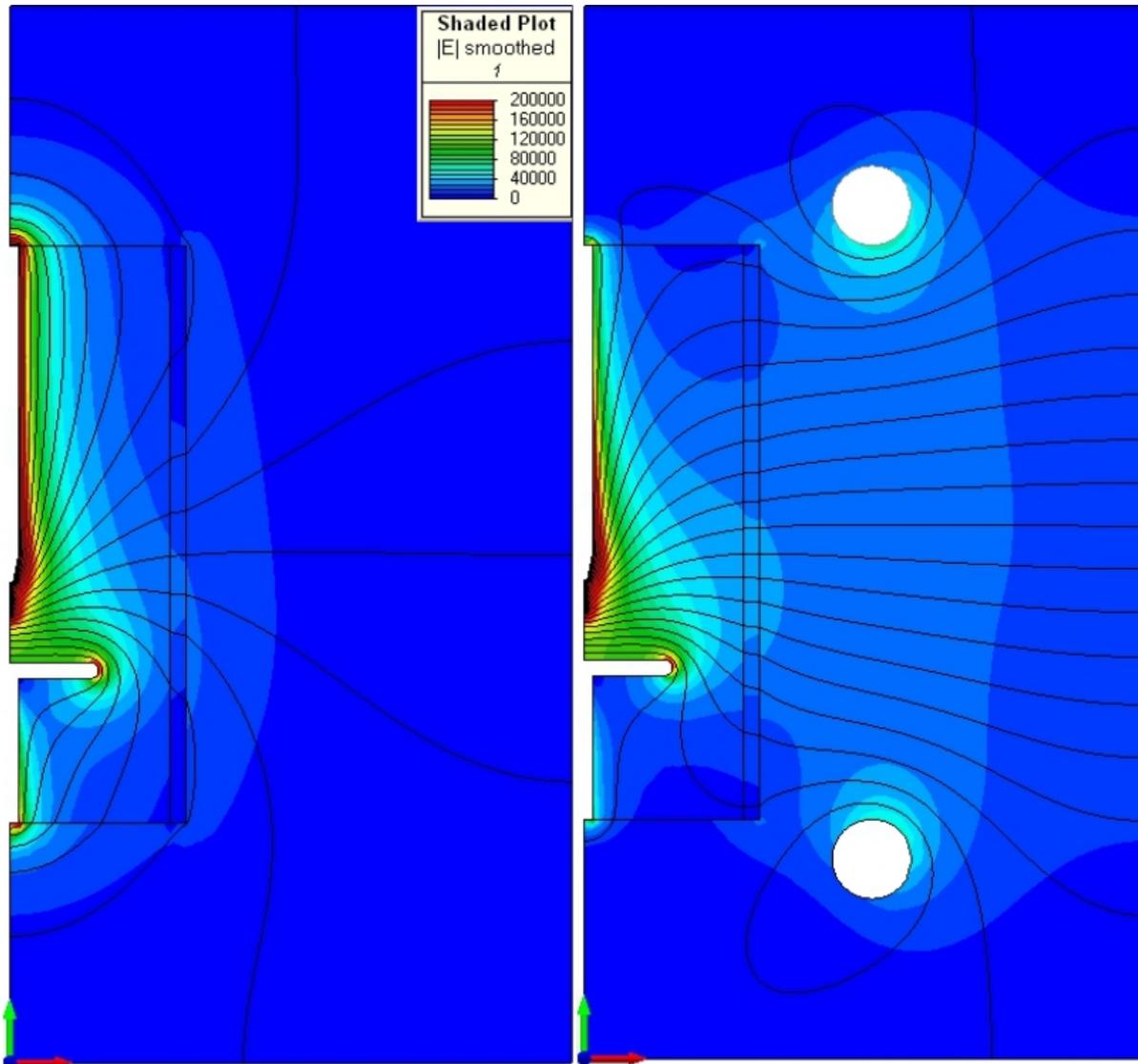


Abbildung 5.2: Prüfkessel ohne (links) und mit Schirmtori (rechts)

Durch Schirmtori wird die elektrische Feldstärke im oberen Bereich der Hochspannungselektrode sowie im unteren Bereich der geerdeten Elektrode abgesenkt. Ohne Schirmtori entsteht an der Grenzfläche Öl-Luft auch eine Gleitanordnung (Abbildung 5.2 links). Diese Gleitanordnung kann durch Schirmtori stark abgeschwächt werden. Das ist vor allem bei Teilentladungsmessungen wichtig, da dadurch Teilentladungen an diesen Bereichen unterdrückt werden, die sonst mitgemessen würden. Bei den Messungen interessiert aber das Verhalten des Prüflings und nicht die des Kessels. Im Bereich der Spitze-Platte Anordnung bleibt die Feldverteilung nahezu gleich (Abbildung 5.3).

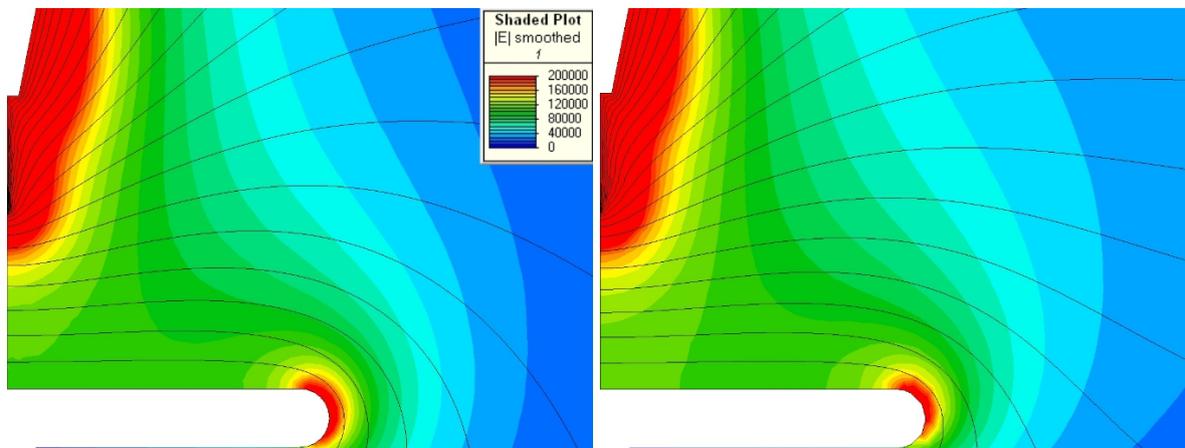


Abbildung 5.3: Detailansicht, ohne (links) und mit Schirmtori (rechts)

5.3.2 Schirmelektrode im rotationssymmetrischen C-förmigen Profil

Ausgehend von einer Anordnung mit Schirmtori wurde eine Schirmeinrichtung hinzugefügt. Diese hat die Aufgabe die Gleitanordnung an der Grenzfläche Öl-Luft weiter zu verringern.

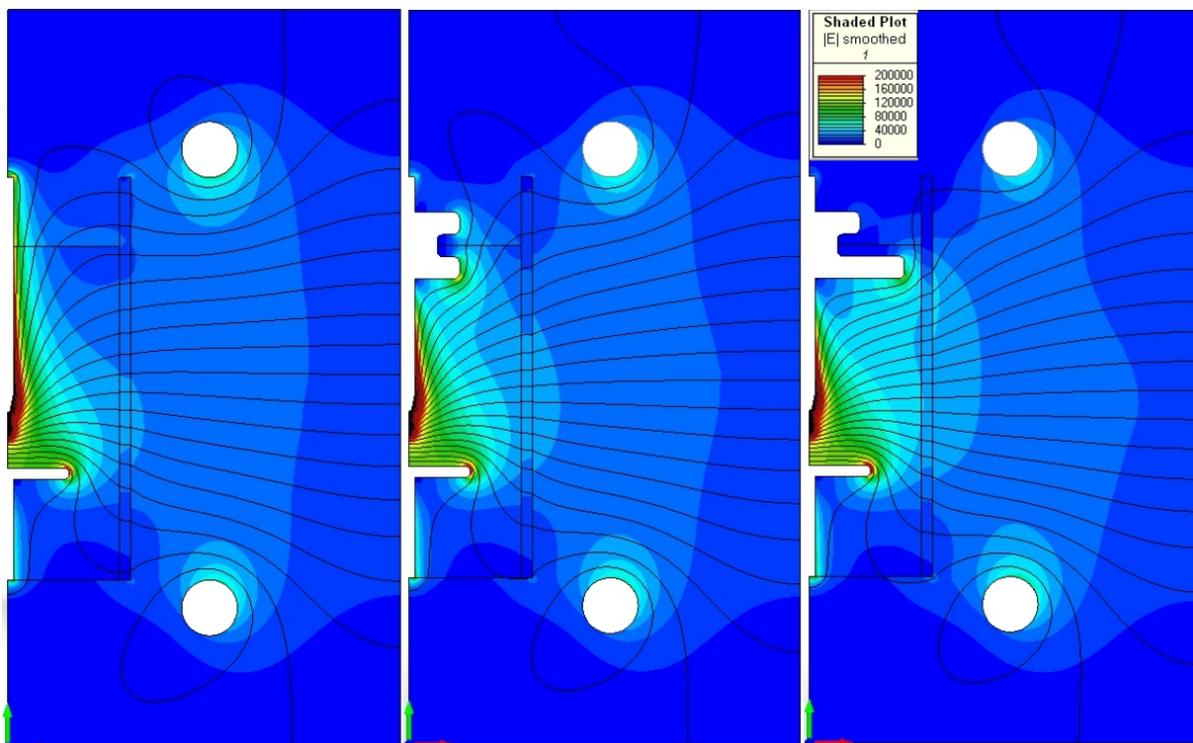


Abbildung 5.4: Kessel mit Schirmtori (links), mit Schirmtori und Schirmeinrichtung Version 1 (mitte) und Schirmtori und Schirmeinrichtung Version 2 (rechts)

Wie in Abbildung 5.4 ersichtlich, wird diese Aufgabe erfüllt. Vor allem mit der Schirmeinrichtung Version 2, mit der die Gleitanordnung zum Großteil vermieden werden kann (siehe Detailansicht Abbildung 5.5). Auf die Feldverteilung im Bereich der Spitze-Platte Anordnung hat dies wieder nahezu keinen Einfluss.

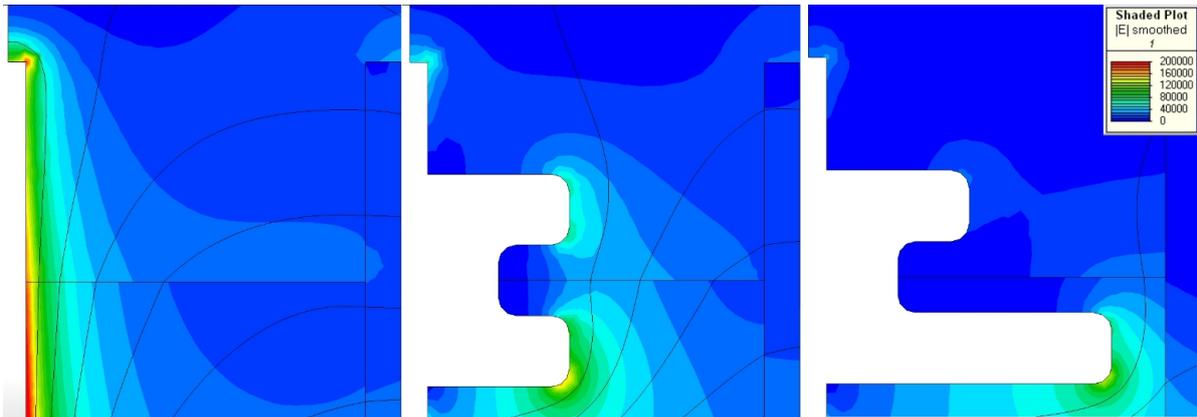


Abbildung 5.5: Detailansicht obere Hochspannungselektrode, Kessel mit Schirmtori (links), mit Schirmtori und Schirmeinrichtung Version 1 (mitte) und Schirmtori und Schirmeinrichtung Version 2 (rechts)

5.4 Öl-Board-Isoliersystem

Für die Simulationen eines Öl-Board-Isoliersystemes wurde das Modell einer solchen Isolieranordnung herangezogen, wie in Abbildung 5.6 ersichtlich ist. Das rot, strichpunktierte Rechteck entspricht dabei dem dargestellten Bereich in den Simulationsbildern.

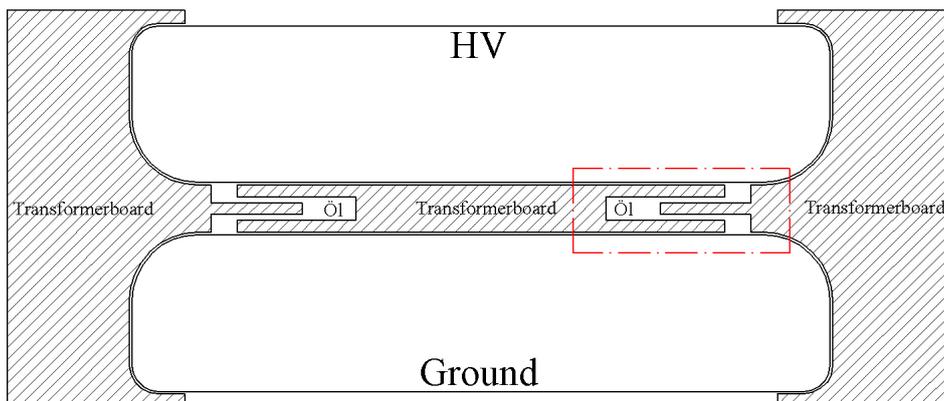


Abbildung 5.6: Isolationsmodell zur Simulation einer Öl-Papier-Isolieranordnung

5.4.1 Stationäres Verhalten

Zur Untersuchung des stationären Verhaltens wurden die Materialeigenschaften variiert und das Feldbild im stationären Zustand untersucht. Die Dielektrizitätszahlen wurden mit $\varepsilon_{\text{Öl}} = 2,2$ und mit $\varepsilon_{\text{Board}} = 4,4$ festgelegt, wobei das Verhältnis der Leitfähigkeiten von 1:10, 1:25 über 1:100 bis 1:1000 verändert wurden. Die Spannung wurde dabei mit 100kV DC festgelegt.

Tabelle 5.1: Materialparameter für die Simulation des Öl-Board-Isliersystems

Leitfähigkeit		
Verhältnis	Board	Öl
-	S/m	S/m
1 : 10	10^{-15}	10^{-14}
1 : 25	10^{-15}	$25 \cdot 10^{-14}$
1 : 100	10^{-15}	10^{-13}
1 : 1000	10^{-15}	10^{-12}

Aufgrund der Aufteilung des Feldes gemäß den Leitfähigkeiten, und den Verhältnissen bei Board und Öl erfolgt eine Verdrängung des Feldes in das Board. Je größer die Leitfähigkeit des Öls im Verhältnis zur Boardleitfähigkeit ist, desto stärker ist dieser Effekt.

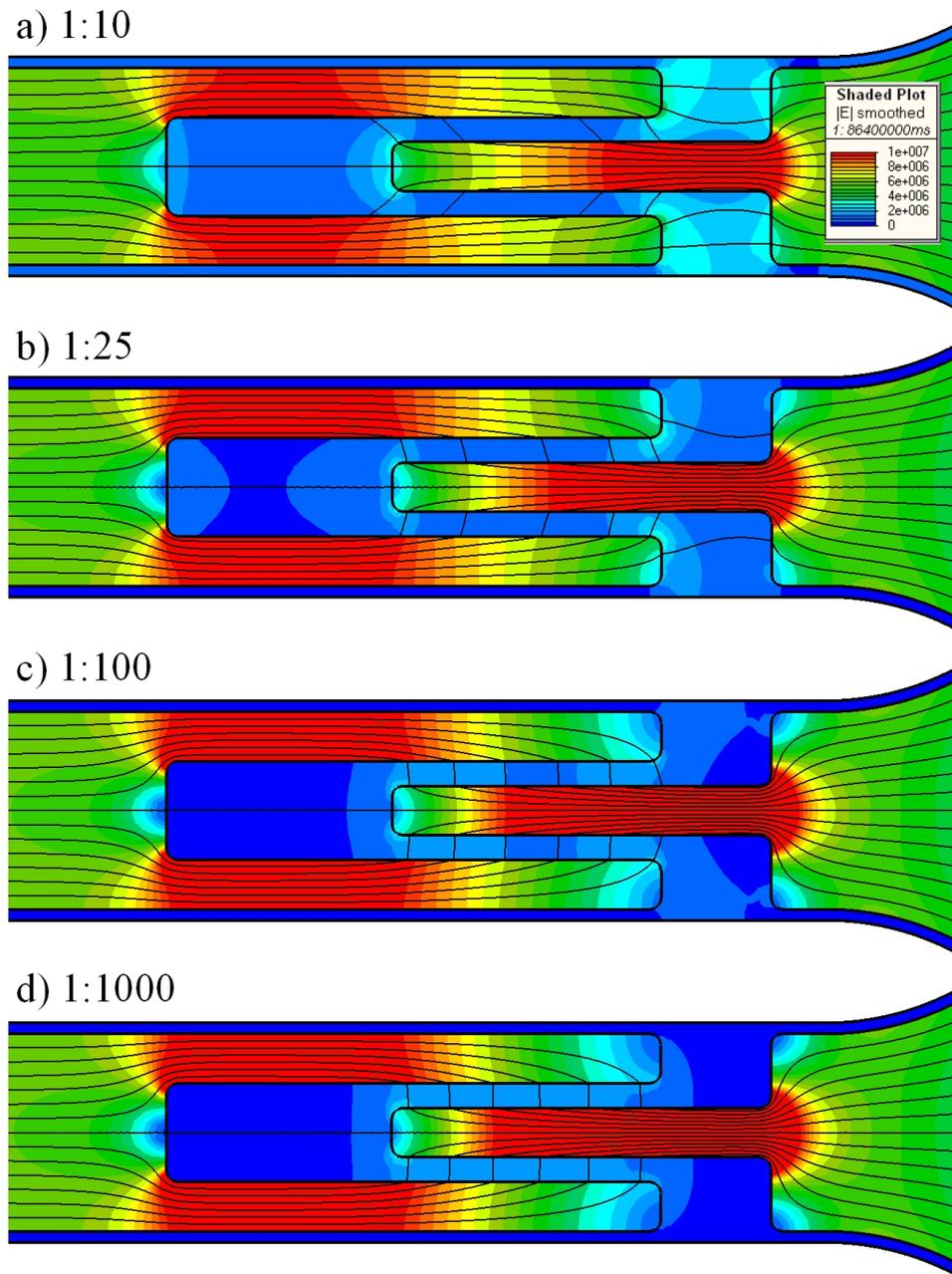


Abbildung 5.7: Feldbild im stationären Zustand bei 100kV DC, Leitfähigkeitsverhältnis a) 1:10, b) 1:25, c) 1:100 und d) 1:1000

Die langsame Verdrängung des Feldes aus dem Öl zum Board kann durch die Alterung der Isolierung erfolgen. Reines Isolieröl weist weder Ionen noch Elektronen die zur Leitfähigkeit notwendig wären auf. Ladungsträger werden aber durch Verunreinigung z.B. bei der Montage oder bei der Raffination eingebracht. Eine weitere Quelle für Ladungsträger sind Alterungsprodukte. Bei der Alterung von Öl-Papier-Isolierungen entstehen

Säuren und Wasser. Säuren dissoziieren beim Vorhandensein von Wasser und bilden Ladungsträger. Dies führt zur Erhöhung der Leitfähigkeit und somit zu einer Verdrängung der elektrischen Belastung einer Öl-Board-Isolieranordnung zum Board, wodurch dieses mit fortschreiten der Alterung stark beansprucht wird (Abbildung 5.7) [10].

5.4.2 Transientes Verhalten

Wird an die Isolieranordnung sprunghaft eine Gleichspannung angelegt, bildet sich im ersten Moment ein kapazitiv-raumladungsfreies Feld aus. Dieses Feld stellt sich gemäß den Dielektrizitätszahlen ein. Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes beginnen nun die in der Isolierung vorhandenen Ladungsträger zu wandern. Es bildet sich ein Stromfluss aus. Unter Vernachlässigung von Polarisierung und Diffusion ergibt sich eine Stromdichte J von:

$$J = E \cdot \sigma \quad (5.1)$$

Aufgrund der anfänglichen Aufteilung des elektrischen Feldes gemäß der Dielektrizitätszahlen und der höheren Leitfähigkeit im Öl, ist im Öl die Stromdichte höher als im Board. Da daher die Ladungsträger im Board nicht so schnell abfließen können wie sie aus dem Öl nachgeliefert werden, kommt es zum Aufbau einer Raumladungszone an den Öl-Board Grenzflächen. Diese Raumladungszonen führen zu einer erhöhten Belastung des Boards wohingehend das Öl entlastet wird. Im stationären Zustand wird schließlich das Board sehr stark beansprucht [2].

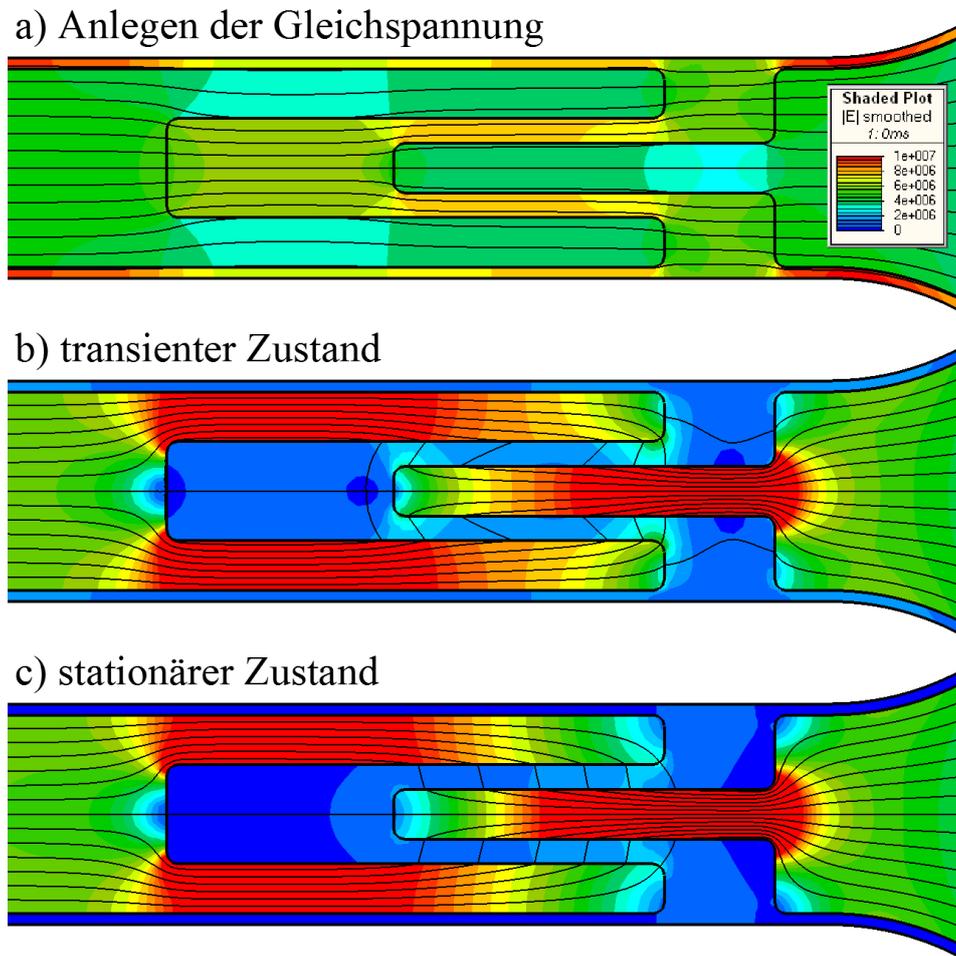


Abbildung 5.8: Verhalten des Öl-Board-Isolationssystems bei 100kV DC, a) unmittelbar nach dem Einschalten der Spannung, b) im transienten und c) im stationären Zustand

Ein zeitliches Maß für den Aufbau der Raumladungen bildet der Quotient aus stationärer Ladung Q_{BDC} und anfänglicher Lade-Stromdichte J [2]:

$$\frac{Q_{BDC}}{J} \quad (5.2)$$

Dieser Quotient kann unter Vernachlässigung von Nichtlinearitäten als Zeitkonstante τ_{DC} betrachtet werden. Dabei gilt:

$$Q_{BDC} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_B \cdot E_{BDC} \quad (5.3)$$

Die Anfangsstromdichte im Öl ergibt sich zu

$$J_{\text{ÖL}} = \frac{E_{\text{ÖL}}}{\rho_{\text{ÖL}}}. \quad (5.4)$$

5.5 Spitze-Platte Anordnung

Simuliert wurde eine Spitze-Platte Anordnung in einem Ölkessel auf dessen Masselektrode sich eine Boardscheibe befindet. Die Materialeigenschaften wurden gemäß Kapitel 5.2 gewählt und eine Spannung von 10kV vorgegeben. Nachfolgende Abbildung zeigt die Feldverteilung bei Wechselspannung.

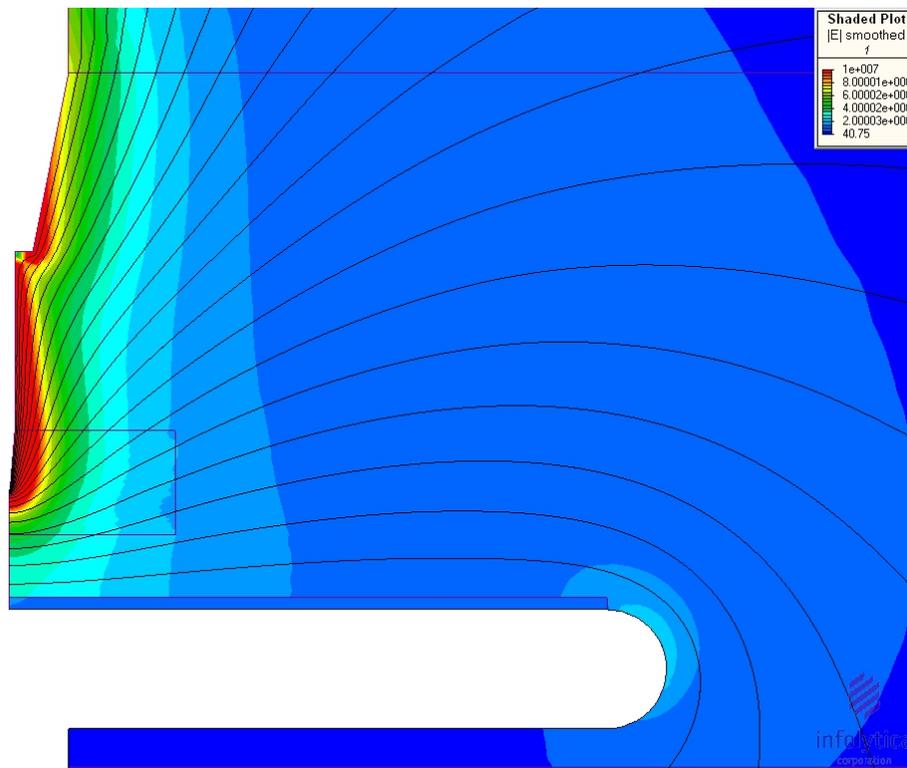


Abbildung 5.9: Spitze-Platte Anordnung mit Board 10kV AC

Bei Wechselspannungsbeanspruchung erfolgt die Aufteilung des Feldes nach den Dielektrizitätszahlen. Daher entsteht ein Sprung in der Feldstärke um den Faktor zwei an der Grenze Öl-Board. Der Sprung ist mit dem kontinuierlichen Übergang der Normalkomponente der elektrischen Verschiebung D_n an der Grenzfläche Öl-Board begründet (siehe Kapitel 3.1). Das Board wird dabei entlastet. Es kommt zu hohen Feldstärken an der

Spitze, der Grund dafür liegt in der Geometrie. Aufgrund der Beziehung

$$E = \frac{U}{r} \quad (5.5)$$

ist ersichtlich, dass aufgrund des geringen Radius r der Spitze eine hohe Feldstärke entsteht. Ein anderes Bild ergibt sich bei Gleichspannungsbelastung (Abbildung 5.10).

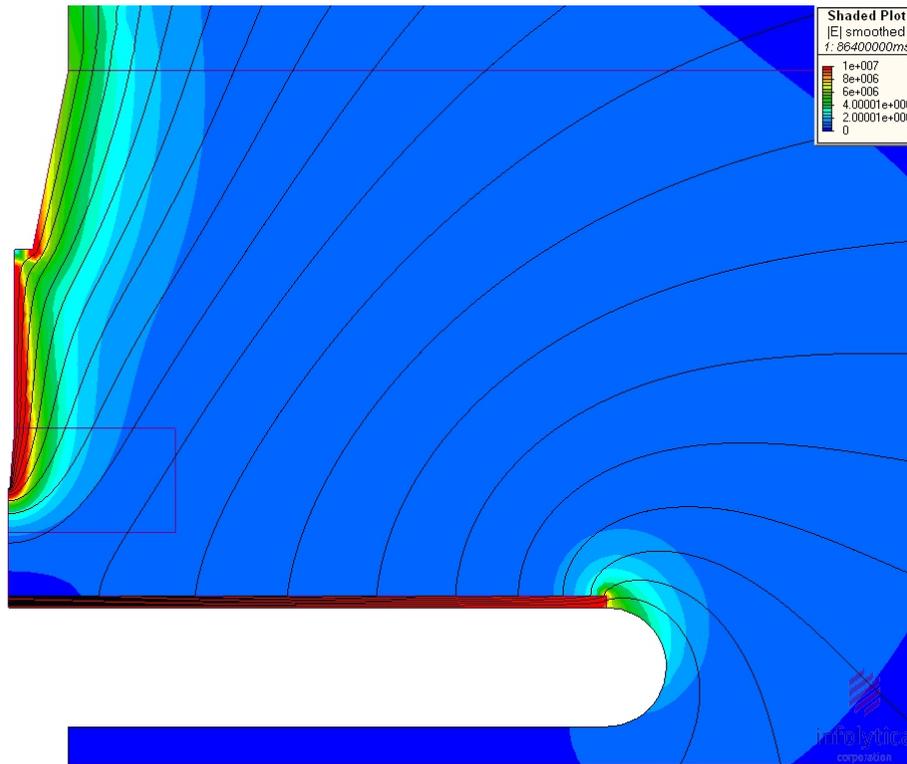


Abbildung 5.10: Spitze-Platte Anordnung mit Board 10kV DC

Bei Gleichspannungsbeanspruchung wird das Board stark belastet. Es entsteht ebenfalls aufgrund der Geometrie eine erhöhte Feldstärke an der Spitze. Die hohe Feldstärke im Board kann aufgrund von Raumladungen die aufgrund verschiedener Leitfähigkeiten von Board und Öl entstehen bzw. durch den kontinuierlichen Übergang der Stromdichte an der Grenzfläche begründet werden (siehe Kapitel 5.4.1).

Weiters ergibt sich auf der Boardoberfläche eine Gleitanordnung..

5.6 Öl-Board-Gleitanordnung

Um eine Gleitanordnung zu simulieren wurde eine Spitze-Platte-Anordnung wie in Abbildung 5.11 herangezogen, siehe dazu auch [16].

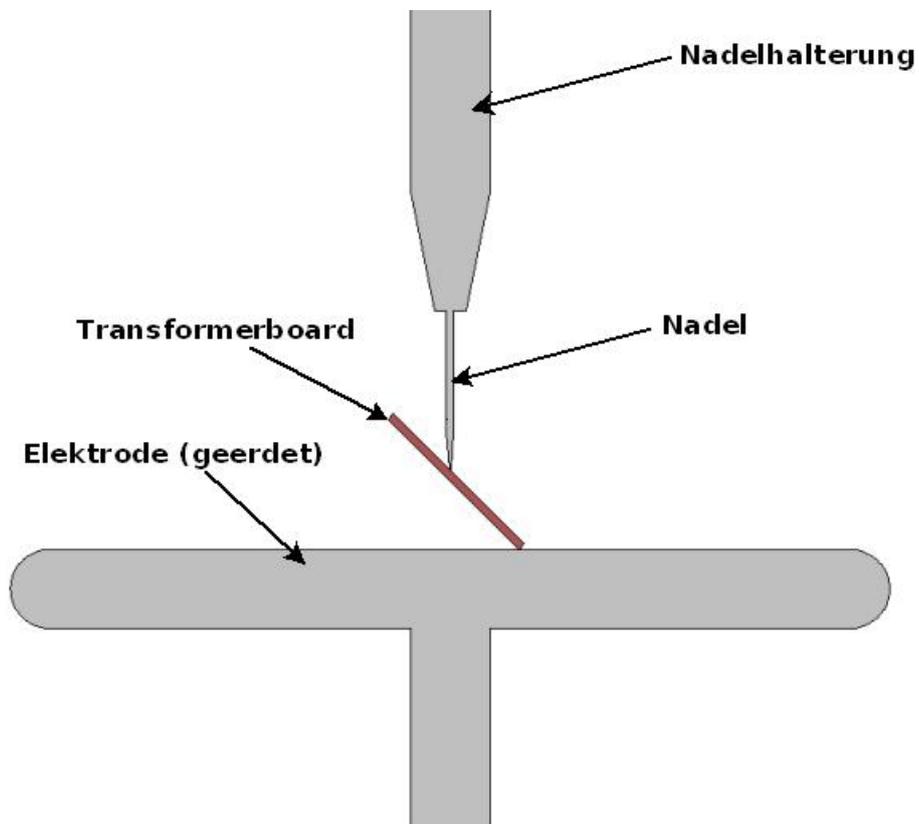


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung der Spitze-Platte-Anordnung.

Die Spitze besteht dabei aus einer Nadel mit einem Spitzendurchmesser von $100\mu\text{m}$. An die Nadelspitze ist eine Boardscheibe in einem Winkel von 45° angelegt. Diese steht auf der Masseelektrode. Die gesamte Anordnung befindet sich in einem Kessel, der mit Öl gefüllt ist. Legt man nun eine Wechselspannung von 10kV an so ergibt sich folgendes Feldbild (Abbildung 5.12).

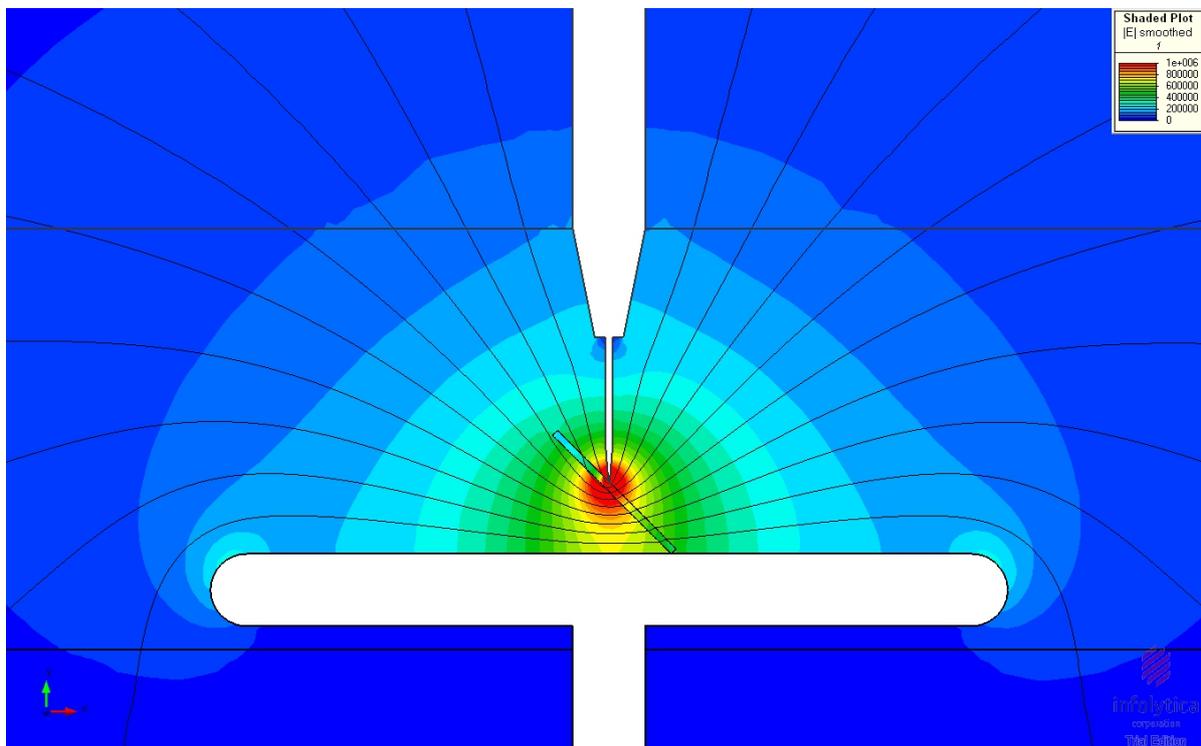


Abbildung 5.12: Öl-Board-Gleitanordnung bei 10kV AC

Das Feldbild ist bis auf den Boardbereich annähernd symmetrisch um die Nadelachse. An der Boardoberfläche herrscht eine Spannungsdifferenz, die Gleitentladungen an der Oberfläche begünstigen. Um die Nadelspitze entsteht geometriebedingt eine erhöhte Feldstärke, das Board wird dabei aufgrund der Feldverteilung nach den Dielektrizitätszahlen weniger belastet als das Öl.

Wird nun eine Gleichspannung mit ebenfalls 10kV angelegt ergibt sich ein Feldbild wie in Abbildung 5.13 dargestellt.

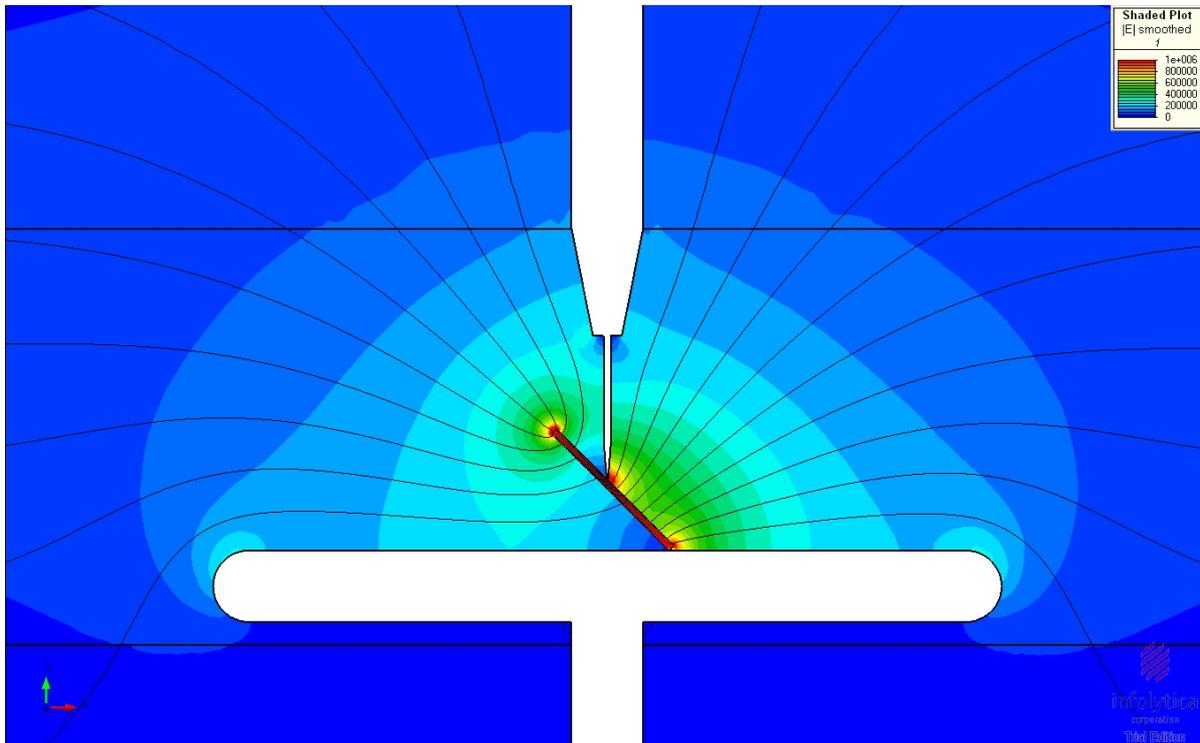


Abbildung 5.13: Öl-Board-Gleitanordnung bei 10kV DC

Das Feld ist nicht mehr symmetrisch sondern wird durch das Board stark verzerrt. Gleitentladungen werden wie bei Wechselspannung begünstigt, ebenfalls entsteht geometriebedingt eine Feldstärkenerhöhung an der Nadelspitze. Das Board wird aufgrund der Feldaufteilung nach den Leitfähigkeiten stark belastet. Weitere Diskussion siehe Kapitel 5.6.1.

5.6.1 Öl-Board-Gleitanordnung, Detailansicht

Die Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen die Detailansicht des Boardbereiches für Wechsel- und Gleichspannung.

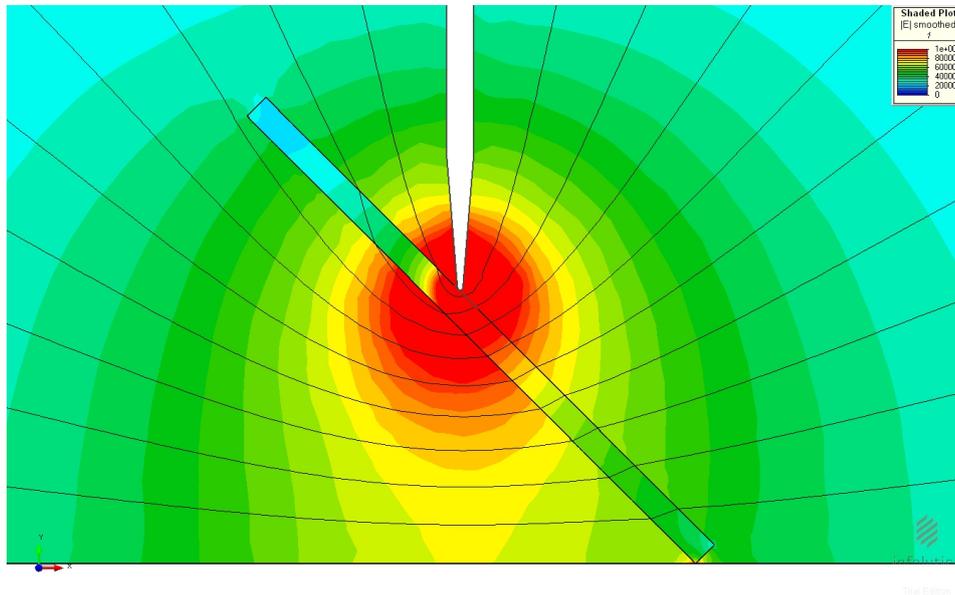


Abbildung 5.14: Spitze-Platte Anordnung mit $100\mu\text{m}$ Spitze und Board im 45° Winkel angelehnt 10 kV AC

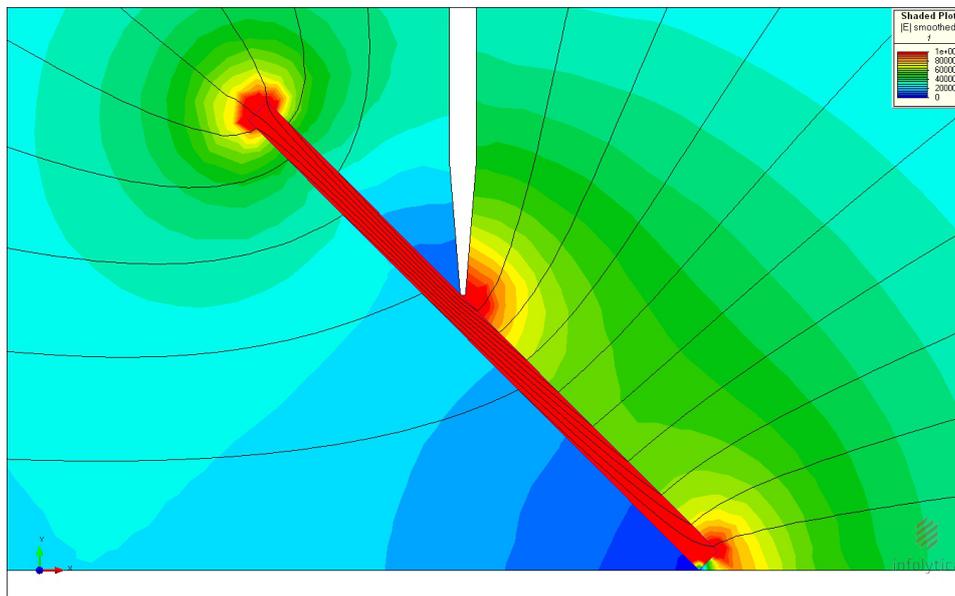


Abbildung 5.15: Spitze-Platte Anordnung mit $100\mu\text{m}$ Spitze und Board im 45° Winkel angelehnt 10 kV DC

Für Wechselspannung (Abbildung 5.14) zeigt sich wie zuvor bereits erwähnt, das sich das Feld annähernd symmetrisch ausbildet. Aufgrund des Dielektrizitätszahlenunterschiedes zwischen Öl und Board von 1:2 kommt es zur Brechung der Linien gleicher Spannung beim Übergang zwischen den Materialien (siehe Kapitel 3.3). Weiters wird die elektrische

Feldstärke im Board gegenüber dem Öl um den Faktor 2 gesenkt. Das Board wird somit entlastet. An den Spannungslinien ist auch zu sehen, dass das Board zum größten Teil nur in Längsrichtung belastet wird.

Bei Gleichspannung (Abbildung 5.15) zeigt sich ein stark verändertes Bild. Die Gleitanzordnung an der Oberseite des Boards bleibt zwar in ähnlicher Weise erhalten, insgesamt ist das Feldbild nicht mehr symmetrisch. Das Feld konzentriert sich im Board und wird dadurch stark belastet. Es wird auch nicht mehr in Längsrichtung sondern fast ausschließlich in Querrichtung belastet. Somit wird fast das gesamte Feld über die Dicke des Board abgebaut. Es zeigt sich auch eine Schirmwirkung unter dem Board. Diese Effekte sind durch den Aufbau von Raumladungen durch die verschiedenen Abfließgeschwindigkeiten der Ladungsträger in Board und Öl zu erklären.

An der Oberseite des Boards stauen sich Ladungsträger, da sie im Board nicht so schnell abfließen können wie im Öl. An der Unterseite fließen die Ladungsträger im Öl schnell in Richtung Masselektrode ab. Es entsteht somit an der Oberseite ein Ladungsträgerüberschuss, wohingehend an der Unterseite ein Ladungsträgermangel herrscht. Je extremer die Unterschiede in der Leitfähigkeit, desto stärker ist dieser Effekt. Das führt dazu, dass der Isolierstoff mit geringerer Leitfähigkeit, in diesem Fall das Board, stärker belastet wird.

5.7 Kessel zur Leitfähigkeitsuntersuchung

Für Leitfähigkeits- und Teilentladungsuntersuchungen von mineralischen Isolieröl und Transformerboard wurde ein Prüfkessel wie in Abbildung 5.16 eingesetzt (siehe [15] und [16]). Die Hochspannung wurde dabei von unten eingeleitet. Der Schirm hat die Aufgabe Störungen von außen zu unterdrücken und sicherzustellen, dass nur der Durchgangswiderstand und nicht auch der Oberflächenwiderstand mitgemessen wird (siehe Kapitel 1.1.2).

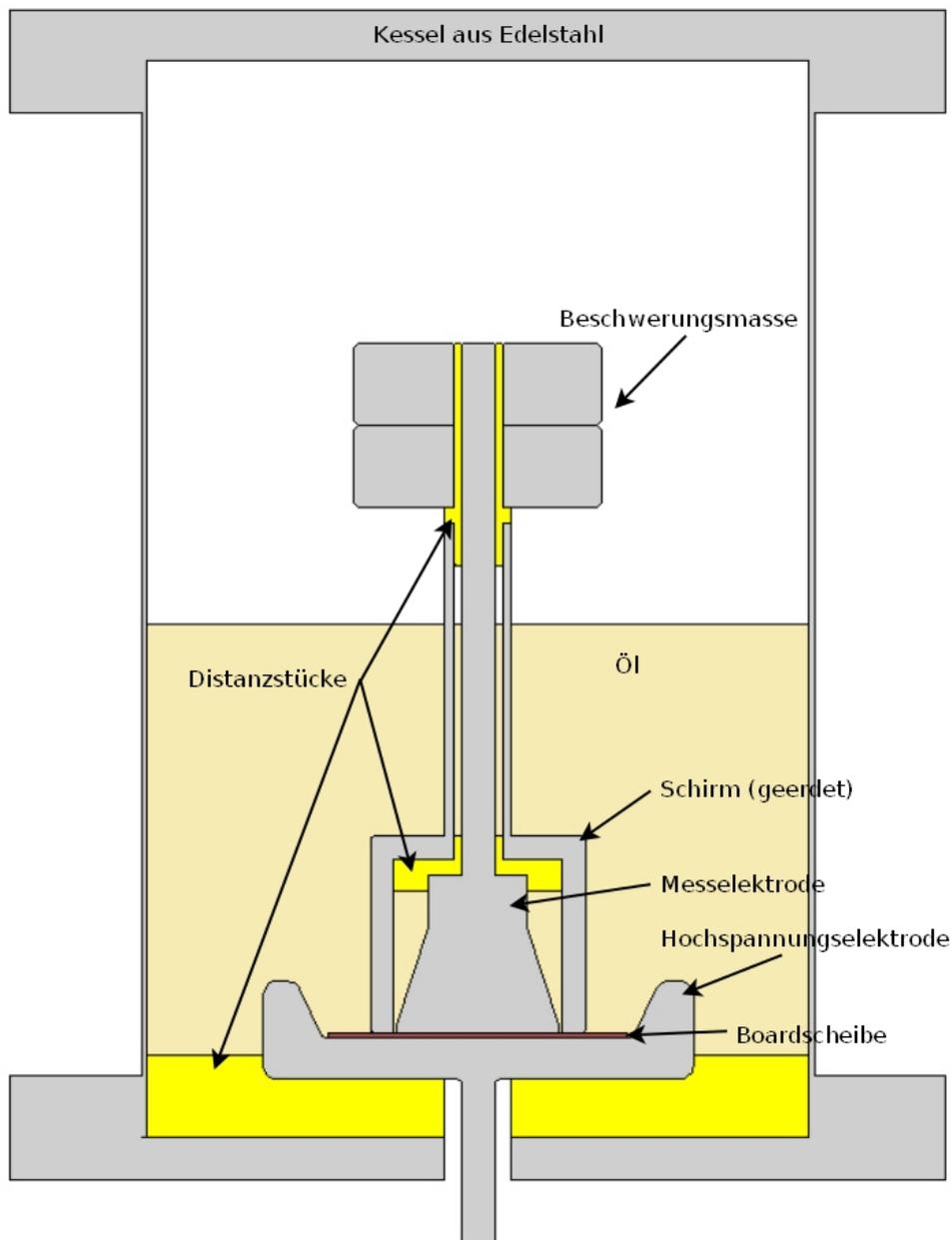


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung des Prüfkessels

Die Simulationen wurden mit einer Gleichspannung von 20kV durchgeführt. Dies ist auch die maximale Spannung bei der Leitfähigkeitsmessungen durchgeführt wurden (siehe [16]). Abbildung 5.17 zeigt den Elektrodenbereich des Prüfkessels.

Es ist zu erkennen, dass das Feld in das Board gedrückt wird. Dadurch entsteht auch eine Gleitanordnung außerhalb der Schirms. Das ist allerdings unkritisch, da die Messelektrode ohnedies vom Schirm abgeschirmt wird. Im Zwischenraum von Messelektrode und Schirm ist der Bereich praktisch feldfrei. Daher wurden hier Sensoren für Feuchtigkeit

und Temperatur eingesetzt [16].

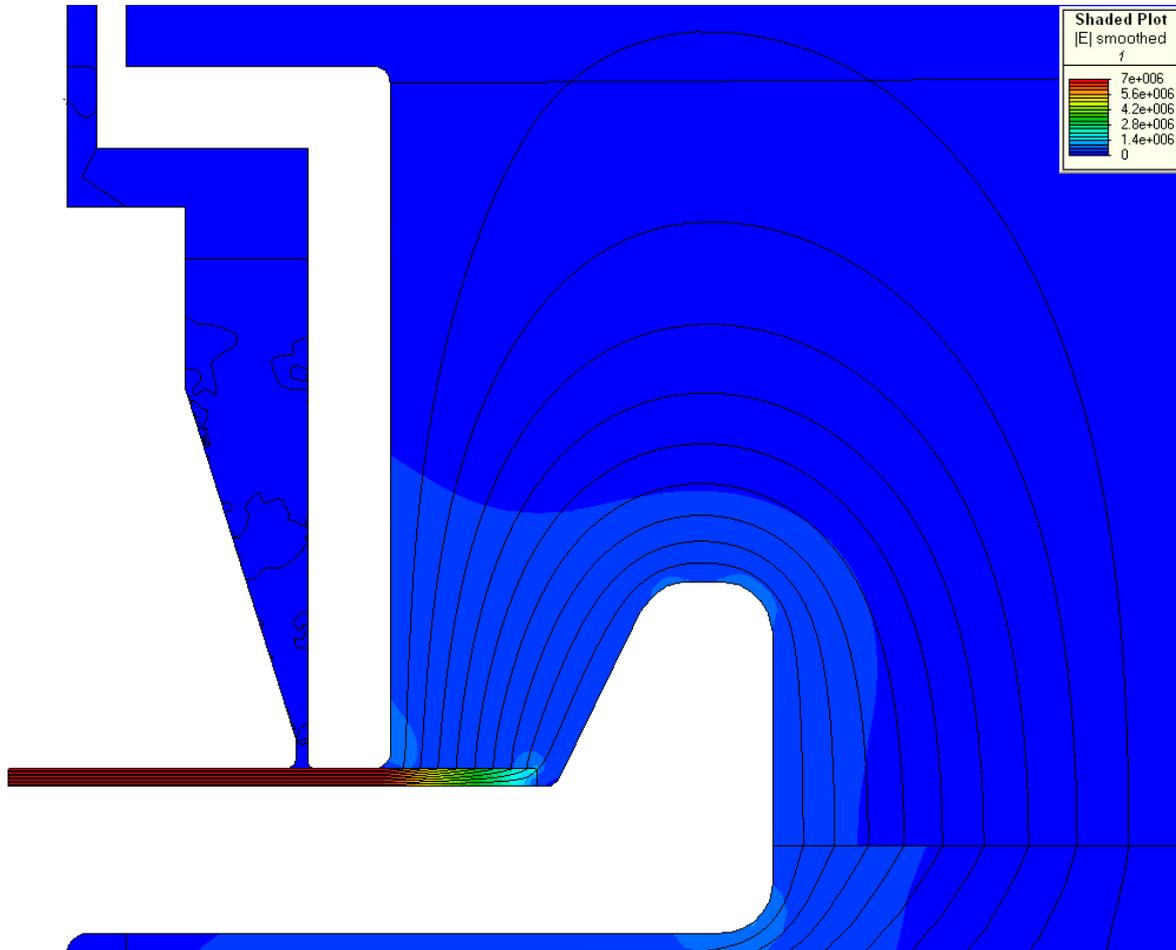


Abbildung 5.17: Detailansicht des Elektrodenbereiches

Für die Messung der Leitfähigkeit ist der Durchgangswiderstand interessant. Daher ist es erforderlich im Messbereich (unter der Messelektrode) ein möglichst homogenes Feld zu erzeugen. Abbildung 5.18 zeigt den Bereich des Boards.

Wie zu erkennen ist, ist der Bereich unter der Messelektrode nahezu ideal homogen. Der Grund liegt vor allem im Leitfähigkeitsunterschied zwischen dem Öl und dem Board. Wie bereits zuvor erwähnt erfolgt dadurch die Verdrängung des Feldes in das Board. Aufgrund des großen Leitfähigkeitsunterschiedes von 1:100 zwischen Öl und Board (siehe Kapitel 5.2) ist die Verdrängung groß und erzeugt damit ein homogenes Feld.

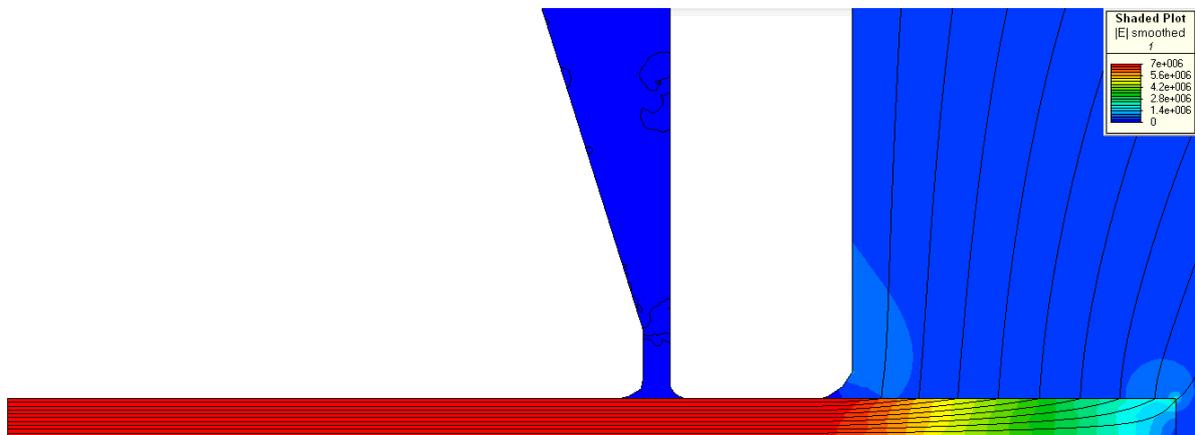


Abbildung 5.18: Detailansicht der Boardscheibe bei 20kV DC

Zum Vergleich, die selbe Anordnung mit 20kV Wechselspannung (Abbildung 5.19). Das Feld ist zwar unter der Messelektrode noch immer sehr homogen, an den Randbereichen ist dies aber nicht mehr der Fall. Es entstehen vor allem auch Feldüberhöhungen im Bereich der Abrundungen zwischen Elektrode und Boardscheibe.

Die elektrische Feldstärke nimmt, im Verhältnis zur Beanspruchung mit Gleichspannung, im Board nach außen hin sehr schnell ab. Betrachtet man den Spannungsverlauf an der Oberfläche der Boardscheibe ist zu erkennen, dass sich bei Gleichspannung das Feld gleichmäßig über die gesamte Länge des Boards abbaut. Bei Wechselspannungsbeanspruchung ist dieser Bereich auf die Umgebung der Schirmelektrode begrenzt. Daraus folgt eine erhöhte Spannungsbelastung, die allerdings räumlich begrenzter ist.

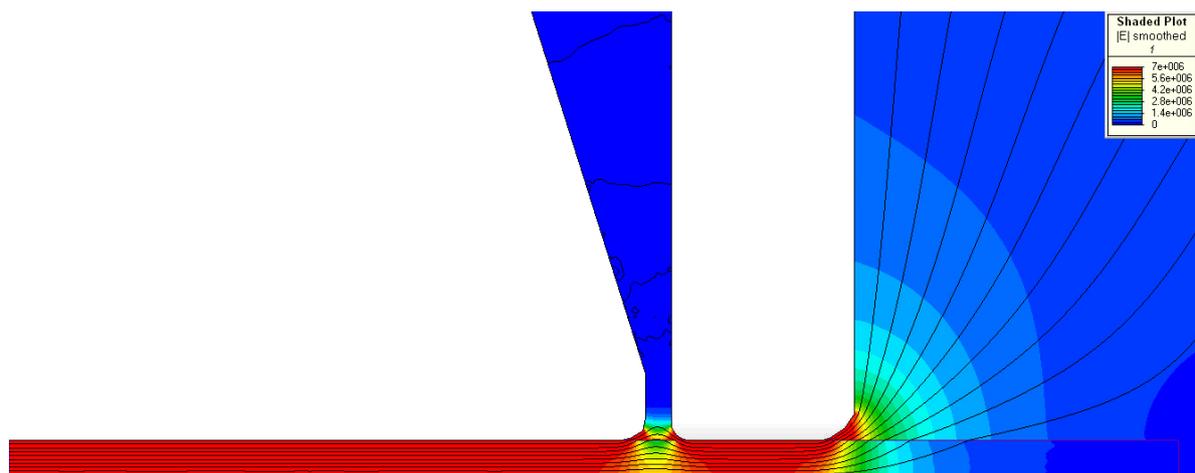


Abbildung 5.19: Detailansicht der Boardscheibe bei 20kV AC

6 Resümee

6.1 Wirkung von Schirmeinrichtungen

Durch das Anbringen von Schirmtori an einem Prüfkessel, können die Feldstärken an kritischen Bereichen reduziert werden. Es wird die Gleitanordnung an der Grenzfläche Öl-Luft verringert. Dabei wird das Verhalten im Messraum praktisch nicht verändert (Abbildungen 5.2, 5.3).

Wird zusätzlich eine Schirmeinrichtung in rotationssymmetrischen C-förmigen Profil hinzugefügt (Kapitel 5.3.2), wird das Verhalten noch weiter verbessert. Die Gleitanordnung wird noch weiter verringert (Abbildung 5.5).

6.2 Öl-Board-Isoliersystem

Das Isolationsmodell dient zur Nachbildung einer Öl-Board-Isolieranordnung unter Gleichspannung. Am Anfang wurde das Verhalten einer solchen Anordnung bei verschiedenen Ölleitfähigkeiten untersucht. Dies soll die alterungsbedingte Zunahme der Leitfähigkeit nachbilden. Die Simulationsparameter wurden dabei gemäß Tabelle 5.1 eingestellt. Wie in Abbildung 5.7 ersichtlich, erfolgt durch die Zunahme der Ölleitfähigkeit eine Verschiebung der elektrischen Belastung zum Board. Daraus folgt, dass bei gealterten Isolationen das Board gegenüber nicht gealterten Isolieranordnungen stärker beansprucht wird.

Bei einer sprunghaften Belastung einer Öl-Board-Isolieranordnung bildet sich im ersten Moment eine kapazitiv-raumladungsfreie Feldverteilung aus (Abbildung 5.8). Die Aufteilung des Feldes erfolgt dabei anhand der Dielektrizitätszahlen. Das Verhältnis der Feldstärken zwischen Öl und Board beträgt dabei 2:1. In weiterer Folge beginnt die Ausbildung von Raumladungszonen, bis der Endzustand erreicht ist. Die Aufteilung der Feldstärken erfolgt hier durch die Leitfähigkeiten. Es ergibt sich somit eine Verschiebung der elektrischen Belastung vom Öl hin zum Board, wobei durch das Leitfähigkeitsverhältnis zwischen Öl und Board von 100:1 das Board eine sehr viel höhere Belastung erfährt als bei der Belastung durch Wechselspannung. Mit fortschreitender Zeit kommt es somit vom Einschaltzeitpunkt bis zum stationären Zustand zu einer starken Veränderung der

Feldverteilung.

6.3 Spitze-Platte Anordnung

Wird an eine Spitze-Platte Anordnung mit Boardscheibe Spannung angelegt so ergibt sich für das Board unterschiedliche Belastungen zwischen Gleich- und Wechselspannung (Abbildungen 5.9, 5.10). Im Falle von Gleichspannung wird das Feld aufgrund der Leitfähigkeitsunterschiede in das Board gedrängt und wird damit stark belastet. Weiters ergibt sich eine Gleitanordnung an der Boardoberfläche.

6.4 Öl-Board-Gleitanordnung

Bei Wechselspannungsbeanspruchung ergibt sich ein annähernd symmetrisches Feldbild. Am Board werden Gleitentladungen begünstigt. An der Nadelspitze entsteht geometriebedingt eine erhöhte Feldstärke.

Wird Gleichspannung angelegt, wird das Feld in das Board gedrängt. Die Feldverteilung ist nicht mehr symmetrisch. Das Board wird im Gegensatz zu Wechselspannung nur mehr in Querrichtung belastet. Gleitentladungen werden ebenfalls begünstigt. Durch das Board entsteht eine Schirmwirkung im Bereich unterhalb des Boards. (Abbildungen 5.14, 5.15)

6.5 Kessel zur Leitfähigkeitsuntersuchung

Das Feld wird bei Gleichspannung ebenfalls in das Board gedrängt. Daraus ergibt sich eine homogene Feldverteilung im zu messenden Bereich (Abbildung 5.18). Damit ist diese Anordnung sehr gut für Leitfähigkeitsmessungen geeignet. Die Schirmelektrode erzeugt einen praktisch Feldfreien Raum zwischen Messelektrode und Schirm (Abbildung 5.17). Dieser Bereich kann für Sensoren genutzt werden.

7 Zusammenfassung

HGÜ-Transformatoren kommen in Bezug auf den steigenden Energiebedarf immer mehr zum Einsatz. Durch die Beanspruchung der Isolierung mit Wechsel- sowie auch mit Gleichspannung ist es wichtig das Verhalten der Isolierung bei den entsprechenden Belastungen zu kennen.

In Kapitel 1 wird die Messung der elektrischen Eigenschaften von Öl-Board Isolationen dargestellt. Durch Leitfähigkeitsmessungen können der Einfluss von Feuchte, Temperatur, usw. auf die Isolation untersucht werden. Mittels PDC- und FDS-Analyse können ganze Transformatoren geprüft werden und damit der Alterungszustand abgeschätzt werden. Für Isolationen treten verschiedene Beanspruchungen auf. Beginnend bei Gleich- über Schaltspannungen bis hin zu sehr schnell ansteigenden Spannungen. Je nach Beanspruchung treten verschiedene Verhalten der Isolationen auf. Bei der Beanspruchung von Mischdielektrika ist vor allem das Verhältnis der Leitfähigkeiten für Gleichspannung und der Dielektrizitätszahlen für Wechselspannung maßgebend für die Feldverteilung.

Die Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Feldberechnung wird in Kapitel 2 dargestellt. Die grafische Feldberechnung wird aufgrund von Regeln aufgrund der Eigenschaften von Feld und Äquipotentiallinien durchgeführt. Man erhält eine quantitative Aussage über die Feldverteilung. Bei genauer Arbeit sind auch Aussagen über die Feldgrößen möglich. Mit analytischer Feldberechnung lassen sich Elektrodenanordnungen genau berechnen. Lösungen sind allerdings nur für spezielle Elektrodenanordnungen möglich. Daher geht man zu numerischen Feldberechnungen über. Hier ist die Berechnung von beliebig komplizierten Anordnungen möglich. Aufgrund der Diskretisierung des Feldraumes, der Interpolation des Potentials in den Elementen und des Rechenprinzips kommt es zu Fehlern. Diese können durch die Größe der Elemente sowie der Anzahl der Iterationsschritte minimiert werden. Dies macht allerdings einen erhöhten Rechenaufwand erforderlich.

Das Verhalten der Feldgrößen in geschichteten Dielektrika zeigt Kapitel 3. Es können quer-, längs- und schräg geschichtete Dielektrika unterschieden werden. Ausgehend von einem Plattenkondensator mit Mischdielektrikum unter Wechselspannung wird die Aufteilung der Feldgrößen sowie das Verhalten von Normal- und Tangentialkomponenten an den Grenzflächen gezeigt.

Kapitel 4 zeigt den Aufbau einer Öl-Board Isolationsanordnung und die Herstellung von Öl und Papier. Mineralöl wird durch fraktionierter Destillation gewonnen. Um als

Isolieröl verwendet werden zu können, muss es danach noch gereinigt und getrocknet werden. Papier wird aus ungebleichter Sulfatzellulose hergestellt. Daraus werden die Zellulosefasern getrennt und daraus Papier erzeugt. In weiterer Folge wird das Papier getrocknet und im letzten Schritt mit Öl imprägniert. Das aus Öl und Papier aufgebaute Isolationssystem besteht aus Ölkanälen die durch Boardbarrieren getrennt sind. Dies führt zu einer Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit. Das Isoliermedium Öl hat zusätzlich die Aufgabe der Kühlung.

Sämtliche Simulationen sind in Kapitel 5 dargestellt. Es wurden zuerst der Einfluss von Schirmeinrichtungen an Prüfkessel untersucht. Es zeigt sich das dadurch die Feldverteilung an kritischen Stellen verbessert werden kann. Weiters wurde das Verhalten einer Öl-Board Isolation eines Transformators bei Gleich- und Wechselspannung untersucht. Allgemein besteht der Unterschied zwischen Gleich- und Wechselfeldbelastung in der Feldaufteilung. Bei Wechselspannung ist diese von den Dielektrizitätszahlen abhängig, wohingehend bei Gleichspannung die Leitfähigkeiten die Aufteilung beeinflussen. Für die Simulation einer Transformatorisolation wurde ein Isolationsmodell herangezogen. Beim Anlegen einer Gleichspannung entsteht im ersten Moment ein kapazitiv raumladungsfreies Feld. Dieses teilt sich nach den Dielektrizitätszahlen auf. Mit fortschreitender Zeit verschiebt sich die Belastung immer weiter in Richtung Board bis es im stationären Zustand fast die gesamte Beanspruchung aufnehmen muss, wohingehend das Öl entlastet wird.

Durch Alterung wird sich die Leitfähigkeit des Öls erhöhen, was ebenfalls dazu führt, das das Feld vom Öl in das Board verdrängt wird.

Es wurden weiters Feldsimulationen eines Prüfkessels für Leitfähigkeitsanalysen von mineralischen Isolieröl und Transformer-Board durchgeführt. Hier zeigt sich das es aufgrund des Leitfähigkeitsverhältnisses zwischen Board und Öl zu einem nahezu idealen homogenen Feld unter der Messelektrode kommt. Bei Wechselspannung ist die Feldverteilung unter der Messelektrode zwar ebenfalls sehr homogen, an den Rändern kommt es aber bereits zu Feldverzerrungen und vor allem zu Feldüberhöhungen im Bereich der Rundungen zwischen Elektrode und Board.

In Kapitel 6 sind die zusammengefassten Ergebnisse der Simulationen dargestellt.

8 Abkürzungs-/Symbolverzeichnis

AC	engl. Alternating Current (Wechselstrom)
DC	engl. Direct Current (Gleichstrom)
PDC	Polarization and Depolarization Current
FDS	Frequency Domain Spectroscopy
R_x	Prüflingswiderstand (in Ω)
C_x	Prüflingskapazität (in F)
C	Kapazität (in F)
R_3, R_4	Abgleichwiderstand (in Ω)
C_4	Abgleichkapazität (in F)
C_N	Messkapazität (in F)
C_0	Vergleichskapazität (in F)
Z_x, Z_3, Z_N, Z_4	Messimpedanz (in Ω)
Y_4	komplexer Leitwert (in S)
R_{IS}	Isolationswiderstand (in Ω)
R_D	Durchgangswiderstand (in Ω)
R_O	Oberflächenwiderstand (in Ω)
d	Abstand (in m)
A	Fläche (in m^2)
$i_p(t)$	Polarisationsstrom (in A)
$i_d(t)$	Depolarisationsstrom (in A)
J	Stromdichte (in A/m^2)
Q_{BDC}	Ladung im Board (in C)
E	elektrische Feldstärke (in V/m)
E_{BDC}	elektrische Feldstärke im Board (in V/m)
U	Spannung (in V)
U_m	höchste Betriebsmittelspannung (in V)
\hat{U}_{LE}	Spitzenwert der Leiter-Erd-Spannung (in V)
\hat{U}_{Ll}	Spitzenwert der Leiter-Leiter-Spannung (in V)
r	Radius (in m)
X_{gl}	Gleichgewichtsfeuchtigkeit
α	Winkel in $^\circ$
σ	Leitfähigkeit (in S/m)
κ	Leitfähigkeit (in S/m)
ρ	spezifischer Widerstand (in Ωm), Ladungsdichte (in As/m^3)
ω	Kreisfrequenz ($2\pi f$)

ε	Dielektrizitätszahl
ε_r	relative Dielektrizitätszahl
ε_B	relative Dielektrizitätszahl von Board
ε_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums ($8,854187871762 \cdot 10^{-12} \text{As}/(\text{Vm})$)
ε^*	komplexe Dielektrizitätskonstante
ε'	Realteil der komplexen Dielektrizitätszahl
ε''	Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätszahl
$\tan \delta$	Verlustfaktor
δ	Verlustwinkel
φ	elektrisches Potential
η	Ausnutzungsfaktor

Literaturverzeichnis

- [1] H.P. MOSER: *Transformerboard*, Birkhäuser AG, 1979.
- [2] H.P. MOSER: *Transformerboard II*, Graz: Druck von Styria, 1987.
- [4] M. KOCH, S. TENBOHLEN: *ETG Fachbericht 99: Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum*, VDE-Verlag GmbH, 2005, ISBN 3-8007-2879-6.
- [5] R. BÄRSCH, J. KINDERSBERGER: *ETG Fachbericht 110: Nichtlineare dielektrische Funktionseigenschaften von Dielektrika*, VDE-Verlag GmbH, 2008, ISBN 978-3-8007-3080-3.
- [6] A. KÜCHLER: *Hochspannungstechnik 3, neu bearbeitete Auflage*, Springer-Verlag, 2009, ISBN 978-540-78412-8.
- [7] G. HILGARTH: *Hochspannungstechnik, 3. durchges. Auflage*, Teubner, 1997, ISBN 3-519-26422-6
- [8] D. KIND, K. FESER: *Hochspannungsversuchstechnik, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage*, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1995, ISBN 3-528-43805-3
- [9] MIDEL: *Vergleich mit alternativen Technologien*, http://www.midel.com/uploads/midel/documents/technical/German%20Technical%20Documents/MIDEL_7131_Comparison_to_Alternative_Technologies_Ger%5B1%5D.pdf, Download am 7.6.2012
- [10] J. FABIAN, B. JOCHAM, B. NADER, R. WOSCHITZ, M. MUHR: *Stresses of Oil/Board Insulation Systems at HVDC*, IEEE Catalog Number CFP11aD-PRT& ISBN 1-4577-0983-8
- [11] V. DAHINDEN, K. SCHULTZ, A. KÜCHLER: *Function of Solid Insulation in Transformers*, transform 98, München, 1998
- [12] G. LEHNER: *Elektromagnetische Feldtheorie: für Ingenieure und Physiker*, Springer-Verlag, 2008, ISBN 978-3540-77681-9

- [13] H. RÖMER, M. FORGER: *Elementare Feldtheorie*, Wiley-VCH-Verlag Weinheim, 1993, ISBN 3-527-29065-6
- [14] M. KOCH, S. TENBOHLEN: *Signifikante Kenngrößen für die Alterung des Isoliersystems in Leistungstransformatoren*, Stuttgarter Hochspannungssymposium 2010, Stuttgart, 2010
- [15] B. NADER: *Dimensionierung eines Prüfkessels zu Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Öl-Board-Isoliersystems unter Einfluss der Feldstärke, Temperatur sowie Boardfeuchte*, Masterarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2012
- [16] J. FABIAN: *Dielektrische Kennwerte von Isolierstoffen bei Gleichspannungsbeanspruchung, Leitfähigkeits- und Teilentladungsverhalten von mineralischen Isolieröl und Transformer-Board*, Dissertation, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, 2012, OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik, ISBN 978-3-85133-072-4