

**Optimierung von Applikationen aus der
Hochspannungstechnik mit dünnen Schichten
aus mikrovaristorgefüllten Polymeren
mithilfe von nichtlinearen transienten 3D Simulationen**

vom Fachbereich E (Elektrotechnik, Informationstechnik, Medientechnik) der Bergischen Universität Wuppertal zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Daniel Weida geboren am 23. Mai 1982 in Emmendingen

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Markus Clemens

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

Tag der mündlichen Prüfung: 25. November 2011

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20120405-122218-6

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20120405-122218-6>]

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	5
2.1. Mikrovaristoren als feldsteuernde Materialien	5
2.1.1. Gleitanordnungen in der Hochspannungstechnik .	5
2.1.2. ZnO-Mikrovaristormaterial	6
2.1.3. Modellierung der elektrischen Eigenschaften . . .	8
2.2. Simulationsmethodik	15
2.2.1. Aufgabe der Simulationswerkzeuge	15
2.2.2. Methode der finiten Elemente	15
2.2.3. Nichtlineare elektro-quasistatische Simulation . .	17
2.2.4. Thermodynamische Simulation	21
2.3. Erstellung der Simulationseingangsdaten	25
2.3.1. Geometrische Modellerstellung	25
2.3.2. Modellierung des Außenraums	25
2.3.3. Diskretisierung mit Tetraedern	26
2.3.4. Angelegte Spannung	26
2.4. Auswertung der Simulationsdaten	26
2.5. Automatisierte Parameterstudien	28

3. Erweiterung der Simulationsmethodik	31
3.1. Isoparametrische Elemente höherer Ordnung	31
3.1.1. Implementierung der isoparametrischen Elemente	32
3.1.2. Konvergenzstudie	34
3.2. Modellierung dünner Schichten	41
3.2.1. Implementierung der dünnen Schichten	43
3.2.2. Vergleich der 2D+3D und 3D+3D-Modellierung .	46
3.2.3. Bewertung des Konvergenzverhaltens	47
4. Anwendungsprobleme	57
4.1. Langstabilisatoren	57
4.1.1. Verwendungspotential von Mikrovaristoren	58
4.1.2. Simulationsmodell der Langstabilisatoren	60
4.1.3. Simulationsergebnisse der Langstabilisatoren . . .	63
4.1.4. Vergleich mit den Tests im Hochspannungslabor .	70
4.2. Endenglimmschutz für elektrische Maschinen	72
4.2.1. Mögliche Vorteile des Mikrovaristormaterials . . .	72
4.2.2. El. Leitfähigkeit der Endenglimmschutzlacke . . .	74
4.2.3. Simulationsmodell des Endenglimmschutzes . . .	76
4.2.4. Simulationsergebnisse zum Endenglimmschutz . .	78
4.2.5. Thermodynamische Simulation	83
4.2.6. Auswertung der Anwendung Endenglimmschutz .	86
4.3. Kabelgarnituren	88
4.3.1. Einsatzmöglichkeiten des Mikrovaristormaterials .	88
4.3.2. Simulationsmodell einer mikrovaristorgefüllten Ka- belgarnitur	90
4.3.3. Simulation bei sinusförmiger Beanspruchung . . .	93
4.3.4. Simulation bei Impulsbeanspruchung	102

5. Zusammenfassung	109
Literatur	113
A. Anhang	127
A.1. Simulation mit MEQSICO	127
A.2. Konvergenzstudie aus Kapitel 3.1	128
A.2.1. Analytische Lösungen der Konvergenzstudie . . .	128
A.2.2. Bewertung des Konvergenzverhaltens	129
Abbildungsverzeichnis	131
Tabellenverzeichnis	135

1. Einleitung

Seit dem Jahre 2000 werden mikrovaristorgefüllte Silikon-Elastomere erfolgreich in Kabelgarnituren im Mittelspannungsbereich eingesetzt [A95]. Abgesehen davon sind jedoch wenig weitere kommerzielle Anwendungen bekannt. Dabei bieten diese gefüllten Elastomere viele Vorteile gegenüber den bisher für die Feldsteuerung in der Hochspannungstechnik eingesetzten Materialien. Im Gegensatz zu rußgefüllten Materialien sind die elektrischen Eigenschaften mikrovaristorgefüllter Polymere deutlich weniger von Umgebungsparametern wie z.B. Dehnung, Temperatur oder Druck abhängig. In der Verarbeitung zeichnen sie sich durch eine gute Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften aus. Sie enthalten keinen Schwefel, der den Vernetzungsmechanismus vom reaktiven Silikon-Polymer zum Silikon-Elastomer inhibiert. Das bisher für den Enden- glimmschutz auf den Wicklungen elektrischer Maschinen verwendete Siliciumkarbid (SiC) besitzt gegenüber mikrovaristorgefüllten Polymeren eine geringere elektrische und thermische Festigkeit, stärker streuende Materialeigenschaften, und es verursacht höhere Kosten in der Verarbeitung aufgrund der SiC-Härte.

Motivation und Ziel der Arbeit

Trotz aller Vorteile haben mikrovaristorgefüllte Polymere bis heute noch keine weite Verbreitung gefunden. Die meisten Anwendungen kamen nicht über Prototypen hinaus. Dies liegt auch daran, dass es noch wenig

1. Einleitung

Erfahrung bei der Anwendung von Mikrovaristoren bezüglich des Alterungs- und Langzeitverhaltens (Lebensdauer) gibt. Es reicht nicht aus, nur das Material zu betrachten. Es muss das komplette Isolierstoffsystem hinsichtlich elektrischer, thermischer und mechanischer Belastung und Alterungseinflüsse untersucht werden. Außerdem fehlen noch geeignete Simulationswerkzeuge, die zum Aufbau des Designs von Prototypen dienen und für die Analyse erforderlich sind, ehe man diese mit hohem Aufwand erstellt und experimentell erprobt. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Es wird eine passende Simulationsumgebung entwickelt, welche die Möglichkeit bietet, Prototypen virtuell zu untersuchen und somit mögliche Anwendungen aus der Hochspannungstechnik mit dünnen Schichten aus mikrovaristorgefüllten Elastomeren zu optimieren. Die Basis bildet die bestehende Simulationssoftware MEQSICO [B3]. Die am Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik und Numerische Feldberechnung der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg unter der Leitung von Prof. Markus Clemens entwickelte Software ermöglicht die transiente Simulation von Applikationen aus der Hochspannungstechnik mit elektro-quasistatischen Annahmen. Hierbei werden kapazitive und nichtlinear-resistive Materialeigenschaften ohne Näherungen berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Software mit der Implementierung von Elementen und Ansatzfunktionen höherer Ordnung und dünn angeordneten Schichten als 2D-Objekte in 3D-Simulationen erweitert.

Im zweiten Schritt wird die erweiterte Software dann in eine Simulationsumgebung unter der Skriptsprache Python [A101] eingebunden, welche die komplette Durchführung von Variantenstudien (Prototypen) von der Modellerstellung über die Simulationen hin zur Optimierung ermöglicht. Es werden in dieser Arbeit Applikationen aus der Hochspannungs-

technik unter Wechselstrom- und Impulsbelastung untersucht. Dies stellt jedoch keine Einschränkung dar, da sich aus den in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnissen auch Hinweise zu Weiterentwicklung bezüglich Anwendungen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) ableiten lassen.

Struktur der Arbeit

Nach einer Zusammenfassung der wesentlichen Grundlagen werden im Kapitel 3 die Simulationsmethoden weiterentwickelt. Hierbei ist ein wesentlicher Aspekt die Berücksichtigung von gekrümmten Geometrien durch Elemente und Ansatzfunktionen höherer Ordnung. Der zweite Aspekt ist die Modellierung der dünnen Schichten aus mikrovaristorgefüllten Polymeren. Im darauf folgenden Kapitel 4 werden mithilfe der in den vorherigen Kapiteln entwickelten Simulationsumgebung drei mögliche Anwendungen aus der Hochspannungstechnik mit dünnen Schichten von 0,2 mm bis 5 mm aus mikrovaristorgefüllten Polymeren untersucht. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung im fünften Kapitel.

2. Grundlagen

Für die Untersuchungen der einzelnen Anwendungsprobleme in Kapitel 4.1, 4.2 und 4.3 werden neben den Grundlagen die für die Simulation notwendigen Methoden und Techniken entwickelt. Ausgehend von den untersuchten Anwendungen der Hochspannungstechnik wird ein Simulationskonzept vorgestellt, welches eine detaillierte Analyse und automatisierte Parameterstudien ermöglicht.

2.1. Mikrovaristoren als feldsteuernde Materialien

2.1.1. Gleitanordnungen in der Hochspannungstechnik

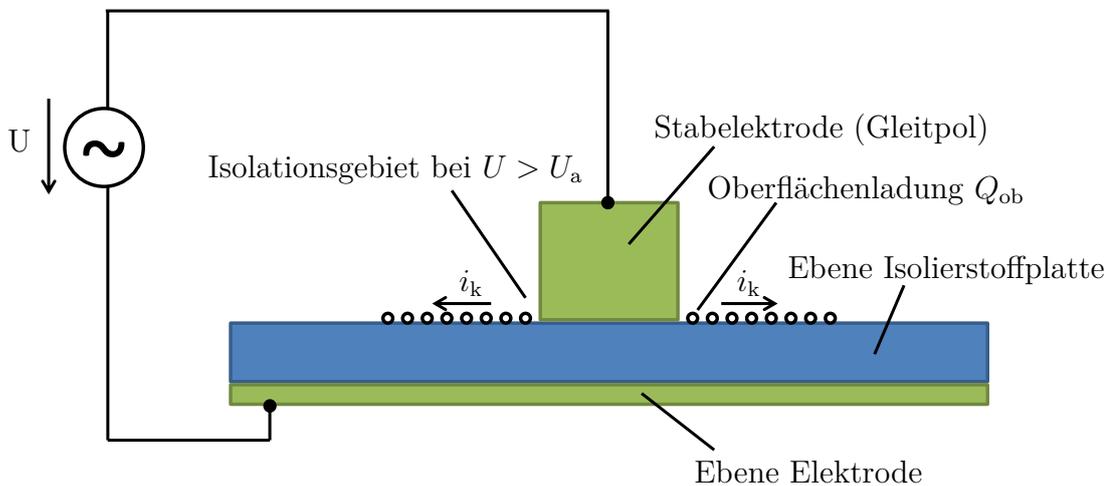


Abbildung 2.1.: Toeplersche Gleitanordnung.

Bei Gleitanordnungen handelt es sich um gemischt tangential und normal elektrisch beanspruchte Grenzflächen zweier Isolierstoffe mit unter-

2. Grundlagen

schiedlichem Aggregatzustand. Als Beispiel ist die Toeplersche Gleitanordnung in Abbildung 2.1 zu finden. Da die elektrische Festigkeit in diesen Anordnungen besonders gering ist, gehören sie zu den kritischen Schwachstellen in Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung. Das feste Isolationsmaterial besitzt eine deutlich höhere elektrische Durchschlagsfestigkeit als Luft. Deshalb erfolgt schon bereits bei sehr niedrigen Feldstärkebeanspruchungen ein Überschlag entlang der Oberfläche im gasförmigen Isoliermaterial. Typische Gleitanordnungen sind Kabelendverschlüsse, Muffen und Stecksysteme, Hochspannungsdurchführungen in Transformatoren und Wicklungsstäbe oder -drähte in elektrischen Maschinen. Zur Homogenisierung des elektrischen Feldes in diesen Problemzonen werden Materialien mit hoher Permittivität oder nichtlinearer Leitfähigkeit zur refraktiven oder resistiven Feldsteuerung verwendet [A1, A70].

Zur Problematik von Gleitanordnungen findet man in der Literatur theoretische und praktische Lösungsansätze für Kabelgarnituren [A5, A38, A37, A81] und Endenglimmschutze [A24, A44, A64]. In dieser Arbeit wird die Verwendung von Mikrovaristormaterialien aus ZnO untersucht. Diese ermöglichen sowohl eine refraktive Feldsteuerung aufgrund einer hohen Permittivität als auch eine gesteuerte nichtlinear-resistive Feldsteuerung durch eine definierbare feldstärkeabhängige Leitfähigkeit. Das Mikrovaristormaterial kann darüber hinaus für die Homogenisierung des elektrischen Feldes auf der Oberfläche von Langstabisolatoren verwendet werden [A37, A52, A97].

2.1.2. ZnO-Mikrovaristormaterial

Die verwendeten Mikrovaristoren sind Partikel aus dotiertem ZnO-Varistormaterial. Sie besitzen einen Partikeldurchmesser von etwa 30 bis

130 μm , siehe auch Abbildung 2.2 und 2.3. Die einzelnen Mikrovaristorpartikel bestehen aus Körnern aus gesintertem und mit verschiedenen Metalloxiden und Oxiden, seltener Erden dotiertem ZnO. An den einzelnen Korngrenzen verhalten sich die Partikel elektrisch wie Varistoren. Jede Korngrenze besitzt hierbei einen Schaltpunkt von etwa 3.2 bis 3.4 V [A39, A46]. Die Dichte der Korngrenzen kann durch die Rezeptur und durch den Herstellungsprozess beeinflusst werden. Somit kann der makroskopische Varistoreffekt an die Anwendung bis zu einem gewissen Maß reproduzierbar angepasst werden. Detaillierte Informationen zu mikrovaristorgefüllten Elastomeren und Lacken und zu deren Herstellungsprozessen findet man in [A12, A35, A36, A68, A69, A93, A94].

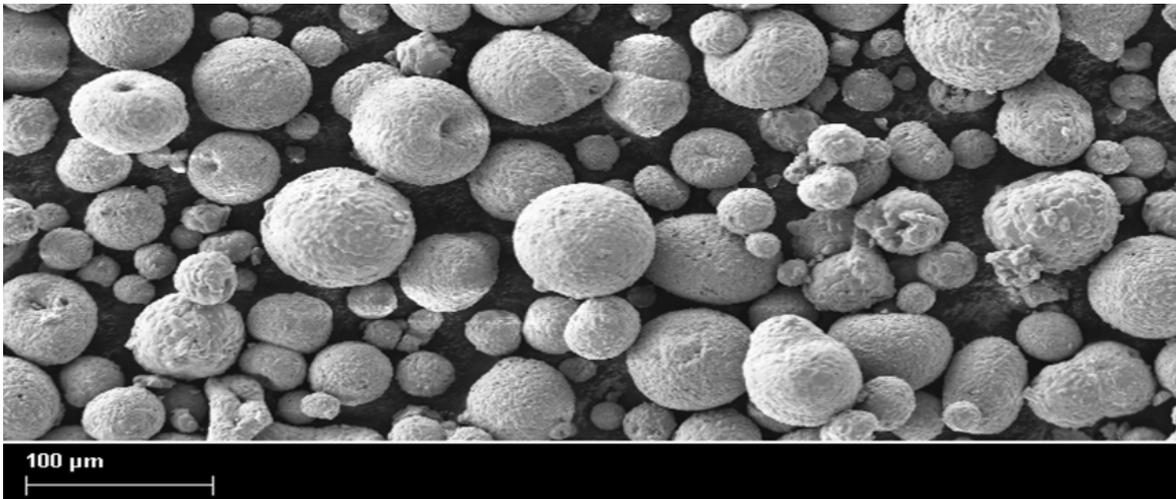


Abbildung 2.2.: Elektronenmikroskopische Aufnahme von losen ZnO-Mikrovaristoren [mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. Th. Schimmel, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)].

Die Mikrovaristoren werden in eine Silikonmatrix oder in einen Lack bzw. ein Band auf Epoxidbasis eingebettet. Für die Silikonmatrizen werden hierbei kalt- (RTV) oder heißvernetzende (HTV) Silikonkautschuke verwendet. Man erhält somit ein flexibel einsetzbares Material mit definierbaren nichtlinearen elektrischen Eigenschaften [A45]. Für elektrische

2. Grundlagen

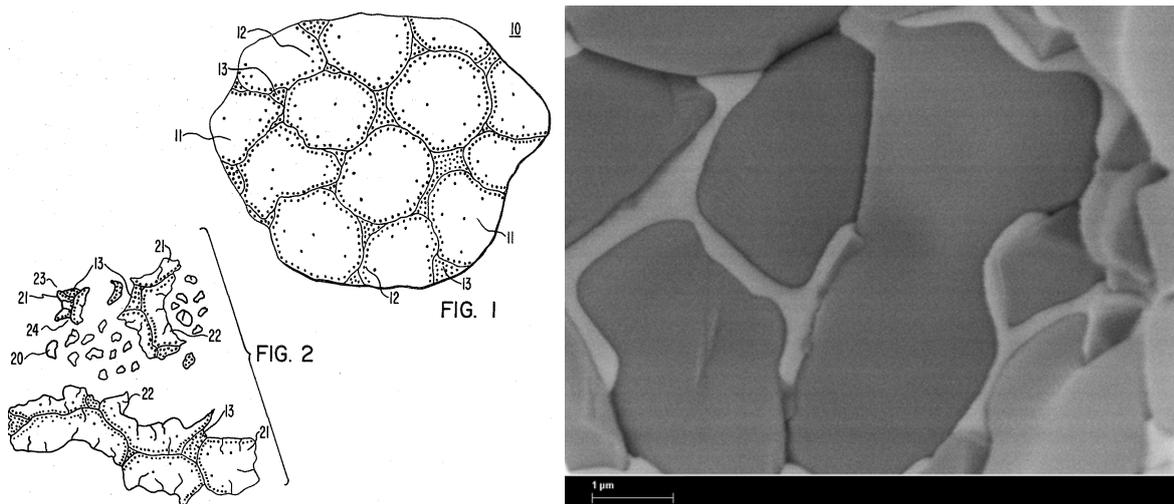


Abbildung 2.3.: Links: Schematische Skizze der Korngrenzen auf der Oberfläche eines ganzen (FIG. I) und eines gemahlene (FIG. II) ZnO-Partikels modifiziert nach [A48]. Rechts: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche eines ZnO Mikrovaristors. In den hellen Bereichen befindet sich viel Bismut(III)-oxid (Bi_2O_3) [A39] [mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. Th. Schimmel, Karlsruher Institut für Technologie].

Maschinen werden die Mikrovaristoren in Lacke auf Epoxidbasis eingearbeitet. Dieser Lack kann direkt oder in Form von getränkten Bändern verwendet werden. Er schützt die Windingenden von elektrischen Maschinen gegen zu hohe elektrische Feldstärken. Das Mikrovaristormaterial stellt eine Alternative zum konventionell verwendeten Siliciumcarbid (SiC) dar [A8, A24, A55, A63, A104].

2.1.3. Modellierung der elektrischen Eigenschaften

In der Literatur ist ein elektrisches Ersatzschaltbild für einen Bereich eines ZnO-Mikrovaristorpartikels zu finden, welches in Abbildung 2.4 dargestellt ist. Ein ähnliches Ersatzschaltbild findet man in [A50]. Die einzelnen Mikrovaristorpartikel sind oberhalb der Perkolationsgrenze leitfähig miteinander verbunden. Somit lässt sich das Mikrovaristormaterial makroskopisch durch eine Serien- und Parallelschaltung dieses Ersatzschaltbildes beschreiben. Es besteht aus zwei Zweigen. Zweig I berück-

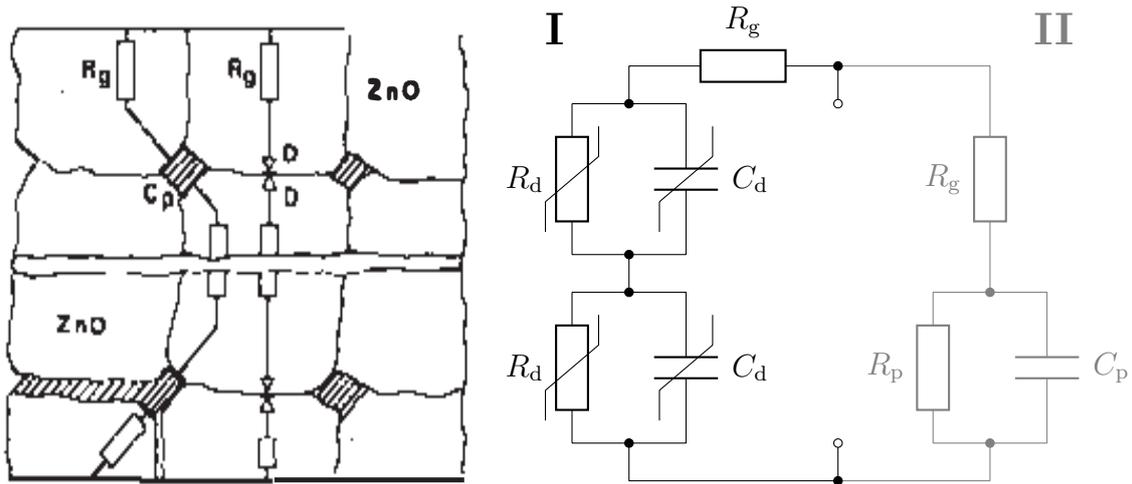


Abbildung 2.4.: Schematisches Diagramm und Ersatzschaltbild eines Teils eines Mikrovaristorpartikels nach [A39].

sichtigt die Leitfähigkeit des Materials als aktiver Varistor. Hierbei stellen R_d und C_d die nichtlineare Impedanz an der Korngrenze und R_g den ohmschen Widerstand der einzelnen ZnO-Körner dar. Der Zweig II berücksichtigt den Kriechstrom zwischen den Körnern mit der Impedanz R_p und C_p . Dieser ist für das Verhalten kurz vor dem Durchschlag relevant. Wenn man für eine erste Näherung davon ausgeht, dass sich die nichtlinearen Elemente durch zwei Parameter beschreiben lassen, würde dieses Ersatzschaltbild zu 12 Parametern führen. Die einzelnen Parameter lassen sich jedoch nur schwer messtechnisch bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb ein vereinfachtes makroskopisches Modell verwendet. Es besteht aus der Parallelschaltung einer konstanten Kapazität und eines nichtlinearen Widerstands. In der numerischen Simulation werden diese in der Form einer konstanten Permittivität ϵ und einer feldstärkeabhängigen Leitfähigkeit $\kappa(|\text{grad}\varphi|)$ berücksichtigt. Die verwendete Methodik wird in Kapitel 2.2.3 näher beschrieben. Inwieweit diese Näherung quantitative Ergebnisse erlaubt, wird im Folgenden erörtert.

Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes

In den Simulationen wird das elektrische Verhalten des ZnO-Mikrovaristormaterials durch ein vereinfachtes Ersatzschaltbild bestehend aus einer nichtlinear feldstärkeabhängigen Leitfähigkeit $\kappa(|\text{grad}\varphi|)$ und einer konstanten Permittivität ε modelliert. Die Parameter werden durch die Auswertung von Oszilloskopdaten bei einer angelegten Spannung mit verschiedenen Amplituden und den Frequenzen 0 Hz (DC), 50 Hz, 500 Hz und 2000 Hz (je AC, sinusförmig) bestimmt. Direkt an der Probe werden die Spannung und der Strom mithilfe eines Messwiderstands über die Zeit gemessen. Die elektrischen Feldstärken $\vec{E}(t)$, deren zeitliche Ableitungen $\vec{E}'(t)$ und die Gesamtstromdichten $\vec{J}(t)$,

$$\vec{J}(t) = \kappa(|\vec{E}|) \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

werden aus den mit dem Oszilloskop gemessenen Spannungen und Strömen ermittelt. Aus diesen werden die jeweiligen Parameter des Ersatzschaltbildes aus der Grundwelle wie folgt bestimmt:

$$\kappa_1 = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}(t) \vec{J}(t) dt}{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}(t)^2 dt}, \quad \varepsilon_{R,1} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}'(t) \vec{J}(t) dt}{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \vec{E}'(t)^2 dt} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0}. \quad (2.1)$$

Mikrovaristormaterial in Lacken

An einer Lackprobe wie in Abbildung 2.5 mit einer Dicke von 0.74 mm und einem stromdurchflossenen Querschnitt von $3.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ wird bei verschiedenen Gleich- und Wechselspannungswerten der Gesamtstrom gemessen. Nähere Details zu der Messmethodik sind in [A7] zu finden. Die aus den Messungen gewonnenen Materialparameter sind in Abbildung 2.6 und 2.7 dargestellt. In diesen steigt mit der Frequenz die Grundleitfä-

higkeit des Materials. Bei der in Anwendungen der Hochspannungstechnik üblicherweise verwendeten Frequenz von 50 Hz entsprechen die Parameter für die Leitfähigkeit denen der Messungen mit Gleichspannung im Rahmen der Messgenauigkeit. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei einer sinusförmigen Spannungsform aufgrund der Feldstärkeabhängigkeit des ZnO-Mikrovaristormaterials und der Mittelung über die Zeit die Leitfähigkeiten sich nicht direkt mit den Messungen bei Gleichspannung vergleichen lassen. Da die Lackschicht mit 0.74 mm im Vergleich zu den lateralen Dimensionen der Applikation sehr dünn ist, wird in den Simulationen der mikrovaristorgefüllte Lack durch eine zusätzliche Oberflächenleitfähigkeit berücksichtigt und muss somit nicht als Volumen modelliert werden. Dies wird im Kapitel 3.2 näher beschrieben.



Abbildung 2.5.: Auf Epoxidplatten mit Kupferbahnen wird Lack mit Mikrovaristormaterial aufgetragen [mit freundlicher Genehmigung von VonRoll Schweiz AG].

Mikrovaristormaterial in Silikon

Das ZnO-Mikrovaristormaterial wird in Form von Hohlkugeln in eine Elastomermatrix eingebettet. Für die Verwendung in einer Kabelgarnitur wird der rotationssymmetrische Körper mind. 15% bis max. 40%

2. Grundlagen

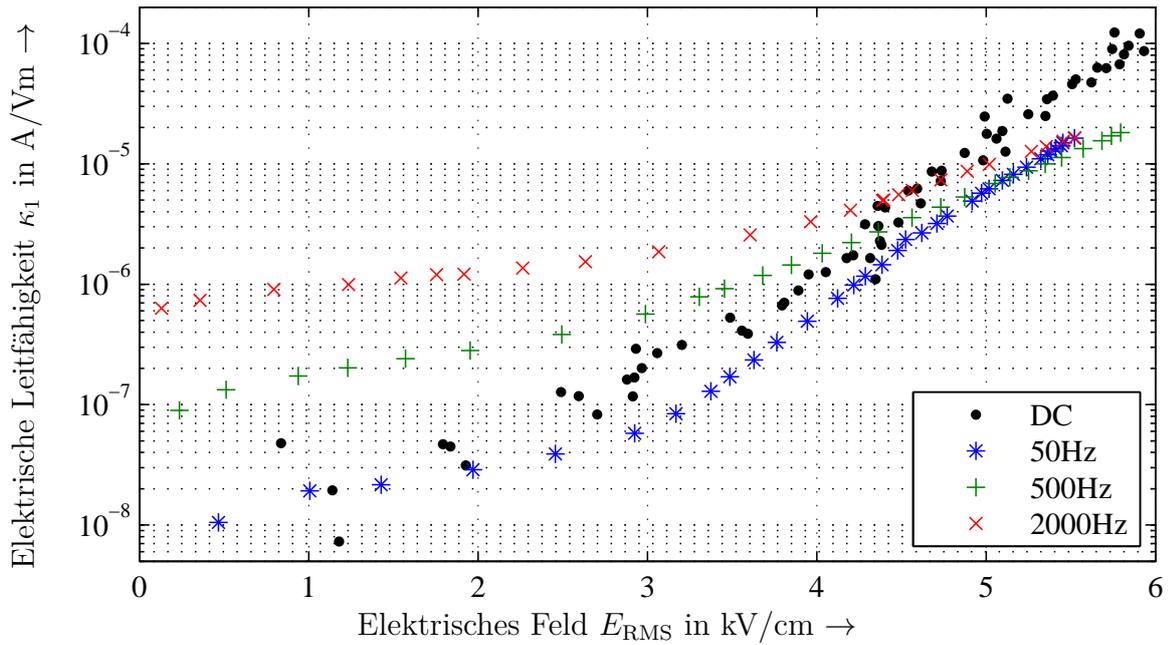


Abbildung 2.6.: Die nach Gl. (2.1) aus den Messungen der Lackprobe auf die Grundfrequenz bezogene elektrische Leitfähigkeit des vereinfachten Ersatzschaltbildes [Messdaten mit freundlicher Genehmigung des Fachgebiets Hochspannungstechnik der TU Darmstadt, Sébastien Blatt, Jan Debus].

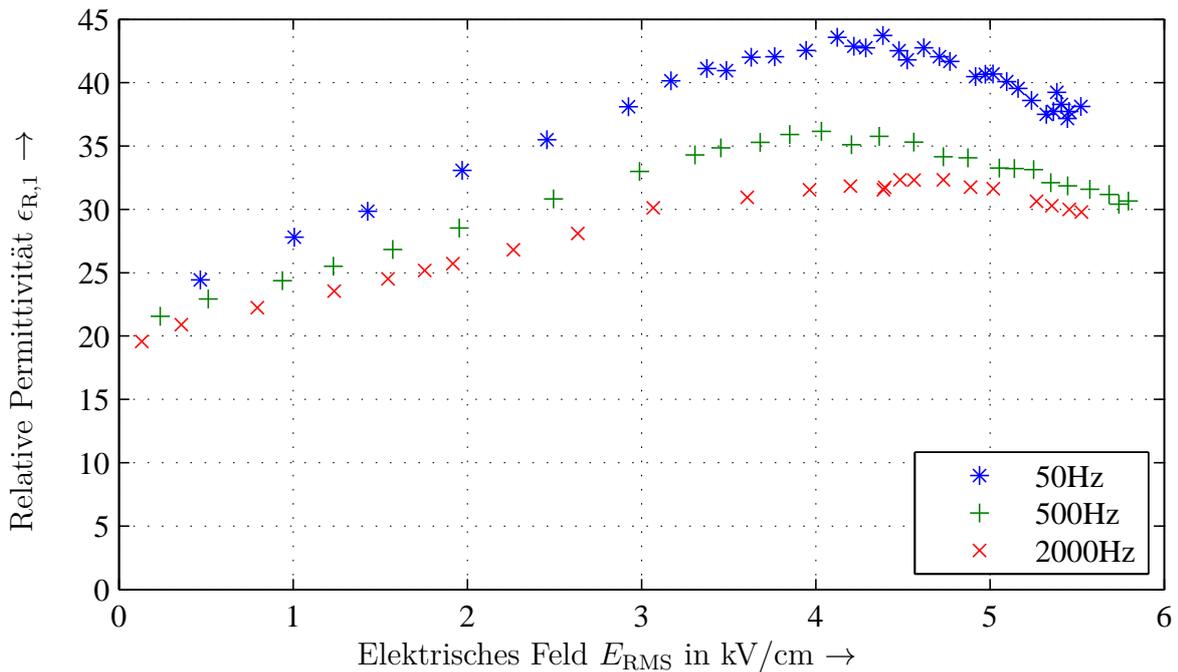


Abbildung 2.7.: Die nach Gl. (2.1) aus den Messungen der Lackprobe auf die Grundfrequenz bezogene relative Permittivität des vereinfachten Ersatzschaltbildes [Messdaten mit freundlicher Genehmigung des Fachgebiets Hochspannungstechnik der TU Darmstadt, Sébastien Blatt].

aufgedehnt. Die mechanischen Anforderungen an die Matrix sind, dass sich die ZnO-Mikrovaristoren nicht herauslösen dürfen, da unerwünschte Hohlräume die elektrische Spannungsfestigkeit verringern. Ungeklärt ist bisher, wie sich die Hohlräume im elektrischen Feld bei hohen Spannungen verhalten und ob es zu Teilentladungen kommen kann.

Als Vertreter eines mikrovaristorgefüllten Silikons wird das Produkt Wacker SLM 79049 [A110] verwendet. An Proben wird bei verschiedenen Gleichspannungswerten der Gesamtstrom durch die Probe gemessen. Die beiden Prüfkörper besitzen einen Durchmesser von 8 mm und eine Höhe von 1.55 mm. Nähere Details zu den Messungen mit diesen Prüfkörpern sind in [B1] zu finden. Die aus den Messungen gewonnenen Materialparameter sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Für die Proben wird eine relative Permittivität von $\epsilon_R = 12$ gemessen [B1].

Auswertung der Parameterbestimmung

Das elektrische Verhalten des ZnO-Mikrovaristormaterials soll in den Simulationen durch das vereinfachte Ersatzschaltbild eines nichtlinearen Widerstandes und einer Kapazität berücksichtigt werden. Die Messungen der Lackprobe in den Abbildungen 2.6 und 2.7 zeigen eine Frequenzabhängigkeit sowohl des Widerstandes als auch der Kapazität. Um aus diesen Werten geeignete Parameter zu extrahieren, sind Feldsimulationen zur „Uncertainty quantification“ (Unsicherheitsberechnung) erforderlich. Für die Simulationen dieser Arbeit werden die Messungen bei Gleichstrom für den nichtlinearen Widerstand verwendet, da für die untersuchten Applikationen zum einen der Aufwand solcher Unsicherheitsberechnungen sehr groß ist im Vergleich zu dem zu erwartenden zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Die messtechnische Bestimmung der zusätzlich benötigten Parameter ist zudem problematisch.

2. Grundlagen

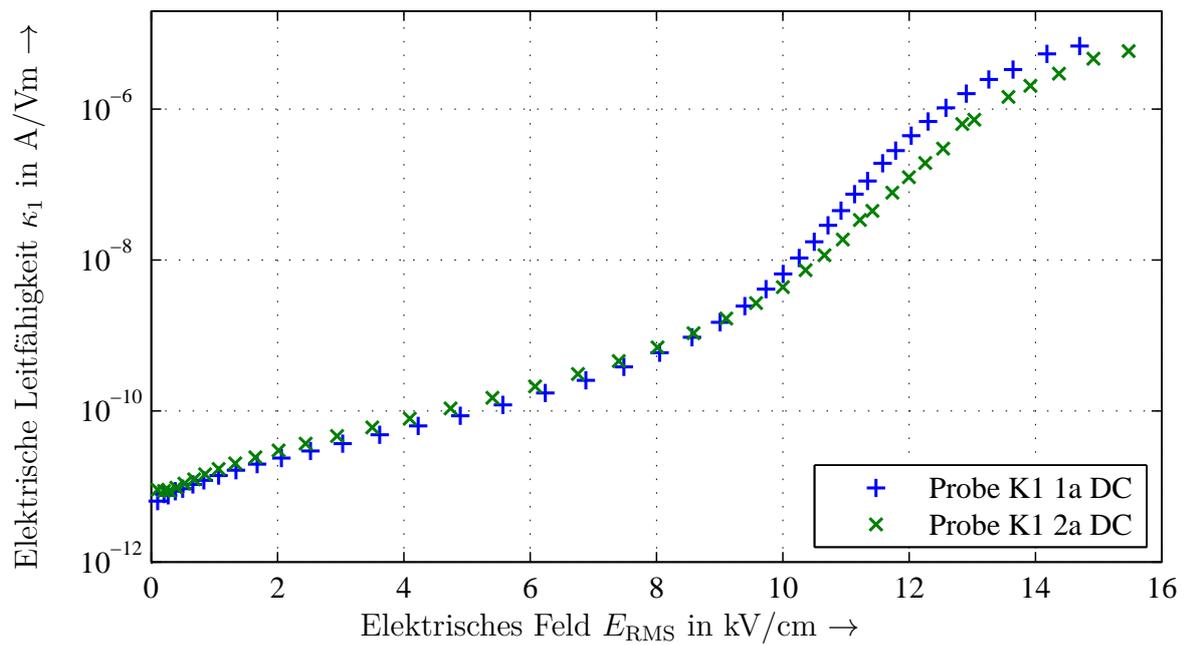


Abbildung 2.8.: Die nach Gl. (2.1) aus den Messungen der Silikonprobe auf die Grundfrequenz bezogene elektrische Leitfähigkeit des vereinfachten Ersatzschaltbildes [Messdaten mit freundlicher Genehmigung der ABB Switzerland Ltd.].

2.2. Simulationsmethodik

2.2.1. Aufgabe der Simulationswerkzeuge

Die Verwendung der beschriebenen ZnO-Mikrovaristormaterialien in der Hochspannungstechnik ist bisher wenig erforscht. Die meisten Applikationen befinden sich noch in einem prototypischen Stadium. Bisher ist die Verwendung dieser Materialien wenig verbreitet [A1]. Die Aufgabe der Simulationswerkzeuge ist somit die Dimensionierung und erste Auslegung von Prototypen und ein besseres Verständnis ihrer Funktion. Die Vorteile der Simulation gegenüber dem Experiment sind hierbei zum einen die geringeren Kosten und zum anderen können die Parameter beliebig variiert werden. Hinzu kommt, dass die Messung von elektrischen Feldern kaum möglich ist, ohne diese zu beeinflussen. Hingegen wird in der Simulation die Möglichkeit geboten, an beliebigen Orten das elektrische Feld auszuwerten, ohne dieses durch das Einbringen einer Messapparatur zu verfälschen. Dies ist sogar innerhalb des Materials möglich.

2.2.2. Methode der finiten Elemente

Das physikalische Verhalten der zu untersuchenden Anwendungen aus der Hochspannungstechnik wird mithilfe des elektrischen Feldes bzw. Temperaturfeldes in der Applikation und Umgebung beschrieben. Diese Felder genügen Differentialgleichungen, welche zusammen mit den vorgegebenen Geometrien, Randbedingungen und Startwerten ein Anfangs-Randwertproblem bilden. Dieses kann mit verschiedenen Verfahren numerisch gelöst werden. Beispiel hierfür sind das Ersatzladungsverfahren (Charge Simulation Method - CSM) [A85], die Randelementmethode (Boundary Element Method - BEM) [A11], die Finite Integrationstech-

2. Grundlagen

nik (FIT) [A113], die Methode der finiten Differenzen, der finiten Volumen und der finiten Elemente (FEM) [A58]. Für die Simulationen in dieser Arbeit wird die Methode der finiten Elemente verwendet, um die kontinuierlichen Gleichungen in ein diskretes algebraisches Gleichungssystem zu überführen. Diese bietet gegenüber den anderen genannten Methoden den Vorteil, sowohl nichtlineares Materialverhalten als auch gekrümmte Oberflächen mithilfe von Ansatzfunktionen und Elementen höherer Ordnung effizient zu berücksichtigen.

Der gesamte Ablauf der Simulation mit finiten Elementen lässt sich in folgende Schritte unterteilen:

- Überführung des zugrunde liegenden Randwertproblems in seine schwache Formulierung
- Diskretisierung in finite Elemente
- Festlegung der Freiheitsgrade
- Integration der schwachen Formulierung in jedem Element mithilfe der Gauß-Jacobi-Quadratur
- Berücksichtigung und Einarbeitung der Randbedingungen
- Aufstellung und Linearisierung des Gleichungssystems
- Lösung des Gleichungssystems durch eine Folge von Lösungen von linearen Gleichungssystemen

Dies wird innerhalb des MEQSICO-Projektes (Magneto-/Electro-Quasistatic-Simulation-CODE) realisiert. Es handelt sich hierbei um eine in C++ programmierte Objektbibliothek, die im Rahmen dieser Arbeit komplett überarbeitet werden musste, um die untersuchten Geometrien, welche mit einer sehr großen Anzahl an Freiheitsgraden vernetzt

werden müssen, berechnen zu können. Nähere Informationen zu dieser Bibliothek und der zugrunde liegenden Methodik sind in der Literatur zu finden [A10, A41, A90, B3, A92, A115, A114]. Sie wird im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich mit isoparametrischen, kurvilinearen Elementen und mit dünnen Schichten als 2D-Flächen in 3D-Simulationen erweitert. Dies wird in den Abschnitten 3.1 und 3.2 näher beschrieben und durch Benchmarks validiert. Für die Berücksichtigung der kapazitiven und nichtlinear-resistiven Materialeigenschaften des untersuchten Mikrovaristormaterials werden nichtlineare Berechnungen des quasistatischen Zustands näherungsweise mithilfe von transienten, nichtlinearen, elektro-quasistatischen Simulationen durchgeführt. Dies wird im Folgenden beschrieben.

2.2.3. Nichtlineare elektro-quasistatische Simulation

Das erweiterte Ampèresche Gesetz aus den Maxwell-Gleichungen lautet:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}.$$

Hierbei bezeichnet t die Zeit, rot den Rotationsoperator, \vec{H} die magnetische Feldstärke, \vec{J} die elektrische Stromdichte und \vec{D} die dielektrische Verschiebungsdichte. Auf die Gleichung wird für die Herleitung der Differentialgleichung der Elektroquasistatik auf beiden Seiten der Divergenzoperator div angewandt:

$$\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{H} = \operatorname{div} \vec{J} + \operatorname{div} \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}.$$

Nach dem Lemma von Poincaré muss der Term auf der linken Seite verschwinden. Für typische Applikationen der Hochspannungstechnik mit ZnO-Mikrovaristormaterial gelten elektro-quasistatische Annahmen

2. Grundlagen

[A32, A91]. Unter diesen Annahmen lässt sich \vec{E} als Gradient eines skalaren Potentials darstellen:

$$\operatorname{div}(\kappa(\operatorname{grad}(\varphi)) \operatorname{grad}(\varphi)) + \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad}(\varphi)) = 0. \quad (2.2)$$

Hierbei ist $\kappa(\operatorname{grad}(\varphi))$ die nichtlineare Leitfähigkeit, ε die Permittivität und φ das elektrische Potential. Die partielle Differentialgleichung 2.2 wird mit der Methode der finiten Elemente diskretisiert und durch Integration über die Zeit gelöst. Die räumliche Diskretisierung wird in den Kapiteln 3.1 und 3.2 näher erörtert. Die wegen des Materialverhaltens nichtlinearen Gleichungen werden mithilfe eines Quasi-Newton-Raphson-Verfahrens berechnet. Die Methodik der nichtlinearen elektro-quasistatischen Simulation ist in der Literatur z.B. in [A18, A20, A23, A90] zu finden.

Ein alternativer Lösungsansatz ist die Simulation im Frequenzbereich. Dies ist für lineare Materialien in [A22, A80] oder z.B. in [C1] zu finden. Die Berücksichtigung von stark nichtlinear-resistiven Materialien, wie z.B. das untersuchte Mikrovaristormaterial, ist bei einer Simulation im Frequenzbereich jedoch deutlich aufwendiger als im Zeitbereich.

Die für das elektro-quasistatische Feld in den untersuchten Anwendungen näherungsweise gültige partielle Differentialgleichung (2.2) wird mithilfe der Methode der Finiten Elemente räumlich diskretisiert. Sie gilt im Gebiet Ω , welches den Rand $\Gamma = \partial\Omega$ besitzt. Auf diesem Rand sind auf disjunkten Abschnitten Γ_{D} bzw. Γ_{N} jeweils Dirichlet- bzw. Neumann-Randbedingungen vorgegeben, d.h.

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{D}} : \quad & \varphi(\vec{r}, t) \quad \text{wird vorgegeben,} \\ \Gamma_{\text{N}} : \quad & \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \varphi(\vec{r}, t) \quad \text{wird vorgegeben.} \end{aligned}$$

Die Gleichung wird mit einer Testfunktion $v \in V_0$,

$$V_0 = \{v \in H^1(\Omega) | v = 0 \text{ auf } \Gamma_D\}, \quad (2.3)$$

multipliziert und über das Gebiet Ω integriert. Hierbei wird nach der Methode der gewichteten Residuen gefordert, dass der Wert des resultierenden Integrales verschwindet [A59],

$$\iiint_{\Omega} \left(\operatorname{div} (\kappa (\operatorname{grad} (\varphi)) \operatorname{grad} (\varphi)) + \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} (\varepsilon \operatorname{grad} (\varphi)) \right) v \, d\Omega \stackrel{!}{=} 0.$$

Durch partielle Integration erhält man

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega} (\operatorname{grad} (v))^T \kappa (\operatorname{grad} (\varphi)) \operatorname{grad} (\varphi) \, d\Omega + \\ & + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} (\operatorname{grad} (v))^T \varepsilon \operatorname{grad} (\varphi) \, d\Omega = \iint_{\Gamma=\partial\Omega} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma. \end{aligned}$$

Betrachtet man das Randintegral der obigen Gleichung, teilt sich dieses in die Gebiete Γ_D und Γ_N auf:

$$\iint_{\Gamma} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma = \iint_{\Gamma_D} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma + \iint_{\Gamma_N} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma. \quad (2.4)$$

Die Testfunktion v aus Gleichung (2.3) wird so definiert, dass sie auf dem Rand Γ_D verschwindet. Der Wert des Integrals über Γ_D ist deshalb Null. Die Dirichlet-Randbedingungen werden gesondert in das resultierende FEM-Gleichungssystem eingearbeitet. Da ausschließlich homogene Neumann-Ränder betrachtet werden, verschwindet der Wert des Integrals über den Randabschnitt Γ_N .

2. Grundlagen

Mithilfe einer Diskretisierung mit den Ansatz-/Testfunktionen N_i und N_j , welche nach der Galerkin-Methode aus demselben Funktionenraum gewählt werden,

$$V_h = \left\{ v_h : v_h(\vec{r}) = \sum_{i=0}^n v_i N_i(\vec{r}) \right\},$$

$$v_h(\vec{r}) = \sum_i v_i N_i(\vec{r}), \quad \varphi_h(\vec{r}) = \sum_j \varphi_j N_j(\vec{r}),$$

lässt sich die i -te Zeile, $i \in \{1, \dots, N\}$, des zu lösenden Gleichungssystems schreiben als:

$$\sum_j \left(\underbrace{\iint_{\Omega} (\text{grad}(N_i))^T \kappa(\text{grad}(\varphi)) \text{grad}(N_j) \, d\Omega}_{\text{Steifigkeitsmatrix } \mathbf{A}} + \frac{\partial}{\partial t} \underbrace{\iint_{\Omega} (\text{grad}(N_i))^T \varepsilon \text{grad}(N_j) \, d\Omega}_{\text{Massenmatrix } \mathbf{B}} \right) \varphi_j = 0, \quad (2.5)$$

wobei j den Spaltenindex ergibt, $j \in \{1, \dots, N\}$.

Die Anzahl der Zeilen bzw. Spalten ist die Anzahl der Freiheitsgrade des Gleichungssystems und abhängig von der Anzahl der Knoten der vorgegebenen Geometrie und der Ordnung der gewählten Ansatzfunktionen. Die Assemblierung der Steifigkeitsmatrix, der Massenmatrix und des Lastvektors geschieht durch FEMSTER-Routinen [A10]. Diese werden zur Einbindung in das MEQSICO-Projekt stark modifiziert und angepasst. Dies wird in den Kapiteln 3.1, 3.2 und A.1 näher beschrieben.

2.2.4. Thermodynamische Simulation

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Energie eines abgeschlossenen Systems konstant ist. In einem nicht abgeschlossenen System kann sich die innere Energie durch den Transport von Energie in Form von Arbeit oder Wärme über die Grenzen des Systems ändern. Eine Änderung der inneren Energiedichte u eines Systems setzt sich aus einer Wärmestromdichte \dot{q} und einer mechanischen oder elektrischen Leistungsdichte p zusammen, [A2, A112]

$$\frac{d}{dt}u = \dot{q}(t) + p(t).$$

Die innere Energiedichte des Systems lässt sich durch die spezifische Wärmekapazität $c(\vec{r}, T)$ und die Dichte $\rho(\vec{r}, T)$ beschreiben,

$$\frac{d}{dt}u = \frac{d}{dt}\rho(\vec{r}, T)c(\vec{r}, T)T = \rho(\vec{r}, T)c(\vec{r}, T)\frac{d}{dt}T.$$

Die volumenspezifische Wärme ist das Produkt aus der Dichte ρ und der spezifischen Wärme c . Der masselose Wärmestrom \dot{q} ist proportional zum Temperaturgradienten (Gesetz von Fourier),

$$\dot{q} = \text{div}(\lambda \text{grad } T).$$

Elektrische oder mechanische Wärmequellen q_E und q_M führen dem System Energie zu,

$$p(t) = \dot{q}_E + \dot{q}_M.$$

2. Grundlagen

Aus diesen Gleichungen ergibt sich folgende Formulierung für die instationäre Wärmeleitungsgleichung unter Vernachlässigung von mechanischen Wärmequellen:

$$c(\vec{r}, T)\rho(\vec{r}, T)\frac{\partial}{\partial t}T - \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \dot{q}_E. \quad (2.6)$$

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt gibt Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung an die Umgebung ab. Die Intensität und die Wellenlänge der Strahlung steigen mit der Temperatur. Die Oberflächenbeschaffenheit des Körpers hat einen starken Einfluss auf die Intensität der Wärmeabstrahlung. Die Normalkomponente der Wärmestromdichte setzt sich aus einem Abstrahl- und einem Konvektionsteil zusammen [A15],

$$J_w(\vec{r}, t) = \underbrace{h(T - T_a)}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\epsilon\sigma(T^4 - T_a^4)}_{\text{Abstrahlung}}.$$

Hierbei bezeichnet T_a die Umgebungstemperatur, J_w die Wärmestromdichte, h den Wärmeübergangskoeffizienten der Konvektion in $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ und σ die Boltzmannkonstante $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{K}$.

Um diese Randbedingung im linearisierten Gleichungssystem zu berücksichtigen, wird der nichtlineare Abstrahlungsterm lokal linearisiert. Dies geschieht mithilfe eines Taylorpolynoms erster Ordnung an der Stelle T_0 ,

$$J_w(\vec{r}, t) = h(T - T_a) + \epsilon\sigma(T_0^4 - T_a^4 + 4T_0^3(T - T_0)),$$

Die Konvektions- und Abstrahlrandbedingung wird auf diese Art in jedem Schritt linearisiert und zu einer Robinrandbedingung zusammengefasst,

$$J_w(\vec{r}, t) = k_1 \cdot T - k_2.$$

Für die Parameter k_1 und k_2 der Linearisierung gilt:

$$k_1 = h + 4\epsilon\sigma T_0^3; \quad k_2 = hT_a + \epsilon\sigma(3T_0^4 + T_a^4).$$

Diese die Konvektion und Abstrahlung beschreibende Wärmestromdichte J_w kann als Robin-Randbedingungen in das diskrete Gleichungssystem eingearbeitet werden. Dafür wird das Randintegral aus Gl. (2.4), welches sich aus dem Dirichletrand Γ_D und dem Neumannrand Γ_N zusammensetzt, um einen zusätzlichen Robinrand Γ_R ergänzt,

$$\iint_{\Gamma} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma = \underbrace{\iint_{\Gamma_D} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma}_{=0, \text{ da } v \in \Gamma_D} + \underbrace{\iint_{\Gamma_N} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma}_{\text{zz. nur hom., d.h. } \frac{\partial T}{\partial N}|_{\Gamma_N}=0} + \underbrace{\iint_{\Gamma_R} \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{n}} v \, d\Gamma}_{\text{Robin-Randbeitrag}} .$$

Robin-Randbedingungen auf einer Randfläche Γ_R lauten allgemein:

$$\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial N} + \alpha(\vec{r}, t)T(\vec{r}, t) = \alpha(\vec{r}, t)T_a(\vec{r}).$$

Aufgrund der linearisierten Abstrahlrandbedingung gilt hier

$$\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial N} = -J_w(\vec{r}, t) = -k_1(\vec{r}, t) \cdot T(\vec{r}, t) + k_2(\vec{r}, t).$$

2. Grundlagen

Dieser Robin-Randbeitrag wird in die Wärmeleitungsgleichung (2.6) eingearbeitet,

$$\iiint_{\Omega} \left((\text{grad}(v))^T \lambda \text{grad}(T) - \dot{q}_E v + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} v \right) d\Omega + \iint_{\Gamma_R} (k_1 T - k_2) d\Gamma = 0.$$

Mithilfe einer Diskretisierung mit den Ansatz-/Testfunktionen N_i und N_j , welche nach der Galerkin-Methode aus demselben Funktionenraum gewählt werden, lässt sich die i -te Zeile, $i \in \{1, \dots, N\}$, des zu lösenden Gleichungssystems schreiben als:

$$\sum_j \left(\underbrace{\iiint_{\Omega} (\text{grad}(N_i))^T \lambda \text{grad}(N_j) d\Omega + \iint_{\Gamma_R} k_1 N_i N_j d\Gamma}_{\text{Steifigkeitsmatrix } \mathbf{A}} + \frac{\partial}{\partial t} \underbrace{\iiint_{\Omega} c(\vec{r}) \rho(\vec{r}) N_i N_j d\Omega}_{\text{Massenmatrix } \mathbf{B}} \right) T_j = \underbrace{\iiint_{\Omega} \dot{q}_E N_i d\Omega + \iint_{\Gamma_R} k_2 N_i d\Gamma}_{\text{Lastvektor } b}, \quad (2.7)$$

wobei j den Spaltenindex ergibt, $j \in \{1, \dots, N\}$. Die Anzahl der Zeilen bzw. Spalten ist die Anzahl der Freiheitsgrade des Gleichungssystems und abhängig von der Anzahl der Knoten der vorgegebenen Geometrie und der Ordnung der gewählten Ansatzfunktionen. Die Assemblierung der Steifigkeitsmatrix, der Massenmatrix und des Lastvektors geschieht analog zur elektro-quasistatischen Simulation in Kapitel 2.2.3. Die elektrischen Verluste \dot{q}_E werden aus den Ergebnissen der elektro-quasistatischen Simulation berechnet, siehe auch [A19, A21, A78, A112, C4],

$$\dot{q}_E = \vec{E} \cdot \vec{J}.$$

2.3. Erstellung der Simulationseingangsdaten

2.3.1. Geometrische Modellerstellung

Die untersuchten Applikationen aus der Hochspannungstechnik werden mithilfe einer Konstruktionssoftware (CAD - Computer Aided Design) erstellt. Dabei kann auf schon vorhandene Konstruktionsdaten für die Fertigung zurückgegriffen werden. Meist stellt sich jedoch eine komplette Neumodellierung für die Simulation als sinnvoll heraus, da sich die Anforderungen an CAD-Daten für die Fertigung und für die Simulationen deutlich unterscheiden. Beispiele sind Toleranzen und Materialüberlappungen, aber auch die Detailtreue der Applikationen.

2.3.2. Modellierung des Außenraums

Die modellierten Körper werden in ein großes Volumen eingesetzt, welches die umgebende Luft modelliert. Dieses umgebende Volumen muss ausreichend groß gewählt werden, um das asymptotische Abfallverhalten des elektrischen Potentials hinreichend genau zu berücksichtigen. Für dieses gilt z.B. bei einer kugelförmigen Anordnung:

$$|\vec{E}(r)| = \mathcal{O}\left(\frac{1}{r^2}\right) \quad \text{mit } r \rightarrow \infty.$$

Zur Modellierung eines unendlich ausgedehnten umgebenden kapazitiven Mediums bietet sich die Kopplung der Methode der finiten Elemente an eine Randelementmethode an [A88, A89]. Da jedoch in der Praxis die in dieser Arbeit untersuchten Anwendungen aufgrund des geringeren Platzbedarfs in unmittelbarer Nähe zueinander eingesetzt werden, wird die umgebende Luft als ein begrenztes Volumen mit Erdpotential an den äußeren Flächen modelliert. Der zu erwartende Effekt sind hierbei zu große Feldstärken.

2.3.3. Diskretisierung mit Tetraedern

Die mithilfe einer CAD-Software erstellten Applikationen werden nun in diskrete Elemente für die Simulation unterteilt. In dieser Arbeit wird das „Geometry and Mesh Generation Toolkit Cubit“ [A84] verwendet. Dieses basiert auf dem ACIS Kernel [A86] als 3D-CAD-Engine und dem 3D-Mesher von INRIA [A57]. Zuerst werden die Oberflächen der Modelle mit linearen Dreiecken vernetzt, danach die Volumen durch lineare Tetraeder. Danach bietet Cubit die Möglichkeit, die Kanten der Tetraeder isoparametrisch den Geometrien anzupassen. Damit erhält man isoparametrische, kurvilineare quadratische Tetraeder, welche sich durch Polynome zweiter Ordnung modellieren lassen. Diese erlauben eine exaktere Repräsentation der Oberflächen und somit eine genauere Simulation, siehe dazu Kapitel 3.1 und [B13]. Die somit erzeugten diskreten Modell-
daten werden für die Simulation in eine Datei im Abaqus-Format [A27] exportiert.

2.3.4. Angelegte Spannung

Durch ein zu schnelles Anlegen der Spannung an das nichtlineare Material können Einschalteneffekte das Simulationsergebnis beeinträchtigen. Deshalb wird in der Simulation mit einer Wechsellspannung von 50 Hz der Spannungsverlauf wie in Abbildung 2.9 dargestellt vorgegeben. Innerhalb der ersten Periode wird die sinusförmige Spannung mit einem linear ansteigenden Faktor multipliziert.

2.4. Auswertung der Simulationsdaten

Das elektrische Feld wird auf Punkten auf einer Linie z.B. entlang der Oberfläche eines Isolators ausgewertet. Dafür wird mithilfe der Ansatz-

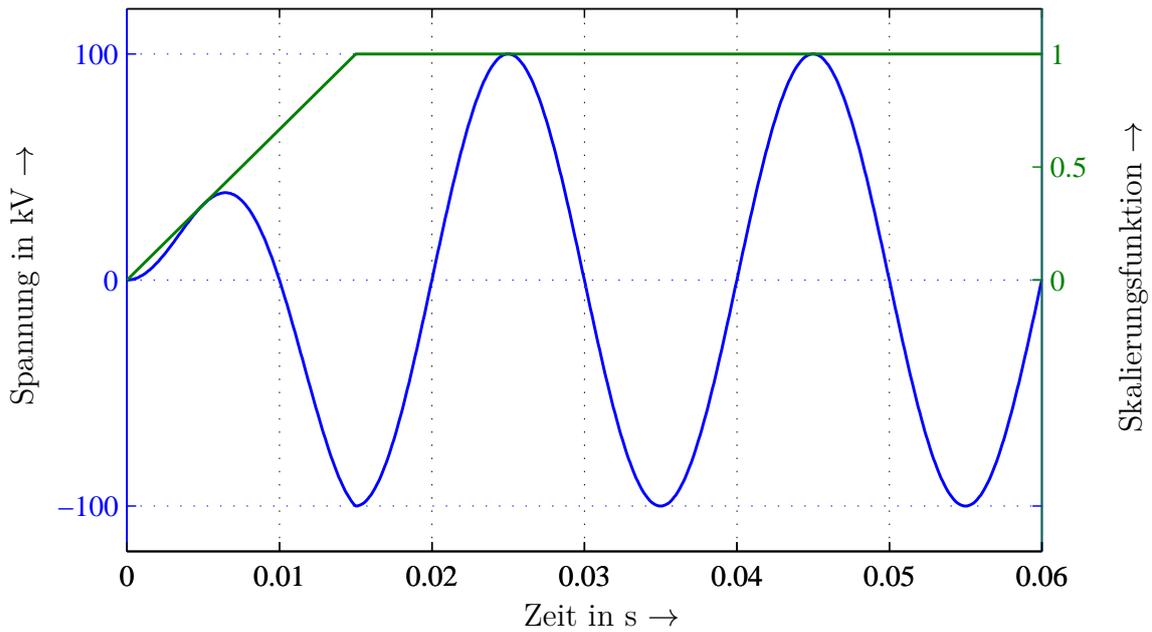


Abbildung 2.9.: In den Simulationen wird die blau dargestellte Spannung angelegt. Um Einschalteneffekte zu minimieren, wird die sinusförmige Spannung mit einer innerhalb der ersten Periode linear ansteigenden Skalierungsfunktion multipliziert.

funktionen der Gradient der berechneten Potentialwerte auf den Freiheitsgraden des Elements, in welchem sich der jeweilige Punkt befindet, berechnet.

Ab der dritten Periode der angelegten Spannung kann man davon ausgehen, dass alle Einschalteneffekte abgeklungen sind. Es werden die Simulationsergebnisse über diese Periode integriert, um die effektiven Mittelwerte oder auch RMS-Werte (Root Mean Square) des elektrischen Potentials φ , der elektrischen Feldstärke E und der ohmschen Verluste $\vec{E} \cdot \vec{J}$ aus den Simulationsergebnissen zu erhalten,

$$\varphi_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{2T}^{3T} \varphi(t)^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i(t=2T)}^{i(t=3T)} \varphi(t_i)^2 \cdot \Delta t_i},$$

$$\vec{E}_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{2T}^{3T} \vec{E}(t)^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i(t=2T)}^{i(t=3T)} \vec{E}(t_i)^2 \Delta t_i}, \quad (2.8)$$

$$\vec{E} \cdot \vec{J} = \frac{1}{T} \int_{2T}^{3T} \kappa(\vec{E}) \vec{E}(t)^2 dt \approx \frac{1}{T} \sum_{i(t=2T)}^{i(t=3T)} \kappa(\vec{E}) \vec{E}(t_i)^2 \Delta t_i.$$

2.5. Automatisierte Parameterstudien

Da in dieser Arbeit nicht nur eine Simulation einer bestimmten Applikation, sondern viele Simulationen im Rahmen von Parameterstudien durchgeführt werden sollen, bietet sich eine Automatisierung der Simulationsdatenerstellung, des Startens der Simulation und der Datenauswertung an. In Abbildung 2.10 ist der für die Simulationen entwickelte Zyklus dargestellt. Die Kommunikation und der Datenaustausch zwischen den einzelnen Schritten werden mithilfe von Modulen innerhalb der Software Python [A73, A101] realisiert, welche unter LINUX in der Shellumgebung BASH gestartet werden. Die Modellerstellung geschieht innerhalb von Cubit, welches als Modul in Python alle zur Simulation benötigten Daten im „Black-Box-Modus“ in einem temporären Verzeichnis erstellt. Die Ergebnisse der Simulation mit MEQSICO werden entweder direkt in Python oder mit Matlab analysiert und gespeichert. Auf Basis dieser Daten wird dann ein neuer Simulationszyklus mit entsprechend angepassten Parametern gestartet. Während eines kompletten Zyklus werden die einzelnen Prozesse hinsichtlich ihres Ressourcenbedarfs überwacht. Hierzu werden neben den Python-Modulen „os“, „sys“, „timeit“, „subprocess“, „time“, „resource“, „signal“ auch die GNU Linux Befehle „free“, „ps“ und „time“ verwendet.

Die Simulationskonfiguration für die Parameterstudien ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Es setzt sich aus dem lokalen Computer, dem zentralen File-Server und den Rechenknoten (Compute-Clusters) zusammen. Auf den Rechenknoten laufen jeweils ein oder mehrere Python-Skripte, welche den in Abbildung 2.10 dargestellten Simulationsablauf realisieren. Die einzelnen Knoten kommunizieren hierbei über den zentralen File-Server. Dieser verwaltet die zu simulierenden Parameterlisten und die berechneten Ergebnisse. Vom lokalen PC aus werden die Ergebnisse ausgewertet und graphisch dargestellt. Somit steht eine geeignete Infrastruktur zur Verfügung.

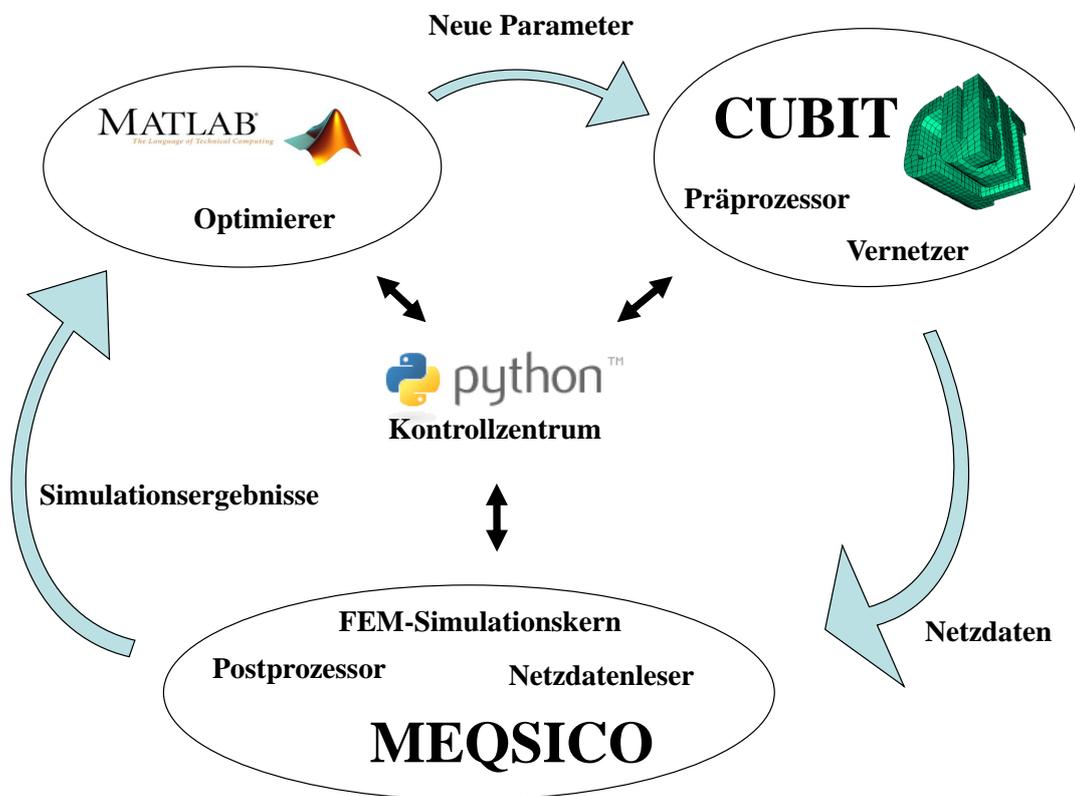


Abbildung 2.10.: Simulationszyklus der automatisierten Parameterstudien.

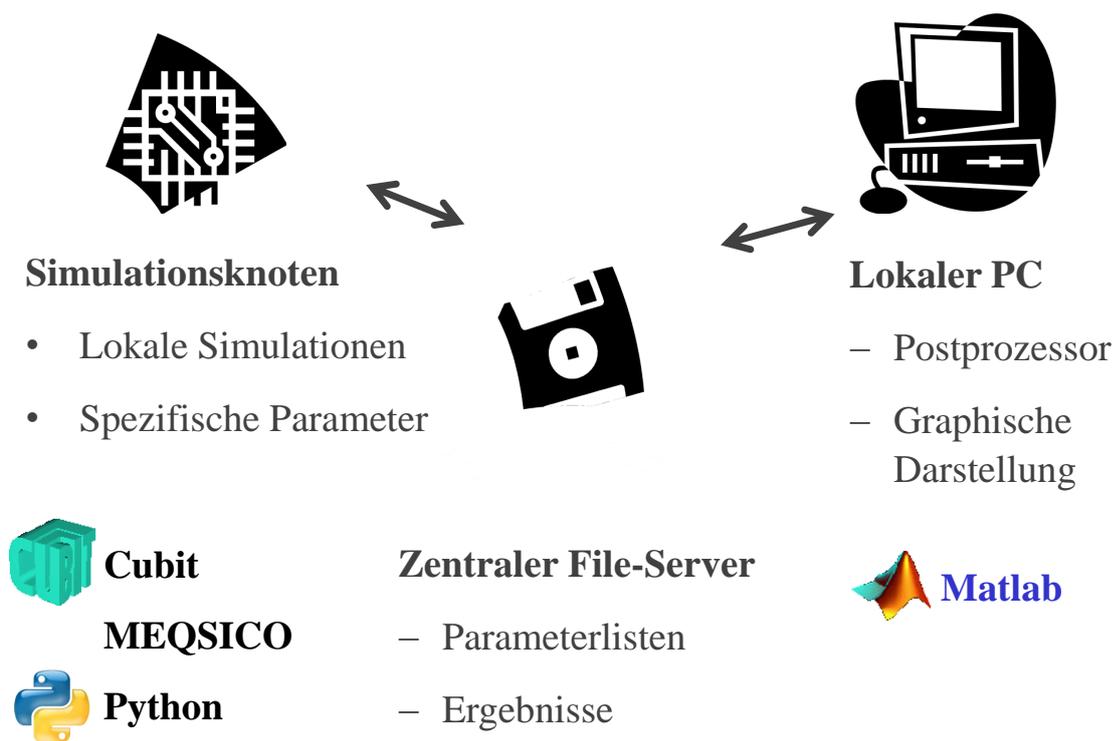


Abbildung 2.11.: Simulationskonfiguration für die automatisierten Parameterstudien.

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

3.1. Isoparametrische Elemente höherer Ordnung

Viele Anwendungen der Hochspannungstechnik lassen sich aus rotations-symmetrischen Komponenten zusammensetzen. Da diese jedoch meistens in nicht rotationssymmetrischen Konfigurationen verwendet werden, werden diese mithilfe von 3D-Elementen vernetzt. Für die Diskretisierung bieten sich tetrahedrale Elemente aufgrund ihrer Robustheit und Zuverlässigkeit an. Quadratische tetrahedrale Elemente bieten eine höhere Genauigkeit als lineare Elemente, siehe Abbildung 3.1, [A40, B10, B13]. Mit diesen quadratischen Elementen lassen sich Rundungen in der Simulation berücksichtigen. Somit werden im Gegensatz zu linearen Elementen keine zusätzlichen künstlichen Singularitäten des elektrischen Feldes durch Kanten und Ecken in der Simulationsgeometrie [A60, A74] erzeugt.

Die quadratischen tetrahedralen Elemente werden innerhalb von Cubit aus den durch das Vernetzen gewonnenen linearen Tetraedern erzeugt. Die zusätzlichen Knoten auf den Kanten werden den Oberflächen der Geometrien angepasst. Unter Umständen entstehen verzerrte Elemente mit negativem Volumen. Dies lässt sich durch eine Anpassung der Feinheit der lokalen Diskretisierung der Oberfläche beheben. Ein Algo-

rithmus für die direkte Erstellung eines tetrahedralen Netzes höherer Ordnung steht aktuell nicht zur Verfügung.

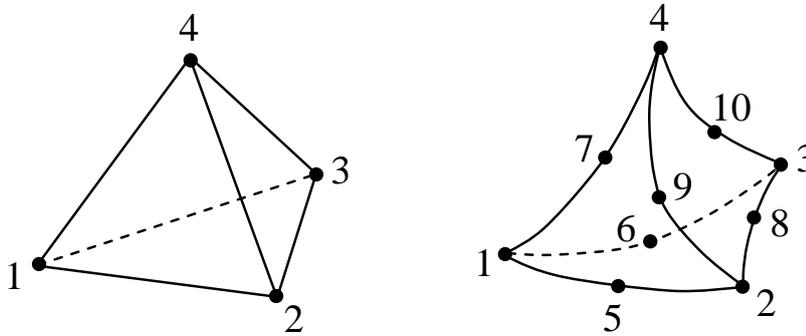


Abbildung 3.1.: Das lineare tetrahedrale Element auf der linken Seite besteht aus 4 Knoten. Das quadratische tetrahedrale Element auf der rechten Seite erlaubt eine bessere Approximation der Geometrie durch 6 zusätzliche Knoten auf den Kanten. [B13]

3.1.1. Implementierung der isoparametrischen Elemente

Nach der zuvor hergeleiteten Gleichung (2.5) berechnen sich die Einträge der Steifigkeitsmatrix für jedes einzelne Volumenelement nach:

$$A_{ij} = \iiint_{\Omega} (\text{grad}(N_i))^T \begin{pmatrix} \kappa_x & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_y & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_z \end{pmatrix} \text{grad}(N_j) d\Omega, \quad (3.1)$$

wobei κ_x, κ_y und κ_z vom Gradienten des elektrischen Feldes abhängig sind. Für die Berechnung des Integrals aus Formel (3.1) wird das Element im ursprünglichen Koordinatensystem x, y, z auf ein Referenzelement

mit der Kantenlänge 1 im Koordinatensystem a, b, c abgebildet. Durch Umformen des Gradienten,

$$\begin{aligned} \text{grad}_{x,y,z}(N_i) &= \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} N_i = \begin{pmatrix} \partial a/\partial x & \partial a/\partial y & \partial a/\partial z \\ \partial b/\partial x & \partial b/\partial y & \partial b/\partial z \\ \partial c/\partial x & \partial c/\partial y & \partial c/\partial z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial/\partial a \\ \partial/\partial b \\ \partial/\partial c \end{pmatrix} N_i \\ &= J^{-1} \text{grad}_{a,b,c}(N_i) , \end{aligned}$$

lässt sich Gleichung (3.1) umformen zu:

$$A_{ij} = \iiint_{\Omega} (\text{grad}_{a,b,c}(N_i))^T \tilde{\kappa}(\text{grad}(\varphi)) \text{grad}_{a,b,c}(N_j) d\Omega , \quad (3.2)$$

mit dem in das Referenzelement transformierten Tensor für die Leitfähigkeit $\tilde{\kappa}(\text{grad}(\varphi))$:

$$\tilde{\kappa}(\text{grad}(\varphi)) = J^{-T} \kappa(\text{grad}(\varphi)) J^{-1} \det(J) .$$

Dieses Integral wird durch eine Summe über gewichtete lokale Gaußpunkte approximiert. Der Gradient $\text{grad}_{a,b,c}$ von N_i bzw. N_j muss hierbei nur einmalig für jeden Gaußpunkt berechnet werden. Bei der Verwendung von isoparametrischen Elementen ist die Jacobimatrix J für die Abbildung in das Referenzelement vom Ort abhängig. Folglich werden die einzelnen Werte des Integrals über Lagrange-Polynome berechnet, gewichtet und mit der Funktionaldeterminante eines jeden Gaußpunktes multipliziert. Die Einträge dieser Element-Steifigkeitsmatrix werden anschließend in die Gesamtsteifigkeitsmatrix eingearbeitet. Da quadratische tetrahedrale Elemente mit jeweils einem Freiheitsgrad auf den vier

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

Ecken und jeweils einem Freiheitsgrad auf den sechs Kanten verwendet werden, gilt für die Dimensionen der Elementmatrix:

$$A_{ij} \in \mathbb{R}^{10 \times 10}.$$

Für die Berechnung der Jacobimatrix der Transformation ins Referenzelement und für die Ansatzfunktionen werden Silvester-Lagrange-Polynome verwendet. Als weiterführende Finite-Elemente-Literatur wird auf [A13, A31, A58, A59, A116] verwiesen.

3.1.2. Konvergenzstudie

Es wird der Einfluss der Ordnung der Elemente und verwendeten Ansatzfunktionen für eine einfache rotationssymmetrische Geometrie in einer elektrostatischen Konvergenzstudie mit konstanten und nichtlinearen Materialparametern untersucht. Das Ziel ist es, den Einfluss der verwendeten Elemente auf die Genauigkeit der Simulation zu überprüfen. Es stellt sich die Frage, inwieweit der erhöhte numerische Aufwand der Elemente und Ansatzfunktionen höherer Ordnung sich auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse auswirkt.

Verwendete Geometrie

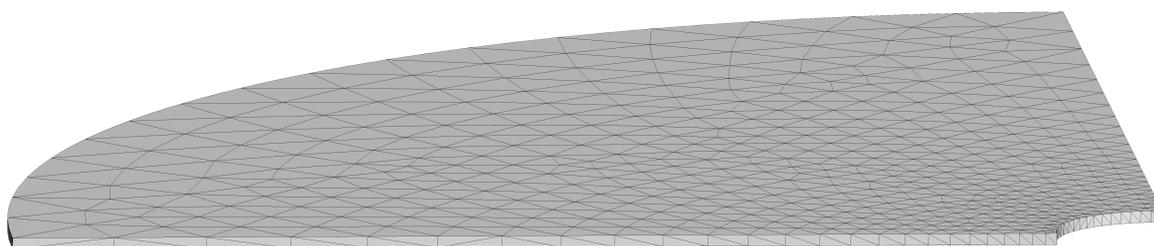


Abbildung 3.2.: Mit quadratischen tetrahedralen Elementen vernetztes CAD-Modell des Zylinderkondensators für die Konvergenzstudie. Der innere Radius beträgt 0.1 m, der äußere Radius 1.0 m. [B10]

Die vereinfachte Geometrie einer rotationssymmetrischen Komponente ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Es handelt sich um das Viertel eines Zylinderkondensators. An die innere Mantelfläche wird in der Simulation eine Spannung von 1000 V, an die äußere Mantelfläche eine Spannung von 500 V angelegt. Für die verbleibenden Randflächen wird ein homogener Neumann-Rand und als Startwert $\varphi(\vec{r}, 0) = 0 V$ für die Simulation vorgegeben. Der Diskretisierungsfehler dieses Randwertproblems setzt sich aus räumlichen und zeitlichen Anteilen zusammen. Da der Einfluss der Geometrie auf die Genauigkeit der Simulation untersucht werden soll, wird das Problem auf den resistiven Anteil der Gleichung (2.2) reduziert. Es werden Simulationen für lineare und quadratische tetrahedrale Elemente unter der Verwendung von Ansatzfunktionen erster und zweiter Ordnung durchgeführt und deren Abweichung zur analytischen Lösung ausgewertet. Die unterschiedliche Approximation von tetrahedralen Elementen erster und zweiter Ordnung ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

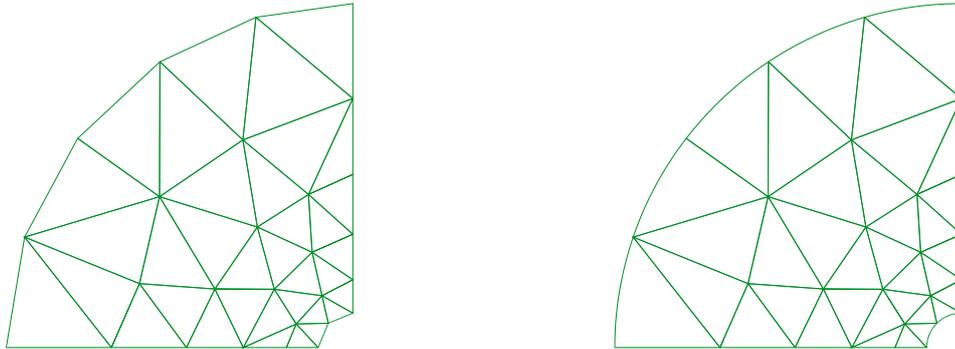


Abbildung 3.3.: Räumliche Diskretisierung der Oberfläche des Viertels eines Zylinderkondensators. Die quadratischen Elemente auf der rechten Seite approximieren die Geometrie durch gekrümmte Ränder wesentlich genauer als die linearen Elemente auf der linken Seite. [B10]

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

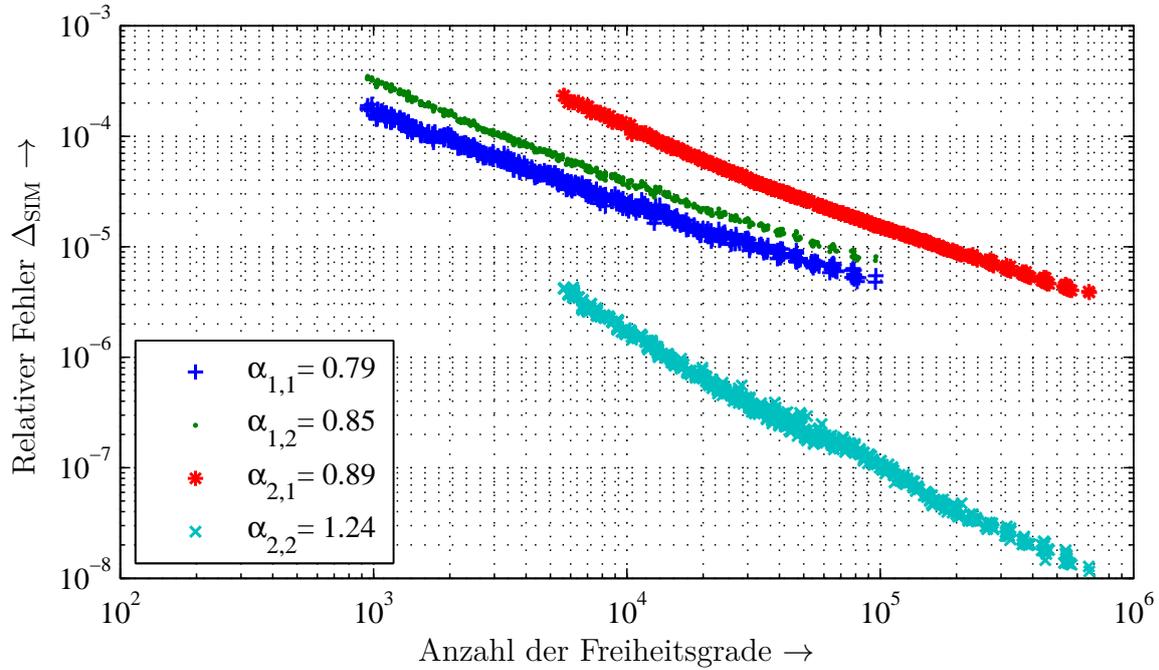


Abbildung 3.4.: Linearer Zylinderbenchmark. Der relative Fehler nach (A.1) der verschiedenen Simulationsarten ist gegen die Anzahl der mit kleiner werdendem Diskretisierungsparameter h zunehmende Anzahl der Freiheitsgrade aufgetragen. Fehlerordnung $\alpha_{p,g}$ nach Gl. (A.2) mit Ordnung der Ansatzfunktionen p und Elemente g . [B10]

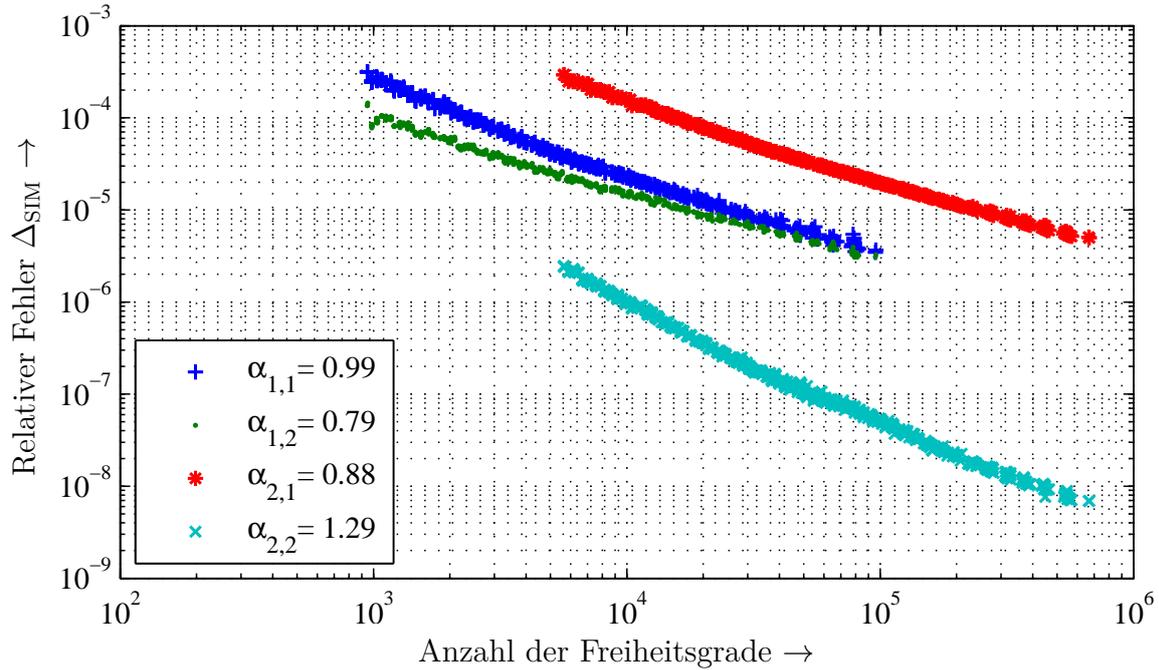


Abbildung 3.5.: Nichtlinearer Zylinderbenchmark. Der relative Fehler nach (A.1) der verschiedenen Simulationsarten ist gegen die mit kleiner werdendem Diskretisierungsparameter h zunehmende Anzahl der Freiheitsgrade aufgetragen. Fehlerordnung $\alpha_{p,g}$ nach Gl. (A.2) mit Ordnung der Ansatzfunktionen p und Elemente g . [B10]

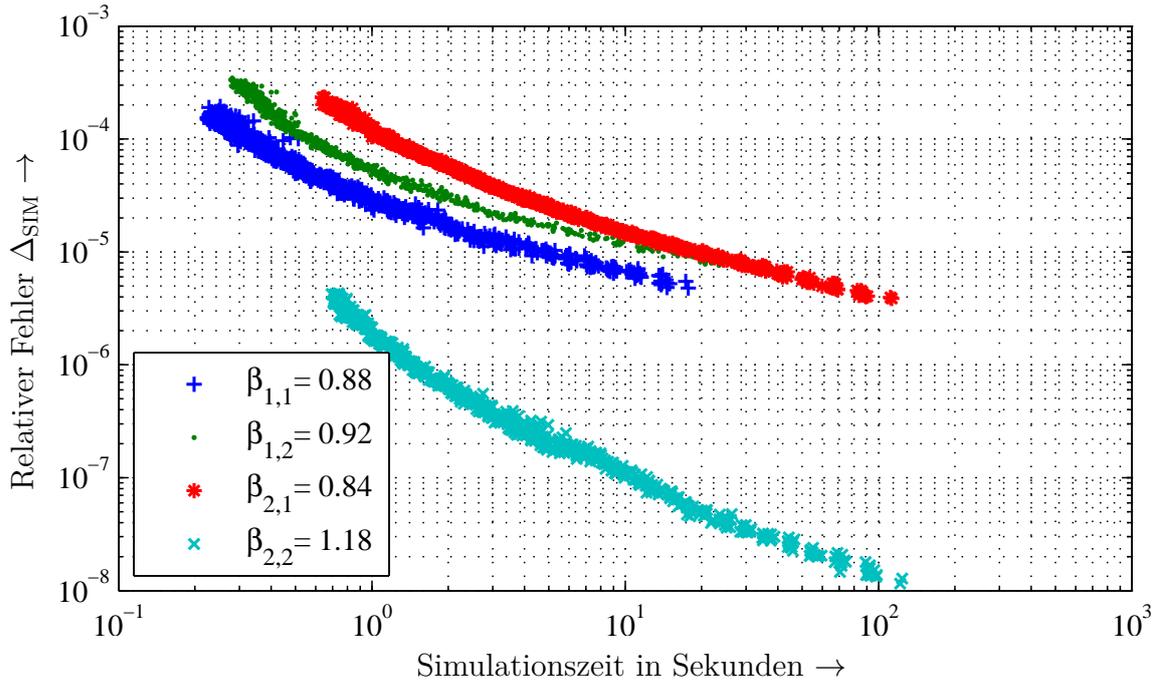


Abbildung 3.6.: Linearer Zylinderbenchmark. Der relative Fehler nach (A.1) ist gegen die benötigte Simulationszeit aufgetragen. Fehlerordnung $\beta_{p,g}$ analog zu Gl. (A.2) mit Ordnung der Ansatzfunktionen p und Elemente g . [B10]

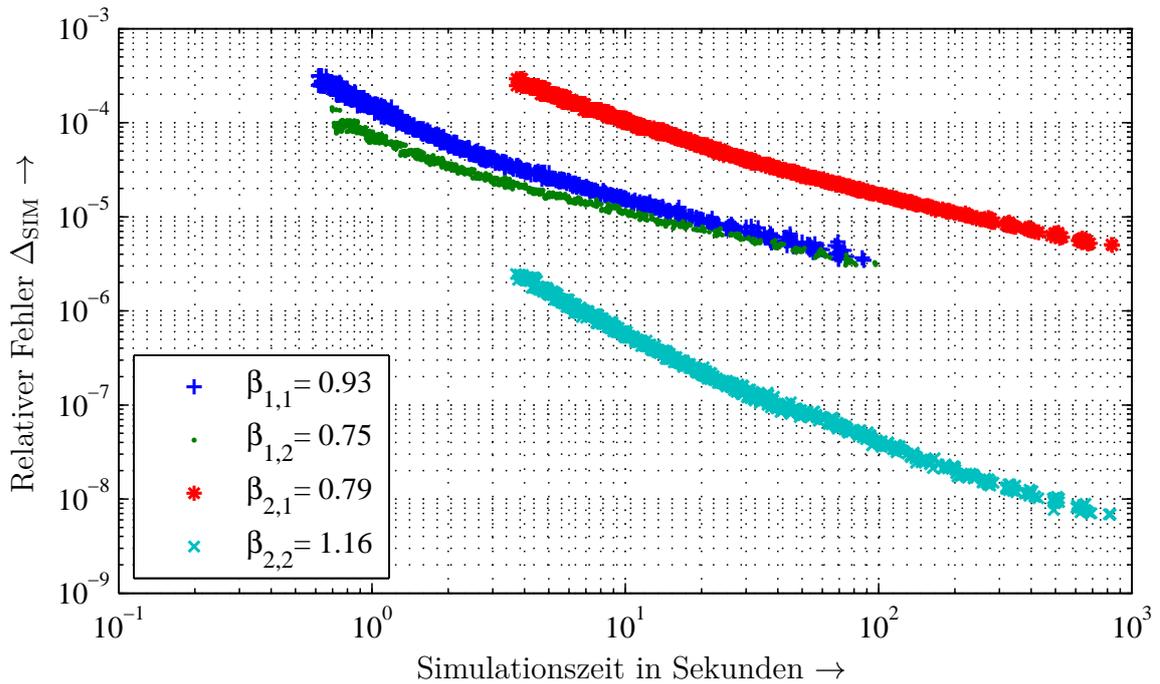


Abbildung 3.7.: Nichtlinearer Zylinderbenchmark. Der relative Fehler nach (A.1) ist gegen die benötigte Simulationszeit aufgetragen. Fehlerordnung $\beta_{p,g}$ analog zu Gl. (A.2) mit Ordnung der Ansatzfunktionen p und Elemente g . [B10]

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

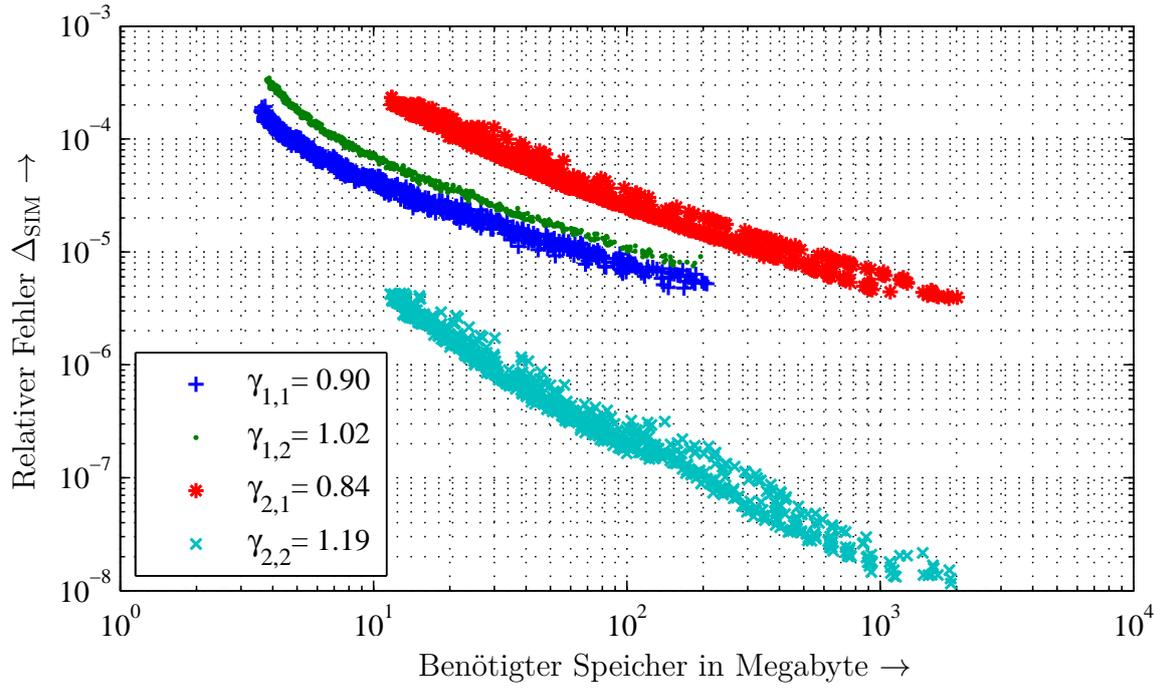


Abbildung 3.8.: Linearer Zylinderbenchmark. Der relative Fehler nach (A.1) ist gegen den benötigten Speicher aufgetragen. Fehlerordnung $\gamma_{p,g}$ analog zu Gl. (A.2) mit Ordnung der Ansatzfunktionen p und Elemente g . [B10]

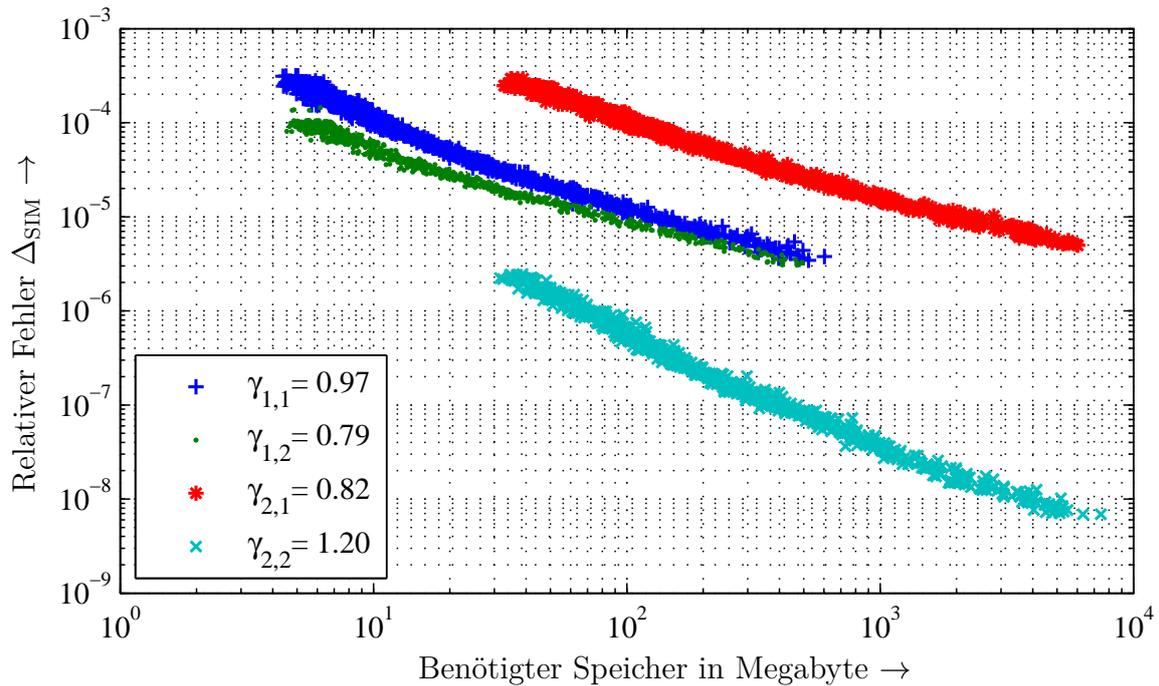


Abbildung 3.9.: Nichtlinearer Zylinderbenchmark. Der relative Fehler nach (A.1) ist gegen den benötigten Speicher aufgetragen. Fehlerordnung $\gamma_{p,g}$ analog zu Gl. (A.2) mit Ordnung der Ansatzfunktionen p und Elemente g . [B10]

Ergebnisse der Konvergenzstudie

Die Simulationsergebnisse des parametrisierten Benchmarks sind in Abbildung 3.4 bis 3.9 dargestellt. Es wurden jeweils 1 000 Simulationen mit variiertes Feinheit h der Diskretisierung durchgeführt. Die Auswertungslinie besteht aus 1 000 äquidistanten Punkten. Die Herleitung der analytischen Lösung und die Berechnung des Fehlers befinden sich im Anhang im Kapitel A.2.1. Die Koeffizienten α und analog dazu β und γ können als die Fehlerordnung in Gleichung (A.2) aufgefasst werden. Sie berechnen sich aus den Steigungen einer Regressionsgeraden im doppelt-logarithmischen Maßstab. Die entsprechenden Werte sind in der Legende gegeben.

Aus den Ergebnissen des Zylinderbenchmarks lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten. Sie bestätigen die Beobachtungen aus realistischen Simulationen:

- Die Verwendung sowohl von Elementen als auch von Ansatzfunktionen höherer Ordnung führt zu einem deutlich besseren Konvergenzverhalten hinsichtlich aller drei untersuchten Variablen, d.h. der Anzahl der Freiheitsgrade, der Simulationszeit und des Speicherbedarfs. Sowohl die Simulation mit linearen Elementen und linearen Ansatzfunktionen, die Simulation mit linearen Elementen und Ansatzfunktionen höherer Ordnung als auch die Simulation mit Elementen höherer Ordnung und linearen Ansatzfunktionen führt nicht zu vergleichbar genauen Ergebnissen.
- Die alleinige Erhöhung der Ordnung der Ansatzfunktionen führt zu ungenaueren Ergebnissen. Dies wird durch die am Anfang des Kapitels erwähnten Singularitäten der künstlichen Ecken der linearen Elemente verursacht.

3. *Erweiterung der Simulationsmethodik*

- In diesem Beispiel verbessert die alleinige Erhöhung der Ordnung der Elemente die Genauigkeit für nichtlineare Materialien.

3.2. Modellierung dünner Schichten

In vielen der in dieser Arbeit untersuchten Anwendungen ist die Schichtdicke des ZnO-Mikrovaristormaterials mit etwa 0,2 bis 1,5 mm sehr dünn im Vergleich zu den lateralen Abmessungen. Dies hat zur Folge, dass im Bereich der dünnen Schicht deutlich feiner diskretisiert werden muss. Dies führt zu längeren Simulationszeiten [A9, A51, A76, A105]. Der in [B12] präsentierte Ansatz berücksichtigt diese dünnen Schichten als 2D-Modelle in 3D-Simulationen. Dieser Ansatz wurde im Rahmen dieser Arbeit in MEQSICO implementiert. In diesem Abschnitt wird der Ansatz, in Abschnitt 3.2.1 dessen Implementation vorgestellt. Es folgt ein ausführlicher Benchmark für ein realistisches Isolatormodell in Abschnitt 3.2.2. Die Anwendungsprobleme werden dann in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 vorgestellt.

Es wird eine Anordnung wie in Abbildung 3.10 betrachtet. Zwei Volumina Ω_1 und Ω_2 bestehen aus jeweils zwei Materialien mit verschiedenen elektrischen Eigenschaften ε und κ (grad φ). Eine mögliche Anordnung wäre z.B. das Mikrovaristormaterial für Ω_1 und Luft für Ω_2 . Diese können alternativ mit deutlich weniger Aufwand auch in Form einer 2D-Schicht in den Simulationen berücksichtigt werden. Bei einer Modellierung als 2D-Schicht wird, gegenüber der als 3D-Schicht, das Volumen der Schicht auf eine Fläche reduziert. Die Voraussetzung hierfür ist zum einen, dass die Schicht dünn ist im Vergleich zur lateralen Ausdehnung, und zum anderen, dass die zur Oberfläche tangentialen die normalen Komponenten des elektrischen Feldes überwiegen. Eine andere mögliche Verwendung der dünnen Schichten ist die Berücksichtigung von leitfähigen Wasserschichten auf Isolatoren in Kapitel 4.1. Die vereinfachte Modellierung führt zu weniger Freiheitsgraden, zu besser konditionierten Gleichungssystemen und somit zu kürzeren Simulationszeiten. Hinzu kommt, dass

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

die Modell- und Netzerstellung von 2D-Schichten deutlich einfacher und unproblematischer ist als die von 3D-Volumina.

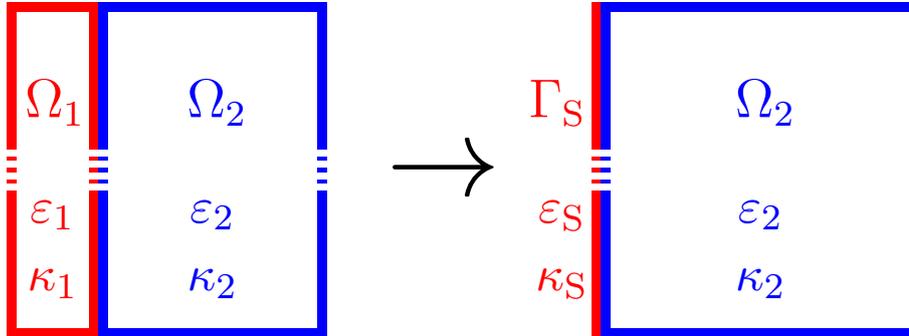


Abbildung 3.10.: Berücksichtigung von dünnen Volumina als 2D-Schicht.

Die beiden Volumina Ω_1 und Ω_2 in Abbildung 3.10 besitzen die unterschiedlichen Materialparameter κ_1 ($\text{grad } \varphi$), κ_2 , ε_1 , ε_2 . Das kleinere Volumen Ω_1 wird nun in eine dünne Schicht Γ_S mit der Dicke s projiziert. Für diese dünne Schicht berechnen sich die Einträge in die Steifigkeits- und Massenmatrix nach Gleichung (3.2) mit tensorieller Leitfähigkeit zu:

$$A_{ij} = \iiint_{\Omega} (\text{grad}_{a,b,c}(N_i))^T \begin{pmatrix} \tilde{\kappa}_a & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\kappa}_b & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\kappa}_c \end{pmatrix} \text{grad}_{a,b,c}(N_j) d\Omega.$$

Für diese dünne Schicht mit der Dicke s in Richtung der lokalen c -Koordinate lässt sich nun mit einer von der lokalen c -Koordinate unabhängigen Oberflächenleitfähigkeit $\tilde{\kappa}_a s$ und $\tilde{\kappa}_b s$ der Grenzwert des Integrals für c gegen Null bilden. Dabei geht der Gradient $\text{grad}_{a,b,c}$ in den Oberflächengradienten $\text{grad}_{a,b}$ über:

$$A_{ij} = \iiint_{\Omega} (\text{grad}_{a,b}(N_i))^T \begin{pmatrix} \tilde{\kappa}_a & 0 \\ 0 & \tilde{\kappa}_b \end{pmatrix} \text{grad}_{a,b}(N_j) d\Omega.$$

Da der Integrand der Schicht von der lokalen Koordinate in c -Richtung unabhängig ist, lässt sich das Volumenintegral für eine bestimmte konstante Dicke s in ein Oberflächenintegral überführen:

$$A_{ij} = s \iint_{\Gamma} (\text{grad}_{a,b}(N_i))^T \begin{pmatrix} \tilde{\kappa}_a & 0 \\ 0 & \tilde{\kappa}_b \end{pmatrix} \text{grad}_{a,b}(N_j) d\Gamma.$$

3.2.1. Implementierung der dünnen Schichten

Für die Berücksichtigung der dünnen Schichten müssen Flächenintegrale berechnet werden. Für die numerische Integration wird das Flächenelement auf ein Referenzelement mit der Kantenlänge 1 abgebildet und das Integral durch eine Summe über definierte gewichtete lokale Gaußpunkte approximiert. Die einzelnen Flächen werden im globalen Koordinatensystem x, y, z lokal durch die Vektoren \vec{a} und \vec{b} aufgespannt. Damit ergibt sich für den lokalen Flächenvektor \vec{F} :

$$\vec{F} = \vec{a} \times \vec{b} \quad \text{mit} \quad \vec{a} = \begin{pmatrix} \partial x / \partial a \\ \partial y / \partial a \\ \partial z / \partial a \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} \partial x / \partial b \\ \partial y / \partial b \\ \partial z / \partial b \end{pmatrix}.$$

Es wird ein lokales, so um die x - und y -Achse gedrehtes Koordinatensystem (r, s, t) eingeführt, dass in diesem der lokale Flächenvektor \vec{F} in t -Richtung zeigt. Somit liegt die Fläche in der rs -Ebene, siehe Abbildung 3.11. Die Abbildungsmatrix $A_{r,s,t}$ in dieses lokale Koordinatensystem lässt sich aus den Drehmatrizen um die Winkel des lokalen Flächenvektors \vec{F} zur z -Achse berechnen. Es werden für die Integration im Re-

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

ferenzelement der 2D-Schichten im gedrehten dreidimensionalen Raum (r, s, t) die Abbildungsmatrizen J bzw. deren Inverse J^{-1} benötigt mit

$$J = \begin{pmatrix} \partial r / \partial a & \partial r / \partial b \\ \partial s / \partial a & \partial s / \partial b \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad J^{-1} = \begin{pmatrix} \partial a / \partial r & \partial a / \partial s \\ \partial b / \partial r & \partial b / \partial s \end{pmatrix}.$$

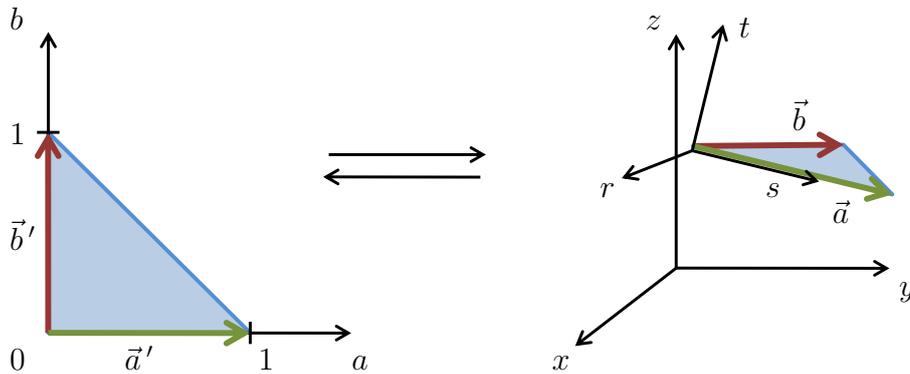


Abbildung 3.11.: Abbildung der beliebigen rechten Dreiecksfläche im Raum \mathbb{R}^3 auf das linke Referenzdreieck im Raum \mathbb{R}^2 .

Mit den in der rs -Ebene definierten Oberflächenmaterialparametern der dünnen Schicht mit Dicke s , $\varepsilon_S = s\varepsilon$ und $\kappa_S(\text{grad}(\varphi)) = s\kappa(\text{grad}(\varphi))$, ergeben sich die Einträge der 2D-Schicht in die Matrizen analog zu Gleichung (3.1) aus der Integration über die Gaußpunkte des lokalen Referenzelementes zu:

$$A_{ij} = \iint_{\Gamma} (\text{grad}_{r,s}(N_i))^T \begin{pmatrix} \kappa_{S,r} & 0 \\ 0 & \kappa_{S,s} \end{pmatrix} \text{grad}_{r,s}(N_j) \det(J) d\Gamma.$$

Der Oberflächengradient $\text{grad}_{r,s}$ wird mithilfe der Kettenregel in den Gradienten des Referenzelementes $\text{grad}_{a,b}$ transformiert,

$$\begin{aligned} \text{grad}_{r,s}(N_i) &= \begin{pmatrix} \partial / \partial r \\ \partial / \partial s \end{pmatrix} N_i = \begin{pmatrix} \partial a / \partial r & \partial a / \partial s \\ \partial b / \partial r & \partial b / \partial s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial / \partial a \\ \partial / \partial b \end{pmatrix} N_i = \\ &= J^{-1} \text{grad}_{a,b}(N_i). \end{aligned}$$

Damit lässt sich die Integration im Referenzelement durchführen, d.h.

$$A_{ij} = \iint_{\Gamma} (\text{grad}_{a,b}(N_i))^T \tilde{\kappa}_S(\text{grad}(\varphi)) \text{grad}_{a,b}(N_j) d\Gamma,$$

wird ausgewertet. Hierbei wird die Leitfähigkeit $\kappa_S(\text{grad}(\varphi))$ des jeweiligen Elementes in eine tensorielle Leitfähigkeit $\tilde{\kappa}_S(\text{grad}(\varphi))$ im Referenzelement transformiert:

$$\tilde{\kappa}_S = J^{-T} \kappa_S(\text{grad}(\varphi)) J^{-1} \det(J).$$

Das Integral wird durch eine Summe über definierte gewichtete lokale Gaußpunkte approximiert. Der Gradient $\text{grad}_{a,b}$ von N_i bzw. N_j muss hierbei nur einmalig für jeden Gaußpunkt berechnet werden. Bei der Verwendung von isoparametrischen Elementen ist die Jacobimatrix J für die Abbildung in das Referenzelement vom Ort abhängig. Folglich werden die einzelnen Werte des Integrals über Lagrange-Polynome berechnet, gewichtet und mit der Funktionaldeterminante eines jeden Gaußpunktes multipliziert. Die Einträge dieser Element-Steifigkeitsmatrix der Korrekturflächen werden anschließend in die Gesamtsteifigkeitsmatrix eingearbeitet. Da quadratische dreiecksförmige Elemente mit jeweils einem Freiheitsgrad an den drei Ecken und jeweils einem Freiheitsgrad auf den drei Kanten verwendet werden, gilt für die Dimensionen der Elementmatrix:

$$A_{ij} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}.$$

Für die Berechnung der Jacobimatrix der Transformation ins Referenzelement und für die Ansatzfunktionen werden Silvester-Lagrange-Polynome verwendet. Als weiterführende Finite-Elemente-Literatur wird auf [A13, A31, A58, A59, A116] verwiesen.

3.2.2. Vergleich der 2D+3D und 3D+3D-Modellierung

In einem Benchmark wird der Unterschied zwischen der Modellierung einer dünnen nichtlinear-resistiven Schicht aus Mikrovaristormaterial in 3D und 2D innerhalb einer 3D-Finite-Elemente-Simulation untersucht. Da sich dieses Problem nicht wie im Benchmark in Kapitel 3.1.2 analytisch lösen lässt, werden jeweils das eigene und das Konvergenzverhalten der Simulationen zueinander untersucht.

Verwendete Geometrie

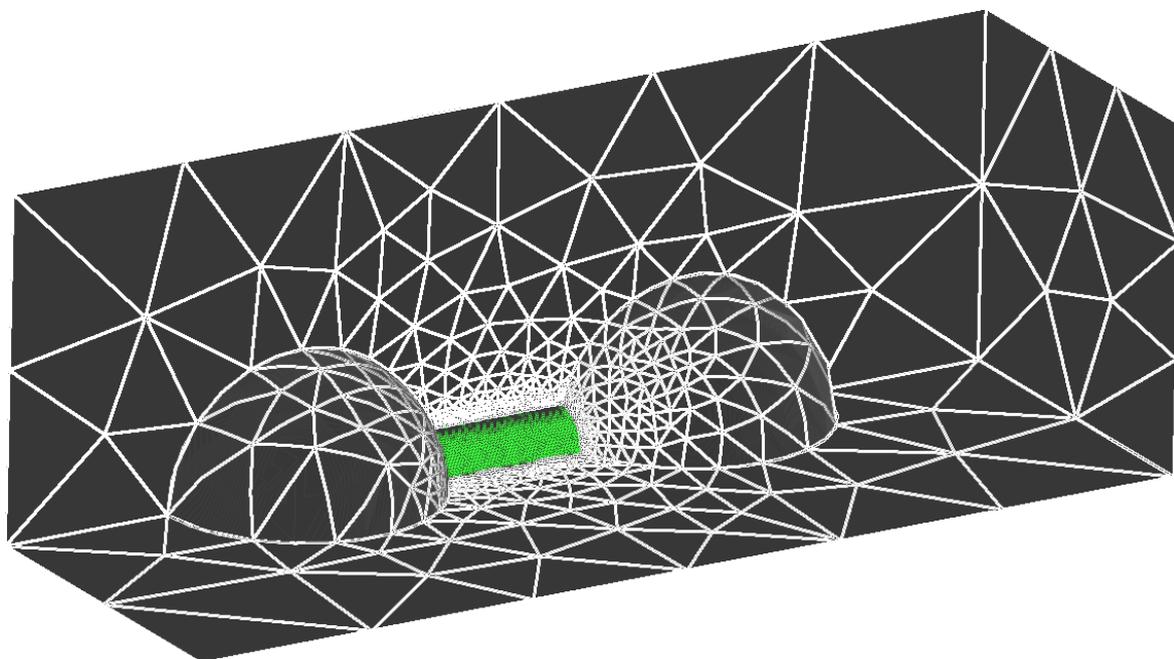


Abbildung 3.12.: Geometrie- und Vernetzungsbeispiel des Benchmarks der dünnen Schichten. Die nichtlinear-resistive dünne Schicht befindet sich auf dem Isolatorstab zwischen den beiden kugelförmigen Elektroden.

Die Modellierung der dünnen Schichten als 2D-Schicht wird mit einer konventionell modellierten 3D-Schicht verglichen. Das Modell ist ein Isolatorstab mit einer 1 mm dicken ZnO-Mikrovaristorschicht, welcher zwischen zwei kugelförmigen Elektroden eingespannt wird, siehe Abbildung

3.12. Der Stab ist 85 mm lang und hat einen Durchmesser von 40 mm. Die kugelförmigen Elektroden besitzen einen Radius von 80 mm. An die eine Elektrode wird eine sinusförmige Spannung mit einem Effektivwert von 70.71 kV angelegt, die andere Elektrode und das Ende des Außenraums werden geerdet. Der Außenraum besitzt eine relative Permittivität von 1.0 und keine Leitfähigkeit, der Isolatorstab eine relative Permittivität von 4.0 und keine Leitfähigkeit und die Mikrovaristorschicht eine Permittivität von 12.0 und die nichtlineare Leitfähigkeit der Probe K1 1a aus Abbildung 2.8. Die transienten Simulationen werden mit einer konstanten Zeitschrittweite von 0.5 ms durchgeführt. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Elektroden werden als ideal elektrische leitfähig (PEC) modelliert.

Tabelle 3.1.: Materialparameter für den Vergleich der Modellierungen.

Material	ϵ_r	κ
ZnO-Mikrovaristormaterial	12.0	siehe Abb. 2.8
Umgebung (Luft)	1.0	-
Silikon	4.0	-
Metall	PEC	PEC

3.2.3. Bewertung des Konvergenzverhaltens

Die Simulationsergebnisse der transienten nichtlinearen elektro-quasistatischen Simulationen werden entlang einer Linie bestehend aus 5 000 Punkten im Abstand 1 mm von der Oberfläche des Isolatorstabs in der Luft ausgewertet. Aus den berechneten Potentialwerten wird mithilfe des Gradienten der verwendeten Lagrange-Polynome das elektrische Feld berechnet. Es wird die technisch relevante zur Oberfläche tangential Komponente des elektrischen Feldes untersucht. Für das Konvergenzverhalten

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

wird die Abweichung zur Referenzlösung $E_{\text{tan,ref}}$ für n Auswertungspunkte nach der folgender Formel berechnet:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{\text{tan}}(\vec{r}_i) - E_{\text{tan,ref}}(\vec{r}_i)}{E_{\text{tan,ref}}(\vec{r}_i)} \right)^2}. \quad (3.3)$$

Hierbei wird der Bereich in der unmittelbaren Nähe der Elektroden, der sog. Tripelpunkt nicht berücksichtigt. Für das Konvergenzverhalten werden nur die Werte auf den Auswertungspunkten zwischen -40 mm und 40 mm berücksichtigt. Dieser Bereich ist auch in den Abbildungen 3.15 bis 3.22 durch schwarze Linien markiert.

Die für die transiente elektro-quasistatische Simulation benötigte Zeit und der benötigte Speicher sind in den Abbildungen 3.13 und 3.14 aufgetragen. Die Simulationen werden auf einem IBM BladeServer mit zwei Intel Xeon X5570 CPUs mit 2,93 GHz Taktung unter Linux durchgeführt. Die Modellierung als 2D-Schicht ist etwas effizienter bei gleicher Anzahl an Freiheitsgraden. Für einen exemplarischen direkten Vergleich sind in den Abbildungen 3.15 und 3.16 die Ergebnisse der Simulation für eine etwa gleiche Anzahl an Freiheitsgraden aufgetragen. Der Feldverlauf bei Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen zweiter Ordnung ist wesentlich glatter bei vergleichbarer Rechenzeit. Die Modellierung der dünnen Schicht als 2D-Fläche ist etwa um den Faktor zwei schneller. In den Abbildungen 3.19 und 3.20 sind die Simulationsergebnisse für die feinsten Diskretisierungen aufgetragen. Diese werden für die Bewertung des Konvergenzverhaltens nach Gleichung (3.3) in den Abbildungen 3.23 und 3.24 als Referenzlösung verwendet. Für die abweichenden Ergebnisse der verschiedenen Modellierungen der dünnen Schicht ist die unterschiedliche Auswertung des elektrischen Feldes für die Ermittlung der Materialparameter in der Schicht verantwortlich. Während bei einer 3D-Modellierung auch normale Feldkomponenten in der Schicht berück-

sichtigt werden, ist dies bei der Modellierung als 2D-Schicht nicht möglich. Der Betrag der elektrischen Feldstärke ist ohne die normale Komponente kleiner. Dies führt zu einer geringeren Leitfähigkeit im feldstärkeabhängigen Material und somit zu abweichenden Ergebnissen. Da bei der Ermittlung der in der Simulation verwendeten Materialdaten eine mögliche Anisotropie nicht untersucht wurde, ist nicht bekannt, welche Modellierung zu realistischeren Ergebnissen führt. Es erscheint jedoch sinnvoll, das Material als isotrop anzunehmen, es sei denn, dass z.B. Bänder oder Lacke simuliert werden.

Aus den Ergebnissen der Simulationen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Eine Modellierung als 2D-Schicht führt wie erwartet zu leicht abweichenden Ergebnissen gegenüber denen bei Modellierung als 3D-Schicht. In der untersuchten Anordnung ist dieser systematische Fehler von 0,5% in Abbildung 3.24 ersichtlich.
- Die Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung führt zu genaueren Ergebnissen bei vergleichbarem Rechenaufwand, siehe auch Kapitel 3.1.
- Beide Modellierungen konvergieren für eine zunehmende Anzahl an Freiheitsgraden in Abbildung 3.23.
- Der Unterschied der Ergebnisse der verschiedenen Modellierung der dünnen Schicht ist in diesem Beispiel mit etwa 0.5% vergleichsweise gering im Vergleich zu den Vorteilen der einfacheren Modellierung und schnelleren Simulation. Insbesondere bei der Erstellung des Netzes kann aufgrund des guten Konvergenzverhaltens der 2D-Schicht eine wesentlich gröbere Diskretisierung gewählt werden.

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

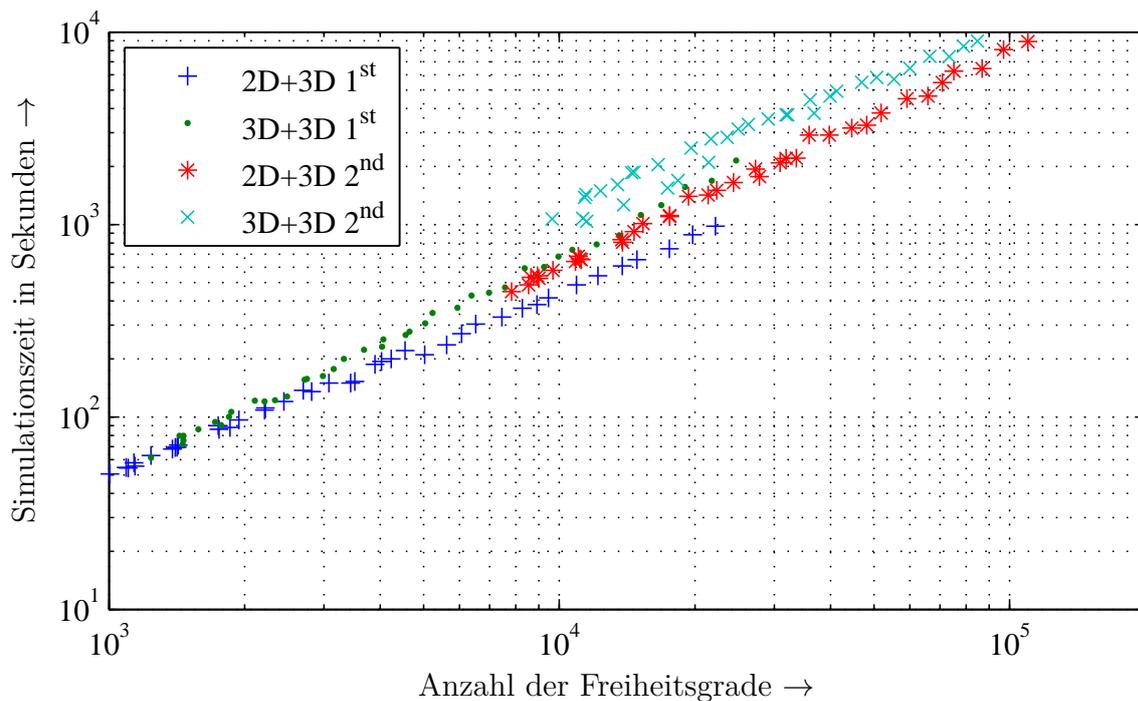


Abbildung 3.13.: Simulationszeit gegen Anzahl der Freiheitsgrade für die verschiedenen Modellierungen der dünnen Schicht. Die Modellierung als 2D-Schicht führt zu geringfügig schnelleren Simulationsergebnissen bei gleicher Anzahl von Freiheitsgraden.

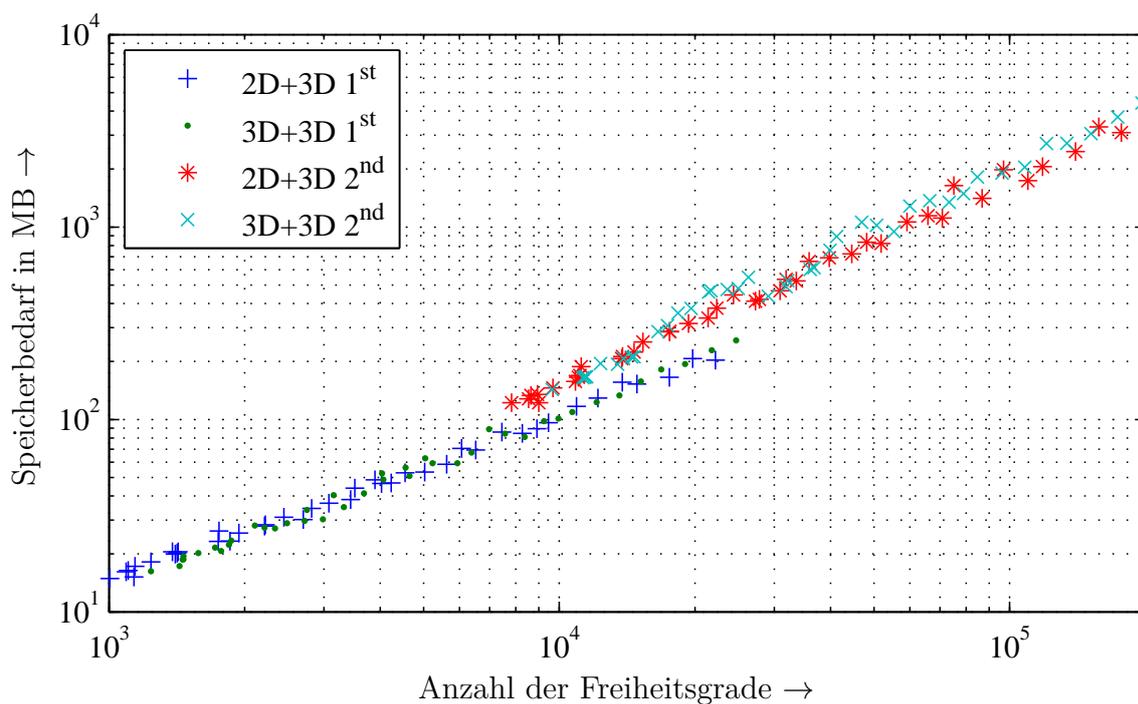


Abbildung 3.14.: Speicherbedarf der Simulation gegen Anzahl der Freiheitsgrade für die verschiedenen Modellierungen der dünnen Schicht. Die Simulationen mit Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung benötigen etwas mehr Speicher.

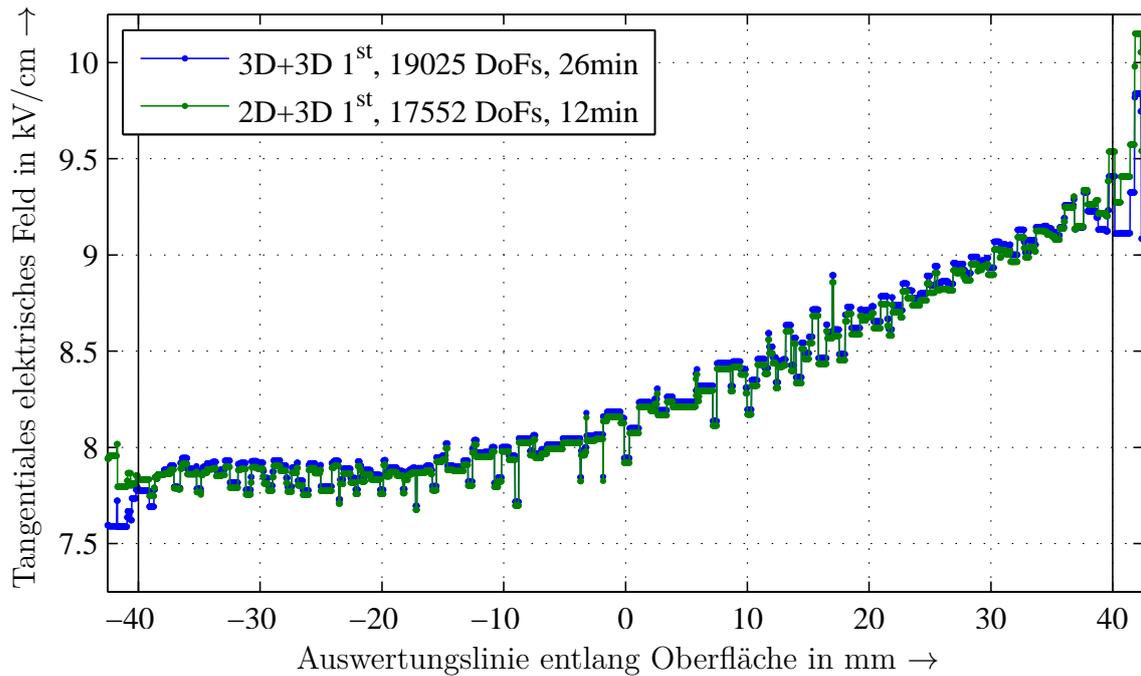


Abbildung 3.15.: Beispiel des Benchmarks der dünnen Schichten mit etwa 18 000 Freiheitsgraden (DoFs) erster Ordnung. Bei einem vergleichbaren Verlauf des elektrischen Feldes halbiert sich die Simulationszeit bei Verwendung von 2D-Schichten.

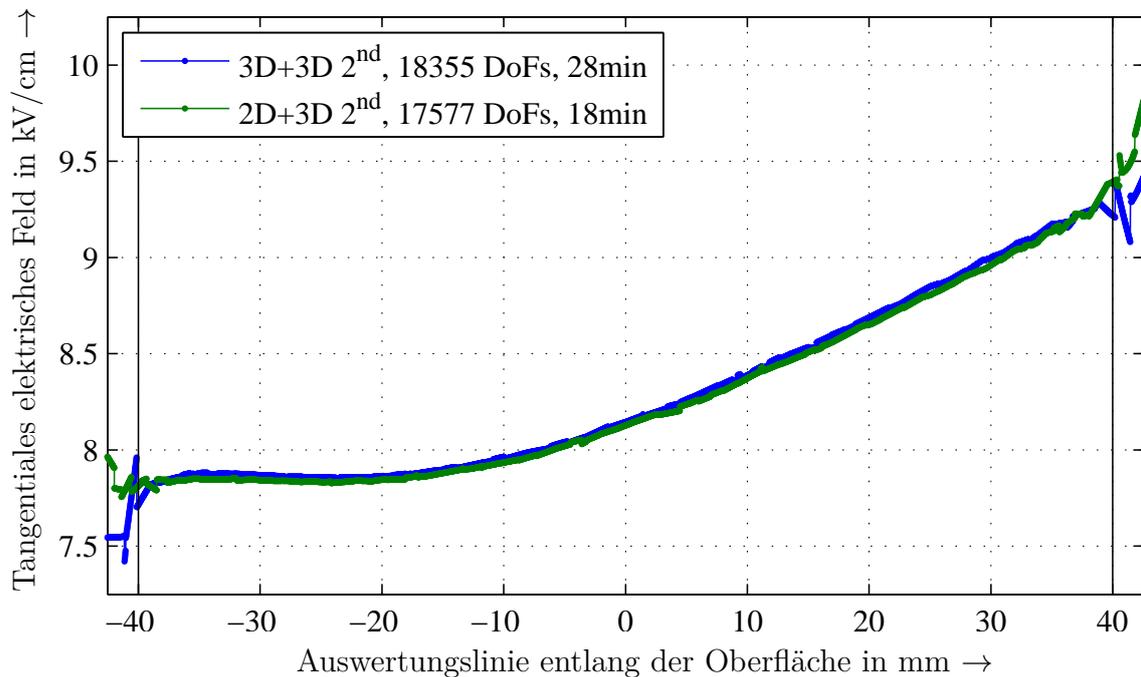


Abbildung 3.16.: Beispiel des Benchmarks der dünnen Schichten mit etwa 18 000 DoFs zweiter Ordnung. Bei vergleichbaren Rechenzeiten führt die Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen zweiter Ordnung zu wesentlich glatteren Ergebnissen.

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

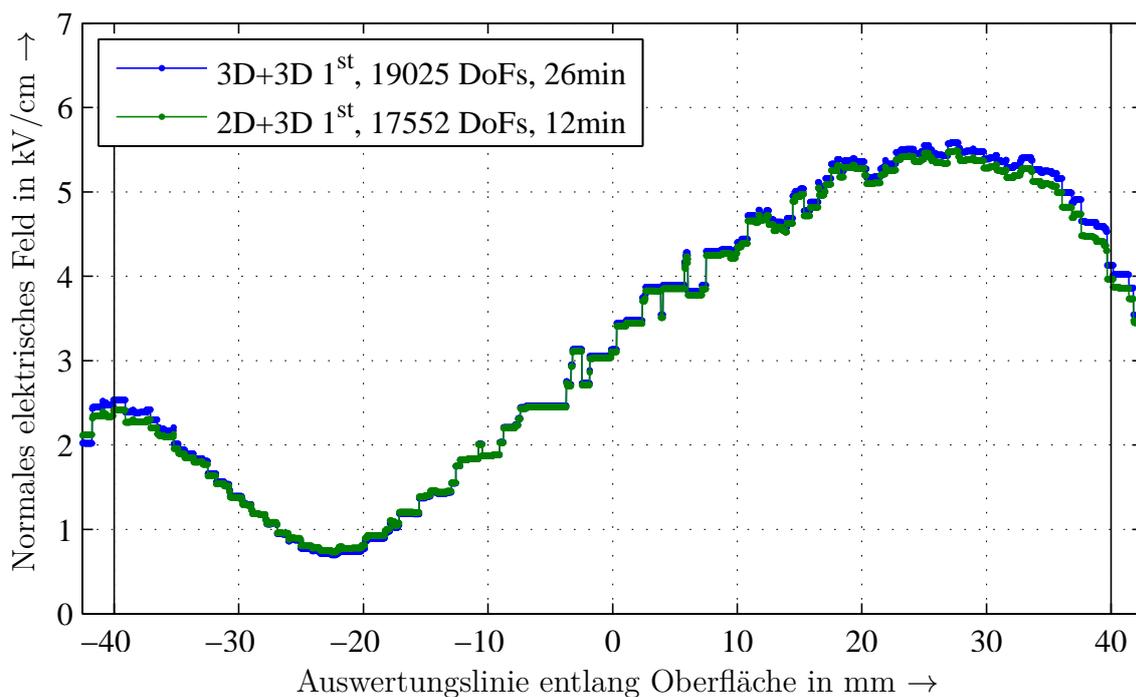


Abbildung 3.17.: Beispiel des Benchmarks der dünnen Schichten mit etwa 18 000 DoFs erster Ordnung. Der zur Oberfläche normale Anteil des elektrischen Feldes unterscheidet sich kaum bei Modellierung der dünnen Schicht als 2D Fläche oder 3D Volumen.

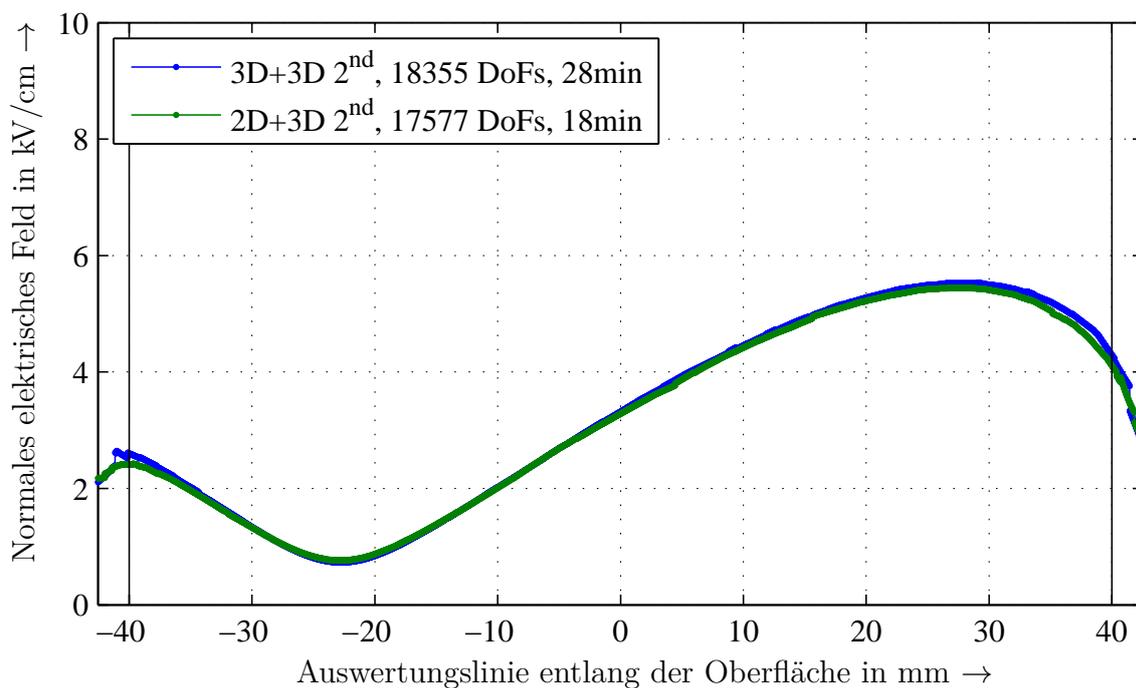


Abbildung 3.18.: Beispiel des Benchmarks der dünnen Schichten mit etwa 18 000 DoFs zweiter Ordnung. Der zur Oberfläche normale Anteil des elektrischen Feldes unterscheidet sich kaum bei Modellierung der dünnen Schicht als 2D Fläche oder 3D Volumen.

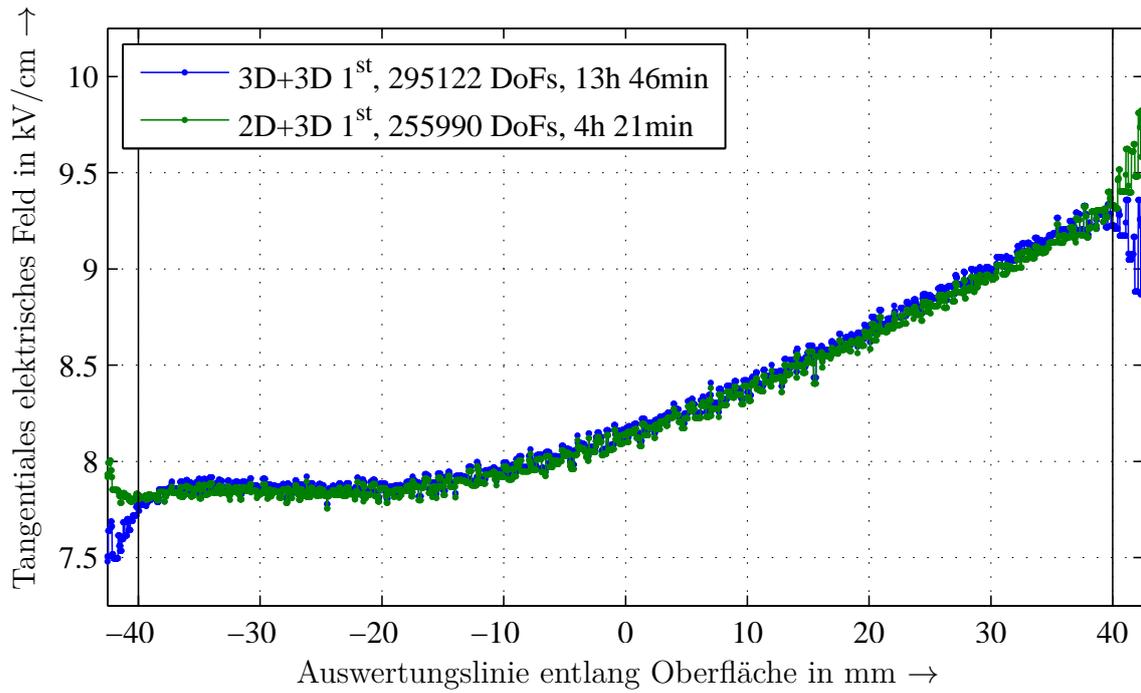


Abbildung 3.19.: Referenzlösung erster Ordnung des Benchmarks der dünnen Schichten. Für die Vernetzung des Mikrovaristormaterials wurden 0.4 mm vorgegeben. Die Modellierung als 2D-Schicht beschleunigt die Simulation um den Faktor 3.

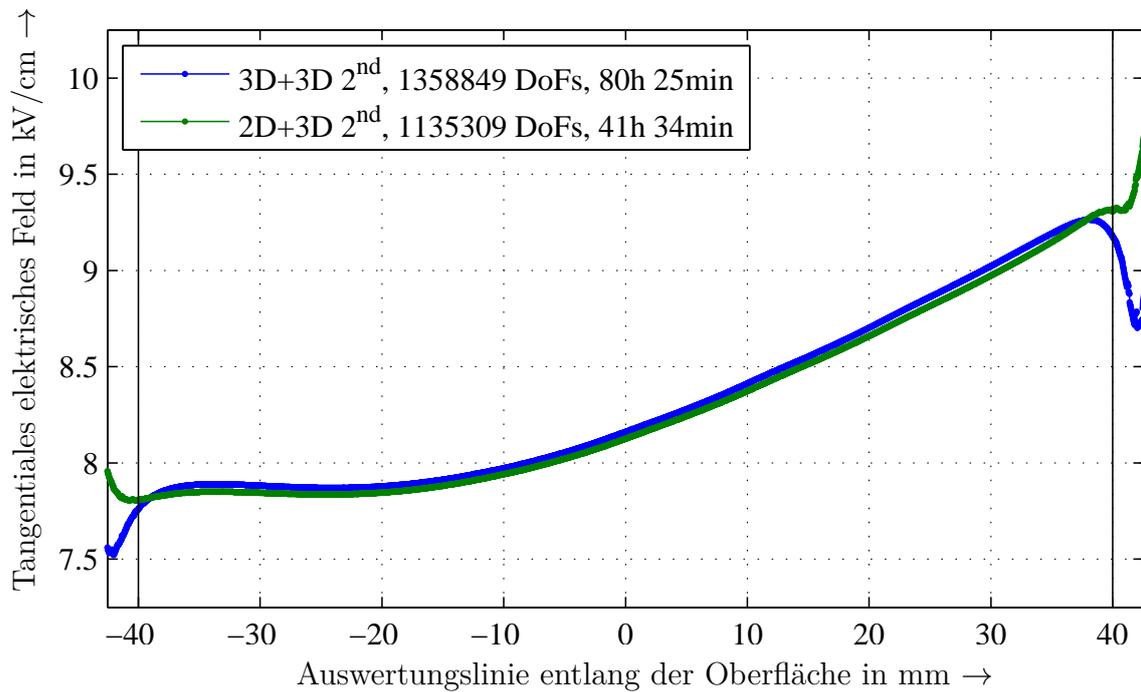


Abbildung 3.20.: Referenzlösung zweiter Ordnung des Benchmarks der dünnen Schichten. Das Ergebnis der 3D-Modellierung wird als Referenz für die vergleichende Konvergenzanalyse in Abbildung 3.24 verwendet.

3. Erweiterung der Simulationsmethodik

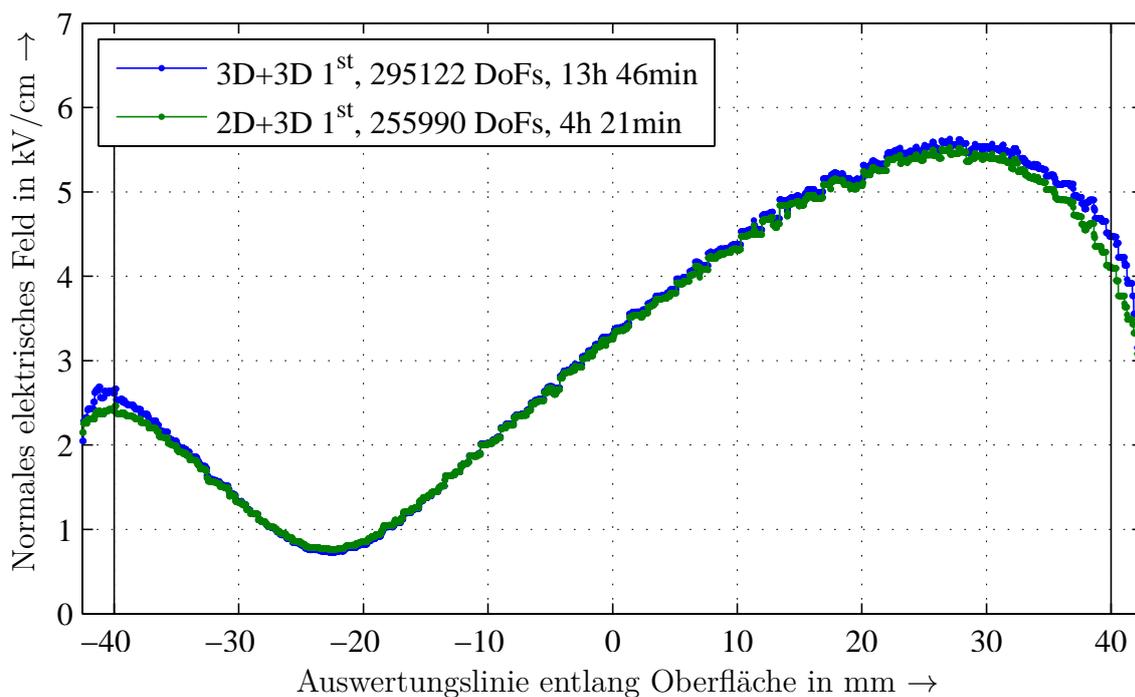


Abbildung 3.21.: Referenzlösung erster Ordnung des Benchmarks der dünnen Schichten. Der zur Oberfläche normale Anteil des elektrischen Feldes unterscheidet sich kaum bei Modellierung der dünnen Schicht als 2D Fläche oder 3D Volumen.

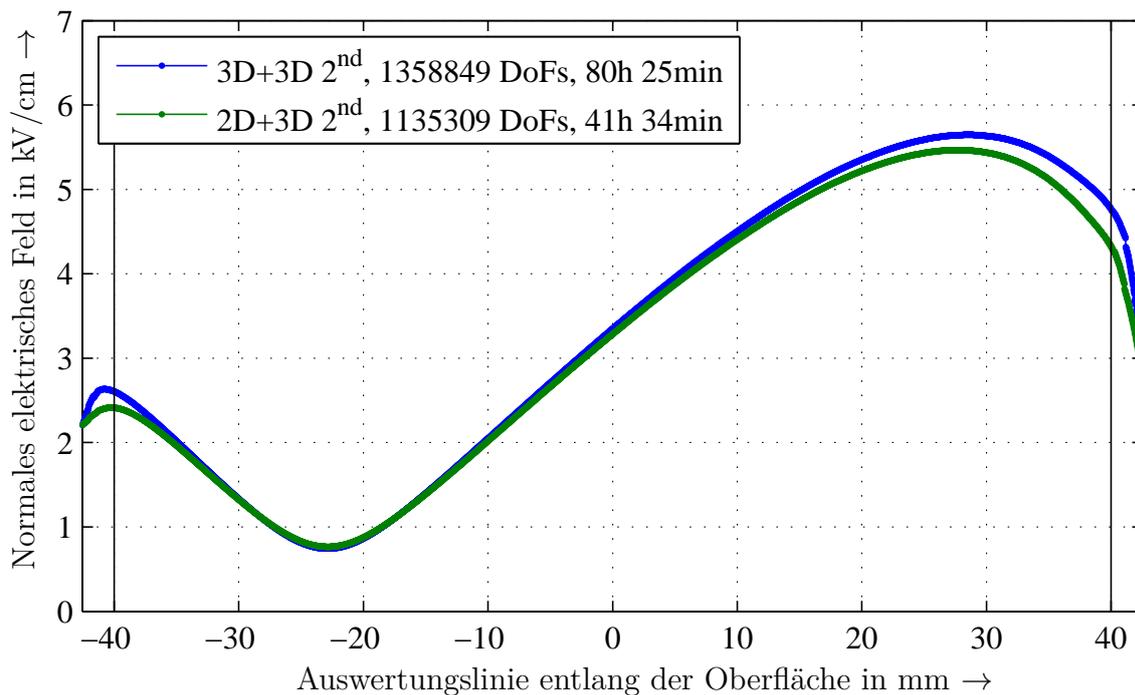


Abbildung 3.22.: Referenzlösung zweiter Ordnung des Benchmarks der dünnen Schichten. Der zur Oberfläche normale Anteil des elektrischen Feldes unterscheidet sich deutlich bei Modellierung der dünnen Schicht als 2D Fläche oder 3D Volumen.

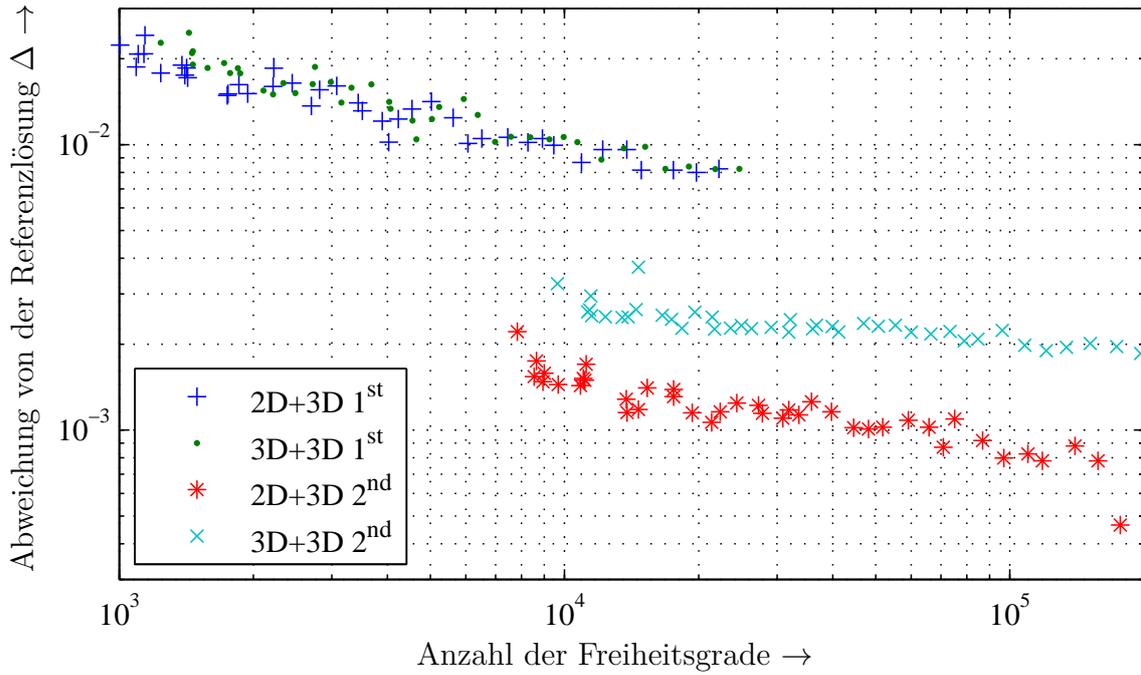


Abbildung 3.23.: Eigenes Konvergenzverhalten der verschiedenen Modellierungen. Die Abweichungen nach Gleichung (3.3) werden auf die feinsten Lösungen in den Abbildungen 3.19 und 3.20 bezogen.

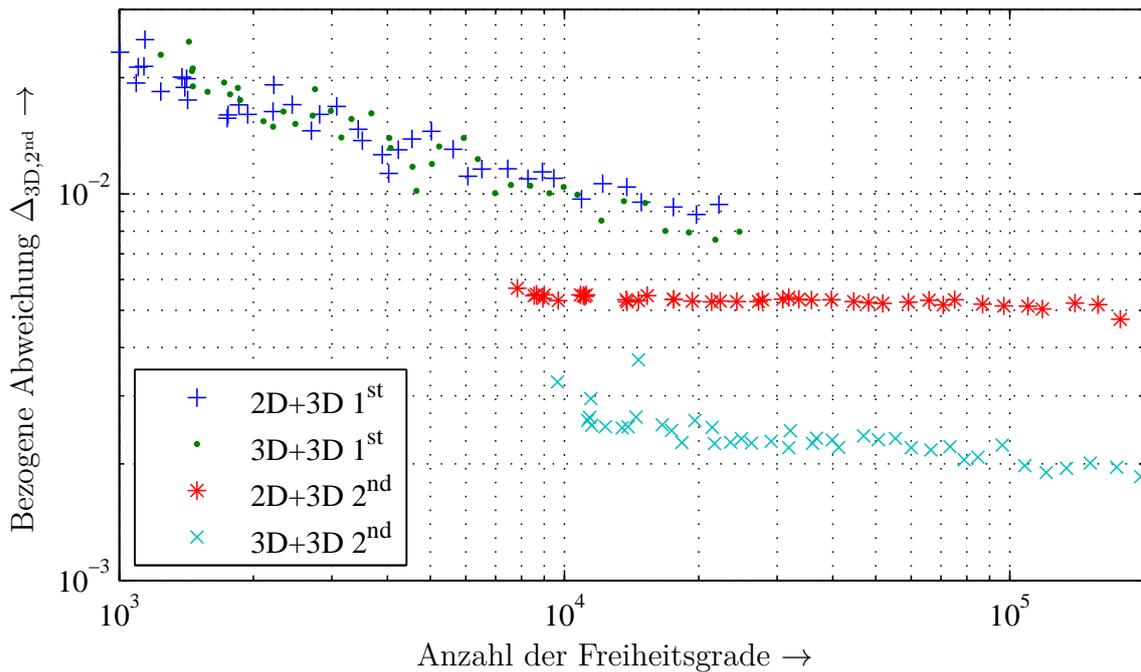


Abbildung 3.24.: Vergleichendes Konvergenzverhalten der verschiedenen Modellierungen. Die Abweichungen nach Gleichung (3.3) werden auf die feinste Lösung der Modellierung als 3D-Schicht zweiter Ordnung in der Abbildung 3.20 bezogen. Klar erkenntlich ist die modellierungsbedingte Abweichung von etwa 0.5 %.

4. Anwendungsprobleme

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse und die erarbeitete Programminfrastruktur, die in den Kapiteln 2 und 3 beschrieben sind, genutzt, um die Einsatzmöglichkeiten des Mikrovaristormaterials in der elektrischen Energietechnik zu klären. Neben zwei typischen Gleitarrangements, dem Endenglimmschutz für elektrische Maschinen und den Kabelgarnituren, wird hier auch die Anwendung von Mikrovaristormaterialien in Verbundisolatoren untersucht.

4.1. Langstabisolatoren

Schwach leitfähige Schichten auf der Oberfläche von Keramikisolatoren wurden schon im Jahre 1940 patentiert. Der aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit fließende Kriechstrom von etwa 1 mA erhöht die Temperatur der Isolatoroberfläche und begünstigt somit eine schnelle Trocknung. Zudem bietet die leitfähige Schicht einen alternativen Pfad, um eventuell auftretende Lichtbögen zu unterbinden [A47]. Das Mikrovaristormaterial bietet die Möglichkeit, diesen Effekt auch für Verbundisolatoren zu nutzen. Dies wird in [A6] für eine Durchführung und einen Langstabilisolator theoretisch untersucht. Der Einsatz von Mikrovaristormaterial glättet hier in beiden Anordnungen die elektrische Feldverteilung und ermöglicht somit ein kompakteres Design. Hingegen wird in [A14] aus theoretischen Überlegungen davon abgeraten, das Material für die Her-

stellung von Verbundisolatoren zu verwenden. Die ohmschen Verluste beeinträchtigen stark das thermische Verhalten. Dem gegenüber jedoch stehen praktische Untersuchungen an Langstabisolator mit Mikrovaristormaterialien an der TU Darmstadt [A30, A102, A103]. In diesen Arbeiten wird von einem positiven Einfluss auf die Überschlagsfestigkeit der Langstabisolator berichtet. Diese Messungen wurden auch in Simulationen nachvollzogen [C6, B1, B5, B9]. Auch wird in der Literatur von einer Verbesserung des Betriebsverhaltens von Langstabisolator beim Einsatz von Barium-Titanat berichtet [A77, A107]. Hierbei beruht dies jedoch ausschließlich auf der hohen Permittivität des Barium-Titanats. Das ZnO-Mikrovaristormaterial bietet zusätzlich noch die feldstärkeabhängige Leitfähigkeit. In diesem Kapitel wird der Einfluss des Mikrovaristormaterials auf das elektrische Verhalten des Langstabisolator in Prüfungen unter künstlicher Beregnung nach [A25], im Weiteren Regentest genannt, untersucht.

4.1.1. Verwendungspotential von Mikrovaristoren

Im Regentest wird aufgrund der Leitfähigkeit des Wassers der Kriechweg des Langstabisolator teilweise überbrückt. Zusätzlich wird das elektrische Feld durch abwechselnd mit Wasser benetzte und trockene Bereiche stark inhomogen. Diese Inhomogenität des elektrischen Feldes wirkt sich negativ auf die Lebensdauer des Langstabisolator aus, da verstärkt Korona entlang der Oberfläche des Isolator in den Trockenzonen auftritt. Außerdem wirkt sich der verkürzte Kriechweg negativ auf die mögliche Betriebsspannung des Langstabisolator aus.

Nach Abbildung 4.1 werden die Trockenzonen durch den Einsatz von Mikrovaristoren überbrückt. Diese werden mit zunehmender Feldstärke leitfähiger. Dadurch wird das elektrische Feld entlang des Langstabiso-

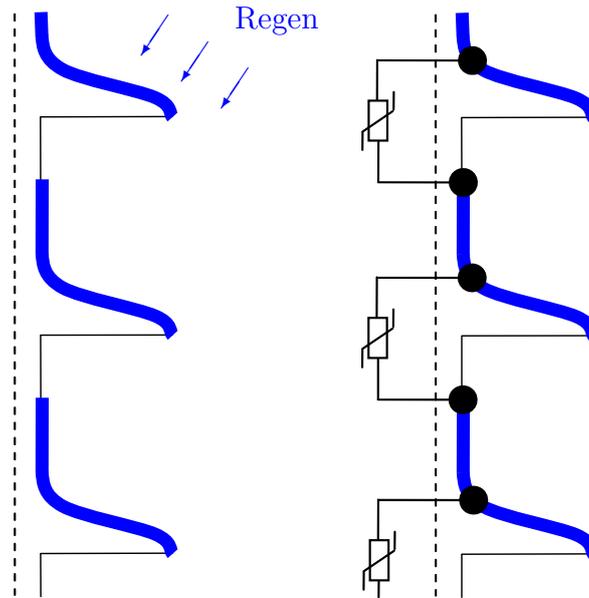


Abbildung 4.1.: Schnittbild eines Teils des Langstabisolators im Regentest. Die trockenen Zonen zwischen den mit Wasser benetzten Schirmen werden mit Mikrovaristormaterial überbrückt. Links der konventionelle, rechts der Langstabilisolator mit Mikrovaristormaterial. [B9]

lators homogenisiert. In Abbildung 4.2 sind die Ersatzschaltbilder für den konventionellen Isolator und den Isolator mit Mikrovaristormaterial gegeben. In diesen wird der Langstabilisolator als eine Kette von Kapazitäten aufgefasst. Im Regentest werden aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit der vom Wasser benetzten Schirme diese Kapazitäten teilweise überbrückt. Die Folge sind hohe elektrische Feldstärken in den Trockenzonen aufgrund der inhomogenen Potentialverteilung, eine Überbrückung des Kriechwegs und eine niedrigere Betriebsspannung des Langstabisolators. Die Applikation von Mikrovaristormaterial homogenisiert die Potentialverteilung entlang des Kriechwegs durch eine angepasste Leitfähigkeit in den Trockenzonen und erhöht somit die Betriebsspannung des Langstabilisolators. Dieser Effekt soll mithilfe der Simulation näher untersucht werden.

4. Anwendungsprobleme

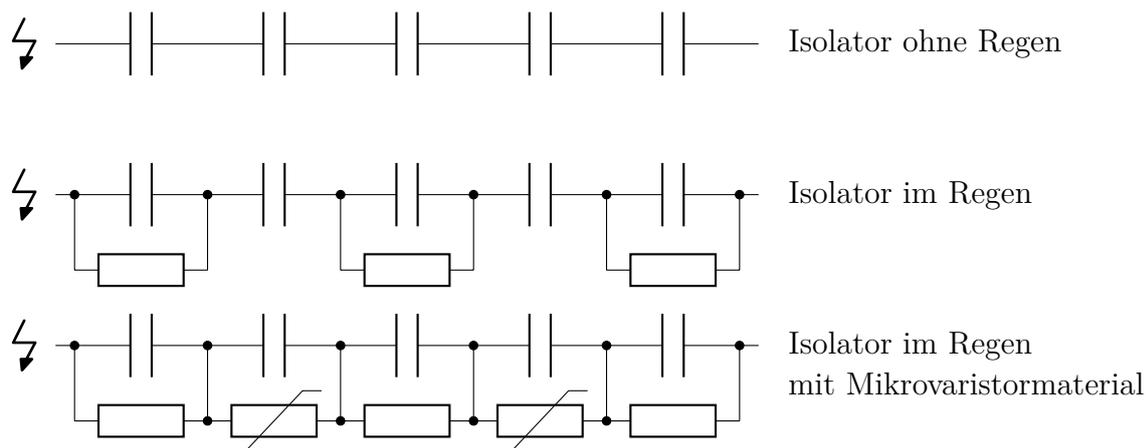


Abbildung 4.2.: Ersatzschaltbild des trockenen und berechneten konventionellen Langstabisolators und des berechneten Isolators mit Mikrovaristoren. Das Mikrovaristormaterial überbrückt die Trockenzone durch seine schwache Leitfähigkeit und führt somit zu einer Homogenisierung des elektrischen Feldes auf der Oberfläche des Isolators [B5].

4.1.2. Simulationsmodell der Langstabisolatoren

Der Messaufbau für die Regentests im Hochspannungslabor ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Der Regentest wird nach [A56] durchgeführt. Das obere Ende der Isolatoren ist an einer geerdeten Mastnachbildung befestigt. An die Leiternachbildung am unteren Ende der Isolatoren wird eine 50 Hz-Wechselspannung von 600 kV angelegt. Nähere Details zu den praktischen Messungen sind in [A30, B1] zu finden. Die Ergebnisse der Messungen werden auch im Anschluss an die Vorstellung der Simulationsergebnisse im Kapitel 4.1.4 diskutiert. Das konstruierte Simulationsmodell und dessen Vernetzung ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Hierbei werden alle dünnen Schichten als 2D-Modelle modelliert, da sich bei einer Modellierung der dünnen Schichten in 3D das Modell kaum oder nur mit stark erhöhtem Aufwand vernetzen ließe. Der durch diese vereinfachte Modellierung verursachte Fehler ist hierbei nach den Ergebnissen der Untersuchungen im Kapitel 3.2 vertretbar. Die Mikrovaristorbeschichtungen besitzen eine Dicke von 1.5 mm. Der Effekt des Regentests wird

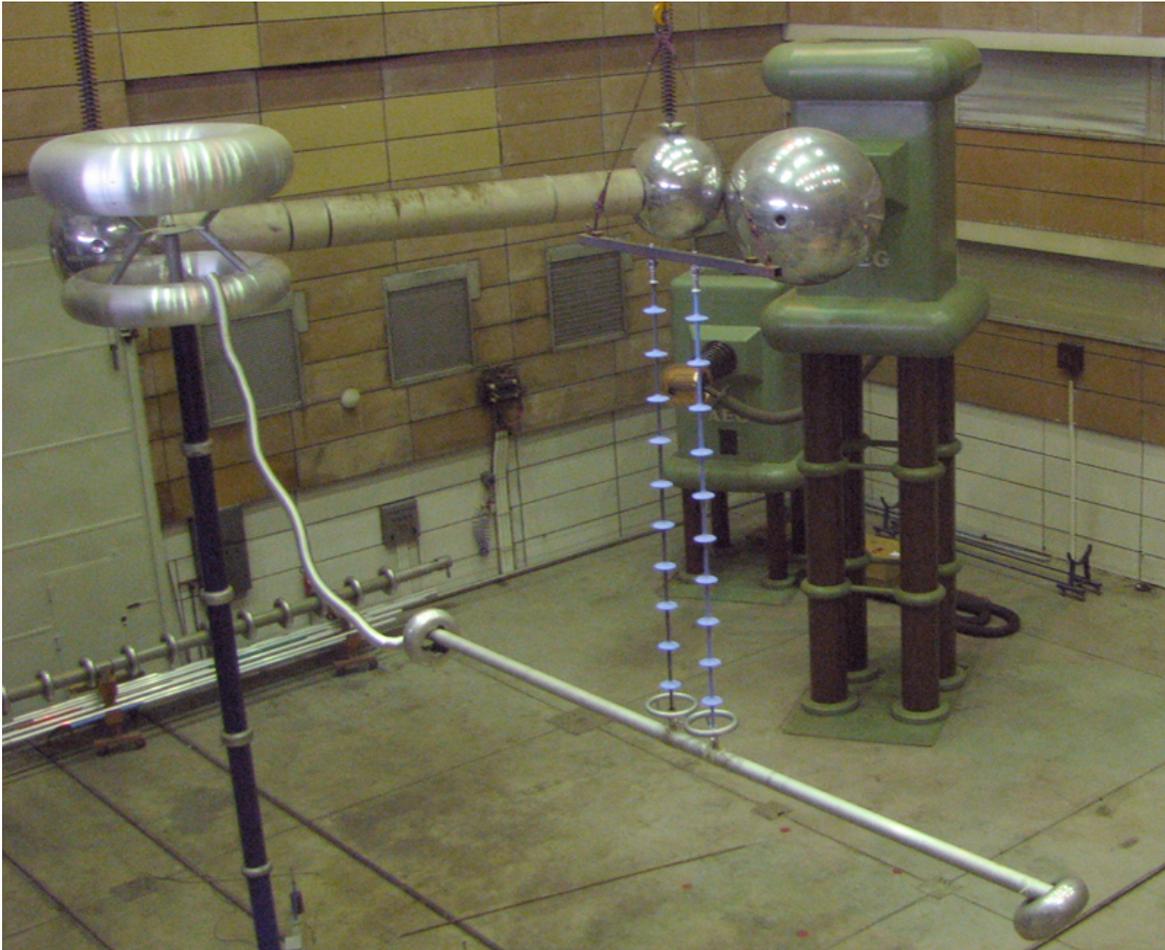


Abbildung 4.3.: Messaufbau in der Hochspannungshalle für die Regentests an den Langstabisolatoren. [B1]

durch eine leitfähige Wasserschicht auf der Isolatoroberfläche berücksichtigt. Hierbei wird eine Oberflächenleitfähigkeit von $1 \mu\text{S}$ verwendet, [A25] und [A4]. Die Modellierung der dünnen Schicht in 2D hat den Vorteil, dass die Dicke der Schicht für die Modellierung nicht bekannt sein muss, da die Schichtleitfähigkeit aus der Literatur bekannt ist.

Das vernetzte Modell besteht aus 1.221.665 tetrahedralen Elementen. Daraus resultieren bei der Simulation mit Ansatzfunktionen erster Ordnung 210.511 Freiheitsgrade und für zweite Ordnung 1.655.66 Freiheitsgrade. Die transiente Simulation wird mit einer konstanten Zeitschritt-

4. Anwendungsprobleme

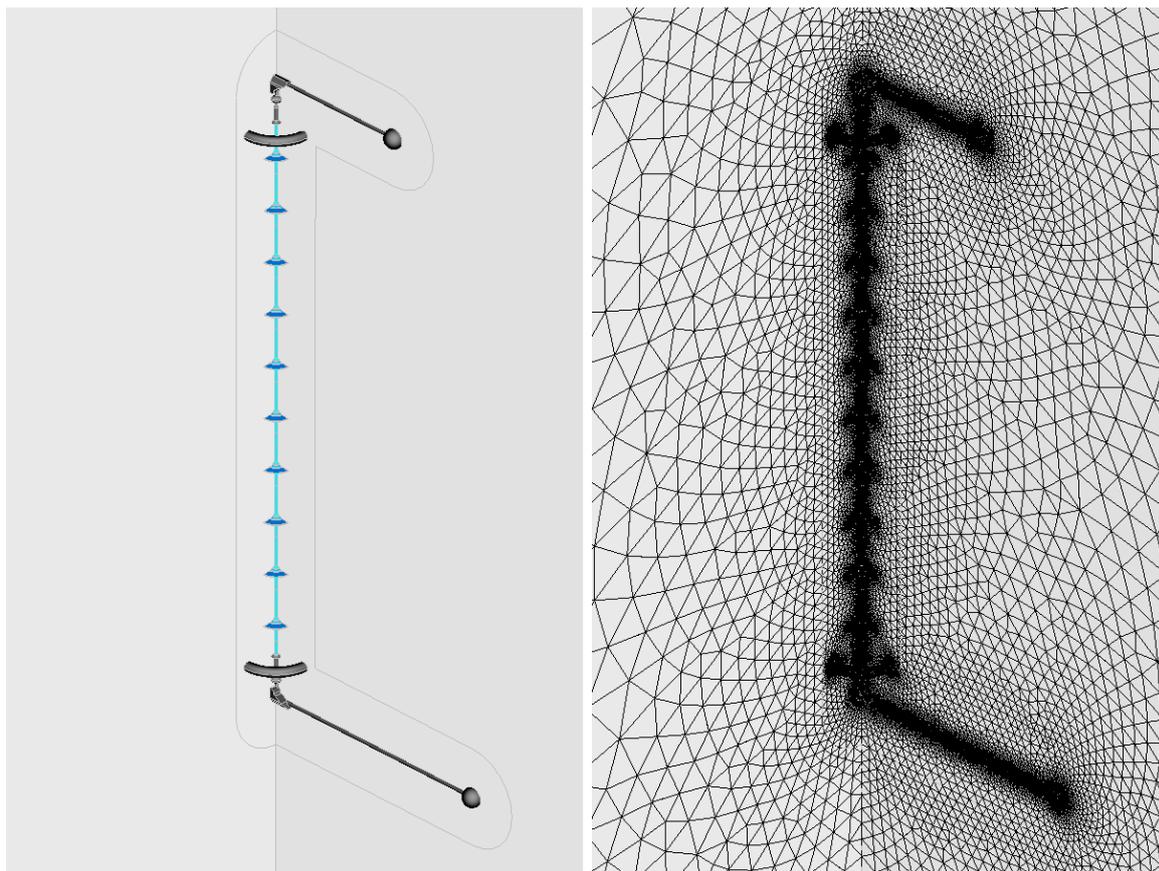


Abbildung 4.4.: 3D-CAD-Modell und Oberflächennetz des 3 m langen Isolators. Aufgrund der Symmetrie der Anordnung zur xz - und yz -Ebene wird nur ein Viertel des Isolators simuliert.

weite Δt von 0,5 ms durchgeführt. Bei der angelegten Frequenz von 50 Hz besteht somit eine Periode aus 40 Zeitschritten. Das maximal erlaubte relative nichtlineare Residuum der Quasi-Newton-Raphson-Approximation ist 10^{-6} . Dieses gibt Auskunft über die Genauigkeit der Approximation des nichtlinearen Materialverhaltens. Das maximale relative Residuum der linearisierten Gleichungssysteme ist 10^{-12} . Es wird eine Wechselspannung von 600 kV angelegt, um zu den praktischen Messungen im Hochspannungslabor vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Kupfer,

Eisen und Aluminium werden als ideal elektrisch leitfähig (PEC) modelliert.

Tabelle 4.1.: Materialparameter der untersuchten Langstabilisatoren.

Material	ϵ_r	κ	κ_S
ZnO-Mikrovaristormaterial	12.0	-	siehe Abb. 2.8 · 1,5 mm
Wasserschicht auf den Schirmen	-	-	1 μ S
Umgebung (Luft)	1.0	-	-
Silikon	4.0	-	-
Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)	4.0	-	-
Metalle	PEC	PEC	PEC

4.1.3. Simulationsergebnisse der Langstabilisatoren

Aus den simulierten elektrischen Potentialwerten innerhalb der dritten Periode wird der Effektivwert der tangentialen elektrischen Feldstärke entlang der Isolatoroberfläche analog zu Gl. (2.8) berechnet. Das Ergebnis der Simulation des konventionellen Isolators mit erster Ordnung ist in den Abbildungen 4.6 dargestellt. Die durch die linearen Elemente verursachten künstlichen Singularitäten erschweren die Auswertung. Hingegen zeichnen sich die Ergebnisse der Simulation mit zweiter Ordnung in Abbildung 4.9 durch glattere Feldverläufe aus. Da sich aufgrund der deutlich stärker ausgeprägten Diskretisierungsfehler bei der Simulation mit erster Ordnung nur schwer eine Aussage über das unterschiedliche Verhalten der drei verschiedenen Isolatorvarianten machen lässt, werden nur die Ergebnisse der Simulation mit zweiter Ordnung der mit ZnO-Mikrovaristormaterial beschichteten Varianten in den Abbildungen 4.8 bis 4.13 verglichen. Das maximale Feld ist bei den Varianten mit ZnO-Mikrovaristormaterial kleiner.

Die für die Simulationen benötigte Zeit und Speicherbedarf sind für die verschiedenen Simulationsvarianten in Tabelle 4.2 aufgelistet. Die

4. Anwendungsprobleme

Simulationen werden auf einem IBM BladeServer mit zwei Intel Xeon X5570 CPUs mit 2,93 GHz Taktung unter Linux durchgeführt.

Tabelle 4.2.: Simulationszeiten und Speicherbedarf für den Isolator im Regentest.

	Ordnung	Unbekannte	Simulationszeit	Speicher
Konventioneller	1	210511	1 h 11 min	2.11 GB
Langstabilisolator	2	1660115	20 h 45 min	28.00 GB
ZnO-Material im Stab	1	211054	3 h 01 min	2.59 GB
	2	1655766	65 h 04 min	32.89 GB
ZnO-Material im Stab	1	210511	3 h 43 min	2.69 GB
und unter den Schirmen	2	1660115	61 h 02 min	37.04 GB

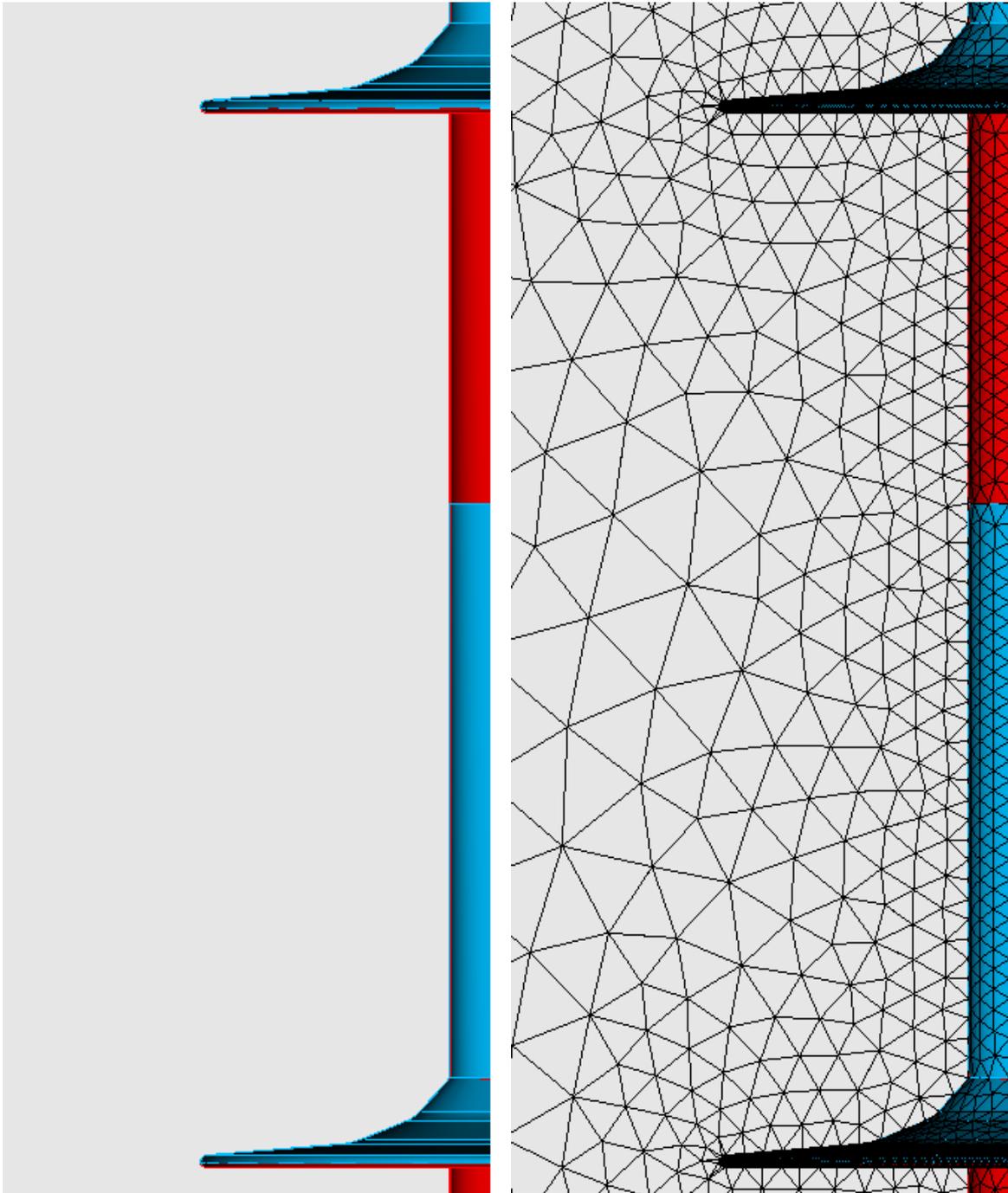


Abbildung 4.5.: Simulationsmodell der Wasserschichten der Langstabisolatoren. Die heller (blau) gezeichneten Oberflächen werden mit einer schwachen Leitfähigkeit versehen, die dunkler (rot) markierten Trockenzonen unter den Schirmen besitzen keine Leitfähigkeit. Diese vereinfachte Verteilung der Leitfähigkeiten beruht auf der Annahme, dass die Oberflächen des Isolatorstabs direkt unter den Schirmen durch diese vor Beregnung geschützt werden und somit keine Leitfähigkeit besitzen.

4. Anwendungsprobleme

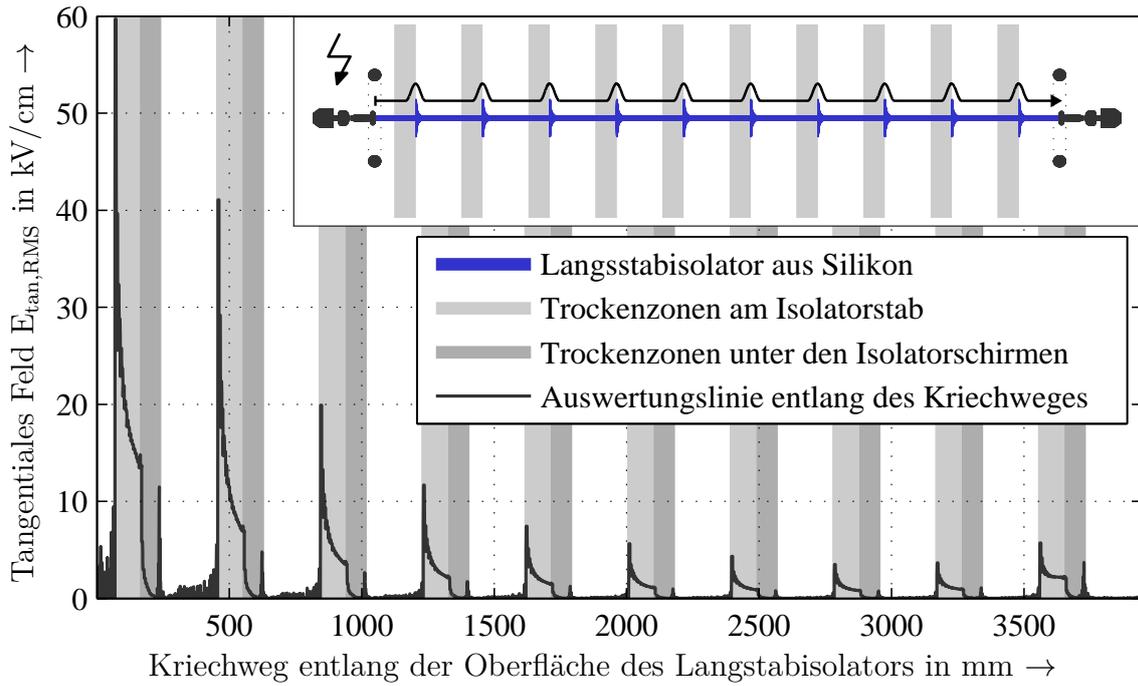


Abbildung 4.6.: Mit 1. Ordnung simuliertes tangenciales elektrisches Feld auf der Oberfläche des konventionellen Langstabilisators im Regentest bei 600 kV. In den Trockenzonen am Isolatorstab treten sehr große Feldspitzen unter den zwei unteren Schirmen auf. Da diese die Durchbruchfeldstärke in Luft ($\hat{E} \approx 25\text{kV/cm}$ bzw. $E_{\text{eff}} \approx 18\text{kV/cm}$ deutlich überschreitet ist mit Teilentladungen zu rechnen.

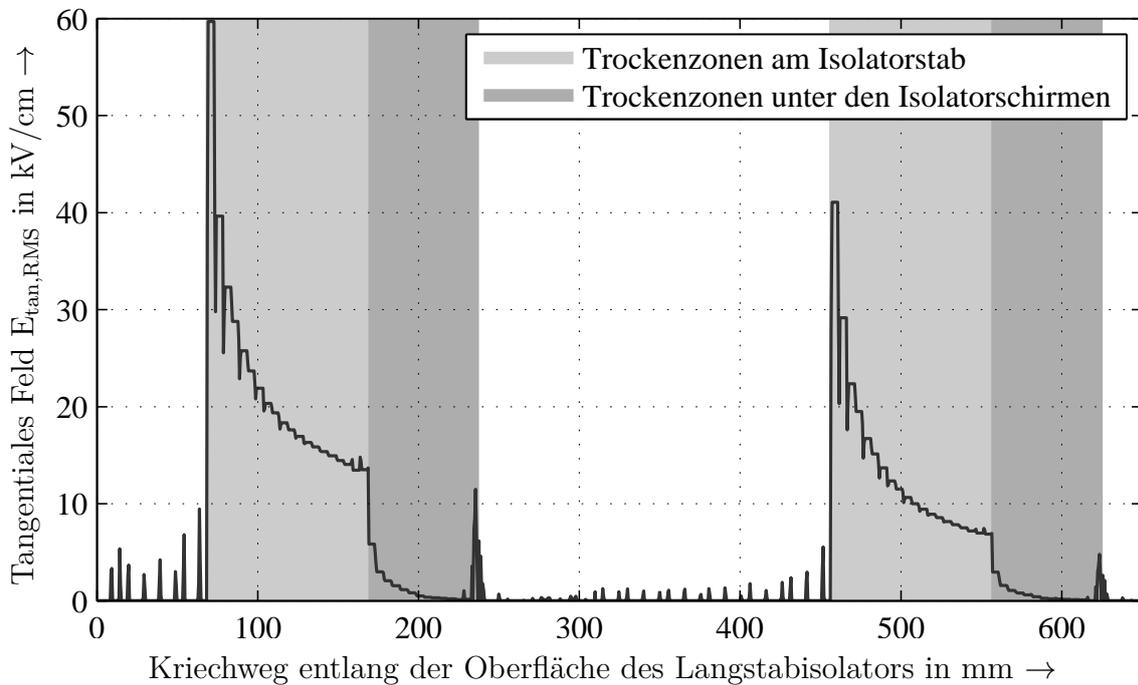


Abbildung 4.7.: Teilansicht des Simulationsergebnisses aus Abbildung 4.6.

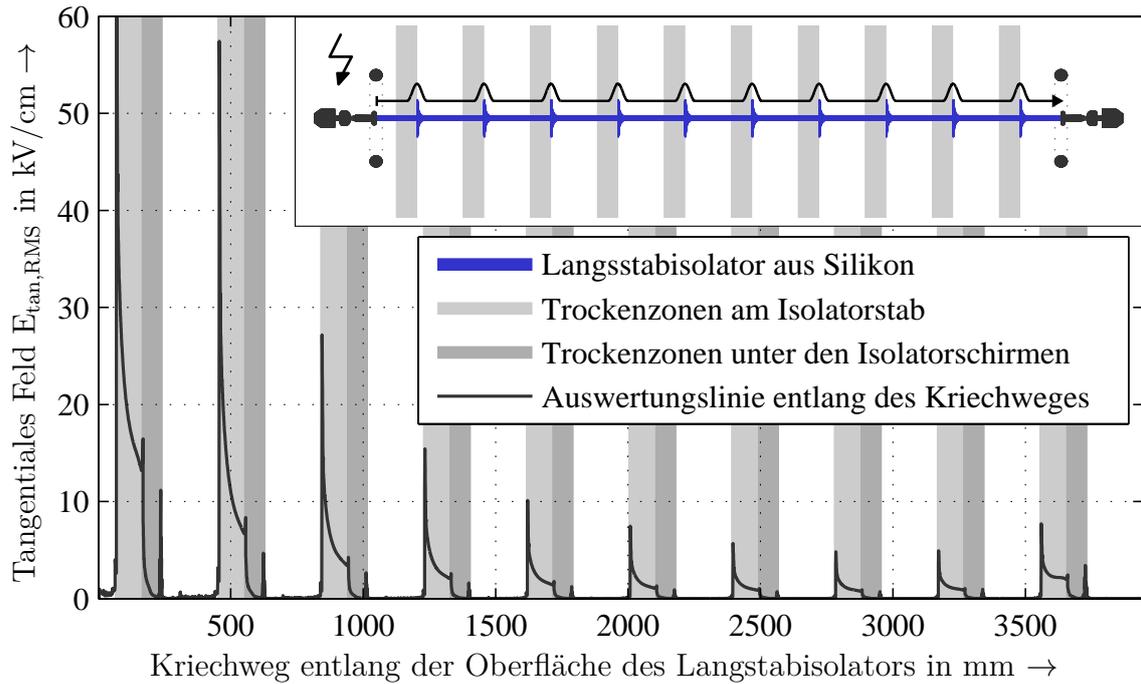


Abbildung 4.8.: Mit 2. Ordnung simuliertes tangenciales elektrisches Feld auf der Oberfläche des konventionellen Langstabisolatator im Regentest bei 600 kV. In den Trockenzone am Isolatorstab treten sehr große Feldspitzen unter den zwei unteren Schirmen auf.

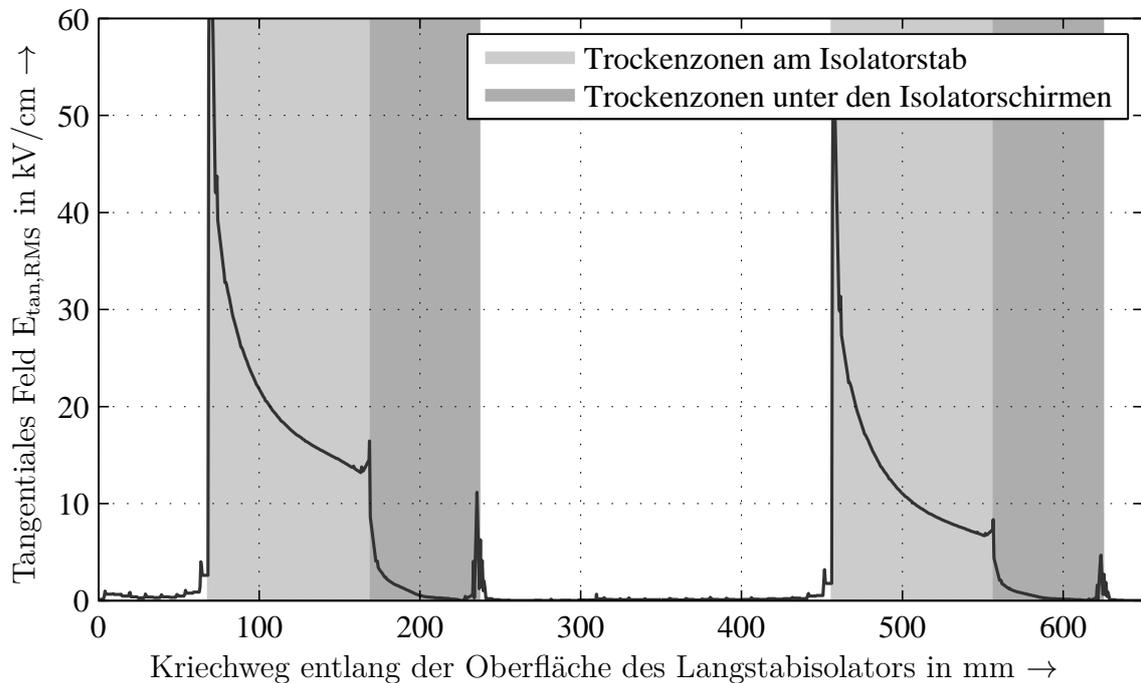


Abbildung 4.9.: Teilansicht des Simulationsergebnisses aus Abbildung 4.8.

4. Anwendungsprobleme

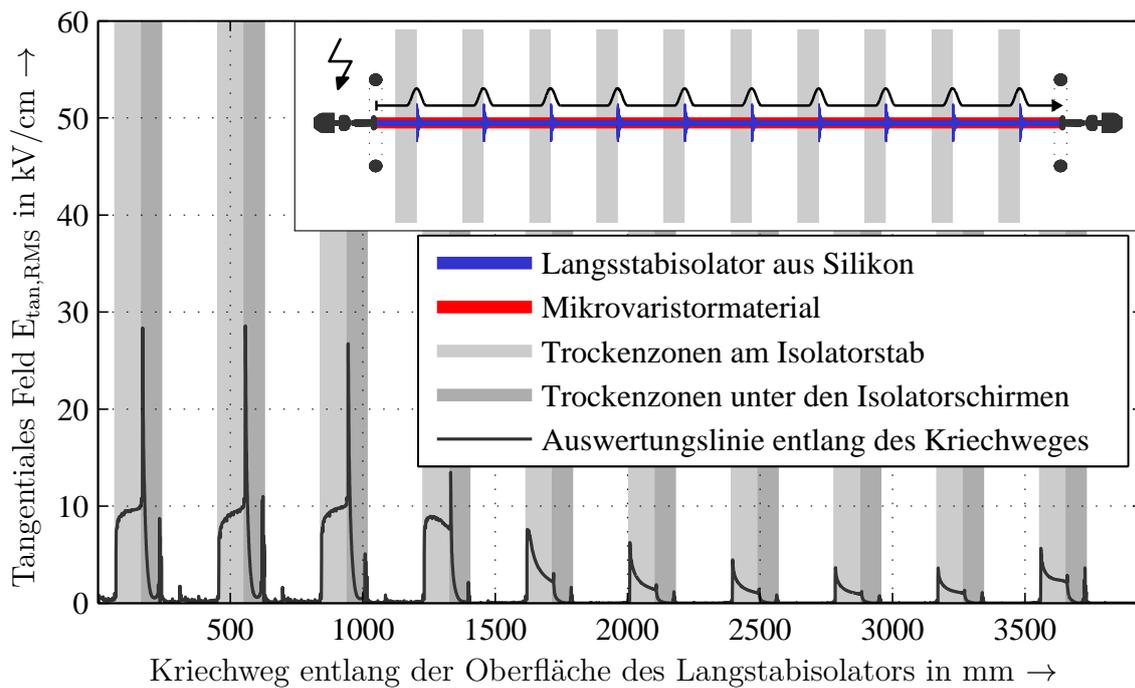


Abbildung 4.10.: Mit 2. Ordnung simuliertes tangenciales elektrisches Feld auf der Oberfläche des Langstabilisators mit Mikrovaristormaterial im Stab im Regentest bei 600 kV.

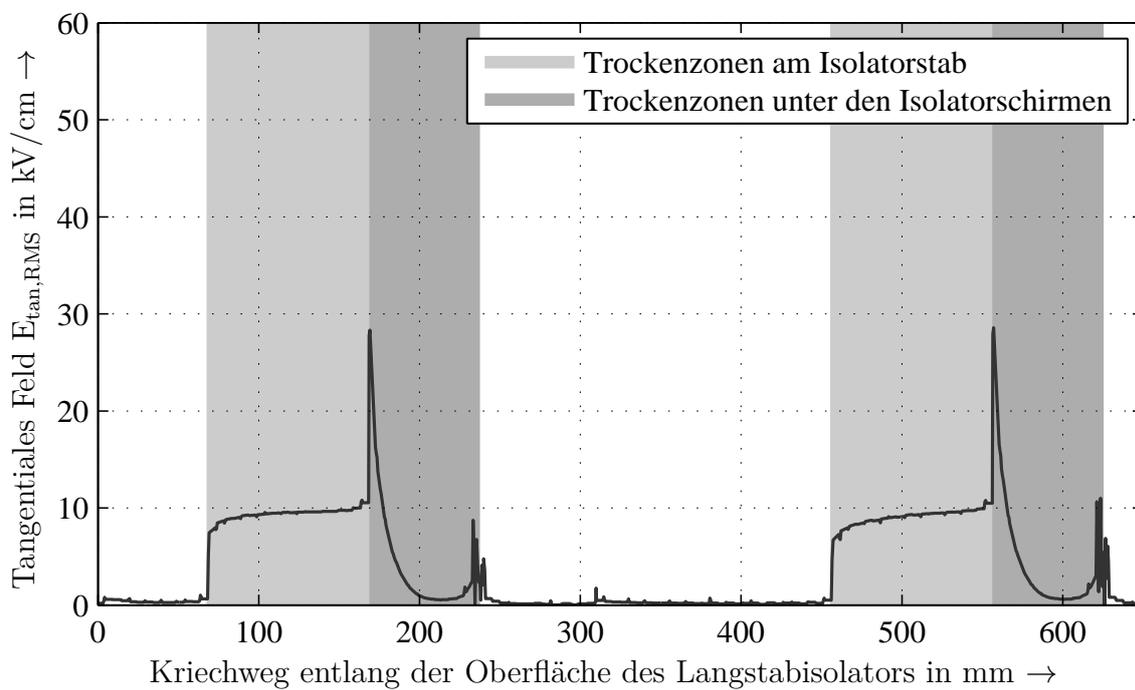


Abbildung 4.11.: Teilansicht des Simulationsergebnisses aus Abbildung 4.10.

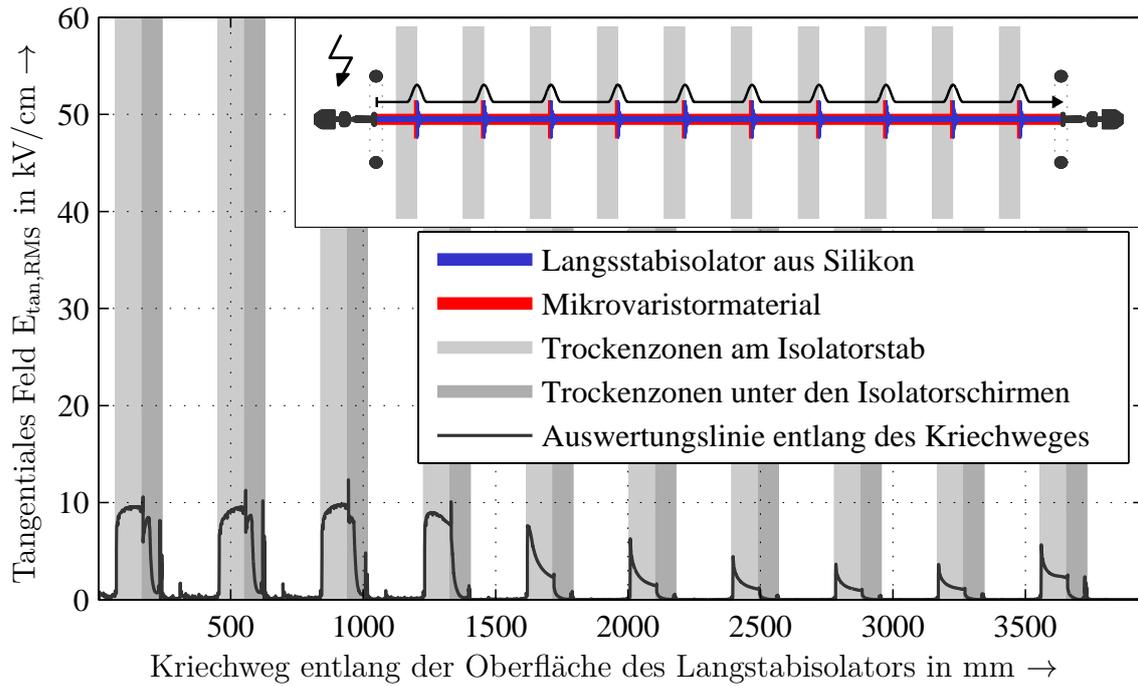


Abbildung 4.12.: Mit 2. Ordnung simuliertes tangentiales elektrisches Feld auf der Oberfläche des Langstabisolatators mit Mikrovaristormaterial im Stab und unter den Schirmen im Regentest bei 600 kV.

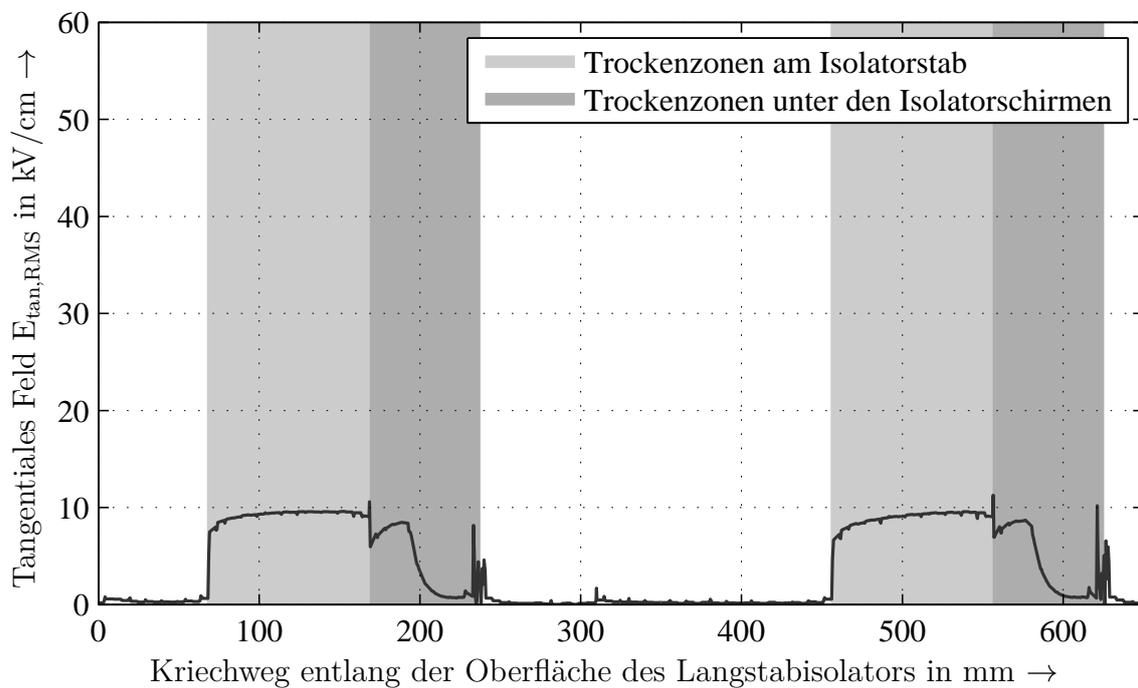


Abbildung 4.13.: Teilansicht des Simulationsergebnisses aus Abbildung 4.12.

4.1.4. Vergleich mit den Tests im Hochspannungslabor

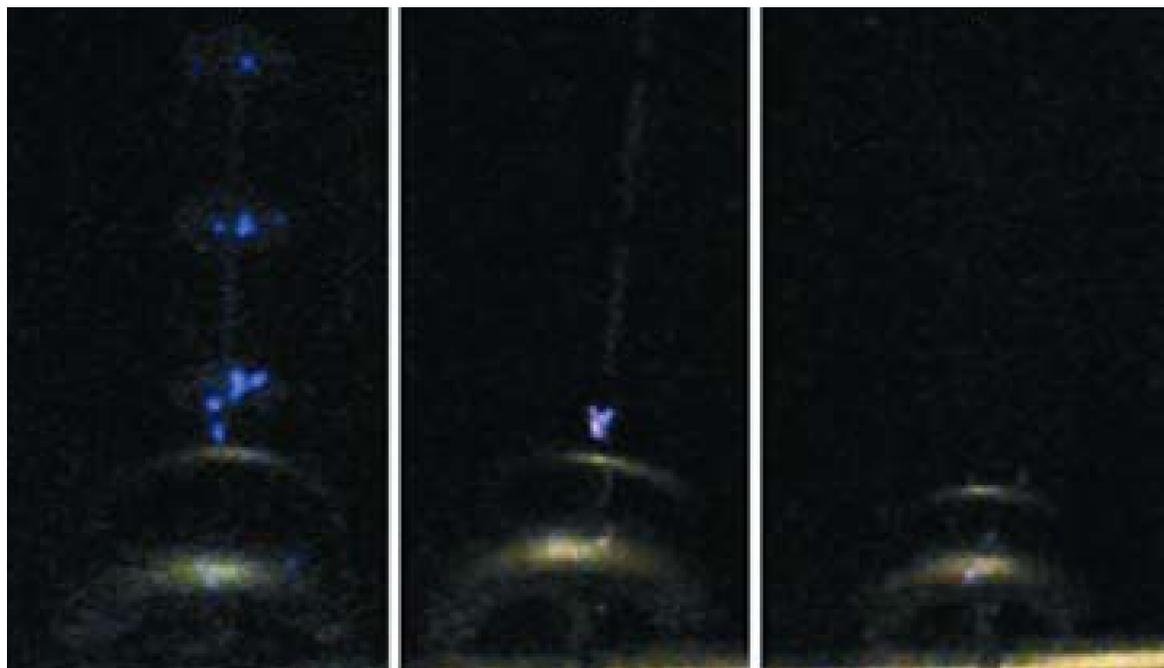


Abbildung 4.14.: Fotos der Regentests an den Langstabisolatoren. Es ist jeweils nur das untere, hochspannungsgespeiste Ende mit drei Schirmen des Isolators dargestellt. Links ist der konventionelle Isolator ohne Mikrovaristorbeschichtung, in der Mitte der Isolator mit Mikrovaristormaterial entlang des Stabes und rechts der Isolator mit Mikrovaristormaterial unter den Schirmen und am Stab. [A30]

In den Regentests im Hochspannungslabor an der Technischen Universität in Darmstadt zeigten Langstabisolatoren mit Mikrovaristormaterial im Strunk eine deutlich höhere Einsatzspannung [B1]. Hierbei erwies sich der Langstabisolator mit Mikrovaristormaterial im Strunk und den Schirmen als Variante mit den wenigsten Teilentladungen, siehe Abbildung 4.14 aus [A30]. Dies deckt sich mit den Simulationsergebnissen. Aus der Abbildung 4.13 lässt sich der Schaltspunkt des ZnO-Mikrovaristormaterials aus dem maximalen elektrischen Feld von 10 kV/cm ablesen. Hinzu kommt noch ein weiterer Effekt, welcher nicht im Simulationsmodell enthalten ist: In dem Moment, in welchem sich eine Teilentladung aufgrund von hohen Feldstärken ausbildet, wird das lokale elektrische

Feld durch die Ausbildung von Raumladungen geschwächt. Dies hat zur Folge, dass das Mikrovaristormaterial lokal seinen elektrischen Widerstand verringert und somit den hohen Feldstärken entgegenwirkt.

Die Simulation der Regentests bietet als Vorteil gegenüber praktischen Tests die Möglichkeit, Aussagen über das lokale elektrische Verhalten zu machen. Neben der Vorhersage möglicher Ausgangspunkte von Teilentladungen können auf diese Weise die Vorgänge in den realen Tests nachvollzogen werden. Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Weiterentwicklung der Simulationsmethoden zeigt sich hierbei als vorteilhaft. Die Modellierung der dünnen Schichten als 2D-Flächen in 3D-Simulationen erweist sich als deutlich weniger aufwendig. Die isoparametrischen Elemente höherer Ordnung führen zu wesentlich leichter zu interpretierenden Ergebnissen aufgrund der erhöhten Genauigkeit der erzielten Simulationslösungen.

4.2. Endglimmschutz für elektrische Maschinen

4.2.1. Mögliche Vorteile des Mikrovaristormaterials

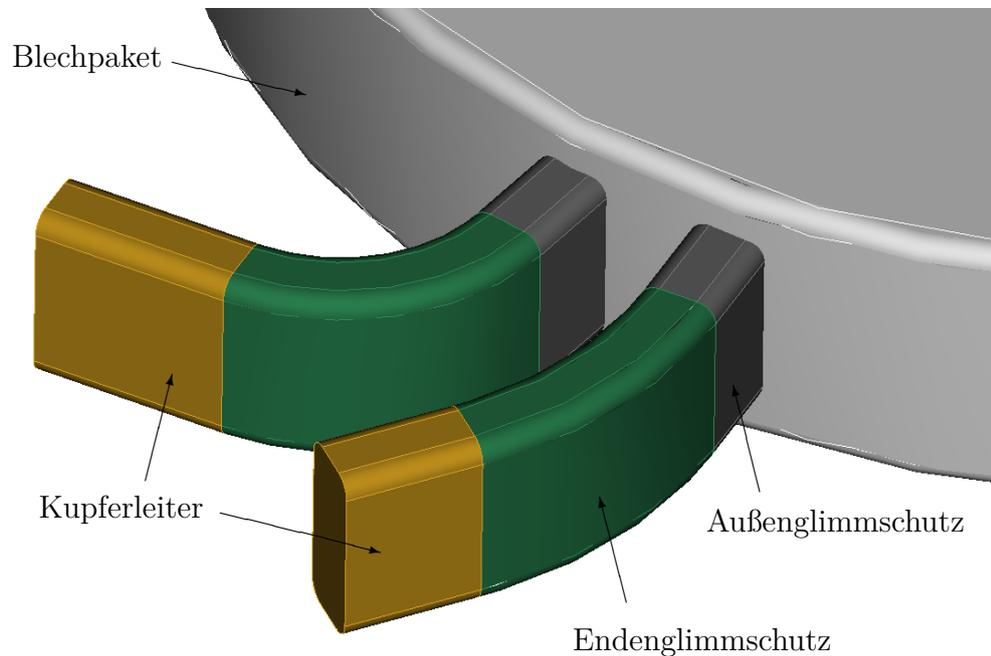


Abbildung 4.15.: Prinzipieller Aufbau der Wicklungsisolierung von elektrischen Maschinen in der Hochspannungsebene. Außen- und Endglimmschutz dienen der Unterbindung von Teilentladungen.

In elektrischen Maschinen im Hochspannungsbereich wird ein Endglimmschutz eingesetzt, um Teilentladungen an den Statorwindungen beim Austritt aus dem Blechpaket zu unterdrücken, siehe Abbildung 4.15. Für den Endglimmschutz werden leitfähige Bänder aus Glas- oder Polyesterweben oder auch Lacke auf Epoxidbasis verwendet. Die Leitfähigkeit wird üblicherweise durch das Hinzufügen des Füllstoffes Siliziumkarbid (SiC) erreicht. Problematisch ist hierbei, dass die elektrischen Eigenschaften bei der Verwendung des Füllstoffes SiC stark schwanken. Auch ist die elektrische und thermische Festigkeit begrenzt. Diesem steht eine angestrebte Leistungssteigerung elektrischer Maschi-

nen entgegen. Insbesondere die Verwendung von Leistungselektronik anstelle der Netzspeisung führt aufgrund der Spannungspulse der steilen Flanken der Pulsweitenmodulation zu einer erhöhten elektrischen Beanspruchungen der Statorwindungen und damit des Endenglimmschutzes. Diese liegen deutlich über den Spezifikationen der derzeit verwendeten Isolierwerkstoffe [A61]. ZnO-Mikrovaristorgefüllte Lacke besitzen eine hohe thermische und elektrische Festigkeit. Sie stellen eine vielversprechende Alternative zu den bisher SiC-gefüllten Lacken dar. Zu Details der Funktion des Endenglimmschutzes wird auf die Literatur verwiesen [A62, A81].

Für die Bestimmung der Charakteristik des Endenglimmschutzes wird ein Modellstab wie in Abbildung 4.16 verwendet. Mithilfe von solchen Modellstäben soll die Charakteristik eines Endenglimmschutzes mit Mikrovaristormaterial untersucht werden und mit einem in der Praxis etablierten Endenglimmschutz verglichen werden. Hierfür wird das Produkt „anti corona - CoronaShield[®] P 8001“ der Firma VonRoll verwendet [A109].

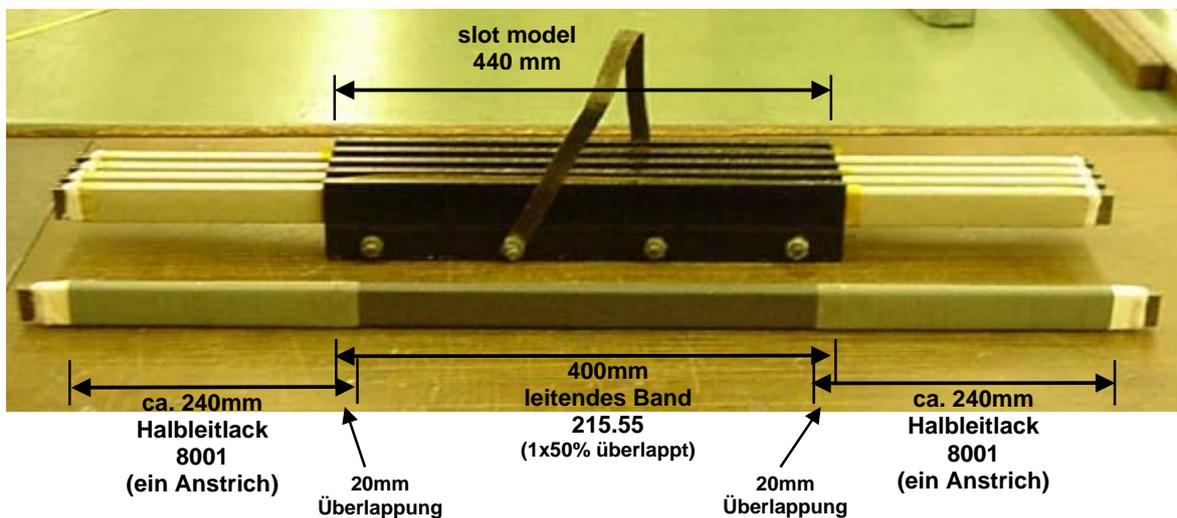


Abbildung 4.16.: Geometrie des Modell-Stabes zur Messung der EGS-Charakteristik [mit freundlicher Genehmigung der VonRoll Schweiz AG].

4.2.2. Elektrische Leitfähigkeit der Endenglimmschutzlacke

Für die Simulation des Endenglimmschutzes werden die elektrischen Materialeigenschaften der verwendeten Lacke benötigt. Der hierfür verwendete Messaufbau ist in Abbildung 4.17 skizziert. Es werden dabei zwei Lackproben der Länge 13 cm und Breite von 1 cm verwendet. Die Gleichspannung U wird an den äußeren Elektroden der Lackprobe angelegt. Es werden die Ströme I_1 und I_2 durch die Lackproben gemessen und deren Werte gemittelt. Die Messwerte sind in Tabelle 4.3 und Abbildung 4.18 zu finden. Es werden eine SiC- und zwei ZnO-Mikrovaristormaterialproben untersucht.

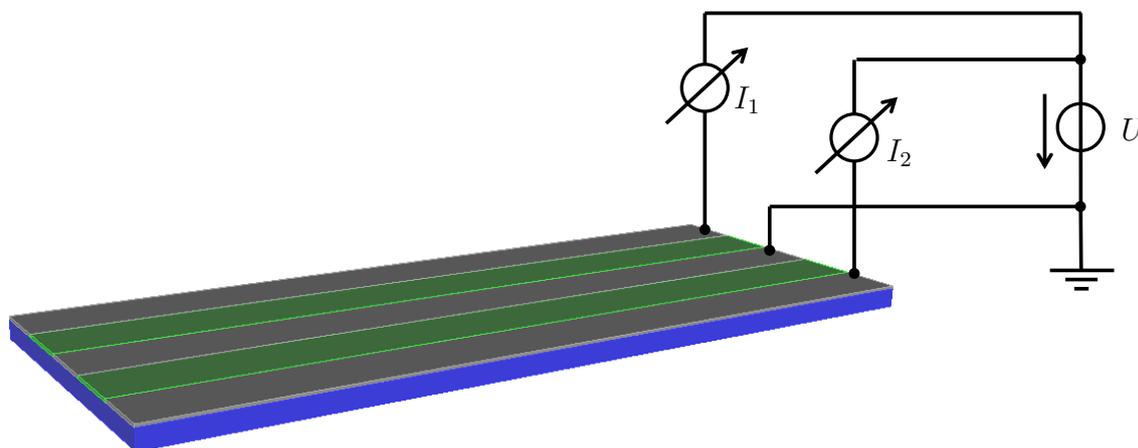


Abbildung 4.17.: Messaufbau zur Bestimmung der Schichtleitfähigkeit der Endenglimmschutzlacke. Auf die blau gezeichnete Epoxidharzplatte wird zwischen die grauen Elektroden die grün dargestellte Lackprobe aufgetragen.

Die durch Messung bestimmten Werte der Leitfähigkeit des SiC-Materials werden in den Simulationen durch Spline-Funktionen zweiter Ordnung interpoliert. Da das ZnO-Mikrovaristormaterial ein deutlich markanteres Schaltverhalten besitzt, kann diese Interpolation aufgrund von Oszillationen nicht verwendet werden. Es wird für dieses, anstelle einer

Spline-Approximation, eine untere und obere analytische Approximation in jeweils zwei Simulationen verwendet [A34],

$$\kappa_{S,ZnO} = \kappa_{S,0} \frac{1 + \left(\frac{|\text{grad } \varphi|}{E_0}\right)^\alpha}{1 + \left(\frac{|\text{grad } \varphi|}{E_1}\right)^\alpha}. \quad (4.1)$$

Tabelle 4.3.: Gemessene Materialdaten der Endenglimmschutzlacke [Messdaten mit freundlicher Genehmigung der Alstom Technology Ltd.].

U in kV	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
$I_{1,SiC}$ in μA	0.077	0.671	2.87	13.0	41.0	146	430	800	1200
$I_{2,SiC}$ in μA	0.086	0.703	3.19	14.0	44.0	155	440	800	1100
$I_{1,ZnO,1}$ in μA	0.003	0.005	0.009	0.023	0.081	0.56	17.0	230	900
$I_{2,ZnO,1}$ in μA	0.003	0.005	0.01	0.025	0.08	0.402	5.5	200	800
$I_{1,ZnO,2}$ in μA	0.003	0.006	0.015	0.038	0.134	0.77	15.0	360	1000
$I_{2,ZnO,2}$ in μA	0.003	0.005	0.01	0.025	0.08	0.402	5.5	200	600

Tabelle 4.4.: Die für die Approximation der elektrischen Schichtleitfähigkeit des ZnO-Mikrovaristormaterials nach Gl. (4.1) verwendeten Parameter.

	$\kappa_{S,0}$	E_0	E_1	α
ZnO _{min}	0.15 pA/V	4.85 kV/cm	100.0 kV/cm	16.0
ZnO _{max}	0.5 pA/V	4.45 kV/cm	100.0 kV/cm	15.0

Hierbei werden die Parameter aus Tabelle 4.4 verwendet. Die untere und obere Materialapproximation ZnO_{min} und ZnO_{max} stellen eine untere und obere Schranke dar. Deren Parameter werden so bestimmt, dass sie semiquantitativ mit den Messwerten übereinstimmen und ein möglichst kleines Intervall zwischen oberer und unterer Schranke bilden. Durch die Parameter E_0 und E_1 werden die Feldstärken festgelegt, an denen sich die Charakteristik deutlich ändert. E_0 wird auch als der Schalterpunkt des ZnO-Mikrovaristormaterials bezeichnet [A46]. $\kappa_{S,0}$ definiert die Grundleitfähigkeit und α den Nichtlinearitätsexponenten. Die Messwerte und

4. Anwendungsprobleme

deren Approximation mit den verwendeten Parametern in Tabelle 4.4 sind in Abbildung 4.18 aufgetragen. Die für die Simulation verwendeten Materialparameter sind in der Tabelle 4.5 aufgelistet.

Tabelle 4.5.: Materialparameter des untersuchten Endenglimmschutzes.

Material	ϵ_r	κ_S
ZnO-Mikrovaristormaterial	12.0	siehe Tab. 4.4
SiC	10.0	siehe Tab. 4.3
Umgebung (Luft)	1.0	-
Isolierung	5.0	-
Wicklungsstab	PEC	PEC
Leitendes Band	PEC	PEC

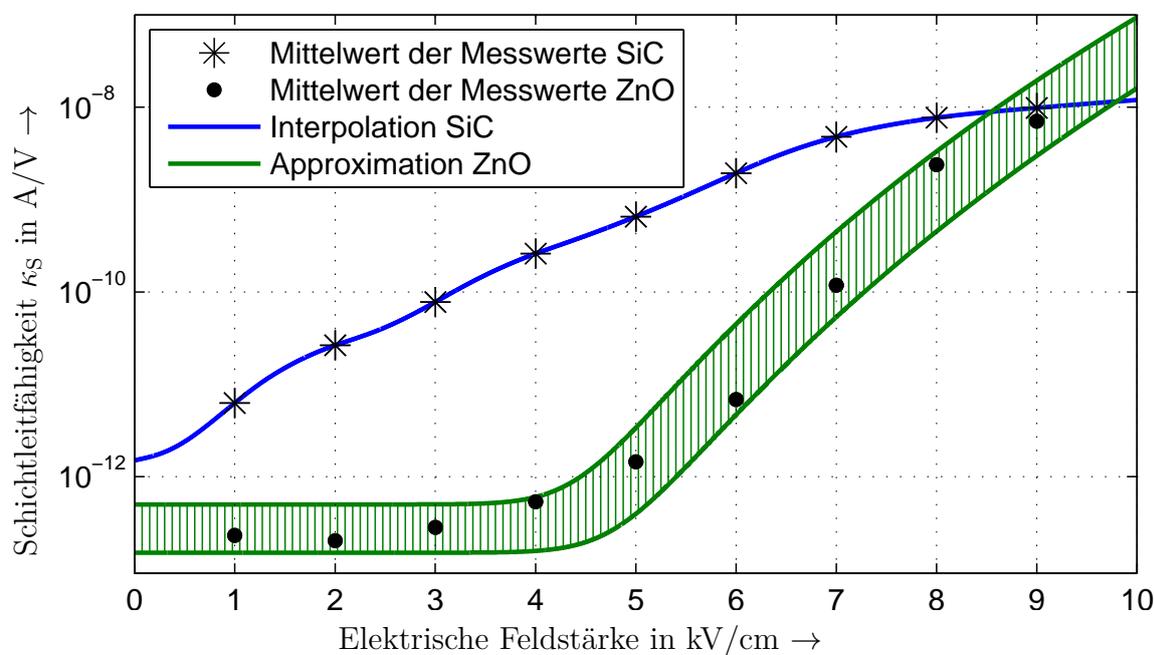


Abbildung 4.18.: Schichtleitfähigkeit der verwendeten Lacke in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke.

4.2.3. Simulationsmodell des Endenglimmschutzes

Eine Halbschnitts- und Querschnittszeichnung der Geometrie der Modellanordnung des Endenglimmschutzes ist in Abbildung 4.19 gezeigt.

Die verwendeten Dimensionen lauten: $l_1 = 220.0$ mm, $l_2 = 220.0$ mm, $d_1 = 30.0$ mm, $d_2 = 34.2$ mm, $b = 10.0$ mm. Der Kantenradius ist 1.0 mm. Die Schichtdicke des Lackes ist $200 \mu\text{m}$. Aufgrund der Symmetrie des Modellstabs wird nur ein Achtel des Modells simuliert.

Das vernetzte Modell ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Die transiente Simulation wird mit einer konstanten Zeitschrittweite Δt von 0,1 ms durchgeführt. Bei der angelegten Frequenz von 50 Hz besteht somit eine Periode aus 200 Zeitschritten. Das maximal erlaubte relative nichtlineare

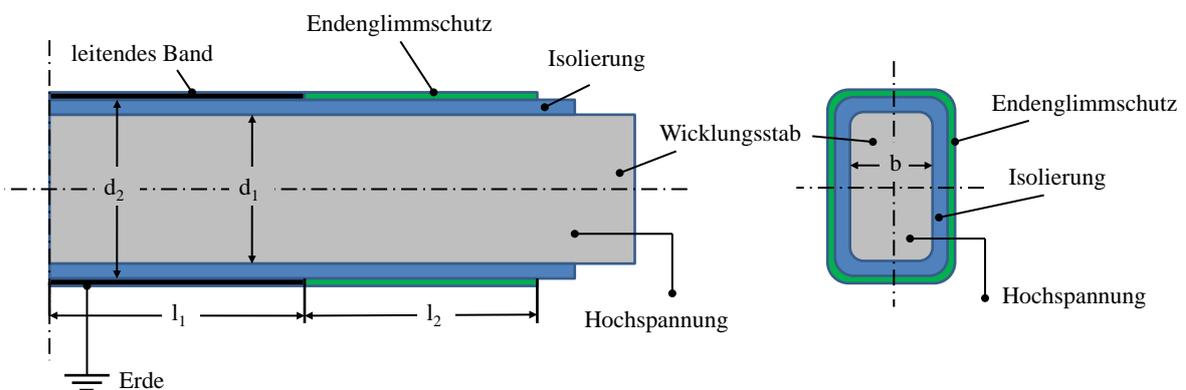


Abbildung 4.19.: Geometrie des Simulationsmodells der Modellanordnung des Endenglimmschutzes aus Abbildung 4.16. Die verwendeten Materialparameter finden sich in Tabelle 4.5.

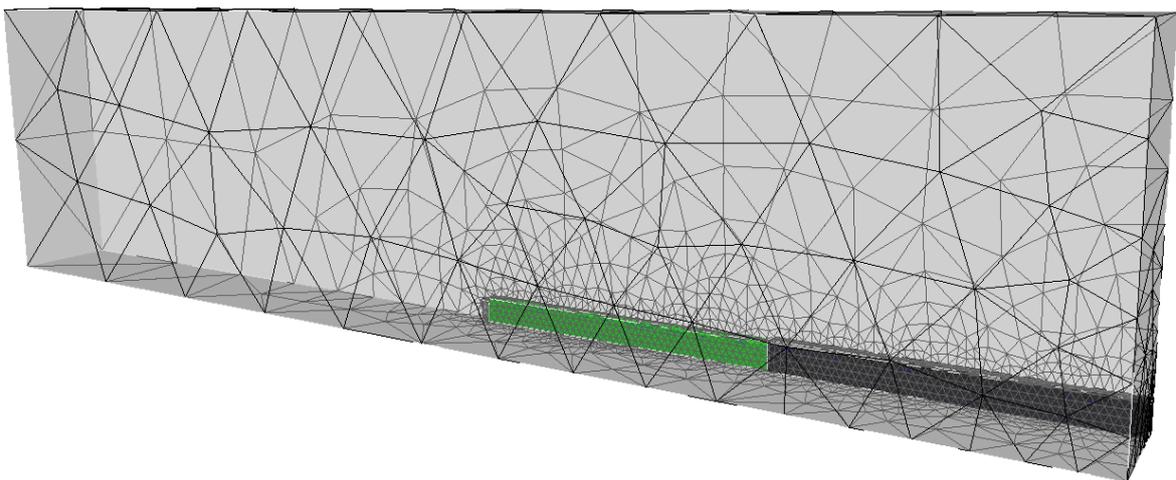


Abbildung 4.20.: Vernetzung der Modellanordnung des Endenglimmschutzes.

Residuum der Quasi-Newton-Raphson-Approximation ist 10^{-6} . Das maximale relative Residuum der linearisierten Gleichungssysteme ist 10^{-12} .

4.2.4. Simulationsergebnisse zum Endenglimmschutz

Die Ergebnisse der transienten Simulationen der Modellanordnung des Endenglimmschutz bei einer Spannung von 33 kV (Effektivwert) sind in den Abbildungen 4.21 bis 4.27 dargestellt. Die Simulationszeiten und der Speicherbedarf der verschiedenen Simulationsvarianten sind in Tabelle 4.6 aufgelistet. Die Simulationen werden auf einem IBM BladeServer mit zwei Intel Xeon X5570 CPUs mit 2,93 GHz Taktung unter Linux durchgeführt. Zum Vergleich der Modellierungen verschiedener Ordnung und Dimension der dünnen Schicht nach Kapitel 3.1 und 3.2 werden jeweils vier verschiedene Varianten simuliert. Da sich in der Darstellung des effektiven elektrischen Potentials die Ergebnisse der verschiedenen Varianten kaum unterscheiden, ist in Abbildung 4.21 nur die Variante zweiter Ordnung und 3D-Modellierung der dünnen Schicht dargestellt. Hingegen unterscheiden sich die Ergebnisse bei der Auswertung des tangentialen elektrischen Feldes bei maximaler angelegter Spannung und der ohmschen Verluste über eine Periode in den Abbildungen 4.22 bis 4.27 bezüglich der Ordnung der Simulation. Die Verwendung von isoparametrischen Elementen und Ansatzfunktionen höherer Ordnung führt zu glatteren Verläufen. Der Einfluss der Modellierung der dünnen Schicht als 2D oder 3D ist kaum sichtbar. Die ohmschen Verluste in der dünnen Schicht werden nur für die 3D-Modellierung ausgewertet.

Tabelle 4.6.: Simulationszeiten und Speicherbedarf für den Endenglimmschutz.

Material	Ordnung	2D/3D	Unbekannte	Simulationszeit	Speicherbedarf
SiC 8001	1	2D+3D	17254	1 h 07 min	0.16 GB
	1	3D+3D	20055	1 h 49 min	0.18 GB
	2	2D+3D	146095	13 h 29 min	2.71 GB
	2	3D+3D	168015	26 h 15 min	3.85 GB
ZnO min	1	2D+3D	17254	1 h 26 min	0.17 GB
	1	3D+3D	20055	2 h 20 min	0.18 GB
	2	2D+3D	146198	19 h 43 min	2.79 GB
	2	3D+3D	168015	37 h 17 min	3.95 GB
ZnO max	1	2D+3D	17254	1 h 24 min	0.17 GB
	1	3D+3D	20055	2 h 23 min	0.20 GB
	2	2D+3D	146198	20 h 47 min	3.08 GB
	2	3D+3D	168015	38 h 56 min	3.43 GB

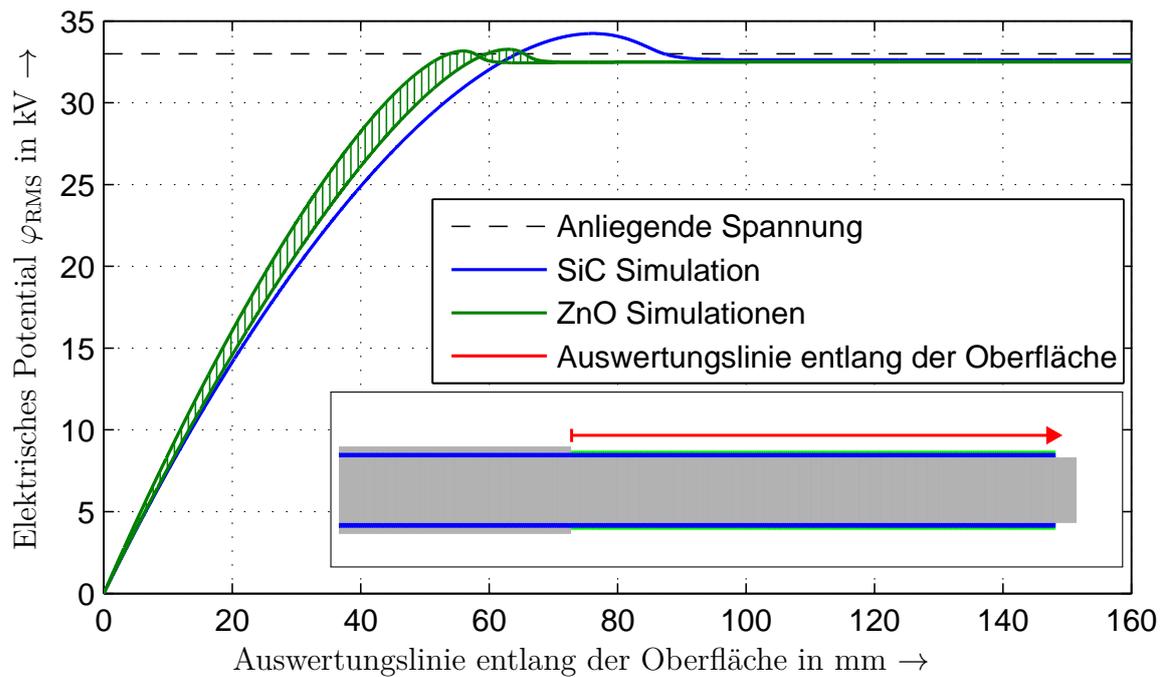


Abbildung 4.21.: Effektives elektrisches Potential des Endenglimmschutzes entlang der Oberfläche. Das maximale Potential, die sogenannte Überspannung, befindet sich bei etwa 56 mm für die Simulation „ZnO min“, bei etwa 62 mm für die Simulation „ZnO max“ und bei etwa 74 mm für die Simulation „SiC 8001“.

4. Anwendungsprobleme

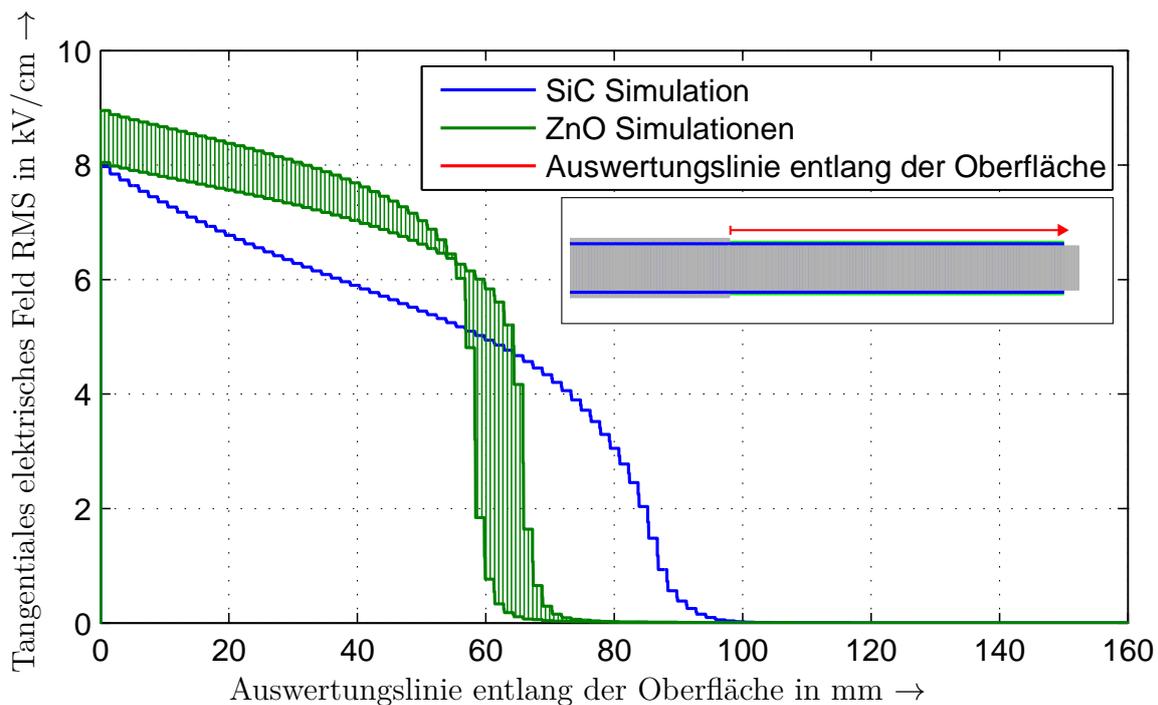


Abbildung 4.22.: Tangentiales effektives elektrisches Feld entlang der Oberfläche des Endenglimmschutzes bei der 2D-Modellierung der dünnen Schicht und der Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen erster Ordnung.

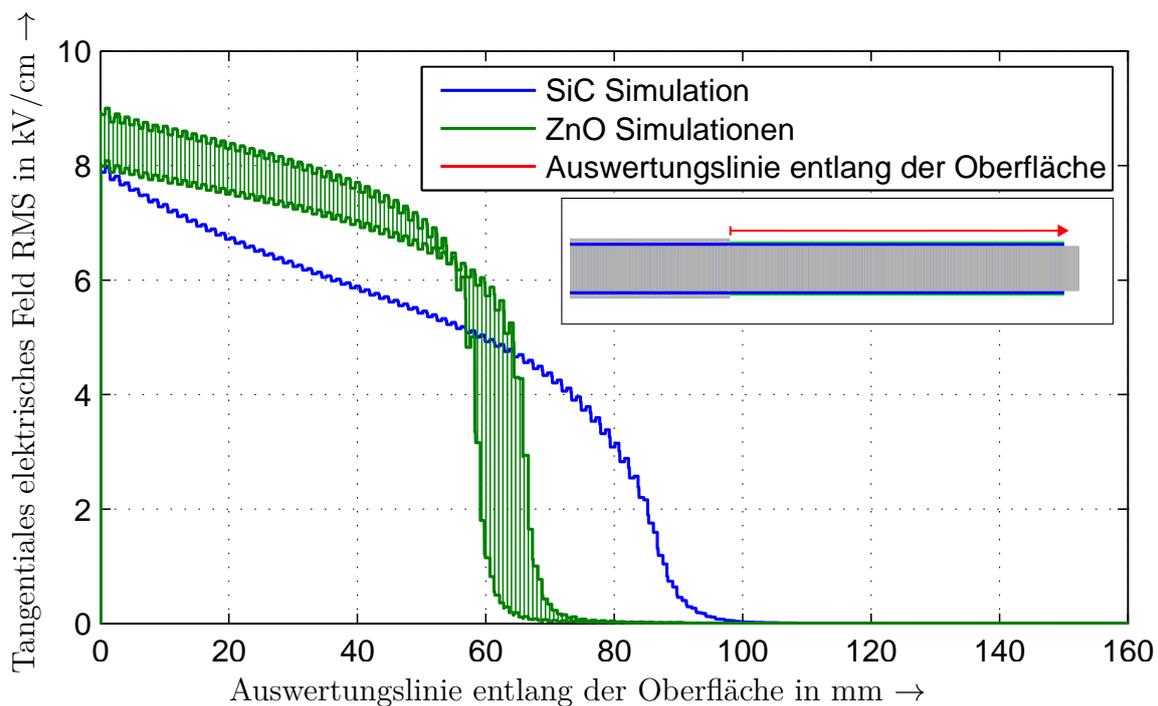


Abbildung 4.23.: Tangentiales effektives elektrisches Feld entlang der Oberfläche des Endenglimmschutzes bei der 3D-Modellierung der dünnen Schicht und der Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen erster Ordnung.

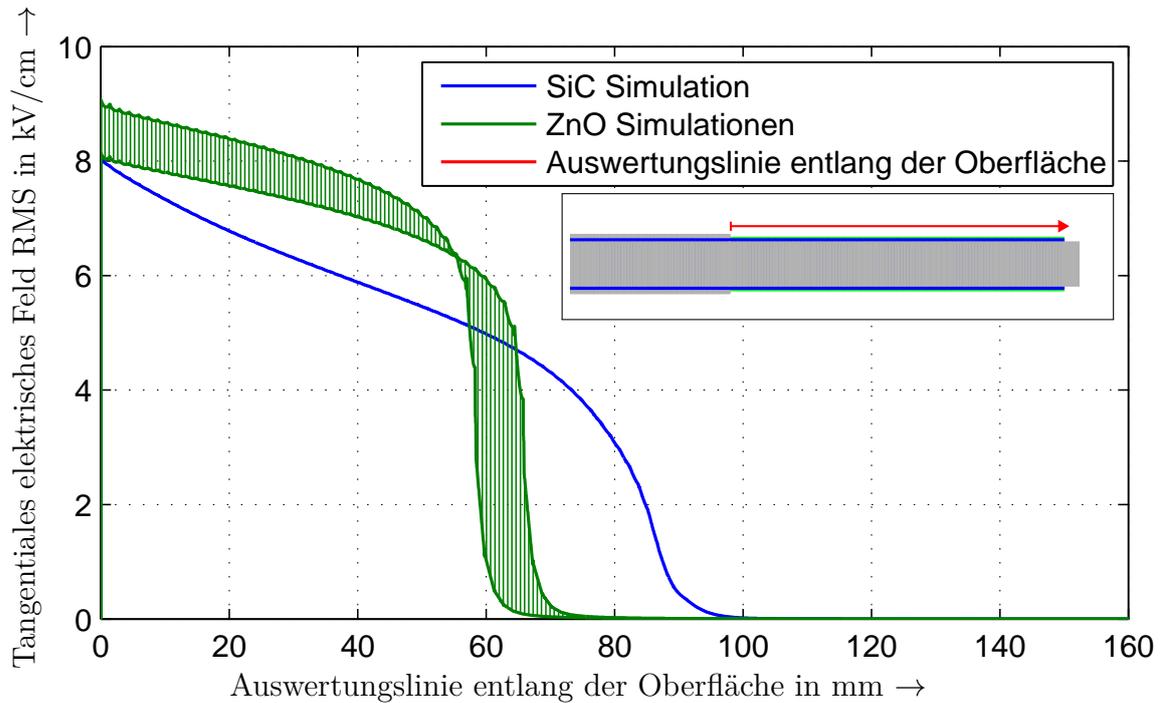


Abbildung 4.24.: Tangentiales effektives elektrisches Feld entlang der Oberfläche des Endenglimmschutzes bei der 2D-Modellierung der dünnen Schicht und der Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen zweiter Ordnung.

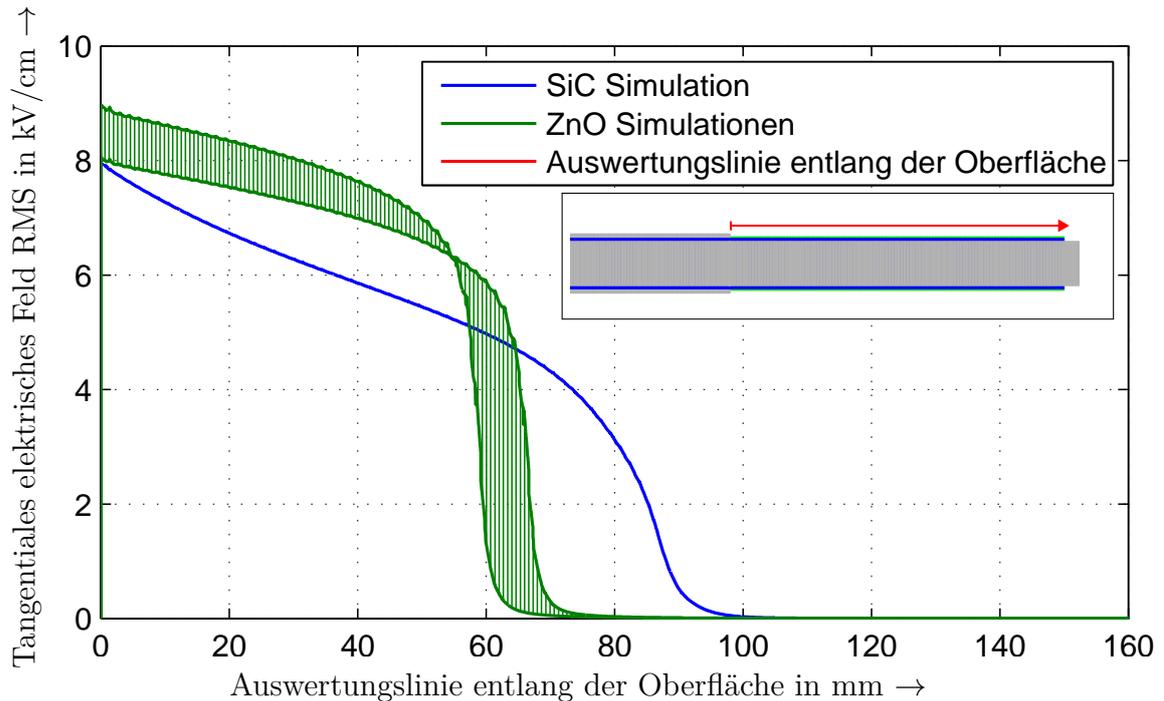


Abbildung 4.25.: Tangentiales effektives elektrisches Feld entlang der Oberfläche des Endenglimmschutzes bei der 3D-Modellierung der dünnen Schicht und der Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen zweiter Ordnung.

4. Anwendungsprobleme

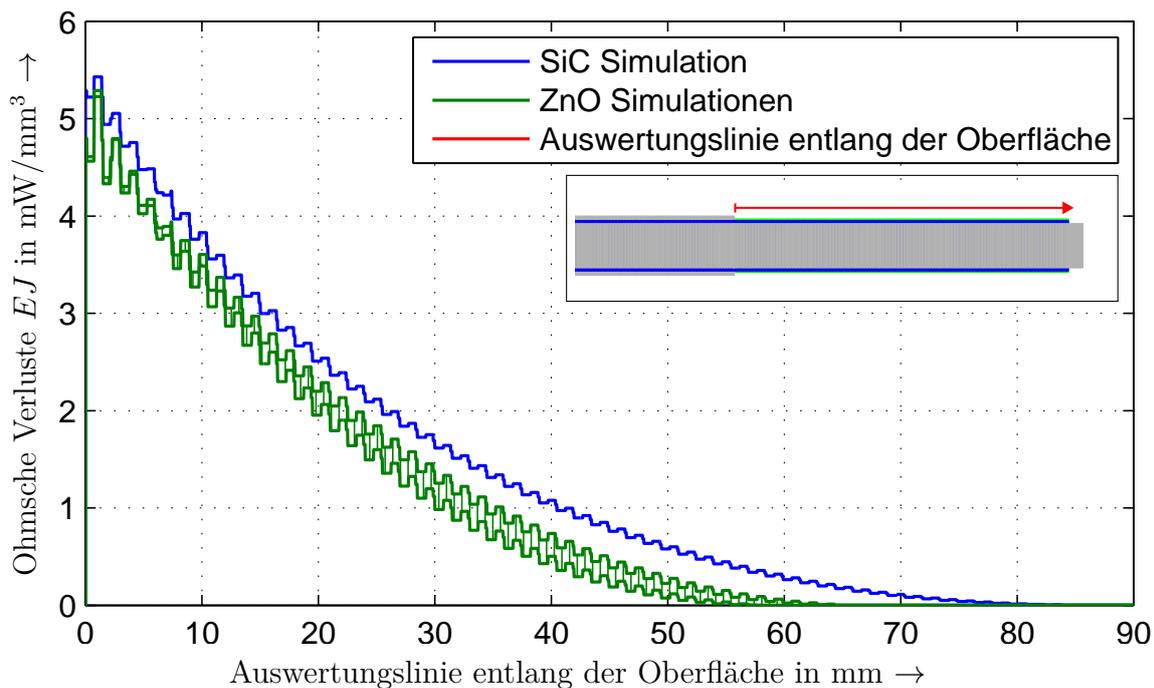


Abbildung 4.26.: Ohmsche Verluste entlang der Oberfläche des Endenglimmschutzes bei der 3D-Modellierung der dünnen Schicht und der Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen erster Ordnung.

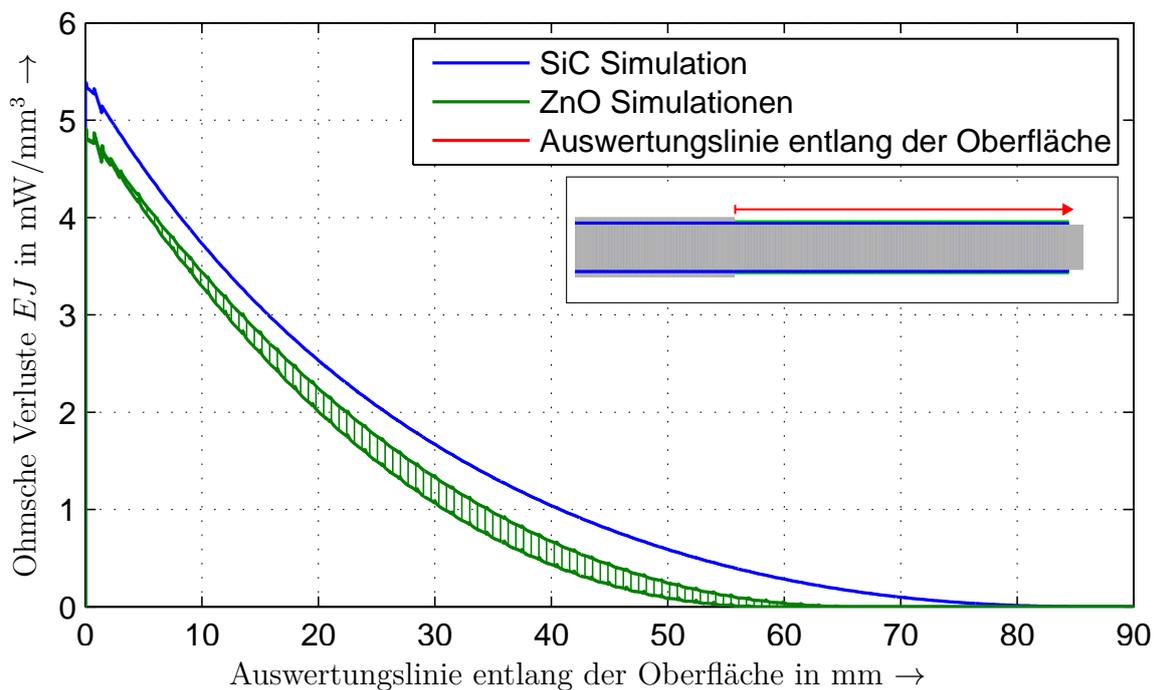


Abbildung 4.27.: Ohmsche Verluste entlang der Oberfläche des Endenglimmschutz bei der 3D-Modellierung der dünnen Schicht und der Verwendung von Ansatzfunktionen und Elementen zweiter Ordnung.

4.2.5. Thermodynamische Simulation

Durch die resistive Feldsteuerung fließen Ströme auf der Oberfläche des Endenglimmschutzes. Diese verursachen eine Erwärmung des Materials. Die in der vorherigen Simulation ermittelten globalen ohmschen Verluste sind in Tabelle 4.7 aufgelistet. Diese sind für das ZnO-Mikrovaristormaterial geringer.

Tabelle 4.7.: Globale ohmsche Verluste.

Material	Ordnung	2D/3D	Globale ohmsche Verluste
SiC 8001	1	2D+3D	23.09 W
	1	3D+3D	23.18 W
	2	2D+3D	23.05 W
	2	3D+3D	23.13 W
ZnO min	1	2D+3D	15.59 W
	1	3D+3D	15.62 W
	2	2D+3D	15.55 W
	2	3D+3D	15.58 W
ZnO max	1	2D+3D	17.58 W
	1	3D+3D	17.62 W
	2	2D+3D	17.54 W
	2	3D+3D	17.57 W

Für die Untersuchung der thermischen Stabilität werden Simulationen durchgeführt. Diese werden mit den thermographischen Messungen für SiC [A49] verglichen. Für die Simulation des thermischen Verhaltens werden die im vorherigen Kapitel berechneten elektrischen Verluste q_E der partiellen Differentialgleichung (2.6) verwendet. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 4.8 aufgelistet. Die Ausgangs- und Umgebungstemperatur ist 293,15 K (20 °C). Auf der Oberfläche des Endenglimmschutzes werden als Konvektionskoeffizient $h=5 \text{ W/Km}^2$ [A33] und für den Emissionskoeffizient 0,6 [A2] vorgegeben, siehe auch [A111]. Die Materialparameter für den SiC- und ZnO-Lack setzen sich aus denen

4. Anwendungsprobleme

des Dotierungsstoffes und des Trägermaterials zusammen. Die konstante Zeitschrittweite Δt der Simulation ist 5 s. Das maximal erlaubte relative nichtlineare Residuum für die Quasi-Newton-Approximation der Wärmestrahlung auf dem Robinrand ist 10^{-6} . Das maximale relative Residuum der linearisierten Gleichungssysteme ist 10^{-12} .

Tabelle 4.8.: Thermische Materialparameter des Endenglimmschutzes. [C4]

Material	ρ in kg/m^3	λ in W/Km	c in J/kgK
Wicklungsstab	7874,0	72,0	449,0
Leitendes Band	7874,0	72,0	449,0
Hauptisolierung	1200,0	0,24	800,0
Umgebung (Luft)	0,0	$1,0e^{-5}$	0,0
SiC-Lack und ZnO-Lack	3120,0	0,6	703,0

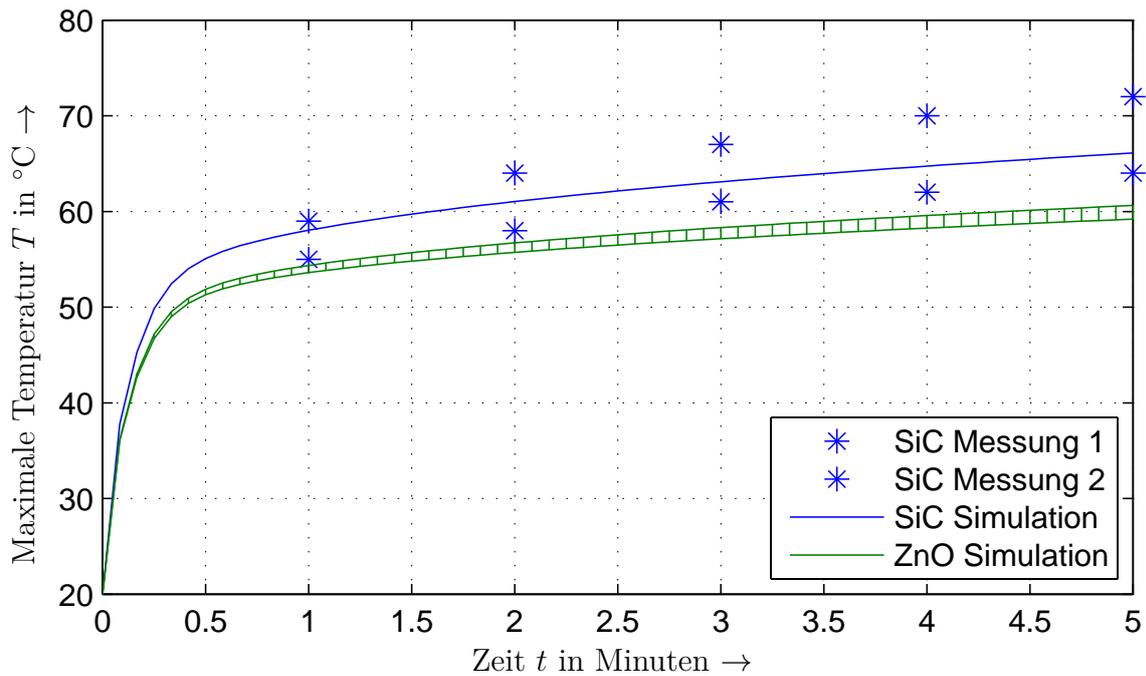


Abbildung 4.28.: Maximale Temperatur auf der Oberfläche des Endenglimmschutzes.

Der gemessene und simulierte zeitliche Verlauf der maximalen Temperatur der SiC-Lacke und ZnO-Lacke ist in Abbildung 4.28 dargestellt. Erwartungsgemäß führt der ZnO-Lack aufgrund der geringeren elektri-

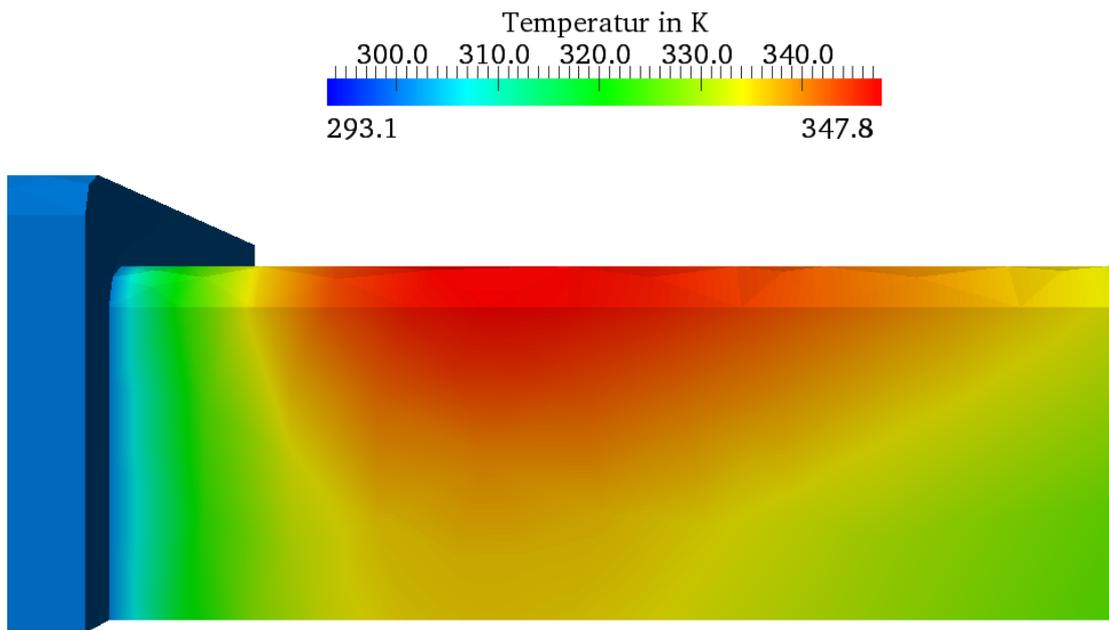


Abbildung 4.29.: Temperatur auf der Oberfläche des Endenglimmschutzes mit SiC nach 5 Minuten. [C4]

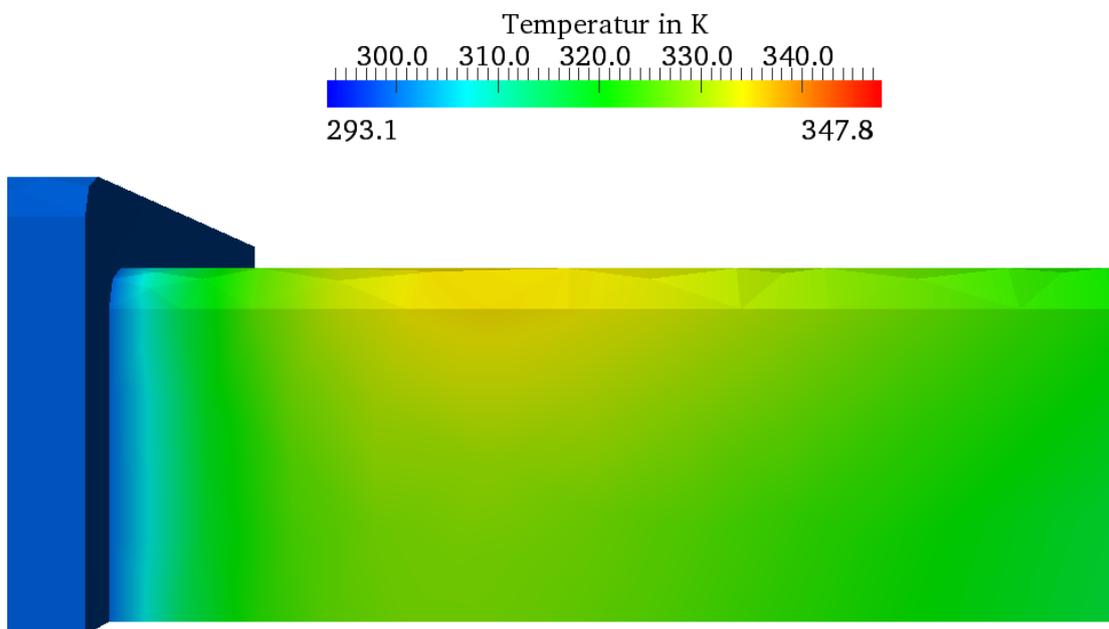


Abbildung 4.30.: Temperatur auf der Oberfläche des Endenglimmschutzes mit ZnO nach 5 Minuten. [C4]

schen Verluste auf niedrigere Temperaturen als der SiC-Lack. Dies zeigen auch die Abbildungen 4.29 und 4.30. Es wird jeweils die maximale Temperatur auf beiden Seiten des Wicklungsstabes gemessen. Der Ort dieser Punkte maximaler Temperatur (sog. Hot Spots) hängt stark von der Materialbeschaffenheit ab [A8].

4.2.6. Auswertung der Anwendung Endenglimmschutz

Bei den Auswertungen der Simulationsergebnisse des Endenglimmschutzes sind kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Simulationsvariationen bezüglich der Modellierung erkennbar. Dies liegt sowohl daran, dass die Geometrie nur wenig gekrümmte Flächen oder Kanten besitzt, als auch daran, dass die Dicke des Lackes bzw. der dünnen Schicht deutlich kleiner als deren laterale Abmessungen ist.

Die Simulationszeiten und der Speicherbedarf sind wie zu erwarten am geringsten bei der 2D-Modellierung der dünnen Schicht bei der Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen erster Ordnung. Die Modellierung der dünnen Schicht in 2D verkürzt die Simulationszeiten bei Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen erster Ordnung auf etwa die Hälfte.

Der Vergleich zu Messungen an einem realen Endenglimmschutz ist für das elektrische Potential oder Feld nur qualitativ möglich, da das Messen elektrischer Potentiale und Felder kaum möglich ist, ohne diese zu beeinflussen. Diese Problematik der Feldmessung ist in [A66] ausführlich geschildert. Qualitativ stimmen die Ergebnisse mit denen im Hochspannungslabor in Darmstadt durchgeführten Messungen überein [A69]. Sie zeigen ein vergleichbares Verhalten, unterscheiden sich jedoch in den maximalen Potentialwerten. Die Ergebnisse der thermischen Simulationen

für das SiC-Material stimmen mit den thermographischen Messungen überein. Für das ZnO-Mikrovaristormaterial liegen keine Messdaten vor.

In der Literatur sind verschiedene Grenzwerte für die maximale tangentielle elektrische Feldstärke zu finden, um Teilentladungen zu vermeiden. Da der in [A82] zu findende Grenzwert von 10 kV/cm von einer Raumfeuchtigkeit von 50% ausgeht und im Vergleich recht hoch ist, wird der Wert von 5 kV/cm aus [A98] und [A99] verwendet. Somit zeigen die Simulationsergebnisse, dass das Mikrovaristormaterial im Bereich ab 5 kV/cm stärker leitfähig sein sollte, um stärker die Bereiche des EGS zu entlasten, in denen eine tangentielle elektrische Feldstärke von 5 kV/cm überschritten wird. Dies führt aufgrund des stärkeren Schaltverhaltens zu einer gezielteren und damit effizienteren Feldsteuerung des EGS mit ZnO Mikrovaristormaterials als mit konventionellen SiC.

Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Weiterentwicklung der Simulationsmethoden zeigte sich in der Anwendung des Endenglimmschutzes für elektrische Maschinen nur teilweise als vorteilhaft. Die Modellierung der dünnen Schichten als 2D-Flächen in 3D-Simulationen erwies sich als deutlich weniger aufwendig und führte trotzdem zu vergleichbaren Ergebnissen.

Die höhere Genauigkeit der Ergebnisse bei Verwendung von isoparametrischen Elementen und Ansatzfunktionen höherer Ordnung rechnete sich in dieser Anwendung mit einer überwiegend „glatten“ und „geraden“ Struktur nur bedingt gegen den deutlich höheren Aufwand bezüglich der Simulationszeit und Speicherbedarf in Tabelle 4.6.

4.3. Kabelgarnituren

4.3.1. Einsatzmöglichkeiten des Mikrovaristormaterials

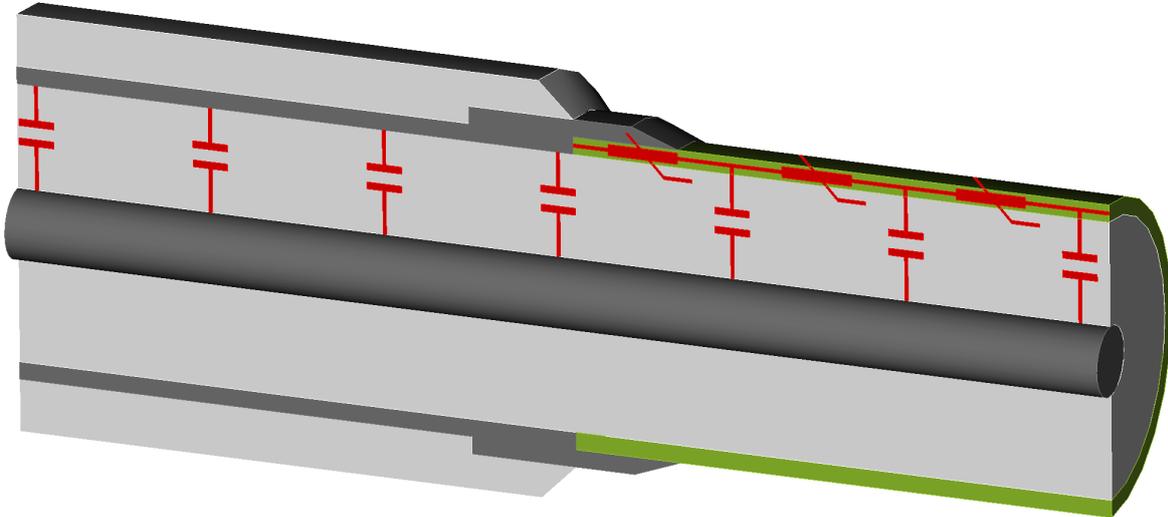


Abbildung 4.31.: Ersatzschaltbild einer Kabelgarnitur mit nichtlinear-resistiver Feldsteuerung. Die feldstärkeabhängige Leitfähigkeit der grün gezeichneten Schicht aus ZnO-Mikrovaristormaterial reduziert hohe tangential elektrische Felder auf der Oberfläche. [B7]

Die Zuverlässigkeit von Kabelnetzen in der Energietechnik hängt stark von den verwendeten Kabelgarnituren ab. Deren Aufgabe ist die Homogenisierung des elektrischen Feldes an Übergängen zweier Hochspannungskabelsysteme oder auf Freileitungen und in Verteileranlagen. Ein Beispiel eines solchen Kabelendverschlusses ist in Abbildung 4.32 zu finden. An diesen Übergängen schützen Kabelgarnituren elektrische Anlagen vor Schäden durch Gleitentladungen. Die Homogenisierung des elektrischen Feldes basiert für gewöhnlich auf kapazitiver, refraktiver oder resistiver Feldsteuerung [A38, A106]. Die Verwendung von linear resistiven Material erhöht jedoch die ohmschen Verluste [A75]. Als Alternative wird die Verwendung von nichtlinear-resistiven Material zur Steuerung des elektrischen Feldes erstmalig in [A108] vorgeschlagen.



Abbildung 4.32.: Anwendungsbeispiel von Kabelendverschlüssen in einem Schalt-schrank [mit freundlicher Genehmigung der Cellpack GmbH, Radeberg].

4. Anwendungsprobleme

Durch das gezielte Steuern des elektrischen Feldes mithilfe des nichtlinearen Verhaltens treten deutlich weniger Verluste bei gleicher Qualität der Feldsteuerung auf. In Abbildung 4.31 ist ein Ersatzschaltbild einer Kabelgarnitur mit nichtlinear-resistiver Feldsteuerung skizziert.

Im Jahre 2000 wurde das erste Produkt mit ZnO-Mikrovaristormaterial für den Mittelspannungsbereich der Firma Tyco Electronics TE Connectivity Ltd. eingeführt [A6, A96]. Es gibt Patente zur Anwendung und zum Herstellungsprozess von Feldsteuerungssystemen mit ZnO-Mikrovaristormaterialien z.B. der Firma ABB Ltd. in [A35, A42, A43]. Die Verwendung des ZnO-Mikrovaristormaterials im Bereich des Überspannungsschutzes für Niederspannungsanwendungen wurde in [A93] untersucht. In diesem Kapitel wird das Design eines Kabelendverschlusses für die Verwendung im Mittelspannungsbereich optimiert. Hierbei wird auf die Belastbarkeit im Kurztest bei sinusförmiger Beanspruchung und bei Impulsbeanspruchung durch Überspannungen eingegangen.

4.3.2. Simulationsmodell einer mikrovaristorgefüllten Kabelgarnitur

Die untersuchte Kabelgarnitur besteht aus einem Steuerkonus und einem Mantel aus Silikon, siehe auch Abbildung 4.33. Sie wird auf ein abgeschältes Kabel aufgeschoben. Ein Schnittbild einer aufgeschobenen Kabelgarnitur ist in Abbildung 4.34 dargestellt. Für die Simulation und die Untersuchungen wird der Schirm der Kabelgarnitur abgeschnitten, um die Schlagweite in den Messungen herabzusetzen. Die Geometrie für die Simulationen der Parameterstudie ist in Abbildung 4.35 gegeben. Die verwendeten Maße und Materialparameter sind in Tabelle 4.9 und 4.10 aufgelistet. Das Kupfer wird in den Simulationen als perfekt elektrisch leitend (PEC) betrachtet. Die Simulationsergebnisse werden entlang ei-

ner Auswertungslinie auf der Oberfläche der Kabelgarnitur in der Luft ausgewertet.



Abbildung 4.33.: Auf der linken Seite eine Testkabelgarnitur ohne Farbpatch, in der Mitte die Standardkabelgarnitur und auf der rechten Seite die untersuchte Kabelgarnitur ohne Schirm. [B7]

4. Anwendungsprobleme

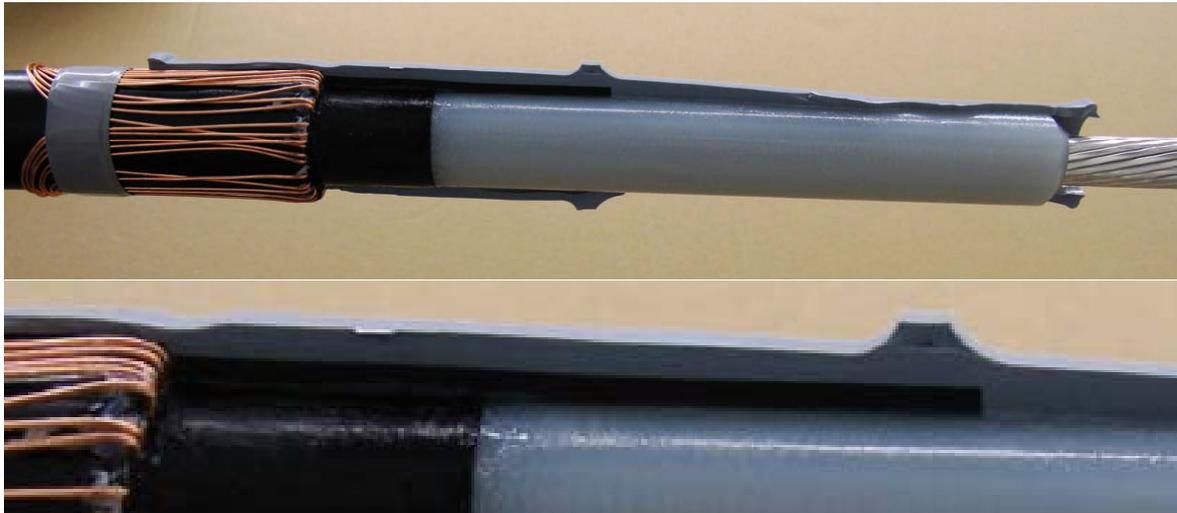


Abbildung 4.34.: Schnittbild der auf ein abgeschältes Kabel aufgezogene Kabelgarnitur. [B7]

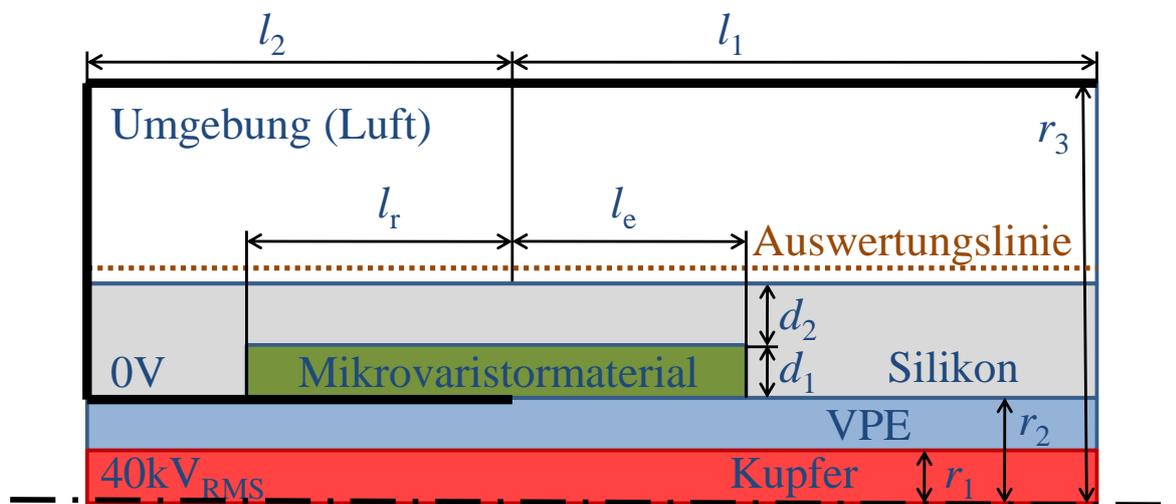


Abbildung 4.35.: Rotationssymmetrisches Simulationsmodell der untersuchten Kabelgarnitur. Die verwendeten Maße und Materialparameter sind in Tabelle 4.9 und 4.10 zu finden [B7]. VPE steht für vernetztes Polyethylen.

Tabelle 4.9.: Geometrische Parameter der untersuchten Kabelgarnitur.

$d_1 = 1...5 \text{ mm}$	$d_2 = 4 \text{ mm}$
$l_r = 30 \text{ mm}$	$l_e = 5...80 \text{ mm}$
$l_1 = 320 \text{ mm}$	$l_2 = 80 \text{ mm}$
$r_1 = 7.5 \text{ mm}$	$r_2 = 13.5 \text{ mm}$
$r_3 = 300 \text{ mm}$	

Tabelle 4.10.: Materialparameter der untersuchten Kabelgarnitur.

Material	ε_r	κ
ZnO-Mikrovaristormaterial	12.0	siehe Abb. 2.8
Umgebung (Luft)	1.0	-
VPE	2.3	-
Silikon	2.8	-
Kupfer	PEC	PEC

4.3.3. Simulation bei sinusförmiger Beanspruchung

Es wird das optimale Design des Feldsteuerelements einer Kabelgarnitur mit ZnO-Mikrovaristormaterial gesucht. Dafür werden in einem parametrisierten Benchmarkproblem die einzelnen Varianten des Simulationsmodells aus Kapitel 4.3.2 verglichen. Zum Vergleich wird die ZnO-Mikrovaristorschicht als 2D- und als 3D-Modell in der Simulation berücksichtigt. Es wird jeweils eine Simulation mit Elementen und Ansatzfunktionen erster und zweiter Ordnung durchgeführt. Es werden somit 80 Varianten auf vier verschiedenen Arten simuliert und verglichen.

In den Abbildungen 4.38 bis 4.43 sind die Simulationsergebnisse bei 46 kV (Effektivwert) von sieben Varianten verschiedener Länge bei konstanter Dicke 3 mm für die verschiedenen Simulationsarten aufgetragen. Es werden das tangentiale und das normale effektive elektrische Feld entlang der in Abbildung 4.35 eingezeichneten Auswertungslinie entlang der

Oberfläche der Kabelgarnitur ausgewertet. Die Modellierung der dünnen Schicht als 2D oder 3D hat nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse. Die Ergebnisse sind jedoch deutlich glatter bei Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung.

Die Simulationszeiten und der Speicherbedarf sind in Tabelle 4.11 aufgeführt. Die Simulationen werden auf einem IBM BladeServer mit zwei Intel Xeon X5570 CPUs mit 2,93 GHz Taktung unter Linux durchgeführt. Die Simulation mit einer 2D-Modellierung der dünnen Schicht ist vorteilhaft. Bei vergleichbaren Ergebnissen lassen sich die alle 80 Varianten bei 16 parallelen Simulationsprozessen in weniger als einer Stunde simulieren. Wird die dünne Schicht als 3D-Volumenschicht berücksichtigt, verdoppelt sich die Simulationszeit. Bei Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung statt erster Ordnung dauert die komplette Simulation mehr als zehnmal so lange.

Tabelle 4.11.: Simulationszeiten und Speicherbedarf für den Kabelendverschluss. Relatives maximales nichtlineares Residuum 10^{-6} .

Ordnung	2D/3D	∅ Unbekannte	∅ Simulationszeiten	∅ Speicherbedarf
1	2D	16175	10 min 54.94 s	0.17 GB
1	3D	18147	21 min 04.12 s	0.40 GB
2	2D	116428	2 h 55 min 38.25 s	2.56 GB
2	3D	131322	4 h 24 min 43.10 s	3.43 GB

Die maximalen tangentialen effektiven Feldstärken der jeweils 80 Varianten sind in den Abbildungen 4.44 und 4.45 für die vier Simulationsvarianten aufgetragen. Die Abweichungen der Ergebnisse der verschiedenen Modellierungen der dünnen Schicht in 2D oder 3D steigt wie zu erwarten mit der Dicke der Schicht.

Die gesamte Verlustleistung der jeweils 80 Varianten für die vier Simulationsvarianten sind in den Abbildungen 4.46 und 4.47 aufgelistet. Diese unterscheiden sich für die vier Simulationsvarianten nur geringfügig.

Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Weiterentwicklung der numerischen Berechnungsmethoden zeigte sich in der Simulation bei sinusförmiger Beanspruchung der Kabelgarnitur nur teilweise als vorteilhaft. Die Modellierung der dünnen Schichten als 2D-Flächen in 3D-Simulationen erwies sich als deutlich weniger aufwendig und führte trotzdem zu vergleichbaren Ergebnissen. Die Simulationszeiten und der Speicherbedarf halbierten sich hierbei sogar. Dies ist gerade für aufwendige Parameterstudien mit vielen Varianten von großem Vorteil.

Die höhere Genauigkeit der Ergebnisse bei Verwendung von isoparametrischen Elementen und Ansatzfunktionen höherer Ordnung rechnete sich in diesem Beispiel nur bedingt gegen den deutlich höheren Aufwand bezüglich der Simulationszeit und Speicherbedarf.

Für das optimale Design des Feldsteuerelements führt nach den Simulationsergebnissen eine effektive Länge l_e von mindestens 50 mm zu einer homogeneren Feldverteilung. Eine Dicke d_1 von 3 mm ist ein Kompromiss zwischen dem maximalen tangentialen elektrischen Feld und der Verlustleistung, welche mit steigender Dicke sinken, und dem Materialverbrauch, Gewicht und Montageaufwand, welche mit zunehmender Dicke steigen. Diese Maße werden für die Simulationen bei Impulsbeanspruchung und für die vergleichenden Messungen im folgenden Kapitel verwendet.

4. Anwendungsprobleme

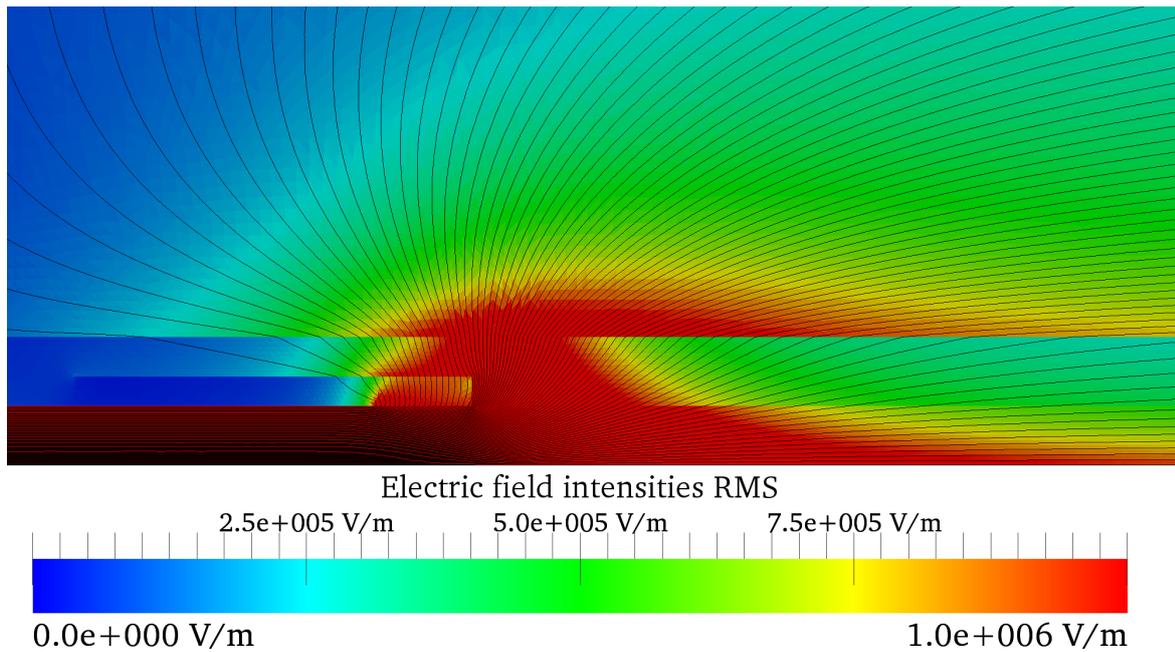


Abbildung 4.36.: Schnittbild mit Äquipotentiallinien im Abstand von 0,5 kV des simulierten elektrischen Potentials und Feldstärke bei 40 kV Testspannung. Die Geometrieparameter sind $l_e = 10$ mm und $d_1 = 3$ mm. [B7]

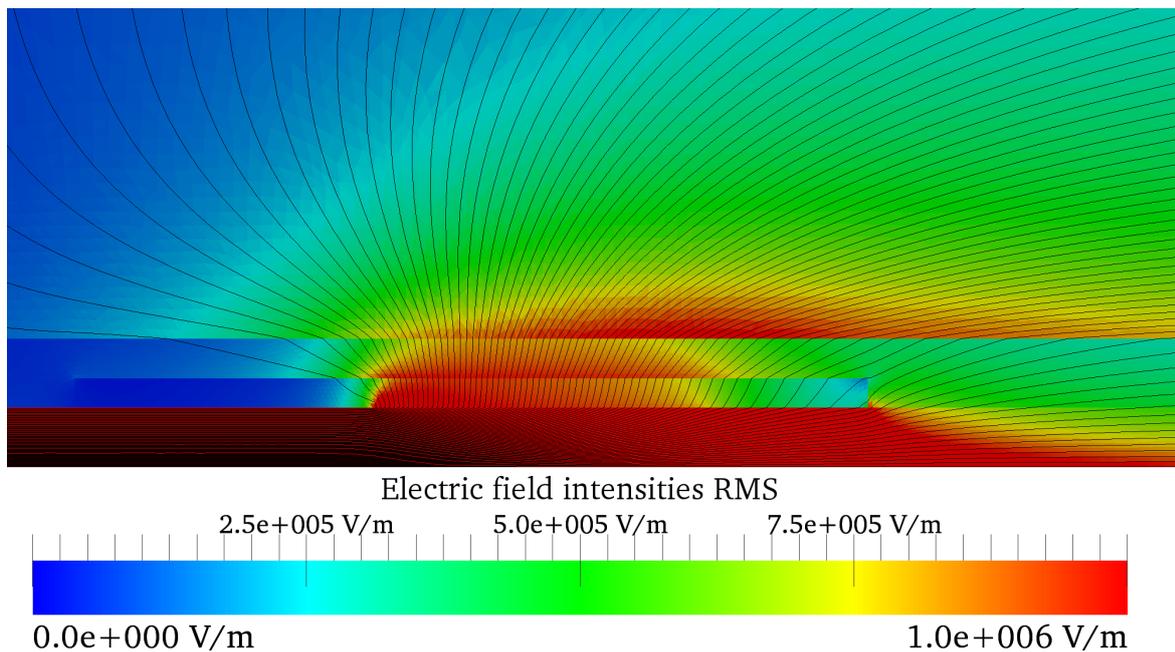


Abbildung 4.37.: Schnittbild mit Äquipotentiallinien im Abstand von 0,5 kV des simulierten elektrischen Potentials und Feldstärke bei 40 kV Testspannung. Die Geometrieparameter sind $l_e = 50$ mm und $d_1 = 3$ mm. [B7]

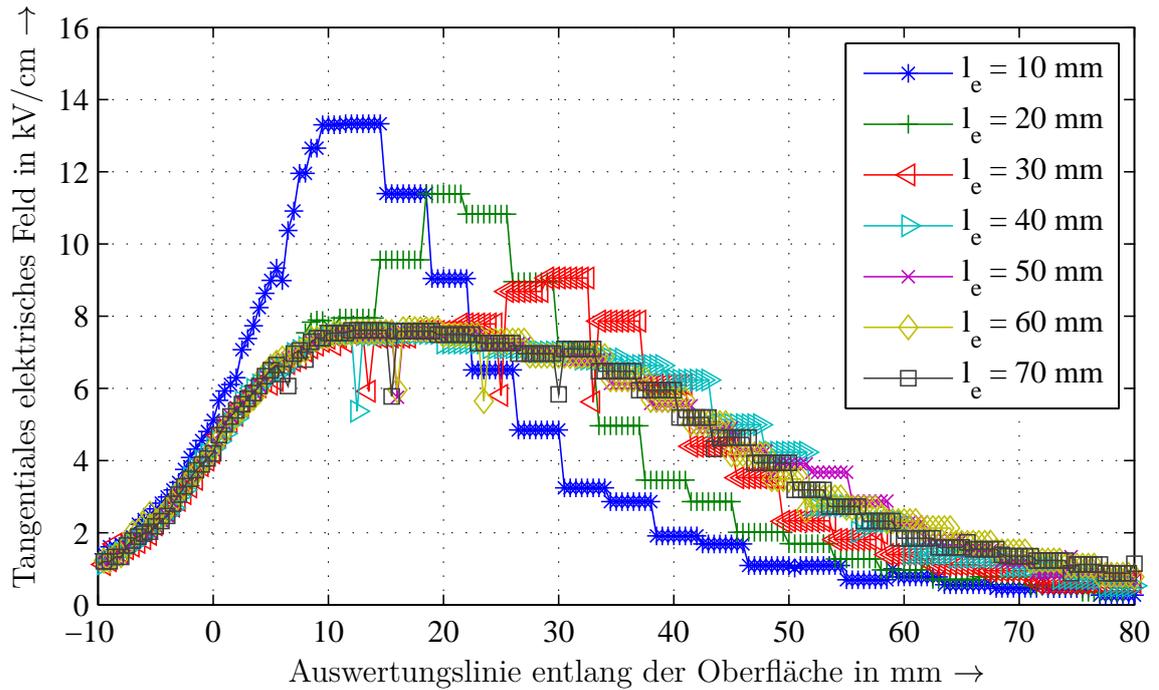


Abbildung 4.38.: Tangentiale Komponente des effektiven elektrischen Feldes bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen erster Ordnung und 2D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

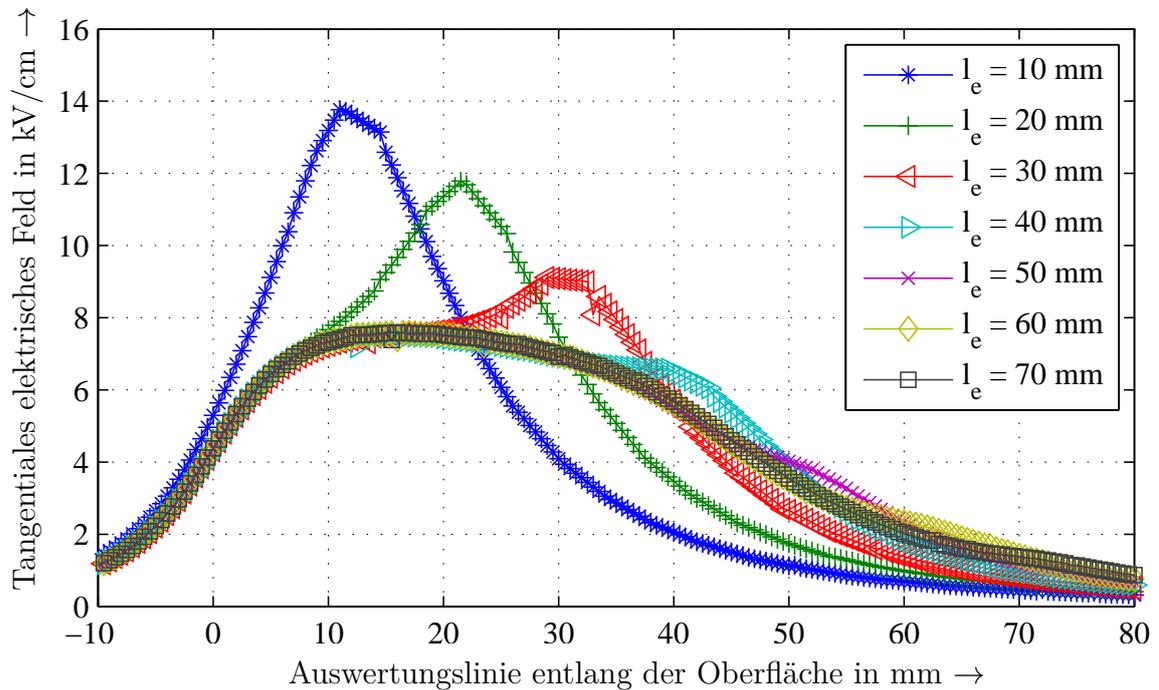


Abbildung 4.39.: Tangentiale Komponente des effektiven elektrischen Feldes bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 2D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

4. Anwendungsprobleme

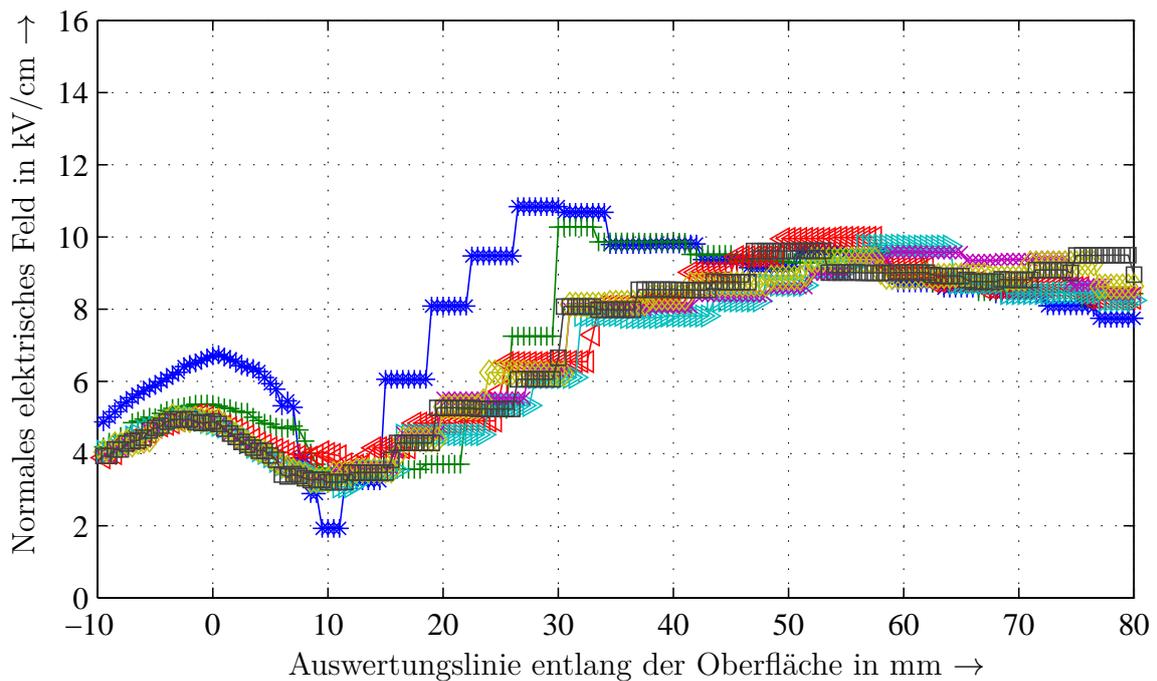


Abbildung 4.40.: Normale Komponente des effektiven elektrischen Feldes bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen erster Ordnung und 2D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

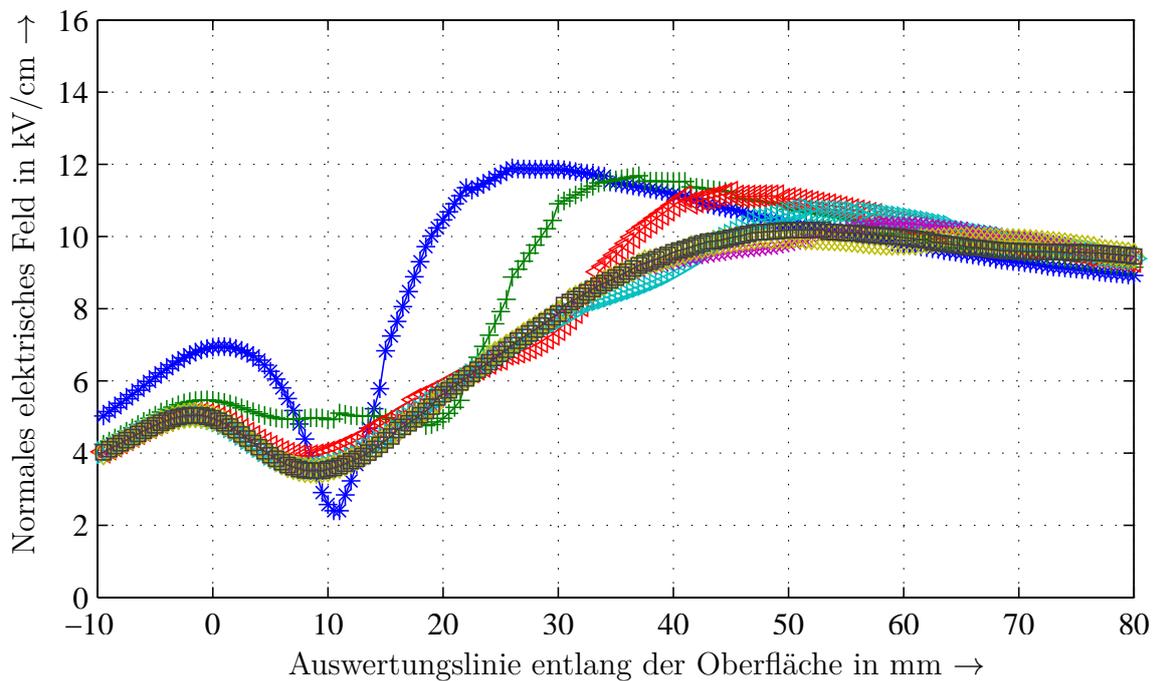


Abbildung 4.41.: Normale Komponente des effektiven elektrischen Feldes bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 2D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

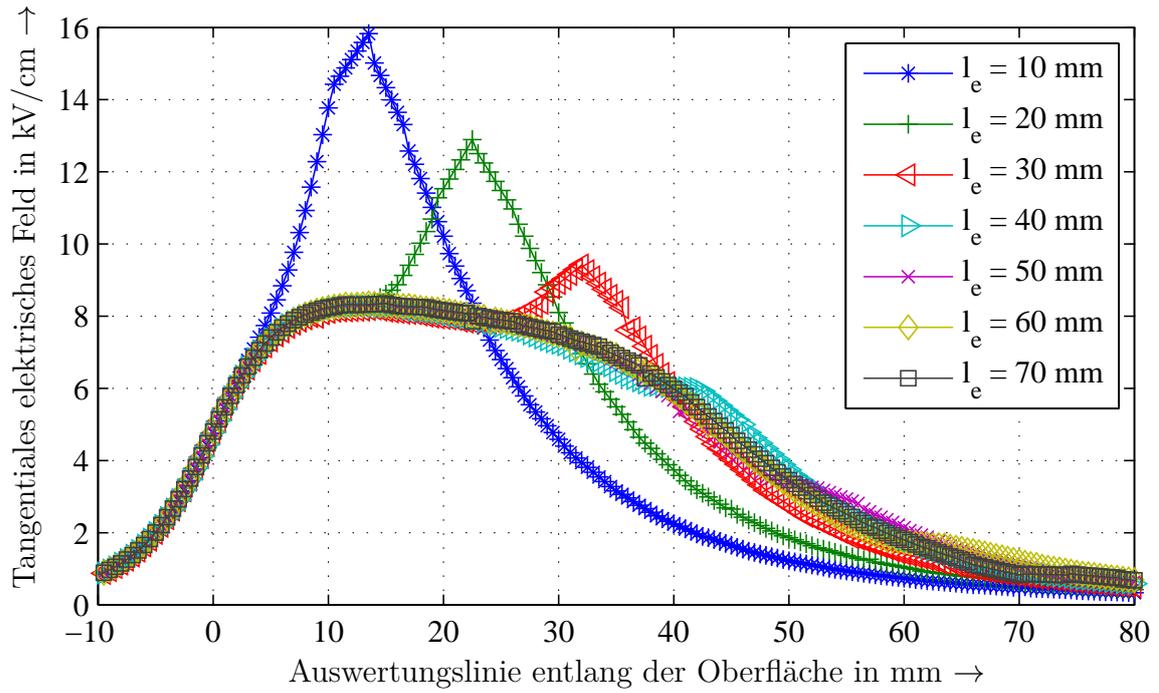


Abbildung 4.42.: Tangentiale Komponente des effektiven elektrischen Feldes bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 3D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

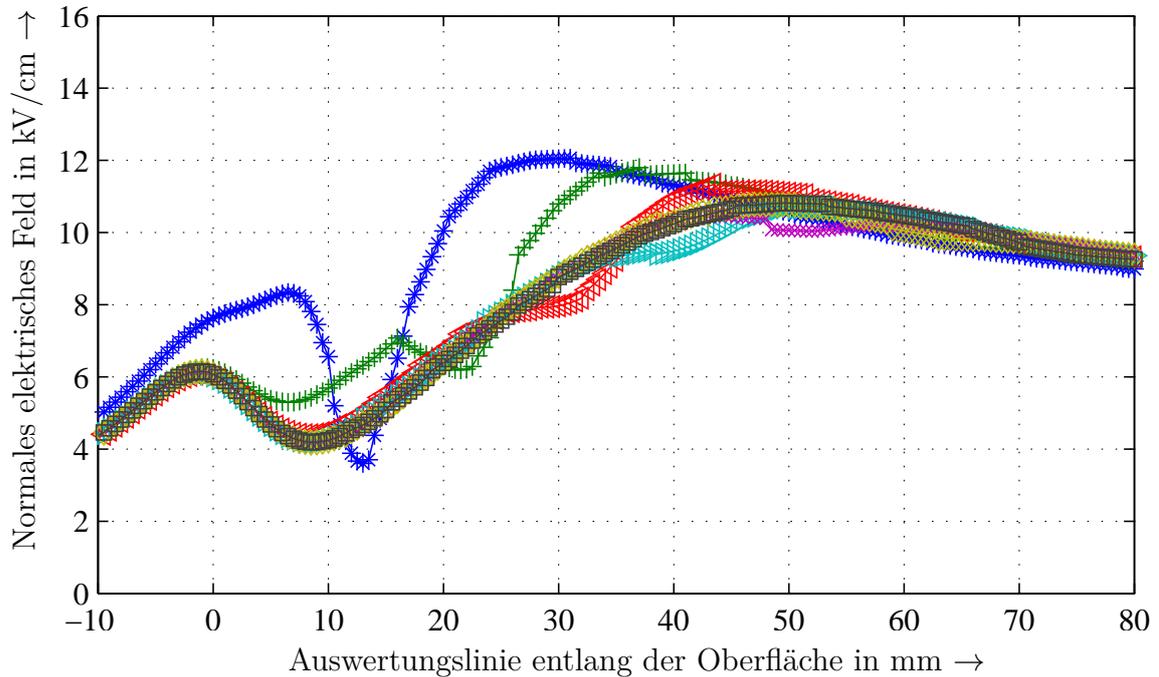


Abbildung 4.43.: Normale Komponente des effektiven elektrischen Feldes bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 3D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

4. Anwendungsprobleme

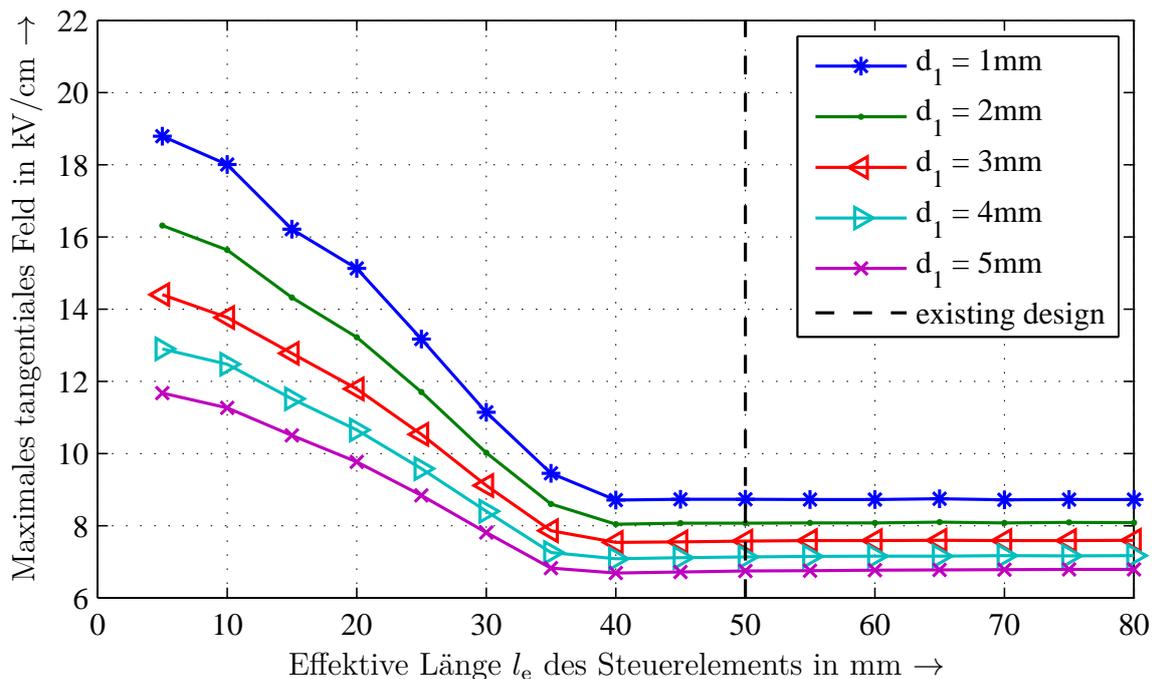


Abbildung 4.44.: Maximales tangenciales effektives elektrisches Feld bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 2D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

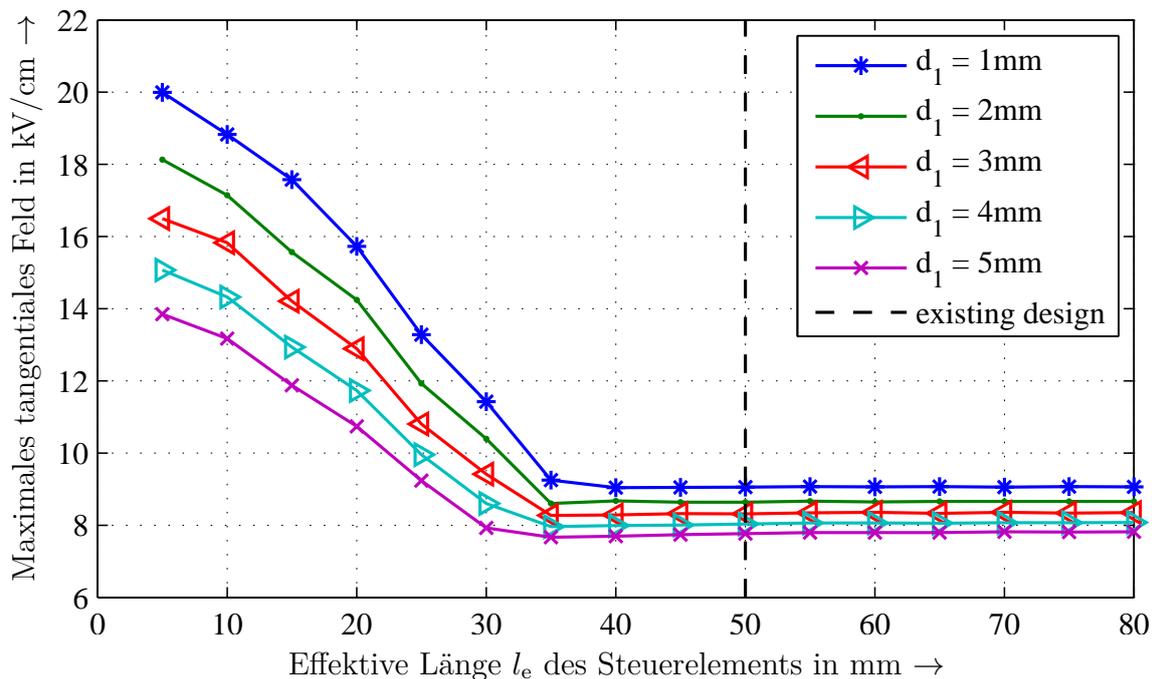


Abbildung 4.45.: Maximales tangenciales effektives elektrisches Feld bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 3D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

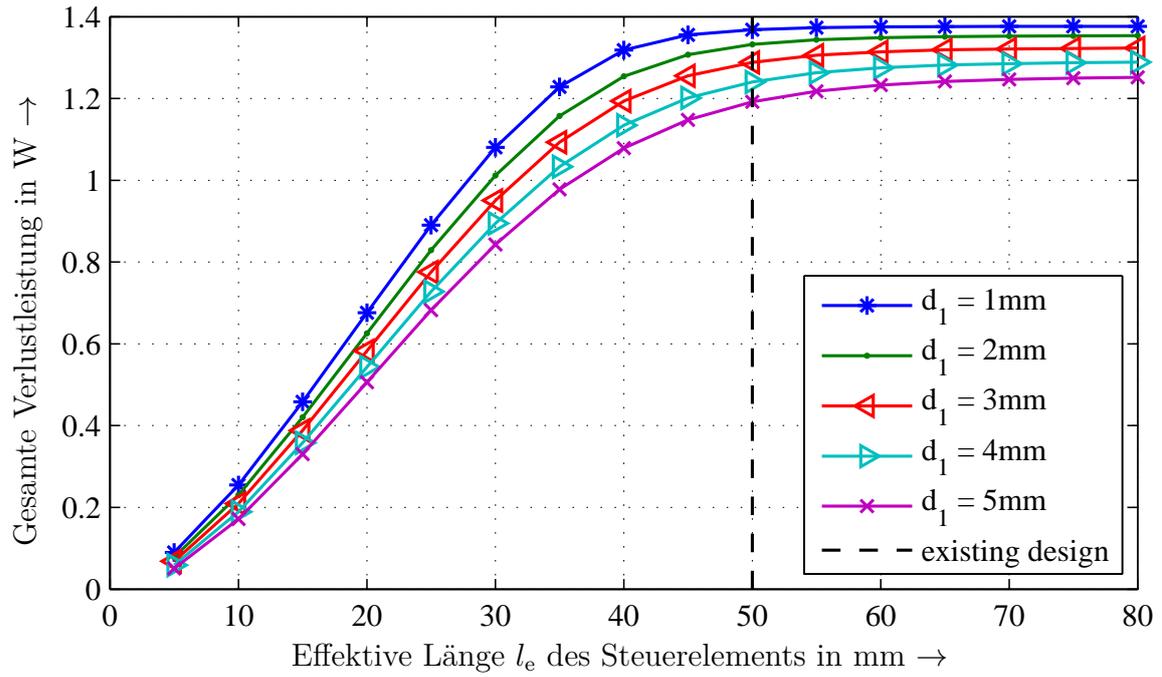


Abbildung 4.46.: Gesamte Verlustleistung bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 2D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

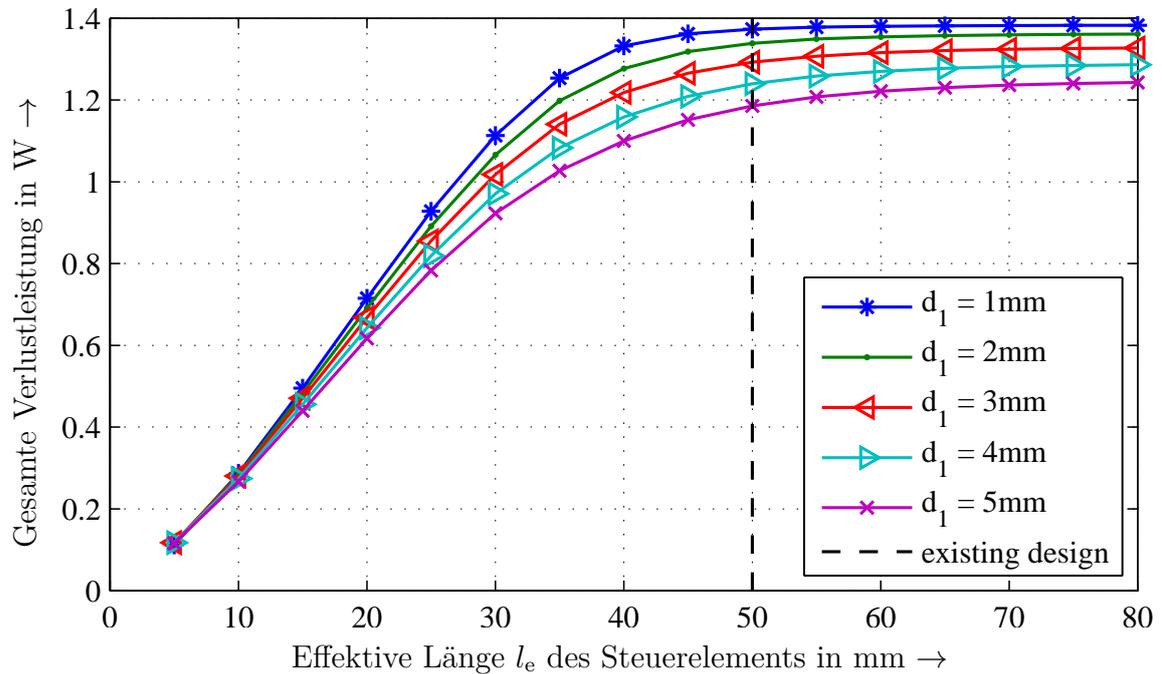


Abbildung 4.47.: Gesamte Verlustleistung bei sinusförmiger Beanspruchung 46 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung und 3D-Modellierung der ZnO Mikrovaristorschicht. [B6]

4.3.4. Simulation bei Impulsbeanspruchung

Das im vorherigen Kapitel 4.3.3 gefundene optimale Design wird nun mit einer Standard-Kabelgarnitur bei Impulsbeanspruchung verglichen. Die Standard-Kabelgarnitur basiert auf einem refraktiven Feldsteuerungselement mit einer relativen Permittivität von $\varepsilon_r = 19$. Die Kabelgarnituren werden mit einer Impulsspannung von $1.2/50 \mu\text{s}$ belastet [A26]. Aus den Simulationsergebnissen werden für jeden Zeitschritt die tangentialen elektrischen Feldstärken entlang der Auswertungslinie auf der Oberfläche ausgewertet. Überschreitet diese die Grenzfeldstärke in Luft nach [A70, S.175],

$$(E/p)_0 = 24.4 \text{ kVbar}^{-1} \text{ cm}^{-1},$$

ist ein Überschlag möglich. Die lokale Überschreitung der Grenzfeldstärke,

$$\Delta E_{\text{tan}}(\vec{r}, t) = E_{\text{tan}}(\vec{r}, t) - p(E/p)_0,$$

wird entlang der Auswertungslinie zu der resultierenden Überspannung $\Delta U(t)$ aufintegriert,

$$\Delta U(t) = \int_{C_\Delta} \Delta E_{\text{tan}}(\vec{r}, t) \, d r.$$

Die temporäre Überspannung wird über die Zeit integriert,

$$\Phi = \int \Delta U(t) \, d t.$$

Diese über die Zeit integrierte Überspannung wird im Folgenden als Überspannungsstoß Φ bezeichnet und ist für eine bestimmte Anwendung konstant, siehe hierzu auch die Angaben zum Kriterium der wirksamen

Fläche [A67, A79]. Somit kann dieser aus den Simulationsergebnissen ermittelte Überspannungsstoß Φ als vergleichendes Kriterium für die Wahrscheinlichkeit eines Überschlages verwendet werden.

Für die Simulationen werden die gleichen Materialparameter wie für die sinusförmige Spannung im Kapitel 4.3.3 verwendet, da sich das Material oberhalb von E_b ähnlich bei Impuls- und DC-Beanspruchung verhält, siehe Abbildung 2.6 oder [A35]. Die Simulationsergebnisse für die vier verschiedenen Simulationsarten werden in den Abbildungen 4.48 und 4.49 mit den praktischen Messungen verglichen. Für ein besseres Verständnis der Auswertung ist in den Abbildungen 4.50 bis 4.53 die Überfeldstärke ΔE_{\tan} für die vier Simulationen bei einer Impulsspannung von 115 kV und Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung gegen die Zeit und den Ort aufgetragen. Das Volumen entspricht dem Überspannungsstoß Φ . Die praktischen Impulsprüfungen werden bei der Cellpack GmbH durchgeführt. Bei diesen praktischen Messungen wird wie bereits erwähnt der Schirm abgeschnitten, um die Spannungsfestigkeit zu verkleinern. Es werden jeweils vier Prüfkörper bis zum Erreichen der Durchschlagsspannung nach [A26] geprüft. Die mittleren Simulationszeiten und der zugehörige Speicherbedarf sind in Tabelle 4.12 aufgelistet. Die Simulationen werden bei einer konstanten Zeitschrittweite von $0.1 \mu\text{s}$ und einem maximalen nichtlinearen Residuum der Quasi-Newton-Iterationen von 10^{-6} auf einem IBM BladeServer mit zwei Intel Xeon X5570 CPUs mit 2,93 GHz Taktung unter Linux durchgeführt.

Die Ergebnisse der für die Simulation vereinfachten Geometrie mit spezifischem Durchschlagskriterium von 30.0 mVs zeigen zur Messung konsistente Ergebnisse. Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Weiterentwicklung der Simulationsmethoden führt in der Simulation bei Impuls-

4. Anwendungsprobleme

Tabelle 4.12.: Simulationszeiten und Speicherbedarf für den Kabelendverschluss bei Impulsbeanspruchung.

Material	Ordnung	2D/3D	∅ Unbekannte	∅ Simulationszeit	∅ Speicher
Std	1	2D	14629	1 min 42.90 s	0.15 GB
	1	3D	16845	2 min 01.91 s	0.16 GB
	2	2D	105335	23 min 06.30 s	1.69 GB
	2	3D	121870	27 min 08.77 s	1.86 GB
ZnO	1	2D	14617	3 min 24.34 s	0.20 GB
	1	3D	16848	5 min 48.12 s	0.23 GB
	2	2D	105243	43 min 04.70 s	1.86 GB
	2	3D	121863	65 min 47.43 s	2.17 GB

beanspruchung der Kabelgarnitur zu genaueren Ergebnissen. Die Verwendung von isoparametrischen Elementen und Ansatzfunktionen höherer Ordnung benötigt jedoch in diesem Beispiel einen deutlich höheren Aufwand bezüglich der Simulationszeit und Speicherbedarf. Sowohl die Simulationsergebnisse der Modellierung der dünnen Schicht in 2D als auch 3D zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Messergebnisse. Die Einsatzspannung bei der 2D-Modellierung der dünnen Schicht ist deutlich höher. Dies liegt daran, dass das elektrische Feld im Material aufgrund der Vernachlässigung der Normalkomponente kleiner ausgewertet wird und somit die Leitfähigkeit der Schicht geringer ist.

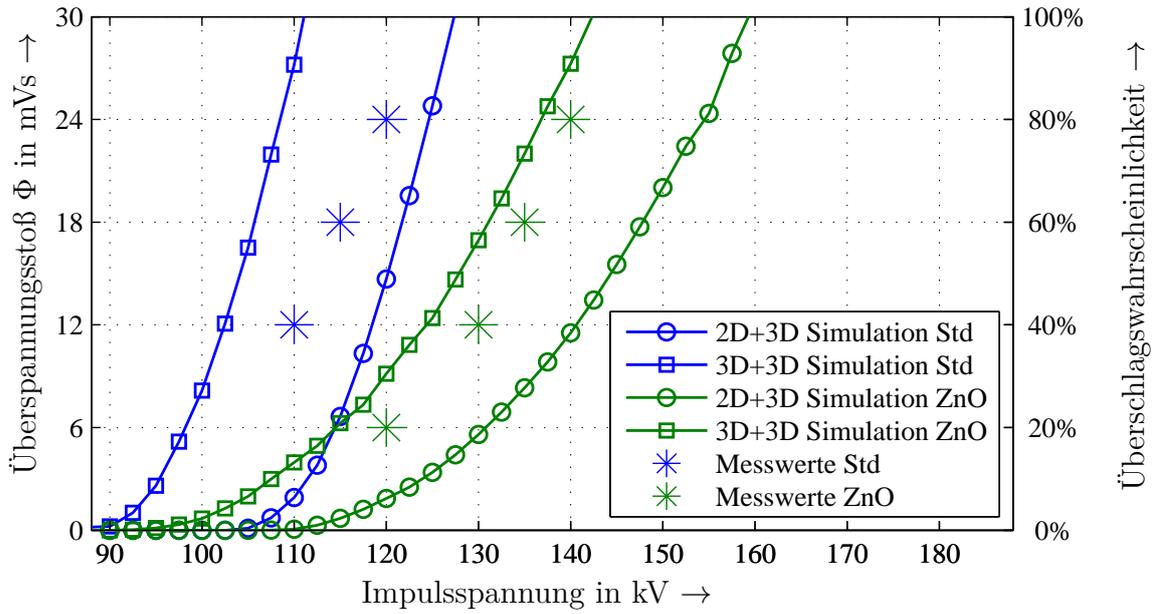


Abbildung 4.48.: Die aus den Simulationen mit Elementen und Ansatzfunktionen erster Ordnung berechneten Überspannungsstöße Φ und die in den praktischen Messungen ermittelten Überschlagswahrscheinlichkeiten gegen die Impulsspannung. [B7]

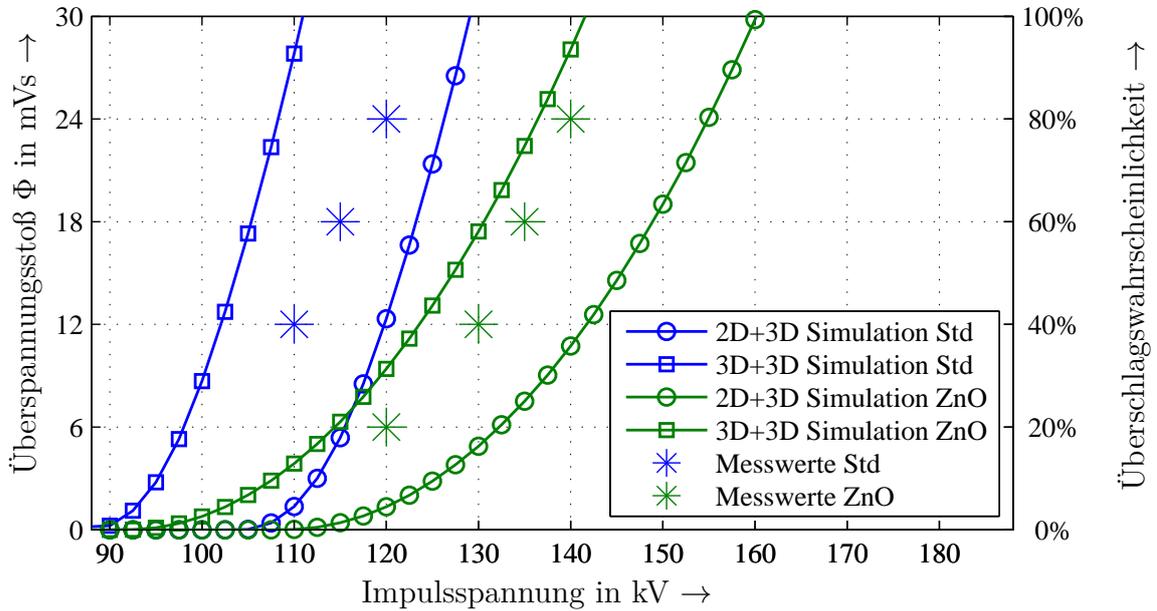


Abbildung 4.49.: Die aus den Simulationen mit Elementen und Ansatzfunktionen zweiter Ordnung berechneten Überspannungsstöße Φ und die in den praktischen Messungen ermittelten Überschlagswahrscheinlichkeiten gegen die Impulsspannung. [B7]

4. Anwendungsprobleme

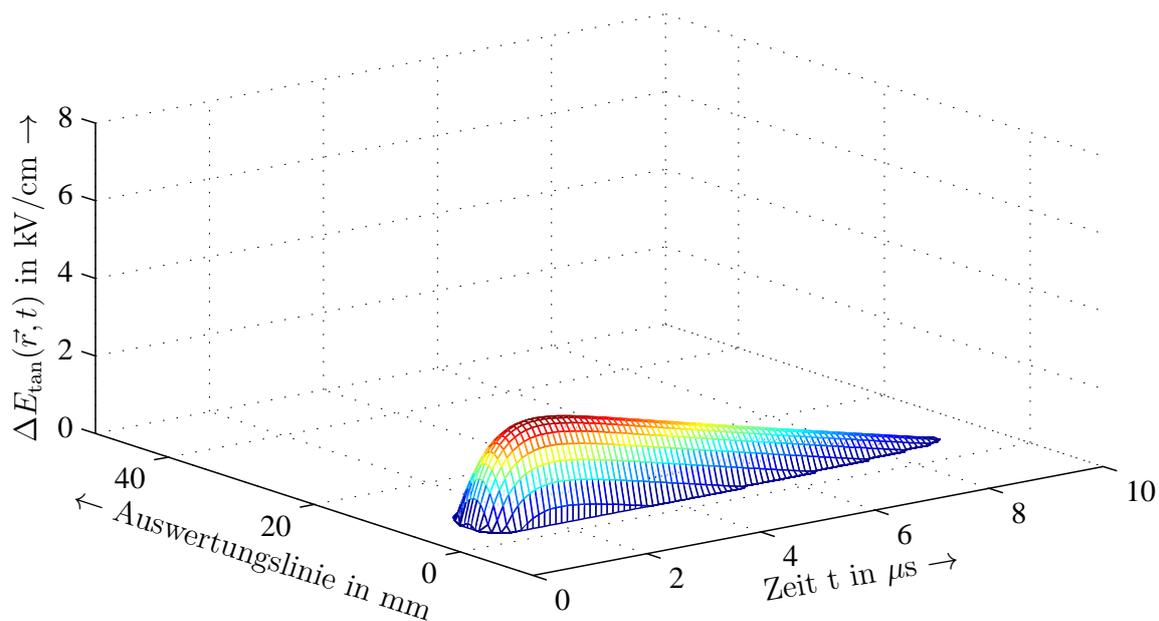


Abbildung 4.50.: Überfeldstärke ΔE_{tan} für die konventionelle refraktive Kabelgarnitur bei Modellierung der dünnen refraktiven Schicht in 2D. Die maximale Überfeldstärke ist 2.45 kV/cm. Das Volumen bzw. der Überspannungsstoß Φ ist 5.38 mVs.

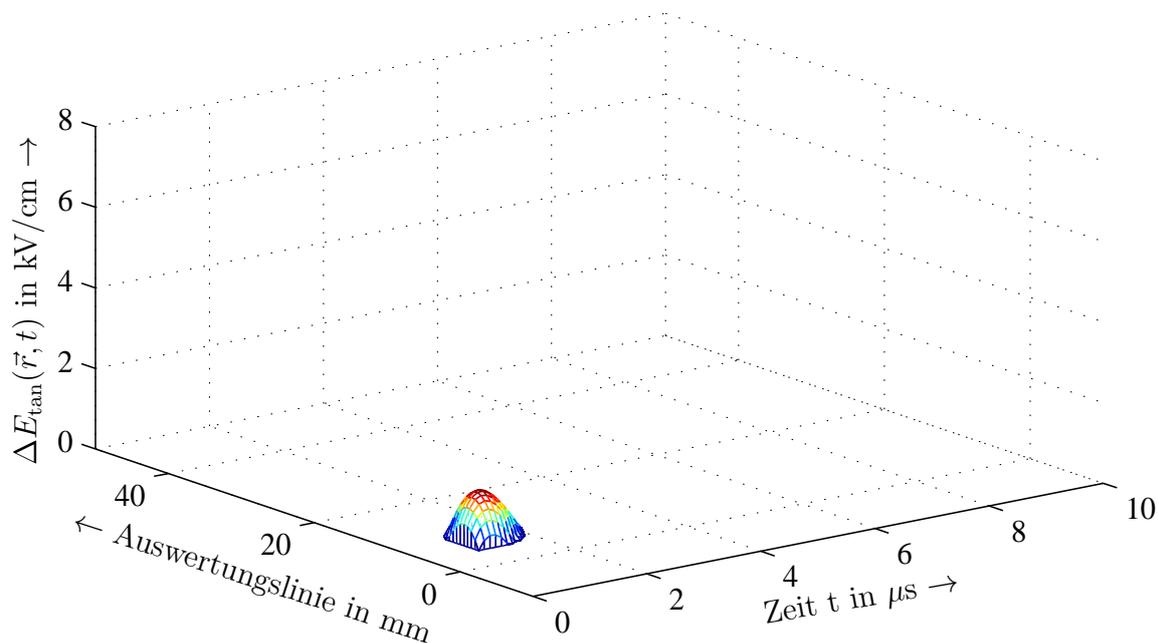


Abbildung 4.51.: Überfeldstärke ΔE_{tan} für die Kabelgarnitur mit ZnO Mikrovaristor-material bei Modellierung der dünnen refraktiven Schicht in 2D. Die maximale Überfeldstärke ist 1.21 kV/cm. Das Volumen bzw. der Überspannungsstoß Φ ist 0.41 mVs.

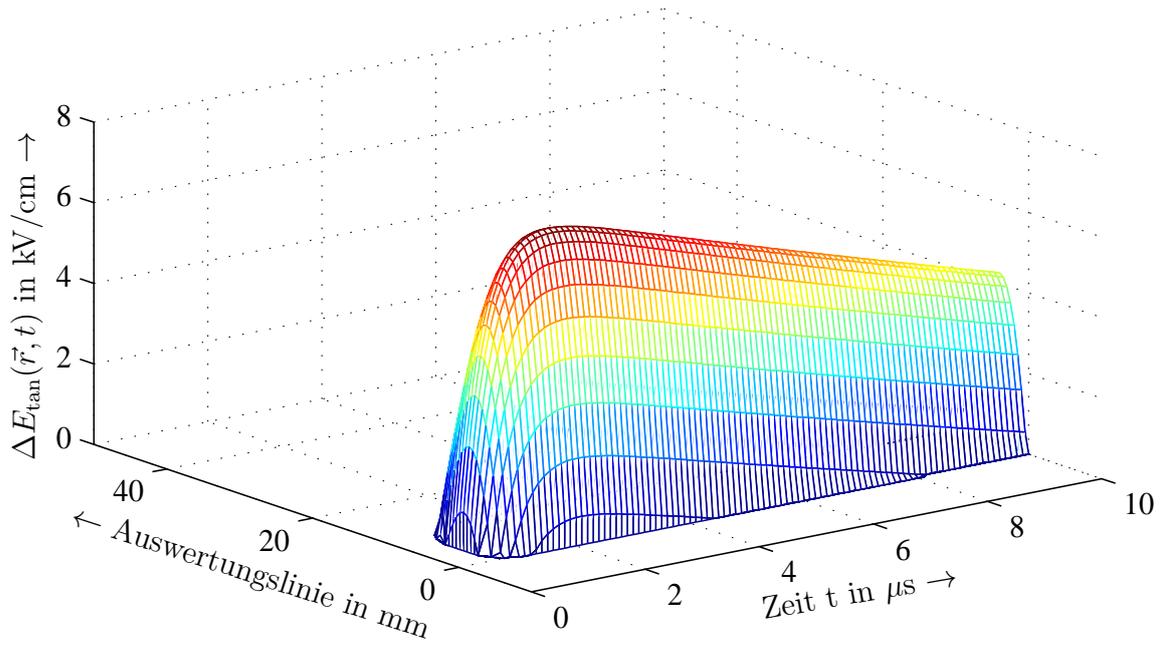


Abbildung 4.52.: Überfeldstärke ΔE_{tan} für die konventionelle refraktive Kabelgarnitur bei Modellierung der dünnen refraktiven Schicht in 3D. Die maximale Überfeldstärke ist 7.59 kV/cm. Das Volumen bzw. der Überspannungsstoß Φ ist 39.87 mVs.

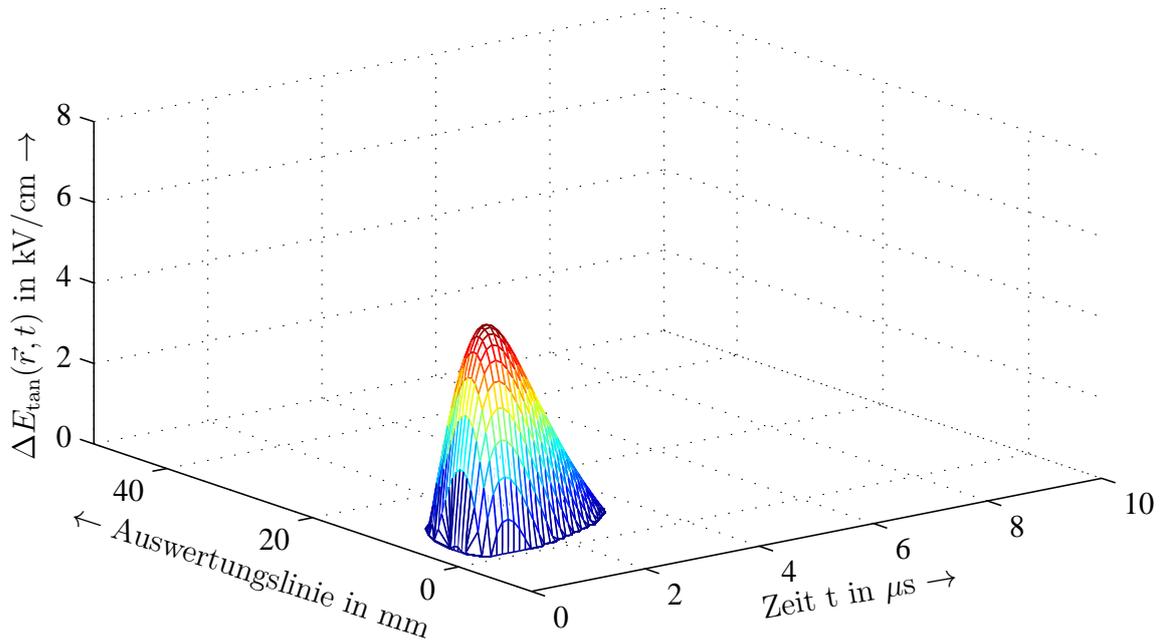


Abbildung 4.53.: Überfeldstärke ΔE_{tan} für die Kabelgarnitur mit ZnO Mikrovaristor-material bei Modellierung der dünnen refraktiven Schicht in 3D. Die maximale Überfeldstärke ist 5.34 kV/cm. Das Volumen bzw. der Überspannungsstoß Φ ist 6.31 mVs.

5. Zusammenfassung

Dünne Schichten aus mikrovaristorgefüllten Elastomeren oder Lacken können in Applikationen der Hochspannungstechnik zur Steuerung des elektrischen Feldes eingesetzt werden. Sie bieten viele Vorteile gegenüber den bisher eingesetzten Materialien und erlauben zusätzlich durch ihre vorteilhaften und definierbaren elektrischen Eigenschaften kompaktere Designs. Jedoch werden sie bisher nur wenig in kommerziellen Applikationen eingesetzt. Es fehlen sowohl Erfahrungen bezüglich des Alterungs- und Langzeitverhaltens als auch optimierte Designs.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine geeignete numerische Simulationsumgebung entwickelt. Diese ermöglicht es, mittels Variantenstudien ein optimales Design einer Applikation zu finden. Hierfür wurde eine bestehende Simulationssoftware weiterentwickelt und in die Simulationsumgebung unter Python eingebunden.

Die meisten Applikationen aus der Hochspannungstechnik bestehen aus rotationssymmetrischen Objekten in einer unsymmetrischen Umgebung. Für die exaktere Berücksichtigung dieser runden Objekte in den Simulationen wurde die vorhandene Software mit der möglichen Berücksichtigung von Elementen höherer Ordnung erweitert. Diese können im Gegensatz zu linearen Elementen runde Objekte mit geringerem Volumenfehler und unter Vermeidung von künstlichen Feldsinguläritäten darstellen.

Die Schichten aus ZnO-Mikrovaristormaterial sind dünn im Vergleich zu ihrer lateralen Ausdehnung. Folglich wirkt das Material überwiegend in den zur Oberfläche tangentialen Richtungen feldsteuernd. Aufgrund der geringen Dicke kann die feldsteuernde Wirkung in der zur Oberfläche normalen Richtung meist vernachlässigt werden. Somit können diese dünnen Schichten näherungsweise als 2D-Objekte in den 3D-Simulationen berücksichtigt werden. Mit dieser Option wurde die vorhandene Software erweitert. Die Vorteile sind deutlich schnellere Simulationszeiten und eine vereinfachte Modellierung. Die aufwendige Erstellung eines Volumenmodells der dünnen Schicht entfällt. Stattdessen können der gemeinsamen Fläche des angrenzenden Volumens die entsprechenden Materialeigenschaften der dünnen Schicht zugewiesen werden.

In den untersuchten möglichen Anwendungen wurden die Vor- und Nachteile der Weiterentwicklungen gegeneinander abgewogen. Die Verwendung von Elementen und Ansatzfunktionen höherer Ordnung führte zu genaueren Ergebnissen. Diese sind jedoch immer gegen den höheren Aufwand in der Gittergenerierung und die deutlich längere Simulationszeit abzuwägen. Die Modellierung der dünnen Schichten als 2D-Flächen in den 3D-Simulationen vereinfachte in allen untersuchten Anwendungen die Modellerstellung. Zudem verkürzte sie deutlich die Simulationszeiten. Der Modellierungsfehler durch die Dimensionsreduktion der dünnen Schicht ist hierbei problemabhängig und sollte bei der Interpretation der Ergebnisse z.B. durch eine Fehlerabschätzung berücksichtigt werden. Die Simulationsergebnisse wurden anhand von Messungen validiert.

Die gewonnenen Ergebnisse und Einsichten können für eine Auslegung von Applikationen in der Hoch- und Mittelspannungstechnik mit einer Feldsteuerung durch dünne Schichten aus mikrovaristorgefüllten Elasto-

meren oder Lacken eingesetzt werden. Auch wenn die Arbeit neben den numerischen und simulationstechnischen Fragestellungen auch praktische Probleme berücksichtigt hat, bleiben offene Fragen für weitere Forschungen. In den Simulationsmodellen werden überwiegend makroskopische Effekte berücksichtigt. Oft spielen jedoch gerade mikroskopische Effekte eine wesentliche Rolle im elektrischen Verhalten. Es stellt sich die Frage, was die Begriffe Leitfähigkeit und Permittivität eines Materials bzw. Materialverbunds bedeuten. Dies ist bei linearen Materialien relativ klar, bei nichtlinearen Materialien jedoch weniger klar definiert. Diskussionswürdig ist die Berücksichtigung von komplizierteren nichtlinearen Effekten wie z.B. in den Ersatzschaltbildern in [A50]. Die Untersuchung der Applikationen unter Wechselstrom- und Impulsbelastung stellt keine Einschränkung dar, da sich aus den Erkenntnissen, die aus dieser Arbeit resultieren, auch Hinweise zu Weiterentwicklung bezüglich Anwendungen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) ableiten lassen.

Literatur

- [A1] AiF-Mitgliedsvereinigung (MV) Elektrotechnik. “Mikrovaristoren in polymeren Isoliersystemen - Klärung der Einsatzmöglichkeiten in der elektrischen Energietechnik und Untersuchungen zum Betriebsverhalten”. In: *Antrag N11542/06* (2006).
- [A2] H. Baehr und K. Stephan. *Wärme und Stoffübertragung*. 5. Springer, 2006.
- [A3] O. Belz. “Mikrohohlkugelgefülltes Silikongel als Isolierstoff in der Hochspannungstechnik”. Diss. Universität Kassel, 2011.
- [A4] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller und W. Zaengl. *Hochspannungstechnik. Theoretische und praktische Grundlagen*. Springer Berlin, 1986.
- [A5] A. Blake, G. Clarke und W. Starr. “Improvements in stress control materials”. In: *Transmission and Distribution* (1979), S. 264–270.
- [A6] B. Boettcher, G. Malin und R. Strobl. “Stress control system for composite insulators based on ZnO-technology”. In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES 2* (2001), S. 776–780. DOI: 10.1109/TDC.2001.971336.
- [A7] H. Brandes, T. Hillmer und P. Stebler. “Halbleitende Lacke und Bänder - für die Anwendung nützliche Ergebnisse und Eigenschaften”. In: *ETG Fachbericht: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften*. Stuttgart: VDE VERLAG GmbH, 2008, S. 57–63.
- [A8] R. Brütsch und T. Hillmer. “Corona Protection in Rotating High Voltage Machines”. In: *INDUCTICA 2006 Conference, Berlin*. 2006.
- [A9] C. Buccella, M. Feliziani, F. Maradei und G. Manzi. “Magnetic field computation in a physically large domain with thin metallic shields”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 41.5 (Mai 2005), S. 1708–1711. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2005.846059.

- [A10] P. Castillo, R. Rieben und D. White. “FEMSTER: An object oriented class library of discrete differential forms”. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest* 31.4 (2005), S. 972–975. DOI: 10.1109/APS.2003.1219397.
- [A11] A. H.-D. Cheng und D. T. Cheng. “Heritage and early history of the boundary element method”. In: *Engineering Analysis with Boundary Elements* 29.3 (März 2005), S. 268–302. ISSN: 09557997. DOI: 10.1016/j.enganabound.2004.12.001.
- [A12] T. Christen, L. Donzel und F. Greuter. “Nonlinear Resistive Electric Field Grading Part 1 : Theory and Simulation”. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 26.6 (2010), S. 47–59.
- [A13] P. G. Ciarlet. *The Finite Element Method for Elliptic Problems*. North-Holland, Amsterdam, 1978.
- [A14] D. Cisilino. “Möglichkeiten der Beeinflussung des Überschlagsverhaltens von Verbundlangstäben durch den Einsatz von Silikonkautschuk mit Mikrovaristoren”. Diplomarbeit. TU Dresden, Jan. 2005.
- [A15] M. Clemens, E. Gjonaj, P. Pinder und T. Weiland. “Self-consistent simulations of transient heating effects in electrical devices using the finite integration technique”. In: *Magnetics, IEEE Transactions on* 37.5 (2001), S. 3375–3379. ISSN: 00189464. DOI: 10.1109/20.952617.
- [A16] M. Clemens, M. Wilke, R. Schuhmann und T. Weiland. “Subspace projection extrapolation scheme for transient field simulations”. In: *Magnetics, IEEE Transactions on* 40.2 (März 2004), S. 934–937. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2004.824583.
- [A17] M. Clemens, M. Wilke und T. Weiland. “Extrapolation strategies in numerical schemes for transient magnetic field simulations”. In: *Magnetics, IEEE Transactions on* 39.3 (Mai 2003), S. 1171–1174. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2003.810523.
- [A18] M. Clemens. “Large systems of equations in a discrete electromagnetism: formulations and numerical algorithms”. In: *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings-* 152.2 (2005), S. 50–72. ISSN: 1350-2344. DOI: 10.1049/ip-smt.

- [A19] M. Clemens, E. Gjonaj, P. Pinder und T. Weiland. “Numerical simulation of coupled transient thermal and electromagnetic fields with the finite integration method”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 36.4 (Juli 2000), S. 1448–1452. ISSN: 00189464. DOI: 10.1109/20.877711.
- [A20] M. Clemens, W. Koch, M. Wilke und T. Weiland. “Adaptive Zeitbereichsverfahren für die Simulation quasistationärer elektromagnetischer Felder mit der Methode der Finiten Integration”. In: *ASIM - Symposium Simulationstechnik <16, 2002, Rostock>: Tagungsband, 10.-13. September 2002*. 2002, S. 433–438.
- [A21] M. Clemens, T. Steinmetz, D. Weida und V. Hinrichsen. “Coupled Thermal-Electroquasistatic 3D Field Simulation of High-Voltage Surge Arrester Structures”. In: *6th International Conference on Computational Electromagnetics*. 2006, S. 1–2.
- [A22] M. Clemens, T. Weiland und U. van Rienen. “Comparison of Krylov-type methods for complex linear systems applied to high-voltage problems”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 34.5 (2002), S. 3335–3338. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/20.717784.
- [A23] M. Clemens, M. Wilke und G. Benderskaya. “Transient electro-quasistatic adaptive simulation schemes”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 40.2 (März 2004), S. 1294–1297. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2004.824582.
- [A24] D. Conley und N Frost. “Fundamentals of semi-conductive systems for high voltage stress grading”. In: *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings*. IEEE, 2005, S. 89–92.
- [A25] *DIN EN 60060-1; VDE 0432-1:2011-10:2011-10 Titel (deutsch): Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen (IEC 60060-1:2010); Deutsche Fassung EN 60060-1:2010*.
- [A26] DIN VDE 0432-1 19. *Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 1: Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen*. 1991.
- [A27] Dassault Systemes. *Abaqus 6.11*. 2011.
- [A28] J. O. Debus und V. Hinrichsen. “Eigenschaften von mikrovaristorgefüllten Polymeren für Isoliersysteme in der elektrischen Energietechnik”. In: *RCC Fachtagung 2009: Werkstoffe*. Mai 2009.

- [A29] J. O. Debus und V. Hinrichsen. “Untersuchung des Verhaltens von mikrovaristorgefülltem Silikon unter mechanischer Beanspruchung”. In: *2. Burghauser Isolierstoff Kolloquium*. Juni 2009.
- [A30] J. O. Debus, V. Hinrichsen, J. M. Seifert und M. Hagemester. “Investigation of composite insulators with microvaristor filled silicone rubber components”. In: *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2010)*. Potsdam, 2010, S. 1–4.
- [A31] G. Dhatt und G. Touzot. *The Finite Element Method Displayed*. John Wiley & Sons, 1984.
- [A32] H. K. Dirks. “Quasi-stationary fields for microelectronic applications”. In: *Electrical Engineering* 79.2 (Apr. 1996), S. 145–155. ISSN: 0003-9039. DOI: 10.1007/BF01232924.
- [A33] H. Doepken. “Calculated heat transfer characteristics of air and SF6”. In: *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* 8 (1970), S. 1979–1985.
- [A34] L. Donzel. *Private Communication*. 2010.
- [A35] L. Donzel, T. Christen, R. Kessler, F. Greuter und H. Gramespacher. “Silicone composites for HV applications based on microvaristors”. In: *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2004)*. Toulouse, 2004, S. 403–406.
- [A36] L. Donzel, F. Greuter und T. Christen. “Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications”. In: *Electrical Insulation Magazine, IEEE* 27.2 (2011), S. 18–29.
- [A37] L. Egiziano, V. Tucci, C. Petrarca und M. Vitelli. “A Galerkin model to study the field distribution in electrical components employing nonlinear stress grading materials”. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 6.6 (1999), S. 765–773. ISSN: 10709878. DOI: 10.1109/94.822012.
- [A38] A. Eigner und S. Semino. “Feldsteuertechnologien bei Kabelgarnituren - Überblick und Stand der Technik”. In: *ew dossier - Kabeltechnik* 107.15 (2008), S. 56–58.
- [A39] R. Einzinger. “Metal oxide varistors”. In: *Annual Review of Materials Science* 17.1 (Aug. 1987), S. 299–321. ISSN: 0084-6600. DOI: 10.1146/annurev.ms.17.080187.001503.

- [A40] A Entekin. *Accuracy of MSC/Nastran first and second-order tetrahedral elements in solid modeling for stress analysis*. Techn. Ber. 1999.
- [A41] M. Gee, C. Siefert, J. Hu, R. Tuminaro und M. Sala. “{ML} 5.0 Smoothed Aggregation User’s Guide”. In: *Sandia National Laboratories SAND2006-2649* (2006).
- [A42] H. Gramespacher, F. Greuter und M. Hagemeister. *Hüllkörper für ein Hochspannungskabel und Kabelelement, welches mit einem solchen Hüllkörper versehen ist, Europäisches Patentamt H02G 15/068, ABB Schweiz AG*. 2003.
- [A43] H. Gramespacher, J Svahn, F. Greuter und T. Christen. “Microvaristor based field grading elements for HV terminations”. In: *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*. Delft, 2003, S. 1–4.
- [A44] C. Greffe, F. Gillet und J. Warnant. “Contribution to the electrical characterisation of potential grading varnishes”. In: *Journal of Electrostatics* 48.3-4 (März 2000), S. 231–243. ISSN: 03043886. DOI: 10.1016/S0304-3886(99)00071-6.
- [A45] F. Greuter, Y. Dirix, P. Kluge-Weiss, W. Schmidt und R. Kessler. “Polymer compound with nonlinear current-voltage characteristic and process for producing a polymer compound”. In: *US Patent 7,320,762* (2008).
- [A46] F. Greuter, M. Siegrist, P. Kluge-Weiss, R. Kessler, L. Donzel, R. Loitzl und H. Gramespacher. “Microvaristors: Functional Fillers for Novel Electroceramic Composites”. In: *Journal of Electroceramics* 13.1-3 (Juli 2004), S. 739–744. ISSN: 1385-3449. DOI: 10.1007/s10832-004-5185-9.
- [A47] S. Gubanski. “Modern outdoor insulation-concerns and challenges”. In: *Electrical Insulation Magazine, IEEE* 21.6 (Nov. 2005), S. 5–11. ISSN: 0883-7554. DOI: 10.1109/MEI.2005.1541483.
- [A48] T. K. Gupta und H. E. Pietsch. “Method of producing homogeneous ZnO non-linear powder compositions”. In: *US Patent 4,297,250* (Dez. 1981). ISSN: 0073-5655.
- [A49] HS-Labor (ETS) Von Roll Schweiz AG. “TE und Spannungsverteilung mit 8001”. In: *Protokoll-Nr.: 07-0105-B* (2007), S. 1–8.

- [A50] A Haddad, J. Fuentes-Rosado, D. German und R. Waters. “Characterisation of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages”. In: *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, IEE Proceedings A* 137.5 (1990), S. 269–279. ISSN: 0960-7641.
- [A51] J. Hallier. “Elektro-quasistatische Feldsimulationen von Konstruktionen der Hochspannungstechnik unter Berücksichtigung dünner leitfähiger Fremdschichten”. Studienarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 2006.
- [A52] N Hayashi, K Kawahara, M Sumikura und H. Masanori. “Electric field control by permittivity functionally graded materials and their lightning impulse withstand voltages for surface breakdown”. In: *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* 104.22 (Juni 2002), S. 260–263. ISSN: 1079-7114.
- [A53] V. Henson und U. Yang. “BoomerAMG: A parallel algebraic multigrid solver and preconditioner”. In: *Applied Numerical Mathematics* 41.1 (2002), S. 155–177. DOI: 10.1016/S0168-9274(01)00115-5.
- [A54] G. Hilgarth. *Hochspannungstechnik*. 3. Auflage. Teubner, 1997.
- [A55] M. Hoidis, F. Greuter, L. Donzel und R. Kessler. “Microvaristor Based Over-voltage Protection”. In: *US Patent Application 0045907 A1* (2009).
- [A56] IEC 62217. *Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage >1000 V - General definitions, test methods and acceptance criteria*. 2005.
- [A57] INRIA-Rocquencourt Gamma project. *GHS3D tetrahedral mesher*. 2001.
- [A58] J. Jin. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. 2. Wiley-IEEE Press, 2002.
- [A59] M. Jung und U. Langer. “Finite-Elemente-Methode. Eine Einführung für Ingenieurstudenten”. In: *Vorlesungsskript Technische Universität Chemnitz* (1995).
- [A60] S. Karp. “The effect of discontinuities of dielectric constant on electrostatic fields near conductors”. In: *Inst. Math. Sci. Dec* 9.December (1954).
- [A61] M. Kaufhold, K. Schäfer, K. Bauer, A. Bethge und J. Risse. “Interface phenomena in stator winding insulation - challenges in design, diagnosis, and service experience”. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 18.2 (März 2002), S. 27–36. ISSN: 0883-7554. DOI: 10.1109/57.995396.

- [A62] M. Kaufhold, J. R. Weidner und F. Kielmann. “Nutzung nichtlinearer dielektrischer Werkstoffeigenschaften in Isoliersystemen rotierender elektrischer Maschinen”. In: *ETG Fachbericht: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften*. Stuttgart: VDE VERLAG GmbH, 2008, S. 86–95.
- [A63] A. Kelen. “On the theory of non-linear field-grading coatings”. In: *Elteknik H.6* (1967), S. 109–112.
- [A64] A. Kelen und L.-G. Virsberg. “Discharge suppression on surfaces of high-voltage insulation”. In: *Elteknik H.4* (1967), S. 59–65.
- [A65] C. Kelley. “Iterative methods for linear and nonlinear equations”. In: *Society for Industrial and Applied Mathematics SIAM* (1995).
- [A66] S. Kempen, F. Pohlmann und K. Pinkert. “Comparison of low-interaction methods of measurement for determining the distribution of the surface potential on end corona protection configurations”. In: *11th Insucon Conference, Birmingham, UK* (2009), S. 171–176.
- [A67] D. Kind. “Die Aufbaufläche bei Stoßbeanspruchung technischer Elektrodenanordnungen in Luft”. In: *Ph.D. Dissertation TU München* (1957).
- [A68] P. Kluge-Weiss, F. Greuter und R. Strümpfer. “Non-linear resistance with varistor behavior and method for the production thereof”. In: *US Patent 6,469,611* (2002).
- [A69] P. Koch. “Messung des Potentialverlaufs an Wicklungsstabmodellen mit mikrovaristorgefüllter Feldsteuerung”. Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Aug. 2010.
- [A70] A. Küchler. *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. dritte. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-78412-8. DOI: 10.1007/978-3-540-78413-5.
- [A71] N. Kurda. *Private Communication*. 2011.
- [A72] J. Lang. *Adaptive multilevel solution of nonlinear parabolic PDE systems: theory, algorithm, and applications*. Bd. 20. September. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, 1999.
- [A73] H. Langtangen. *Python scripting for computational science*. Springer Verlag, 2004. ISBN: 3540435085.

- [A74] J. Meixner. “The behavior of electromagnetic fields at edges”. In: *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 20.4 (Juli 1972), S. 442–446. ISSN: 0096-1973. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140243.
- [A75] E. Merrel. “Semiconducting shielding for A-C power cable”. In: *AIEE Trans.* 65 (1946), S. 605–608.
- [A76] R. Olsen. “Integral equations for electrostatics problems with thin dielectric or conducting layers”. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* EI-21.4 (1986), S. 565–573. ISSN: 0018-9367.
- [A77] M. Paredes-Olguín, F. P. Espino-Cortés und C. Gómez-Yáñez. “Uso de Materiales Compuestos de Alta Permitividad para la Atenuación del Campo Eléctrico en Aisladores Poliméricos”. In: *Congreso Internacional en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico (ALTAE 2009)*. Medellín, Colombia, 2009.
- [A78] P. Pinder. “Zur numerischen Berechnung gekoppelter elektromagnetischer und thermischer Felder”. Diss. TU Darmstadt, 1998.
- [A79] H. Raether. “Über den Aufbau von Gasentladungen. I”. In: *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei* 117.5 (1941), S. 375–398. ISSN: 0939-7922.
- [A80] U. van Rienen, M. Clemens und T. Weiland. “Simulation of low-frequency fields on high-voltage insulators with light contaminations”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 32.3 (Mai 1996), S. 816–819. ISSN: 00189464. DOI: 10.1109/20.497366.
- [A81] J. P. Rivenc und T. Lebey. “An overview of electrical properties for stress grading optimization”. In: *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* 6.3 (Juni 2002), S. 309–318. ISSN: 10709878. DOI: 10.1109/94.775616.
- [A82] A Roberts. “Stress grading for high voltage motor and generator coils”. In: *Electrical Insulation Magazine, IEEE* (1995).
- [A83] P. Roll. “Adaptiv relaxierte Verfahren zur Simulation nichtlinearer elektrothermisch gekoppelter Finite-Elemente-Modelle mit Anwendungen in der Hochspannungstechnik”. Diplomarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 2007.
- [A84] Sandia National Laboratories. *Cubit 12.1 User Documentation*. 2010.
- [A85] H. Singer, H. Steinbigler und P. Weiss. “A charge simulation method for the calculation of high voltage fields”. In: *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* 5 (1974), S. 1660–1668.

- [A86] Spatial Corporation. *ACIS*. 2009.
- [A87] T. Steinmetz, G. Wimmer und M. Clemens. “Numerical simulation of transient electro-quasistatic fields using advanced subspace projection techniques”. In: *Advances in Radio Science-Kleinheubacher Berichte* 4 (Sep. 2006), S. 49–53. ISSN: 1684-9973. DOI: 10.5194/ars-4-49-2006.
- [A88] T. Steinmetz, N. Gödel, G. Wimmer, M. Clemens, S. Kurz und M. Bebendorf. “Efficient Symmetric FEM-BEM Coupled Simulations of Electro-Quasistatic Fields”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 44.6 (Juni 2008), S. 1346–1349. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2008.915785.
- [A89] T. Steinmetz, N. Gödel, G. Wimmer, M. Clemens, S. Kurz, M. Bebendorf und S. Rjasanow. “Symmetric Coupling of the Finite-Element and the Boundary-Element Method for Electro-Quasistatic Field Simulations”. In: *Scientific Computing in Electrical Engineering (SCEE 2006)* 11 (2007), S. 309–315.
- [A90] T. Steinmetz, M. Helias, G. Wimmer, L. Fichte und M. Clemens. “Electro-quasistatic field simulations based on a discrete electromagnetism formulation”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 42.4 (Apr. 2006), S. 755–758. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2006.872488.
- [A91] T. Steinmetz, S. Kurz und M. Clemens. “Domains of Validity of Quasistatic and Quasistationary Field Approximations”. In: *VXV International Symposium on Theoretical Engineering (ITG-FB 217)*. 2009, S. 271–275.
- [A92] T. Steinmetz, G. Wimmer und M. Clemens. “Acceleration of Linear-Implicit Time Integration Schemes Using Subspace Projection Techniques for Electro-Quasistatic Field Simulations”. In: *Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conference on*. IEEE, 2006, S. 18. ISBN: 1424403200. DOI: 10.1109/CEFC-06.2006.1632810.
- [A93] J. Stolz, B. Gutheil und P. Weiß. “Microvaristor filled silicone elastomeres - advantages and restraints of principal adaptability”. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*. Johannesburg, 2009.
- [A94] J. Stolz. “Untersuchung der Einsatzbereiche und Einsatzmöglichkeiten mikrovaristorgefüllter Siliconelastomere im Bereich des Überspannungsschutzes für Niederspannungsanwendungen”. Dissertation. Lehrstuhl für Hochspannungs-

- technik und Elektromagnetische Verträglichkeit, TU Kaiserslautern, 2009. ISBN: 3941438115.
- [A95] R. Strobl, W. Haverkamp, G. Malin und F. Fitzgerald. “Evolution of stress control systems in medium voltage cable accessories”. In: *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)* 2 (2001), S. 843–848. DOI: 10.1109/TDC.2001.971348.
- [A96] R. Strobl, W. Haverkamp, G. Malin und F. Fitzgerald. “Medium voltage terminations using an advanced stress control technology”. In: *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)* (2001), S. 771–775. DOI: 10.1109/TDC.2001.971335.
- [A97] K. Tavernier, B. R. Varlow, D. Auckland und M. Ugur. “Improvement in electrical insulators by nonlinear fillers”. In: *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology* 146.2 (1999), S. 88. ISSN: 13502344. DOI: 10.1049/ip-smt:19990028.
- [A98] N. Taylor. “Diagnostics of stator insulation by dielectric response and variable frequency partial discharge measurements”. In: *licentiate thesis, KTH, Stockholm* (2006).
- [A99] N. Taylor. “Material properties of SiC stress-grading material”. In: (2008), S. 1–28.
- [A100] M. Tenzer, J. O. Debus und V. Hinrichsen. “Mikrovaristorgefüllte Isoliersysteme bei Gleichspannungsbeanspruchung”. In: *ETG-Fachbericht Isoliersysteme bei Gleich- und Mischfeldbeanspruchung*. Köln: VDE VERLAG GmbH, Sep. 2010.
- [A101] The Python Software Foundation, PO Box 37 Wolfeboro Falls, NH 03896-0037 USA. *Python*. 1990.
- [A102] D. Thiel. “Evaluation der grundlegenden Eigenschaften von mikrovaristorgefülltem Silikon in Verbundlangstabisolatoren”. Studienarbeit. Technische Universität Darmstadt, Juli 2010.
- [A103] D. Thiel. “Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von mikrovaristorgefüllten Silikonen in Verbundlangstabisolatoren”. Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Jan. 2010.

- [A104] J Thienpont und T. Sie. “Suppression of surface discharges in the stator windings of high voltage machines”. In: *CIGRE Paper* (1964).
- [A105] P. Tirkas und K. Demarest. “Modeling of thin dielectric structures using the finite-difference time-domain technique”. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 39.9 (1991), S. 1338–1344. ISSN: 0018926X. DOI: 10.1109/8.99042.
- [A106] L. Trim. “Principles of accessory design [for power cables]”. In: *IEE Colloquium on Ensuring the Reliability of 11-132 kV Cable Accessories (Digest No. 1998/191)* (1998), S. 2/1–2/4.
- [A107] B. Varlow, J Robertson und K. Donnelly. “Nonlinear fillers in electrical insulating materials”. In: *Science, Measurement & Technology, IET* 1.2 (2007), S. 96–102. ISSN: 1751-8822. DOI: 10.1049/iet-smt.
- [A108] L.-G. Virsberg und P. Ware. “A New Termination for Underground Distribution”. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-86.9 (Sep. 1967), S. 1129–1135. ISSN: 0018-9510. DOI: 10.1109/TPAS.1967.291798.
- [A109] VonRoll. “anti corona - CoronaShield P 8001”. In: *Datenblatt* (2010).
- [A110] Wacker Chemie Deutschland. *Datenblatt SLM 79049 zum Mikrovaristorgefüllten Feldsteuermaterial*.
- [A111] “Wärmeübertragung an einzelnen längsumströmten Zylindern, Drähten und Fäden”. In: *VDI-Wärmeatlas*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 581–585. ISBN: 978-3-540-32218-4.
- [A112] D. Weida. “Elektro-thermisch gekoppelte transiente Finite - Elemente - Simulationen unter Berücksichtigung von Konvektions- und Abstrahlrandbedingungen”. Studienarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Okt. 2005.
- [A113] T. Weiland. “Time Domain Electromagnetic Field Computation With Finite Difference Methods”. In: *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields* 9.4 (Juli 1996), S. 295–319. ISSN: 0894-3370. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1204(199607)9:4<295::AID-JNM240>3.0.CO;2-8.
- [A114] G. Wimmer, T. Steinmetz und M. Clemens. “Reuse, Recycle, Reduce (3R) - strategies for the calculation of transient magnetic fields”. In: *Applied Numerical Mathematics* 59.3-4 (März 2009), S. 830–844. ISSN: 01689274. DOI: 10.1016/j.apnum.2008.03.015.

- [A115] G. Wimmer, T. Steinmetz und M. Clemens. “Space-Time Adaptive Methods for the Simulation of Magnetic Fields”. In: *Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conference on*. IEEE, 2006, S. 374. ISBN: 1424403200. DOI: 10.1109/CEFC-06.2006.1633164.
- [A116] O. Zienkiewicz, R. Taylor und J. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Sixth Edit. Elsevier, 2005.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit entstandene Publikationen

- [B1] J. M. Seifert, V. Hinrichsen, J. O. Debus, M. Clemens, D. Weida und M. Hagemeister. “Einsatz von Feldsteuermaterialien in Hochspannungsisolatoren - Potentiale und Risiken”. In: *ETG Fachbericht: Werkstoffe mit nichtlinearen dielektrischen Eigenschaften*. Stuttgart: VDE VERLAG GmbH, 2008, S. 75–85.
- [B2] D. Stefanini, J. Seifert, M. Clemens und D. Weida. “Three Dimensional FEM Electrical Field Calculations for EHV Composite Insulator Strings”. In: *IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference (IPMHVC 2010) 23.-27.05.2010, Atlanta, USA*. 2010, S. 238–242. DOI: 10.1109/IPMHVC.2010.5958337.
- [B3] T. Steinmetz, D. Weida und M. Clemens. “Numerische Simulation elektroquasistatischer Hochspannungsfelder mit MEQSICO”. In: *Forschungsmagazin der Helmut-Schmidt-Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg* (2007), S. 8–15.
- [B4] D. Weida, S. Böhmelt und M. Clemens. “Design of ZnO microvaristor end corona protection for electrical machines”. In: *Conference Record of the 18th IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 2010)*. San Diego, 2010.
- [B5] D. Weida, J. Nevoigt, M. Clemens, D. Stefanini und J. M. Seifert. “Effects of Microvaristor Material on the Occurrence of Partial Discharges upon Insulators in Rain Test”. In: *IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference (IPMHVC 2010) 23.-27.05.2010, Atlanta, USA*. Atlanta, 2010, S. 497–500. DOI: 10.1109/IPMHVC.2010.5958403.

5.0. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit entstandene Publikationen

- [B6] D. Weida, C. Richter und M. Clemens. “Design of Cable Accessories Using ZnO Microvaristor Material Based on FEM Simulations”. In: *IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference (IPMHVC 2010) 23.-27.05.2010, Atlanta, USA*. Atlanta, 2010, S. 94–97. DOI: 10.1109/IPMHVC.2010.5958303.
- [B7] D. Weida, C. Richter und M. Clemens. “Design of ZnO Microvaristor Material Stress-Cone for Cable Accessories”. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 18.4 (2011), S. 1262–1267.
- [B8] D. Weida, T. Steinmetz und M. Clemens. “Electro-Quasistatic High Voltage Field Simulations of Large Scale Insulator Structures Including 2-D Models for Nonlinear Field-Grading Material Layers”. In: *IEEE Transactions on Magnetics* 45.3 (März 2009), S. 980–983. ISSN: 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2012492.
- [B9] D. Weida, T. Steinmetz und M. Clemens. “Electro-Quasistatic High-Voltage Field Simulations of Insulator Structures Covered with Thin Resistive Pollution or Nonlinear Grading Material”. In: *IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference (IPMHC 2008)*. Las Vegas, 2008, S. 580–583. ISBN: 978-1-4244-1534-2. DOI: 10.1109/IPMC.2008.4743725.
- [B10] D. Weida, T. Steinmetz und M. Clemens. “Improved accuracy of electro-quasistatic simulations of large-scale 3D high voltage insulators with nonlinear material layers”. In: *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 30.3 (2011), S. 1112–1120. DOI: 10.1108/033216411111111031.
- [B11] D. Weida, T. Steinmetz und M. Clemens. “Simulation des elektrischen Verhaltens von polymeren Isoliersystemen mit Mikrovaristoren”. In: *RCC Fachtagung 2009: Werkstoffe*. Berlin, Mai 2009, S. 75–80.
- [B12] D. Weida, T. Steinmetz, M. Clemens, J. M. Seifert und V. Hinrichsen. “Electro-Quasistatic High-Voltage Field Simulation of Large Scale 3D Insulator Structures Including 2D Models for Conductive Pollution Layers”. In: *Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetics* (2008), S. 431–437.
- [B13] D. Weida, T. Steinmetz, M. Clemens, D. Stefanini und J. M. Seifert. “Benefits of higher order elements for electrostatic simulations of large-scale 3D insulator structures”. In: *29th IEEE Electrical Insulation Conference (EIC 2009)*. Montréal, 2009, S. 558–561.

Betreute studentische Arbeiten

- [C1] T. Bachran. “Lösung komplexwertiger linearer Gleichungssysteme für FEM-Simulationen elektroquasistatischer Felder im Frequenzbereich”. Diplomarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Apr. 2008.
- [C2] T. Bachran. “Visualisierung von Simulationsergebnissen unter MEQSICO mit Hilfe von COVISE”. Studienarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Dez. 2007.
- [C3] S. Böhmelt. “Berechnung des elektrischen Stromes und Flusses in nichtlinearen elektroquasistatischen Finite-Elemente-Simulationen”. Studienarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Sep. 2009.
- [C4] S. Böhmelt. “Thermodynamische Finite-Elemente-Simulationen von Hochspannungsapplikationen unter Berücksichtigung von Konvektion und Wärmestrahlung”. Diplomarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Apr. 2010.
- [C5] N. Günther. “Simulation von Überspannungsableitern und Optimierung ihrer Streufeldcharakteristik - Simulation Of Highvoltage Surge Arrestors and Optimization Of Their Stray Field Characteristics”. Bachelorarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 2011.
- [C6] J. Nevoigt. “Einsatz von Mikrovaristormaterial zur Reduktion von Teilentladungen auf Verbundisolatoren im Regentest”. Bachelorarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Jan. 2010.
- [C7] C. Richter. “Dimensionierung eines Hochspannungskabelendverschlusses mit Mikrovaristormaterial”. Bachelor-Arbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Jan. 2010.
- [C8] C. Richter. “Dimensionierung eines Mittelspannungskabelendverschlusses mit Mikrovaristormaterial bei Belastung durch Blitzstoßspannung”. Studienarbeit. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 2010.

A. Anhang

A.1. Simulation mit MEQSICO

Das Softwarepaket MEQSICO wird im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt und für alle durchgeführten Simulationen verwendet. Das elektro-quasistatische bzw. thermo-dynamische Anfangswertproblem wird mithilfe der Methode der finiten Elemente in ein Gleichungssystem überführt, siehe Gl. (2.5) und Gl. (2.7). Die Lösung der Anfangswertprobleme verringert sich auf das Problem einer Zeitintegration der steifen Systeme gewöhnlicher partieller Differentialgleichungen. Es werden dazu einfach-diagonale implizite Runge-Kutta-Verfahren verwendet (SDIRK - Singly diagonal implicit Runge-Kutta), siehe z.B. [A72]. Mit diesem absolut stabilen, s-stufigen Einschritt-Verfahren werden eine Lösungsapproximation $x_{(p)}(t_{n+1})$ und eine weitere, eingebettete Approximation $x_{(\hat{p})}(t_{n+1})$ mit der Ordnung $\hat{p} < p$ ermittelt. Aus deren Abweichungen wird ein Fehlerkriterium berechnet. Dieses hängt von der gewählten Zeitschrittweite ab. Beim Überschreiten einer benutzerdefinierten Toleranzschranke wird der Zeitschritt verworfen. Die Größe des nächsten zu wählenden Zeitschrittes wird aus dem Kriterium berechnet, [A23], [A20], [A72], [A90].

In den untersuchten Anwendungen befinden sich Materialien mit feldstärkeabhängigen elektrischen Leitfähigkeiten. Die aus der Zeitdiskretisierung resultierenden nichtlinearen algebraischen Gleichungssysteme werden mit Quasi-Newton-Rapson-Verfahren iterativ gelöst. Das nicht-

lineare elektrische Verhalten der untersuchten mikrovaristorgefüllten Silikonelastomere und Lacke ist sehr stark ausgeprägt. Es sind geeignet konstruierte Relaxationsverfahren erforderlich, um diese Strom-Spannungs-Charakteristiken zu berücksichtigen ohne dabei an Robustheit zu verlieren, [A65], [A83].

Die linearisierten algebraischen Gleichungssysteme sind positiv semi-definit und symmetrisch. Sie werden mithilfe eines vorkonditionierten konjugierten Gradientenverfahrens (PCG - preconditioned conjugate gradient methods) gelöst. Für die Vorkonditionierung werden Mehrgitterverfahren mit beinahe optimaler asymptotische Komplexität verwendet. Dazu werden externe Bibliotheken in die MEQSICO-Software eingebunden, siehe [A41] und [A53].

In den iterativen Verfahren unterscheiden sich die wiederholt zu lösenden linearen Gleichungssysteme mitunter nur marginal. Mithilfe von effizient gewählten Startwerten und Multiple-Rechte-Seite-Verfahren verkürzen sich die Simulationszeiten beachtlich, siehe z.B. [A17], [A16], [A87].

A.2. Konvergenzstudie aus Kapitel 3.1

A.2.1. Analytische Lösungen der Konvergenzstudie

Die analytische Lösung des definierten Randwertproblems hängt bei konstanten Materialparametern nur von radialen Abstand ϱ ab,

$$\varphi_{\text{ANA}}(\varrho) = 1\,000\text{ V} - 500\text{ V} \cdot \log\left(\frac{\varrho}{0.1\text{ m}}\right).$$

Das verwendete feldstärkeabhängig resistive Material hat eine ähnliche Charakteristik wie das realistische ZnO Mikrovaristormaterial in Abbildung 2.6 und 2.8:

$$\kappa(\text{grad } \varphi) = \kappa_0 \cdot |\text{grad } \varphi|^2 .$$

Die partielle Differentialgleichung (2.2) in ihrer reduzierten Form kann unter der Verwendung dieser Materialcharakteristik in eine gewöhnliche Differentialgleichung vereinfacht werden,

$$\left(\frac{d\varphi}{d\varrho}\right)^2 \cdot \left(3\frac{d^2\varphi}{d\varrho^2} + \frac{1}{\varrho}\frac{d\varphi}{d\varrho}\right) = 0 ,$$

welche nur noch vom radialen Abstand ϱ abhängt. Setzt man die vorgegebenen Randwerte ein, erhält man die analytische Lösung für die Zylinderkonvergenzstudie mit nichtlinearen Materialeigenschaften,

$$\varphi_{\text{ANA}}(\varrho) \approx 1\,137.3\text{ V} - 637.3\text{ V} \cdot \left(\frac{\varrho}{1\text{ m}}\right)^{2/3} .$$

A.2.2. Bewertung des Konvergenzverhaltens

Um eine Aussage über die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der verschiedenen räumlichen Diskretisierungen machen zu können, wird der relative Fehler zur analytischen Lösung betrachtet,

$$\Delta_{\text{SIM}} = \frac{\|\varphi_{\text{SIM}} - \varphi_{\text{ANA}}\|}{\|\varphi_{\text{ANA}}\|} . \quad (\text{A.1})$$

Hierbei bezeichnet $\|\varphi\|$ die euklidische Norm der numerischen Auswertung der Funktion u an den Punkten x_i ,

$$\|\varphi\| = \sqrt{\sum_i \varphi(x_i)^2} .$$

A. Anhang

Diese Punkte x_i bilden die Auswertungslinie. Wesentlich ist hierbei, dass die Punkte x_i nicht mit den Knoten der Elemente übereinstimmen. Das Konvergenzverhalten kann a priori bestimmt werden [A59, S.229]:

$$\|\varphi_{\text{SIM}} - \varphi_{\text{ANA}}\| \leq c(\varphi_{\text{ANA}}) \cdot h^\alpha. \quad (\text{A.2})$$

Hierbei bezeichnet α die Fehlerordnung, h die Feinheit der Diskretisierung und c eine Konstante, die von der Aufgabenstellung und somit von der analytischen Lösung φ_{ANA} abhängig ist.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Toeplersche Gleitanordnung	5
2.2. Aufnahme von losen ZnO-Mikrovaristoren	7
2.3. Oberfläche und Korngrenzen eines ZnO-Partikels	8
2.4. Ersatzschaltbild eines Mikrovaristorpartikels	9
2.5. Mikrovaristormaterial in Lacken	11
2.6. Leitfähigkeit eines Mikrovaristorlacks	12
2.7. Relative Permittivität eines Mikrovaristorlacks	12
2.8. Leitfähigkeit von Mikrovaristorsilikon	14
2.9. Transienter Spannungsverlauf der Simulation	27
2.10. Automatisierter Simulationszyklus	29
2.11. Konfiguration automatisierter Parameterstudien	30
3.1. Lineares und quadratisches tetrahedrales Element	32
3.2. CAD-Modell der Konvergenzstudie	34
3.3. Vernetzung des Zylinderkondensators	35
3.4. Linearer Zylinderbenchmark: Fehler gegen nDoFs	36
3.5. Nichtlinearer Zylinderbenchmark: Fehler gegen nDoFs	36
3.6. Linearer Zylinderbenchmark: Fehler gegen Zeit	37
3.7. Nichtlinearer Zylinderbenchmark: Fehler gegen Zeit	37
3.8. Linearer Zylinderbenchmark: Fehler gegen Speicher	38
3.9. Nichtlinearer Zylinderbenchmark: Fehler gegen Speicher	38
3.10. Berücksichtigung von dünnen Volumen als 2D-Schicht	42

3.11. Abbildung der Schicht auf das Referenzdreieck	44
3.12. Geometrie- und Meshbeispiel dünne Schichten	46
3.13. Simulationszeiten der dünnen Schichten	50
3.14. Speicherbedarf der dünnen Schichten	50
3.15. Simulationsergebnisse Beispiel dünne Schichten E_{\tan} 1 . .	51
3.16. Simulationsergebnisse Beispiel dünne Schichten E_{\tan} 2 . .	51
3.17. Simulationsergebnisse Beispiel dünne Schichten E_{norm} 1 .	52
3.18. Simulationsergebnisse Beispiel dünne Schichten E_{norm} 2 .	52
3.19. Simulationsergebnisse Referenz dünne Schichten E_{\tan} 1 .	53
3.20. Simulationsergebnisse Referenz dünne Schichten E_{\tan} 2 .	53
3.21. Simulationsergebnisse Referenz dünne Schichten E_{norm} 1	54
3.22. Simulationsergebnisse Referenz dünne Schichten E_{norm} 2	54
3.23. Eigenes Konvergenzverhalten der dünnen Schichten . . .	55
3.24. Vergleichendes Konvergenzverhalten der dünnen Schichten	55
4.1. Schnittbild Langstabisolator im Regentest	59
4.2. Ersatzschaltbild des Langstabisolators	60
4.3. Messaufbau der Isolatoren in der Hochspannungshalle . .	61
4.4. Simulationsmodell des Langstabisolators	62
4.5. Modellierung der Wasserschichten auf den Isolatoren . .	65
4.6. Konventioneller Langstabisolator im Regentest 1a	66
4.7. Konventioneller Langstabisolator im Regentest 1b	66
4.8. Konventioneller Langstabisolator im Regentest 2a	67
4.9. Konventioneller Langstabisolator im Regentest 2b	67
4.10. Mikrovaristormaterial im Stab im Regentest 2a	68
4.11. Mikrovaristormaterial im Stab im Regentest 2b	68
4.12. Im Stab und unter den Schirmen im Regentest 2a	69
4.13. Im Stab und unter den Schirmen im Regentest 2b	69
4.14. Fotos der Isolatoren im Regentest	70

4.15. Endenglimmschutz für elektrische Maschinen	72
4.16. Geometrie des Modell-Stabes des Endenglimmschutz . . .	73
4.17. Messaufbau für die Bestimmung der Leitfähigkeit	74
4.18. Schichtleitfähigkeit der verwendeten Lacke	76
4.19. Geometrie des Endenglimmschutzes	77
4.20. Vernetzung der Modells des Endenglimmschutzes	77
4.21. Elektrisches Potential des Endenglimmschutzes	79
4.22. Elektrisches Feld des Endenglimmschutzes 1	80
4.23. Elektrisches Feld des Endenglimmschutzes 2	80
4.24. Elektrisches Feld des Endenglimmschutzes 3	81
4.25. Elektrisches Feld des Endenglimmschutzes 4	81
4.26. Ohmsche Verluste des Endenglimmschutzes 1	82
4.27. Ohmsche Verluste des Endenglimmschutz 2	82
4.28. Temperaturverhalten des Endenglimmschutzes	84
4.29. Temperatur des Endenglimmschutzes mit SiC	85
4.30. Temperatur des Endenglimmschutzes mit ZnO	85
4.31. Ersatzschaltbild einer Kabelgarnitur	88
4.32. Kabelendverschluss in einem Schaltschrank	89
4.33. Untersuchte Kabelgarnitur	91
4.34. Schnittbild der aufgezogenen Kabelgarnitur	92
4.35. Geometrie des Kabelendverschlusses	92
4.36. Äquipotentiallinien des Kabelendverschlusses $l_e=10$ mm .	96
4.37. Äquipotentiallinien des Kabelendverschlusses $l_e=50$ mm .	96
4.38. Tangentiales Feld 3D+3D erste Ordnung	97
4.39. Tangentiales Feld 2D+3D zweiter Ordnung	97
4.40. Normales Feld 3D+3D erste Ordnung	98
4.41. Normales Feld 2D+3D zweiter Ordnung	98
4.42. Tangentiales Feld 3D+3D zweiter Ordnung	99

4.43. Normales Feld 3D+3D zweiter Ordnung	99
4.44. Maximales Feld 2D+3D zweiter Ordnung	100
4.45. Maximales Feld 3D+3D zweiter Ordnung	100
4.46. Verlustleistung 2D+3D zweiter Ordnung	101
4.47. Verlustleistung 3D+3D zweiter Ordnung	101
4.48. Simulation erster Ordnung bei Impulsbeanspruchung . .	105
4.49. Simulation zweiter Ordnung bei Impulsbeanspruchung . .	105
4.50. Überfeldstärke konventionelle Kabelgarnitur 2D+3D . . .	106
4.51. Überfeldstärke ZnO Kabelgarnitur 2D	106
4.52. Überfeldstärke konventionelle Kabelgarnitur 3D+3D . . .	107
4.53. Überfeldstärke ZnO Kabelgarnitur 3D	107

Tabellenverzeichnis

3.1. Materialparameter für den Vergleich der Modellierungen	47
4.1. Materialparameter der Kabelgarnitur	63
4.2. Simulationszeiten Isolator im Regentest	64
4.3. Materialdaten der Endenglimmschutzlacke	75
4.4. Approximation der elektrischen Schichtleitfähigkeit	75
4.5. Materialparameter des Endenglimmschutzes	76
4.6. Simulationszeiten Endenglimmschutz	79
4.7. Globale ohmsche Verluste.	83
4.8. Thermische Materialparameter des Endenglimmschutzes	84
4.9. Geometrische Parameter der Kabelgarnitur	93
4.10. Materialparameter der Kabelgarnitur	93
4.11. Simulationszeiten Kabelendverschluss	94
4.12. Kabelendverschluss bei Impulsbeanspruchung	104