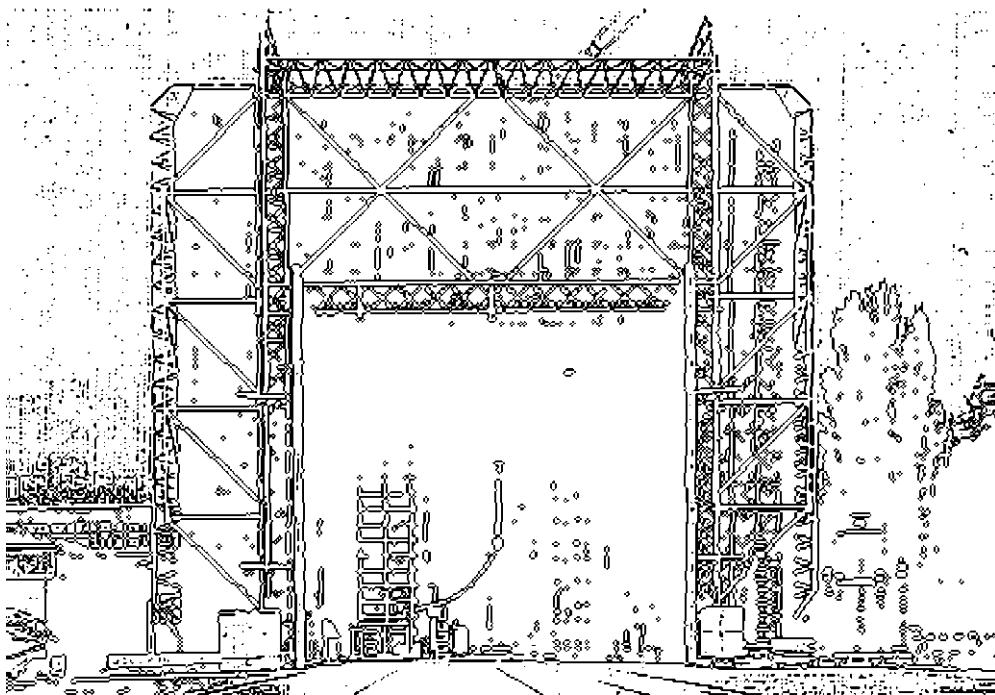


Technische Universität Graz

MASTERARBEIT

Arno Tuna, BSc

Oktober 2014



INSTITUT FÜR
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND
SYSTEMMANAGEMENT
UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER

Untersuchungen von leitfähigen Teilchen in gasisolierten Systemen unter hoher Gleichspannung

Masterarbeit



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Betreuer

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Thomas Berg

Vorgelegt von Arno Tuna, BSc

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7401
Telefax: (+43 316) 873 – 7408
<http://www.ihs.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Oktober 2014



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich beim Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz und seinen Mitarbeitern für die Möglichkeit bedanken, meine Masterarbeit an diesem Institut durchführen zu können. Allen voran bei meinem Betreuer DI Thomas Berg für die Unterstützung und Begleitung durch diese Arbeit, sowie DI Mohammad Zamani für diverse aufschlussreiche Gespräche.

Weiters gilt mein Dank meinen Freunden und Kollegen Bene, Benjamin, Robert und Harry. Ohne euch wäre dieses Studium nicht dasselbe gewesen. In diesem Sinne: „des schaff ma leicht!“

Ich möchte meinen Dank auch an den Hochspannungszeichensaal richten, der mir über eine weite Strecke des Studiums als ein zweites Zuhause innerhalb der Technischen Universität gedient hat.

Natürlich möchte ich an dieser Stelle auch meiner Familie danken, die mir während des Studiums immer den nötigen moralischen sowie finanziellen Halt gegeben hat. Danke!

Abschließend möchte ich einer Person ein besonderes Dankeschön ausrichten, meinem Großvater. Deine Begeisterung für die Technik hat auf mich abgefärbt und dadurch bin ich überhaupt erst zum Studium der Elektrotechnik gekommen.

Diese Arbeit ist meinem Großvater Josef Bubik gewidmet.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

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

Graz,.....

.....

(signature)

Kurzfassung

Gasisolierte Systeme zeichnen sich durch ihre Kompaktheit und ihre geringe Kapazität aus. Sie sind aus der Energieübertragung und –verteilung nicht mehr wegzudenken. In Zukunft werden gasisolierte Systeme auch im Bereich der Hochspannungsgleichstromübertragung eine wichtige Rolle spielen. Die Betriebssicherheit dieser Systeme wird durch leitfähige metallische Partikel maßgeblich beeinflusst und herabgesetzt.

In dieser Masterarbeit wird das Bewegungsverhalten dieser Partikel untersucht, sowie Methoden zur Erkennung und Neutralisation zusammengefasst. Als zweiter Teil dieser Arbeit wird eine grundlegende Simulation der Partikelbewegung mit COMSOL Multiphysics erstellt. Dabei wird das Bewegungsverhalten von Aluminium- und Kupferpartikeln mit unterschiedlichen Längen simuliert.

Abstract

Gas-insulated systems are characterized by their compactness and their low capacity. They are an important part in power transmission and distribution. In the future, gas-insulated systems will also play an important role in the field of high voltage direct current transmission. The reliability of these systems is significantly influenced and decreased by conductive metallic particles.

In this thesis, the movement behavior of these particles is examined and methods for detection and neutralization are summarized. In the second part of this work a fundamental simulation of particle motion is created with COMSOL Multiphysics. Therefore, the movement behavior of aluminum and copper particles with different lengths is simulated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Allgemeines.....	8
1.2	Aufgabenstellung und Ziele	9
2	Partikelverhalten unter Wechsel- und Gleichspannung	10
2.1	Allgemeines Partikelverhalten	10
2.1.1	Aufgenommene Ladung und Lift-Off-Feldstärke eines Partikels	11
2.1.2	Teilelastischer Stoß an einer Elektrode	13
2.2	Partikelverhalten unter Wechselspannung	14
2.3	Partikelverhalten unter Gleichspannung	15
2.3.1	Bewegungsverhalten unter Gleichspannung	16
2.3.2	Teilentladungsbedingte Bewegungsabläufe	17
3	Teilentladungsmessung.....	20
3.1	Fehlerquellen in gasisolierten Systemen	20
3.2	UHF-Messung	20
3.3	Akustische TE-Messung.....	22
3.4	Konventionelle Teilentladungsmessung	24
4	Maßnahmen gegen Partikeleinfluss.....	26
4.1	Allgemeine Maßnahmen vor Inbetriebnahme	26
4.1.1	Konditionierung	27
4.1.2	Bei der Inbetriebnahme (Vor-Ort Prüfung).....	27
4.2	Im Betrieb.....	28
4.3	Konstruktive Maßnahmen.....	29
4.3.1	Design.....	29
4.3.2	Beschichtung.....	31
5	Partikelfallen.....	36
5.1	Partikelfallen unter Wechselspannung.....	36
5.2	Partikelfallen unter Gleichspannung	37
5.3	Vergleich zwischen Wechsel- und Gleichspannung.....	37
6	Stand der Technik von Partikelsimulationen	38
6.1	Charge Simulation Methode (CSM).....	38

6.2	Monte Carlo Methode.....	41
7	Simulation von Partikelbewegungen.....	42
7.1	Grundsätzliche Überlegungen.....	42
7.2	Simulation mit COMSOL Multiphysics.....	42
7.2.1	Nachbildung der Geometrie.....	42
7.2.2	Berechnung des elektrischen Felds.....	44
7.2.3	Nachbildung eines Partikels und Definition der Bewegungsgleichungen.....	45
7.2.4	Mechanische Reflexion an einer Elektrode und Umladevorgang.....	47
7.3	Simulationsergebnisse.....	49
7.3.1	Bouncing Motion.....	50
7.3.2	Standing Motion.....	69
8	Resümee.....	72
9	Zusammenfassung.....	74
10	Ausblick.....	76
11	Literaturverzeichnis.....	77

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Gasisolierte Systeme unterteilen sich in die gasisolierte Schaltanlage und die gasisolierte Übertragungsleitung.

Bereits Ende der sechziger und vor allem in den siebziger Jahren wurde die mit SF₆ gasisolierte Schaltanlage (GIS) eingeführt. Heutzutage kann mit der GIS der gesamte Spannungsbereich bis 800kV abgedeckt werden. Sämtliche Anlagenteile sind in geerdete Kapselungen eingebaut, die mit SF₆-Gas befüllt sind. Die hervorragenden Isoliereigenschaften des SF₆-Gases ermöglichen eine sehr kompakte Bauweise und somit eine starke Reduktion des Raumbedarfs. SF₆ hat in einer GIS zwei Funktionen, es dient einerseits als Isoliergas und arbeitet andererseits als Lichtbogenlöschmittel in den Leistungsschaltern. Im niedrigeren Spannungsbereich wird die GIS unter normalem atmosphärischen Druck betrieben, im höheren Spannungsbereich wird der Druck auf bis zu 0,6 MPa erhöht. [1]

Die gasisolierte Übertragungsleitung (GIL) verbindet die Vorteile einer Freileitung mit denen eines Kabels. Die kompakte Bauweise erhalten gasisolierte Leitungen durch den Einsatz spezieller Isoliergase (zB: SF₆) mit hoher elektrischer Festigkeit, die bei hohem Gasdruck im Inneren der Leitung Verwendung finden. Ähnlich wie bei einem Kabel ist das System nach außen hin abgeschlossen und geschirmt, Dielektrizitätszahl und Kapazität sind aber durch die Verwendung von SF₆ als Isoliergas geringer. Außerdem kann das Dielektrikum nicht altern, es kann thermisch nicht überlastet werden und es ist selbstheilend. Neue und sehr vorteilhafte Eigenschaften sind sehr geringe magnetische Feldstärken im Außenraum (selbst im Vergleich mit Kabeln) und keinerlei Gefährdung der Umgebung, auch nicht bei sehr großen Kurzschlussströmen. Zur Anwendung kommt die GIL als Ersatz von Kabeln in Bereichen, in denen Brandgefahr herrscht, bzw. von Freileitungsstrecken, wegen Platzbedarfs oder aus optischen Gründen. Die Reduzierung der magnetischen Feldstärke in der Umgebung von Energieübertragungstrassen kann ebenfalls ein Einsatzgrund für die GIL sein. [2] [3]

Die Isolationsfestigkeit gasisolierter Systeme wird nicht nur durch den Aufbau sondern auch durch die Sauberkeit während der Produktion und Errichtung bestimmt. Diese wird hauptsächlich durch das Auftreten von frei beweglichen Partikeln beeinflusst. Diese Partikel können aus allen Materialien bestehen, die während Produktion und Bauzeit zum Einsatz kommen. Leitfähige Partikel stellen dabei das Hauptproblem dar. Diese Partikel nehmen im Betrieb eine elektrische Ladung auf und erfahren dadurch eine elektrostatische Kraftwirkung, die zur Bewegung des Partikels führt. Ist die Kraft auf das Partikel groß genug, kann es

abheben und sich in der Isolationsstrecke bewegen, wobei es durch Feldstärkenerhöhungen zu Teilentladungen kommt. Treten diese Teilentladungen in der Nähe des Innenleiters auf, steigt die Gefahr eines Durchschlags stark an. [3]

Um die Zuverlässigkeit von gasisolierten Leitungen weiter zu erhöhen, werden in der Literatur neben dem Verhalten von Partikeln mehrere Maßnahmen beschrieben, um den Einfluss von frei beweglichen Partikeln zu minimieren. Zur Erkennung eines Partikels werden Teilentladungsmessungen nach IEC 60270 sowie die Verfahren der akustischen Teilentladungsmessung und die UHF-Teilentladungsmessung eingesetzt. Als passive Verfahren zur Reduzierung des Partikeleinflusses werden Beschichtungen der Kapselung mit isolierenden Materialien verwendet, ebenso kommen spezielle Designs von Leiter und Stützisolatoren sowie elektrostatische Partikelfallen zur sicheren Neutralisierung zum Einsatz. Um die Wirkungsweise dieser Maßnahmen zu verstehen, ist eine gute Kenntnis des Bewegungsverhaltens sowie der Faktoren, die das Bewegungsverhalten beeinflussen, nötig. Daraus leiten sich die Aufgabenstellung und Ziele dieser Masterarbeit ab.

1.2 Aufgabenstellung und Ziele

- Literaturrecherche zu:
 - Partikelverhalten
 - Teilentladungsmessung in gasisolierten Systemen
 - Maßnahmen gegen Partikeleinfluss (Design der Systeme, Beschichtung, Partikelfallen)
- Erstellen einer grundlegenden Simulation der Partikelbewegung mit COMSOL Multiphysics

2 Partikelverhalten unter Wechsel- und Gleichspannung

2.1 Allgemeines Partikelverhalten

Frei bewegliche Metallpartikel entstehen durch mechanische Arbeiten während der Montage der gasisolierten Anlage, durch Verschrauben der einzelnen Komponenten sowie durch mechanische Abnutzung von Schaltelementen. Dabei entstehen hauptsächlich:

- Längliche, span- und drahtartige leitfähige Metallpartikel
- Sphärische leitfähige Metallpartikel
- Staubartige leitfähige Metallpartikel

Ausgehend von einem direkten Kontakt des Partikels mit der Kapselung nimmt ein leitfähiges Partikel im elektrischen Feld eine von seiner Oberfläche A und der lokalen elektrischen Flussdichte \vec{D} abhängige Ladung an.

$$q_p = \oint_A \vec{D} d\vec{A} \quad (2.1)$$

Daraus ergibt sich eine von der Kapselung weg gerichtete Kraftwirkung auf das Partikel. Die gesamte Kraft auf das Partikel ist von dessen Größe, Form und Lage abhängig.

$$\vec{F}_e = \int_q \vec{E} d\vec{q} \quad (2.2)$$

Wird diese Kraft größer als die auf das Partikel wirkenden Gewichts-, Reibungs- und Adhäsionskräfte hebt das Partikel ab. [4]

Nachdem Abheben wird das Partikel abhängig von Gleich- oder Wechselspannung ein unterschiedliches Bewegungsverhalten aufweisen, auf welches in den nachfolgenden Punkten dieses Kapitels eingegangen wird. Die Formeln 2.3 und 2.4 beschreiben das Bewegungsverhalten des Partikels, wobei x die Flughöhe des Partikels beschreibt und z die seitliche Bewegung,

$$m\ddot{x} = q_p \cdot E_x + \vec{F}_v \pm m \cdot g \quad (2.3)$$

$$m\ddot{z} = q_p \cdot E_z - F_r \quad (2.4)$$

wobei E_x für die vertikale Komponente von \vec{E} , E_z für die horizontale Komponente von \vec{E} , F_r für die Reibungskraft entgegen der Kraftwirkung, \vec{F}_v für die dynamische Viskosität des Isoliergases und g für die Erdbeschleunigung steht.

Eine gasisolierte Leitung entspricht einer koaxialen Anordnung, in der die elektrische Feldstärke in Richtung des Innenleiters zunimmt. [3] Daher ist auch die aufgenommene Ladung an der Kapselung geringer als jene am Innenleiter. [5] Somit wird auch die Kraftwirkung auf das Partikel größer je näher dieses dem Innenleiter kommt. Ein Partikel, das von der Kapselung Ladung aufgenommen hat und von der Innenelektrode angezogen wird, beschleunigt zunehmend je näher es dem Innenleiter kommt. Die Bewegung von der Kapselung in Richtung Innenleiter ist wegen der geringeren aufgenommenen Ladung langsamer als jene vom Innenleiter in Richtung Kapselung. Das liegt einerseits an der geringeren aufgenommenen Ladung und andererseits an der Gewichtskraft entgegen der Bewegungsrichtung. [3]

2.1.1 Aufgenommene Ladung und Lift-Off-Feldstärke eines Partikels

2.1.1.1 Kugelförmiges Partikel

Für ein kugelförmiges Partikel ergibt sich die aufgenommene Ladung nach [6] und [7] zu:

$$Q_S = \frac{2}{3} \cdot \pi^3 \cdot \epsilon_0 \cdot R^2 \cdot E_0 \quad (2.5)$$

Q_S ...aufgenommene Ladung des kugelförmigen Partikels

ϵ_0 ...Permittivität des leeren Raumes

R ...Radius des kugelförmigen Partikels

E_0 ...elektrische Grundfeldstärke

Die benötigte Feldstärke damit ein kugelförmiges Partikel von der Elektrodenoberfläche abhebt ergibt sich nach [7] zu:

$$E_{S,lift} = 0,49 \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot R}{\epsilon_0}} \quad (2.6)$$

$E_{S,lift}$...lift-off Feldstärke des kugelförmigen Partikels

ρ ...Dichte des Partikels

R ...Radius des kugelförmigen Partikels

g ...Erdbeschleunigung

2.1.1.2 Zylinderförmiges Partikel

Für den technisch interessanteren Fall des zylinderförmigen Partikels kann die aufgenommene Ladung bzw. die lift-off-Feldstärke unter der Voraussetzung eines großen Achsenverhältnisses (Länge/Durchmesser >5) mit einer Näherungslösung angegeben werden. Die Näherungen hängen von der Lage auf der Elektrode ab. Im Fall eines liegenden Partikels wird dieses als unendlich lang angenommen und somit der Einfluss der Enden vernachlässigt. Bei einem aufrecht stehenden Partikel spielen die Enden wegen der erhöhten lokalen Feldstärke jedoch eine wichtige Rolle. [3] Die aufgenommene Ladung eines stehenden Partikels ist größer als jene eines liegenden Partikels. Ein liegendes Partikel richtet sich wegen des Dipoleffektes zuerst auf und orientiert sich entsprechend der elektrischen Feldlinien. [8]

Für ein liegendes zylinderförmiges Partikel ergibt sich die aufgenommene Ladung nach [3] und [8] zu:

$$Q_{zl} = \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d \cdot l \cdot E_0 \quad (2.7)$$

Q_{zl} ...aufgenommene Ladung eines liegenden zylinderförmigen Partikels

d ...Durchmesser des Partikels

l ...Länge des Partikels

Die benötigte Feldstärke, damit ein liegendes zylinderförmiges Partikel von der Elektrodenoberfläche abhebt, ergibt sich nach [3] zu:

$$E_{zl, lift} = \sqrt{\frac{d \cdot \rho \cdot g}{2,86 \cdot \varepsilon_0}} \quad (2.8)$$

$E_{zl, lift}$...lift-off Feldstärke des liegenden zylinderförmigen Partikels

Für ein aufrecht stehendes zylinderförmiges Partikel ergibt sich die aufgenommene Ladung nach [3] und [8] zu:

$$Q_{zs} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l^2 \cdot E_0}{\ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right) - 1} \quad (2.9)$$

Q_{zs} ...aufgenommene Ladung eines aufrecht stehenden zylinderförmigen Partikels

Die benötigte Feldstärke, damit ein liegendes zylinderförmiges Partikel von der Elektrodenoberfläche abhebt, ergibt sich nach [3] zu:

$$E_{Zs,lift} = \frac{\ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right) - 1}{2} \cdot \sqrt{\frac{d^2 \cdot \rho \cdot g}{\varepsilon_0 \cdot l \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right) - \frac{1}{2}\right)}} \quad (2.10)$$

$E_{Zs,lift}$...lift-off Feldstärke des stehenden zylinderförmigen Partikels

2.1.1.3 Tabelle für aufgenommene Ladung, lift-off-Feldstärke und Krafteinwirkung für unterschiedliche Partikelformen

In Tabelle 1 sind für unterschiedliche Partikelformen die aufgenommene Ladung, die lift-off-Feldstärke und die wirkende elektrostatische Kraft zusammengefasst. [9]

shape	electric charge	electrostatic force	lift-off and levitation field
sphere [6.1]	$q = \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon_0 r^2 E$	$F_e = kqE$ $k = 0.832$ (on electrode) ~ 1.0 (at midgap)	$E_L = 0.49 \sqrt{\frac{\rho g r}{\varepsilon_0}}$
wire [6.2] (horizontal lying)	$q = 2\pi \varepsilon_0 r L E$	$F_e = \frac{1}{\sqrt{2}} q E$	$E_L = \sqrt{\frac{\rho g r}{1.43 \varepsilon_0}}$
wire* [6.2] (vertical standing)	$q = \frac{\pi \varepsilon_0 L^2 E}{\ln(2L/r) - 1}$	$F_e = \frac{\ln(L/r) - 0.5}{\ln(2L/r) - 1} q E$	$E_L = [\ln(2L/r) - 1] \sqrt{\frac{2 \rho r^2 g}{3 \varepsilon_0 L [\ln(L/r) - 0.5]}}$
spiral [6.3] (horizontal lying)	$q = \pi \varepsilon_0 L D E$	$F_e = 0.715 q E$	$E_L = d \sqrt{\frac{\rho g}{2.86 \varepsilon_0} \sqrt{\left(\frac{\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{1}{D}\right)^2}}$

r, L, ρ : radius, length and density of the particle, g : gravitational acceleration, E : field strength
 D, h : spiral diameter and pitch, d : wire diameter of spiral, * half prolate spheroid

Tabelle 1: aufgenommene Ladung, lift-off-Feldstärke und elektrostatische Kraft für unterschiedliche Partikelformen [9]

2.1.2 Teilelastischer Stoß an einer Elektrode

Schlägt ein Partikel im Zuge der Bewegung auf einer Elektrode auf, kommt es zu einer mechanischen Reflexion. [5] Durch das Zusammenwirken von Faktoren wie elastische und plastische Verformungen, kommt es zu einem teilelastischen Stoß, bei dem ein Teil der Bewegungsenergie in Wärme oder Verformungsenergie umgewandelt wird. Die Partikelgeschwindigkeit vor und nach dem Stoß lässt sich nach folgender Gleichung berechnen,

$$v_2 = -k \cdot v_1 \quad (2.11)$$

wobei k der Stoßfaktor ist, der Werte zwischen null und eins annehmen kann. Der Stoßfaktor hängt von den Materialien, Massen, Formen und Geschwindigkeiten der beteiligten Körper (Partikel, Elektrode) ab und ist daher bei jedem Stoß unterschiedlich. [3]

2.2 Partikelverhalten unter Wechselspannung

Das elektrische Feld einer gasisolierten Leitung stellt eine quasi homogene Feldanordnung dar. Liegt am Innenleiter eine Wechselspannung an, werden sich die Ladungsträger am Innenleiter und an der Kapselung so anordnen, dass die Feldlinien normal zur Oberfläche austreten. Ein leitfähiges Partikel, das einen leitenden Kontakt zur Kapselung besitzt, stellt für das elektrische Feld eine veränderte Oberfläche dar und es entsteht eine lokale Inhomogenität. Die Ladungsträger werden je nach Polarität in das Partikel oder aus dem Partikel wandern, damit die Feldlinien normal zur Oberfläche austreten. Durch diese Wanderung von Ladungsträgern nimmt das Partikel entweder eine positive Ladung bei negativer Polarität am Innenleiter oder eine negative Ladung bei positiver Polarität des Innenleiters auf. [10] Der Vorgang der Umladung erfolgt dabei mit Netzfrequenz.

Ist die lift-off-Feldstärke erreicht, hebt ein leitfähiges Partikel ab und beginnt eine hüpfende Bewegung auszuführen. Je höher die angelegte Wechselspannung ist, desto höher wird das Partikel auch abheben. Sollte die Spannung ausreichend hoch sein, kann das Partikel die gesamte Isolationstrecke zum Innenleiter zurücklegen. Wenn ein Partikel während einer Halbwelle der Wechselspannung abhebt und während der Halbwelle der anderen Polarität zur Elektrode zurückkehrt, kommt es kurz vor dem Auftreffen auf die Elektrode zu einem Mikrodurchschlag der Strecke zwischen Partikel und Elektrode. Dieser kann genug Energie aufweisen, um einen Durchschlag der gesamten Isolation zu bewirken. Legt ein Partikel den gesamten Weg zum Innenleiter zurück, kommt es bei Kontakt (bzw. kurz davor) zwischen Partikel und Innenleiter zu einer kleinen Funkenentladung. In einem Wechselfeld kann ein Partikel längere Zeit in der Isulationsstrecke schweben. Es kann einige Perioden dauern bis der Weg zum Innenleiter zurückgelegt wird. [8]

Partikelverhalten unter Wechsel- und Gleichspannung

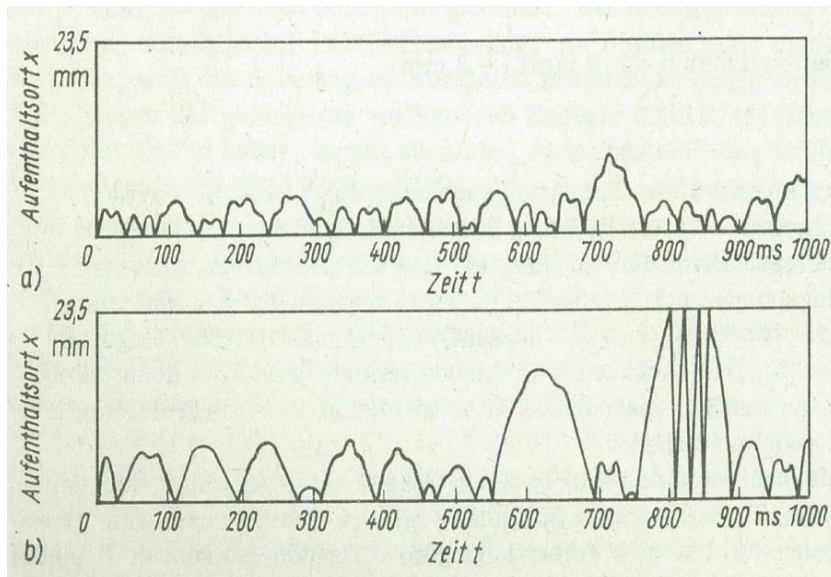


Abbildung 1: Partikelbewegung unter Wechselspannung [5]

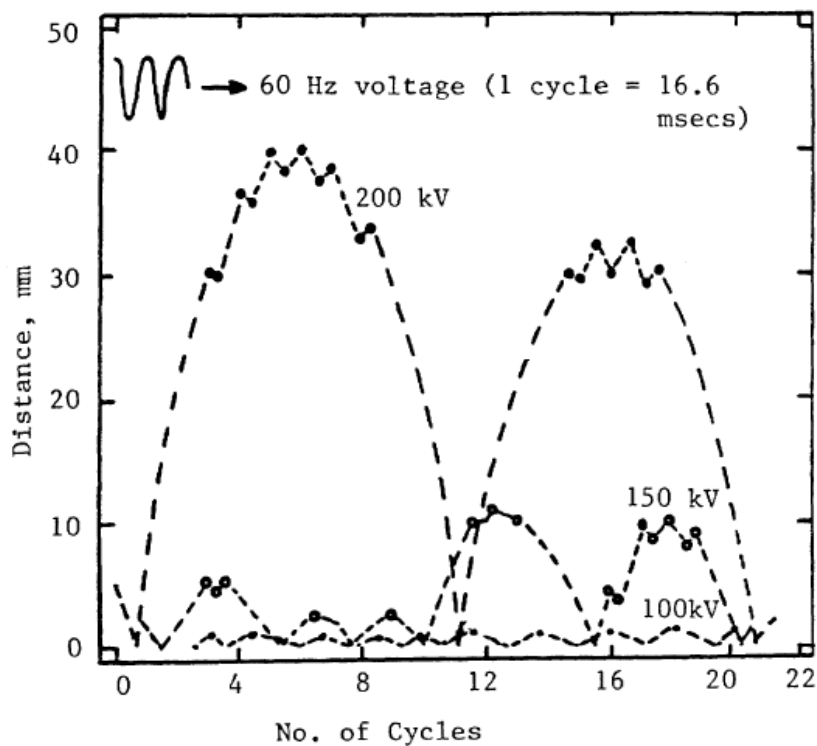


Abbildung 2: Partikelbewegung bei verschiedenen Spannungshöhen [8]

2.3 Partikelverhalten unter Gleichspannung

Bei gasisolierten Anlagen befindet sich die Kapselung immer auf Erdpotential, am Innenleiter kann positive oder negative Spannung anliegen. Im Weiteren bezieht sich die Angabe von positiver bzw. negativer Spannung immer auf den Innenleiter.

2.3.1 Bewegungsverhalten unter Gleichspannung

Im Unterschied zu Wechselspannungsverhältnissen ändert sich das elektrische Feld \vec{E} unter Gleichspannung nicht mit der Netzfrequenz. Ein leitfähiges Partikel mit einem leitfähigen Kontakt zur Kapselung stellt wie im Wechselspannungsfall eine veränderte Oberfläche dar. Das elektrische Feld wird lokal inhomogen. Damit die Feldlinien normal zur Oberfläche austreten können, werden wieder Ladungsträger in das Partikel oder aus dem Partikel wandern, um das zu ermöglichen. Somit nimmt das Partikel, abhängig von der Polarität des Innenleiters, wieder positive oder negative Ladung auf. [10]

Nachdem ein Partikel abgehoben hat, hängt seine Bewegung hauptsächlich von dessen Ladung Q ab. Es gelten dieselben Bewegungsgleichungen wie in Kapitel 2.1 beschrieben (2.3 und 2.4). Daher bewegt sich das Partikel unter der Voraussetzung, dass keine Koronaentladung stattfindet, kontinuierlich auf die Innenelektrode zu, bis es auf dieser aufschlägt. Dabei gilt wieder Gleichung 2.5. Das Partikel wird umgeladen, wodurch es sich wieder auf die Kapselung zubewegt. Das Partikel wirkt praktisch wie ein Förderband zum Transport von Ladungsträgern. [11]

Liegt das Partikel anfangs auf der Kapselung und wird in Richtung des Innenleiters bewegt, kommt es beim Aufprall neben der mechanischen Reflexion auch zum Ladungsaustausch. Durch den teilelastischen Stoß besitzt das Partikel eine Anfangsgeschwindigkeit ungleich null, daher wird es im elektrischen Feld solange beschleunigen bis die Bewegung einen eingeschwungenen Zustand erreicht. [3] [5]

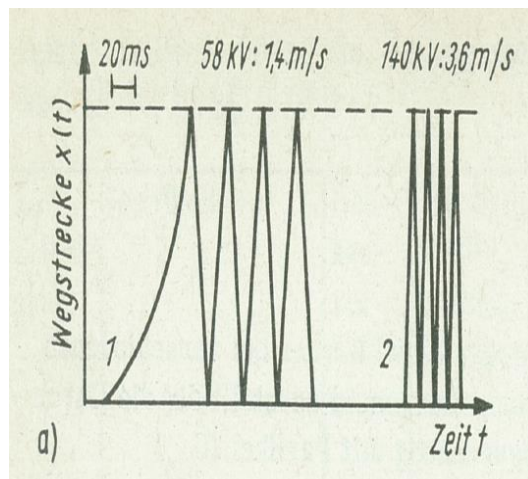


Abbildung 3: Partikelbewegung bei Gleichspannung [5]

2.3.2 Teilentladungsbedingte Bewegungsabläufe

2.3.2.1 Standing Motion

Wird der Einfluss von Koronaentladungen nicht mehr vernachlässigt, kommen teilentladungsbedingte Bewegungsabläufe der Partikel zu der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen idealen Pendelbewegung hinzu. Asano et al. stellten bei Versuchen im Isoliergas Luft fest, dass der negative Koronastrom größer ist als der positive. Abbildung 4 und Abbildung 5 stellen den Koronastrom in Abhängigkeit von Abstand und angelegter Spannung dar. [12]

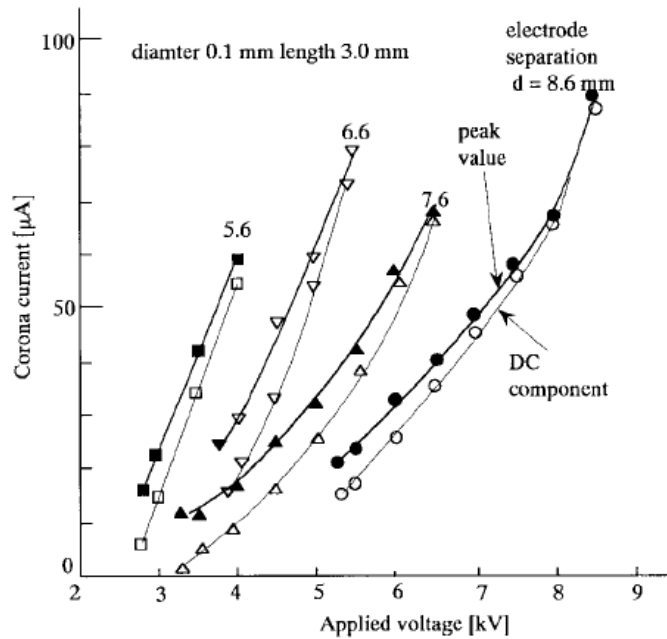


Abbildung 4: Negativer Koronastrom eines zylinderförmigen Partikels [12]

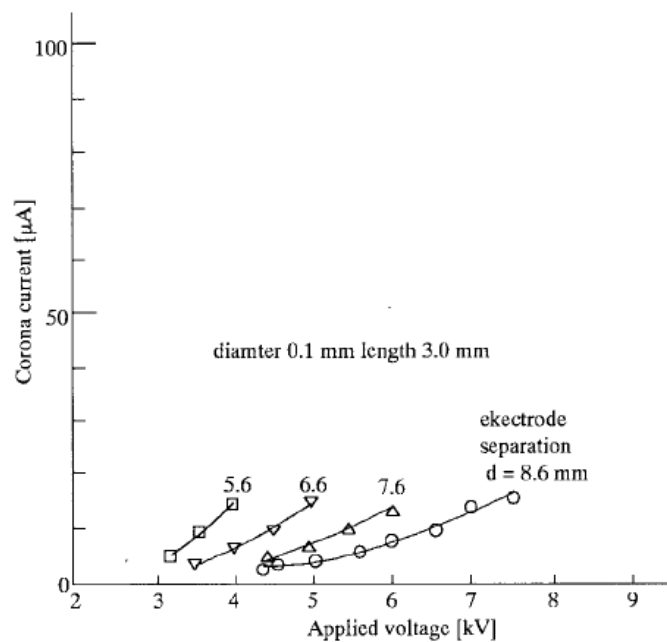


Abbildung 5: Positiver Koronastrom eines zylinderförmigen Partikels [12]

Partikelverhalten unter Wechsel- und Gleichspannung

Zur Erklärung der standing motion wird von einem leitfähigen, zylinderförmigen Partikel in einer horizontalen Platte-Platte-Anordnung ausgegangen. Die angelegte Spannung ist eine positive Gleichspannung, das elektrische Feld ist homogen. Weiters befindet sich das Partikel bereits in aufgerichteter Position und die angelegte Spannung ist groß genug, damit an den Partikelenden Teilentladungen auftreten. Der Strom der Koronaentladungen wird nun an jenem Ende des Partikels größer, welches der positiven Elektrode zugewandt ist. Der Grund dafür ist, dass der negative Koronastrom größer ist als der positive (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). Daraus resultiert eine zurückbleibende positive Ladung des Partikels, die dem Partikel erlaubt, auf der unteren Elektrode stehen zu bleiben. [12]

Liegt an der oberen Elektrode nun negative Gleichspannung an, wird sich das Partikel, wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wegen der elektrostatischen Kräfte in Richtung der oberen Elektrode bewegen. Dort gibt es seine Ladung ab und nimmt negative Ladung auf. Treten wieder Teilentladungen auf, ist wieder der negative Koronastrom an jenem Ende größer, welches der unteren Elektrode zugewandt ist. Daraus resultiert wiederum eine positive zurückbleibende Ladung. Aufgrund der Coulombschen Kraftwirkung ist es dem Partikel wiederum möglich, auf der oberen Elektrode stehen zu bleiben. [12]

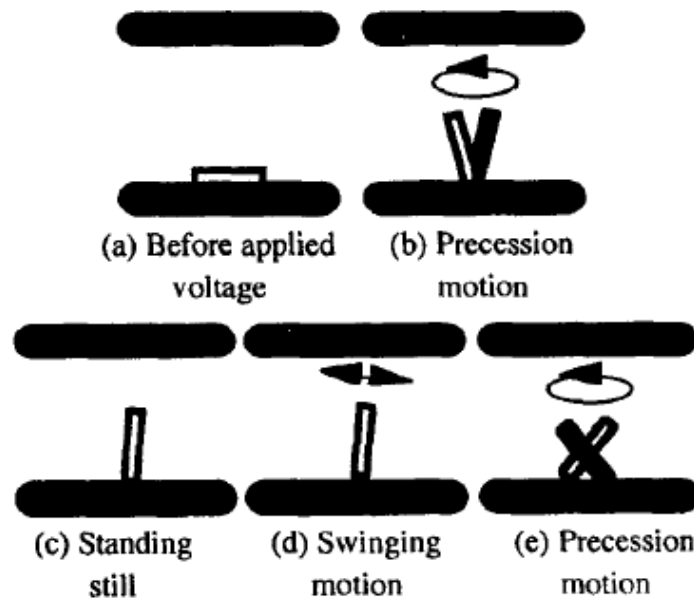


Abbildung 6: Unterschiedliche Bewegungen eines zylinderförmigen Partikels während der standing motion [13]

Im Fall der Präzisionsbewegung variiert der Koronastrom stark, steht das Partikel jedoch still, ist der Koronastrom nahezu konstant. [13]

2.3.2.2 Firefly-Effekt

Ein leitfähiges, zylinderförmiges Partikel befindet sich in einer mit SF_6 gasisolierten Leitung. Am Innenleiter liegt negative Gleichspannung an. Das von der Kapselung positiv geladene Partikel bewegt sich wegen der elektrostatischen Kraftwirkung auf den Innenleiter zu. Kommt es nun zum Kontakt mit dem Innenleiter, gibt das Partikel seine positive Ladung ab und nimmt negative Ladung auf. Wegen der Geometrie und Ausrichtung des Partikels ist die Feldstärke an jenem Ende, das der Kapselung zugewandt ist groß genug, um eine lokale Ionisation des Isoliergases hervor zu rufen. Die entstehenden Elektronen bewegen sich sehr schnell in Richtung Kapselung. Das negativ geladene Partikel beginnt sich ebenfalls in Richtung Kapselung zu bewegen. In jenen Moment, in dem das Partikel seinen Kontakt zum Innenleiter verliert, stoppt auch die Zufuhr von Ladung. Bei der Ionisation des Isoliergases entsteht auch eine positive Ionenwolke, die sich relative langsam auf den Innenleiter zu bewegt. Das Partikel taucht auf seinem Weg zur Kapselung in diese Ionenwolke ein, seine negative Ladung wird dabei neutralisiert und es wird positiv geladen. Dadurch ändert das Partikel seine Richtung und bewegt sich wieder auf den Innenleiter zu, gibt dort seine Ladung ab und der Zyklus, auch Firefly-Effekt genannt, beginnt erneut. Beim Auftreffen des Partikels auf dem Innenleiter kommt es zu einem mechanischen Stoß. Dieser erfolgt abhängig von der Oberfläche des Partikels, sodass ein zufälliges Bewegungsmuster am Innenleiter erfolgt. Bei der Bewegung am Innenleiter kommt es zu zwei Arten von Leuchterscheinungen: Eine schwach leuchtende und eine stark leuchtende. Die schwach Leuchtende erfolgt während des Kontakts des Partikels mit dem Innenleiter und kann als Koronaentladung aufgefasst werden. Die starke Leuchterscheinung kann als Entladung zwischen dem positiv geladenen Partikel und dem negativen Innenleiter, kurz bevor das Partikel auftrifft, erklärt werden. [14]

Liegt am Innenleiter positive Gleichspannung an, findet der Firefly-Effekt ähnlich wie bei negativer Gleichspannung statt. Besteht ein Kontakt zwischen dem Partikel und dem Innenleiter, gibt das Partikel seine negative Ladung ab und nimmt positive Ladung auf. Ist die Feldstärke groß genug, kommt es an dem Ende, welches der Kapselung zugewandt ist, wiederum zur Ionisation des SF_6 . Im Fall der positiven Gleichspannung lagern sich jedoch die Elektronen an den SF_6 -Molekülen an und es entsteht eine negativ geladene, träge Ionenwolke. Durch die Umladung am Innenleiter bewegt sich das positiv geladene Partikel wieder auf die Kapselung zu und taucht dabei in die negativ geladene Ionenwolke ein. Dabei wird die positive Ladung neutralisiert und das Partikel negativ geladen. Die elektrostatischen Kräfte bewirken nun eine Richtungsänderung des Partikels. Es wird sich wieder auf den Innenleiter zubewegen. Somit beginnt der Zyklus von vorne, die zufallsartigen Bewegungen durch Oberflächenbeschaffenheit und ungerade Stöße kommen ebenfalls vor. [14]

Der Firefly-Effekt tritt bei positiver und negativer Gleichspannung auf, jedoch bei negativer Gleichspannung leichter. Ist die elektrische Feldstärke ausreichend groß, kann der Firefly-Effekt auch an der Kapselung auftreten. [14]

3 Teilentladungsmessung

3.1 Fehlerquellen in gasisolierten Systemen

Die Teilentladungsmessung (TE-Messung) ermöglicht die Erkennung eines leitenden Partikels oder anderen Defektes innerhalb der gasisolierten Anlage. Im folgenden Kapitel werden Methoden zur Erkennung und Lokalisierung von Partikeln vorgestellt und erläutert. Mögliche Quellen für die Entstehung von Teilentladungen sind in Abbildung 7 dargestellt.

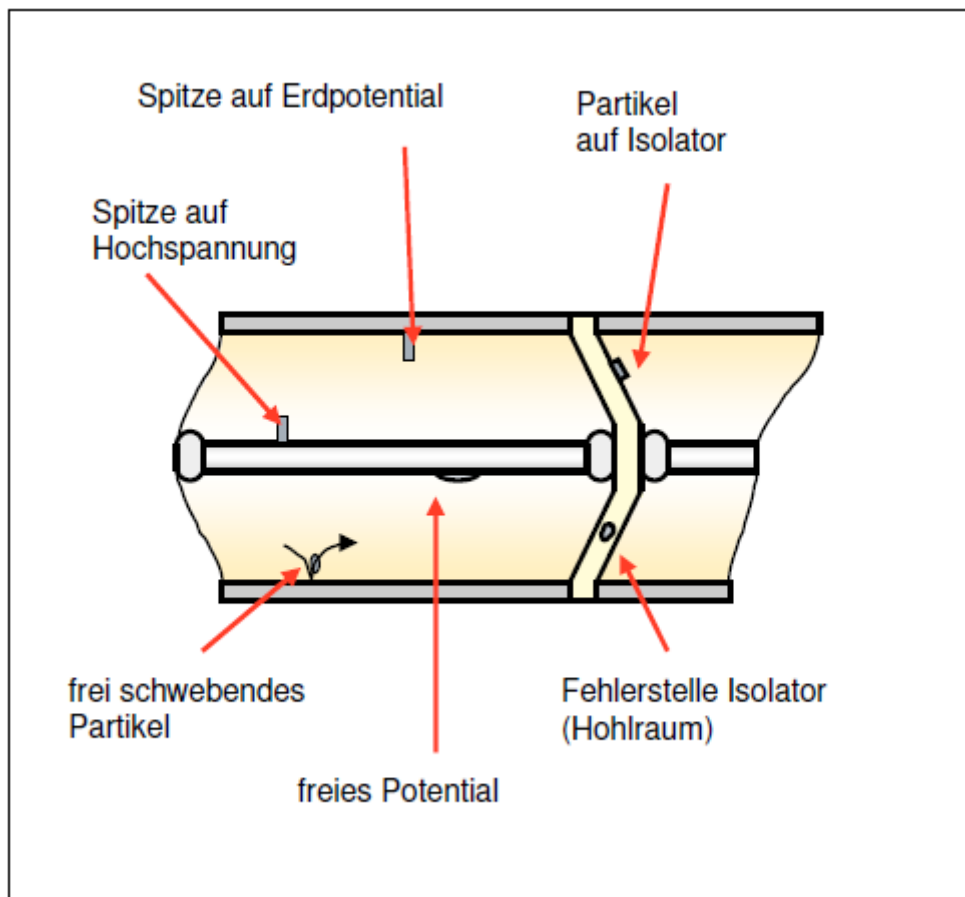


Abbildung 7: Mögliche TE-Quellen in einer GIL [15]

3.2 UHF-Messung

Die steiflankigen Teilentladungströme führen zur Emission von elektromagnetischen Wellen mit Frequenzanteilen bis über 1 GHz. Neben den Grundmoden (transversale elektromagnetische Welle, TEM-Welle), werden auch zahlreiche höhere Wellenmoden, wie die transversale elektrische Welle (TE-Wellen) und die transversale magnetische Welle (TM-Welle) angeregt. Die hochfrequenten Schwingungen im UHF-Bereich (Ultra High Frequency, 0,3...3 GHz) können mit der UHF-Methode gemessen werden. [16]

Teilentladungsmessung

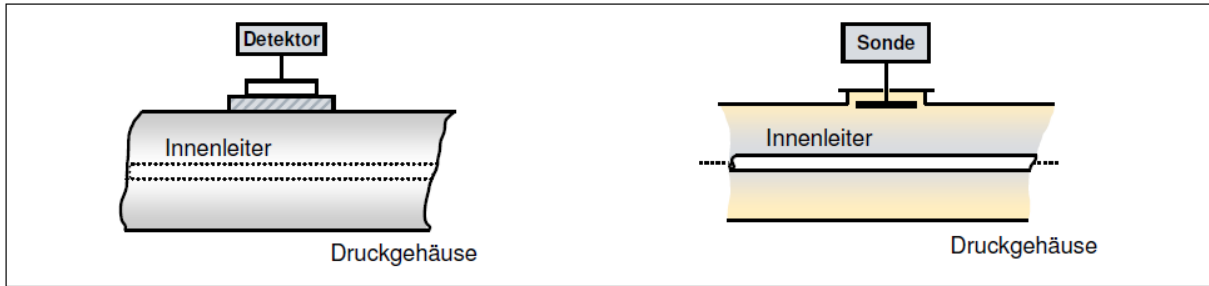


Abbildung 8: UHF-Sensor außerhalb der GIS (links) und innerhalb der GIS (rechts) [15]

Die Auskopplung der angeregten hochfrequenten Wellen erfolgt mit einem Koppler, der meist in Form einer runden Plattenelektrode realisiert ist. Diese Elektrode soll das elektrische Feld der Isolationsanordnung möglichst wenig verzerren, so dass sie meist in Aufweitungen der GIS/GIL (z.B. Montagedeckel) eingebaut ist. Der nötige Elektrodendurchmesser von etwa 10 cm und die hohen Frequenzen führen dazu, dass der Koppler als Antenne betrachtet wird und nicht als kapazitiver Teiler. [16]

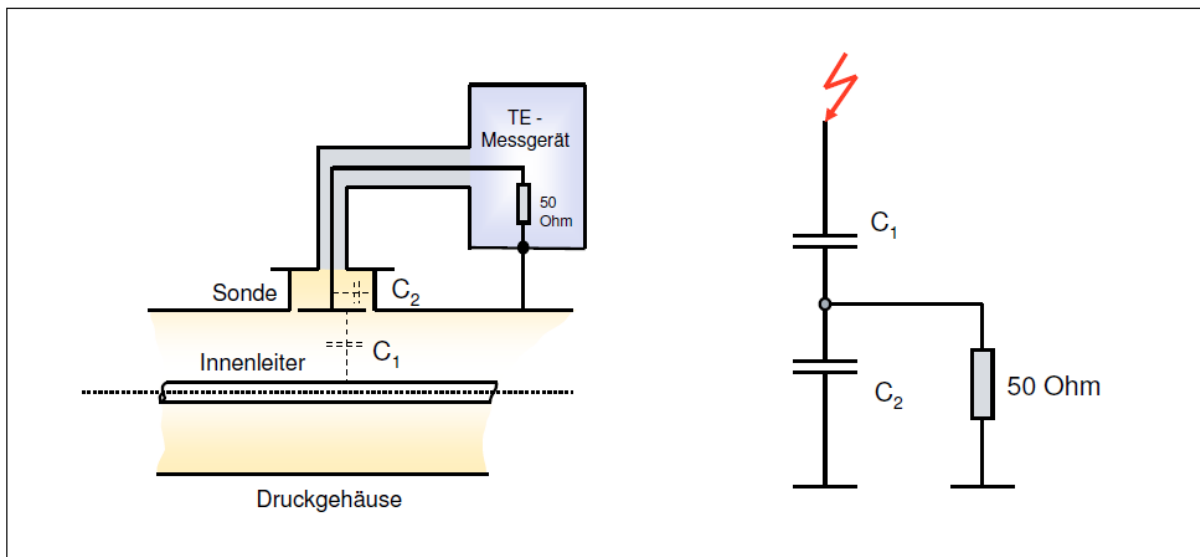


Abbildung 9: UHF-Sensor und vereinfachtes Ersatzschaltbild [15]

Die Amplitude des ausgekoppelten Signals ist nicht nur vom emittierten Signal sondern auch vom Ausbreitungsweg, der Position der Teilentladung und des Kopplers sowie den Kopplerresonanzen abhängig. Aus diesem Grund ist eine Kalibrierung auf den Teilentladungsstrom oder die Ladung ohne genaue Kenntnis dieser Punkte nicht möglich. Die deutlich reduzierten Störsignale im Messbereich von einigen hundert MHz bis über 1 GHz prädestinieren das Verfahren für den Einsatz vor Ort. Weiters können noch vorhandene Störer im Frequenzbereich bei spannungslosem Aufbau erkannt und durch Wahl eines geeigneten störungsfreien Messbandes ausgeblendet werden [16].

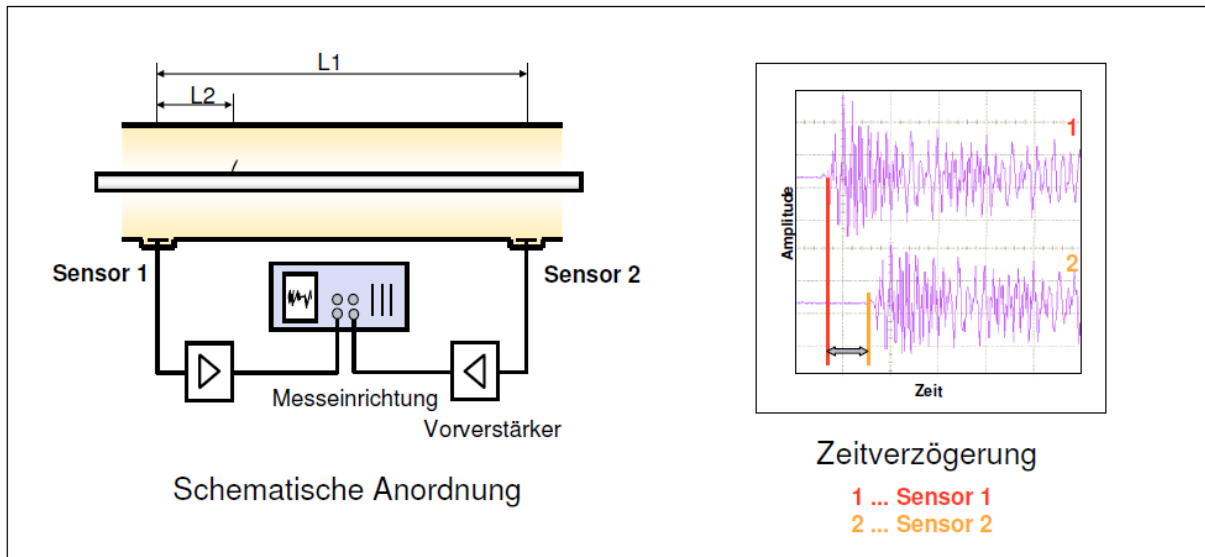


Abbildung 10: Prinzip der TE-Ortung über den Laufzeitunterschied [15]

Die Ortung wird durch Laufzeitverfahren der elektromagnetischen Wellen im Zeitbereich durchgeführt. Ist mehr als ein Sensor im Einsatz, kann durch die Zeitverzögerung zwischen den aufgenommenen Signalen die Entstehungsstelle bis auf wenige Zentimeter genau lokalisiert werden. [16]

3.3 Akustische TE-Messung

Der Aufprall beweglicher Partikel auf der Kapselung, die Druckwellen von Teilentladungen oder die mechanische Vibration verschiedener Komponenten regen auf unterschiedliche Weise die Kapselung zu Schwingungen an. Diese Schwingungen können mit Sensoren, die an der Außenseite der GIL montiert sind, detektiert werden. Die Detektion erfolgt im Ultraschallbereich von 10 kHz bis einige 100 kHz, da in diesem Bereich externe Störgeräusche die Empfindlichkeit nur wenig beeinträchtigen. Ein großer Vorteil der akustischen TE-Messung ist, dass kein Eingriff in die Anlage nötig ist [4].

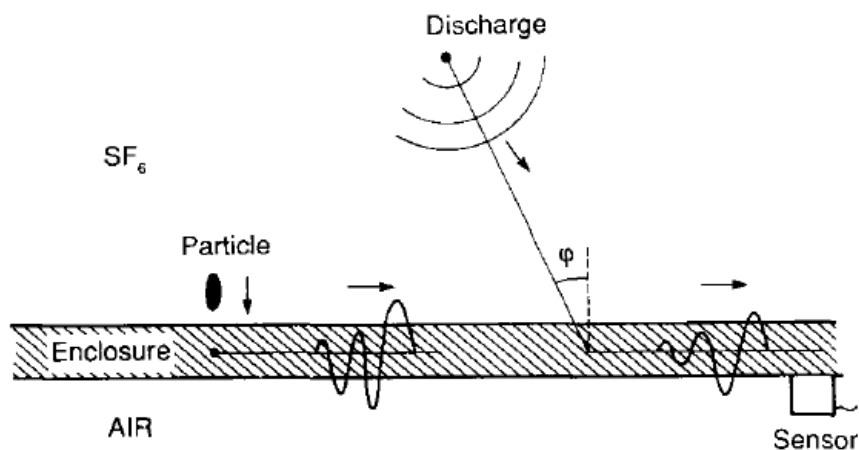


Abbildung 11: Signalwege zwischen Quelle und Sensor [17]

Teilentladungsmessung

Es kann grundsätzlich zwischen zwei Signalwegen unterschieden werden:

- Direkte Anregung durch einen Stoß eines Partikel mit der Kapselung
- Ein vibrierendes Bauteil oder einer Entladung im Gasvolumen

Das entstehende Signal hängt von der Quelle und dem Ausbreitungsweg ab. Da die Kapselungen üblicherweise aus Aluminium oder Stahl hergestellt sind, ist die Dämpfung der Signale ziemlich klein. Es entsteht jedoch ein Energieverlust, wenn die Signale über einen Flansch von einem Teil zu einem anderen übertragen werden. Akustische Signale können mit außen angebrachten Messfühlern aufgenommen werden. Es werden üblicherweise entweder Beschleunigungsaufnehmer oder Messfühler für akustische Ausstrahlungen verwendet und das Prüfverfahren besteht darin, zwischen allen Flanschen zu messen (in einer gasisolierten Schaltanlage) [18].



Abbildung 12: Akustische TE-Sensoren, Quelle: [19]

Die Ortung der Fehlerstelle erfolgt über ein Laufzeitdifferenzverfahren. Mit bereits zwei Sensoren kann eine Genauigkeit von einigen Zentimetern erreicht werden. Die Kapselung kann dabei als näherungsweise eindimensionaler Wellenleiter betrachtet werden. Aus der Zeitdifferenz, der an den Sensoren ankommenden Signale Δt , kann man die Position der Signalquelle berechnen. [4]

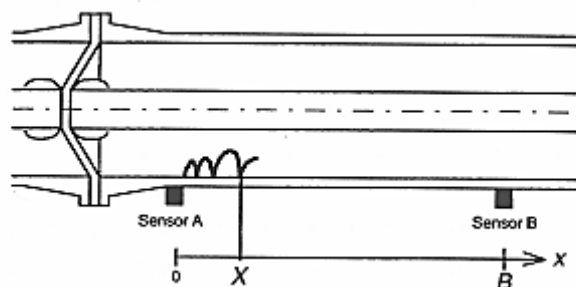


Abbildung 13: Ortung über Laufzeitmessung [4]

$$X = \frac{B}{2} \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) \quad (3.1)$$

$T...$ Laufzeit von Sensor A nach B

$B...$ Entfernung von Sensor A nach B

$\Delta t...$ Laufzeitdifferenz der Signale

$X...$ Position des Fehlers

3.4 Konventionelle Teilentladungsmessung

Für die Erfassung von Teilentladungsimpulsen ist eine spezielle Messtechnik erforderlich (siehe Abbildung 14). Parallel zu dem an einen Prüftrafo angeschlossenen Prüfling mit der Kapazität C_p , wird ein Koppelkondensator mit der Kapazität C_k geschaltet. Im Falle einer Teilentladung fließt ein impulsförmiger Ausgleichsstrom im Kreis aus C_k und C_p . Über einen Ankopplungsvierpol (ZM), der sich im Zweig des Koppelkondensators befindetet, kann der TE-Stromimpuls als Spannungsimpuls erfasst werden [2].

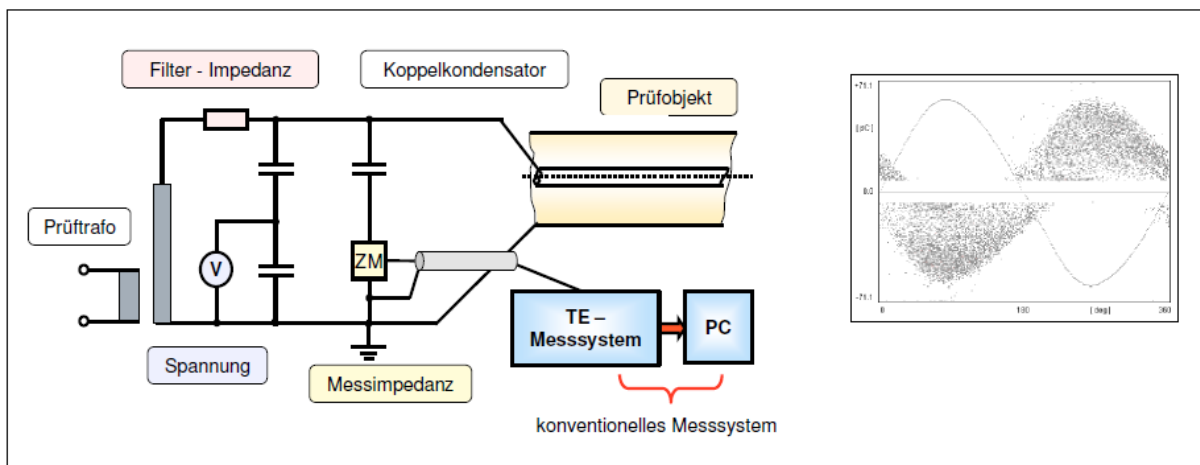


Abbildung 14: Klassische TE-Messung und Beispiel für ein q, ϕ, n -Diagramm eines hüpfenden Partikels [15]

Der gesamte Messaufbau muss teilentladungsfrei sein, d.h. neben der Verwendung entsprechender Geräte (Trafo, Koppelkondensator) sind ausreichend verrundete Zuleitungen und Armaturen erforderlich. Außerdem müssen alle metallischen Teile durch Kontaktierung auf definiertem Potential gehalten werden [2].

Mit dem konventionellen Verfahren nach IEC 60270 wird die scheinbare Ladung gemessen. Diese ist proportional zur tatsächlichen Ladung, die an der Fehlerstelle umgesetzt wird [16]. Der Zusammenhang wird über Fehlergeometrie und Position hergestellt, die jedoch im

Teilentladungsmessung

Allgemeinen nicht bekannt sind [2]. Die Messmethode arbeitet in einem Frequenzbereich von einigen kHz bis zu wenigen MHz, daher kann die Anlage als konzentrierte Kapazität betrachtet werden. Bei großen Anlagen ist dies nicht mehr zulässig, da die Anlage dann nicht mehr klein gegenüber den auftretenden Wellenlängen ist. Das Übertragungsverhalten wird dann frequenz- und ortsabhängig. Dieser Umstand kann umgangen werden, wenn eine große Anlage nicht als Ganzes, sondern in kleinen Abschnitten geprüft wird [16]. Ein weiterer einschränkender Punkt ist, dass elektromagnetische Störungen durch Rundfunksender und anderen Quellen zu einer Messempfindlichkeit für Teilentladungen von einigen 10pC führen. Unter Vor-Ort-Bedingungen ist ein Störpegel unter 5pC schwer zu erreichen [18]. Das legt nahe, dass die konventionelle elektrische TE-Messung für gasisolierte Systeme hauptsächlich für den Laborbetrieb geeignet ist.

Tritt eine Teilentladung auf, führt der lokale Zusammenbruch an der Fehlerstelle zu einem Stromfluss, der nicht direkt gemessen werden kann. Es fließt jedoch unmittelbar nach einer Teilentladung ein Ausgleichsstrom. Dieser führt an der Messstelle die scheinbare Ladung zu, die dem Spannungseinbruch und dem Ladungstransport an der Fehlerstelle proportional ist [16]. Durch Dämpfungen im Prüf- und Messkreis kommt die messbare Ladung zur Anzeige. Durch Kalibrierung kann jedoch wieder die scheinbare Ladung zur Anzeige gebracht werden. Dafür wird zuerst die Messeinrichtung durch Einspeisen eines Kalibrierimpulses kalibriert. Anschließend wird ein Kalibrierimpuls, bei spannungsfreiem Versuchsaufbau, direkt in den Prüfling eingespeist und so die Messung des gesamten Aufbaues kalibriert [15].

4 Maßnahmen gegen Partikeleinfluss

4.1 Allgemeine Maßnahmen vor Inbetriebnahme

Um eine saubere Umgebung bei der Konstruktion vor Ort zu gewährleisten, werden verschiedene Maßnahmen ergriffen. Nachfolgend werden einige davon aufgelistet:

- Konstruktionszelte [20] bzw. mobile Reinräume [21]
- Spezielle, nichtmetallische Werkzeuge bzw. metallische Teile werden mit Kunststoffen überzogen, um die Entstehung metallischer Partikel zu vermeiden [21]
- Vollautomatische Schweißroboter [20] [21]

Abbildung 15 zeigt das Innere eines Montagezeltes auf der Baustelle für eine erdverlegte, gasisolierte Leitung. Darin werden die einzelnen Komponenten der Leitung zusammengebaut und in beide Baurichtungen über ein Rollensystem an ihren endgültigen Platz verschoben. Das Zelt dient dabei als Schutz vor externen Einflüssen. Abbildung 16 zeigt, wie die Kapselungen miteinander verschweißt werden. Um eine konstante Qualität der Verbindungen zu gewährleisten, kommen spezielle Schweißroboter zum Einsatz. Neben dem Ziel der optimalen Errichtung, haben diese Maßnahmen auch das Ziel, die Entstehung leitfähiger Partikel, die in der GIL zurückbleiben, zu minimieren.



Abbildung 15: Fertigstellung der GIL-Module auf der Baustelle [20]



Abbildung 16: Verbindung der Kapselungen mittels Orbitalschweißgerät [20]

4.1.1 Konditionierung

Frei bewegliche Partikel sind die gefährlichste Fehlerquelle für gasisolierte Schaltanlagen und Leitungen. Mit Hilfe der sogenannten Konditionierung können Partikel in feldschwache Bereiche oder Partikelfallen bewegt werden, in denen sie verbleiben ohne Probleme zu bereiten. Die Konditionierung erfolgt am besten mit einer Wechselspannung. Die Wechselspannung wird dabei stufenförmig bis zur Nennspannung erhöht. Steht keine Wechselspannung zur Verfügung, kann ein gewisser Konditionierungseffekt auch durch eine große Anzahl an Schaltstoßspannungen mit wechselnder Polarität und ansteigendem Scheitelwert erzielt werden. [22]

4.1.2 Bei der Inbetriebnahme (Vor-Ort Prüfung)

Vor-Ort Prüfungen sollen die dielektrische Festigkeit sicherstellen und eventuelle Ursachen ausschließen, die Ursprung für einen inneren Fehler im Betrieb sein könnten. [23] Dazu zählen:

- Schäden durch Transport, Lagerung oder Konstruktion
- Fehlerhafte Konstruktion
- Fremdkörper oder andere Verunreinigungen zB.: bewegliche metallische Partikel [22]

Maßnahmen gegen Partikeleinfluss

Die Norm IEC EN 62271-204 empfiehlt folgende Punkte für Vor-Ort Prüfungen:

- Passende Prüfung für jeden einzelnen Fall in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtung
- Bei der Wahl der Spannungsform sollte IEC 60060-1 berücksichtigt werden, es sind jedoch ähnliche Spannungsformen zulässig
- Es soll vorzugsweise mit Wechselspannung geprüft werden, die Spannungshöhe wird mit 80% der angelegte Wechselspannung bei der Stückprüfung empfohlen
- Eine Teilentladungsmessung soll durchgeführt werden
- Prüfungen mit Stoßspannung dürfen zusätzlich durchgeführt werden
- Die GIL sollte so lang wie möglich sein [23]

Abbildung 17 zeigt den Aufbau für eine Vor-Ort Prüfung einer gasisolierten Leitung inklusive des Ablaufes der Spannungsprüfungen. In diesem Fall werden die Konditionierung und die abschließende Hochspannungsprüfung in einem abgehandelt.

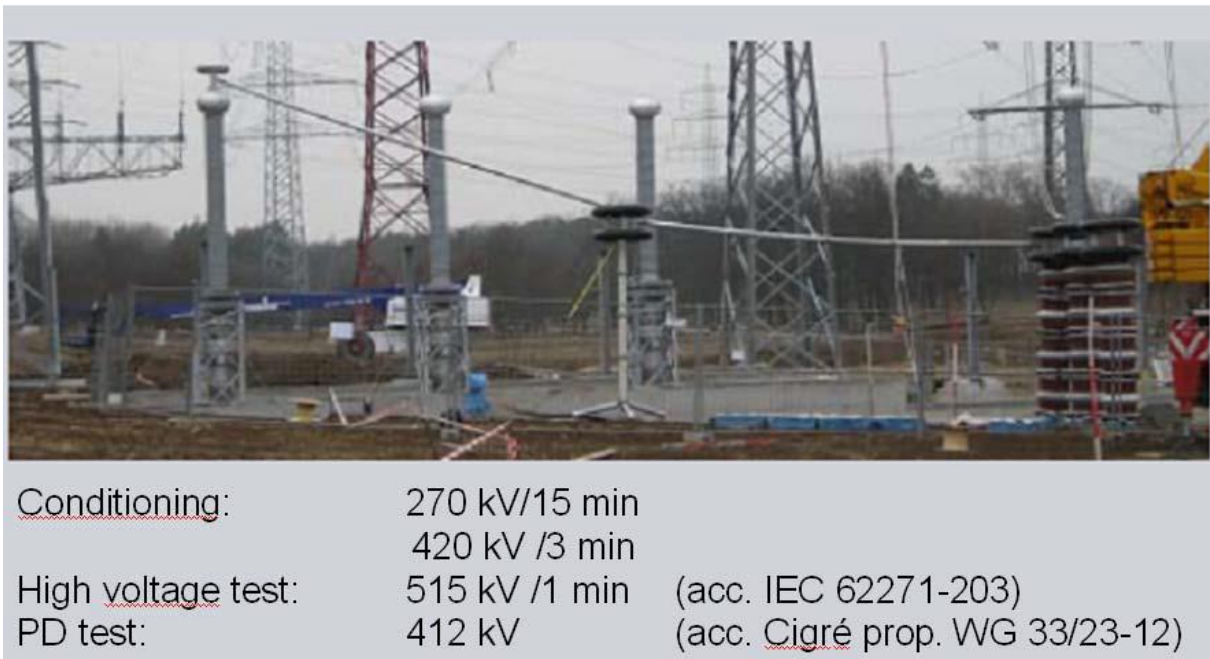


Abbildung 17: Vor-Ort Prüfung bei Inbetriebnahme einer GIL [20]

4.2 Im Betrieb

Treten im laufenden Betrieb Partikel auf, die während der Konditionierungsphase nicht bereits in Partikelfallen gefangen wurden, schaffen konstruktive Maßnahmen in Kombination mit Partikelfallen Abhilfe. Die Erkennung der Partikel erfolgt nach dem akustischen und UHF Verfahren, die in Kapitel 3 bereits beschrieben werden. Auf Partikelfallen wird in Kapitel 5 eingegangen.

4.3 Konstruktive Maßnahmen

4.3.1 Design

4.3.1.1 Particle Driver und Field-Well Ring

Ein Partikel, das auf einer Elektrode aufschlägt, erfährt neben den Kraftwirkungen aus Gleichung 2.3 und 2.4 noch eine abstoßende Kraft F_r . Die Bewegung des Partikels wird durch diese wirkenden Kräfte bestimmt. Wird der Leiter bzw. die Kapselung gezielt mit einem Gefälle mit den Winkel θ_1 konstruiert, werden sich auch die Feldlinien um diesen Winkel an der Elektrode ausrichten. Dadurch kann eine horizontale Kraftwirkung auf Partikel gezielt erzeugt werden, um diese in Richtung einer Partikelfalle zu befördern.

$$F_h = F_e \cdot \sin \theta_1 \quad (4.1)$$

F_h ...horizontale Kraftwirkung

F_e ...elektrostatische Kraftwirkung

θ_1 ...Gefälle des Leiters

Wird die abstoßende Kraft F_r berücksichtigt, ergibt sich eine zweite Komponente von F_h bei einem Aufprallwinkel θ_2 zu

$$F_h = F_r \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.2)$$

Diese beiden Kräfte bewegen das Partikel wie in Abbildung 18 dargestellt von rechts nach links.

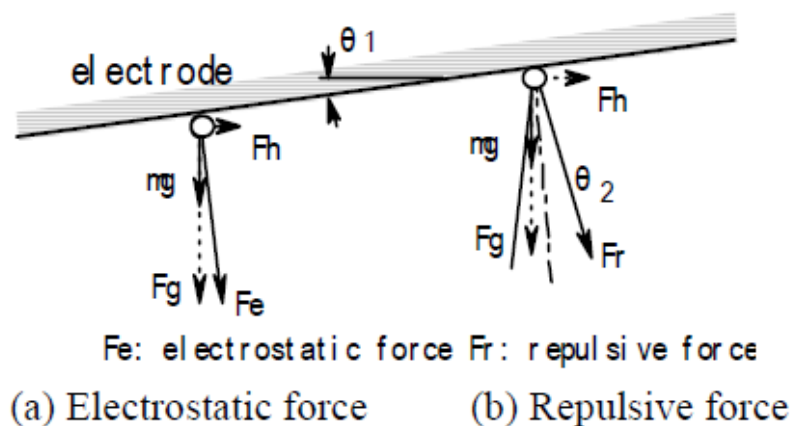


Abbildung 18: Prinzip des "particle driver " [9]

Maßnahmen gegen Partikeleinfluss

Die konisch ausgeführte Elektrode arbeitet als aktiver particle driver. Die Wahrscheinlichkeit für eine horizontale Partikelbewegung ist nach [24] größer als 95%, wenn der Winkel $\theta_1 = (\alpha)$ einige Grad beträgt, sogar wenn der Winkel β mit $\beta=0^\circ$ ausgeführt ist.

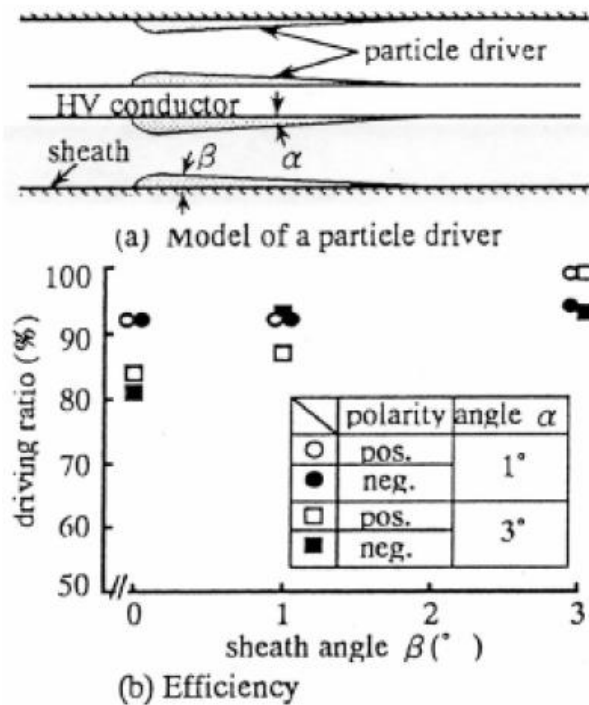


Abbildung 19: Modell und Effizienz eines particle drivers [9]

Im Fall von negativer Gleichspannung kann bei ausreichend großer Feldstärke der sog. Firefly-Effekt auftreten (beschrieben in Kapitel 2.3.2.2). In diesem Fall bleibt das Partikel am Leiter kleben. Um solch ein Partikel in die Partikelfalle zu lotsen, muss eine zusätzliche Maßnahme ergriffen werden, der sog. field-well Ring. [24]

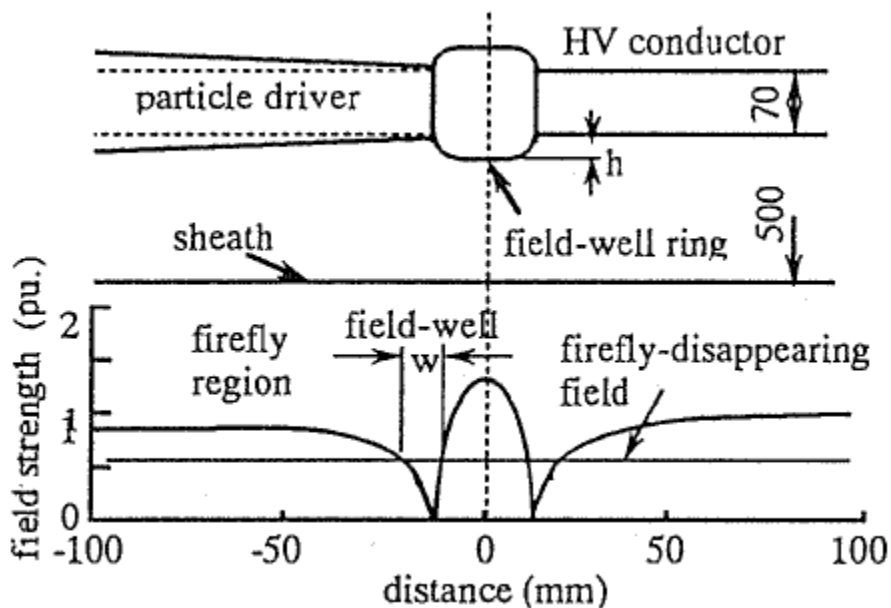


Abbildung 20: Prinzip der field-well Rings zur Vermeidung von firefly motion [9]

Wird ein particle driver mit field-well Ring in Kombination mit einer Partikelfalle eingesetzt, können Partikel ausnahmslos neutralisiert werden. [9]

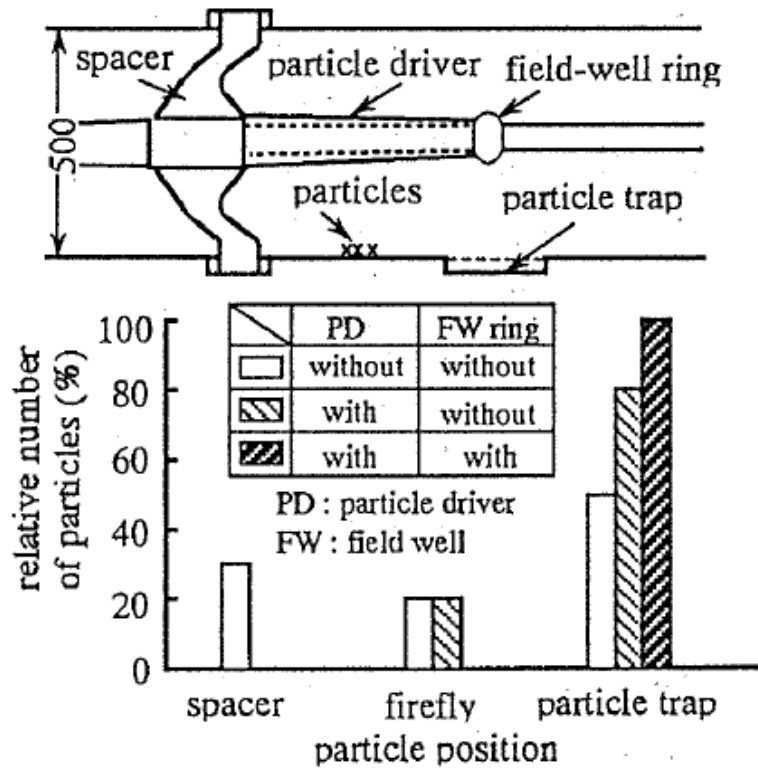


Abbildung 21: Effizienz der Partikelneutralisation bei negativer Gleichspannung [24]

4.3.2 Beschichtung

4.3.2.1 Allgemeine Auswirkung der Beschichtung

Eine dielektrische Beschichtung auf der Elektrode unterdrückt die Elektronenemission und verringert die lokale Feldstärkenenerhöhung an den Spitzen von Mikrovorsprüngen auf der Elektrodenoberfläche. [9] Obwohl eine dünne Beschichtung nicht ausreicht, um die elektrische Feldstärke im mikroskopischen Maßstab herabzusetzen, ist die Unterdrückung der Elektronenemission bei negativer Gleichspannung, die eine Hauptrolle bei Gasdurchschlägen spielt, jedoch sehr groß. [9] [25] Wie in Abbildung 22 ersichtlich ist, wirkt sich die Beschichtung merklich auf die negative Durchschlagspannung aus, während die positive Durchschlagspannung wegen der fehlenden Unterdrückung der Elektronenemission nahezu unverändert bleibt. [9]

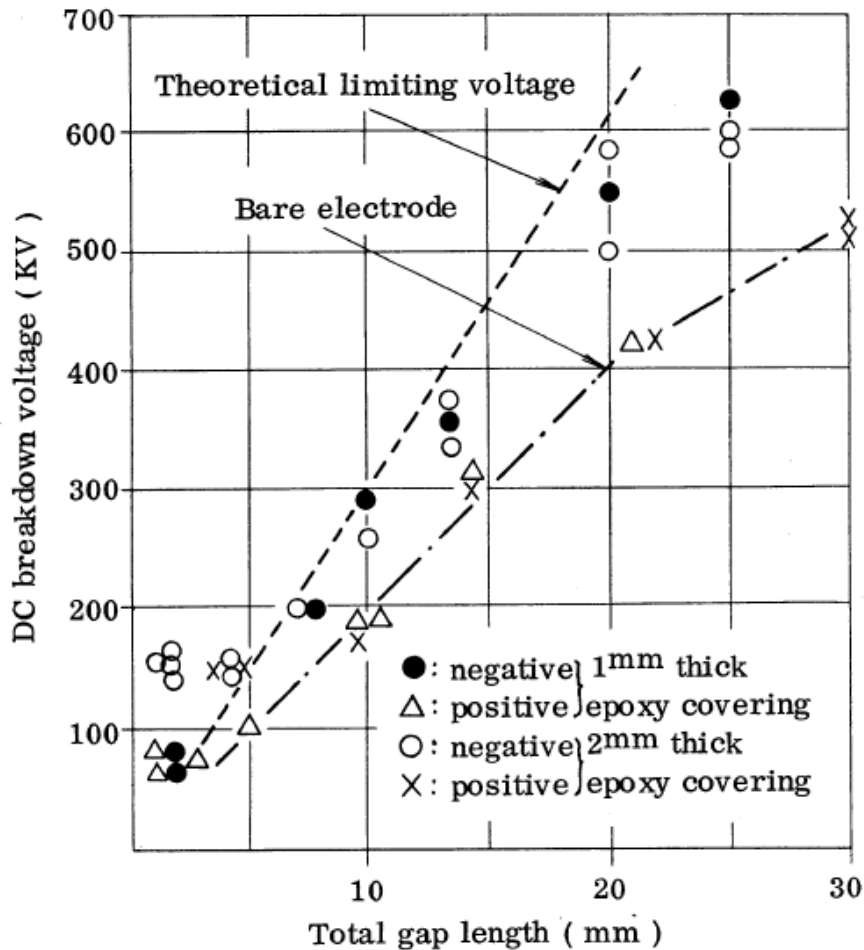


Abbildung 22: Auswirkung, wenn eine Elektrode mit Epoxid beschichtet wird, auf die Durchschlagsspannung [25]

Im Wechselspannungsfall ist die Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit bei rauen Elektroden höher als bei stark polierten. Weiters spielt eine Beschichtung auf der äußeren Elektrode keine große Rolle und die höchste Durchschlagsspannung wird in einer Reihe von Versuchen immer beim ersten dieser Versuchsreihe erzielt. [26]

4.3.2.2 Auswirkung der Beschichtung auf die Ladungsaufnahme von Partikeln

In der Literatur werden viele unterschiedliche Materialien genannt, die zur Beschichtung einer Elektrode verwendet werden. Diese haben eine weite Bandbreite an physikalischen Eigenschaften (Widerstand, Dielektrizitätszahl, etc.). Einige Autoren schreiben, dass die Erhöhung der Durchschlagsspannung nur auf die Modifikation der Elektronenemission zurückzuführen und diese somit unabhängig von den physikalischen Eigenschaften und der Dicke der Beschichtung ist. Im Gegenzug dazu, gibt es Autoren, die dem Widerstand der Beschichtung eine große Rolle zu schreiben. Die Durchschlagsfestigkeit wird laut diesen durch den Widerstand der Beschichtung beeinflusst, da dieser die Aufladung von Staub, der sich auf der Beschichtung befindet, steuert und somit auch dessen Fähigkeit als Elektronenemitter zu fungieren. [26]

Maßnahmen gegen Partikeleinfluss

Die Beschichtung auf einer Elektrode verhindert, dass ein Partikel direkt geladen wird, wenn ein elektrisches Feld vorhanden ist. Es gibt jedoch andere Mechanismen, die eine Aufladung des Partikels ermöglichen. Diese sind:

- Ladungsträgertransport durch die Beschichtung
- Teilentladungen zwischen dem Partikel und der Beschichtung
- Die Aufnahme von Ladungsträgern, die bereits auf der Beschichtung ruhen. [26] [27]

Der Transport von Ladungsträgern ist ein sehr langsamer Prozess und spielt daher im Wechselspannungsfall keine Rolle. Die lift-off-Feldstärke weist, wie in Abbildung 23 ersichtlich ist, eine starke Gasdruckabhängigkeit auf. [26] [27] Abbildung 24 zeigt sowohl die Abhängigkeit der lift-off-Feldstärke als auch die Abhängigkeit der Einsetzfeldstärke für Teilentladungen vom Druck. Beide steigen ebenfalls mit höher werdendem Druck. Laut [9] lassen sich beobachtete Effekte wie:

- Leuchterscheinungen rund um die Kontaktstelle des Partikels mit der Beschichtung
- Die Druckabhängigkeit der lift-off-Feldstärke und Einsetzfeldstärke von Teilentladungen

durch Teilentladungsberechnungen erklären. Ein Zusammenhang zum Transport von Ladungsträgern durch die Beschichtung konnte nicht gefunden werden. Das lässt den Schluss zu, dass ein Partikel Ladungsträger nur durch Teilentladungen aufnimmt. Dieser Prozess ist unter Punkt 4.3.2.3 beschrieben. Weiters zeigen Abbildung 23 und Abbildung 24 den Vergleich zwischen einer beschichteten und einer nicht beschichteten Elektrode. Es ist zu sehen, dass die lift-off-Feldstärke bei einer beschichteten Elektrode bei atmosphärischem Druck um ca. den doppelten Wert größer ist als bei der nicht beschichteten. [26]

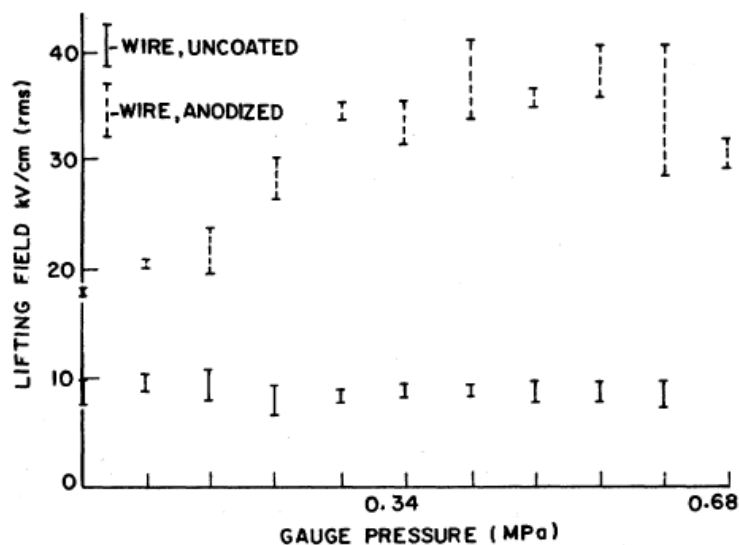


Abbildung 23: Effekt einer Beschichtung (eloxiertes Aluminium) auf die lift-off-Feldstärke [26]

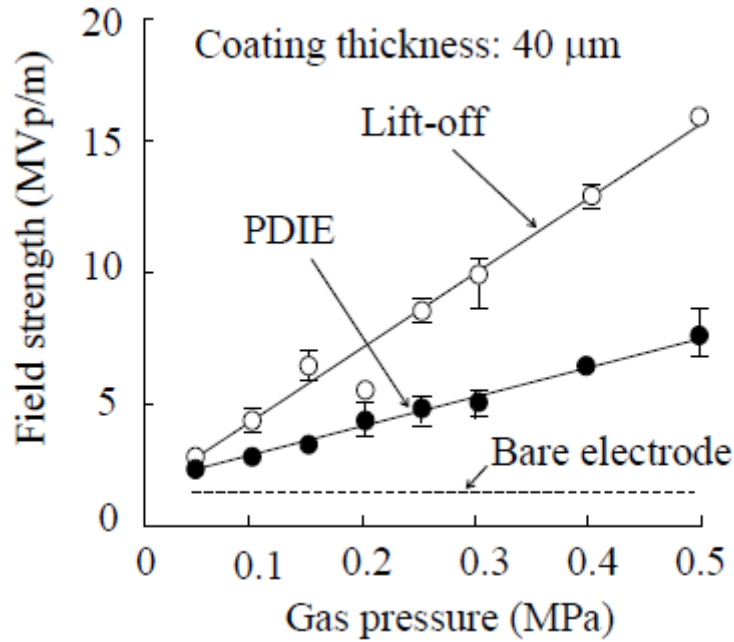


Abbildung 24: Abhängigkeit der Teilentladungseinsetzfeldstärke und lift-off-Feldstärke vom Druck unter Wechselfspannung [9]

Im Gleichspannungsfall zeigt die lift-off-Feldstärke eine Gasdruckabhängigkeit ähnlich jener bei Wechselfspannung. Obwohl Ladung durch die Beschichtung transportiert wird, wurde der Literatur nach in keinem Laborversuch ein Abheben eines Partikels durch diesen Mechanismus festgestellt. Das legt nahe, dass Partikel keine Ladung durch Ladungstransport durch die Beschichtung erhalten sondern durch Teilentladungen. [9] Jedoch entsteht bei anliegender Gleichspannung auf der Beschichtung eine Oberflächenladung, die selbst nach dem Abschalten der Spannung noch mehrere Minuten vorhanden ist und nur langsam verfällt. [26]

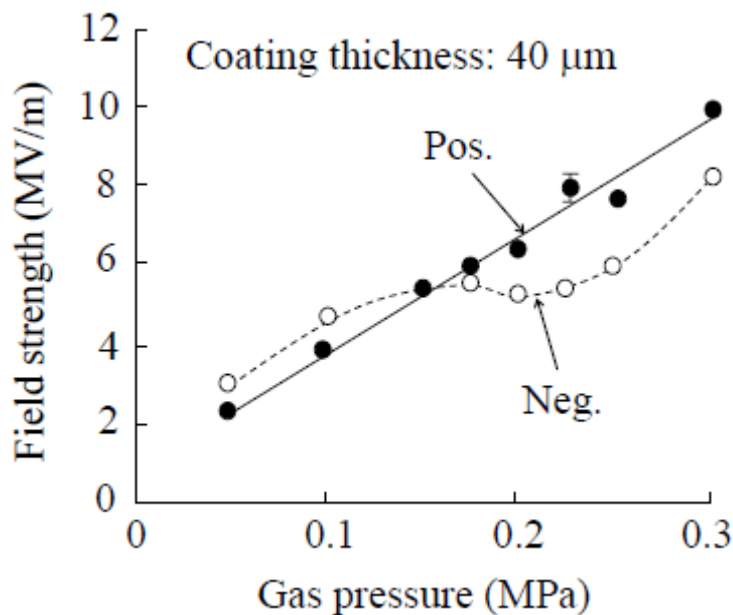


Abbildung 25: Abhängigkeit der lift-off-Feldstärke vom Gasdruck bei Gleichspannung [9]

4.3.2.3 Ladungsaufnahme durch Teilentladungen

Ruht ein Partikel auf einer Beschichtung und ein elektrisches Feld ist vorhanden, so wird das Partikel polarisiert. Die lokale Feldstärke zwischen dem Partikel und der Elektrode wird nun um einiges höher. Die Feldverteilung unter dem Partikel hängt von der Dicke der Beschichtung und deren Dielektrizitätszahl ab. Die Feldstärkenerhöhung verursacht eine Kraftwirkung auf das Partikel in Richtung der Beschichtung. Aus diesem Grund ist auch die Abhebefeldstärke des Partikels höher. [27]

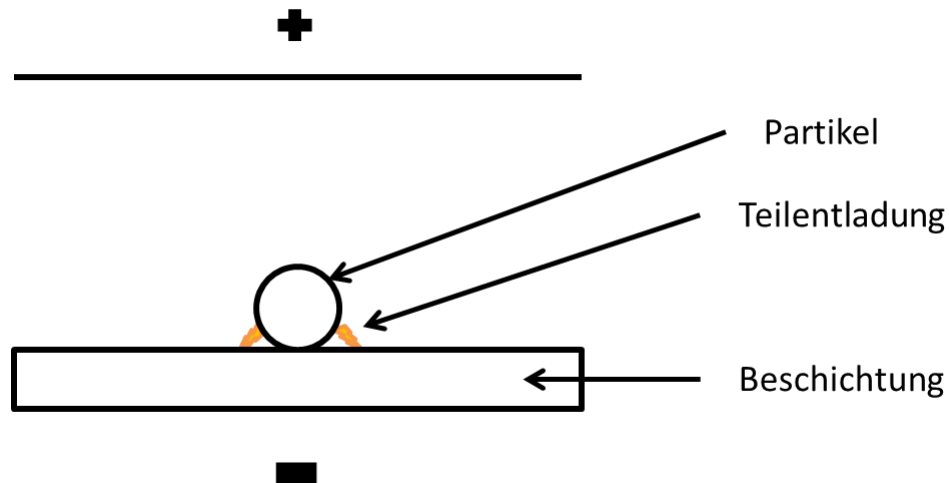


Abbildung 26: Kugelförmiges Partikel auf einer Beschichtung

Wenn die lokale Feldstärke hoch genug ist, kommt es zu einer Teilentladung im keilförmigen Bereich unter dem Partikel. Nach dem Paschen Gesetz kommt es nicht am Ort der höchsten Feldstärke, dem Kontaktpunkt, zur Entladung sondern in einem Bereich, in dem die Potentialdifferenz groß genug ist, damit eine Entladung vorkommen kann. Kommt es zur Teilentladung nimmt das Partikel einen Ladungswert q auf, die Beschichtung wird mit einer Ladung q mit anderem Vorzeichen geladen. Nach dem Coulombschen Gesetz wirkt nun eine Kraft $q \cdot E$ in Aufwärtsrichtung auf das Partikel. Die Anziehungskraft zur Beschichtung verliert ebenfalls ihre axiale Symmetrie. Somit fängt das Partikel an sich seitwärts zu bewegen. Im Wechselspannungsfall verstärkt die Ladung des Partikels die lokale Feldstärke, wenn das Feld sein Vorzeichen wechselt. Somit werden weitere Teilentladungen begünstigt. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis das Partikel genug Ladung aufgenommen hat um abheben zu können. [27]

5 Partikelfallen

5.1 Partikelfallen unter Wechsellspannung

Eine Partikelfalle stellt im Prinzip einen feldschwachen Raum in der gasisolierten Leitung dar. Wie in Kapitel 2.2 bereits beschrieben beschreibt ein Partikel bei anliegender Wechsellspannung eine Auf- und Abwärtsbewegung, bei der nicht zwangsweise der komplette Weg zum Leiter vollzogen wird. Als Partikelfalle kommt somit eine Konstruktion am Boden der Kapselung in Frage, die einen künstlichen, feldschwachen Raum schafft, um Partikel dauerhaft einzufangen. Ist ein Partikel einmal in diesem feldschwachen Bereich, so reicht die Coulombsche Kraftwirkung nicht mehr aus, um das Partikel aus der Partikelfalle zu befreien. Abbildung 27 zeigt ein Beispiel für eine durchgehende Partikelfalle.

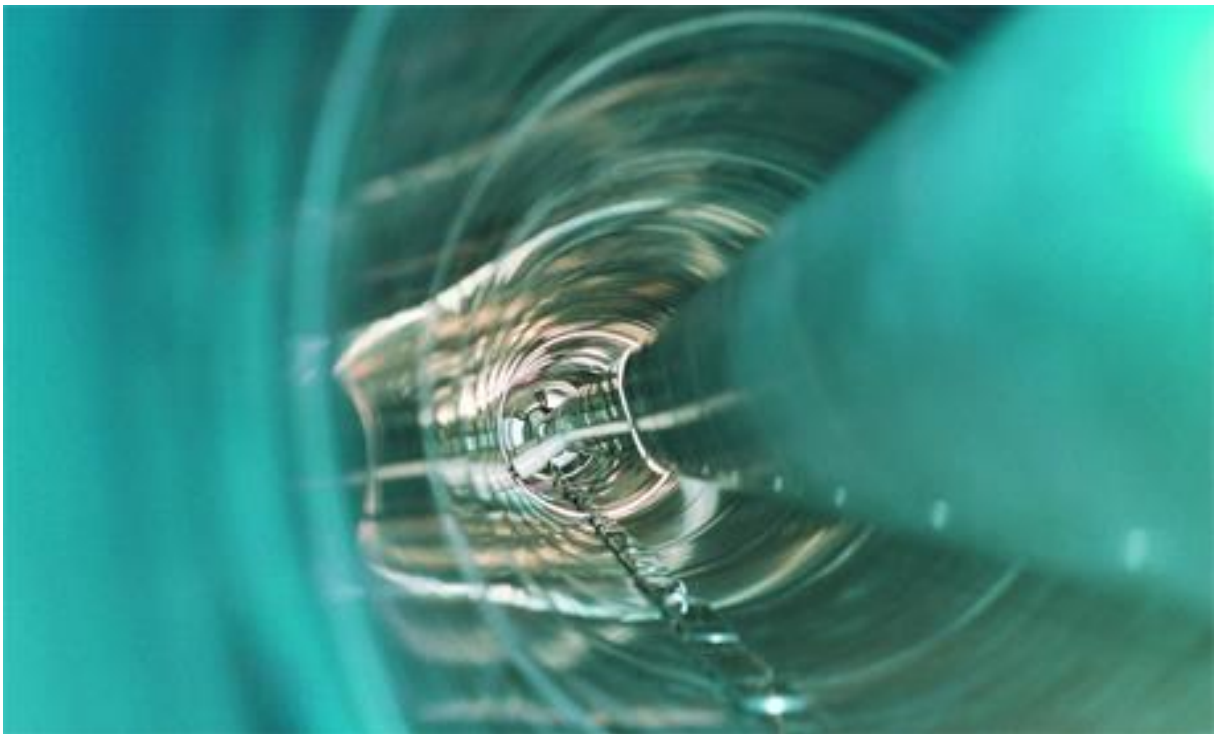


Abbildung 27: Gasisolierte Leitung mit Partikelfalle am Boden der Kapselung [28]

Eine weitere Möglichkeit wird durch eine zylinderförmige Konstruktion um einen Stützisolator erzielt, der leitend mit der Kapselung verbunden ist. Das Innere dieses Zylinders ist mit Schlitzen versehen und schafft ebenfalls einen künstlichen feldschwachen Raum. Partikel werden im Zuge der Konditionierung in diesen Raum bewegt und bleiben somit gefangen. In Abbildung 28 ist das Prinzip einer solchen Partikelfalle zur Verdeutlichung dargestellt.

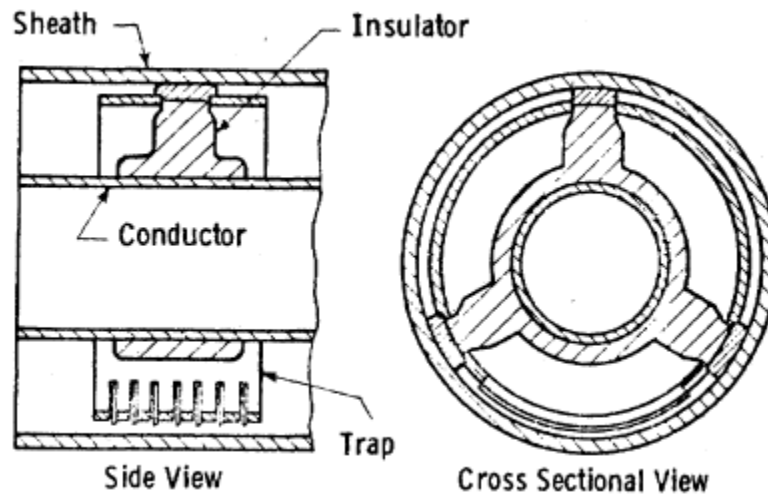


Abbildung 28: Partikelfalle an einem Stützisolator [29]

5.2 Partikelfallen unter Gleichspannung

Die gasisolierte Leitung für hohe Gleichspannungen ist noch nicht in großtechnischem Einsatz. Daher gibt es in der Literatur auch keine Informationen zu Partikelfallen für Gleichspannungsanwendungen, außer dem bereits in Kapitel 4.3.1.1 beschriebenen particle-driver. Es ist jedoch denkbar, dass sowohl für positive also auch für negative Polarität Maßnahmen vorgesehen werden müssen.

5.3 Vergleich zwischen Wechsel- und Gleichspannung

Ein direkter Vergleich zwischen den Maßnahmen ist nicht möglich, da es für Partikelfallen unter Gleichspannung keine Literatur gibt. Da sich die Polarität bei Wechselspannung mit Netzfrequenz ändert, ist eine konstruktive Maßnahme zur Schaffung eines feldschwachen Raumes ausreichend. Im Fall von Gleichspannung ist jedoch denkbar, dass für beide mögliche Polaritäten eine eigene Maßnahme gefunden werden muss.

6 Stand der Technik von Partikelsimulationen

6.1 Charge Simulation Methode (CSM)

Bei der Charge Simulation Methode (CSM) wird das elektrische Feld im gewünschten Bereich durch diskrete Ladungen geformt, die außerhalb des Bereichs platziert werden. Die Werte der Ladungen sind so definiert, dass Randbedingungen an sg. Konturpunkten erfüllt sind. Sobald die Ladungswerte und Positionen der diskreten Ladungen bekannt sind, kann das Potential und die Feldverteilung überall im betrachteten Bereich berechnet werden. Sind mehrere diskrete Ladungen (zB. Punkt-, Linien- oder Ringladungen) vorhanden, kann das Potential eines Punktes C, sofern dieser nicht auf einer der diskreten Ladungen liegt, durch Superposition berechnet werden. [30]

$$\phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot Q_j \quad (6.1)$$

ϕ_i ...Potential am Punkt i

P_{ij} ...Potentialkoeffizient

Q_j ...Wert der diskreten Ladung

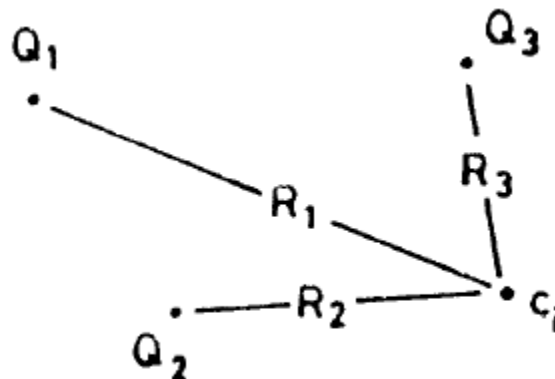


Abbildung 29: Beispiel der CSM mit drei diskreten Ladungen [30]

Das Potential des Punktes c_i aus Abbildung 29 kann über Formel 6.2 berechnet werden.

$$\phi_i = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{Q_3}{4\pi\epsilon_0 R_3} = P_{1i}Q_1 + P_{2i}Q_2 + P_{3i}Q_3 \quad (6.2)$$

Wie bereits erwähnt, werden die Ladungen außerhalb des betrachteten Bereiches bzw. innerhalb einer Äquipotentialfläche, wie im Fall einer Elektrode, platziert. Wird der Punkt c_i auf eine Elektrodenoberfläche gelegt, ist sein Potential gleich dem Potential des Leiters.

Wenn diese Prozedur auf m Konturpunkte angewandt wird, führt das zu einem linearen System von m Gleichungen für n Unbekannte. [30]

$$\begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Nachdem das Gleichungssystem aus 6.3 gelöst ist, muss sichergestellt werden, dass die berechneten Ladungen auch die vorgegebenen Randbedingungen auf den Elektrodenoberflächen erfüllen. Die Genauigkeit kann durch Erhöhen der Anzahl an diskreten Ladungen verbessert werden oder durch Veränderung von deren Position und Typ bzw. durch Ändern der Position der Konturpunkte. Sobald das System zufriedenstellende Ergebnisse liefert, können das Potential und die Feldstärke außerhalb der Elektroden berechnet werden. Das Potential ergibt sich nach Gleichung 6.1, die Feldstärke kann in jeder Richtung nach folgender Formel berechnet werden. [30]

$$E_i = \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial x} Q_j \right] \vec{e}_x + \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial y} Q_j \right] \vec{e}_y + \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial z} Q_j \right] \vec{e}_z \quad (6.4)$$

Sollten freie Potentiale (wie im Fall eines Partikels) vorhanden sein, wird das Gleichungssystem so verändert, dass die Zusatzbedingungen erfüllt werden. Hat das freie Potential eine Ladung, so muss die Summe der diskreten Ladungen dieser entsprechen. [30]

Wohlmuth hat im Jahr 1996 in seiner Arbeit das Simulationsprogramm PIGIS (Partikel in GIS) entwickelt, das ein bestehendes Feldberechnungsprogramm in PIGIS integriert. Basierend auf der CSM ist es durch Eingriff in die Matrixstruktur möglich, die Bewegung der Partikel zu simulieren. Die Realisierung erfolgt über ein Hauptprogramm und zwei Unterprogramme. Abbildung 30 zeigt den Ablauf des Hauptprogramms. Die Unterprogramme Teilentladung und Durchschlag werden in Abbildung 31 dargestellt. Im Hauptprogramm erfolgt in jedem Durchlauf eine elektrostatische Feldberechnung, um die Kräfte auf das Partikel zu bestimmen. Diese sind abhängig von der Position, der Ladung und dem Momentanwert der Spannung. Mit dem Unterprogramm Teilentladung wird das Auftreten von diesen simuliert und deren Rückwirkung auf die Partikelladung berücksichtigt. Anschließend wird die Bewegungsgleichung des Partikels gelöst und somit dessen neue Position bestimmt. Somit ändert sich im nächsten Zeitschritt die Position der Ersatzladungen und der Konturpunkte des Partikels. Das Durchschlagskriterium bei Kontakt mit dem Innenleiter wird mit dem zweiten Unterprogramm überprüft. Tritt ein Durchschlag auf, wird die Simulation abgebrochen und die Ergebnisse ausgegeben. Die Simulationsdauer ist durch die Anzahl der Schritte und die Schrittweite bestimmt. [3]

Stand der Technik von Partikelsimulationen

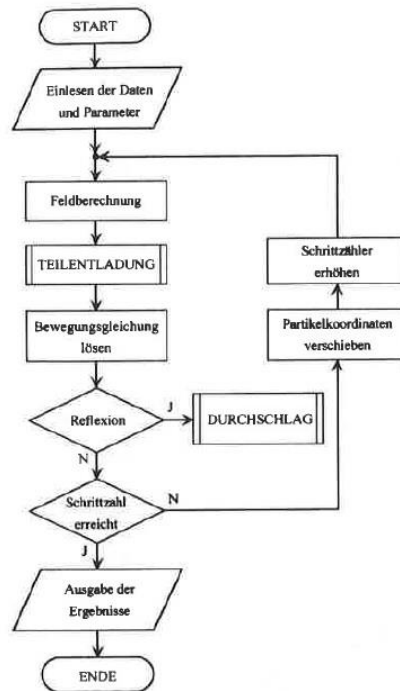


Abbildung 30: Ablauf des Hauptprogramms [3]

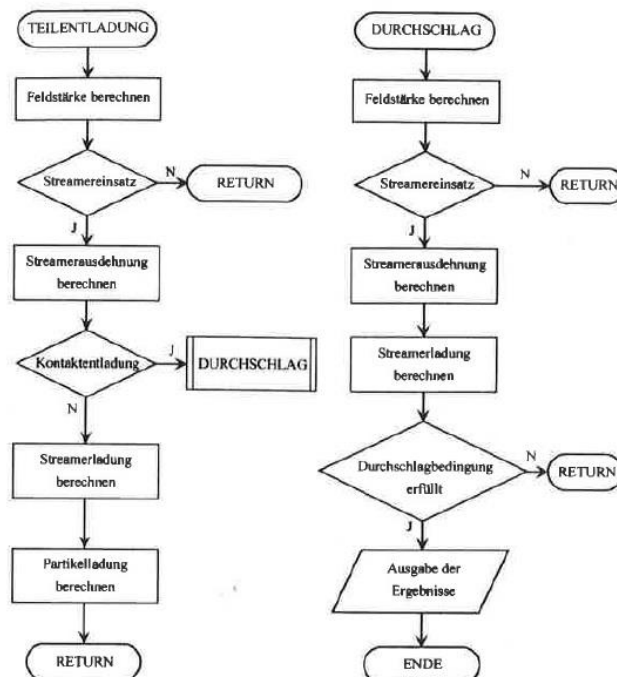


Abbildung 31: Ablauf der Unterprogramme Teilentladung und Durchschlag [3]

Zu Beginn des Programms werden die erforderlichen Daten eingegeben. Diese sind:

- Die Geometriedaten der Anordnung und des Partikels
- Die Diskretisierungsdaten (Art, Anzahl und Verteilung der Ersatzladungen)
- Die Randbedingungen (Potentiale der Elektroden, Ladung des Partikels) [3]

6.2 Monte Carlo Methode

Ein Ansatz, um die Zufälligkeit der Partikelbewegung zu berücksichtigen, ist in einer Simulation die Achsenlage des Partikels um einen Winkel zu verändern. Ausgehend davon, dass sich der Winkel um weniger als einen gewissen Winkel ϕ ändert, wird um die vertikale Achse der Winkel $\phi/2$ aufgespannt. Eine durch die Monte-Carlo Methode generierte Zufallszahl zwischen Null und eins wird mit dem Winkel ϕ skaliert. So ergibt sich die neue Ausrichtung des Partikels. Dieser Vorgang wird neben den bekannten Bewegungsgleichungen am Ende jedes Zeitschrittes durchgeführt. Somit ist es möglich, eine Bewegung in axialer Richtung zu erhalten. Die bekannten Bewegungsgleichungen ergeben nur eine radiale Positionsänderung. Die Lösung der gesamten Simulation erfolgt in einem C-Programm. [31]

Eine weitere Möglichkeit für den Einsatz der Monte-Carlo Methode ist die Berücksichtigung der Rauigkeit der Elektrodenoberfläche. Hierfür wird angenommen, dass bei einer Kollision mit der Elektrode ein Partikel nicht mit einem fixen Winkel reflektiert wird sondern der Reflexionswinkel einer gewissen Zufälligkeit unterliegt. Diese wird wiederum mit einer Zufallszahl zwischen Null und eins sowie der Multiplikation mit dem Winkel erzeugt. In derselben Arbeit haben die Autoren auch Fluktuationen der Spannungsversorgung über die Monte-Carlo Methode berücksichtigt. [32]

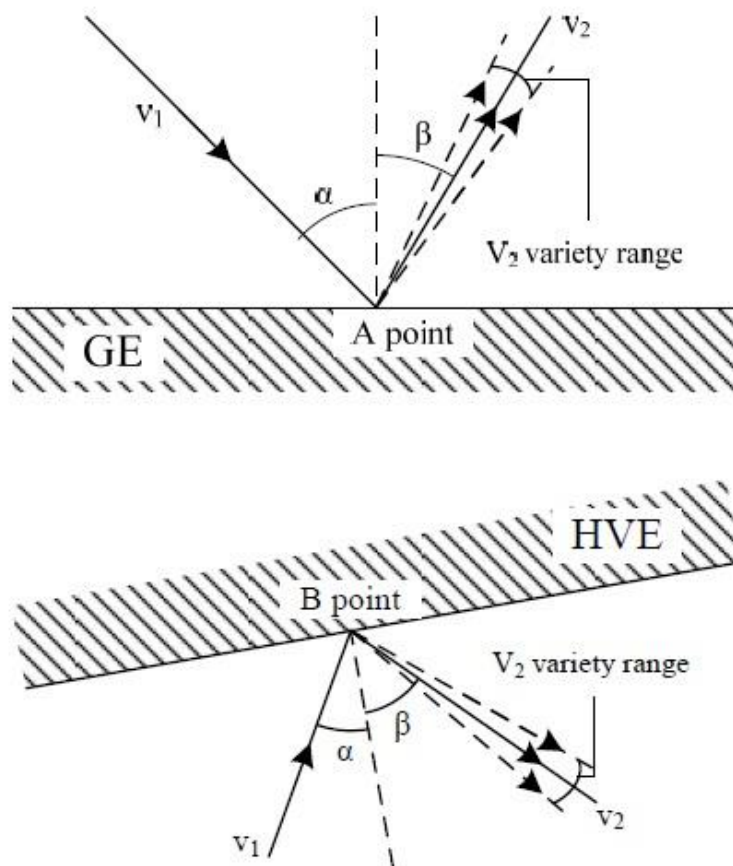


Abbildung 32: Einsatz der Monte-Carlo Methode bei Kollision mit einer Elektrode [32]

7 Simulation von Partikelbewegungen

Die Simulation von Partikelbewegungen wird mit COMSOL Multiphysics in der Version 4.4 durchgeführt. COMSOL Multiphysics ist, wie der Name schon sagt, ein Simulationsprogramm für multiphysikalische Problemstellungen mit der Zielsetzung, so viele Themenbereiche wie möglich in einem Programm simulieren zu können sowie diverse Vorgänge und Effekte auch miteinander zu koppeln.

7.1 Grundsätzliche Überlegungen

Die Untersuchung eines frei beweglichen Partikels in einem gasisolierten System benötigt neben der Geometrie noch die Randbedingungen für das elektrische Feld und die Bewegungsgleichungen des Partikels, um eine Simulation zu ermöglichen. Somit ergeben sich die grundlegenden Anforderungen an die Simulation:

- Erstellen/Importieren der Geometrie
- Randbedingungen zur Beschreibung des elektrischen Felds aufstellen
- Bewegungsgleichungen des Partikels implementieren

COMSOL bietet eine Reihe vorgefertigter Physikmodule an, um diverse Simulationsziele zu erreichen. Die Simulation der Partikelbewegung und die daraus folgenden Partikeltrajektorien werden mit den Modulen "Elektrostatics" (es) und "Charged particle tracing" (cpt) durchgeführt. Aufgrund einiger Limitierungen der Simulationssoftware müssen einige Vereinfachungen durchgeführt werden:

- Kein Unterschied zwischen positiver und negativer Gleichspannung
- Rauheit der Elektrodenoberflächen wird vernachlässigt
- Partikel wird als Massenpunkt angenommen
- Feldstärkenerhöhung an den Partikelenden können nicht berücksichtigt werden
- Teilentladungen können nicht simuliert werden

Durch die Vereinfachungen ist es möglich, eine ideale Partikelbewegung zu simulieren.

7.2 Simulation mit COMSOL Multiphysics

7.2.1 Nachbildung der Geometrie

Die Geometrie wird mit den Abmessungen aus Tabelle 2 nachgebildet. Die Länge der Geometrie wird der Einfachheit halber mit 25 cm gewählt. Dazu bietet COMSOL die Möglichkeit, einfache geometrische Körper, wie Zylinder, zu erstellen. Die Nachbildung des Leiters und der Kapselung wird mit solchen Zylindern erzielt. Da jedoch nur der mit SF₆ gefüllte Bereich, in dem ein elektrisches Feld vorhanden ist, für die Partikelbewegung von Interesse ist, wird dieser Bereich über Subtraktion der Zylinder erstellt. Der Hohlleiter wird

Simulation von Partikelbewegungen

aufgrund der Feldfreiheit als Vollleiter modelliert. Als Material wird Luft gewählt, da SF_6 in der Materialbibliothek nicht vorhanden ist. Die Permittivität von Luft wird durch jene von SF_6 ersetzt. In Abbildung 33 ist die grundlegende Geometrie für die nachfolgende Simulation dargestellt.

	Innendurchmesser	Außendurchmesser
	mm	mm
Leiter	160	180
Kapselung	490	496/498,5

Tabelle 2: Abmessungen eines Versuchsaufbaus

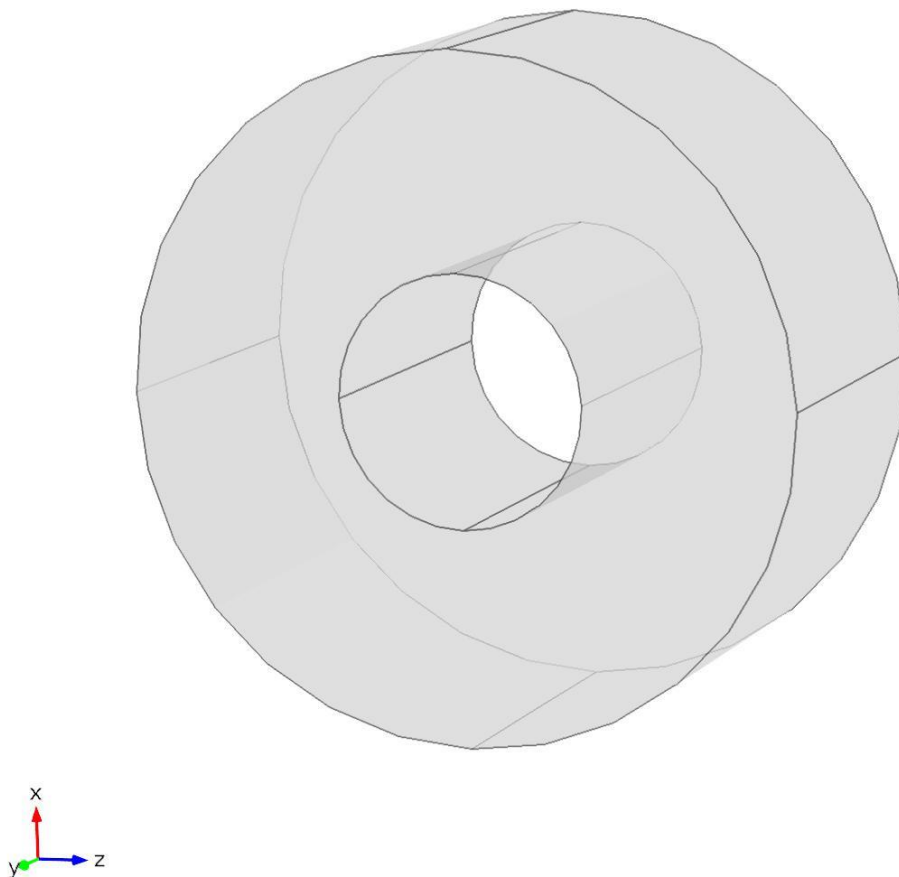


Abbildung 33: Grundgeometrie in COMSOL

7.2.2 Berechnung des elektrischen Felds

Das elektrische Feld lässt sich auf sehr einfache Art berechnen. Auf der Geometrie aus Abbildung 33 werden die Randbedingungen definiert. Neben den standardmäßig vorhandenen Randbedingungen (Neumannsche Randbedingungen an den "offenen" Seiten des Rohrleiters) muss eine Randbedingung Potential mit der gewünschten Spannung auf den Elektrodenflächen des Innenleiters definiert werden und die Kapselung muss über die Randbedingung Erdung als Erdpotential ausgewählt werden. Somit ergibt sich ein radiales Feldbild, wie es in Abbildung 34 dargestellt wird. Die berechneten Werte der Feldstärke stimmen mit einer analytischen Vergleichsrechnung sehr gut überein.

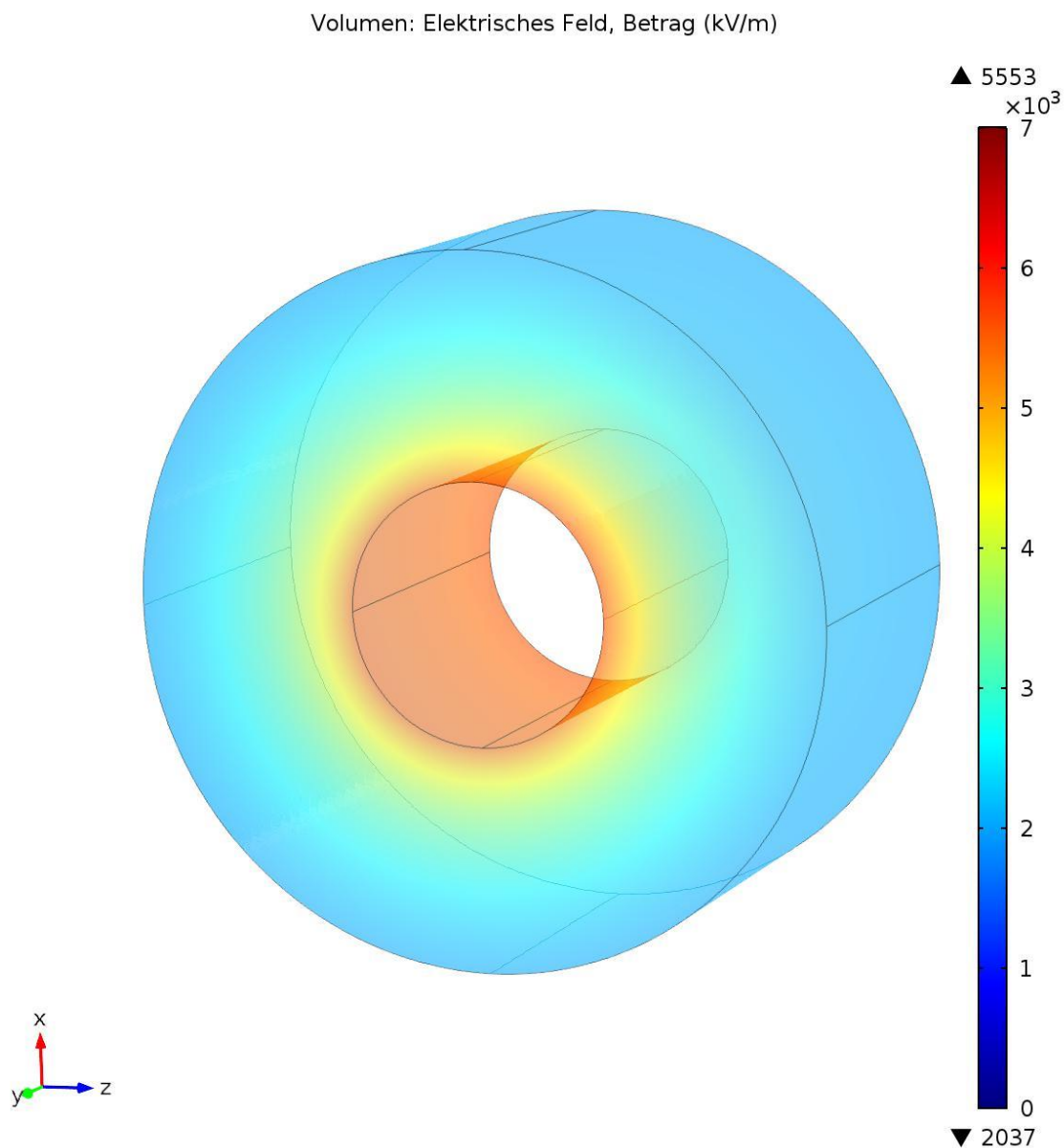


Abbildung 34: Elektrisches Feld der zylinderförmigen Anordnung

7.2.3 Nachbildung eines Partikels und Definition der Bewegungsgleichungen

Wie in den Vereinfachungen bereits erwähnt, wird das Partikel als ein Massenpunkt nachgebildet. Diese Annahme ermöglicht den Einsatz des "Charged particle tracing" Moduls zur Simulation der Partikelbewegung. Es wird ein zylinderförmiges Partikel mit Länge l und Durchmesser d verwendet. Die Masse ergibt sich nach Gleichung 7.1:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{(d^2)}{4} \cdot \pi \cdot l \quad (7.1)$$

ρ ...Dichte des Materials (für Kupfer $\rho=8920\text{kg/m}^3$)

V ...Volumen

d ...Durchmesser des Partikels

Die aufgenommene Ladung ergibt sich, abhängig von der Feldstärke und Ausrichtung des Partikel, nach den Formeln aus Tabelle 1.

Da die Simulation den vorherrschenden Druck von 0,4 MPa in der Kraftwirkung der dynamischen Viskosität berücksichtigt, muss die Dichte des SF_6 umgerechnet werden und ergibt sich nach den Gleichungen 7.2 und 7.3 zu $23,97 \text{ kg/m}^3$.

$$\rho = \frac{P}{R_s \cdot T} \quad (7.2)$$

$$R_s = \frac{R}{M} \quad (7.3)$$

ρ ...Dichte von SF_6

p ...Druck (4 bar)

T ...Temperatur in Grad Kelvin

R_s ...spezielle Gaskonstante von SF_6 ($56,925 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)

R ...universelle Gaskonstante ($8,3145 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

M ...Molmasse von SF_6 (146 g/mol)

Weiters wird die Oberfläche des Partikels benötigt. Somit sind alle Parameter, die für die Bewegungsgleichungen benötigt werden, bekannt und können formuliert werden. Bei der Implementierung muss noch eine Aufteilung der Formel in x-, y- und z-Richtung vorgenommen werden. Weiters muss sichergestellt sein, dass die Kraft durch die Viskosität des Gases immer entgegen der Bewegungsrichtung wirkt. Gleichung 7.4 beschreibt die Bewegung in positiver z-Richtung (nach oben). Bei der Betrachtung der anderen Richtungen fällt der Term $m_p \cdot g$ weg, da die Gravitationskraft nur in z-Richtung wirken soll.

Simulation von Partikelbewegungen

$$\frac{d(m_p \cdot v_p)}{dt} = F_e - \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_g \cdot v_p^2 - m_p \cdot g \quad (7.4)$$

- c_w ...Widerstandsbeiwert
- A ...Fläche des Partikels
- ρ_g ...Dichte von SF₆
- v_p ...Partikelgeschwindigkeit

Die Richtung der Kraftwirkung der Kraft F_e , die durch das elektrische Feld herrührt, kommt aus der aufgenommenen Ladung und muss daher nicht beeinflusst werden. Jene durch die Viskosität des Gases wird über den Operator $\text{sign}(v_p)$ entgegen der Bewegungsrichtung des Partikels vorzeichenrichtig angenommen, sodass die Bewegung gedämpft wird. Die Richtung der Gravitationskraft wirkt immer in negativer z-Richtung. Daher wirkt diese Kraft in positiver z-Richtung dämpfend und in negativer beschleunigend.

Das "Charged particle tracing" Modul bietet den Unterpunkt "Kräfte". Dieser ermöglicht es, Kräfte auf das Partikel in Form von Formeln zu definieren. Hier kommen die bekannten Bewegungsgleichungen für x-, y-, und z-Richtung zum Einsatz. In COMSOL implementiert sehen die Bewegungsgleichungen folgendermaßen aus.

$$\frac{dm_p \cdot v_x}{dt} = ((\log(L/rp) - 0.5)/(\log(2 * L/rp) - 1)) * elemq * Z_Partikel * es.Ex - 0.5 * cw * A * rhog * ((cpt.vx)^2) * \text{sign}(cpt.vx) \quad (7.5)$$

$$\frac{dm_p \cdot v_y}{dt} = ((\log(L/rp) - 0.5)/(\log(2 * L/rp) - 1)) * elemq * Z_Partikel * es.Ey - 0.5 * cw * A * rhog * ((cpt.vy)^2) * \text{sign}(cpt.vy) \quad (7.6)$$

$$\frac{dm_p \cdot v_z}{dt} = ((\log(L/rp) - 0.5)/(\log(2 * L/rp) - 1)) * elemq * Z_Partikel * es.Ez - mass * grav - 0.5 * cw * A * rhog * ((cpt.vz)^2) * \text{sign}(cpt.vz) \quad (7.7)$$

- m_p ...Masse des Partikels
- v ...Geschwindigkeit des Partikels (Index steht für die Richtungskomponente)
- $elemq$... Name der Variable für die Elementarladung
- Z ...Ladungszahl des Partikels
- $es.Ex$...Name der Variable für die elektrische Feldstärke in x-Richtung
- $rhog$... Name der Variable Dichte von SF₆
- $cpt.vx$... Name der Variable für die Geschwindigkeit in x-Richtung

Simulation von Partikelbewegungen

Die Verwendung des Moduls ist grundsätzlich für die Simulation von Elektronen/Ionen gedacht. Daher steht in den Partikeleigenschaften für die aufgenommene Ladung nur der Parameter Ladungszahl zur Verfügung. Da die Ladungszahl und die aufgenommene Ladung des Partikels über folgende Gleichung in Zusammenhang stehen

$$q_p = Z \cdot e, \quad (7.8)$$

ist es leicht möglich, den benötigten Wert zu erhalten. Die Konstante e steht dabei für die Elementarladung von $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Um eine Simulation durchführen zu können, werden noch die Anfangswerte der Ladungszahl benötigt. Diese Werte werden mit einem Matlab-Skript für Aluminium- und Kupferpartikel mit unterschiedlichen Längen berechnet.

7.2.4 Mechanische Reflexion an einer Elektrode und Umladevorgang

Im "Charged particle tracing" Modul muss für die Implementierung der mechanischen Reflexion mit einer Elektrode eine Randbedingung (wall...Wand) hinzugefügt werden. Diese bietet die Möglichkeit einzustellen, was mit dem Partikel bei Kollision mit dieser Wand passiert. An den Flächen des Leiters und der Kapselung wird das Partikel nach Formel 2.11 reflektiert. Der Stoßkoeffizient wird nach [3] zwischen 0,5 – 0,8 gewählt. Sollte das Partikel den zu simulierenden Teil der gasisolierten Leitung in axialer Richtung verlassen, wird an den offenen Enden ebenfalls eine Randbedingung definiert, an der das Partikel verschwindet anstatt reflektiert zu werden. Die Reflexion und das Verschwinden des Partikels sind Auswahlmöglichkeiten der Randbedingung "Wand" im Fall eines Kontakts zwischen Wand und Partikel. Kommt es im Zuge der Partikelbewegung zum Kontakt mit einer der in Abbildung 35 und Abbildung 36 markierten Flächen, kommt es je nach ausgewählter Option zur Reflexion nach Formel 2.11 für x-, y- und z-Richtung bzw. wird das Partikel verschwinden.

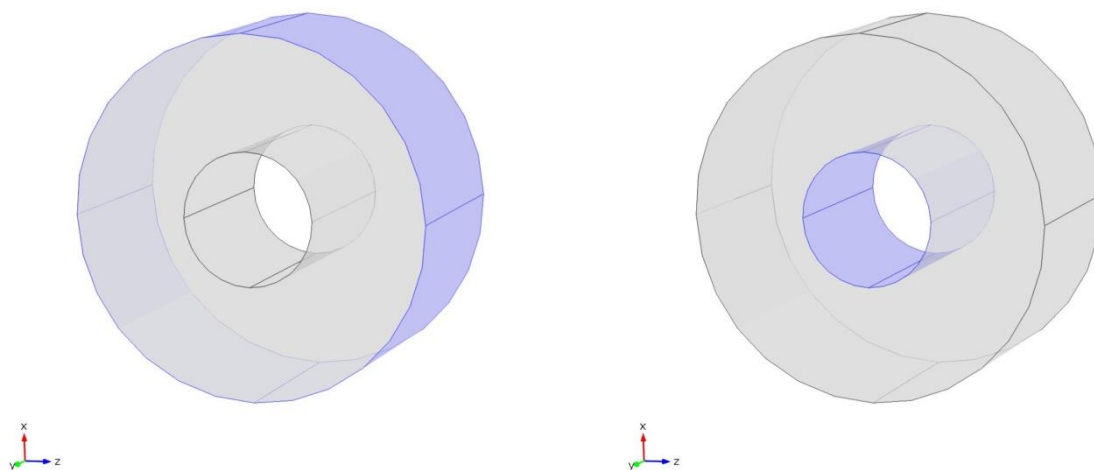


Abbildung 35: Randbedingungen für mechanische Reflexion auf Kapselung und Leiter

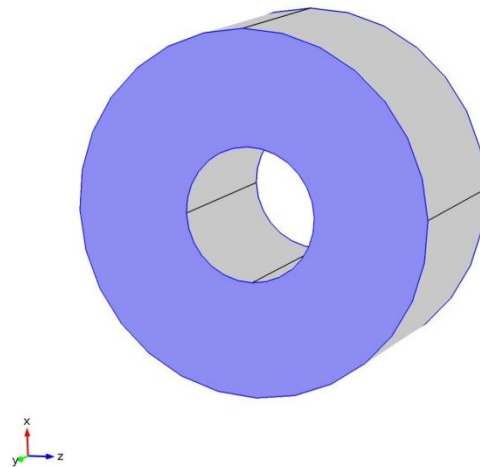


Abbildung 36: Randbedingungen an den offenen Enden für Verschwinden des Partikels

Im Zuge der Kollision erfolgt bekanntlich ein Ladungsaustausch mit der Elektrode. Die bereits für die Reflexion verwendete Randbedingung kann ebenfalls in einem Unterpunkt einer abhängigen Hilfsvariablen einen neuen Wert zuweisen. Diese Hilfsvariable beinhaltet lediglich den Wert der Ladungszahl Z und ist daher einheitslos. Somit muss die Formel für die Ladungsaufnahme nach Gleichung 7.8 modifiziert werden. Bekanntlich nimmt ein Partikel bei Kontakt mit einer Elektrode immer eine gleichnamige Ladung auf. Um dies in Abhängigkeit des Vorzeichens der Spannung zu realisieren, kommt wieder der sign-Operator zum Einsatz. In COMSOL formuliert sehen die Gleichungen für die Ladungszahl bei Kontakt mit dem Leiter und der Kapselung folgendermaßen aus:

$$Z = \left(\frac{1}{\text{elemq}} \right) * \left(\pi * \text{epsilon0_const} * 1.0006 * L^2 * \text{es.normE} \right) / \left(\log(2L/rp) - 1 \right) * \text{sign}(\text{es.V0}) \quad (7.9)$$

$$Z = \left(-\frac{1}{\text{elemq}} \right) * \left(\pi * \text{epsilon0_const} * 1.0006 * L^2 * \text{es.normE} \right) / \left(\log(2L/rp) - 1 \right) * \text{sign}(\text{es.V0}) \quad (7.10)$$

π	...Kreiszahl π
epsilon0_const	...Permittivität von Vakuum
rp	...Radius des Partikels
L	...Länge des Partikels
es.normE	... Name der Variable für den Betrag der elektrischen Feldstärke
es.V0	... Name der Variable für den aktueller Wert der Spannung

Gleichung 7.9 definiert die Ladungszahl des Partikels nach dem Kontakt mit dem Leiter, Gleichung 7.10 jene nach Kontakt mit der Kapselung, wobei hier das negative Vorzeichen sicherstellt, dass die Ladung gleichnamig mit jener der Elektrode ist.

7.3 Simulationsergebnisse

Wie bereits in Kapitel 7.2.3 erwähnt, werden sämtliche benötigten Partikelparameter wie Masse, Oberfläche, Abhebefeldstärke und –ladung in einem Matlab-Skript berechnet, um die notwendigen Anfangswerte der Simulation schnell zur Verfügung zu haben. Simuliert werden Aluminium- und Kupferpartikel mit 2 mm, 4 mm und 6 mm Länge und 0,25 mm Durchmesser. Eine Übersicht über Abhebefeldstärke und –ladung liefern Abbildung 37 und Abbildung 38. Aus den beiden Abbildungen ist ersichtlich, dass die Abhebefeldstärke mit zunehmender Partikellänge abnimmt und die aufgenommene Ladung zum Abhebezeitpunkt zunimmt. Da mit steigender Partikellänge auch die Masse der Partikel zunimmt, kann aus den Abbildungen abgelesen werden, dass die Coulombsche Kraft dominant gegenüber der Gewichtskraft ist. Da die Partikel beim Abhebevorgang zunächst am Boden der Kapselung liegen und sich im elektrischen Feld vor dem Abheben aufrichten, wird als Ausgangsposition ein stehendes Partikel angenommen und für dieses die Ladung zum Abhebezeitpunkt berechnet.

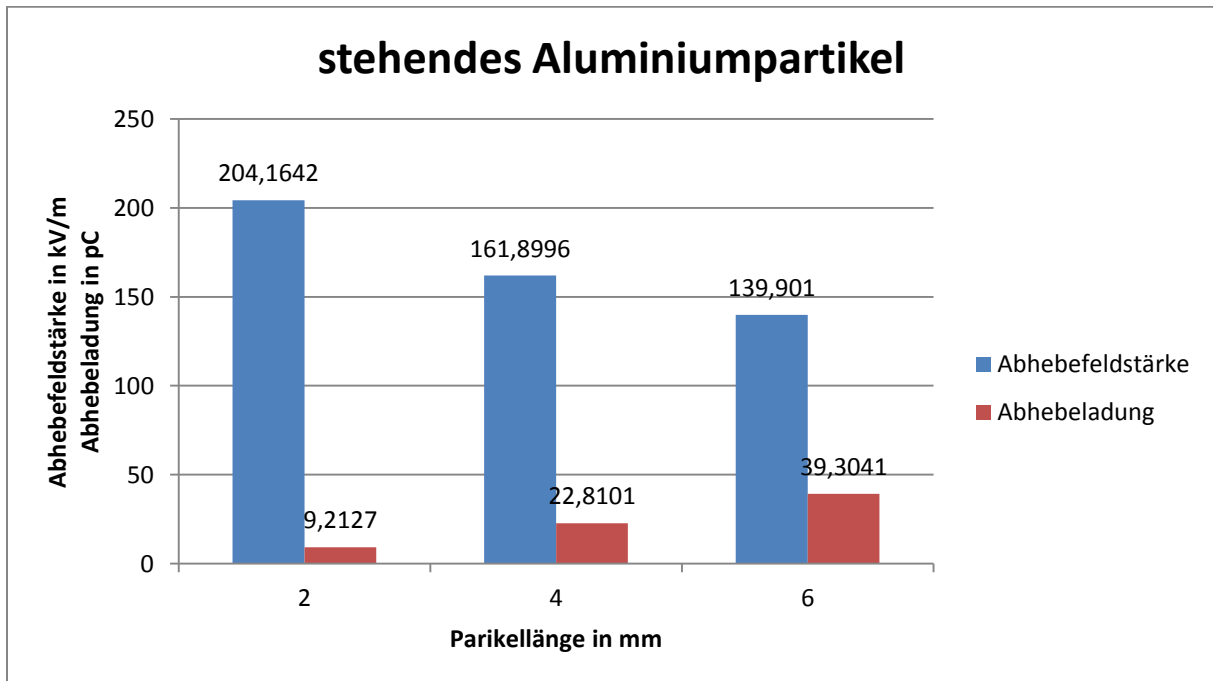


Abbildung 37: Abhebefeldstärke und -ladung von Aluminiumpartikel

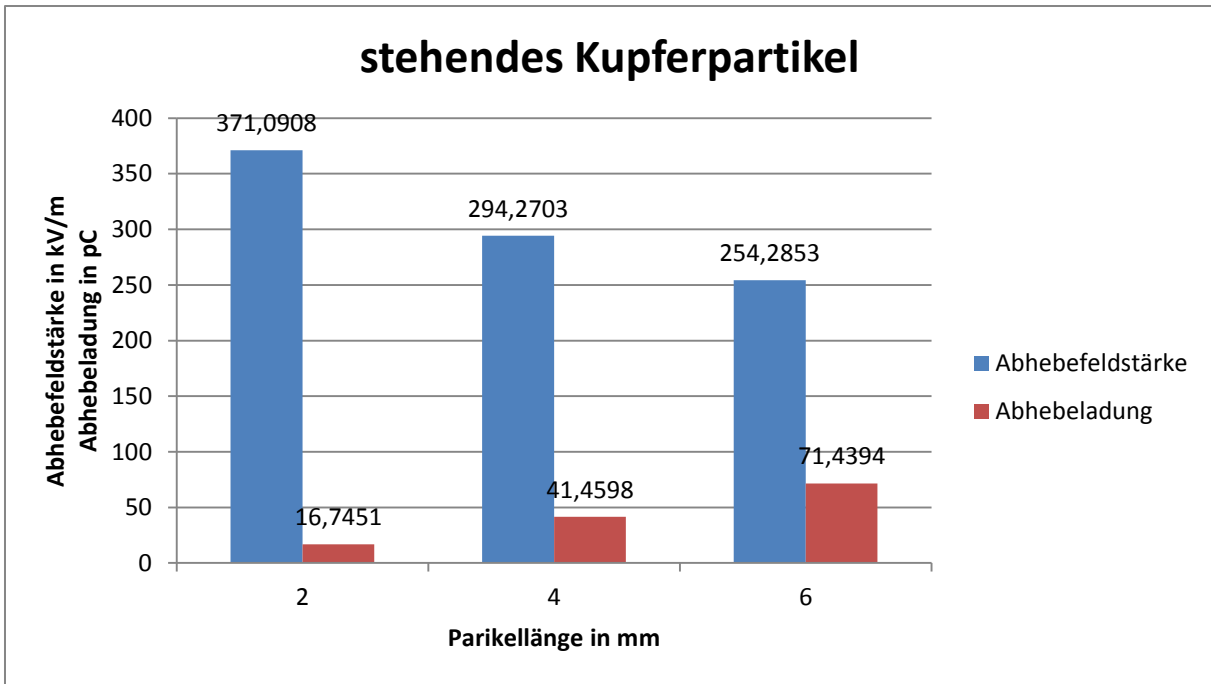


Abbildung 38: Abhebefeldstärke und -ladung von Kupferpartikel

7.3.1 Bouncing Motion

Die Simulation wurde für 2 mm, 4 mm und 6 mm Kupfer- und Aluminiumpartikel bei einer Gleichspannung von 500 kV durchgeführt. Zum Zeitpunkt $t=0$ wird das Partikel mit der Ladung, die sich aus der Abhebefeldstärke ergibt im Simulationsmodell freigesetzt. Die Bewegungsgleichungen werden für eine Simulationsdauer von 1s gelöst, die Zeitschritte Δt betragen 0,1 ms. Die auf das Partikel wirkenden Kräfte bewegen dieses nun Richtung Leiter. Bei Kontakt mit dem Leiter kommt es zum mechanischen Stoß. Das Partikel wird nun umgeladen. Die neue Ladung ist nur noch von der vorherrschenden Feldstärke und der Länge des Partikels abhängig. Somit stellt sich abhängig von der Masse des Partikels und der Feldstärke an Leiter und Kapselung ein Bewegungsablauf ein (siehe Formeln in Tabelle 1). Daraus ergibt sich ein sich wiederholendes Bewegungsmuster für die Aufwärts- und Abwärtsbewegung. Die Simulation der Partikel weist Abweichungen des erwarteten Verlaufs auf. Diese lassen sich durch ein Ausreißen des Partikels in x-Richtung erklären, das durch die Diskretisierung des Simulationsmodells entstanden ist. Dieser Fehler nimmt durch die elektrostatische Kraft auf das Partikel mit zunehmender Simulationsdauer weiter zu.

Länge	Al	Cu
mm	m/s	m/s
2	9,84842	7,22723
4	11,98563	9,798036
6	12,10768	11,18029

Tabelle 3: maximale Geschwindigkeit von Al- und Cu-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

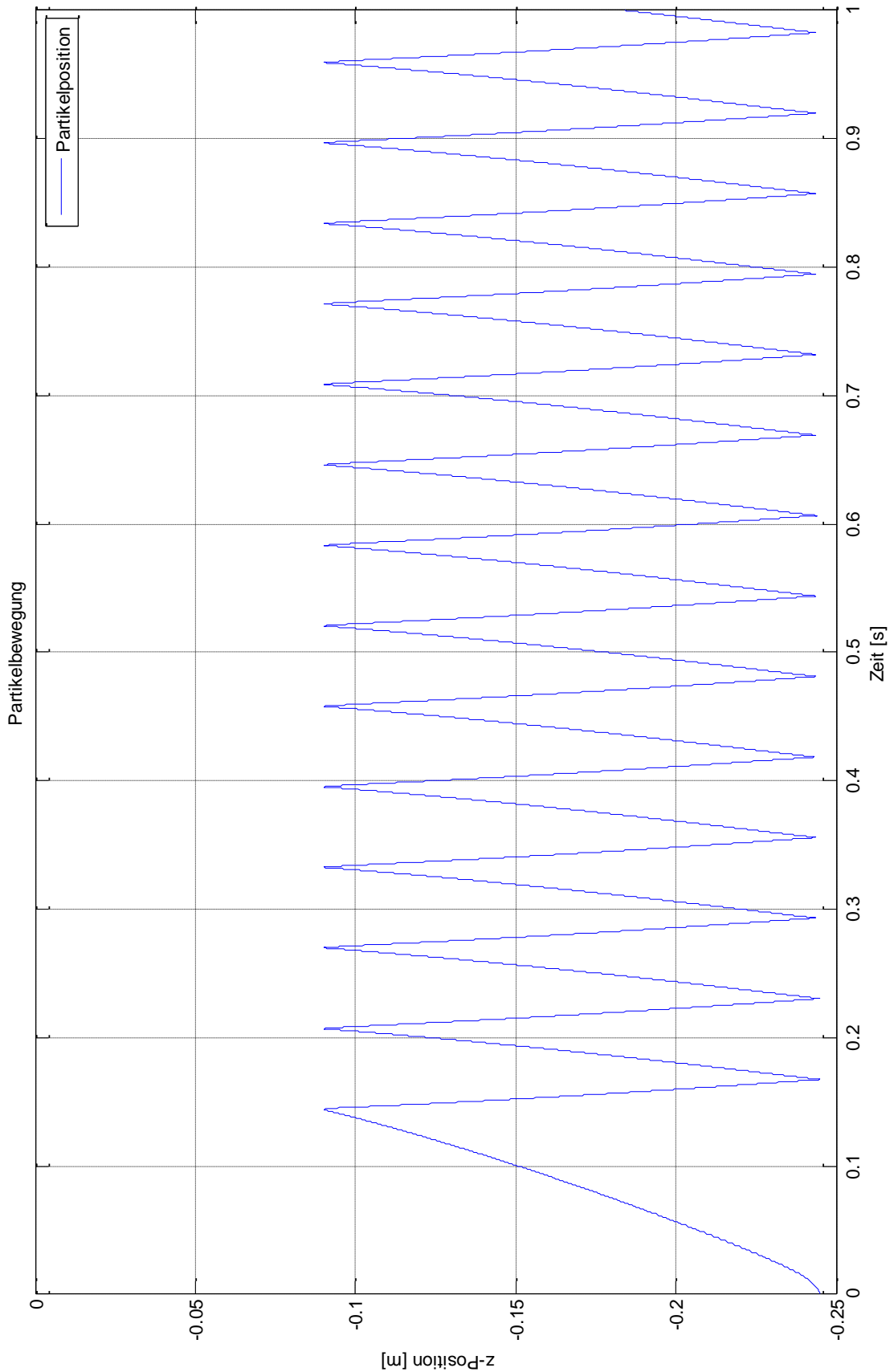


Abbildung 39: Bewegung eines 2mm Al-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

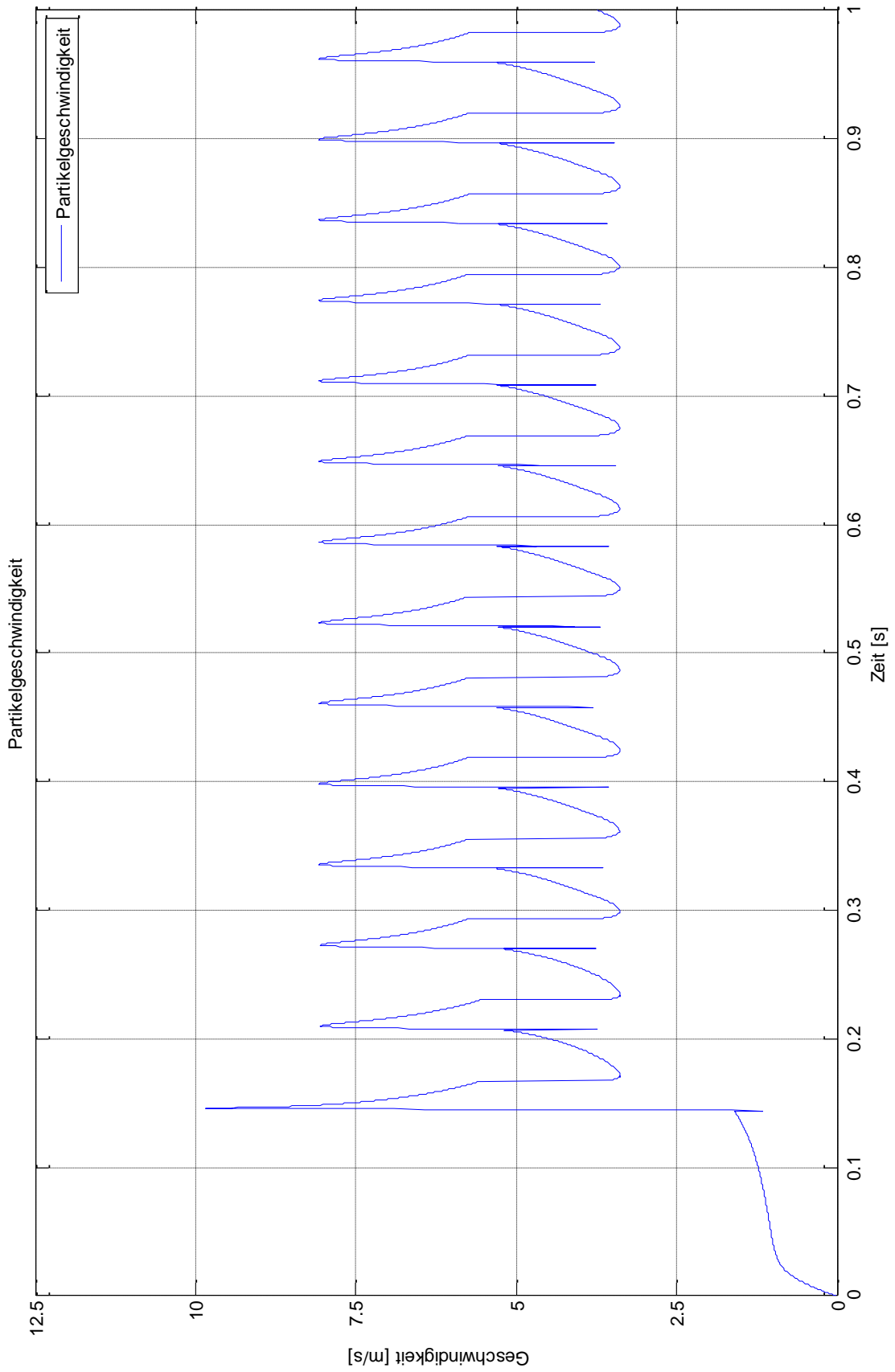


Abbildung 40: Geschwindigkeitsverlauf eines 2mm Al-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

Zeit=1 s Volumen: Elektrisches Feld, Betrag (kV/m) Partikeltrajektorien

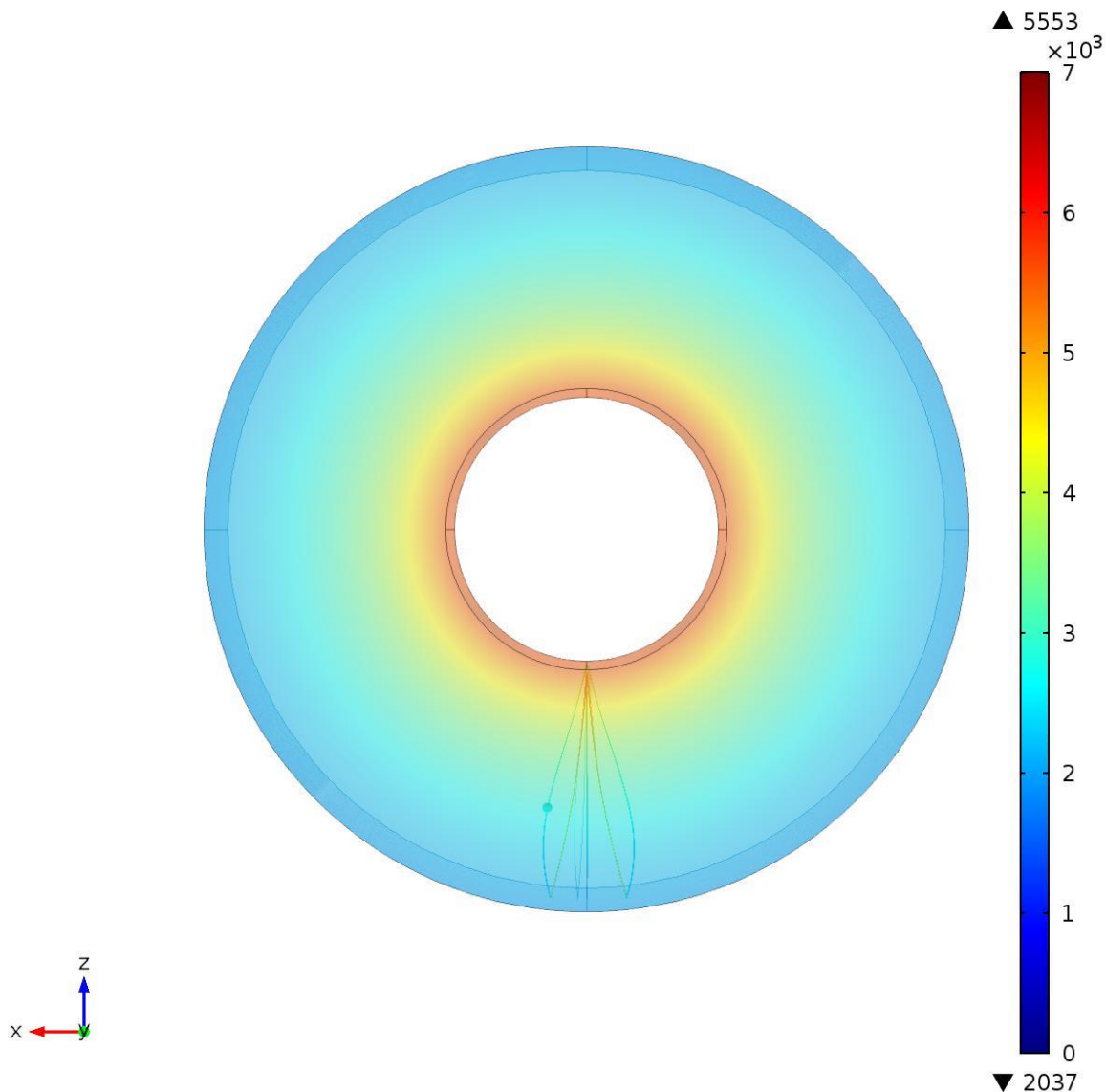


Abbildung 41: Trajektorie eines 2mm Al-Partikel

Vom Freigabezeitpunkt $t=0$ bis zum ersten Kontakt mit dem Leiter beschleunigt das Partikel. Beim Kontakt mit dem Leiter kommt es zur Umladung. Das Partikel erfährt durch die neue Ladung und die Gewichtskraft eine sehr starke Beschleunigung. Auf dem Weg zur Kapselung nimmt die Geschwindigkeit durch die schwächer werdende elektrostatische Kraft ab. Nach dem Kontakt mit der Kapselung beginnt der Bewegungszyklus von neuem und es stellt sich ein eingeschwungener Bewegungsablauf ein. In Abbildung 41 wird die Trajektorie der Partikelbewegung dargestellt. Hier ist die bereits erwähnte Abweichung vom erwarteten Verlauf ersichtlich, die durch die Diskretisierung im Zusammenspiel mit der elektrostatischen Kraft entsteht und sich mit zunehmender Simulationsdauer immer stärker auswirkt.

Simulation von Partikelbewegungen

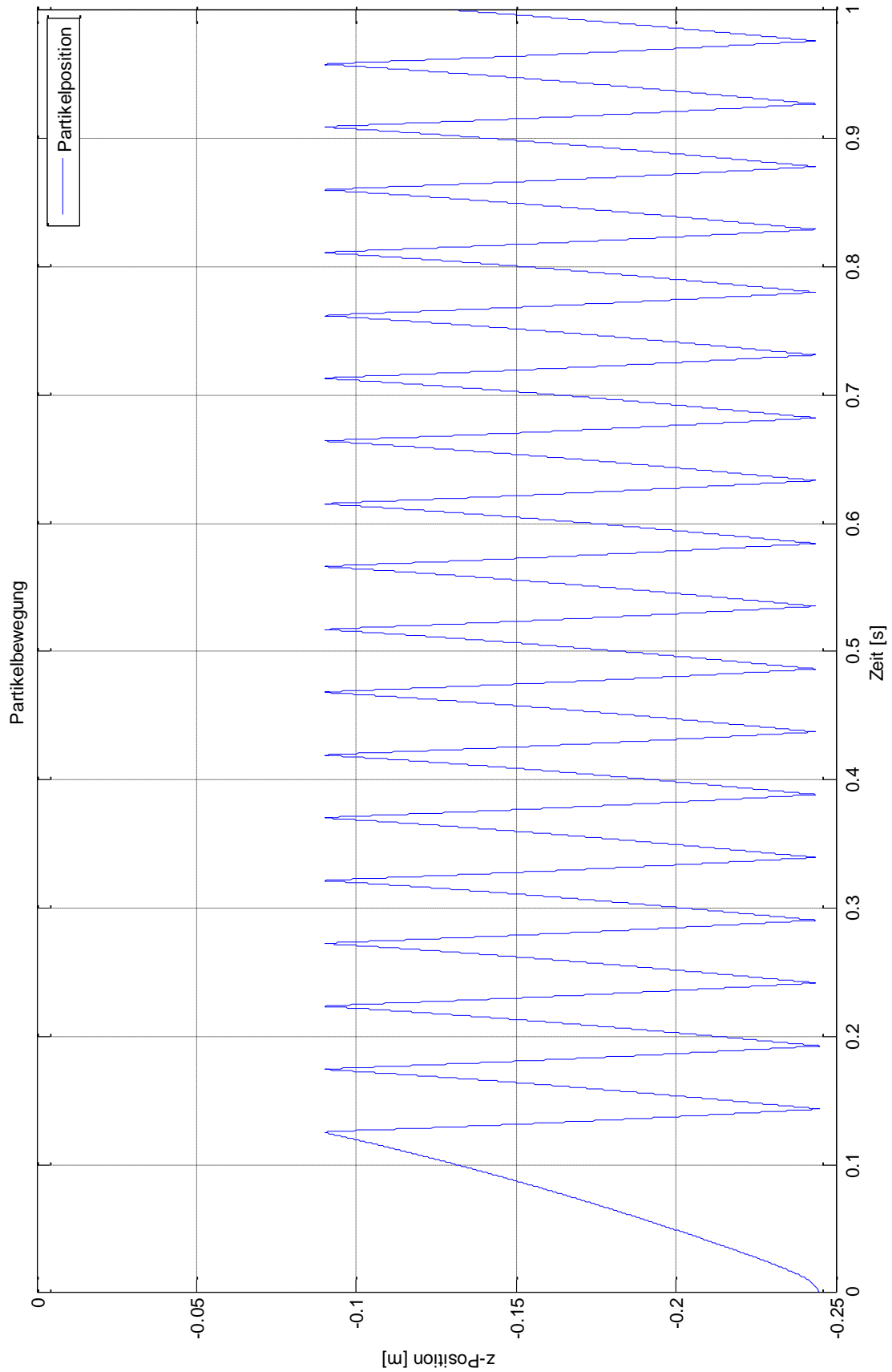


Abbildung 42: Bewegung eines 4mm Al-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

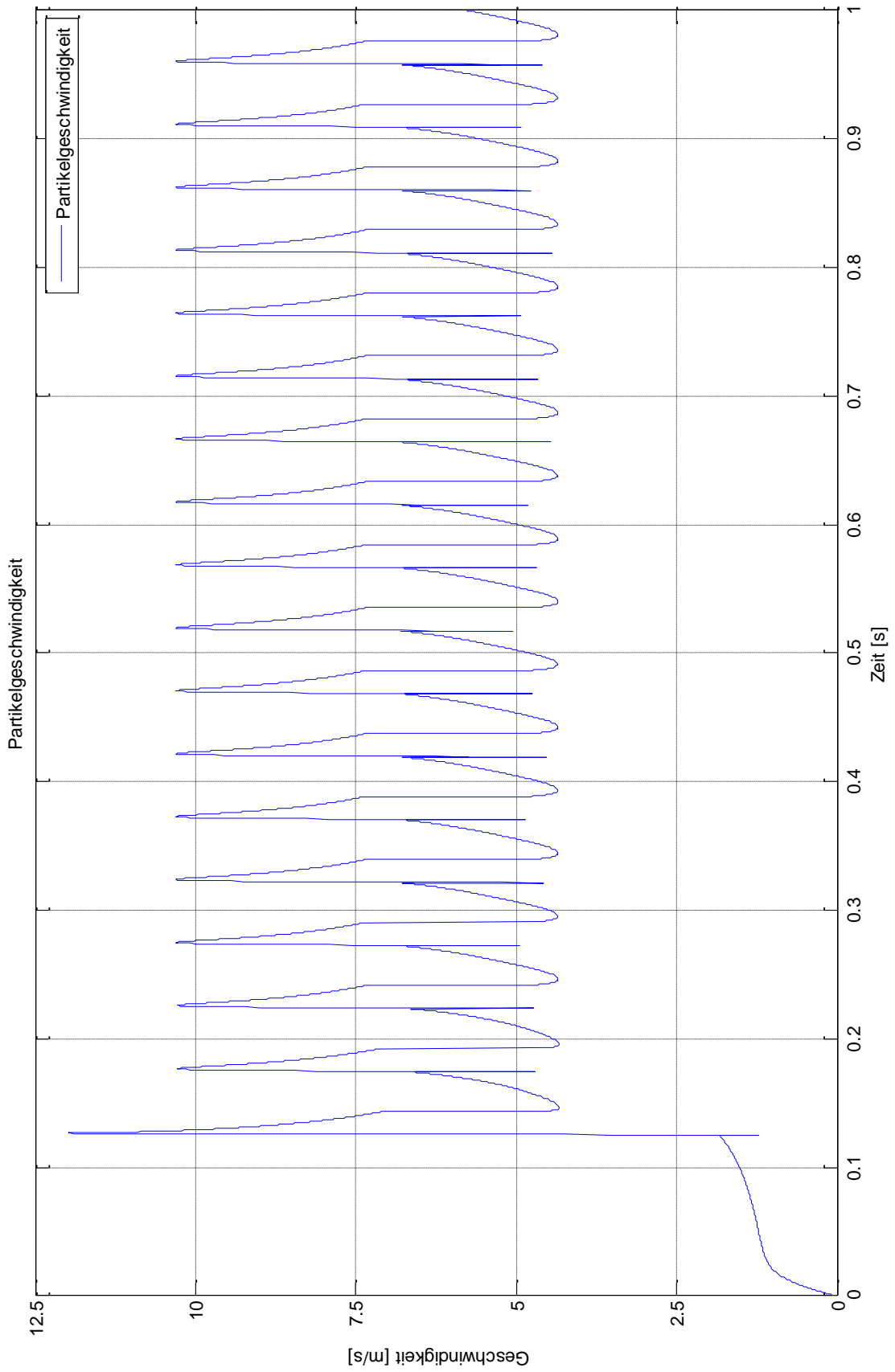


Abbildung 43: Geschwindigkeitsverlauf eines 4mm Al-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

Zeit=1 s Volumen: Elektrisches Feld, Betrag (kV/m) Partikeltrajektorien

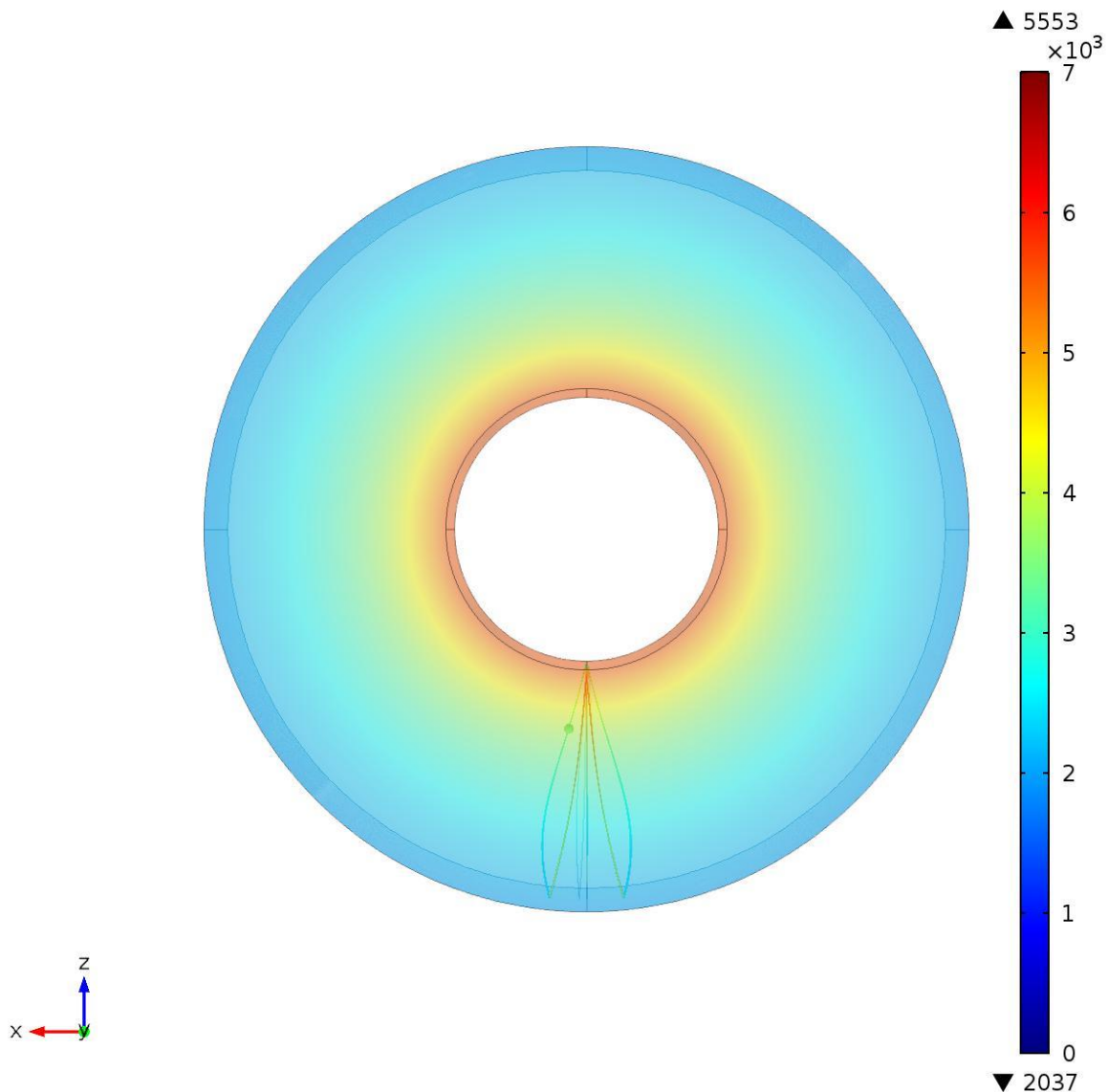


Abbildung 44: Trajektorie eines 4mm Al-Partikel

Im Vergleich zum 2 mm Al-Partikel nimmt die Geschwindigkeit aufgrund der höheren Ladung und Masse zu. Die Verläufe von Position und Geschwindigkeit sind wie zu erwarten war sehr ähnlich. Die Auswirkung der Diskretisierung ist in diesem Fall größer.

Simulation von Partikelbewegungen

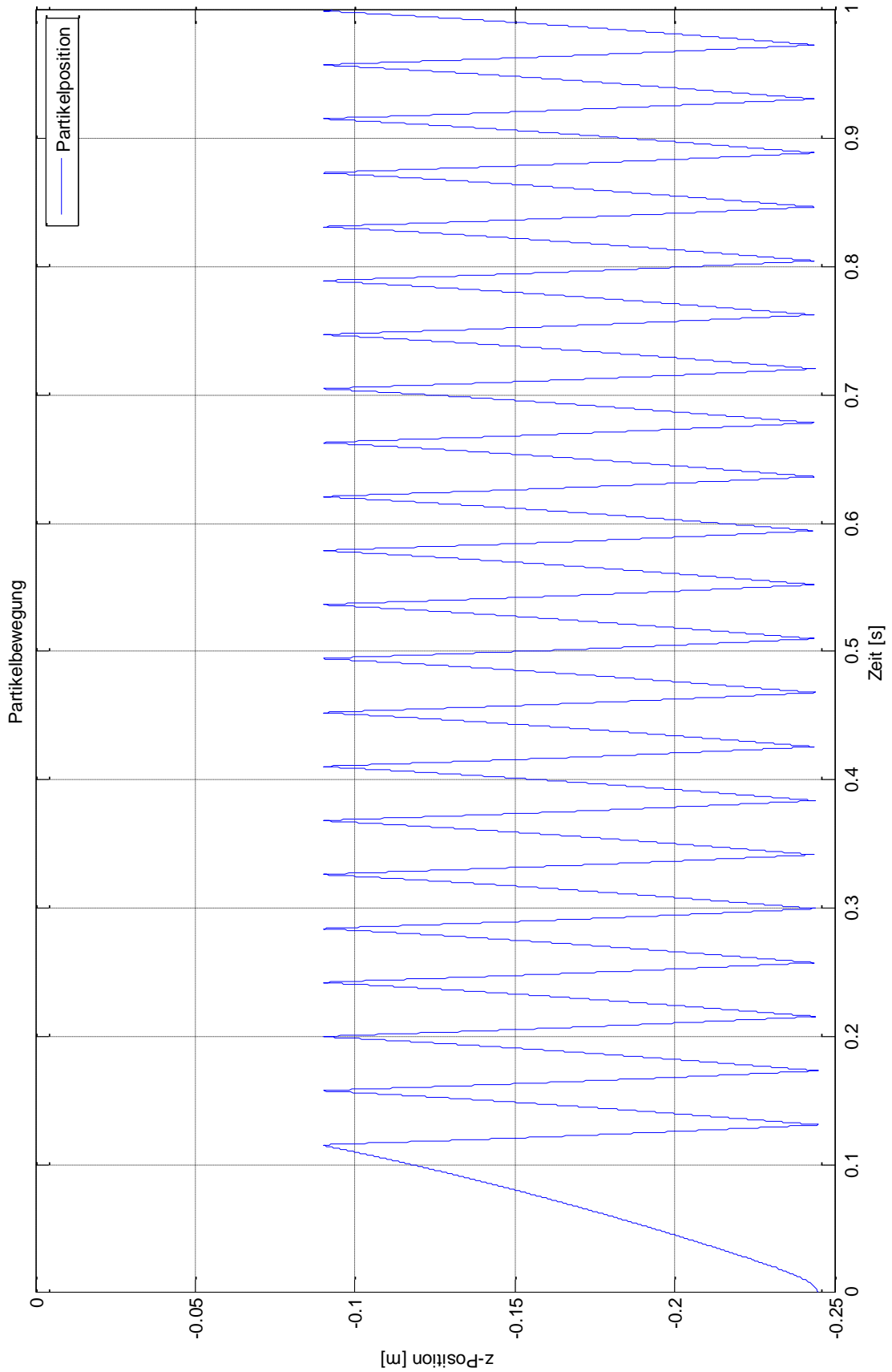


Abbildung 45: Bewegung eines 6mm Al-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

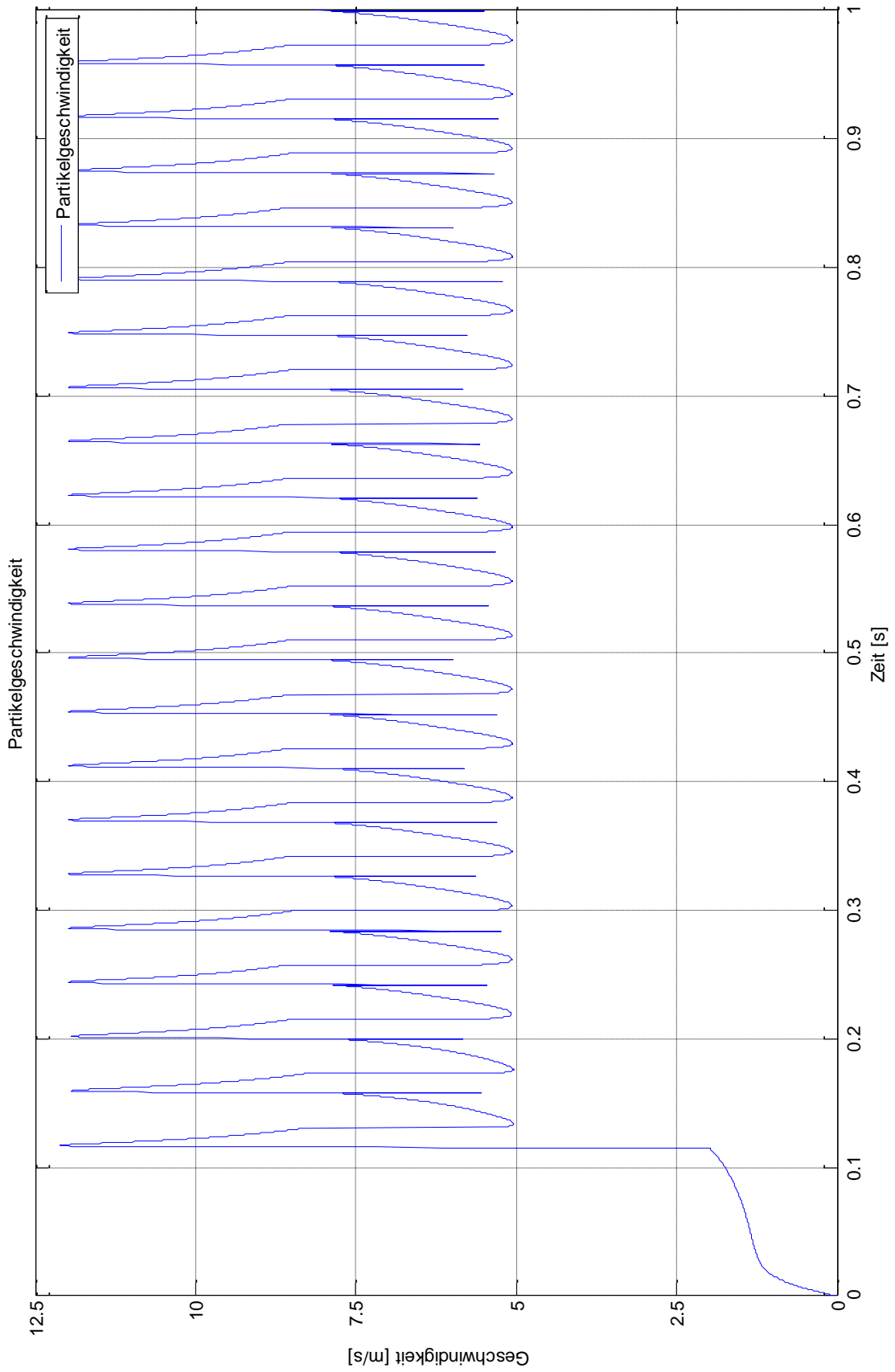


Abbildung 46: Geschwindigkeitsverlauf eines 6mm Al-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

Zeit=1 s Volumen: Elektrisches Feld, Betrag (kV/m) Partikeltrajektorien

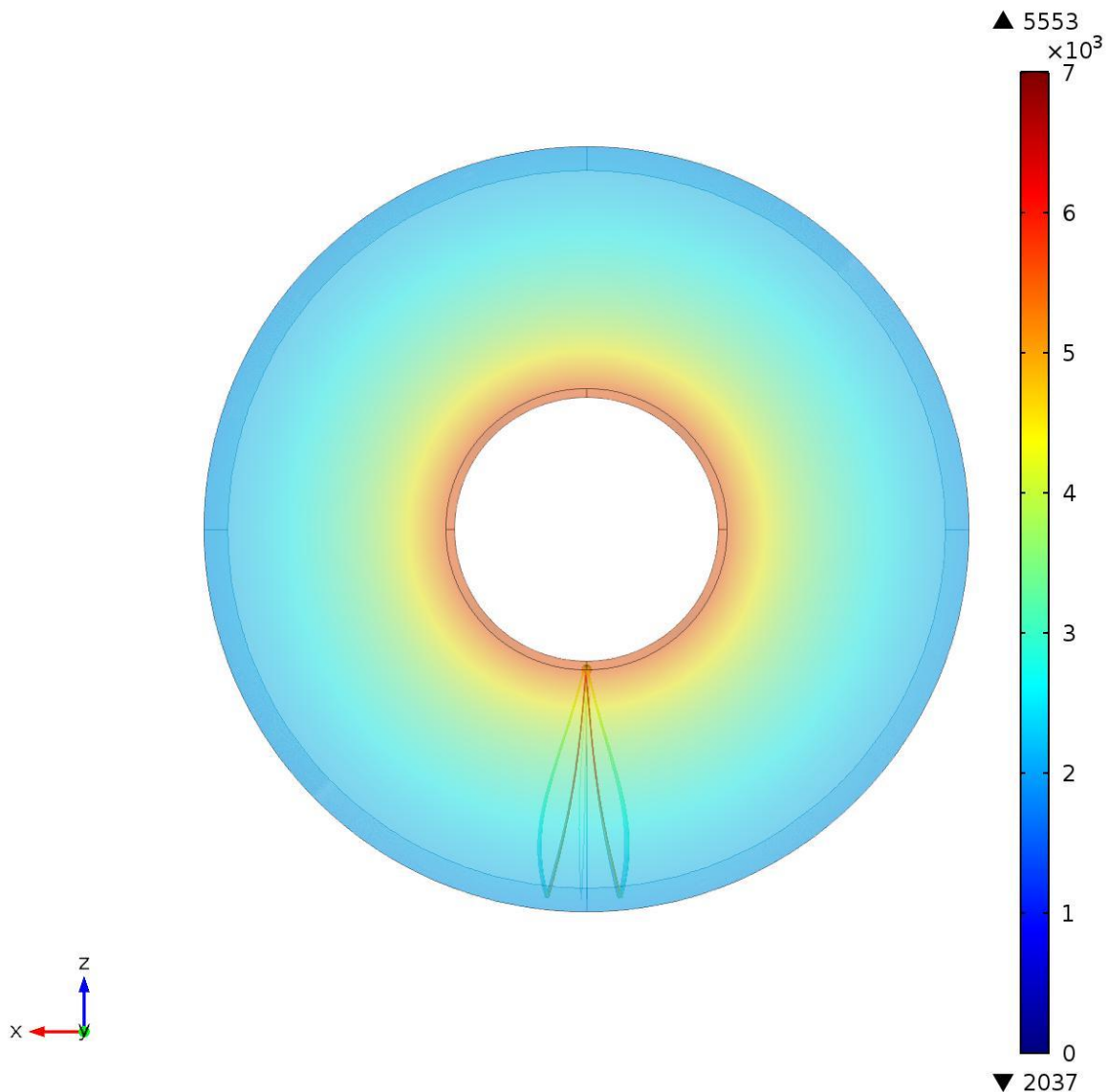


Abbildung 47: Trajektorie eines 6mm Al-Partikel

Bei der Simulation des 6 mm Al-Partikel stellen sich, wie bei den Vorhergehenden, sehr ähnliche Verläufe ein. Wiederum ist die Geschwindigkeit größer als bei den Simulationen von 2 mm und 4 mm Al-Partikeln. Der Fehler durch die Diskretisierung tritt ebenfalls wieder auf und ist leicht schwächer als beim 4 mm Al-Partikel.

Simulation von Partikelbewegungen

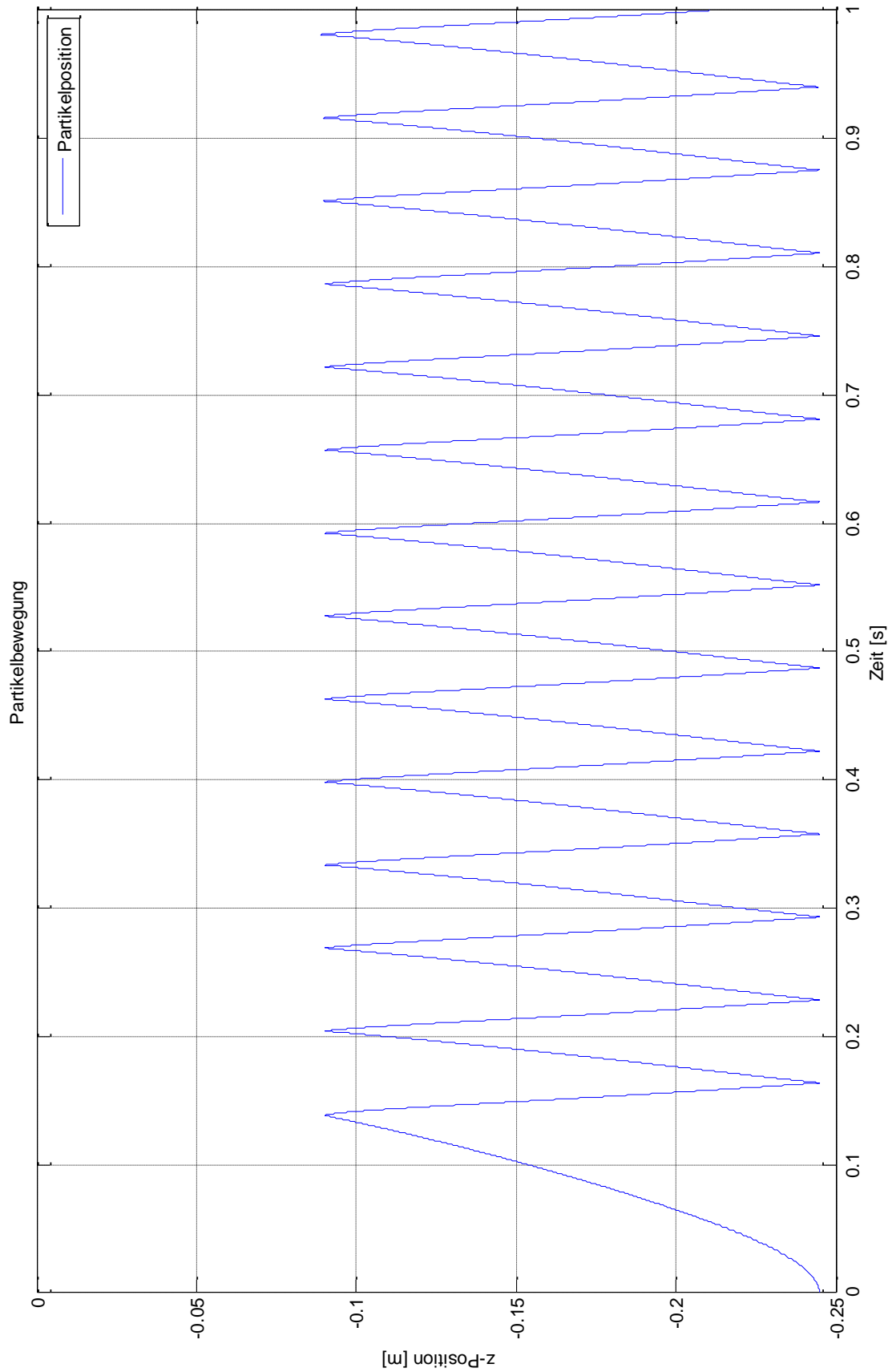


Abbildung 48: Bewegung eines 2mm Cu-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

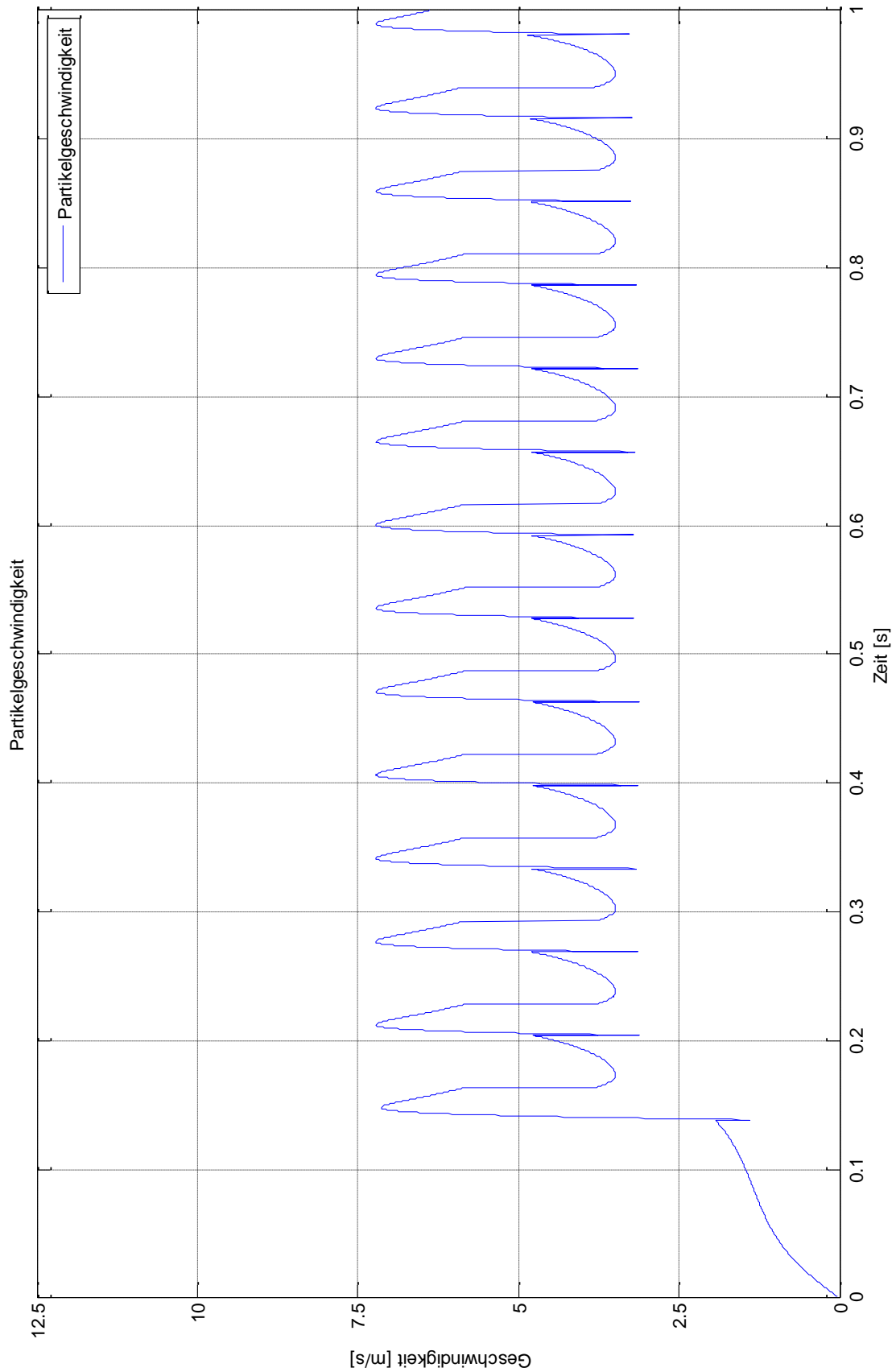


Abbildung 49: Geschwindigkeitsverlauf eines 2mm Cu-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

Zeit=1 s Volumen: Elektrisches Feld, Betrag (kV/m) Partikeltrajektorien

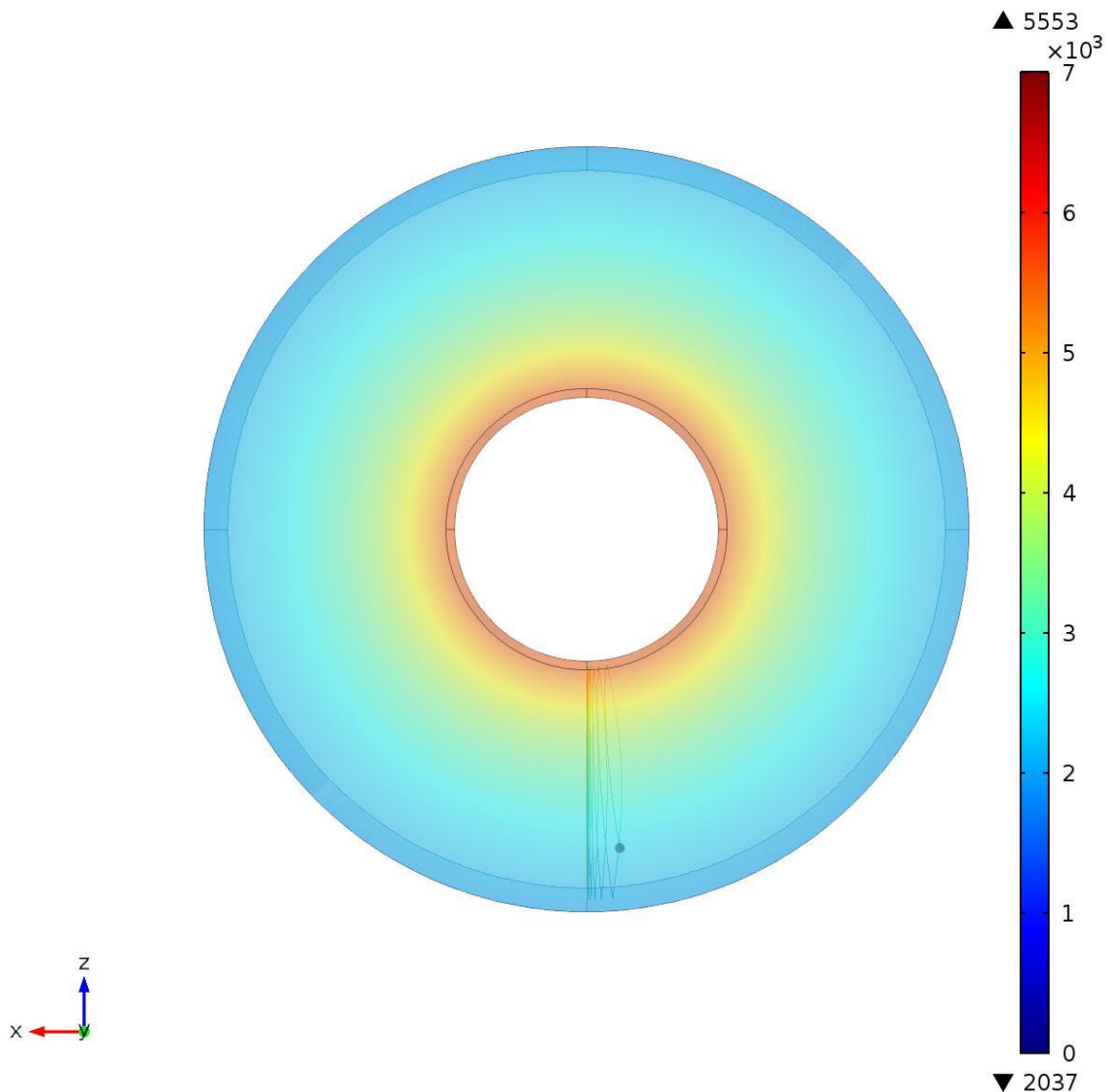


Abbildung 50: Trajektorie eines 2mm Cu-Partikel

Es ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Geschwindigkeit im Vergleich zu dem Al-Partikel, die Geschwindigkeit ist jedoch niedriger als beim 2 mm Al-Partikel. Die Spitze im Geschwindigkeitsverlauf nach dem ersten Kontakt ist im Unterschied zu den Al-Partikel-Simulationen nicht vorhanden. Der Verlauf der Trajektorie entspricht am Ehesten dem erwarteten Verlauf, die Abweichung durch die Diskretisierung ist jedoch in Abbildung 50 zu erkennen.

Simulation von Partikelbewegungen

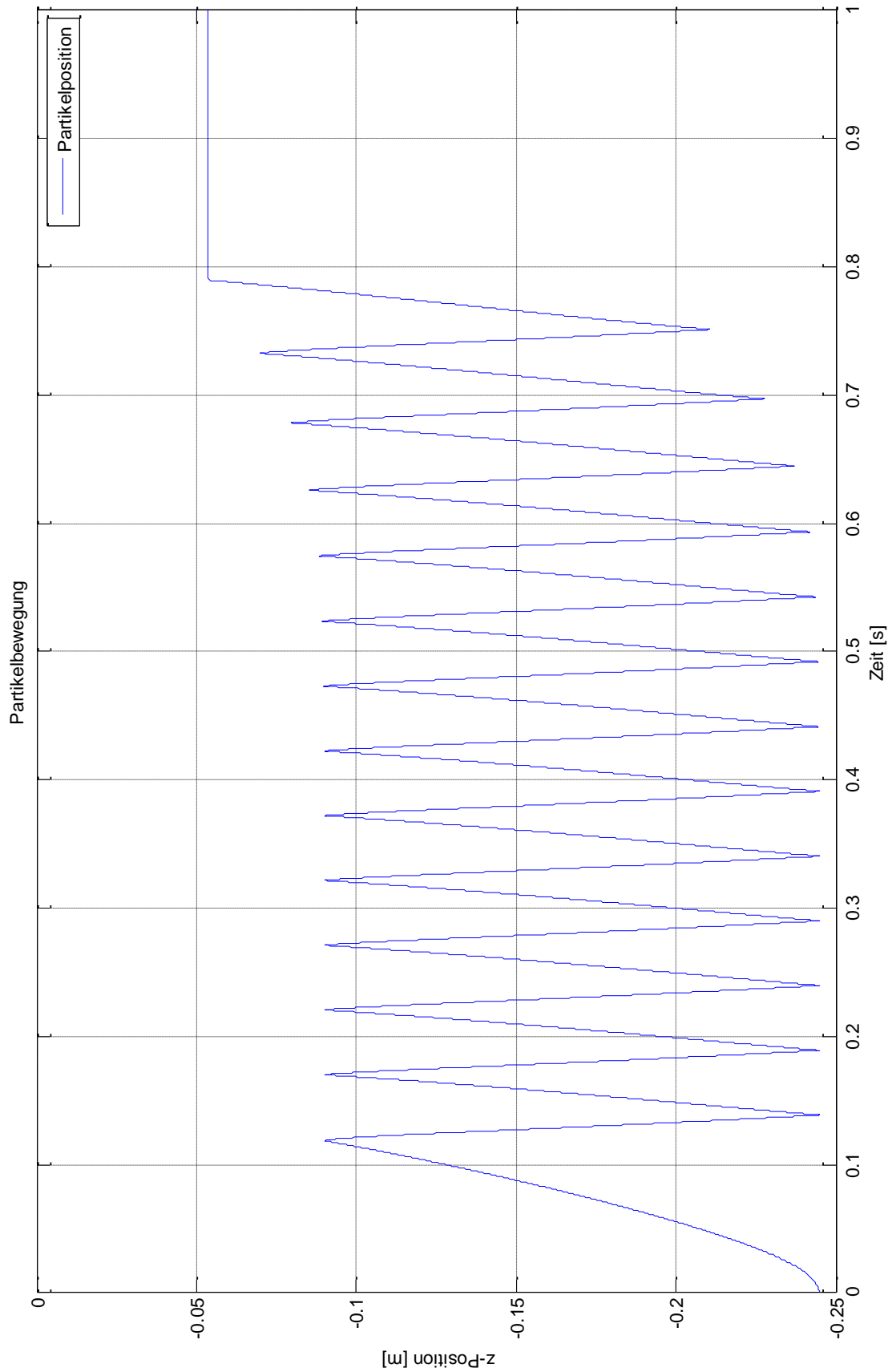


Abbildung 51: Bewegung eines 4mm Cu-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

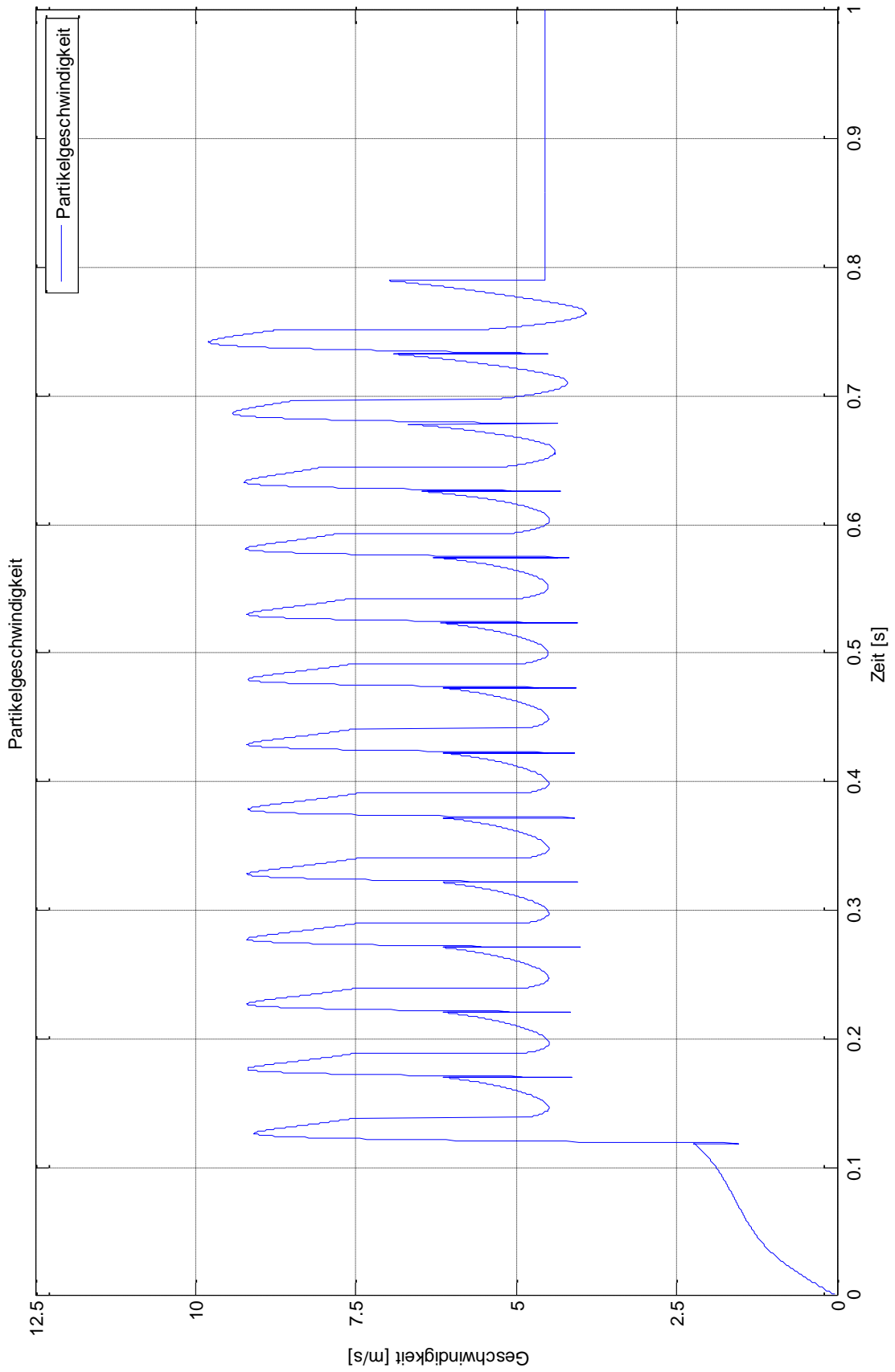


Abbildung 52: Geschwindigkeitsverlauf eines 4mm Cu-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

Zeit=1 s Volumen: Elektrisches Feld, Betrag (kV/m) Partikeltrajektorien

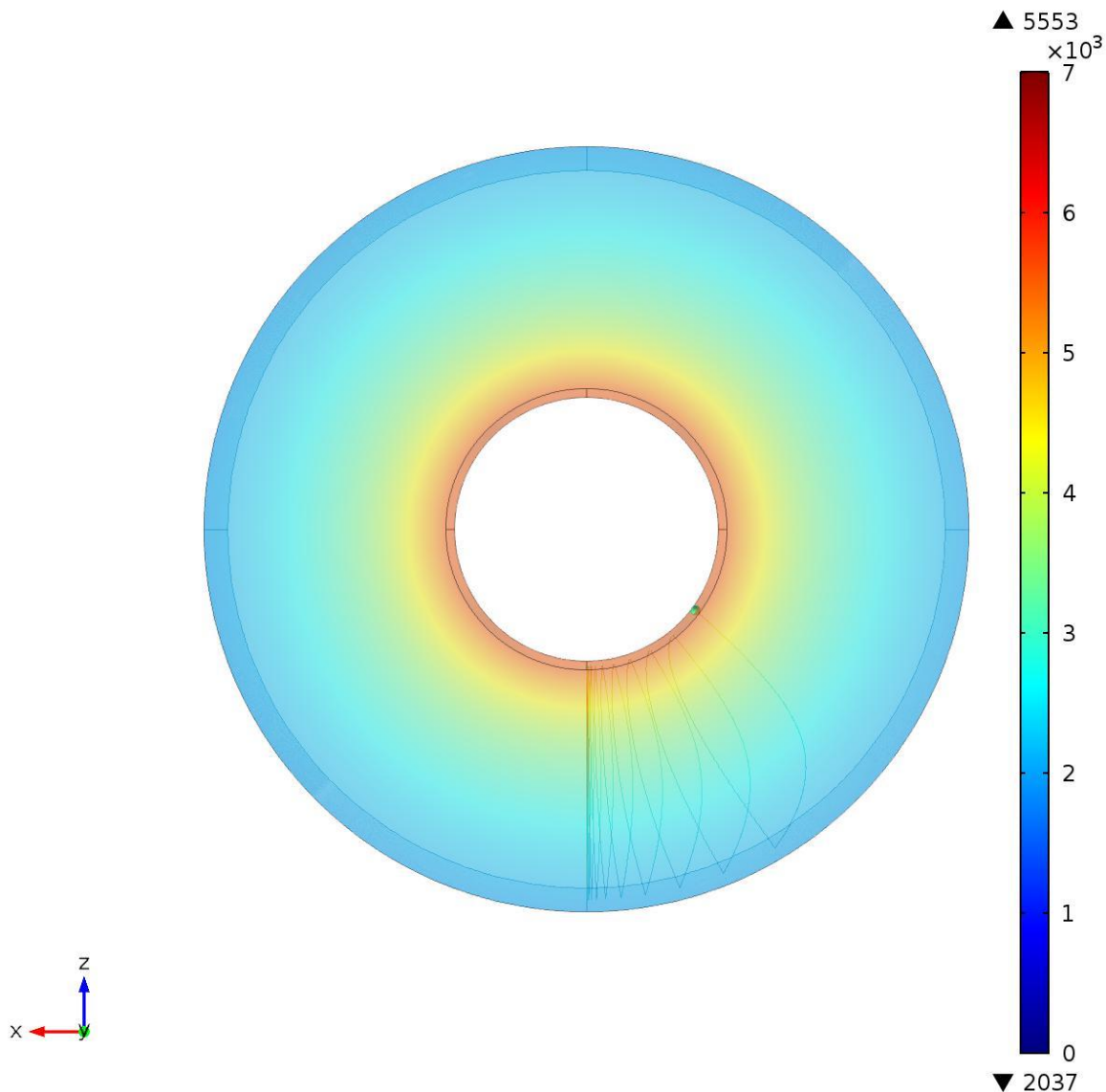


Abbildung 53:Trajektorie eines 4mm Cu-Partikel

In dieser Simulation ist die Auswirkung des Diskretisierungsfehlers viel größer als bei den Simulationen zuvor (Abbildung 53). Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass das Partikel nach dem Stoß mit der Kapselung durch die elektrostatische Kraft wieder in Richtung des Leiters gezogen wird. Bei $t \approx 0,4$ s nimmt das Ausreißen in x-Richtung bereits sehr große Werte an. Das Ergebnis dieser Simulation ist nur bis $t \approx 0,8$ s verwertbar, da danach offensichtlich ein Fehler auftritt. Dies ist durch die konstante Geschwindigkeit und Position ab diesem Zeitpunkt ersichtlich.

Simulation von Partikelbewegungen

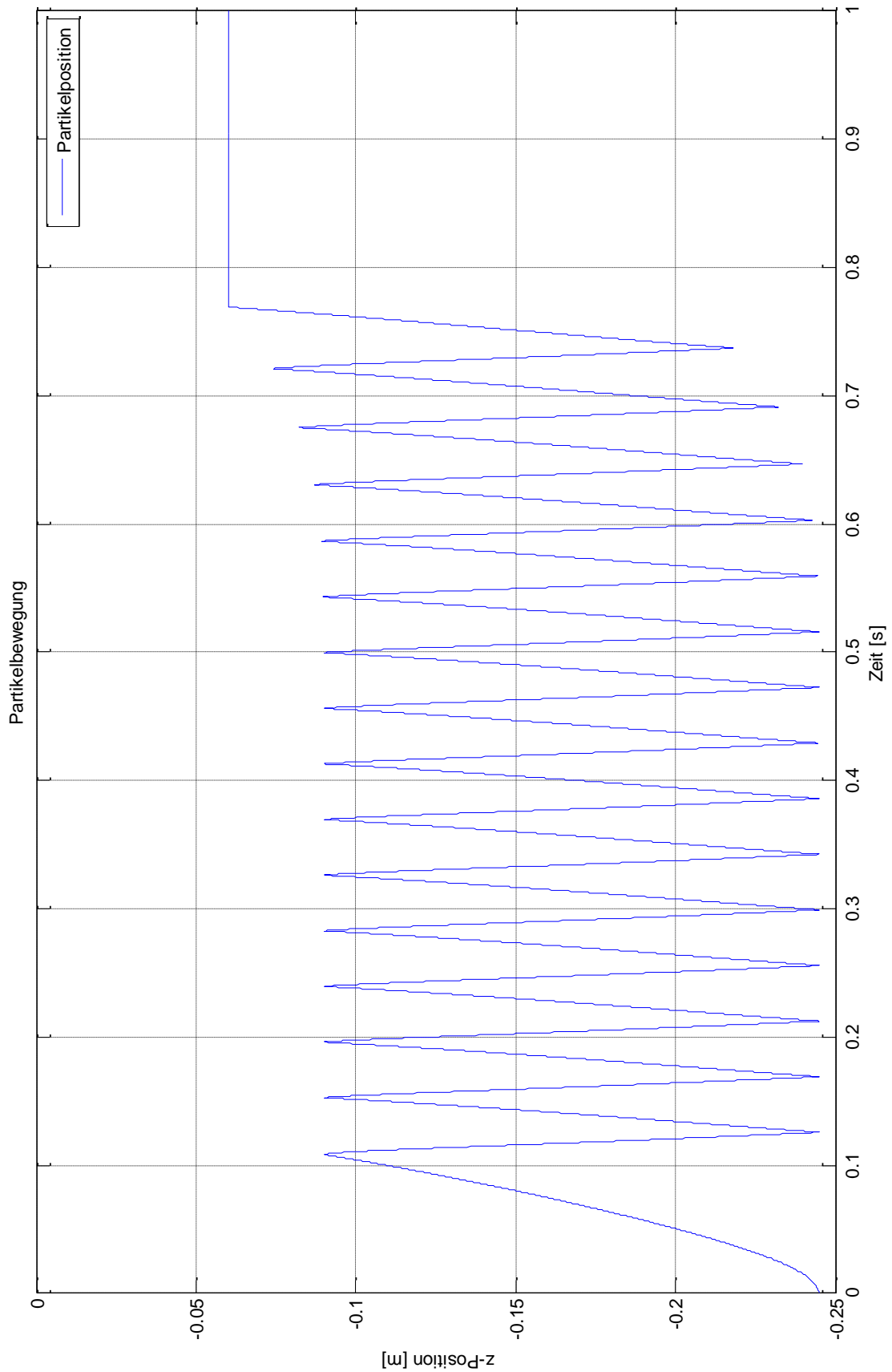


Abbildung 54: Bewegung eines 6mm Cu-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

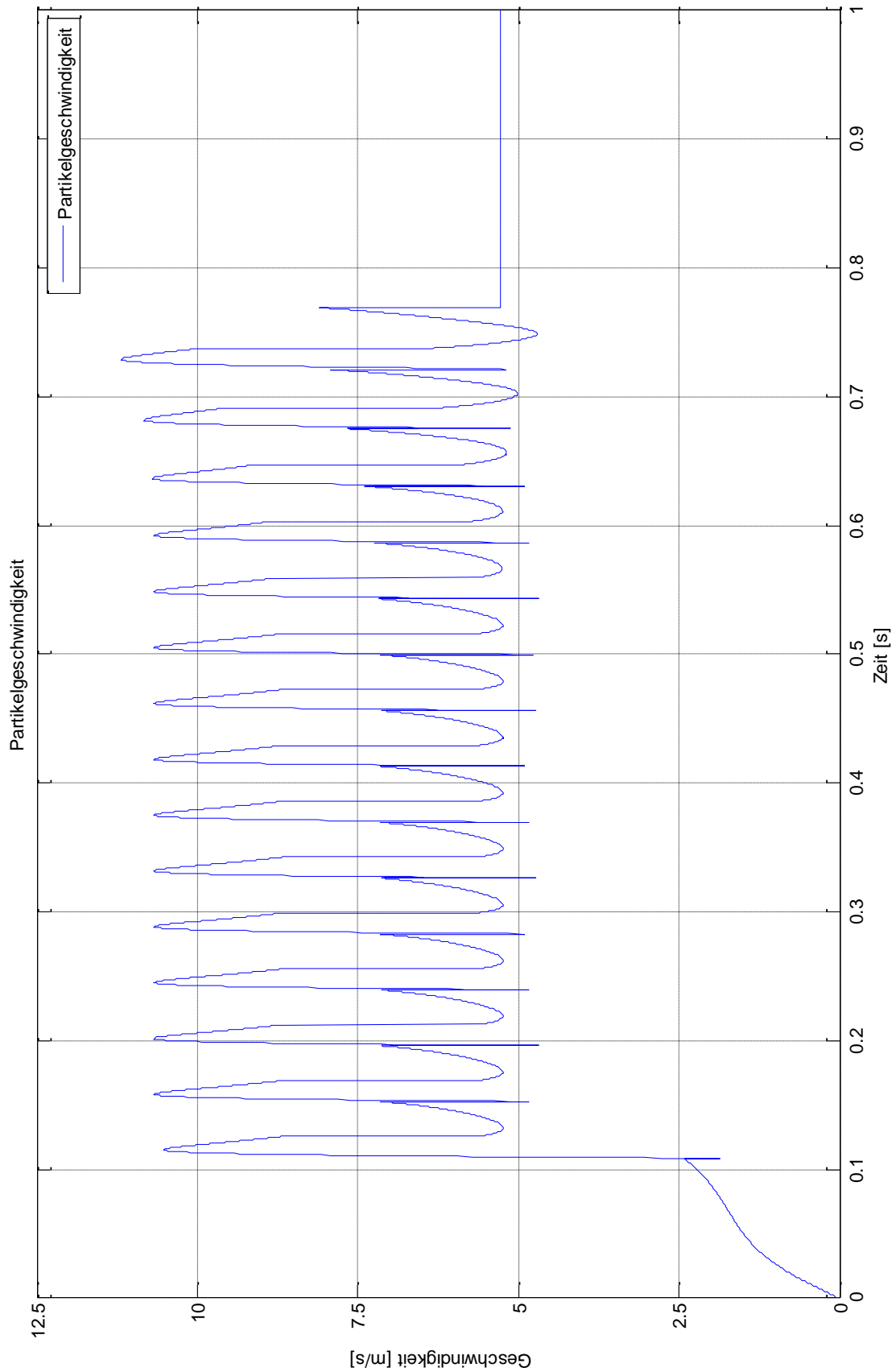


Abbildung 55: Geschwindigkeitsverlauf eines 6mm Cu-Partikel

Simulation von Partikelbewegungen

Zeit=1 s Volumen: Elektrisches Feld, Betrag (kV/m) Partikeltrajektorien

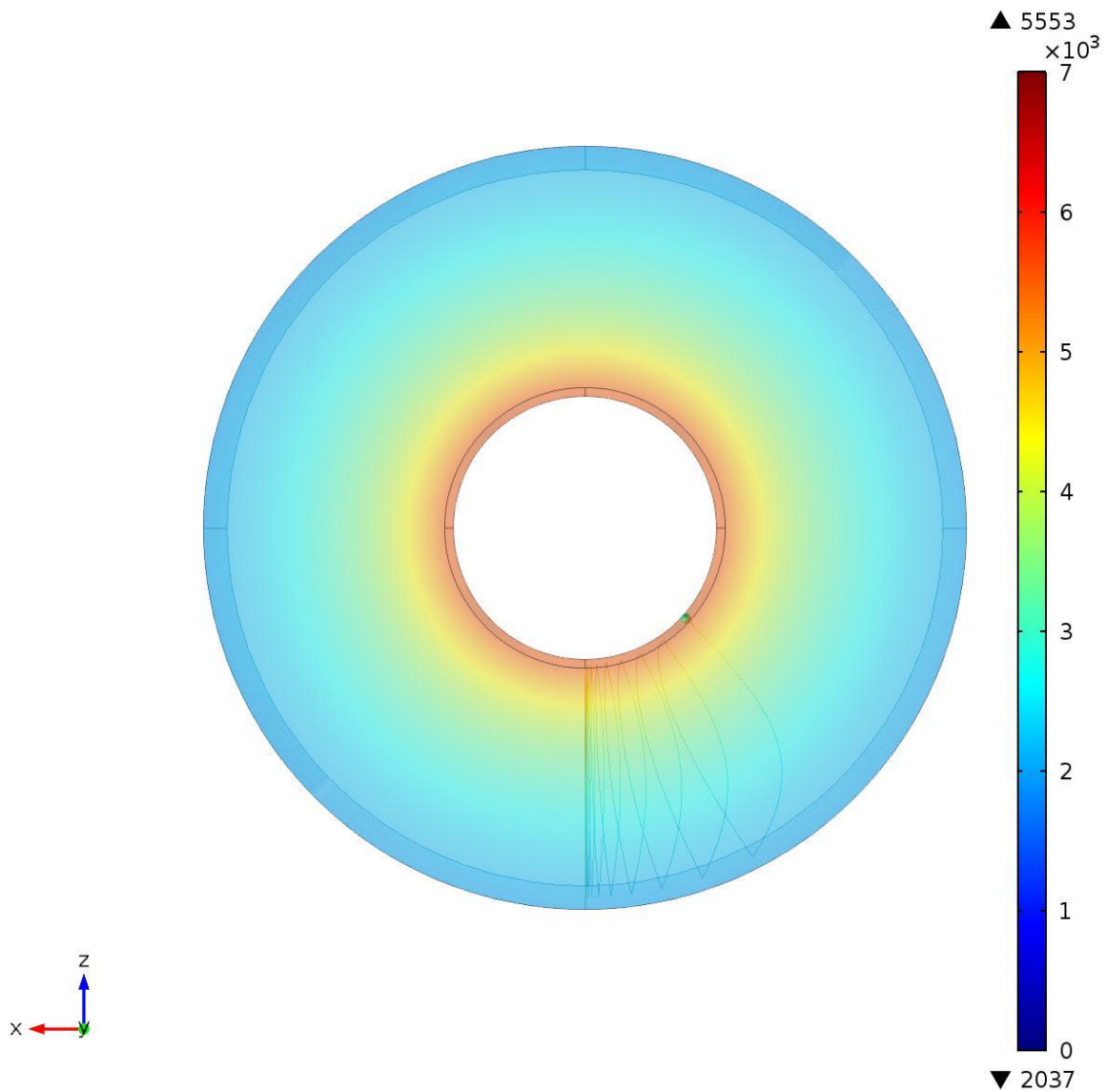


Abbildung 56: Trajektorie eines 6mm Cu-Partikel

Hier gelten dieselben Aussagen wie bei der Simulation des 4 mm Cu-Partikels.

7.3.2 Standing Motion

Ein teilentladungsbedingtes Phänomen bezüglich der Partikelbewegung ist die standing motion, wie in Kapitel 2.3.2.2 beschrieben. Da es in COMSOL nicht möglich ist Teilentladungen direkt zu simulieren, wird die Simulation aus Kapitel 7.2 leicht verändert, um zumindest einfache Aussagen treffen zu können. Ausgehend von einem Gleichgewichtszustand der Kräfte auf das Partikel, wird die Ladung in diesem Zustand analytisch berechnet und dem Partikel mit umgekehrtem Vorzeichen an der Randbedingung "Wand" zugewiesen. Die zugewiesene Ladung muss etwas größer sein als jene des Gleichgewichtszustandes. Somit ist die Summe der Kraftwirkungen auf das Partikel wieder in Richtung des Leiters gerichtet. Da die standing motion hauptsächlich bei negativer Gleichspannung auftritt, wird als Spannungswert -500 kV Gleichspannung gewählt.

	Ladungswert	Standing motion
Simulationsiteration	pC	J/N
1	4,9662	N
2	4,806	N
3	6,408	N
4	9,612	N
5	9,7722	N
6	10,0926	N
7	10,413	N
8	12,015	N
9	12,816	N
10	14,418	J
11	17,622	J

Tabelle 4: Bei Kontakt zugewiesener Ladungswert

Der Ladungswert, der etwas größer als jener ist, bei dem ein Gleichgewichtszustand der Kräfte herrscht (erste Zeile in Tabelle 4), ergibt eine Partikelbewegung ähnlich jener aus Kapitel 7.3.1. Betrachtet man die Bewegungsgleichungen ist dies auch leicht erklärbar. Die Summe der Kräfte auf das Partikel ist annähernd Null, Daher wirkt auf das Partikel nur die dämpfende Kraft durch die Bewegung im SF₆. Die nach Richtung Leiter gerichtete elektrische Kraft ist nicht groß genug, um die Bewegungsrichtung des Partikels zu ändern. Es tritt somit nur eine Verlangsamung ein. Durch weiteres Erhöhen des Ladungswerts treten Bewegungsmuster auf, die dem Beginn der standing motion nahekommen.

Simulation von Partikelbewegungen

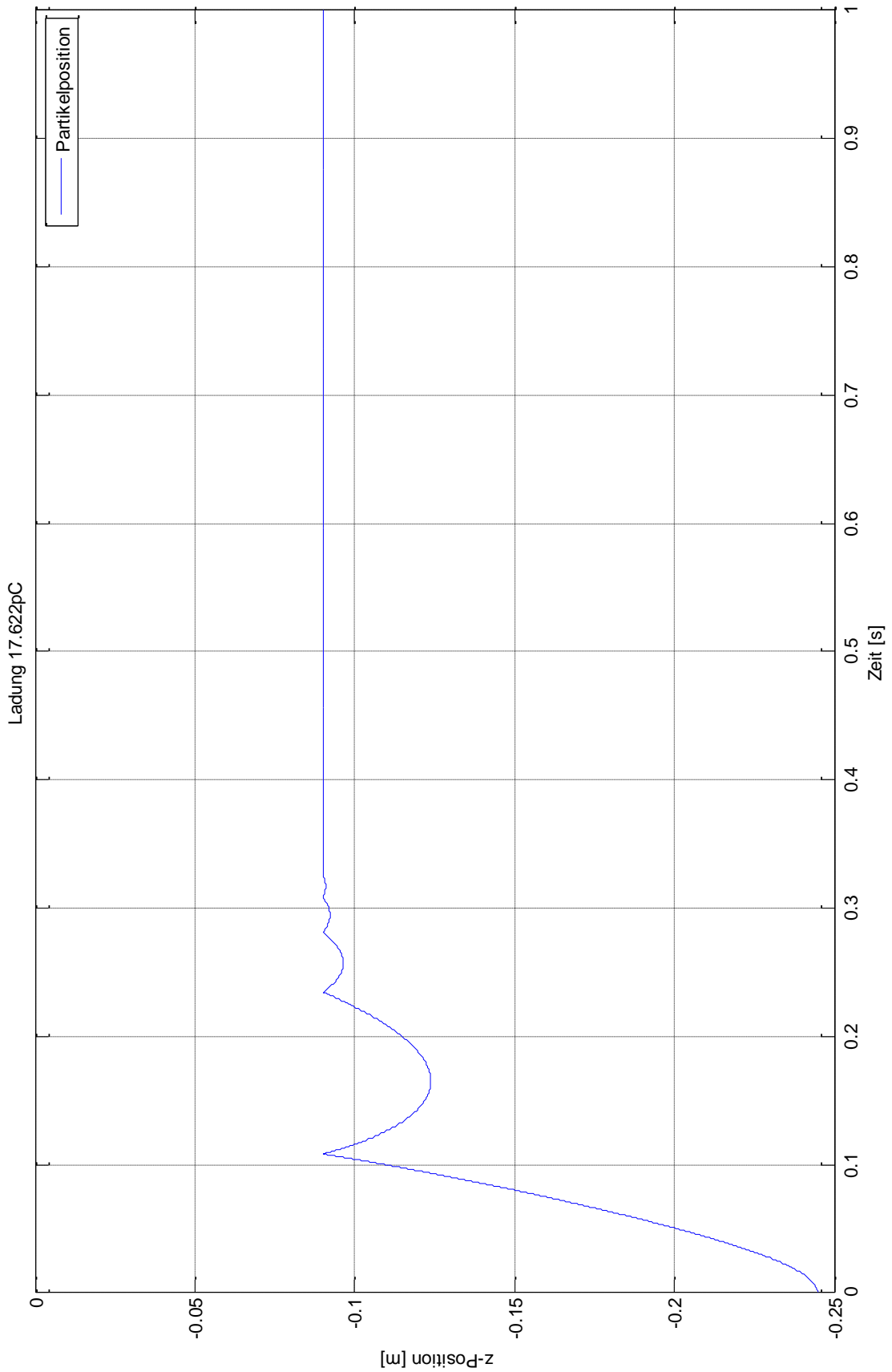


Abbildung 57: Simulation der standing motion

Simulation von Partikelbewegungen

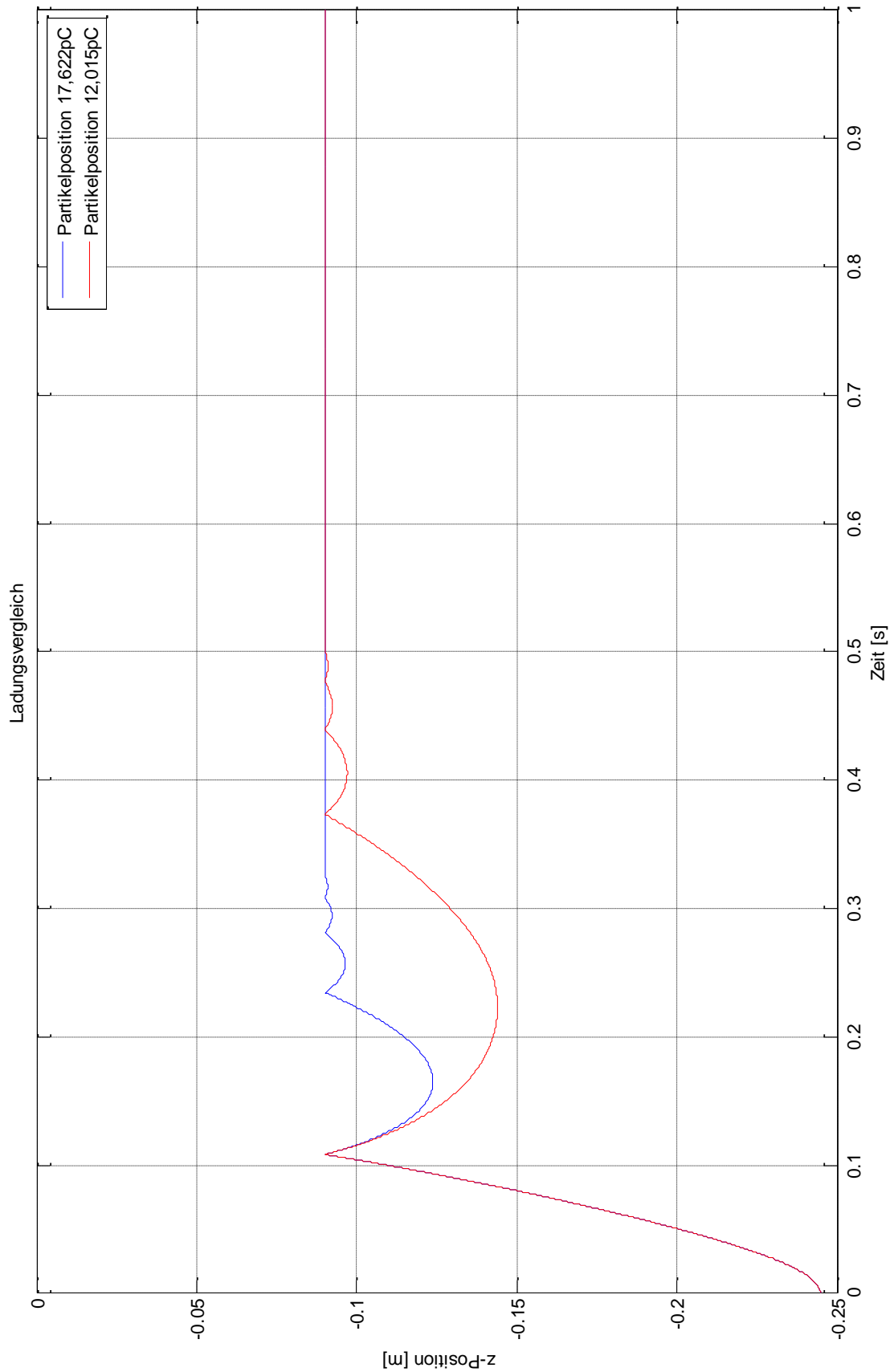


Abbildung 58: Vergleich zwischen unterschiedlichen Ladungswerten

8 Resümee

Die allgemeine Bewegungsgleichung aus [9] ist in Formel (8.1) wiederholt. Es handelt sich dabei um eine klassische Summe der Kräfte, die auf ein Partikel wirken:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} - \eta \frac{d\vec{r}}{dt} + q\vec{E} + m\vec{g} = 0 \quad (8.1)$$

Besonders fällt hier der Term $q\vec{E}$ ins Gewicht, da die elektrostatische Kraft dominierend ist. Bei realen Partikelbewegungen ist die Ladung nicht konstant, sie verändert sich durch Teilentladungen. Somit ändert sich auch die Bewegung im Isolationsmedium.

Die Literatur liefert im Prinzip zwei Ansätze zur Simulation von Partikelbewegungen. Das Ersatzladungsverfahren (CSM) bietet die Möglichkeit, jede Geometrie durch Ersatzladungen außerhalb des Bereichs zu simulieren. Das elektrische Feld innerhalb des Bereichs wird durch die Ersatzladungen genau nachgebildet. Ein Partikel kann durch ein freies Potential realisiert werden, die Summe der Ersatzladungen muss der Partikelladung entsprechen. Somit ist die Feldstärkenerhöhung an den Partikelenden automatisch berücksichtigt. Wird dieses Verfahren in ein Computerprogramm, wie in der Arbeit von Wohlmuth, eingebunden, kann durch Unterprogramme für Teilentladungen und Durchschläge eine sehr genaue Simulation erstellt werden. Die Implementierung der teilentladungsbedingten Ladungsänderung während der Bewegung im Isolationsmedium zeichnet diese Art der Simulation besonders aus. Mechanische Stöße mit den Elektroden und die damit einhergehende Umladung des Partikels sind ebenfalls realisierbar. Die Rauigkeit der Elektroden wird beim Ersatzladungsverfahren nicht berücksichtigt.

Die zweite Methode ist die Lösung der Bewegungsgleichungen innerhalb eines C-Programmes, das einige Effekte durch Zufallszahlen mittels der Monte-Carlo Methode berücksichtigt. Im Unterschied zum Ersatzladungsverfahren wird ein Partikel als Massepunkt mit konzentrierter Ladung nachgebildet. Daher werden die Feldstärkenerhöhungen an den Partikelenden bei dieser Methode vernachlässigt. Bewegungen in axialer Richtung des gasisolierten Systems werden durch Erstellen einer Zufallszahl zwischen Null und eins sowie der anschließenden Skalierung dieser mit einem kleinen Winkel erstellt. Diese Zufallszahl wird bei jedem Zeitschritt erstellt, danach erfolgt die Lösung der Bewegungsgleichungen. Beim mechanischen Stoß kann die Rauigkeit der Elektrode berücksichtigt werden. Dafür wird der Kollisionswinkel um einen kleinen Winkel verändert, der wiederum durch eine Zufallszahl gebildet wird. Die Änderung der Partikelladung durch Teilentladungen wird nicht berücksichtigt. Somit bleibt die Ladung zwischen zwei mechanischen Stößen konstant. Die elektrostatische Kraft hängt daher nur vom elektrischen Feld ab.

Resümee

Die Simulation mit COMSOL Multiphysics kann nur mit einigen Vereinfachungen durchgeführt werden. Diese resultieren aus den vorhandenen Physikmodulen und sind anschließend noch einmal aufgeführt:

- Kein Unterschied zwischen positiver und negativer Gleichspannung
- Rauheit der Elektrodenoberflächen wird vernachlässigt
- Partikel wird als Massenpunkt angenommen
- Feldstärkenerhöhung an den Partikelenden können nicht berücksichtigt werden
- Teilentladungen können nicht simuliert werden

Die Geometrie des gasisolierten Systems wird als einfache Zylinderanordnung nachgebildet, der Hohlleiter wird wegen seiner Feldfreiheit als Vollleiter angenommen. Es werden nur jene Bereiche simuliert, in denen ein elektrisches Feld vorhanden ist. Die Rauigkeit der Oberfläche realer Anlagen kann nicht berücksichtigt werden. Das Partikel muss wegen der Verwendung des "Charged particle tracing" Moduls (cpt) als Massepunkt mit konzentrierter Ladung nachgebildet werden. Daher entfallen auch die Feldstärkenüberhöhungen an den Partikelenden. Die Bewegungsgleichungen werden in einem Unterpunkt des cpt-Moduls implementiert. Dies geschieht durch allgemeine Variablen, deren Parameter leicht geändert werden können. Der mechanische Stoß mit einer Elektrode ist ebenfalls durch einen Unterpunkt des cpt-Moduls lösbar. In diesem wird auch die Umladung des Partikels gelöst. Limitierend wirkt hier jedoch, dass dabei nur eine Formel für die neue Ladung verwendbar ist. Diese geht von einem auf der Elektrode gerade stehenden Partikel aus. Das ist jedoch in realen Anlagen nicht der Regelfall. COMSOL bietet nicht die Möglichkeit Teilentladungen zu simulieren, daher bleibt die Ladung zwischen den Kontakten mit Elektroden konstant. Somit entfällt auch das zufällige Bewegungsverhalten, das durch Teilentladungen entsteht.

Vergleicht man die drei Methoden zur Simulation von Partikelbewegungen, kann die Simulation von Wohlmuth, die das Ersatzladungsverfahren verwendet und über Unterprogramme erweitert, Partikelbewegungen sicherlich am besten nachbilden. Die Simulation mit COMSOL und jene, die versucht zufällige Ereignisse mit der Monte-Carlo Methode zu realisieren, können zumindest Richtwerte liefern.

9 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung leitfähiger Partikel in gasisolierten Systemen. Zunächst wird beschrieben, wie diese Partikel überhaupt entstehen können bzw. wie sie in das System gelangen. Liegt an der Anlage eine Spannung an, nehmen diese Partikel eine Ladung mit demselben Vorzeichen jener Elektrode auf, mit der sie in Kontakt stehen. Diese Ladung ist abhängig von der Geometrie der Partikel. Eine Übersicht dazu wird in Tabelle 1 gegeben. Durch die aufgenommene Ladung des Partikels wirkt im elektrischen Feld die Coulombsche Kraft auf dieses. Wird die Abhebefeldstärke überschritten, beginnt sich das Partikel im Isoliergas zu bewegen. Dabei können unter Berücksichtigung von Teilentladungen zwei Bewegungsarten, die bouncing motion und die standing motion mit Firefly-Effekt, beschrieben werden. Trifft ein Partikel auf eine Elektrode kommt es zum mechanischen Stoß inklusive Ladungsaustausch mit dieser, wobei das Partikel einen Teil seiner Bewegungsenergie abgibt und seine Bewegung etwas langsamer fortsetzt.

Zum sicheren Betrieb gasisolierter Anlagen ist es wichtig, eventuelle Partikelaktivitäten zu erkennen. Dazu stehen im Rahmen der Teilentladungsmesstechnik drei Varianten zur Verfügung. Die konventionelle Teilentladungsmessung nach IEC 60270 bietet den Vorteil, den Teilentladungen in Form der scheinbaren Ladung ein Vorzeichen und eine Größe zu geben, jedoch gibt es keine Möglichkeit den Entstehungsort zu orten. Eine wichtige Voraussetzung für diese Methode ist ein niedriger Grundstörpegel, der in Anlagen vor-Ort nicht immer gewährleistet werden kann. Daher wird diese Form der Teilentladungsmessung hauptsächlich im Laborbetrieb verwendet. Die akustische Teilentladungsmessung kann lediglich die Aktivität von Partikeln feststellen. Diese Methode erkennt Druckwellen, die beim Kontakt eines Partikels mit der Kapselung entsteht, sowie Druckwellen, die sich durch Teilentladungen im Isoliergas ausbreiten. Das Partikel kann mit mindestens zwei Sensoren geortet werden. Die Ortung erfolgt über das sogenannte Laufzeitverfahren. Durch den Einbau von Feldsonden in die Anlage können TEM-Wellen, die durch Teilentladungen entstehen, mittels der UHF-Teilentladungsmesstechnik detektiert werden. Es kann wiederum nur die Aktivität nachgewiesen werden, jedoch kann mit dieser Methode durch einen Empfindlichkeitsnachweis zumindest eine Teilentladung von 5pC detektiert werden. Die Ortung der Teilentladung benötigt wiederum zumindest zwei Sensoren, die über das Laufzeitverfahren abgeglichen werden. Somit sind diese beiden Methoden auch für die Überwachung ausgedehnter Anlagen in Verwendung.

Als Maßnahmen gegen Partikeleinfluss gibt es der Literatur nach folgende Möglichkeiten: Die Beschichtung der Elektroden mit einem isolierenden Material stellt eine davon dar. Die Beschichtung hindert Partikel daran, im elektrischen Feld eine Ladung aufzunehmen. Da jedoch mit steigender Feldstärke zunehmend Teilentladungen vorkommen, kann das Partikel durch diese eine Ladung aufnehmen. Die Abhebefeldstärke wird durch eine Beschichtung um einen bis zu Faktor fünffachen Wert im Vergleich zu einer nicht beschichteten Elektrode

erhöht. Die Ladungsaufnahme findet hauptsächlich über Teilentladungen statt. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit Partikel über spezielle Einbauten innerhalb der Anlage unschädlich zu machen. Diese sogenannten Partikel- oder Teilchenfallen erzeugen einen feldfreien bzw. feldschwachen Bereich innerhalb der Anlage, aus dem Partikel nicht mehr entkommen können. Für Wechselspannung reicht dafür eine Schiene am Boden der Kapselung, wie sie in Abbildung 27 dargestellt wird. Im Gleichspannungsfall muss sowohl für positive als auch negative Polarität eine Maßnahme vorhanden sein. Weiters gibt es den sogenannten particle-driver, der Partikel in eine vorhandene Partikelfalle lotsen soll.

Da nach der Errichtung oder Wartung einer Anlage sichergestellt werden muss, dass keine Partikel vorhanden sind, wird vor der Inbetriebnahme eine Konditionierung der Anlage vorgenommen. Diese wird vorzugsweise mit einer Wechselspannung durchgeführt, die stufenweise bis zur Nennspannung erhöht wird. Sollte keine Wechselspannungsquelle zur Verfügung stehen, kann ein gewisser Konditionierungseffekt auch mit einer großen Anzahl an Stoßspannungen mit wechselnder Polarität und steigendem Scheitelwert erzielt werden.

In der Literatur finden sich zwei Arten zur Simulation von Partikelbewegungen. Die Charge Simulation Methode bildet die Verteilung des elektrischen Feldes über diskrete Ersatzladungen nach. Durch Ergänzung der Feldberechnung mit den Bewegungsgleichungen kann die Bewegung des Partikels simuliert werden. Das Partikel wird dabei als freies Potential nachgebildet und die Ersatzladungen des Partikels werden nach jedem Zeitschritt, entsprechend den Ergebnissen der Bewegungsgleichungen, verschoben. Eine weitere Methode zur Simulation von Partikelbewegungen ist das Lösen der Bewegungsgleichungen in einem C-Programm. Zusätzlich werden zufällige Bewegungsabläufe, wie der Stoß mit der Elektrode oder Bewegung in axialer Richtung, mittels der Generierung von Zufallszahlen in Form der Monte-Carlo Methode integriert. Diese Methode erlaubt auch, Fluktuationen der Spannungsversorgung zu berücksichtigen.

In dieser Arbeit wird ebenfalls eine Simulation der Partikelbewegung mit COMSOL Multiphysics erstellt. Dafür wird ein Teilstück einer gasisolierten Leitung mit den Abmessungen des Versuchsaufbaus am Institut nachgebildet. Die Partikelbewegung wird durch Kombination der Module Electrostatics und Charged Particle Tracing simuliert. Dazu müssen die benötigten Parameter zur Berechnung des elektrischen Feldes und zum Lösen der Bewegungsgleichungen in Form von Randbedingungen implementiert werden. Die Auswertung der zeitabhängigen Studie liefert die berechneten Positionswerte in Tabellenform. Diese werden ausgewertet und über ein Matlab-Skript graphisch dargestellt. Es werden die Bewegungen zylinderförmiger Aluminium- und Kupferpartikel mit 2 mm, 4 mm und 6 mm Länge simuliert und ausgewertet, sowie mit einem iterativen Zugang die standing motion untersucht.

10 Ausblick

Um weitere und genauere Aussagen zum Thema Partikelfallen treffen zu können, sind noch Recherchen nötig. Hierfür benötigt man jedoch neue, noch nicht veröffentlichte Literatur.

Eine weiterführende Arbeit im Bereich der Simulation wäre die Simulation spezieller Geometrien, wie zB. der particle-driver oder eine Partikelfalle. Es werden jedoch genaue Geometriedaten benötigt um eine Simulation durchführen zu können.

Da es sich bei der erstellten Simulation um eine vereinfachte Grundlagensimulation handelt, ist ein denkbarer, nächster Schritt die Implementierung von Teilentladungen. Dazu muss jedoch ein anderes Simulationsverfahren wie die Charge Simulation Methode verwendet werden. Die in dieser Arbeit erstellte Simulation kann dabei Vergleichswerte zur Überprüfung auf Richtigkeit liefern.

11 Literaturverzeichnis

- [1] V. Crastan, Elektrische Energieversorgung 1 (2.Auflage), Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [2] A. Küchler, Hochspannungstechnik (3. Auflage), Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [3] M. Wohlmuth, „Einfluß beweglicher Partikel auf das Isolationsverhalten gasisolierter Schaltanlagen,“ VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [4] H.-D. Schlemper, *Akustische und elektrische Teilentladungsmessung zur Vor-Ort-Prüfung von SF6-isolierten Schaltanlagen*, Stuttgart: Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, 1997.
- [5] W. Mosch und W. Hauschild, Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid, Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, 1979.
- [6] F. Rizk, C. Masetti und R. Comsa, „Partikel-initiated breakdown in SF6 insulated systems under high direct voltage,“ *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 3, pp. 825-836, Mai/Juni 1979.
- [7] H. Parekh, K. D. Srivastava und R. G. v. Heeswijk, „Lifting Field of Free Conducting Particles in Compressed SF6 with Dielectric Coated Electrodes,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 3, pp. 748 - 758, 1979.
- [8] J. R. Laghari und A. H. Qureshi, „A review of particle-contaminated gas breakdown,“ *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-16 No. 5, pp. 388-398, October 1981.
- [9] CIGRE WG D1.03 (TF11) , „Gas Insulated Systems for HVDC: DC Stress at DC and AC Systems,“ August 2012.
- [10] K. Preis, Skriptum zur Vorlesung "Elektrodynamik 1", Graz: Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik.
- [11] C. M. Cooke, R. E. Wootton und A. H. Cookson, „Influence of particles on AC and DC electrical performance of gas insulated systems at extra-high-voltage,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, no. 3, pp. 768- 777, 1977.
- [12] K. Asano, K. Anno und Y. Higashiyama, „The Behavior of Charged Conducting Particles in Electric Fields,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol 33, No 3, pp. 679-686, May/June 1997.

- [13] K. Asano, R. Hishinuma und K. Yatsuzuka, „Bipolar Coronadischarge from a Floating Filamentary Particle between Parallel Plate Electrodes,“ in *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, Rome, 2000.
- [14] A. Diessner und J. Trump, „Free Conducting Particles in a Coaxial Compressed-Gas-Insulated System,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 8, pp. 1970-1978, November/Dezember 1970.
- [15] R. Schwarz, Skriptum zur Vorlesung "Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik", Graz: Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2012.
- [16] G. Wanninger, „Ultrahochfrequente Teilentladungssignale in gasisolierten Schaltanlagen (GIS),“ VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [17] L. Lundgaard, M. Runde und B. Skyberg, „Acoustic diagnosis of gas insulated substations: a theoretical and experimental basis,“ *IEEE Tansaction on Power Delivery*, pp. 1751-1759, 4 5 1990.
- [18] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, *Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen - Teil 203: Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 52 kV (IEC 62271-203:2011);Deutsche Fassung EN 62271-203:2012*, Berlin: VDE VERLAG GMBH, November 2012.
- [19] Power Diagnostix Systems GmbH, „www.pd-systems.com,“ [Online]. Available: http://www.pd-systems.com/pdf/brochure_815_small.pdf. [Zugriff am 7 März 2013].
- [20] S. Poehler und P. Rudenko, „Directly Buried Gas-Insulated Transmission Lines (GIL),“ in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*, Orlando, FL, 2012.
- [21] N. Takinami, S. Kobayashi und A. Miyazaki, „Application of the World's Longest Gas Insulated Transmission Line in Japan,“ in *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, 1-5 June 2003.
- [22] U. Schichler, A. Diessner und J. Gorablenkow, „Dielectric On-site Testing of GIL,“ in *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, 1-5 June 2003.

- [23] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, *Hochspannungs-Schaltgeräte und Schaltanlagen - Teil 204: Starre gasisolierte Übertragungsleitungen für Bemessungsspannungen über 52kV (IEC 62271-204:2011); Deutsche Fassung EN 62271-204:2011*, Berlin: VDE VERLAG GMBH, Mai 2012.
- [24] T. Hasegawa, K. Yamaji, M. Hatano, F. Endo, T. Rokunohe und T. Yamagiwa, „Development of insulation structure and enhancement of insulation reliability of 500 kV DC GIS,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, January 1997.
- [25] S. Menju und K. Takahashi, „DC dielectric strength of a SF6 gas insulated system,“ *IEEE transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 1, pp. 217-224, January/February 1978.
- [26] K. D. Srivastava und R. G. v. Heeswijk, „Dielectric Coatings - Effect on Breakdown and Particle Movement in GITL Systems,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 1, pp. 22-31, 1985.
- [27] S. P. Hornfeldt, „Lifting Force on Metallic Particles in GIS Systems,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 13, Issue:4, pp. 838-841, August 2006.
- [28] Siemens AG, „Strom von der höchsten Staumauer der Welt - Siemens Global Website,“ [Online]. Available: <http://www.siemens.com/innovation/de/news/2009/strom-von-der-hoehchten-staumauer-der-welt.htm>. [Zugriff am 11 März 2013].
- [29] S. J. Dale und M. D. Hopkins, „Methodes of Particle Control in SF6 Insulated CGIT Systems,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 6, pp. 1654-1663, June 1982.
- [30] N. H. Malik, „A Review of the Charge Simulation Methode and its Applikations,“ *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24 No. 1, Februar 1989.
- [31] J. Amarnath, B. Singh, S. Kamakshaiah und C. Radhakrishna, „Determination of particle trajectory in gas insulated bus duct by Monte-Carlo technique,“ in *1999 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Austin, TX, 1999.
- [32] J. Jiangbo, Y. Lanjun und Z. Qiaogen, „Motion Simulation of Metallic Particle in Non-uniform Electric Field under DC Condition by Monte-Carlo Method,“ in *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, Beijing, China, August 25-29, 2005.